

---

# Methode zur Analyse der Tropfenpositionierung im Inkjet-Druck

---

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
Genehmigte Dissertation von Claus Schneider aus Crailsheim  
Tag der Einreichung: 25.10.2022, Tag der Prüfung: 08.02.2023

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam
  2. Gutachten: Prof. em. Dr. Reinhard R. Baumann
  3. Gutachten: Prof. Dr. Andreas Berchtold
- Darmstadt, Technische Universität Darmstadt



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Fachbereich Maschinenbau  
Institut für Druckmaschinen  
und Druckverfahren

Methode zur Analyse der Tropfenpositionierung im Inkjet-Druck

Genehmigte Dissertation von Claus Schneider

Tag der Einreichung: 25.10.2022

Tag der Prüfung: 08.02.2023

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-234389

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/23438>

Jahr der Veröffentlichung auf TUprints: 2023

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)

Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Meinem Betreuer der TU Chemnitz, Prof. em. Dr. Reinhard R. Baumann, gebührt besonderer Dank für sein Interesse an meiner Forschung und seine Unterstützung über die gesamte Dauer meiner Promotion.

Ebenso besonderen Dank verdient Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam der TU Darmstadt, der es mir ermöglichte, diese Promotion zu einem erfolgreichen Abschluss zu bringen.

Vielen Dank an Philippe Körner und Dr. Rüdiger Lippok, die die Kooperation mit dem Unternehmen Canon Production Printing Germany GmbH & Co. KG (CPP) – ehemals Océ Printing Systems GmbH & Co. KG – ermöglichten und meine Arbeit mit viel Weitsicht betreuten. In diesem Zuge auch vielen Dank an das Unternehmen CPP, das Ressourcen zur Verfügung gestellt hat und die Forschung ermöglichte, die teilweise die Basis für dieses Dokument bildet.

Außerdem möchte ich dem Projekt InProTUC der TU Chemnitz danken, das mir finanzielle und beratende Unterstützung meines internationalen Forschungsaufenthaltes in Venlo, Niederlande, in Form eines Stipendiums gewährte. Ohne diese Unterstützung wäre ein wichtiger Teil meiner Thesis nicht möglich gewesen.

An meine lieben Kollegen, die mit mir zusammengearbeitet haben und jederzeit für eine konstruktive Diskussion oder eine erfrischende Pause verfügbar waren, vielen Dank euch allen!

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei Franziska, die mein Leben während dieser Zeit im Lot gehalten hat.



---

## Erklärungen laut Promotionsordnung

### § 8 Abs. 1 lit. c PromO

Ich versichere hiermit, dass die elektronische Version meiner Dissertation mit der schriftlichen Version übereinstimmt.

### § 8 Abs. 1 lit. d PromO

Ich versichere hiermit, dass zu einem vorherigen Zeitpunkt noch keine Promotion versucht wurde. In diesem Fall sind nähere Angaben über Zeitpunkt, Hochschule, Dissertationsthema und Ergebnis dieses Versuchs mitzuteilen.

### § 9 Abs. 1 PromO

Ich versichere hiermit, dass die vorliegende Dissertation selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen verfasst wurde.

### § 9 Abs. 2 PromO

Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, 25.10.2022



---

C. Schneider



---

## Kurzfassung / Abstract

---

Inkjet-Druckmaschinen befinden sich auf dem Weg zu mehr Produktivität und Zuverlässigkeit. Da der Produktionsdruck zunehmend personalisiert wird und die Chargen kleiner werden, steigt die Nachfrage nach dem Digitaldruck mit seiner erhöhten Flexibilität. Zwei verbleibende Nachteile sind die geringere Produktionsgeschwindigkeit und Druckqualität. Die Inkjet-Technologie bringt derzeit noch viele Schwächen und Herausforderungen mit sich, wie z. B. die im Vergleich zum konventionellen Druck erhöhte Neigung zu sichtbaren Fehlern im Druckergebnis.

In dieser Arbeit wird eine Methodik vorgestellt, die mit einem kamerabasierten Inspektionssystem und einem Simulationsmodell der Bilderfassung die Analyse der Tropfenpositionierung in Produktionsdruckmaschinen ermöglicht. Die Untersuchungen zeigen, wie im laufenden Druckbetrieb bei minimaler Makulatur eine vollständige Überprüfung aller Druckdüsen erfolgt. Die Herangehensweise lässt sich auf die Überprüfung von bedarfsgesteuert aufgetragener, transparenter Grundierung übertragen. Darüber hinaus wird eine Methode für Kompensationen und Korrekturen unter Berücksichtigung der Messdaten, die in der Produktionsdruckmaschine erfasst werden, abgeleitet. Durch die Kombination von Bildauswertung, zielgerichteten Testmustern und einem Regressionsmodell können gegenüber dem Stand der Technik und der Wissenschaft schnellere und erfolgversprechendere Maßnahmen erfolgen, die zu weniger Druckprodukten mit minderer Druckqualität führen. Experimente zur vorgestellten Methodik zeigen die Grenzen der Kompensationsgeschwindigkeit sowie die Fähigkeit und Qualität des Ansatzes, mit Druckfehlern umzugehen. Als Resultat der Korrekturmaßnahmen wird die Druckqualität auf einem konstant hohen Niveau gehalten und die Verfügbarkeit der Druckmaschine steigt.

Inkjet printing machines are on the way to greater productivity and reliability. As production printing becomes increasingly personalized and batches become smaller, the demand for digital printing with its increased flexibility is growing. Two remaining disadvantages are lower production speed and print quality. Inkjet technology currently still presents many weaknesses and challenges, such as the increased tendency for visible defects in the printed result compared to traditional printing.

In this thesis, a methodology is presented that uses a camera-based inspection system and a simulation model of image acquisition to analyze droplet placement in production printing machines. The research shows how a complete inspection of all print nozzles is performed during ongoing printing operations with minimal waste. The approach can be transferred to the inspection of on-demand applied transparent primer. In addition, a method for compensations and corrections is derived, taking into account the measurement data recorded in the production printing machine. By combining image analysis, targeted test patterns and a regression model, faster and more promising measures can be taken compared to the state of the art and science, resulting in fewer printed products with inferior print quality. Experiments on the presented methodology show the limits of the compensation speed and the ability and quality of the approach to deal with printing errors. As a result of the corrective measures, print quality remains at a consistently high level and printing machine availability increases.





---

# Zentrale Ergebnisse dieser Dissertationsschrift

---

Dieser Abschnitt listet die zentralen Ergebnisse auf und gibt einen Überblick über die vier Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit, mit denen die Tropfenpositionierung im Inkjet-Druck analysiert wurde.

- a) Untersuchung von optischen Bilderfassungssystemen in Produktionsdruckmaschinen
  - Zusammenfassung der wichtigsten industriellen Inspektionssysteme zur optischen Druckbilderfassung und Auflistung derer Funktionen im Kontext dieser Dissertation
  - Entwickeln eines modularen Simulationsmodells des optischen Bilderfassungsprozesses
  - Entwickeln und Programmieren eines Tools zur Ermittlung der Punktspreizfunktion von optischen Abbildungssystemen
  - Nachweis der Vergleichbarkeit zwischen simuliertem Bild und aufgezeichnetem Bild vom Druckprodukt
  - Nachweis der Anwendbarkeit und Übertragbarkeit des Modells auf industrielle Hardware und Nachweis der Eignung von Komponenten (z. B. Bildsensor, Objektiv, Beleuchtung) hinsichtlich der automatisierten, optischen Druckbilderfassung
- b) Entwicklung und Optimierung der Messung der Tropfenpositionierung mit minimalem Bedarf an Druck- und Bedruckstoff während des Druckens
  - Nachweis und Analyse einer Wechselwirkung bei der Übertragung existierender Untersuchungsmethoden auf 1200 dots per inch (dpi) Druckköpfe von *Kyocera*, welche zu Druckfehlern führt
  - Grundlegender Nachweis der Eignung von Linienformen für digitale Erkennbarkeit
  - Experimenteller Nachweis der Qualifikation von ein- und mehrfarbigen Linienmustern für Düsenausfalldetektion und hinreichend genaue Bestimmung des Positionsversatzes
  - Erreichen von mehr Messungen pro Zeit und schneller Regelschleife
  - Reduzierung des Bedarfs an Bedruckstoff für Testdruckmuster um 33% gegenüber dem Stand der Technik
  - Ergebnisse erlauben den Verzicht auf Aussortierung von Testseiten in der Nachverarbeitung des Druckprozesses
- c) Digitalisierung der Detektion von Düsenausfällen für farblose, transparente Grundierung
  - Optimierung des Testmusters zum Hervorheben visueller Effekte, die durch Auftragen von Grundierung hervorgerufen werden
  - Implementierung einer digitalen Auswertung des Testmusters zur Erfassung von Ausfällen
  - Erarbeitung einer Kompensationsmethode zum Einsatz im laufenden Druckbetrieb
- d) Untersuchung des zeitlichen Verhaltens der Düsenperformance bezüglich deren Positionsversatzes
  - Stabilisierung des Druckprozesses im Umgang mit fehlerhaft positionierten Tropfen
  - Nachweis von vorhersehbar Verhalten im Verlauf des Positionsversatzes an auffälligen Düsen
  - Entwicklung eines Regressionsmodells aus etwa 120 Millionen Messwerten
  - Entwicklung einer effizienten Trendanalyse von Druckfehlern für kurze Zeitintervalle mit hoher Genauigkeit
  - Präventive Vermeidung von Ausfällen durch Vorhersage und Optimierung der Regelschleife



---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1. Einführung in die Thematik</b>	<b>1</b>
1.1. Herausforderung und Motivation . . . . .	1
1.2. Ziele dieser Arbeit . . . . .	3
1.3. Kapitelübersicht . . . . .	4
<b>2. Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1. Drucktechnologie . . . . .	7
2.1.1. Prinzip der Bildaufbereitung . . . . .	7
2.1.2. Inkjet-Druckverfahren . . . . .	9
2.1.3. Tropfenausstoß . . . . .	12
2.1.4. Tinten und Wechselwirkungen mit Substrat . . . . .	13
2.1.5. Inkjet-Druckmaschine . . . . .	17
2.2. Kamertechnologie und deren Einsatz in Inspektionssystemen . . . . .	23
2.2.1. Grundlagen zu industriellen Kameras . . . . .	23
2.2.2. Kommerziell verfügbare Inspektionssysteme . . . . .	27
2.2.3. Nutzung von Inspektionssystemen in Druckmaschinen . . . . .	30
2.2.4. Auswertungen von speziellen Testdruckbildern . . . . .	32
2.3. Limitierungen gegenwärtiger Systeme . . . . .	38
<b>3. Material, Testumgebung und Methoden</b>	<b>43</b>
3.1. Druckmaschine und Kamerasystem . . . . .	43
3.1.1. Druckmaschine . . . . .	43
3.1.2. Verwendete Druckköpfe . . . . .	43
3.1.3. Verwendetes Substrat . . . . .	45
3.1.4. Kamerasystem . . . . .	45
3.2. Experimenteller Aufbau der optischen Bilderfassung . . . . .	46
3.2.1. Simulationscomputer . . . . .	47
3.2.2. Messkamera . . . . .	47
3.2.3. Kalibrierseite . . . . .	48
3.2.4. Prototyp-Kamerasystem . . . . .	48
3.2.5. Laboraufbau . . . . .	48
3.2.6. Beschreibung der Experimente . . . . .	51
3.3. Experimenteller Aufbau zur Messung der Tropfenpositionierung . . . . .	54
3.3.1. Beschreibung der Versuchsparameter . . . . .	54
3.3.2. Testdruckmuster . . . . .	55
3.3.3. Methodik und Bildauswertung . . . . .	57
3.4. Experimenteller Aufbau zur Erkennung von Düsenausfällen für Grundierung . . . . .	59
3.5. Experimenteller Aufbau zur Trendanalyse des Positionsversatzes . . . . .	61

<b>4. Simulationsmodell der optischen Bilderfassung</b>	<b>65</b>
4.1. Beschreibung des entwickelten Simulationsmodells . . . . .	65
4.1.1. Objekt . . . . .	66
4.1.2. Beleuchtung . . . . .	67
4.1.3. Optisches Abbildungssystem . . . . .	67
4.1.4. Diskretisierung im Bildsensor . . . . .	69
4.2. Weitere entwickelte Softwareanwendungen . . . . .	69
4.2.1. Messung der Punktspreizfunktion . . . . .	70
4.2.2. Nachbildung von Funktionskurven . . . . .	73
4.3. Verifikation des Simulationsmodells . . . . .	74
4.3.1. Anpassung des Simulationsmodells an das Kamerasystem . . . . .	74
4.3.2. Vergleich von Simulationsbild und Kamerabild . . . . .	76
4.3.3. Übertragbarkeit des Simulationsmodells . . . . .	79
4.3.4. Ergebnisse . . . . .	81
<b>5. Messung der Tropfenpositionierung während des Druckens</b>	<b>85</b>
5.1. Entwicklung eines Referenzmusters für 1200 dpi . . . . .	85
5.2. Vermeidung von Wechselwirkung zwischen Düsenreihen . . . . .	86
5.3. Linienmuster für Beschnitt . . . . .	88
5.4. Experiment zur Messung der Tropfenpositionierung im Beschnitt . . . . .	89
5.4.1. Vorversuch zu Linienformen . . . . .	90
5.4.2. Untersuchung von einfarbigen Mustern . . . . .	92
5.4.3. Untersuchung von mehrfarbigen Mustern . . . . .	93
5.4.4. Ergebnisse . . . . .	96
5.5. Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	98
<b>6. Erkennung von Düsenausfällen für Grundierung</b>	<b>101</b>
6.1. Visualisierung von Düsenausfällen bei Grundierung . . . . .	101
6.2. Digitale Erfassung des Testdruckmusters . . . . .	102
6.3. Bildauswertung des erfassten Testdruckmusters . . . . .	102
6.4. Kompensation ausgefallener Düsen . . . . .	104
<b>7. Trendanalyse des Positionsversatzes</b>	<b>107</b>
7.1. Dauer zwischen Auftreten und Kompensation von Positionsfehlern . . . . .	107
7.2. Trendanalyse des Positionsversatzes von Linien . . . . .	108
7.3. Stabilisierung des Kompensationsverhaltens . . . . .	110
7.4. Vorhersagegenauigkeit der Trendanalyse . . . . .	112
7.5. Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	117
<b>8. Zusammenfassung &amp; Schlussfolgerung</b>	<b>119</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>123</b>
<b>A. Anhänge</b>	<b>133</b>
A.1. Spezifikationen der benutzten Kamerasysteme . . . . .	133
A.2. Messungen der Tropfenpositionierung . . . . .	133
A.3. Aufbau des resultierenden Druckmusters . . . . .	138

---

# Abkürzungen

---

<b>AM</b>	Amplitudenmodulation
<b>CCD</b>	Charge-Coupled Device – Ladungsgekoppeltes Bauteil
<b>CIE</b>	Commission Internationale de l'Éclairage – Internationale Beleuchtungskommission
<b>CMOS</b>	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor – Metall-Oxid-Halbleiter mit p- und n-Kanal-Transistor
<b>CMYK</b>	Cyan, Magenta, Yellow, Key – Cyan, Magenta, Gelb, Schwarz
<b>CPP</b>	Canon Production Printing Germany GmbH & Co. KG
<b>CTE</b>	Charge Transfer Efficiency – Übertragungseffizienz
<b>dB</b>	Dezibel
<b>DOD</b>	Drop-on-Demand – Tropfen nach Bedarf
<b>dpi</b>	dots per inch – Rasterzellen pro Zoll
<b>ESF</b>	Edge Spread Function – Kantenspreizfunktion
<b>FM</b>	Frequenzmodulation
<b>FPGA</b>	Field Programmable Gate Array – Integrierter Schaltkreis der Digitaltechnik
<b>LED</b>	Licht emittierende Diode
<b>lpi</b>	lines per inch – Linien pro Zoll
<b>LSF</b>	Line Spread Function – Linienspreizfunktion
<b>MICR</b>	Magnetic Ink Character Recognition – Zeichenerkennung durch magnetische Tinte
<b>MTF</b>	Modulation Transfer Function – Modulationsübertragungsfunktion
<b>NFD</b>	Nozzle Failure Detection – Düsenausfallerkennung
<b>PDF</b>	Portable Document Format
<b>pl</b>	Picoliter – $10^{-12}$ Liter
<b>ppi</b>	Pixel per inch – Pixel pro Zoll
<b>PSF</b>	Punktspreizfunktion
<b>px</b>	Pixel – ein physikalischer Punkt in einem Sensor oder gerasterten Bild
<b>QR</b>	Quick Response – Schnelle Reaktion
<b>RGB</b>	Rot, Grün, Blau
<b>RIP</b>	Raster Image Processor – Rastergrafikprozessor
<b>SNR</b>	Signal Noise Ratio – Signal-Rauschabstand
<b>UV</b>	Ultraviolett



---

# 1. Einführung in die Thematik

---

Der digitale Produktionsdruck wird heute zunehmend von Produktionsdruckmaschinen basierend auf der Inkjet-Technologie geprägt. Die Anforderungen an solche Systeme hinsichtlich Druckqualität, Produktionsgeschwindigkeit, Verfügbarkeit, Bedruckstoffvielfalt und Farbumfang steigen stetig. Gleichzeitig wird zunehmende Bewertungstransparenz erwartet und die Toleranz für Qualitätsminderung des Druckprodukts sinkt. Das Ziel dieses Promotionsvorhabens ist eine Methode zur Analyse der Tropfenpositionierung in Inkjet-Druckmaschinen. Aufgrund von Alterung und Abnutzung versagen über die Lebensdauer eines Druckkopfes mehr und mehr Druckdüsen bei ihrer Aufgabe, Druckstoff korrekt auf dem Bedruckstoff zu positionieren. Dieses Fehlverhalten einzelner Druckdüsen mindert die Qualität des Druckprodukts. In dieser Arbeit wird, unter Zuhilfenahme eines integrierten Inspektionssystems, das Fehlverhalten von Druckdüsen im laufenden Druckprozess überwacht und dem Fehlverhalten durch entwickelte Methoden entgegengewirkt. Somit verbleibt keine sichtbare Qualitätsminderung im Druckprodukt, die Nutzbarkeit der Druckköpfe verlängert sich und führt zu einer erhöhten Verfügbarkeit der Produktionsdruckmaschine.

## 1.1. Herausforderung und Motivation

Inkjet-Druckmaschinen sind auf dem Weg, die Produktionsgeschwindigkeit und Qualität des Offsetdrucks zu erreichen. Dennoch gibt es viele Mängel in deren Zuverlässigkeit, die auf fehlerhafte Düsen und Positionierungsfehler im Druckbild zurückzuführen sind. Dadurch kann die Differenz zu der Qualität des Offsetdrucks bislang nicht überwunden werden. Auf solchen Produktionsdruckmaschinen werden Substrate mit Abmessungen, die deutlich größer sind als die typischen DIN A4-Blätter, mit hoher Qualität eingefärbt, um den Erwartungen des Zielmarktes der grafischen Industrie gerecht zu werden. Deshalb arbeiten Zehntausende von Druckdüsen gleichzeitig, um die Anforderungen an Detailgrad, Geschwindigkeit und variablen Inhalt zu erfüllen. Die Realität zeigt, dass die Komplexität dieses Verfahrens nicht hundertprozentig kontrolliert werden kann und die Zuverlässigkeit der Komponenten solcher Systeme noch nicht ausreicht. Jeden Moment ist ein innerer oder äußerer Effekt zu erwarten, der zu Fehlverhalten der Druckdüsen oder des bewegten Substrates führen kann, welches die Druckqualität sofort beeinflusst. Unter Qualität wird im Kontext der Drucktechnik eine möglichst originalgetreue Nachbildung einer (digitalen) Vorlage in Form und Farbe verstanden. Da der Bedruckstoff die Druckmaschine lediglich einmal durchläuft, bleibt eine solche Qualitätsminderung auf dem Erzeugnis sichtbar und lässt sich nicht korrigieren. In Abbildung 1.1 ist die grundlegende Architektur einer solchen Inkjet-Druckmaschine veranschaulicht: Der Bedruckstoff wird als kontinuierliche Bahn zur Druckeinheit befördert, wo der eigentliche Druckprozess stattfindet. Der aufgetragene Druckstoff wird anschließend fixiert und zum Ausgang der Druckmaschine transportiert. In dieser Darstellung ist bereits am linken unteren Ende der Druckmaschine ein Inspektionssystem ergänzt. Alle weiteren Grundlagen und Details zu Druckmaschinen und Inspektionssystemen werden im Kapitel 2 beschrieben.

Es gibt in der Industrie bereits Methoden und Inspektionssysteme, die solches Fehlverhalten von Druckdüsen durch optische Bilderfassung feststellen und auf verschiedene Arten damit umgehen, aber diese sind meist mit einer langsamen Verarbeitungsgeschwindigkeit, viel Makulatur, sprich Papierabfall, oder gegebenenfalls viel zu später Fehlerbehandlung verbunden. Um die Grundlage für die Eignung und Nutzung eines

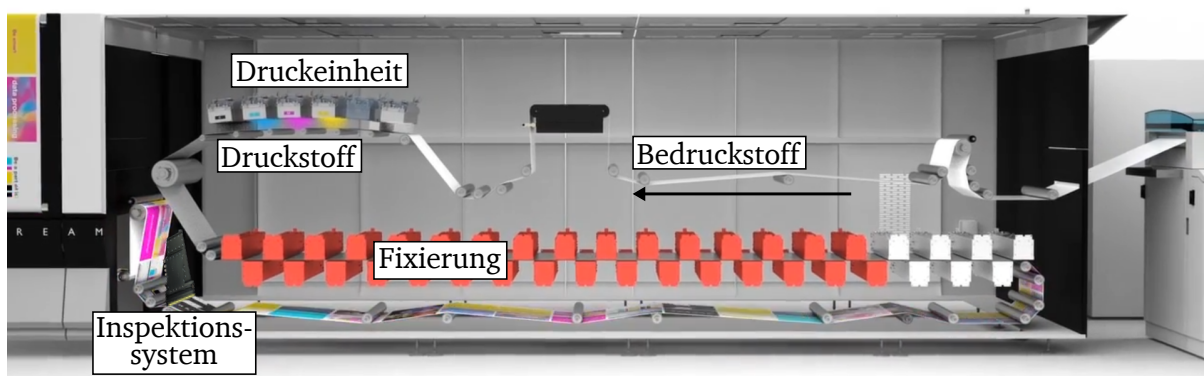


Abbildung 1.1.: Architektur einer Inkjet-Produktionsdruckmaschine. Der Bedruckstoff (hier: Papier) durchläuft als kontinuierliche Bahn die Druckmaschine und wird in der Druckeinheit mit dem Druckstoff (hier: Tinte) eingefärbt. Anschließend wird der Druckstoff in der Nachverarbeitung auf dem Bedruckstoff fixiert und das Druckprodukt durch ein Inspektionssystem auf Fehler und Mängel geprüft. Quelle: CPP.

Inspektionssystem zu schaffen, wird in dieser Arbeit ein Simulationsmodell der optischen Bilderfassung entwickelt und verifiziert, das sich auf Druckbilddaten anwenden lässt. Basierend auf einem nachweislich geeigneten Inspektionssystem gilt es, Ansätze und Lösungen zu finden und zu entwickeln, um die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Druckmaschine zu erhöhen oder zumindest sichtbare Beeinträchtigungen so lange wie möglich zu vermeiden. Besonders für grafische Anwendungen des Produktionsdrucks, bei denen die Industrie regelmäßig neue Qualitätsmaßstäbe setzt, ist eine Aufrechterhaltung der Druckqualität essenziell. In Szenarien, die sich durch die Druckmaschine nicht autonom handhaben lassen, ist es erforderlich, dass der Bediener jederzeit über den Zustand seiner Maschine informiert ist. Die Forschungsfragen, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden, lauten:

- Welche Einflüsse im Druckprozess erzeugen eine Reduzierung der Druckqualität, wie lässt sich diese Qualitätsminderung feststellen und welche Gegenmaßnahmen sind möglich?
- Wie können die Einschränkungen existierender Druck- und Bilderfassungssysteme überwunden werden?
- Wie kann die Druckqualität detailliert und mit einem Minimum an Makulatur überwacht werden?
- Wie schnell lassen sich auftretende Druckfehler im laufenden Druckvorgang beheben?

Zur Beantwortung dieser Fragen werden die Prozesse erforscht, die in einer Inkjet-Produktionsdruckmaschine in Hinblick auf den Regelkreis zum Qualitätserhalt ablaufen. Dies umfasst den Druckvorgang, die optische Bilderfassung, die digitale Bildverarbeitung und die abschließende Anwendung der Kompensationsmethode. Jeder dieser vier Prozesse benötigt eine gewisse Zeit, die im Fehlerfall mit einer resultierenden Menge an Makulatur korreliert. Die aufgewendeten Verbrauchsstoffe an Druck- und Bedruckstoff für diese Druckprodukte gelten als Abfall und müssen unter Berücksichtigung der Qualitätsansprüche gegebenenfalls für einen zusätzlichen Druckvorgang erneut aufgebracht werden. Je träger dieser Regelkreis zwischen Druckvorgang und Kompensation ist, desto größer ist der Anteil auszusortierender Druckerzeugnisse, sprich der Anteil an Makulatur.

In der Literatur finden sich bereits allgemeine Ansätze, um verschiedene Druckfehler zu kompensieren. Diese Ansätze müssen an die Fähigkeiten und Eigenschaften der Druckmaschine angepasst werden.



---

Auch wenn sich viele Aspekte dieser Arbeit auf Bogendruckmaschinen übertragen lassen, liegt hier der Schwerpunkt auf dem Rolle-zu-Rolle-Druck, bei dem Makulatur aufwendig markiert, ausgeschnitten und mit speziellen Geräten in der Nachverarbeitung aussortiert werden muss. Eine Vermeidung oder eine schnelle Kompensation von Fehlern im Druckprozess ist daher unerlässlich, um Makulatur und viele zusätzliche Betriebskosten zu vermeiden.

## 1.2. Ziele dieser Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wurden die Sicherung und Steigerung der Druckqualität und die Erhöhung der Verfügbarkeit der Produktionsdruckmaschine als Hauptziele gesetzt. Die folgenden Bestandteile der Methode zur Analyse der Tropfenpositionierung sind im Rahmen dieser Arbeit zu entwickeln, um die Hauptziele zu erreichen.

- **Simulationsmodell der optischen Bilderfassung:** Es wird im Rahmen dieser Arbeit ein Simulationsmodell der optischen Bilderfassung entwickelt, das die theoretische Grundlage für die Auswahl von Kameratechnik liefert. Die Simulationsergebnisse sind Bilder des Druckprodukts, die zur Verifikation des Simulationsmodells mit aufgezeichneten Kamerabildern von Ausdrucken verglichen werden. Dies erlaubt der Industrie, die Eignung von Kameratechnik in kürzester Zeit computergestützt nachzuweisen. In dieser Arbeit wird die vorliegende Produktionsdruckmaschine mit verifizierter Kameratechnik (Kamera, Objektiv, Beleuchtung) der *Chromasens GmbH*, einem erfahrenen Spezialisten in Machine Vision und Bilderfassung, ausgestattet. Die Kamera unterstützt einen schnellen Datentransfer mit einer Datenrate von bis zu  $20 \frac{\text{Gb}}{\text{s}}$  zur Übertragung der Bilddaten, womit die Anforderung, detaillierte Messungen in der Größenordnung von 5 bis 100  $\mu\text{m}$  durchzuführen, erfüllt ist. Das Kamerasystem wird in die Druckmaschine eingebaut und beide interagieren über mehrere Schnittstellen miteinander. Die Bildaufzeichnung wird durch die Druckmaschine synchronisiert. Digitale Schnittstellen erlauben den bidirektionalen Datenaustausch. Eine schnelle Bildverarbeitung wird durch eine leistungsfähige Recheneinheit mit Mehrkernprozessoren erreicht. Die Parameter der Druckmaschine werden von der Recheneinheit bei der Auswertung gelesen und berücksichtigt. Auf detektiertes Fehlverhalten wird dank direkter Interaktion durch geeignete Maßnahmen frühzeitig reagiert. Die Integration des Kamerasystems in die Druckmaschine erlaubt, auf Redundanz von Sensoren zu verzichten, da erfasste Signale allen beteiligten Komponenten bereitgestellt werden.
- **Messung der Tropfenpositionierung während des Druckens:** Kamerasysteme kommen für viele Anwendungen zum Einsatz, die während der Einrichtung der Druckmaschine ablaufen. Die Messung von korrekter Tropfenpositionierung durch die Druckdüsen findet jedoch während des produktiven Betriebes statt. Hierzu werden im Rahmen dieser Arbeit Testdruckmuster entwickelt, die den laufenden Druckbetrieb nicht unterbrechen, da sie im Beschnitt gedruckt werden. Auf diese Art wird die benötigte Makulatur zur Messung der Tropfenpositionierung in zweierlei Hinsicht reduziert: Die Testdruckmuster benötigen gegenüber ganzen Testseiten deutlich weniger Fläche auf dem Bedruckstoff und durch eine Messung auf jeder Seite wird eventuelles Fehlverhalten wesentlich schneller erkannt. Da keine ganzen Testseiten zwischen den Kundendaten gedruckt werden, kann auf eine gesonderte Nachverarbeitung zum Entfernen der Testseiten verzichtet werden. Darüber hinaus werden die relevanten Geräteparameter, wie Druckkopflayout, Druckauflösung und Eigenschaften der Tinten in die Erzeugung und Auswertung der Testdruckmuster einbezogen. Die Methode ist auf Inkjet und die Verwendung fest verbauter Druckköpfe optimiert. Die Testdruckmuster orientieren sich an der Architektur der Druckköpfe sowie deren Anordnung und Abstand zum Kamerasystem. Durch diese bedarfsgerechte Anpassung können Ergebnisse der Auswertung in der Druckmaschine direkt mit

---

zielgerichteten Maßnahmen verknüpft werden. Der entwickelte Algorithmus ist in der Lage, einzelne Düsenausfälle der entsprechenden Druckdüse zuzuordnen. Bei der Verarbeitung der Druckdaten werden die Tropfenverteilung und -größen lokal nachgeregelt, um erfasste Probleme auszugleichen. Dies erhält die Druckqualität und vermeidet große Mengen an Makulatur. Zusätzlich erhöht es die Verfügbarkeit und senkt Wartungskosten des Drucksystems, da Druckköpfe seltener ausgewechselt werden müssen.

- **Erkennung von Düsenausfällen für Grundierung:** Grundierung ist eine farblose Flüssigkeit, um die Wechselwirkung zwischen Druckstoff und Bedruckstoff zu steuern. Es sollen neue Verfahren und Messmethoden entwickelt und integriert werden. Es wird eine Methode entwickelt, die die Erkennung von Düsenausfällen der farblosen Grundierung ermöglicht und die Funktionalität der Düsen im automatisierten Prozess sicherstellt. Diese Ergebnisse werden direkt während des Druckbetriebs geliefert und lassen sich bereits in der Entwicklung der Druckmaschine sowie im produktiven Einsatz für weitere Optimierungen verwenden. Durch die in dieser Arbeit zu entwickelnde Implementierung lässt sich der Auftrag der Grundierung im laufenden Druckvorgang nachregeln und somit eine stetige Minderung der Druckqualität vermeiden.
- **Trendanalyse des Positionsversatzes:** Mit einem zu entwickelnden Regressionsmodell soll auf Basis millionenfacher Messdaten das Verhalten der Tropfenpositionierung im Druckprozess modelliert werden, um eine Vorhersage des Druckverhaltens zu ermöglichen. Für jede einzelne Düse der Druckmaschine wird der Positionsversatz der ausgestoßenen Tropfen beobachtet. Aus der Entwicklung von Messwerten wird zukünftiges Verhalten abgeleitet und der Zeitpunkt bestimmt, zu dem die vorgegebenen Schwellwerte überschritten werden. Durch diese Vorhersage der Schwellwertüberschreitung lässt sich die Totzeit zur Kompensation maßgeblich reduzieren und es lassen sich Makulatur und die Notwendigkeit, fehlerhafte Seiten erneut zu drucken, vermeiden.

Die vorgestellte Methode besteht aus mehreren Bestandteilen, die den Stand der Technik und der Wissenschaft ergänzen oder verbessern und sich zu einem ganzheitlichen Konzept zur Aufrechterhaltung der Druckqualität zusammenfügen, indem die Tropfenpositionierung analysiert und nachjustiert wird. Zur Verwirklichung der aufgeführten Bestandteile der Methode werden Hard- und Softwarekomponenten in die Druckmaschine integriert. Die Integration eines Inspektionssystems in die Druckmaschine ermöglicht im Gegensatz zu einem unabhängig agierenden Inspektionssystem einen vollwertigen Datenaustausch und erlaubt den Verzicht auf redundante Sensorik. Die hier erzielten Analysen und Neuerungen sind bisher überhaupt nicht oder nicht in solcher Form verfügbar und stellen die Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit dar, um die zuvor genannten Ziele zu erreichen. Die oberhalb beschriebenen Bestandteile der Methode dienen einer gesamtheitlichen Analyse der Tropfenpositionierung und somit einem besseren Umgang mit Fehlverhalten von Druckdüsen. Für jeden der vier Bestandteile werden in den Kapiteln 4 bis 7 die Herangehensweise, die experimentelle Verifikation und die Ergebnisse beschrieben.

Zur erfolgreichen Anwendung der Methoden ist es erforderlich, dass ein Eingriff in den Druckprozess in Form geeigneter Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Druckqualität möglich ist. Eigenschaften wie Glanz, Lichtechtheit, Deinkbarkeit, Robustheit und Voraussetzungen für eine korrekte Nachverarbeitung, wie Binden und Laminieren, werden in diesem Kontext nicht betrachtet.

### 1.3. Kapitelübersicht

In dieser Arbeit wird eine Kamera und Software zur Bildauswertung verwendet, um im laufenden Druckprozess in geeigneten Testdruckmustern Druckfehler wie Düsenausfälle zu erkennen und noch während des

---

Druckprozesses mit entsprechenden Korrekturmaßnahmen zu reagieren. Die Inhalte der Arbeit sind in die folgenden Kapitel strukturiert:

**In Kapitel 2** sind die erforderlichen Grundlagen zum Verständnis des behandelten Themas zusammengestellt. Dabei wird die Technologie des Inkjet-Drucks und der Aufbau einer Druckmaschine beschrieben. Anschließend wird ein Einblick in die Kamertechnik und die optische Bilderfassung sowie eine Zusammenfassung über verfügbare Inspektionssysteme und deren Funktionalität gegeben. Das Kapitel schließt mit einer Reflexion gegenwärtiger Systeme und der Erklärung, warum die eingangs erwähnten Herausforderungen bisher nicht überwunden wurden.

**In Kapitel 3** werden die verwendeten Materialien und Methoden aufgeführt, die im Zuge dieser Arbeit Anwendung finden. Zum Einsatz kommen unter anderem ein eigener Testaufbau und eine zum Zwecke dieser Arbeit modifizierte Druckmaschine sowie diverse Bilderfassungssysteme.

**In Kapitel 4** wird das entwickelte Simulationsmodell der optischen Bilderfassung als erster der vier Bestandteile der erarbeiteten Methode der Dissertationsschrift aufgeführt. Das Simulationsmodell wurde modular aufgebaut und dient zum Nachweis der Funktionsfähigkeit von Kamerasystemen (Bildsensor, Objektiv, Beleuchtung). In diesem Kapitel werden die einzelnen Teilfunktionen beschrieben und die Auslegung des Modells erläutert. Im dritten Abschnitt werden die Ergebnisse des Simulationsmodells mit den Ergebnissen des tatsächlichen Kamerasystems verifiziert, und die Übertragbarkeit auf ein anderes zweites Kamerasystem überprüft.

**In Kapitel 5** wird die Messung der Tropfenpositionierung während des Druckens behandelt. Das Kapitel beschreibt eine Erkennung von Düsenausfällen mittels Testdruckmuster im Beschnitt. Diese sollen auf den Druckseiten eine minimale Fläche einnehmen und in kurzen Intervallen die Kontrolle aller Druckdüsen erlauben. Dazu wird der Vergleich zu existierenden Ansätzen hergestellt und der Unterschied für die vorliegende Inkjet-Druckmaschine hervorgehoben. Anhand der Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit unterschiedlich langer Testdruckmuster wird experimentell die minimal nötige Beschnittzugabe untersucht.

**In Kapitel 6** wird die Digitalisierung einer Messmethode zur Detektion von Düsenausfällen in farbloser Grundierung thematisiert, wenn sie bedarfsgesteuert mit Inkjet-Druckköpfen aufgetragen wird. Es wird eine Methode beschrieben, wie die Grundierung visuell erfasst werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Verfahren entwickelt, durch das sich der Auftrag der Grundierung quantitativ bewerten lässt. Den Abschluss des Kapitels bildet ein Ansatz, wie Düsenausfälle der Grundierung im Druckbild zu kompensieren sind.

**In Kapitel 7** wird die Trendanalyse erklärt. Sie basiert auf einem Regressionsmodell, um die Ausfallwahrscheinlichkeit von Düsen über den Positionsversatz derer Linien in den Testdruckmustern zu bestimmen. Im dazugehörigen Experiment wird nachgewiesen, wie die Vorhersagegenauigkeit für Düsenausfälle mit einem Datensatz an tatsächlichen Messwerten übereinstimmt.

**In Kapitel 8** befinden sich die Zusammenfassung und Einordnung der Gesamtergebnisse.



---

## 2. Grundlagen

---

Zum Verständnis der Inhalte dieser Arbeit werden die Grundlagen zu Drucktechnologie und Kameratechnologie bereitgestellt. Das Kapitel schließt mit der Erläuterung von Limitierungen existierender Druck- und Bilderfassungssysteme.

### 2.1. Drucktechnologie

Das Drucken ist ein lange bestehender Herstellungsprozess, welcher der Erzeugung von Replikaten in Text und Bild, kurz gesagt der Vervielfältigung von Information, dient (Kipphan 2001, S. 41). Dieser Prozess der Replikation hat sich fortwährend weiterentwickelt und erlaubt heute, umfangreiche Werke in kurzer Zeit und hoher Qualität zu realisieren. Um Drucktechnologie zu verstehen ist es nötig, einige Grundlagen zu Druckvorgang und Druckmaschine aufzuführen. Der Herstellungsprozess von Druckerzeugnissen gliedert sich in die drei Prozessschritte Bildaufbereitung, Druckprozess und Weiterverarbeitung (Kipphan 2001, S. 42). Diese drei Schritte sind im unteren Bereich der Abbildung 2.1 dargestellt.

#### 2.1.1. Prinzip der Bildaufbereitung

Die Bildaufbereitung in der Drucktechnologie setzt sich aus der Druckvorstufe und der gerätespezifischen Aufbereitung im sogenannten Rastergrafikprozessor (Raster Image Processor (RIP)) zusammen. Als Druckvorstufe wird der Weg vom Layoutentwurf, also von Bild, Text und Grafiken hin zu einer Datendatei (Kipphan 2001, S. 605), wie beispielsweise einem portablen Dokumentenformat (Portable Document Format (PDF)), beschrieben. Dieser Prozess erforderte bei der konventionellen Druckvorstufe das Setzen und Erstellen von Druckformen, also Zwischenträgern, die die zu druckenden Daten enthalten. Dem gegenüber läuft die digitale Druckvorstufe vollständig auf einem Computer ab. Die digitale Druckvorstufe bezeichnet die digitale Gestaltung sowie Bild- und Textverarbeitung der zu druckenden Seite. Die aus der Druckvorstufe resultierende Datendatei wird an den RIP weitergereicht.

Die Inhalte dieser Datendatei können beliebig detailliert, gegebenenfalls vektorisiert sein. Der RIP überträgt die enthaltenen Druckinformationen auf das diskrete, gerätespezifische Gitter an druckbaren Bildpunkten, auch Rasterzellen oder Dots (Kipphan 2001, S. 562). Hierbei wird festgelegt, welche Menge an Druckstoff an welcher Position auf dem Bedruckstoff positioniert wird. Die drei Prozesse, die im RIP ablaufen, sind in Abbildung 2.1 dargestellt: Interpreter, Renderer und Rasterizer. Zunächst wird die Originaldatei durch den *Interpreter* in Objekte aufgeteilt. Dabei erfolgt auch die Aufteilung auf die gerätespezifisch verfügbaren Druckstoffe, auf diese wird in Kapitel 2.1.4 noch genauer eingegangen. Anschließend wird vom *Renderer* ein Halbtonbild erzeugt, also die Objekte „in die gerätespezifische Auflösung des Ausgabe Gerätes umgesetzt – z. B. werden die glatten Konturverläufe einer Schrift durch stufenförmige Verläufe nachgebildet“ (Kipphan 2001, S. 562). Diese Auflösung (z. B. 600 dpi, 1200 dpi) wird auch Druckauflösung genannt und bezeichnet das Verhältnis aus der Anzahl an Rasterzellen zur Fläche auf dem Bedruckstoff. Durch Erhöhung der Druckauflösung wächst der Spielraum, das Druckbild detailgetreu an die Datendatei anzupassen. Übersteigt der Detailgrad das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges bezogen auf einen entsprechenden Betrachtungsabstand, so erscheinen Konturverläufe dem Betrachter als durchgängig und

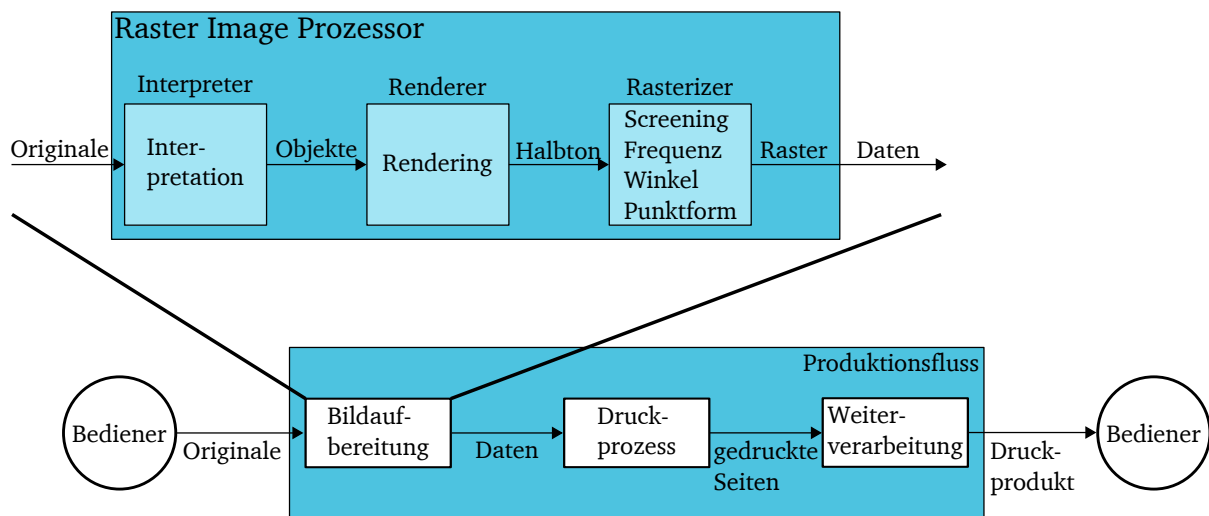


Abbildung 2.1.: Weg der Druckdaten beim Drucken. In der hier hervorgehobenen Bildaufbereitung wird aus den Originalen der zu druckenden Seite eine Datendatei erzeugt, die definiert, an welcher Position auf dem Bedruckstoff welche Menge an Druckstoff positioniert werden muss. Anschließend folgt der Druckprozess auf Basis der Datendatei und in der Weiterverarbeitung entsteht das erzielte Druckprodukt. Angelehnt an Kipphan (2001, S. 42 und 562).

kontinuierlich, obwohl sie vom Renderer stufenförmig gerendert wurden. Im dritten Prozess wird das Halbtonbild vom *Rasterizer* gerastert, d. h. jeder Rasterzelle wird eine diskrete Menge an Druckstoff zugeteilt, um die Originaldatei durch das vorliegende Druckprinzip bestmöglich abzubilden. Aus den gerasterten Daten kann wiederum eine Druckform abgeleitet werden oder unter der Bezeichnung *Computer to Print* der direkte Druckprozess durchgeführt werden. In dieser Arbeit wird sich auf Non-Impact-Druckverfahren beschränkt, also jene ohne Druckform, und im Speziellen auf Inkjet-Druck. Die Inkjet-Druckverfahren werden im folgenden Kapitel 2.1.2 genauer beschrieben, aber die Beschränkung soll hier erwähnt sein, um die Arbeitsweise des RIP hinreichend zu beschreiben. Im Kontext des Inkjet-Drucks gibt es zwei Prinzipien, die für die Rasterung zum Einsatz kommen, nämlich die Amplitudenmodulation (AM) und die Frequenzmodulation (FM) oder eine Kombination aus beiden. Bei der AM wird die Menge an Druckstoff in einer Rasterzelle variiert. Beim Inkjet-Druck wird dies entweder über das Volumen des ausgestoßenen Tropfens oder durch Ausstoßen mehrerer Tropfen an derselben Stelle erreicht. Die Größe, bzw. Anzahl der Tropfen wird dabei stufenweise über den Tonwert des Halbtonbildes festgelegt. Beispielsweise bleibt bei einem Tonwert von 0 bis 42 nach der Umrechnung in zwei Bit die Rasterzelle unbedruckt, von 43 bis 127 wird der kleine Tropfen gedruckt, von 128 bis 212 wird ein mittlerer Tropfen gedruckt und oberhalb wird ein großer Tropfen gedruckt. Üblicherweise werden benachbarte Zellen miteinander verrechnet, um eine feinere Unterteilung des Tropfenvolumens an den Tonwert zu erhalten. Hingegen beim Raster per FM sind alle Tropfen gleich groß und die Anzahl der bedruckten Rasterzellen wird variiert. Das FM-Raster hat somit meist eine höhere Auflösung als das AM-Raster, sprich ein feineres Gitter an Rasterzellen. Die Bildaufbereitung ist anhand eines AM-Rasters in Abbildung 2.2 schematisch veranschaulicht. In der rechten Darstellung von Abbildung 2.2 wird den Rasterzellen entsprechend den Objekten eine von drei definierten Druckstoffmengen zugewiesen. Andere Rasterzellen, an denen sich keine Objekte befinden bleiben frei.

Die Übergabe der aufbereiteten Bilddaten an den anschließenden Druckprozess kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Entweder die Gesamtheit an zu druckenden Seiten wird am Stück verarbeitet und die gerasterten Daten werden bis zum Druckvorgang zwischengespeichert oder der Rasterprozess arbeitet unter Einsatz erhöhter Rechenleistung simultan zum Druckvorgang. Mit der sogenannten skalierbaren

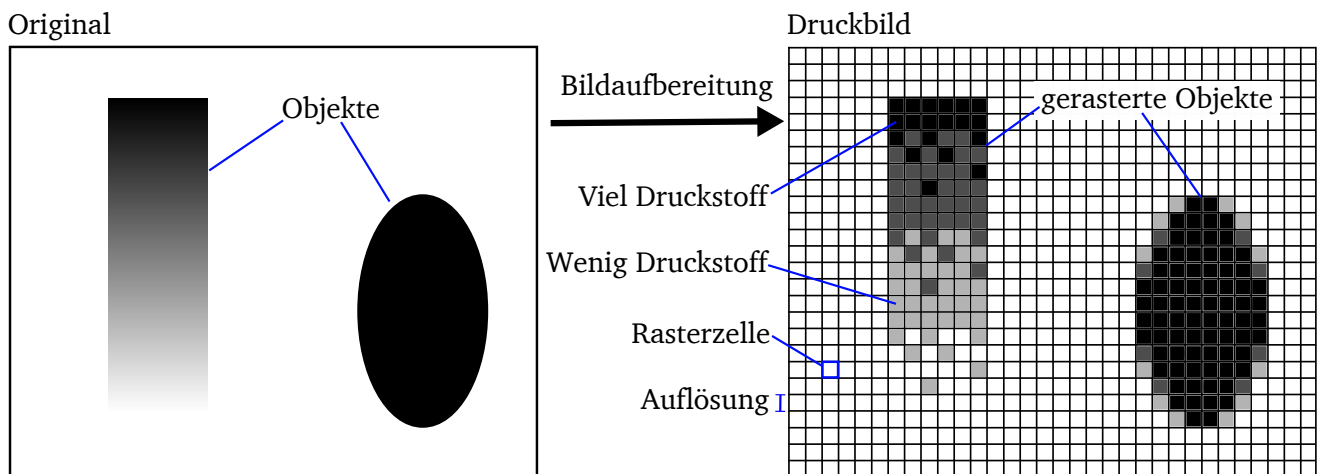


Abbildung 2.2.: Das Raster lässt sich durch ein Gitter veranschaulichen, dessen Zellen definierten Positionen im Druckbild zugeordnet sind. Die Gittergröße entspricht der Auflösung des Rasters. Den Rasterzellen wird durch den RIP eine definierte Menge an Druckstoff zugeordnet, um die Datendatei bestmöglich nachzubilden. Im vorliegenden Fall stehen dem AM-Raster drei Druckstoffmengen pro Rasterzelle zur Verfügung.

Rasterarchitektur werden zu druckenden Seiten auf beliebig vielen Recheneinheiten parallel gerastert und mittels zentraler Intelligenz verwaltet, um die Druckreihenfolge zu gewährleisten und mit nur geringem Puffer an gerasterten Seiten den Druckvorgang starten zu können (Goldmann 2007). Der simultane Rasterprozess zum Druckprozess ist eine entscheidende Voraussetzung für die Untersuchungen in dieser Arbeit. Auf diese Weise ist ein nachträgliches Eingreifen in den Rasterprozess, und damit eine Beeinflussung der Tropfenverteilung möglich, falls im Druckprozess ein Druckfehler festgestellt wurde.

Es wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die Druckinformationen korrekt sind und die Druckvorstufe fehlerfrei arbeitet. Somit werden Inhaltsfehler ausgeschlossen und Jobintegrität sowie Datenintegrität sind sichergestellt. Dies bedeutet, dass jeder zu druckenden Seite die korrekten Druckdaten zugeordnet sind und es besteht die Übereinstimmung von Vorder- zu Rückseite.

### 2.1.2. Inkjet-Druckverfahren

Abbildung 2.3 zeigt die Vielfalt unterschiedlicher Druckverfahren, die im Laufe der Zeit entwickelt wurden. Sie gliedern sich im Produktionsfluss hinter der Bildaufbereitung ein. Die Druckverfahren sind nach dem Bedarf einer Druckform in konventionelle Druckverfahren und Non-Impact-Druckverfahren kategorisiert. Während konventionelle Druckverfahren eine Druckform nutzen, wird bei den Non-Impact-Druckverfahren der Druckstoff ohne mechanischen Kontakt auf einen Zwischenträger oder direkt auf den Bedruckstoff aufgetragen. In dieser Arbeit wird auf den in der Abbildung 2.3 eingefärbten Inkjet-Druck fokussiert, der neben Elektrofotografie, Ionografie und Magnetografie zu den Non-Impact-Druckverfahren gehört. „Neben der Elektrofotografie ist Ink Jet die meist angewandte Non-Impact-Technologie zum Aufbau von digitalen Drucksystemen“ (Kipphan 2001, S. 745). Seit dies im Jahr 2001 von H. Kipphan verfasst wurde, hat sich die Verbreitung des Inkjet-Drucks weiter gesteigert. Inkjet wird auf Basis seines Funktionsprinzips in zwei Kategorien unterteilt: Continuous Inkjet und Drop-on-Demand (DOD) Inkjet. Beide lassen sich weiter unterteilen nach dem Steuerungsprinzip des Tropfenflugs, bzw. der Erzeugung des Tropfens und werden nachfolgend genauer erläutert.

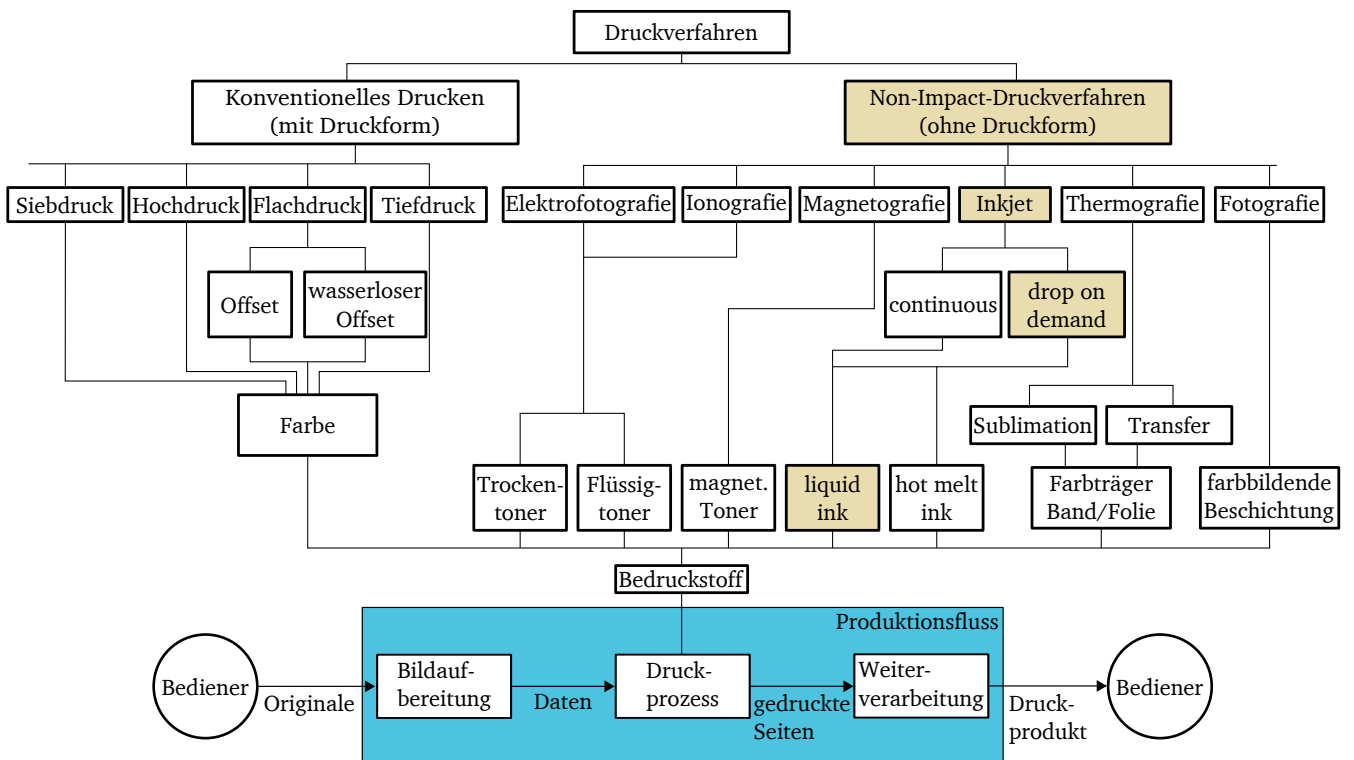


Abbildung 2.3.: Die abgebildete Struktur zeigt die gängigsten Druckverfahren unterteilt nach druckformgebundenen und Non-Impact-Druckverfahren. Zu letzteren gehören unter anderem Elektrofotografie, Ionografie, Magnetografie und Inkjet (Kipphan 2001, S. 61). In dieser Arbeit wird vorwiegend das beige eingefärbte Inkjet-Verfahren mit flüssiger Tinte betrachtet. Das Druckverfahren bestimmt den Druckprozess und befindet sich im Produktionsfluss nach der Bildaufbereitung. Grafik angelehnt an Kipphan (2001, S. 60).



---

## Continuous Inkjet

Systeme der Kategorie *Continuous Inkjet* erzeugen aus einer Düse einen kontinuierlichen Strom an Tinte. Der kontinuierliche Inkjet wird kurz nach dem Ausstoß durch seine Oberflächenspannung und die Schwingungen des Ausstoßes in Einzeltropfen aufgetrennt (Rayleigh 1878; Defay, Prigogine und Bellemans 1966). Dieses Auftrennen wird als *Rayleigh Breakup* bezeichnet (Hoath 2016, S. 179). Je nachdem, ob an der aktuellen Rasterzelle ein Tintenpunkt erwünscht ist oder nicht, wird die Flugbahn der Tropfen abgelenkt und zum Papier geführt oder aufgefangen und zurückgeführt. Die Änderung der Flugbahn kann durch einen gezielten Luftstrom oder – in modernen Systemen häufiger – durch ein elektrisches Feld erfolgen. Bei letzterem wird direkt nach dem *Rayleigh Breakup* eine elektrische Ladung induziert, die beim Durchfliegen des statischen elektrischen Feldes für die entsprechende Ablenkung des Tröpfchens sorgt. Ungeladene Tröpfchen fliegen geradewegs ins Gutter und werden recycelt (Hoath 2016, S. 75). Bedingt durch dieses Prinzip ergeben sich große Herausforderungen beim Erreichen hoher Präzisionsansprüche, darüber hinaus ist eine chemisch komplexe Zusammensetzung der zu druckenden Tinte erforderlich. Der *Continuous Inkjet* wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

## Drop-on-Demand Inkjet

Bei DOD-Systemen wird nur im Bedarfsfall ein Tropfen erzeugt. Da im Gegensatz zu den Düsen beim *Continuous Inkjet*-Verfahren der Tropfen nicht durch ein elektrisches Feld abgelenkt wird, ist jeder Spalte im Raster eine eigene Düse zugeordnet. Dadurch wird eine Vielzahl an Düsen im Array benötigt, die alle ihren eigenen Aktuator haben. Für Aktuatoren stehen verschiedene Prinzipien zur Verfügung, nämlich thermisch, piezoelektrisch, elektrostatisch oder akustisch. Auf die beiden verbreitetsten Formen, thermisch und piezoelektrisch, wird hier weiter eingegangen. In Abbildung 2.4 sind die beiden Prinzipien schematisch dargestellt. Beim thermischen Inkjet, auch als *Bubblejet* bezeichnet, wird ein resistives Heizelement in kurzer Zeit elektrisch auf über 350 °C erhitzt, sodass Tinte in der Nähe verdampft. Durch die Änderung des Aggregatzustands entsteht eine Gasblase mit wesentlich größerem Volumen als im flüssigen Zustand, wodurch ein einzelner Tropfen aus der Düse befördert wird. Dieses Konzept wird wegen der geringen Produktkosten primär bei Heim- und Bürodruckern verwendet. Beim thermischen DOD ist die Auswahl der Tinte limitiert, denn diese muss thermisch stabil sein und sich verdampfen lassen, was nahezu nur wasserbasierte Tinten ermöglichen. Piezoelektrische Aktuatoren nutzen den umgekehrten piezoelektrischen Effekt, der eine Umwandlung von elektrischer Spannung in mechanische Bewegung beschreibt (Arnau u. a. 2004, S. 4). Damit wird durch Formänderung des piezoelektrischen Aktuators das Volumen der Tintenkammer verringert, was den Tropfenausstoß verursacht. Indem Spannungen in gleiche und entgegengesetzte Richtung der Polarisierung im Piezokristall angelegt werden, wird die Bewegung kontrolliert und der Ausstoß des Tropfens sowie das Ansaugen frischer Tinte aus dem Tintenversorgungs kanal veranlasst (Wijshoff 2010). Es gibt mehrere Arten, die Formänderung des piezoelektrischen Aktuators zu nutzen, wie beispielsweise von Brünahl und Grishin (2002), Wu, Lin und Hwang (2004) oder Liou, Chan und Shih (2010) beschrieben. Durch das Rückschwingen des piezoelektrischen Aktuators oder den Zerfall der abkühlenden Gasblase beim thermischen Inkjet wird das *Rayleigh Breakup* begünstigt, das einen Einzeltropfen formt. Gegenüber thermischen haben Piezo-Druckköpfe eine höhere Lebenserwartung, bieten mehr Freiraum bei der Wahl der Tinte und haben eine größere Tropfenausstoßfrequenz, jedoch sind auch die Materialkosten höher, was die Nutzung solcher Druckköpfe in kostengünstigen Drucksystemen erschwert (Hudd 2011). Abgesehen von den nun folgenden Vergleichen beim Tropfenausstoß beschränken sich die Untersuchungen im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf den piezoelektrischen Inkjet-Druck.

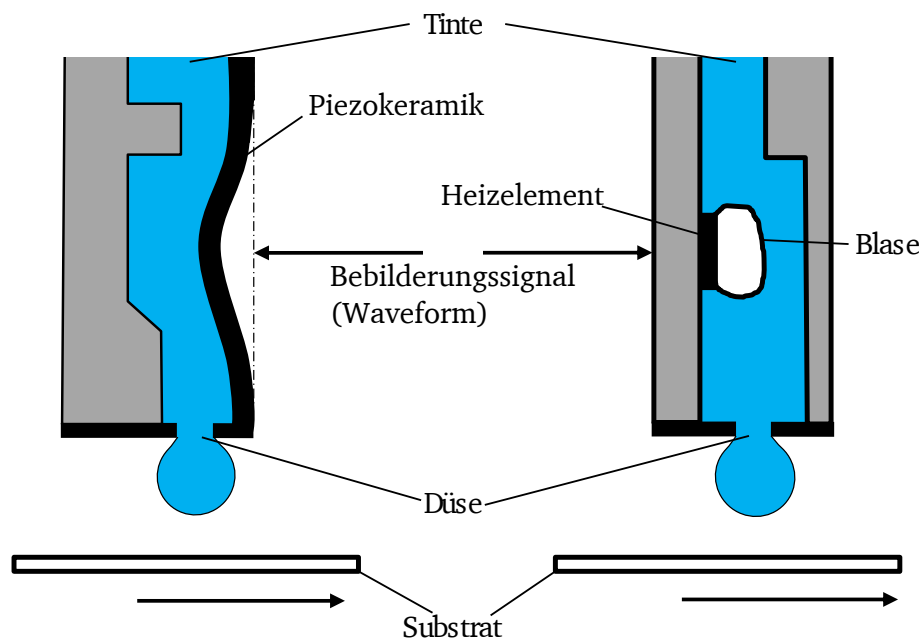
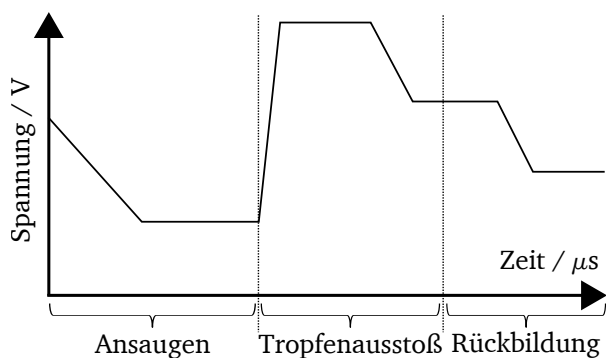


Abbildung 2.4.: Die beiden am weitesten verbreiteten DOD-Inkjet-Verfahren: piezoelektrisch (links) und thermisch (rechts) (Kipphan 2001, S. 66). Durch ein Bebilderungssignal wird der Aktuator des jeweiligen Verfahrens dazu bewegt, einen Tintentropfen aus der Düse auf das Substrat zu stoßen.

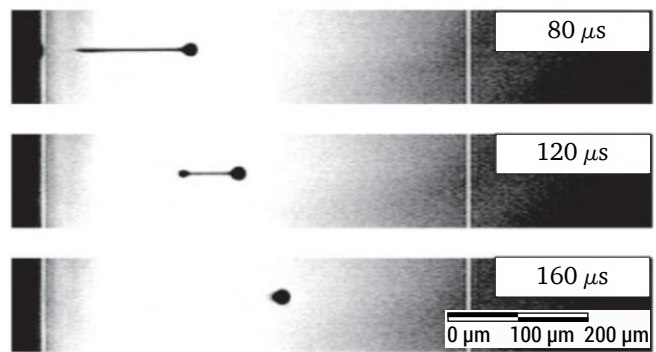
### 2.1.3. Tropfenausstoß

Das elektrische Ansteuersignal oder Bebilderungssignal für das resistive Heizelement (Torigoye 1996) oder den piezoelektrischen Aktuator (Liou, Chan und Shih 2010) nennt sich *Waveform*. Durch verschiedene Signalverläufe, also geeignete Waveformen, wie beispielhaft in Abbildung 2.5a, werden Ausstoßgeschwindigkeit und Tropfengröße kontrolliert (Gan u. a. 2009; Liu u. a. 2013). Die Amplitude der Spannung kann so weit reduziert werden, bis kein Tropfenausstoß erfolgt, sondern lediglich eine Durchmischung der Tinte, um die Viskosität zu erhalten (Stöckle und Körner 2017) oder um Meniskusschwankungen entgegenzuwirken (Stöckle und Körner 2018; Stöckle 2018) sowie zur allgemeinen Verbesserung der Systemstabilität (Zollner u. a. 2016). Der Signalverlauf ist derart zu gestalten, dass eine impulsartige Druckwelle in die Tintenkammer eingebracht wird, welche eine definierte Menge an Tinte aus der Düse herausschleudert und dann abklingt, was auch hier zum *Rayleigh Breakup* führt (Kipphan 2001, S. 746). Es entsteht ein einzelner Tropfen, der gemäß Abbildung 2.5b ein Tintenband hinter sich herzieht und sich bei korrekter Anpassung der Waveform an die Viskosität und Oberflächenspannung der Tinte während der Flugzeit vollständig mit dem Tintenband vereint (Jang, Kim und Moon 2009). Findet diese Vereinigung mit dem Tintenband nicht statt, so entsteht ein kleinerer separater Tropfen aus dem Tintenband, ein sogenannter Satellit (Brenn, Valkovska und Danov 2001; Papageorgiou 1995). Satelliten haben nur einen Bruchteil des Volumens des Haupttropfens. Wenn sie auf dem Papier landen, schaffen sie einen zweiten Punkt, der sich nicht mit dem Punkt des Haupttropfens deckt. Ist der Satellit deutlich kleiner oder fliegt langsamer als der Haupttropfen, kann er sogar von Luftströmungen unterhalb der Düse fortgetragen werden. Die Waveform ist somit für Düsenkammer im Druckkopf und rheologische Eigenschaften des Druckstoffs zu optimieren.

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Waveform ideal ist, also für sich gesehen einen optimalen Tropfen erzeugt. Doch selbst dann ist ein perfekt lotrechter Tropfenausstoß an die erforderliche Position des Bedruckstoffs nicht gewährleistet. Der Auftreffpunkt des Tropfens kann einen Positionsversatz,



(a) Schematischer Signalverlauf einer Waveform zur Erzeugung eines Tropfens aus einer Druckdüse. Grafik angelehnt an Zainuddin u. a. (2017)



(b) Aufnahme eines Tröpfchens 80  $\mu$ s, 120  $\mu$ s und 160  $\mu$ s nach dem Ausstoß aus der Druckdüse (Saito und Nakajo 2017).

Abbildung 2.5.: Der Tropfenausstoß aus einer Druckdüse wird durch ein Bilderzeugungssignal (Waveform), wie in (a) schematisch dargestellt, erzeugt. Es resultiert ein ausgestoßener Tropfen, der wie in (b) gezeigt ein Tintenband hinter sich herzieht und sich innerhalb von etwa 160  $\mu$ s mit diesem vereint.

also eine Abweichung zur Sollposition in beliebiger Richtung aufweisen. Unterschiedliche, äußeren Einflüsse können diesen Positionsversatz erwirken sowie das Volumen des ausgestoßenen Tropfens reduzieren oder den Tropfenausstoß ganz verhindern:

- Lokale Schwankungen der Relativbewegung von Düse zu Bedruckstoff;
- Luftströmungen, die auf den Tropfenflug wirken;
- physikalische Beschädigung der Düsenaustrittsöffnung durch stark abrasive Tinte, Kontakt mit dem Bedruckstoff oder unsachgemäße Handhabe beim Einbau des Druckkopfes;
- Verschleiß oder Ablagerungen, wie Papierstaub oder Satelliten früherer Tropfen an der Düsenaustrittsöffnung;
- Luftbläschen im Düsenkanal durch mangelhaft entgasten Druckstoff oder durch große Meniskus-schwankung bei anspruchsvollen, kontrastreichen Druckvorgängen (Brünahl, Condie u. a. 2017);
- Eintrocknen des Druckstoffs und damit einhergehende Änderung dessen Viskosität;
- Einfluss durch Aktivieren benachbarter Düsen (*Cross Talking*) (Kipphan 2001, S. 753).

Diese Einflüsse zu beherrschen ist die besondere Herausforderung bei Inkjet-Produktionsdruckmaschinen. Bei leichten Beeinträchtigungen der Düse entsteht durch oben genannte Hindernisse oder Kapillarkräfte an der Düsenaustrittsöffnung eine Ablenkung der Flugbahn oder Reduktion der Fluggeschwindigkeit des Tröpfchens. Beides führt zu einem Positionsversatz des resultierenden Punktes, sofern der Bedruckstoff eine Relativbewegung zur Düse aufweist. Ist eine Düse nicht in der Lage, vorgesehene Tropfen zu erzeugen, handelt es sich um einen Düsenausfall, d. h. die Druckwelle des Piezo-Elements genügt nicht mehr, um einen Tropfen aus der Düse herauszuschleudern. An der entsprechenden Position auf dem Papier wird keine Tinte aufgetragen. Das Eintrocknen des Druckstoffs in der Düse hängt stark mit der Nutzungshäufigkeit der Düse und den rheologischen Eigenschaften der Flüssigkeit zusammen. Für diese Eigenschaften und die im folgenden dargelegte Farbe ist bei der Entwicklung des Druckstoffs ein Optimum zu finden.

#### 2.1.4. Tinten und Wechselwirkungen mit Substrat

Der Druckstoff beim Inkjet ist Tinte, der Begriff Substrat wird als Bezeichnung für den Bedruckstoff verwendet. Die wichtigsten Eigenschaften von Tinte und deren Zusammenspiel, bzw. Wechselwirkung mit dem Substrat werden in diesem Abschnitt näher beschrieben.

---

## Farblehre und Tinten

Tinten für den Inkjet-Druck basieren meist auf Wasser und beinhalten zusätzliche Bestandteile, welche die Eigenschaften der Tinte definieren. Die wichtigste Eigenschaft ist die Farbe der Tinte, die durch Farbstoffe oder Pigmente in der Tinte erwirkt wird. Neben der Farbe werden weitere Eigenschaften, wie die Viskosität, Oberflächenspannung, Löslichkeit oder Fähigkeit zum Trocknen und Aushärten durch zusätzliche Bestandteile in der Tinte gesteuert. Die farbigen Pigmente absorbieren ein bestimmtes Spektrum des Lichts und remittieren einen jeweils anderen Bereich des Spektrums. Während der Begriff Reflexion das Zurückwerfen von Licht von glatten Oberflächen beschreibt, wird bei der Remission einfallendes Licht von einer rauhen oder porösen Oberflächen gestreut und absorbiert, bevor es zurückgeworfen wird. Der Wunsch bei der Wahl der Farbpigmente in der Tinte ist eine hundertprozentige Reflexion in definierten Spektralbereichen, dies beschreibt die sogenannten Idealfarben Cyan, Magenta und Gelb. Cyan reflektiert idealerweise die Wellenlängen vom Beginn des sichtbaren Spektrums bis zu 575 nm, Gelb ergibt sich aus einer Reflexion der langen Wellenlängen von 495 nm bis zum oberen Ende des sichtbaren Spektrums und als dritte Idealfarbe hat Magenta einen Spektralverlauf, bei dem zwischen 495 nm und 575 nm keine Reflexion besteht (Kipphan 2001, S. 86). Durch Kombination der drei Idealfarben lassen sich die Mischfarben im Farbraum erzeugen. Die Internationale Beleuchtungskommission (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)) hat Messverfahren und Darstellungsarten erarbeitet, um den Farbraum (z. B. CIELAB (CIE 2019) oder CIELUV (CIE 2016)) und die Farbvalenz, also das Resultat der visuellen Wahrnehmung im Auge, zu standardisieren (Kipphan 2001, S. 76). Überlagern sich alle drei Grundfarben, wird im idealen Fall einfallendes Licht vollständig absorbiert und das Druckbild erscheint schwarz. Je mehr Fläche des weißen Papiers damit abgedeckt ist, desto geringer ist die Remission des Papiers und damit löst das betrachtete Druckbild im menschlichen Auge einen geringeren Reiz aus. Während das menschliche Gehirn aus der Farbvalenz eine qualitative Farbempfindung von Buntheit und Buntheit erzeugt, erlauben Messeinrichtungen die quantitative Farbbeurteilung von Helligkeit und Farbkoordinaten in einem der oben beschriebenen Farbräume (Kipphan 2001, S. 76). In der Realität sind die Grenzen zwischen absorbiertem und remittiertem Lichtspektrum fließende Übergänge, deren Remission bei den einzelnen Tinten jedoch in den oben beschriebenen Wellenlängen dominiert. Durch diese Einschränkung entscheidet die Pigmentwahl über die Fülle des erreichbaren Farbraums. Im Druckprozess gibt es als Ergänzung zu diesen drei Grundfarben noch die Tinte Schwarz (Key), die Gummi, bzw. Farbruß enthält (Leach 2012, S. 290), um die verbleibende Remission zu reduzieren. Damit ergibt sich durch geeignetes Farbmanagement, also gezielte Kombination dieser vier Tinten ein nochmals erweiterter Farbraum. Um die gewünschte Remission zu erreichen, wird die zu druckende Tintenmenge und -zusammensetzung der Tinten Cyan, Magenta, Yellow, Key (CMYK) durch Farbmanagementsysteme in der Bildaufbereitung definiert. Die Farbdichte beschreibt dabei die Gleichmäßigkeit und Intensität des Farbauftrags (Blom und Conner 1990) und bildet damit ein wichtiges Qualitätsmerkmal von Druckerzeugnissen. Dies wird u. a. beeinflusst von dem Verhältnis von tintenbenetzter Fläche zu unbedecktem Substrat. Diese Gleichmäßigkeit der Remission kann durch Herstellungstoleranzen, Verschleiß oder ungleichmäßige Tintenversorgung gestört werden und mindert damit die Qualität des Druckerzeugnisses.

Tinten haben rheologische Eigenschaften, wie Oberflächenspannung und Viskosität, die nicht nur beim Tropfenausstoß aus der Düse von Bedeutung sind. Durch gezielte Mischung und Ergänzung von Bestandteilen werden die Eigenschaften von Tinten erweitert, um beispielsweise auf Magnetfelder oder Ultraviolett (UV)-Licht zu reagieren. Die magnetisch lesbaren Tinten (Magnetic Ink Character Recognition (MICR)) erlauben, gedruckte Zeichen per Magnettechnik durch Maschinen lesbar zu machen. UV-Tinten sind üblicherweise für das menschliche Auge unsichtbar, können aber durch Einstrahlung von einer UV-Lichtquelle mit Wellenlängen unterhalb von 380 nm sichtbar gemacht werden. In diesem Wellenlängenbereich wird Energie von der Tinte absorbiert und mit einer Wellenlänge, die im sichtbaren Bereich des Menschen liegt, wieder emittiert. Diese Verschiebung der Wellenlänge wird als *Stokes-Verschiebung* (*Stokes-Shift*) bezeichnet (Paschotta 2008).

---

Methoden, die dieses Prinzip anwenden, sind beispielsweise in den Patenten von Schneider, Körner u. a. (2018a), Mantell, Jason und Ossman (2010) und Chrétien und Odell (2012) beschrieben. Die beiden Sondertinten, MICR-Tinte und UV-Tinte, werden vorwiegend für Sicherheitsmerkmale zum Schutz vor Fälschung eingesetzt.

### **Wechselwirkung zwischen Substrat und Tinten**

Substrate für den Inkjet-Druck sind Folien oder Papiere. Unbehandelte Papiere bestehen ausschließlich aus Fasern und haben eine Vorzugsrichtung durch den Herstellungsprozess, d. h. die einzelnen Fasern sind hauptsächlich in einer Richtung orientiert (Blechschildt 2013). Kunststofffolien sind synthetisch hergestellt und haben eine dichte Oberfläche, die das Einziehen von Tinte verhindert. Dazwischen gibt es zudem noch gestrichene Papiere, bei denen die Papierfasern durch weitere Bestandteile, wie Kunststoff, Kreide, Kaolin und Kasein ergänzt sein können. Beim Auftreffen einer wasserbasierten Tinte auf ein Substrat besteht ein anfänglicher Kontaktwinkel zwischen den Oberflächen von Tintentropfen und Substrat, dessen Änderungsrate die Einziehgeschwindigkeit bestimmt (Moutinho, Ferreira und Figueiredo 2007). Je nach Papiersorte ziehen Tinten unterschiedlich stark in die Fasern ein (Lovász 1967). Für unbehandelte Papiere wurde von Levlin und Nordman (1967) eine ausführliche Messreihe durchgeführt. Von Li u. a. (2015) wurde das Einziehverhalten von Tinte in unbehandelte Substrate unter Verwendung von Rasterelektronenmikroskopie mit der Porosität und Porengröße in Relation gebracht. Beispielsweise wurde gezeigt, dass sich durch Kalandrieren des Papiers die Porosität reduziert und damit die Aufnahme von Flüssigkeit in die Fasern mindert. Derselbe Effekt wird bei gestrichenen Papieren durch die beigetzten Bestandteile erreicht. Durch die Zusammensetzungen von Druckstoff und Bedruckstoff lässt sich folglich das Verteilen von Tinte und die zuvor beschriebene Farbdichte beeinflussen. Starkes Einziehen ist bei grafischen Anwendungen aus ökonomischen Gründen unerwünscht, da mehr Tinte benötigt wird, um die Oberfläche zu bedecken, weswegen in diesem Fall typischerweise gestrichene Papiere eingesetzt werden (Heard u. a. 2004). Die Aufnahme von Tinte auf solchen gestrichenen Papieren wird von Heard u. a. (2004) untersucht und beschrieben.

Ein Beispiel für Wechselwirkung zwischen Tinten ist Koaleszenz. Die Definition nach Everett (1972) aus dem Englischen übersetzt lautet: Koaleszenz ist das Verschwinden der Grenze zwischen zwei Tröpfchen oder Blasen im Kontakt, gefolgt von Formänderung, die zu einer Reduzierung der gemeinsamen Oberfläche führt (Everett 1972, S. 610f). Es sei angemerkt, dass im Druckkontext der Begriff *Partikel* üblicherweise nicht mit Tröpfchen oder Blasen gleichgesetzt wird, sondern Teilchen, wie beispielsweise Tintenbestandteile bezeichnet. Koaleszenz entsteht, wenn sich bereits vor dem Aufprall eines Tropfens auf dem Papier Flüssigkeit befindet. Tropfen, die zeitversetzt auf das Papier fallen, also beispielsweise von benachbarten Düsen stammen, tendieren nach der Landung zum Zusammenfließen. Dabei ist die Position des zuerst gelandeten Tropfens gegebenenfalls stabiler, je nach Einwirkdauer und Penetrationsverhalten. Der zweite Tropfen wird aufgrund von Viskosität und Oberflächenspannung zum anderen hingezogen. Betrachtet auf größere Strukturen, wie z. B. Linien, und bedruckte Flächen wirkt der Koaleszenzeffekt auf die resultierende Bedeckung des Substrats. Um eine maximale Farbdichte zu erreichen, ist es erforderlich, dass die idealisierten runden Tröpfchen sich überlappen. Durch diese Überlappung erfahren die in Kontakt stehenden Tröpfchen den Koaleszenz-Effekt. Es verschieben sich einander berührende Tropfen aufeinander zu und erzeugen eine schmälere Kontur als die Summe der einzelnen Tropfen erreicht hätte. Gegebenenfalls entsteht auf der entgegengesetzten Seite eine schwach oder unbedruckte Spur, die den Farbeindruck abändert und die Farbdichte der Fläche reduziert. Dies wird in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt. Zu Beginn, Zeitpunkt  $t_1$ , sind zwei Tropfen frisch auf dem Substrat positioniert. Zum Zeitpunkt  $t_2$  ist der dritte Tropfen gelandet, der mit den beiden äußeren Tropfen in Kontakt steht und sie deswegen dispositioniert. Sie werden mittels des Koaleszenz-Effekts ins Zentrum gezogen. Dadurch resultiert eine reduzierte bedruckte Fläche, wie es von den roten Pfeilen

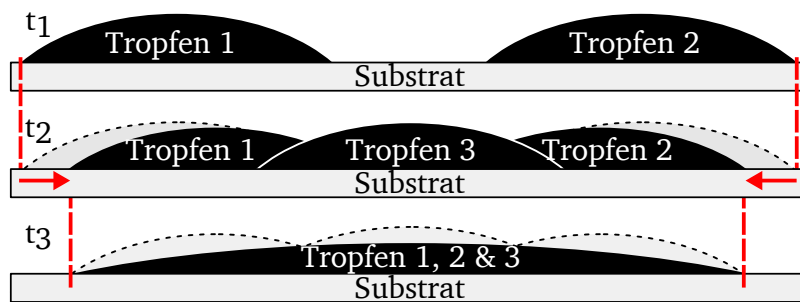


Abbildung 2.6.: Veranschaulichung des Koaleszenzeffekts für drei Tröpfchen, von denen der mittlere zu einem späteren Zeitpunkt landet als die äußeren beiden. Die Einzeltropfen vereinen sich zu einer Gesamtfläche mit optimierter Oberfläche, wodurch die bedeckte Grundfläche reduziert wird (Mohilnik 2015).

angedeutet wird (Mohilnik 2015). Es bildet sich zum Zeitpunkt  $t_3$  ein größerer einzelner Tropfen mit einer geschlossenen Oberfläche.

### Einfluss von Grundierung

Neben den bereits genannten Einflüssen, wie Typ des Substrats und Koaleszenzeffekt gibt es spezielle Substanzen, die das Einziehverhalten von Tinten in Papieren beeinflussen. Eine spezielle Salzlösung, die im Folgenden als Grundierung bezeichnet wird, ist in der Lage, ungestrichene Papiere vorzubefeuchten, sodass die Kapillarkräfte zwischen den Fasern in geringerem Maße auf die Tinte wirken. Damit bleibt der Tropfen im vorgesehenen Bereich und erzeugt im Gesamtbild eine schärfere Kante. Ein solcher Effekt ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Bei Verzicht auf die Grundierung kann die erzielte Form der Tropfen nicht erreicht werden, es bilden sich Verästelungen, die die Erscheinung von Kanten rau und unscharf werden lassen (Freudenberg 2017), wie in Abbildung 2.7a. Als Resultat sind feine Buchstaben nicht mehr lesbar.

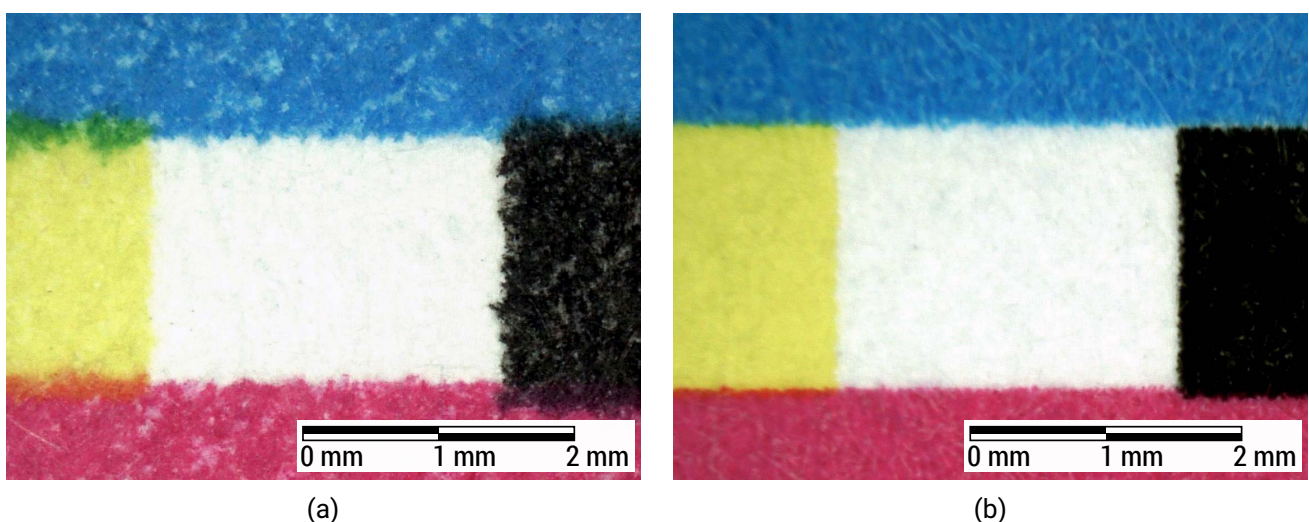


Abbildung 2.7.: Gedruckte Tinte auf dem unbehandelten Substrat Tauro des Herstellers Sappi (Sappi Limited 2014) zeigt raue Kanten und Übergänge durch unterschiedlich starkes Einziehen in die Fasern (a). Das Einziehverhalten lässt sich durch Auftragen von Grundierung steuern (b) (Freudenberg 2017).

---

Durch Auftragen von Grundierung kann dem entgegengewirkt werden und die Tinte an ihrer Position gebunden werden, wie in der Darstellung 2.7b zu sehen ist.

Bei gestrichenen Papieren kann durch Aufbringen derselben Grundierung ein anderer positiver Effekt erzielt werden. Das Ineinanderfließen übereinander gedruckter Tinten wird auch als *Bleeding* bezeichnet. Dies tritt besonders stark bei gestrichenen Papieren auf, deren Oberfläche zu Teilen aus Kunststoffen besteht. Wird Tinte an Stellen appliziert, wo bereits eine andere Tinte gedruckt wurde, bilden sich Verästelungen, wie in Abbildung 2.8a zu sehen ist. Die frische Tinte zerfließt in die zweite, noch feuchte Tinte. In der zweiten Darstellung 2.8b ist der Optimalfall zu sehen, bei dem der Buchstabe klare Konturen aufweist. Dies wird durch das Auftragen von Grundierung erwirkt (Freudenberg 2017). Grundierung lässt sich entweder über Walzen flächig auf das Papier auftragen oder wie Tinte per Inkjet. In beiden Fällen ist das Aufbringen von Grundierung sowohl in einer unabhängigen vorangestellten Anlage als auch als integrierter Teil der Druckmaschine möglich.

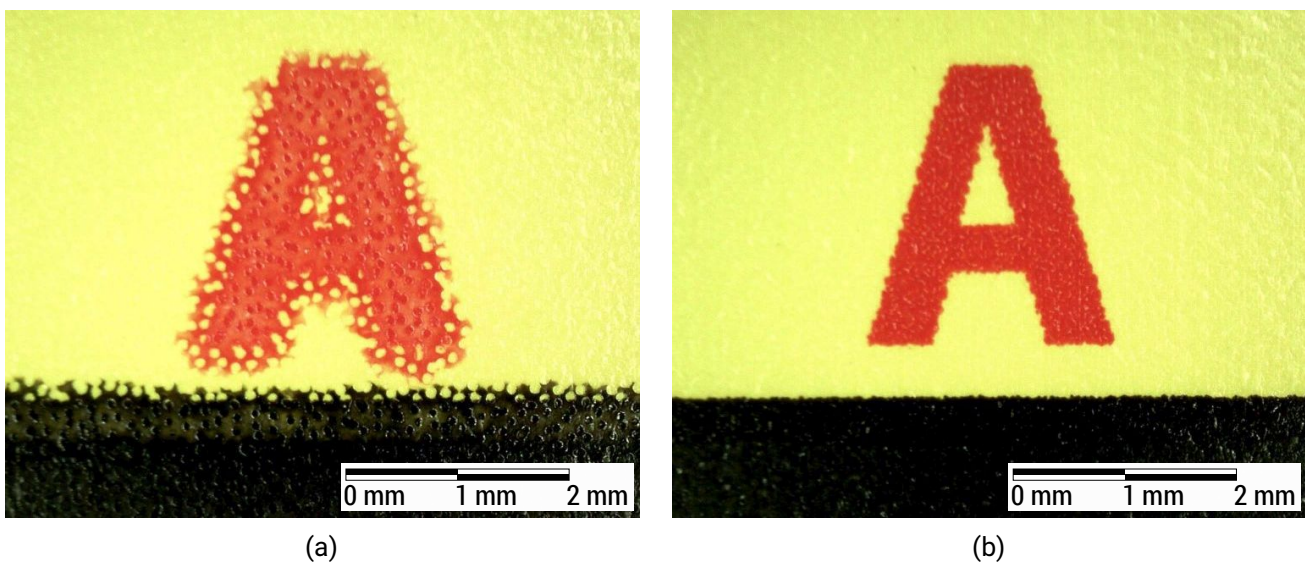


Abbildung 2.8.: Gestrichenes Papier Finesse Matt des Herstellers UPM (UPM GmbH 2017), auf dem mehrere Schichten unterschiedlicher Tinten feucht in feucht aufgetragen wurden. Das linke Bild zeigt, dass die übereinander gedruckten Tinten ineinanderfließen (a). Im rechten Bild werden durch Auftragen von Grundierung definierte Konturen erreicht (b) (Freudenberg 2017).

### 2.1.5. Inkjet-Druckmaschine

In diesem Kapitel werden zunächst die mechanischen Komponenten beschrieben, die erforderlich sind, um den Druckprozess im produktiven Maßstab zu ermöglichen. Der Tropfenausstoß wird von zahlreichen Düsen durchgeführt, die zu einem sogenannten Druckkopf kombiniert sind. Mehrere Druckköpfe lassen sich wiederum zu einer sogenannten Druckeinheit zusammenfassen. Die ersten beiden Abschnitte dieses Kapitels behandeln den Druckkopf und die Druckeinheit, in den beiden anschließenden Abschnitten werden die Druckkopfreinigung und die Nachverarbeitung des bedruckten Substrats erklärt.

#### Druckkopf

Die Frequenz des Tropfenausstoßes unterliegt physikalischen Beschränkungen aufgrund der Viskosität der Tinte. Obwohl der Inkjet-Druck fortwährend weiterentwickelt wird, um die Frequenz des Tropfenausstoßes

zu erhöhen, genügt eine einzelne Düse bei weitem nicht, um im produktiven Umfeld großflächige Substrate hinreichend schnell bedrucken zu können, zumal die Anzahl der Rasterzellen mit erhöhter Druckauflösung quadratisch zunimmt. Deshalb bestehen Druckköpfe aus einer Ansammlung zahlreicher Druckdüsen, um große Flächen in hoher Auflösung in kurzer Zeit zu bedrucken. Zwei solche Druckköpfe sind in Abbildung 2.9 dargestellt. Die Anordnung und der Abstand der Düsen wird bestimmt von dem Platzbedarf der Tintenkam-



(a) Druckkopf KJ4B-YH von Kyocera.



(b) Druckkopf MC160H von Konica Minolta (Corrall 2017).

Abbildung 2.9.: Die Abbildung (a) zeigt einen Druckkopf KY4B-YH von Kyocera mit 2558 Düsen auf 108,3 mm Breite. In Abbildung (b) ist der Druckkopf MC160H von Konica Minolta mit 1.024 Düsen auf einer Breite von 43,3 mm dargestellt. Beide Druckköpfe nutzen piezoelektrische Aktuatoren und durch ihre Vielzahl an Druckdüsen für den Einsatz in Produktionsdruckmaschinen ausgestattet.

mer und des piezoelektrischen Aktuators in den Düsen. Das Substrat und der Druckkopf werden während des Druckvorgangs relativ zueinander bewegt, um ein Bedrucken der gesamten Fläche des Substrats zu erreichen. Gegenüber Bürodruckern ist bei Produktionsdruckmaschinen der Druckkopf üblicherweise als breites Array aus Druckdüsen fest verbaut und das Substrat wird mit kontinuierlicher Geschwindigkeit unterhalb der Düsen verfahren. Die Bewegungsrichtung des Substrats wird als Druckrichtung bezeichnet. Die physikalischen Düsenabstände der Druckköpfe und die Frequenz der Tropfenerzeugung limitieren die Auflösung des Rasters. Bei starr positionierten Druckköpfen ist für jede Spalte des Rasters eine einzelne Düse zuständig. Ausgehend von einem einreihigen Druckkopf lässt sich dessen Auflösung erhöhen und ein feineres Raster realisieren, indem die Düsenreihe geneigt im Druckkopf angeordnet ist. Entsprechend dem Neigungswinkel reduziert sich der horizontale Abstand quer zur Druckrichtung, wie in der linken Grafik von Abbildung 2.10 dargestellt. Alternativ lässt sich die Auflösung vervielfachen, wenn die Düsenreihe, wie im rechten Schaubild gezeigt, durch weitere hintereinanderliegende Düsenreihen mit gegenüber der Vorreihe versetzten Düsen erweitert wird (Kipphan 2001, S. 759). Unter Berücksichtigung der trigonometrischen Beziehungen ändern sich bei geneigt eingebauten Druckköpfen die Abstände zwischen den Düsen längs und quer zur Druckrichtung. Bei einreihigen Druckköpfen liefert dies zusätzliche Flexibilität, da der Abstand zweier benachbarter Düsen quer zur Druckrichtung über die gesamte Kopfbreite stets identisch und über den Neigungswinkel stufenlos verstellbar ist. Bei mehrreihigen Druckköpfen ist das Verhältnis zwischen Winkel und Düsenabstand reihenabhängig, sodass Düsenabstände nicht mehr gleich sind, sondern



---

für jede Kombination unterschiedlich. Eine definierte Verdrehung kann den Abstand benachbarter Düsen zweier unterschiedlicher Düsenreihen quer zur Druckrichtung reduzieren und gleichzeitig an anderer Stelle vergrößern. Dieser Fall ist exemplarisch in Abbildung 2.11 für einen 600 dpi-Druckkopf dargestellt, der sechs Düsenreihen mit einem konstanten Reihenabstand  $d = 5 \text{ mm}$  hat. Die schwarzen Ringe zeigen die Düsenpositionen zu je einer Düse der sechs Düsenreihen im Idealzustand. An den roten Stellen befinden sich die Düsen, wenn der Kopf um einen Winkel von  $\alpha = 0,1^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn um die erste Düse rotiert ist. Das Substrat bewegt sich vertikal bezüglich der dargestellten Positionen und die schwarzen gestrichelten Linien in der Abbildung repräsentieren die Spalten des Rasters, an denen sich die erforderlichen Druckpositionen befinden. Folglich werden bei einem verdrehten mehrreihigen Druckkopf nicht nur die Druckpositionen der Düsen verfälscht, sondern auch deren Abstände. Der Abstand  $a^{**}$  zwischen der sechsten und siebten Düse verhält sich invers zu den anderen Abständen  $a^*$ , da der Versatz der Düsenreihen  $d$  mit dem Tangens zur Entfernung um den Rotationspunkt beiträgt. Je weiter die Düsenreihen voneinander entfernt sind, desto gravierender zeigt sich dieser Effekt. In diesem Beispiel decken sich die Positionen der sechsten und siebten Düse in Druckrichtung und verursachen damit einen doppelt bedruckten Streifen. Dieser Doppeldruck wiederholt sich gemäß der Anzahl an Düsenreihen und erzeugt dadurch periodisch auftretende Streifigkeit.

Ein ähnlicher Effekt namens *Inkjet Banding* tritt durch eine Eigenheit von Inkjet-Druckköpfen auf. Der Effekt zeigt sich durch eine eindimensionale, periodische Schwankung der Farbdichte quer zur Druckrichtung (Osman Arslan, Zygmunt Pizlo und Jan P. Allebach 2005; Briggs, Murphy und Pan 2000). Die Periodizität des Fehlerbildes weist eine Verbindung zum Druckkopflayout auf. Es tritt bei baugleichen Druckköpfen in gleicher Form in Erscheinung. Durch eine zweidimensionale schnelle Fourier-Transformation der Bildmatrix in die Frequenzdomäne lässt sich die charakteristische Übertragungsfunktion bestimmen (Stöckle 2013). Durch Entfernen aller Frequenzen oberhalb von 1 Hz wird das Rauschen der Messung herausgefiltert und zurück bleibt in der räumlichen Domäne das Bandingsignal. Wird dieses invertiert und zum ursprünglichen Druckjob hinzugefügt, so wird der Effekt um bis zu 50% reduziert und nahezu unsichtbar (Stöckle 2013).

Ein Bestandteil des Druckkopfes ist die Tintenversorgung an die Düsen. Die zu druckende Tinte wird aus einem Tank in den Druckkopf geleitet und dort über zahlreiche Kanäle an die Düsen verteilt. Es ist erforderlich, dass in der Versorgung trotz wechselnder Volumenströme der Tinte keine merklichen Druckschwankungen auftreten. Der Tintenbehälter wird in einem definierten Höhenunterschied unterhalb der Druckköpfe angebracht, um dadurch einen erforderlichen Unterdruck zu ermöglichen. Befindet sich der Tintentank zu hoch, so fließt die Tinte unkontrolliert aus den Düsen heraus. Hängt der Tank zu niedrig, dann sind die Aktuatoren, z. B. Piezo-Elemente, nicht in der Lage, die nötige Kraft aufzubringen, um ein Tröpfchen aus dem Versorgungskanal anzusaugen und durch die Düse auf das Papier zu feuern. Bei korrektem Höhenunterschied zwischen Tintenbehälter und Druckkopf herrscht der nötige Vordruck, der unter Umständen Schwankungen unterliegt. Von der Tintenzuleitung des Kopfes verästeln sich nach und nach mehrere Leitungen bis zuletzt eine oder zwei Düsenreihen von einem Kanal versorgt werden. Besonders in diesen letzten, dünnen, düsen nahen Kanälen sind Druckschwankungen kritisch, da sie direkt die Verfügbarkeit von Tinte am Piezo-Element beeinflussen. Bei schnellen Wechseln zwischen hohem und sehr niedrigem gleichzeitigem Tintenausstoß aus den Druckdüsen, kann sich die Druckschwankung der Tintenversorgung zu höheren Amplituden aufschwingen und so die Tröpfchengröße beeinflussen. Auch die Verwendung unterschiedlicher Tinten kann durch deren rheologische Eigenschaften zu Schwierigkeiten führen. Pigmentgröße, Oberflächenspannung und Viskosität müssen korrekt mit Druckköpfen und Ansteuerung abgestimmt sein. Wird der Kanaldurchmesser nicht korrekt berücksichtigt, resultieren im Druckbild Schwankungen der Farbdichte. Selbiges gilt für die Spannungsversorgung. Die Aktuatoren, welche die Tropfen erzeugen, benötigen eine weitestgehend stabile Spannungsquelle. Eine Ursache für variierende Tropfengröße ist z. B. eine geringere Aktuatorspannung, die durch Spannungseinbrüche oder aus erhöhten

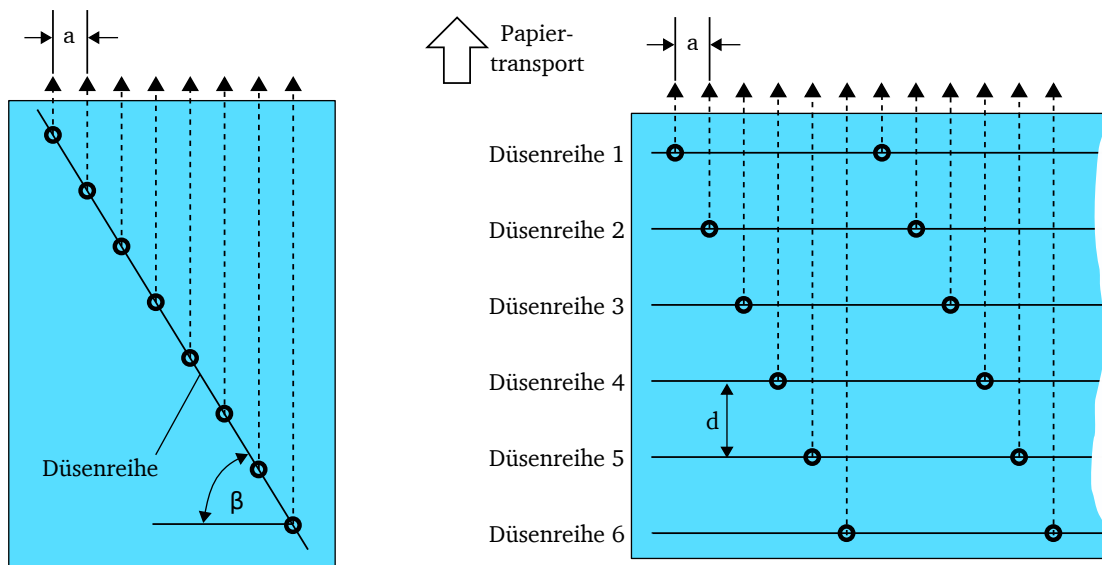


Abbildung 2.10.: Die beiden Darstellungen vergleichen zwei Prinzipien zur Erhöhung der Druckauflösung bei definiertem Platzbedarf einer Düse. In der links dargestellten Variante ist ein einreihiger Druckkopf mit einer um den Winkel  $\beta$  geneigten Düsenreihe ausgestattet. Durch den Neigungswinkel des Druckkopfes lässt sich der Düsenabstand  $a$  quer zur Druckrichtung stufenlos variieren. Die rechte Darstellung zeigt einen Druckkopf mit mehreren um den Abstand  $d$  versetzt angeordneten Düsenreihen (Kipphan 2001, S. 759).

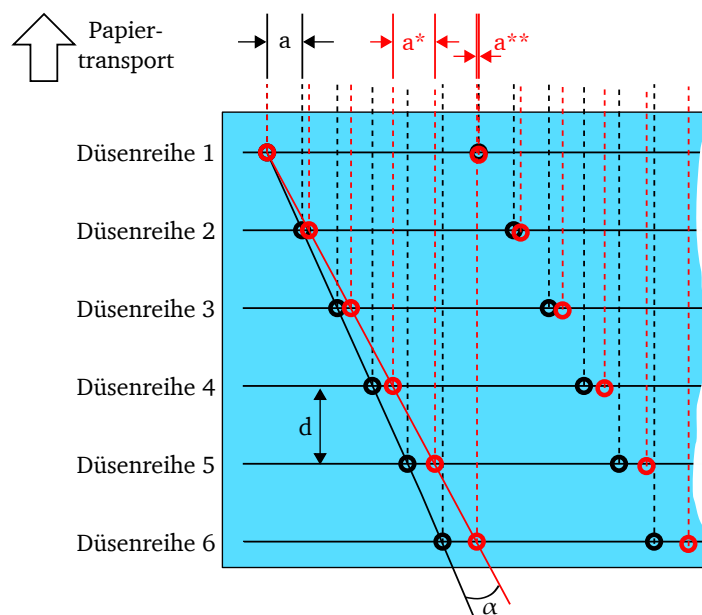


Abbildung 2.11.: Dargestellt sind zwei Abfolgen eines sechsreihigen Druckkopfes in optimaler Position (schwarz) und mit einer leichten Verdrehung von  $\alpha = 0.1^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn (rot). Die Druckrichtung verläuft vertikal. Beträgt der Reihenabstand  $d$  beispielsweise 5 mm, so resultieren durch die Scherung unterschiedliche Düsenabstände  $a^*$  und  $a^{**}$ . Dies führt dazu, dass der Tropfenausstoß der ersten Düse von Düsenreihe 6 und der zweiten Düse von Düsenreihe 1 in Druckrichtung betrachtet dieselbe Spur bedruckt.

Widerständen in Platinen und Leitungen für einzelne Köpfe resultiert. Die Schaltkreise müssen ausreichend gegen Schwankungen in Spannung und Strom abgesichert sein, die auftreten, wenn große Verbraucher – wie die Fixierung – starten oder stoppen und dabei in kurzer Zeit enorme Mengen an Energie umwandeln.

## Druckeinheit

Zur Erweiterung der bedruckbaren Breite werden in industriellen Druckmaschinen einzelne Druckmodule oder Druckköpfe modular zu einem nahezu beliebig breiten Inkjet-Array verbunden. Dieses wird als Druckwerk oder Druckeinheit bezeichnet. Da die bei Inkjet-Systemen verwendeten Druckköpfe gegenüber Platten und Rollen anderer Druckverfahren sehr kompakt sind, bezeichnet die Druckeinheit im Kontext dieser Arbeit nicht das Inkjet-Array einer einzelnen Tinte, sondern die Gesamtheit aller Druckköpfe aller Tinten in der Druckmaschine. Der Aufbau einer Druckeinheit ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Die Summe der Köpfe einer einzelnen Tinte wird als seitenbreite Anordnung bezeichnet. Die Druckköpfe lassen sich nach der Installation

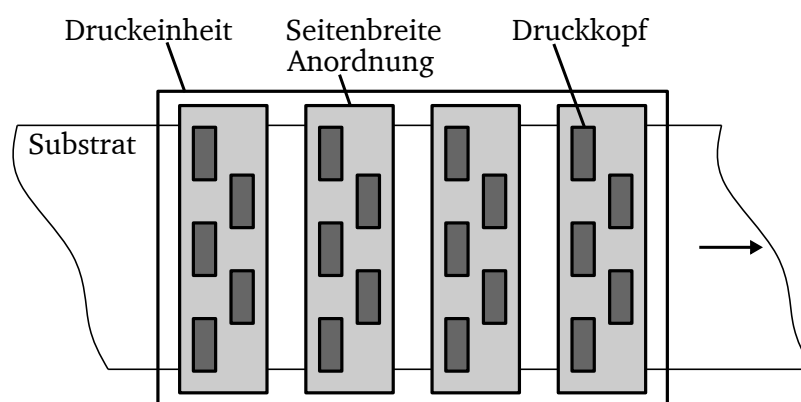


Abbildung 2.12.: Schematische Darstellung einer Druckeinheit. In diesem Beispiel sind jeweils fünf Druckköpfe pro Tinte zu einer seitenbreiten Anordnung zusammengefasst. Die vier seitenbreiten Anordnungen ergeben zusammen die Druckeinheit.

translatorisch und rotatorisch über Einstellschrauben justieren. Die rotatorische Korrektur lässt sich durch die vom Autor dieser Arbeit gemeinsam mit C. Rummelsberger erfundene und patentierte aufsteckbare Vorrichtung automatisieren. Dadurch werden die Druckköpfe über die Stellschrauben wiederholbar genau und präzise ausgerichtet (Schneider und Rummelsberger 2020). Durch korrekte Positionierung der Druckköpfe wird ein Versatz zwischen den Druckbereichen benachbarter Module verhindert. Ein Querversatz würde zu doppelt bedruckten Stellen oder unbedruckten weißen Spalten zwischen zwei Modulen führen. Moderne Systeme erlauben einen wiederholbar genauen Austausch einzelner Druckköpfe (Zapka, Pausch und Rapp 2008). Alternativ bieten beispielsweise die Druckköpfe von Fujifilm einen Austausch von lediglich der verschleißbehafteten Düsenplatte (Yoshinori 2014). Ein weiterer Freiheitsgrad, der Einfluss auf die Tropfenpositioniergenauigkeit hat, ist der Druckspalt, sprich der Abstand zwischen Druckköpfen und Substrat. Inkjet ist eine kontaktlose Drucktechnologie, d. h. es besteht ein kleiner Raum zwischen der Düsenöffnung und dem Substrat, den der Tintentropfen durchqueren muss. Je geringer dieser Druckspalt ist, desto kürzer ist der Tintentropfen den Luftverwirbelungen der Papierbahn, der Umgebungstemperatur und dem Luftwiderstand ausgesetzt. Somit wird eine genauere Positionierung der Tinte auf dem Substrat erreicht. Dem gegenüber sollte der Druckspalt groß genug sein, um Abrasion und Verschleiß des Düsenblechs durch Substratkontakt an Unebenheiten zu vermeiden. Letztlich müssen die seitenbreiten Anordnungen der einzelnen Tinten korrekt zueinander eingerichtet sein. Fehlerhafte Ausrichtung führt zu einem sogenannten Farbreger- oder Passerfehler, der an einem nicht deckungsgleichen Druckbild der Tinten zu erkennen ist.

---

Um solche Effekte zu vermeiden ist es außerdem erforderlich, dass die Papierbahn definiert gespannt und geführt ist, damit es zwischen dem Auftragen zweier Tinten nicht zu Schwankungen der Papierbahn kommt.

### **Druckkopfreinigung und Aufrechterhaltung der Druckfähigkeit**

Vor jedem Druckstart wird eine Reinigung der Druckköpfe durchgeführt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass selbst nach längeren Standzeiten beim Druckbeginn jede der vielen tausend Düsen von Produktionsdruckmaschinen so gut wie möglich funktioniert. Dieser Reinigungsvorgang läuft in der Regel vollautomatisch ab. Hierzu wird abseits der Papierbahn über dedizierten Auffangwannen der Pumpdruck erhöht und frische Tinte durch die Kanäle und Düsen gespült, um gegebenenfalls eingetrocknete Tinte zu beseitigen. Anschließend wird die Unterseite des Druckkopfes abgewischt, um Rückstände von Druckstoff oder Papierstaub zu entfernen. Das Abwischen kann auf mehrere Arten stattfinden. Dies kann beispielsweise händisch durch eine menschliche Arbeitskraft erfolgen, indem die Unterseite des Druckkopfes mit einem feuchten, fusseligen Tuch abgewischt wird. Dieser Prozess lässt sich auch automatisieren, indem das Tuch kontinuierlich von einer Rolle motorisiert abgewickelt und über die Unterseite des Druckkopfes gezogen wird. Alternativ erfolgt dieser Reinigungsschritt durch Einsprühen des Kopfes mit Reinigungsflüssigkeit und anschließendem Abziehen der gelösten Rückstände mittels Silikonlippe. In jedem Fall ist darauf zu achten, das Düsenblech und dessen Beschichtung nicht übermäßig zu strapazieren. Das Düsenblech ist die unterste Schicht des Druckkopfes, in der sich die Austrittsöffnungen der Düsen befinden. Dort auftretender Verschleiß beeinträchtigt langfristig die Präzision des Tropfenausstoßes oder führt leichter zu Ansammlungen von Tinte am Düsenaustritt, welche sich auch über mehrere Düsenreihen hinweg ausweiten können.

Während des Druckens lassen sich zusätzliche Maßnahmen nutzen, um das Eintrocknen von Tinte in den Düsen zu vermeiden oder möglichst lange hinauszuzögern. Ein gebräuchlicher Weg, das Eintrocknen zu verhindern, ist sicherzustellen, dass jede Düse regelmäßig druckt, damit die Tinte in Bewegung bleibt und in den Düsenkammern Austausch stattfindet. Da dies bei variabel zu druckenden Inhalten nicht grundsätzlich für jede einzelne Düse gewährleistet ist, werden von vielen Herstellern Bereiche vorgesehen, in denen jede Düse gezielt angesteuert wird. Diese Auffrischungsbereiche befinden sich beispielsweise zu Beginn oder Ende einer Seite und müssen in einer geeigneten Nachverarbeitung herausgetrennt werden. Da dies den nutzbaren Bereich einschränkt, gibt es alternative Ansätze, bei denen alle Düsen nach einem zufälligen Muster in unregelmäßigen Abständen kleine, einzelne, kaum sichtbare Tropfen ausstoßen (Lund und Ward 1997) oder mit einer Waveform angesteuert werden, die keinen Tropfen erzeugt (Zollner u. a. 2016). In beiden Fällen wird eine geringere Verzögerung von eintrocknenden Düsen im Vergleich zu den Auffrischungsbereichen erreicht, trotzdem wird die Nutzbarkeit der Düsen merklich verlängert gegenüber dem Betrieb ohne Maßnahmen gegen das Eintrocknen.

Auch externe Einflüsse können die Druckfähigkeit einzelner Düsen beeinträchtigen. Als externe Einflüsse sind hier maßgeblich Schwebstoffe zu erwähnen, die innerhalb der Druckmaschine durch die Luft wirbeln. In diese Kategorie fallen beispielsweise die bereits erwähnten Satelliten, die derart leicht sind, dass sie vom Luftstrom der bewegten Papierbahn mitgerissen werden. Selbst bei optimaler Waveform können Satelliten bei verschlissenen oder leicht eingetrockneten Düsen auftreten. Durch Verwirbelungen werden diese Partikel an anderen Düsenplatten abgelagert. Besonders kritisch ist dies bei inline aufgetragener Grundierung, die auf dem Papier das Zerfließen und Ineinanderfließen von Tinten verhindert. Mischt sich die Grundierung in flüssiger Form mit Tinte, führt das zu Verklumpungen, die in der Lage sind, einzelne Düsen in kurzer Zeit zu verstopfen.

### **Weiterverarbeitung**

Inkjet-Druckmaschinen für den Produktionsdruck sind komplexe Systeme aus zahlreichen Komponenten. Dazu gehören die meist zentrale Druckmaschinensteuerung der eingebetteten Elektronik, der Bahntransport,

---

die Fixierung und verschiedene weitere Arten der Nachverarbeitung. Die Druckgerätesteuerung steuert die Druckmaschine und handhabt die verbauten Aktoren und Sensoren sowie die Interaktion mit dem Bediener. Der Bahntransport befördert das Substrat von einem Stapel oder einer Rolle mit konstanter Bahngeschwindigkeit unter der Druckeinheit hindurch und sorgt dabei für eine adäquate Lage des Substrats. Dieses durchläuft mit dem aufgetragenen Druckstoff im Weiteren die Fixierung, wo der Druckstoff auf dem Bedruckstoff getrocknet, bzw. ausgehärtet wird und gegebenenfalls anschließende Kühlung, um die Temperatur der Papierbahn zu senken. Das Druckprodukt ist damit nicht mehr anfällig gegen nachträglichen Abrieb. Anschließend lässt sich das Druckprodukt an Kamera- und Bilderfassungssystemen vorbeiführen, um die Druckresultate aufzuzeichnen, hierauf wird im folgenden Kapitel 2.2 genauer eingegangen. Bei Papierrollen ist ein direktes Aufwickeln im Anschluss möglich, um den Transport zu einer entkoppelten Nachverarbeitung zu ermöglichen. Alternativ lassen sich an die Druckmaschine Schneide- und Falтанlagen anbinden, die Papierbogen oder -bahnen auf die erforderliche Applikation hin verarbeiten und sogar kuvertieren oder binden. Im Prozessschritt der Schneideanlage wird das Ausschneiden und Aussortieren der zuvor erwähnten Auffrischungsbereiche realisiert. Hierfür gibt es eine Vielzahl von Schneideanlagen, die gegebenenfalls mit Doppelmessern ausgestattet sind. Mithilfe besagter Messer kann je Seite ein Beschnitt – der Bereich zwischen den beiden gleichzeitig schneidenden Messern – herausgetrennt und als Abfall aussortiert werden. Mit *Hunkeler* Schneidemaschinen ist beispielsweise ein variabler Beschnitt bis 50 mm möglich (Hunkeler AG 2017b). Alternativ erfolgt das Trennen der Seiten mit einfachen Schneidmessern und beim anschließenden Stapeln der Seiten wird der Beschnitt für den gesamten Stapel auf einmal abgeschnitten.

## **2.2. Kamertechnologie und deren Einsatz in Inspektionssystemen**

Der Stand der Technik zu Inspektionssystemen zeigt auf, welche Funktionalität bereits existiert und insbesondere in Hinblick auf das Druckerzeugnis von Herstellern geliefert wird. Es wird ein Überblick über verfügbare Hersteller und Kamerainspectionssysteme gegeben. Als Hinführung werden zuvor Aufbau und Grundlagen von industriellen Kameras erläutert. Zur klaren Strukturierung der Arbeit wird fortan terminologisch zwischen Druckbild, also den zu druckenden Informationen, und Kamerabild, also den durch eine Kamera digitalisierten Informationen, unterschieden. Wenn von Bilderfassung gesprochen wird, ist zudem grundsätzlich das Kamerabild gemeint.

### **2.2.1. Grundlagen zu industriellen Kameras**

Eine Kamera ist ein technisches Gerät, das dazu dient, von Objekten remittiertes und reflektiertes Licht zu quantifizieren. Bei aktuellen Kameras sind die funktionellen Gruppen der Bildsensor, die interne Elektronik, welche die Signale digitalisiert und verarbeitet, und die Datenschnittstelle, über die das Kamerabild übertragen wird. Bei den Bildsensoren wird zwischen ladungsgekoppeltem Sensor (Charge-Coupled Device (CCD)) und Metall-Oxid-Halbleiter (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS)) unterschieden, beides sind photoresistive Halbleiter auf Siliziumbasis. Die CCD-Sensoren dominieren durch bessere Signalgüte in besonders anspruchsvollen Branchen, wie Hochleistungskameras und Astronomie. In einfacheren Gebieten, wie Machine Vision, werden sie zunehmend durch CMOS-Sensoren verdrängt (Blanc 2001). Vorteile von letzteren sind geringe Zugriffszeiten, hohe Geschwindigkeiten sowie ein in den letzten Jahren optimierter Signal-Rausch-Abstand (Blanc 2001) (Signal Noise Ratio (SNR)). Als Bauform gibt es etablierte Formate von Flächensensoren (4:3, 3:2, 16:9) oder Zeilensensoren, bei denen der Bildsensor aus einer oder wenigen Zeilen besteht. Verbreitet ist die Nutzung einer Zeile für monochrome Aufnahmen und drei Zeilen für Farbaufnahmen. Ein weiterer Vorteil der CMOS-Bildsensoren gegenüber CCD ist besonders bei Zeilensensoren die Art des Auslesens der Photoelemente. Bei CMOS werden alle Photoelemente einzeln

ausgelesen, während bei CCD die Ladung entlang der Bildzeile zu einem zentralen Auslesechip transportiert wird. Hierbei kommt die Übertragungseffizienz (Charge Transfer Efficiency (CTE)) zum Tragen, also der Anteil des Signals der beim Weiterreichen an das benachbarte Photoelement erhalten bleibt. Diese CTE liegt bei hochwertigen Zeilensensoren etwa bei 99,999%, was sich erst bei großer Anzahl an Photoelementen negativ auf die Signalgüte auswirkt. Ähnlich wie das menschliche Auge sind auch photoresistive Halbleiter für Wellenlängen des Lichtspektrums unterschiedlich sensibel. Bildsensoren in industriellen Anwendungen nutzen für mehrfarbige Aufzeichnungen drei Photoelemente mit jeweils verschiedenen vorgeschalteten Lichtfiltern. Zum Einsatz kommen Rot-, Grün- und Blaufilter, die die Farben ihres jeweiligen Spektralbereichs durchlassen. Durch Aufteilung dieser drei Farbkanäle Rot, Grün, Blau (RGB) und geeignete Verstärkung der einzelnen Signale lassen sich bunte Aufnahmen erzeugen. Das einfallende Licht auf dem Sensor wird durch eine diskrete Verschlusszeit getaktet und meist auf einen Bereich von 8 Bit digitalisiert, d. h. das auf die Photodiode fallende Licht während der Aufnahmedauer wird durch die Kameraelektronik in einen ganzzahligen Wert zwischen 0 und 255 übersetzt. Dieser Wert wird als Sensorantwort bezeichnet. Die Photoelemente entsprechen in der digitalisierten Aufnahme den Pixeln und deren Gesamtheit ergibt das Kamerabild. Dabei entspricht eine Sensorantwort von 0 einem schwarzen Pixel im Kamerabild und ein Wert von 255 einem weißen Pixel. Im Kamerabild werden die Sensorantworten der Photoelemente als Pixelwerte bezeichnet. Um die Konvertierung von einfallendem Licht zu 8 Bit wiederholbar und für alle Photoelemente gleichermaßen zu ermöglichen, ist eine Kalibrierung der Kamera per Dunkel- und Weißabgleich nötig. Diese beiden Schritte und deren Auswirkung auf die Abhängigkeit zwischen Lichtintensität und Sensorantwort sind schematisch in Abbildung 2.13 dargestellt. Zum Dunkelabgleich wird bei verschlossener Blende eine

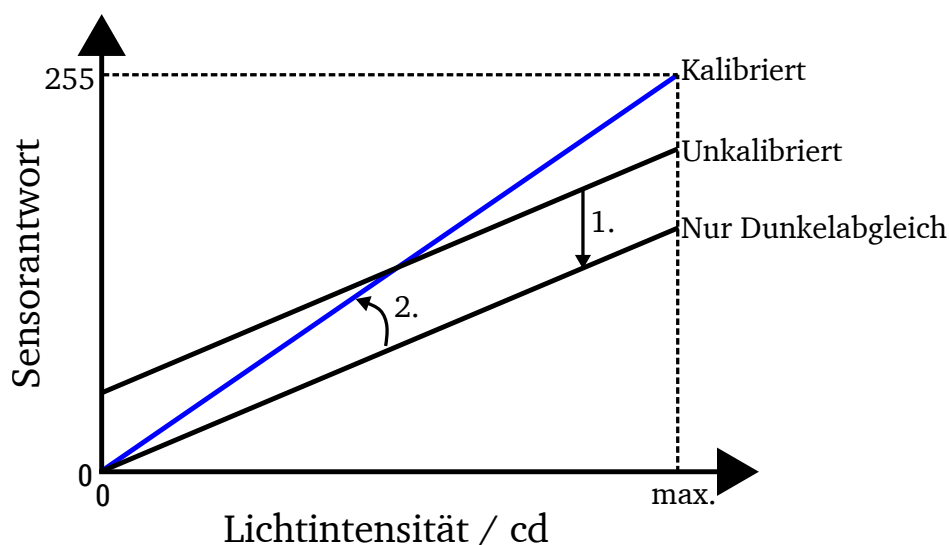


Abbildung 2.13.: Der Bildsensor eines Kamerasystems muss für den Anwendungszweck kalibriert werden, um eine korrekte und wiederholgenaue Messung zu schaffen. Im ersten Schritt wird durch den Dunkelabgleich der Nullpunkt kalibriert (1) und im zweiten Schritt wird durch einen Weißabgleich die korrekte Skalierung der Sensorantwort (2) erreicht. Somit wird entsprechend der blauen Linie der komplette Wertebereich der Sensorantwort von 0 bis 255 (8 bit) bis zur beabsichtigten, maximalen Lichtintensität ausgeschöpft.

Aufnahme durchgeführt, bei der die Messwerte jedes Photoelements als Nullpunkt für zukünftige Aufnahmen hinterlegt werden. Dies entspricht der Verschiebung der unkalibrierte Gerade in Abbildung 2.13 entlang des 1. Pfeils um einen konstanten Betrag, damit sie den Nullpunkt schneidet. Damit wird das Rauschen des Sensors neutralisiert. Für den Weißabgleich wird bei definierter Beleuchtung eine weiße Referenzvorlage

---

aufgenommen. Durch die Messwerte des einfallenden Lichts wird der Verstärkungsfaktor des jeweiligen Photoelements bestimmt, um die Sensorantwort so auf einen einheitlichen Erfassungsbereich zu skalieren. Diese Verstärkung wird in Abbildung 2.13 durch die Drehung um den Nullpunkt entlang des 2. Pfeils dargestellt. Der Weißwert, auf den die Skalierungsfaktoren eingestellt werden entspricht z. B. 80 – 90% des Messbereichs, sodass bei stärkerem Lichteinfall der Sensor nicht überbelichtet. Bei einer eingestellten Skalierung von 80% entspricht eine Sensorantwort von 200 der Remission der Referenzvorlage bei einer definierten Beleuchtung. Die Sensorantwort von 255 entspricht dem maximal messbaren Wert und stärkere Beleuchtung hat aufgrund der Sättigung der Photoelemente keinen Einfluss auf die Sensorantwort. Auf Transformationen in andere Farbräume, wie beispielsweise Normfarbwerte, *Lab* und *LCh* wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, da hierfür eine Farbkalibrierung mit geeichten Farbtafeln durchgeführt oder ein Photospektrometer eingesetzt werden müsste. Die in Kapitel 2.1.2 beschriebene Farbbeurteilung wird folglich auf die quantitative Messung von Helligkeit beschränkt und nicht auf Farbkoordinaten bezogen. Die 255 Pixelwerte je Farbkanal genügen für alle weiteren Untersuchungen.

Von Industriekameras wird erwartet, dass sie hohe Bildfrequenzen bereitstellen, dafür wird ein leistungsfähiger programmierbarer Mikrocontroller (Field Programmable Gate Array (FPGA)) genutzt. Dieser liest die Photoelemente aus, digitalisiert die Werte und wandelt sie in das Format um, mit dem sie über die Schnittstelle übertragen werden. Als Schnittstellen sind USB3.0, Gigabit Ethernet, Camera Link und CoaXPress gebräuchlich. USB3.0 und Gigabit Ethernet werden beispielsweise in vielen Kameras des Herstellers *Baumer* verwendet. *Chromasens* nutzt Camera Link für seine *allPixa* Serie. Die *Electric Line Scan Bar* von *Mitsubishi* wird sowohl mit Camera Link als auch CoaXPress angeboten, wobei die Serie *CX* mit CoaXPress, aufgrund der schnelleren Datenübertragung des Standards, wesentlich höhere Zeilenfrequenzen erreicht. Bei einer Auflösung von 600 dpi wird selbst bei 19008 Pixel (px) eine Zeilenfrequenz von 55 kHz ermöglicht (Mitsubishi Electric Europe B.V. 2017). Dabei wird die maximale Datenrate des Standards CoaXPress Rev. 1.1.1 von  $6,25 \frac{\text{Gb}}{\text{s}}$  (JIA 2015) überschritten, weswegen zweimal vier CoaXPress-Leitungen verwendet werden. Von *Teledyne Dalsa* gibt es verschiedene Flächen- und Zeilenkameras zur optischen Bilderfassung, die im Gegensatz zum einzeiligen Kontakt-Bildsensor von *Mitsubishi* im kompakten Gehäuse untergebracht sind und mit geeigneter Optik in einiger Entfernung zum Objekt platziert sein müssen. Die *Piranha4K* mit Farbzeilensensor und Schnittstelle Camera Link unterstützt bei 4096 px bis zu 55 kHz bei Übertragung mit Camera Link Full (Dalsa 2018). Über den Standard Camera Link werden in der Full-Konfiguration mit 85 MHz bis zu  $680 \frac{\text{MB}}{\text{s}}$  übertragen (AIA 2012). Der Kamerahersteller *Baumer* nutzt bei seinen Industriekameraserien als Schnittstellen vorwiegend die etwas moderneren Standards GigE Vision und USB3 Vision (Baumer Electric AG 2017), die über Ethernet und USB-Schnittstelle arbeiten und auch außerhalb der Industrie breite Verwendung finden. Dabei ermöglicht GigE Vision, entsprechend AIA (2013), eine Übertragungsrate von  $125 \frac{\text{MB}}{\text{s}}$  und USB3 Vision, gemäß AIA (2015),  $350 \frac{\text{MB}}{\text{s}}$ . Für weitere Details und Einzelheiten zur Funktionalität von Kameras sei hier beispielsweise auf die einschlägige Literatur von Holst (2007) zu Bildsensoren und Kamerasystemen verwiesen.

Die Verwendung einer Kamera als industrietaugliches Bilderfassungssystem erfordert zusätzliche Komponenten wie Spannungsversorgung, Objektiv, Beleuchtung, Ansteuerung und Recheneinheit. Diese Komponenten ergeben zusammen den weiterhin als Kamerasystem bezeichneten Aufbau und sind schematisch in Abbildung 2.14 dargestellt. Die Aufgabe der Spannungsversorgung wird hier aufgrund ihrer Trivialität nicht näher erklärt. Das Objektiv sorgt für eine Abbildung des Objektes mit definierter Vergrößerung in der Bildebene auf dem Bildsensor. Das vom Objekt remittierte Licht wird somit gezielt auf den Bildsensor der Kamera geleitet. Eine vereinfachte Darstellung des Strahlengangs findet sich in Abbildung 2.15. Die drei Strahlen vom Objekt aus der Objektebene werden von der Linse gebrochen und erzeugen ein Bild in der Bildebene (Fischer 2001). Die Objektweite und Bildweite für eine scharfe Abbildung hängen dabei von der Brennweite, also dem Abstand von der Linse zum Brennpunkt ab. Eine intensive Beleuchtung des Objektes erlaubt der Kamera kurze Verschlusszeiten, die nötig sind, um den hohen Aufzeichnungsgeschwindigkeiten

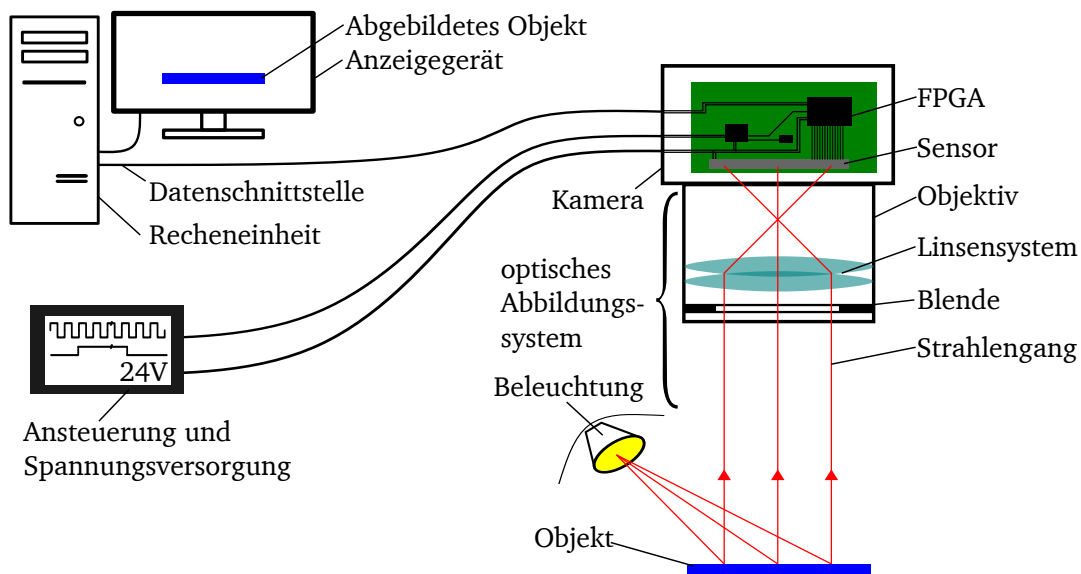


Abbildung 2.14.: Schematischer Aufbau eines Bilderfassungssystems mit Beschriftung der wichtigsten Komponenten. Der Sensor in der Kamera erfasst das Licht, das vom Objekt remittiert oder reflektiert und durch das Linsensystem fokussiert wird. Der Lichteinfall wird vom FPGA im Takt der Ansteuerung digitalisiert und an die Recheneinheit übertragen. Dort ist eine Weiterverarbeitung und die Anzeige des Objektes möglich.

gerecht zu werden. Da sich die Papierbahn kontinuierlich bewegt und dabei aufgezeichnet wird, eignet sich für diese Anwendung ein Zeilensensor eher als ein Flächensensor. Ersterer benötigt nur direkt gegenüber

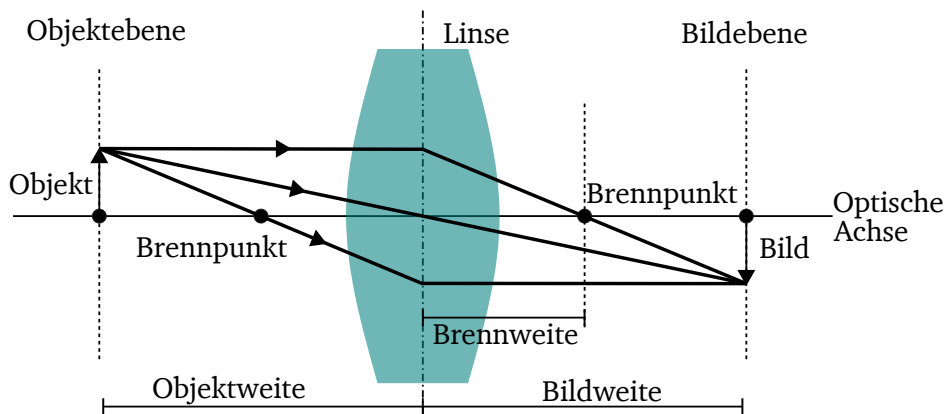


Abbildung 2.15.: Die Darstellung zeigt die Konstruktion einer Abbildung an einer Linse. Damit wird der Strahlengang an einem Objektiv in vereinfachter Form dargestellt. Angelehnt an Fischer (2001).

der Sensorzeile eine flache Oberfläche des Substrates, was durch eine dort positionierte Walze gewährleistet wird. Bei einem Flächensensor hingegen muss sichergestellt sein, dass die Papierbahn sich auch in Bewegungsrichtung stabil innerhalb der Objektebene der Optik befindet. Auf der Recheneinheit erfolgen die Verarbeitung und das Speichern des Kamerabildes. Das Kamerabild ergibt sich durch das Aneinanderfügen einer frei wählbaren Anzahl an Bildzeilen, wodurch beliebige und variable Bildlängen realisiert werden. Um sicherzustellen, dass der korrekte Inhalt aufgezeichnet wird, ist eine Ansteuerung erforderlich, die



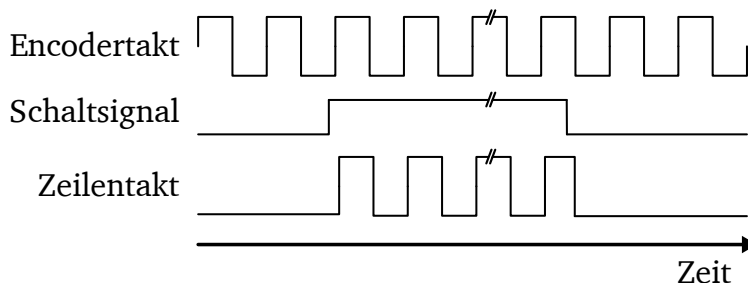


Abbildung 2.16.: Notwendige Signale, um die Bilderfassung einer Kamera zu steuern. Ein Takt, um den Moment der Erfassung festzulegen, und ein Schaltsignal, um Beginn und Ende der Aufzeichnung zu definieren.

Signale entsprechend dem Verlauf aus Abbildung 2.16 erzeugt. Ein Drehgeber an einer Walze erfasst die Bahngeschwindigkeit und liefert den Takt für die Kamera. Das Schaltsignal ist das Anlegen einer Spannung für die Dauer der Aufzeichnung. Mit dem Entfernen des Signals wird die Aufzeichnung von Kamerabildzeilen beendet. Dieses Schaltsignal wird gegebenenfalls durch einen Markensensor an der Papierbahn oder einen intelligenten Abgleich mit den Druckdaten in der Druckmaschinensteuerung bereitgestellt (Schneider und Stöckle 2021c). Die aufgezeichneten Zeilen werden zu einem Kamerabild zusammengefügt und zur Weiterverarbeitung über eine der oben genannten Datenschnittstellen zur Recheneinheit übertragen.

Kombiniert mit entsprechender Software zur Verarbeitung und Darstellung des Kamerabildes wird aus einem optischen Bilderfassungssystem ein Inspektionssystem. Solche Systeme bieten eine generelle Erkennung von Fehlern im Kamerabild. Dies umfasst Produktionsfehler der Papierbahn sowie Druckfehler, wie sie im vorherigen Kapitel 2.1.2 erwähnt wurden. Die Inspektionssysteme kombinieren meist mehrere Auswertungen. Neben dem Prüfen der Datenintegrität sind zahlreiche Systeme in der Lage Gleichmäßigkeit der Farbdichte, Farbregister und Streifigkeit zu messen und Strichcodes sowie Text zu erkennen. Es findet im Kontext dieser Arbeit keine Überprüfung von variablen Inhalten, wie Adressfeldern oder Strich- und Quick Response (QR)-Codes statt.

### 2.2.2. Kommerziell verfügbare Inspektionssysteme

Der grundsätzliche Gedanke, Kamerasysteme in Druckmaschinen einzubauen, ist nicht neu. Es gibt zahlreiche Hersteller und Anbieter von Komplettlösungen, die eine Bildanalyse durchführen und den Bediener der Druckmaschine über aufgetretene Fehler informieren. Solche Kontrollsysteme existieren für verschiedene Prozessschritte bei der Herstellung des Druckprodukts. Sie erlauben vor dem Druckprozess eine Prüfung der Papierbahn auf Mängel, danach die Kontrolle der Qualität und Korrektheit der Druckinformation und in der Weiterverarbeitung eine anschließende Untersuchung von Nachverarbeitungsschritten. Ausschließlich die Überwachung des Druckbildes wird in dieser Arbeit betrachtet.

Die primären Kunden dieser Hersteller sind die Nutzer der Produktionsdruckmaschinen, wie sie von *Hewlett Packard*, *Fuji*, *Rico* oder *Canon* hergestellt werden. Durch diese Vernetzung ergibt sich ein guter Überblick über vorherrschende Hersteller und Systeme. Persönliche Anfragen bei den jeweiligen Anbietern von Lösungen liefern zahlreiche Informationen über den Stand der Technik. Den Kontaktpersonen wurde ein Anforderungskatalog vorgelegt, in dem sie ankreuzten, welchen Funktionsumfang die von ihnen vertriebenen Systeme bieten. Die folgende Tabelle 2.1 zeigt das Ergebnis dieser persönlichen Angebotsanfrage für die erreichbaren Unternehmen. Für weitere Dienstleister und Systeme, die im Rahmen dieser Umfrage nicht erfasst wurden, ergeben sich die Informationen aus Webpräsenz, Flyern und Broschüren. Diese sind in der Tabelle 2.2 zusammengefasst und soweit möglich nach denselben Anforderungen bewertet.

Tabelle 2.1.: Übersicht der Funktionszusagen der angefragten Unternehmen und Zulieferer für Inspektionssysteme auf Basis eines Fragenkataloges.

Anforderung	Hersteller	Axode <sup>1</sup>	Erhardt+Leimer <sup>2</sup>	Futec <sup>3</sup>	Hunkeler <sup>4</sup>	Videk <sup>5</sup>	Isra Vision <sup>6</sup>	QuadTech <sup>7</sup>	QI Press Controls <sup>8</sup>	EyeC <sup>9</sup>	BST Eltromat <sup>10</sup>	Tecna <sup>11</sup>	CPP-internes System
Bis 21" breit		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Bis 160 m/min schnell		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Prüfung Strichcodes		✓	✗	✓	✓	✓	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Prüfung Datenintegrität		✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Messung Farbreister		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Messung Farbdichte		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓*	✓	✓	✓	✓	✓
Messung Düsenausfälle		✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓
- Düsendgenaue Zuordnung		✓**	✗	✗	✓**	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
- Ohne Testseite		✓**	✗	✓	✓**	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✗
- Trendanalyse		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Erkennung Grundierung		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

\* Mit separatem Inspektionssystem möglich

\*\* Schließt sich mit zweiter Anforderung aus

<sup>1</sup> (Axode Corporation 2017) (Axode Corporation 2018)

<sup>2</sup> (Erhardt+Leimer GmbH 2017a) (Erhardt+Leimer GmbH 2017b)

<sup>3</sup> (FUTEC Europe GmbH 2017)

<sup>4</sup> (Hunkeler AG 2017a)

<sup>5</sup> (Videk Ink 2017) (Videk Ink 2018)

<sup>6</sup> (Isra Vision 2017) (Isra Vision 2022)

<sup>7</sup> (QuadTech Europe 2012a) (QuadTech Europe 2012b)

<sup>8</sup> (Q.I. Press Control 2017) (Q.I. Press Control 2016)

<sup>9</sup> (EyeC GmbH 2020)

<sup>10</sup> (BST eltromat International 2017b) (BST eltromat International 2017a)

<sup>11</sup> (Tecna Srl 2017) (Tecna Srl 2014)

Tabelle 2.2.: Übersicht des Funktionsumfangs weiterer Unternehmen und Zulieferer für Inspektionssysteme auf Basis frei zugänglicher Informationen.

Anforderung	Hersteller	AVT <sup>1</sup>	Heidelberg <sup>2</sup>	KBA Ltd <sup>3</sup>	Komori <sup>4</sup>	Lithec <sup>5</sup>	Manroland <sup>6</sup>	Microscan <sup>7</sup>	Mühlbauer <sup>8</sup>	Parvis <sup>9</sup>	PC Industries <sup>10</sup>	Tectonic International <sup>11</sup>	Vision Experts <sup>12</sup>
Bis 21" breit		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓
Bis 160 m/min schnell		✓	✓	✓		✓	✓		✓	✗	✓	✗	
Prüfung Strichcodes		✓				✓	✓	✓		✓	✓	✗	✓
Prüfung Datenintegrität		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Messung Farbreister		✓	✓	✓	✓	✓	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Messung Farbdichte		✓	✓	✓	✓	✓	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Messung Düsenausfälle		✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
- Düsengenaue Zuordnung		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
- Ohne Testseite		✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
- Trendanalyse		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Erkennung Grundierung		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✗

\* Mit separatem Inspektionssystem möglich

<sup>1</sup> (AVT LTD 2018)

<sup>2</sup> (Heidelberger Druckmaschinen AG 2016)

<sup>3</sup> (KBA-Sheetfed Solutions AG & Co. KG 2016)

<sup>4</sup> (Komori Corporation 2016)

<sup>5</sup> (Lithec GmbH 2017)

<sup>6</sup> (manroland sheetfed GmbH 2015b) (manroland sheetfed GmbH 2015a)

<sup>7</sup> (Omron Microscan Systems Inc 2017) (Omron Microscan Systems Inc 2018)

<sup>8</sup> (Mühlbauer GmbH & Co. KG 2018)

<sup>9</sup> (PARVIS systems and services s.p.a. 2018)

<sup>10</sup> (Baldwin Vision Systems 2017)

<sup>11</sup> (Tectonic International LTD 2018)

<sup>12</sup> (Vision Experts GmbH 2018)

---

Das Inspektionssystem *Axode 180 neo* wird von seinem Hersteller *Axode* als innovative Echtzeit-Technologie zur Überwachung von Dokumentendruck mit Kameras beschrieben (Axode Corporation 2018). Zur Durchführung der Untersuchungen nutzen der *Axode 180 neo*, wie auch der *Web Inspection WI6* (Hunkeler) und das CPP-interne Kamerasystem ein Testmuster, das eine eindeutige Zuordnung von Düsenausfällen ermöglicht. Die beiden erstgenannten Systeme sowie *DokuVision Pro* (Videk), *EasyMax.GS* (Futec), *JetControl S* (QI Press Controls), *ProofRunner* (EyeC), *WebVision* (Tecnau), *Apollo 30k* (AVT) und *InlineInspector 2.0* (Manroland) liefern alternativ eine Erkennung von Streifen im Druckbild. Wie fein diese Streifen für eine Detektion sein dürfen, hängt von der Auflösung des verwendeten Sensors ab, denn wie auch das System von EyeC, führen *iPQ-Check* (BST eltromat), *SMARTSCAN* (Erhardt+Leimer), *Prinect Inspection Control 2* (Heidelberg), *Print-Star* (Isra Vision), *QualiTronic ColorControl* (KBA Ltd.), *PQA-W Series* (Komori), *LithoInspect Inline* (Lithec), *Label Vision Systems LVS-7000* (Microscan) und *Tema Pi-Sheets* (Mühlbauer) einen Bildvergleich mit einer Referenzdatei durch. Die meisten dieser Systeme haben ihre Stärke im Verpackungs- und Etikettendruck, wo oft derselbe Druckjob verwendet wird. Bei Labeln und Etiketten wird mit der Prüfung der Datenintegrität die Korrektheit von variablen Inhalten gewährleistet. Die genaue Vorgehensweise ist beispielsweise in der Bedienungsanleitung von *Microscan* beschrieben (Omron Microscan Systems Inc 2018).

Nur sehr wenige Anbieter von Inspektionssystemen befassen sich mit der Detektion von farbloser Grundierung. *Parvis* hat sich mit seinem Inspektionssystem *Proxima* auf die Überprüfung von Geldscheinen spezialisiert und erlaubt daher eine Kontrolle von Sicherheitsmerkmalen wie farbloser Tinte. Auch *PC Industries* mit dem System *Guardian PQV* und *Tectonic International* mit dem *Panther* bieten explizit die Möglichkeit verschiedener Beleuchtungsarten zur Erkennung von UV-fluoreszenten Flüssigkeiten.

*QuadTech* mit ihrer *AccuCam* und *Tectonic International* haben sich konstruktiv in eine etwas andere Richtung der Produktinspektion begeben. Sie stellen ein Kamerasystem bereit, das nicht die komplette Bahnbreite abdeckt, sondern auf einer Traverse motorisiert quer bewegt wird. Dies erlaubt Detailaufnahmen in einem frei definierbaren Interessensbereich. Die Unternehmen *QuadTech* und *PC Industries* wurden im Jahre 2017 von der *Baldwin Technology Company* übernommen, wodurch seither *Guardian PQV*, *AccuCam* und weitere Inspektionssysteme aus einem Hause vermarktet werden (Du Mez 2017). *Bell&Howell* vertreibt das System *WebVision* (Bell and Howell LLC 2013) des ursprünglichen Unternehmens *LasermaxRoll*, welches 2012 von *Tecnau* aufgekauft wurde. Das *WebVision* Inspektionssystem ist ein schrankartiges Modul mit eigenen Walzen, das mit geringem Aufwand hinter der Druckmaschine positioniert wird. *Advanced Vision Technology* nutzt seit 2014 für seine Inspektionssysteme das Kamerasystem *NyScan* von *Erhardt+Leimer*. Die *Vision Experts GmbH* gehört seit dem Jahr 2015 zu *Isra Vision*, die mit dieser Firmenübernahme ihr Kerngeschäft erweitert haben (Isra Vision AG 2015). *Vision Experts* vermarktet weiterhin unter eigenem Namen das Inspektionssystem *VE 4000+*, das im Digitaldruck für pharmazeutische Erzeugnisse Verwendung findet.

Bei dem CPP-internen Kamerasystem handelt es sich um ein integriertes Inspektionssystem in die Druckmaschine von CPP. Die zugrunde liegende Recheneinheit profitiert von der Kenntnis über die Druckeinheit und erzeugt daraufhin zielgerichtet Testmuster, synchronisiert die Kamerabildaufzeichnung, wertet das Kamerabild aus und übermittelt die Ergebnisse an die Druckmaschine.

### 2.2.3. Nutzung von Inspektionssystemen in Druckmaschinen

Der Bediener einer Druckmaschine hat jederzeit die Möglichkeit, den Druckprozess zu unterbrechen und mit geschultem Auge oder einer Lupe das vorliegende Druckprodukt hinsichtlich dessen Druckqualität zu prüfen. Da dies aber immer nur eine subjektive Beurteilung eines zufällig ausgewählten Ausschnitts ist und eine Reduktion von Produktivität zur Folge hat, bietet sich der Einbau einer Kamera an. Im Kapitel 2.1 wurden bereits verschiedene Effekte beschrieben, die zu einer Minderung der Druckqualität führen. Diese wurden im vorangegangenen Abschnitt 2.2.2 aufgegriffen und in die Marktanalyse einbezogen. Obwohl

von vielen Druckbildfehlern die Ursache bekannt ist, können die Fehler meist nicht oder nur unter großem Aufwand konstruktiv vermieden werden. Sie treten durch zufällige, unvorhersehbare Ereignisse oder durch Alterungsprozesse auf. Deshalb ist es nötig, auftretende Druckbildfehler zu erkennen, messen oder quantitativ zu bestimmen und anschließend an die Druckmaschine zu melden. In dieser Arbeit werden Kamerasysteme in drei Stufen nach dem Grad ihrer Interaktion mit der Druckmaschine unterteilt: unabhängig, interaktiv und vollintegriert. Diese Stufen sind in Form von Pfeilen in der Abbildung 2.17 dargestellt, die sich an Abbildung 2.3 anlehnt.

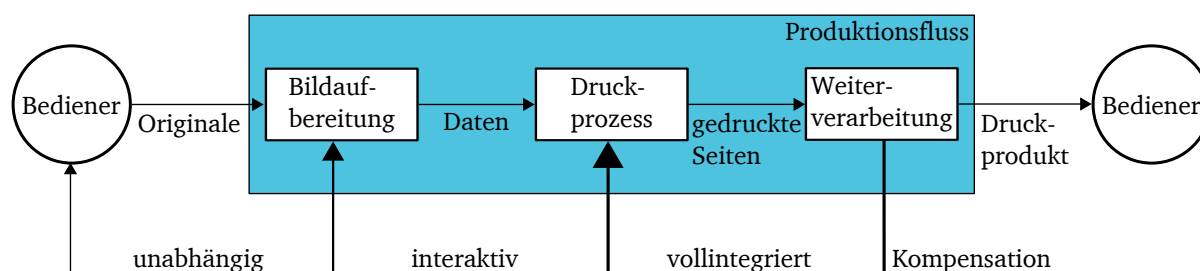


Abbildung 2.17.: Es gibt drei unterschiedlich stark mit der Druckmaschine interagierende Stufen von Inspektionssystemen. Unabhängige Systeme sind lediglich in der Lage, den Bediener über den Zustand des Druckprozesses zu informieren. Bei interaktiven Systemen ist es möglich aufgrund von detektierten Qualitätsminderungen die Vorstufe zu beeinflussen. Vollintegrierte Systeme erlauben einen direkten Eingriff in den Druckprozess für sofortige Kompensationsmaßnahmen, sowie die Beeinflussung der beiden vorangehenden Instanzen. Angelehnt an Kipphan (2001, S. 42).

Was als 100%-Inspektion oder digitaler Inspektionsmodus bezeichnet wird, ist die gebräuchlichste Art der Untersuchung von bedruckten Substraten. Die unabhängigen Inspektionssysteme sind in den Bahntransport eingebaut, aber als komplett autarke Nachverarbeitung zu sehen. Die Grundfunktion wird durch die Aufzeichnung von bedruckten Seiten durch ein Kamerasystem beschrieben. Dieses stellt dem Operator die Kamerabilder auf einem PC mit Monitor bereit. Ziel des digitalen Inspektionsmodus ist die Aufzeichnung aller Kundenseiten, damit der Bediener der Druckmaschine jederzeit auf einem Monitor die Druckqualität begutachten kann, ohne dafür die laufende Produktion stoppen zu müssen. Einmal auf dem PC abgespeichert, bietet Software mit entsprechenden Bibliotheken eine genauere Beurteilung. Hierzu gehört das Hervorheben eines frei definierbaren Bereichs, eine Farbbeurteilung oder die Auswertung eines Strich- oder QR-Codes. Diese Auswertung findet nicht in Echtzeit statt, sondern erlaubt dem Operator, sich die nötige Zeit zur Qualitätsbeurteilung zu nehmen.

Interagiert das Inspektionssystem mit der Druckmaschine, so wird ein Vorlagenvergleich möglich. Dies erfordert zusätzlichen Einrichtungsaufwand oder die Kenntnis über die ursprünglichen Druckdaten. Zum Einrichten wird mit dem Kamerasystem eine erste Aufzeichnung unter optimalen Bedingungen gemacht und diese als Referenz für alle weiteren Aufzeichnungen desselben Druckbildes verwendet. Alternativ lässt sich unter Bereitstellung der Originaldaten oder Rasterdaten des Druckjobs durch Filter und Skalierung eine Vorlage erzeugen, die dem zu erwartenden Kamerabild entspricht und als Referenz dient. Sobald das Druckprodukt erzeugt und aufgezeichnet wurde, werden die Aufnahmen digital gegen die Referenz verglichen. Auf diese Weise wird die Job- und Datenintegrität geprüft. Zusätzlich lassen sich zahlreiche makroskopische Fehler feststellen. Es werden fälschlicherweise nicht gedruckte Bereiche, Registerfehler über Farbsäume oder Farbabweichungen automatisch identifiziert. Bei der Erkennung von Differenzen zur Vorlage wird dem Benutzer eine Warnung oder Fehlermeldung angezeigt. Dieser entscheidet, ob es sich um einen kritischen Zustand handelt, also der Druckvorgang gestoppt und wiederholt wird, oder ob es sich um eine tolerierbare Qualitätsminderung handelt.

---

Bei einem vollintegrierten Inspektionssystem bestehen neben einem elektrischen und mechanischen Einbau weitere digitale Schnittstellen, die es der Recheneinheit zur Bildverarbeitung erlauben, auf Zustände und Parameter der Druckmaschine zuzugreifen. Dieser Kommunikationsaustausch erlaubt es, über interaktive Inspektionssysteme hinaus, zusätzlich selbstständig auf Begebenheiten zu reagieren. Unter Kenntnis vorliegender Geometrien, wie der Düsenanordnung im Druckkopf und Aufbau der Druckeinheit entstehen Möglichkeiten, Auswertungen spezieller Testdruckbilder durchzuführen und deren Ergebnisse mit der Druckmaschine in Bezug zu setzen. Dazu werden einzelne zu untersuchende Qualitätsminderungen wie Düsenausfälle durch Testmuster von anderen Effekten separiert.

#### **2.2.4. Auswertungen von speziellen Testdruckbildern**

In diesem Abschnitt sind die verfügbaren Messmethoden existierender, vollintegrierter Inspektionssysteme aufgeführt. Methoden, die einzelne Fehler quantitativ untersuchen und diese auf Düsen in den seitenbreiten Anordnungen der Druckmaschine beziehen, sind weit weniger verbreitet als die zuvor beschriebenen, unabhängigen oder interaktiven Inspektionssysteme und deren reine Fehleridentifikation. Hier wird nun geklärt, wie sich einzelne Fehler zuverlässig detektieren lassen. Die Detektion wird durch spezielle Testdruckbilder erreicht, die meist geometrisch simple Formen wie Rechtecke, Kreise oder Linien an definierten Positionen im Druckbereich beinhalten. Somit lassen sich individuelle Effekte wie Fehlpositionierung einer Linie hervorheben und messbar machen, die ansonsten im Gesamtbild verschwimmen. Die vier folgenden Abschnitte beschreiben solche Testdruckbilder, die das Hervorheben individueller Effekte zur Messung der Ausrichtung von Druckköpfen, Gleichmäßigkeit der Farbdichte und Performance von Düsen nutzen. Die wesentliche Voraussetzung für Erfolg der Messungen ist ein vollständiges Bewusstsein über die herrschende Düsenanordnung, um jederzeit aus dem Testdruckbild auf die fehlerhaften Düsen rückschließen zu können.

##### **Messung der Ausrichtung von Druckköpfen**

Die Messung der Kopfjustage dient dazu, die rotatorische und translatorische Platzierung von Druckköpfen einer Tinte in der Druckeinheit zu erfassen und eine eventuelle Fehlstellung zu ermitteln. Die Auswirkung eines rotierten Kopfes gegenüber der Bewegungsrichtung der Papierbahn wurde bereits in Abbildung 2.11 dargestellt. Beide Messungen lassen sich über ein gemeinsames Testdruckmuster, bestehend aus einzelnen Linien, bestimmen. Um die translatorischen Fehler zu benachbarten Köpfen zu messen, werden je Kopf die Positionen von vertikalen und horizontalen gedruckten Linien bestimmt und mit denen des Nachbarkopfes verglichen. Da die Abstände der Düsen – und damit der Linien – zum Übergang zwischen den beiden benachbarten Druckköpfen aus dem Düsenlayout bekannt sind, lässt sich aus der Differenz von tatsächlicher Lage und Sollabstand die Breite des Spalts, bzw. das Maß der Überlappung der beiden Köpfe ermitteln. Die Verdrehung des Kopfes lässt sich durch geeignete Ansteuerung der Düsen feststellen. Wie in Abbildung 2.11 bereits dargelegt wurde, wirkt sich die Rotation eines mehrreihigen Druckkopfes auf verschiedene Düsenreihen unterschiedlich stark aus. In dem abgebildeten Testdruckmuster werden die vertikalen Linien abwechselnd von Düsen der vordersten und der hintersten Düsenreihe gedruckt. Durch das Verhältnis der gemessenen Abstände der Linienpositionen gegenüber den erwarteten Abständen aus dem Düsenlayout lässt sich mittels simpler Trigonometrie der Rotationswinkel des betrachteten Druckkopfes errechnen.

Von CPP wird ein Testmuster basierend auf dieser Methodik verwendet. Damit lassen sich die Fehlstellungen aller Köpfe innerhalb einer seitenbreiten Anordnung bestimmen. Das Testdruckmuster wird für jede Tinte separat erzeugt und von dem Kamerasystem aufgezeichnet. Es beinhaltet für jeden Kopf vertikale und horizontale Linien in einer definierten Anordnung. Abbildung 2.18 zeigt die exemplarische Umsetzung dieser Methodik auf einen 1200 dpi-Druckkopf mit 32 Düsenreihen. Durch das abwechselnde Platzieren von Linien aus der vordersten und hintersten Düsenreihe ergeben sich zwischen den Linien alternierende Abstände von

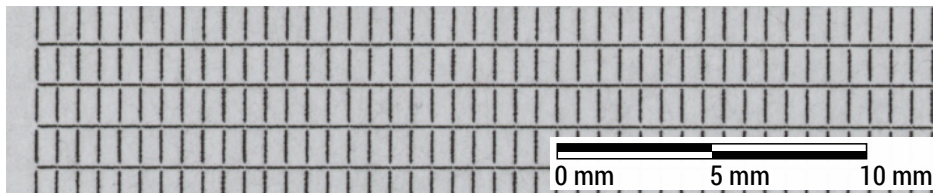


Abbildung 2.18.: Ausschnitt des Testdruckmusters, um Versatz und Verdrehung eines Schwarz-Druckkopfes zu bestimmen. Durch Messung der Positionen der Linien und unter Kenntnis des Düsenlayout lassen sich Rotationswinkel bezüglich der Papierbewegungsrichtung und Abstände zu benachbarten Druckköpfen berechnen.

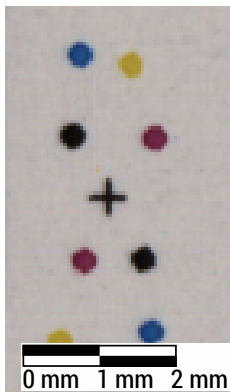
31 Dots und 33 Dots. Wird bei der Vermessung des aufgezeichneten Druckbildes festgestellt, dass sich die mittlere von drei Linien nicht im Verhältnis 31:64 bzw. 33:64 zwischen den beiden Nachbarlinien befindet, so besteht ein Rotationsfehler.

Alle Ergebnisse der Dreiergruppen an Linien werden gemittelt, um gegen Linienversatz durch minder performante Düsen robust zu sein. Für jede Reihe an Linien werden diese Messungen wiederholt, um durch eine gesamte Mittelung über die Testseite den Einfluss niederfrequenter Schwankungen der Papierbahn, z. B. durch exzentrische Rollen oder andere Toleranzen, zu reduzieren. Die Messergebnisse werden verwendet, um die physikalischen Positionen bei der erstmaligen Installation der Druckköpfe anzupassen, wie im Kapitel 2.1.5 beschrieben. Sie lassen sich beispielsweise direkt an die Vorrichtung zur automatisierten Justage der Druckköpfe übermitteln (Schneider und Rummelsberger 2020).

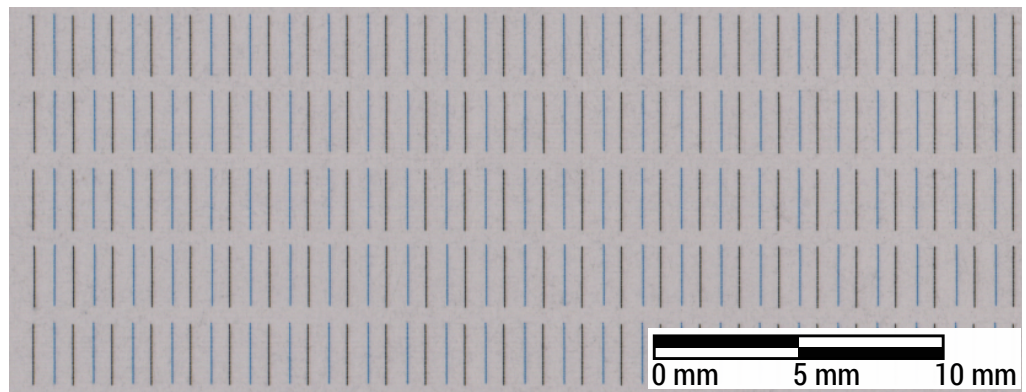
### Bestimmung von Farbregisterversatz

Für die Bestimmung des Farbreisters (Passer) zwischen schwarzer und einer anderen Tinte per Kameraerfassung ist es nötig, Positionen von gedruckten Objekten in den jeweiligen Tinten zueinander zu ermitteln. Dazu lässt sich beispielsweise ein kompaktes Testmuster bestehend aus kleinen Punkten nutzen. Dabei befindet sich in jedem Farbauszug, der einer in der Druckeinheit verwendeten Tinte entspricht, mindestens einer der Punkte. Die Punkte werden wie in Abbildung 2.19a gedruckt und die Abstände der kleinen Punkte werden zueinander sowohl längs als auch quer zur Druckrichtung gemessen. Ein alternativer Ansatz, der besser maschinell automatisiert auswertbar ist, basiert auf der Positionsbestimmung einzelner Linien. Dazu werden abwechselnd vertikale, beziehungsweise horizontale Linien von Schwarz und einer anderen Tinte (Cyan, Magenta, Gelb) nebeneinander gedruckt und deren Position über Subpixelbestimmung ermittelt. Bei einer Kameraauflösung von 600 Pixel per inch (ppi) ist eine Bestimmung auf 2  $\mu\text{m}$  genau erreichbar. Das Testdruckbild zur Messung des Versatzes quer zur Druckrichtung ist in Abbildung 2.19b dargestellt. Das Ergebnis beschreibt den relativen Versatz der beiden gedruckten Farbauszüge. Durch die hohe Präzision der Positionsbestimmung der Linien wird mit diesen Testdruckbildern eine Feinabstimmung der Farbauszüge erreicht. Wird die Position der Tintenlinie im Verhältnis zu den schwarzen Linien bestimmt, resultiert der Abstand, um den die Tinten Cyan, Magenta oder Gelb zu Schwarz versetzt sind. Aus den vielen Linien und den vielen Reihen werden Mittelwerte gebildet, um gegen ungenauen Tropfenausstoß einzelner Düsen robust zu sein und Papierbahnschwankungen auszugleichen. Farbreisterfehler durch Schwankung der Papierbahn lassen sich separiert mit einer Methodik feststellen, bei der Verläufe einzelner gedruckter Linien aus unterschiedlichen Druckköpfen verglichen werden (Schneider, Körner u. a. 2018b).

Ermittelte Farbreisterfehler werden in der Vorstufe ausgeglichen. Die einzelnen Farbauszüge werden um den gemessenen Längs- und Querversatz zur Referenztinte – üblicherweise Schwarz – in die Gegenrichtung verschoben.



(a) Farbregistermarke



(b) Farbregistermessung quer zur Druckrichtung

Abbildung 2.19.: Die Messung des Farbregisters kann durch unterschiedliche Testmuster erreicht werden. Bei einer kompakten Passermarke (a) werden die Positionen von Kreisen sowohl längs als auch quer zur Druckrichtung zueinander verglichen. Anhand der ungleichen Abstände lässt sich mit bloßem Auge erkennen, dass die Tinten in diesem Beispiel großen Versatz aufweisen. Der Ausschnitt des linienbasierten Testdruckmusters (b) dient der Messung des Farbversatz quer zur Druckrichtung von Cyan bezüglich Schwarz.

### Messung der Gleichmäßigkeit der Farbdichte

Ziel dieser Auswertung ist es, lokale Schwankungen der Farbdichte zu messen und daraus lokale Korrekturen für den Rasterprozess abzuleiten. Zuvor im Abschnitt 2.1.5 wurde der Rasterprozess beschrieben und erläutert, wie ein Tonwert von der Druckvorlage auf das Raster übertragen wird. Zusätzlich wurde bei der Erklärung der Druckköpfe erläutert, dass es innerhalb des Druckbereichs durch verschiedene Effekte, wie Tintenversorgung und Alterung, zu lokalen Schwankungen der Farbdichte des Druckbildes kommen kann. Um diese Schwankungen quer zur Druckrichtung zu messen, wird ein Testdruckmuster wie in Abbildung 2.20 dargestellt in einer Tinte – hier Cyan – über die komplette Druckbreite gedruckt. Das

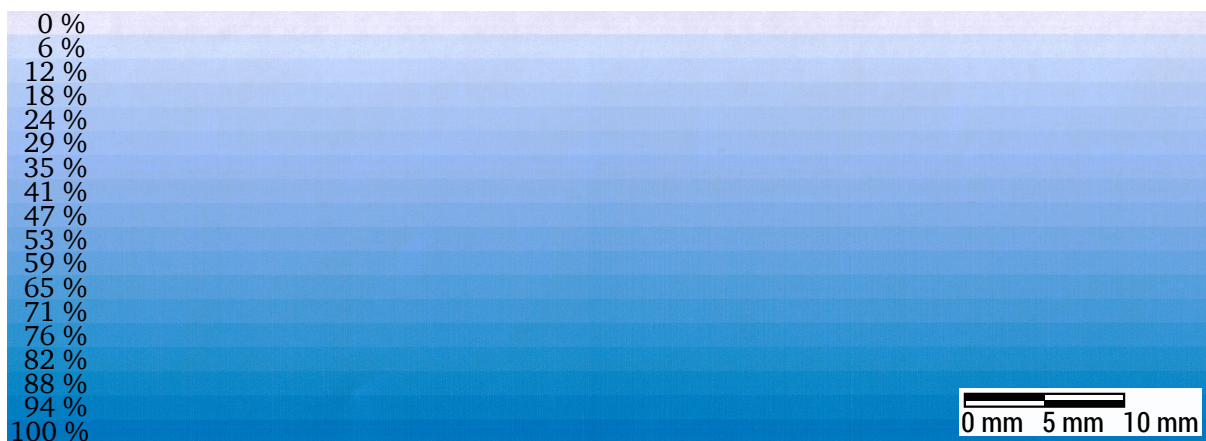


Abbildung 2.20.: Genutztes Testdruckmuster, um die Gleichmäßigkeit der Farbdichte von Cyan über die Druckbreite zu bestimmen. Das Testmuster umfasst 18 Stufen unterschiedlicher Tonwerte von 0% bis 100%. Lokale Schwankungen der Farbdichte sind besonders bei mittleren Tonwerten zu sehen.



---

dargestellte Testdruckmuster erlaubt die Messung der Gleichmäßigkeit der Farbdichte bei 18 gleichmäßig verteilten Tonwerten (0%, 6%, ..., 100%) in 18 in Druckrichtung hintereinander angeordneten Bereichen. Zur Untersuchung der Gleichmäßigkeit der Farbdichte wird das Druckbild mit einer Kamera aufgezeichnet. Anhand des Kamerabildes lässt sich die Gleichmäßigkeit der Pixelwerte bestimmen, hierfür werden für jede der 18 Tonwerte die folgenden vier Berechnungsschritte durchgeführt. Zuerst werden die Pixelwerte jeder Kamerabildspalte in Druckrichtung gemittelt. Dies reduziert Störungen, wie Rauschen des Bildsensors und Unreinheiten im Substrat. Anschließend wird der durchschnittliche Pixelwert über die gesamte Druckbreite berechnet. Für jede Pixelposition quer zur Druckrichtung wird die Abweichung des Pixelwert vom Mittelwert aller Pixelwerte bestimmt. Als letzter Schritt werden die Pixelpositionen den Druckdüsen der seitenbreiten Anordnung zugeordnet, damit der Rasterprozess mit den lokalen Abweichungen der Pixelwerte aus dem Kamerabild entsprechende lokale Korrekturen des Rasters durchführen kann. Diese vier Berechnungsschritte werden für alle Druckauflösungen des Testdruckbildes wiederholt. Um eine Messung der lokalen Schwankungen der Farbdichte in der Bildverarbeitung zu ermöglichen, muss das Testdruckbild aus Abbildung 2.20 ohne lokale Korrekturen des Rasters erzeugt werden. Wird das Testdruckbild mit lokal korrigiertem Raster gedruckt, zeigt sich, dass selbst Effekte des *Inkjet Banding* teilweise ausgelöscht werden. Um Tinten mit geringem Unterschied des Pixelwertes gegenüber unbedrucktem Substrat in den Farbkanälen RGB zu messen, lassen sich Sekundärfarben nutzen, bei denen die Farbdichte der zweiten Tinte bereits erfolgreich ausgeglichen wird (Schneider und Stöckle 2021a).

Um die Linearität zwischen den Tonwerten zu optimieren, können Rasteranpassungen über die gesamte Druckbreite angewandt werden, was gleichbedeutend ist mit einer Erhöhung oder Reduktion der gemittelten Farbdichte bei einem der Tonwerte. Die Messung der Gleichmäßigkeit der Farbdichte ist nicht gedacht, um eine absolute Farbbestimmung und -kalibrierung durchzuführen, für die anstelle einer Schwarz-Weiß- oder RGB-Kamera ein Photospektrometer nötig wäre.

### **Bestimmung von Düsenausfällen und Positionsversatz**

Diese Messung ermöglicht die Erkennung von einzelnen Düsenausfällen (Nozzle Failure Detection (NFD)) und erlaubt eine genaue Zuordnung zur fehlerhaften Düse. Der Druckkopfhersteller *Kyocera* führt eine derartige Überprüfung selbst durch. Wie dieses Muster für einen Kopf aussieht, lässt sich der Spezifikation entnehmen. Dort wird erklärt, dass es der Überprüfung dient, ob aus allen Düsen gedruckt wird und kein fehlerhafter Tropfenausstoß auftritt (Kyocera Corporation 2014). Besagtes Muster besteht aus einem Gitter mit Reihen entsprechend der Anzahl an Düsenreihen über die gesamte Kopfbreite, wobei die vertikalen Linien treppenförmig immer um eine Rasterpalte verrutscht sind, sodass jede von einer anderen Düse des Druckkopfes erzeugt wird. Ein abgewandeltes Testdruckmuster, das nach demselben Prinzip funktioniert, dient auch dieser Arbeit als Grundlage. Der Ausschnitt in Abbildung 2.21 gehört zur NFD-Testseite, die von CPP entwickelt wurde. Diese NFD-Testseite fasst die Köpfe für alle vier Tinten zusammen und ist in bereits gedrucktem Zustand dargestellt. Die Abbildung 2.21 verleiht einen visuellen Eindruck, wie viele Düsen es pro Druckkopf zu überprüfen gilt. Für jeden Kopf und alle vier Tinten werden Testdruckmuster gedruckt, die aus vier runden Marken und Linien entsprechend der Anzahl an Düsen bestehen. In diesem Fall handelt es sich um 2558 Linien. Diese sind 40 Dots lang und jede wird von einer anderen Düse gedruckt. Die Reihenfolge der Reihen ist speziell gewählt, um verschlechternde Effekte, wie beispielsweise *Cross Talking*, zu vermeiden. Dabei wurde darauf geachtet, dass keine Düsenreihen zeitgleich Tropfen ausstoßen, indem die Düsenreihen in aufsteigender Reihenfolge aktiviert werden. Somit entsteht ein nahezu kontinuierlicher Tintenstrom während der Erzeugung des Testdruckmusters.

Die NFD-Seite wird von der Druckmaschinensteuerung in regelmäßigen Abständen in den Druckjob des Kunden eingefügt, dafür muss das Testmuster im Speicher der Druckmaschinensteuerung verfügbar sein. Außerdem muss es an die herrschenden Druckbedingungen angepasst sein. Das erfordert, dass bei

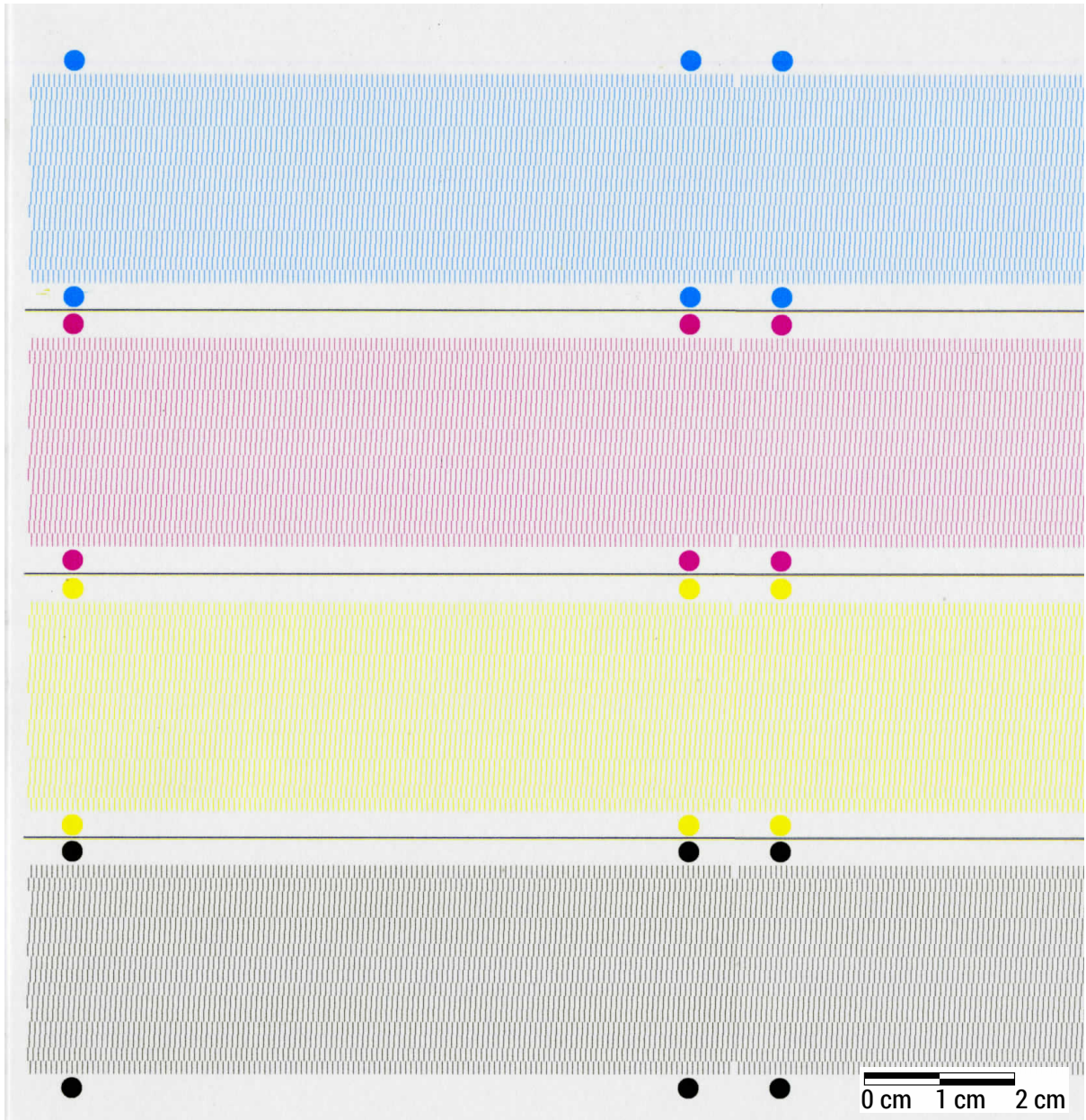


Abbildung 2.21.: Kamerabild einer Prüfseite um Düsenausfälle festzustellen und Versatz von Linienpositionen zu messen. In der hier eingefügten Darstellung sind alle Linien sichtbar. Auf dieser Seite gibt es folglich keine Düsenausfälle.

---

der Erzeugung des Testmusters der Druckbildversatz, links-/rechtsbündig, die Papierbahnbreite und eine eventuelle Überlappung benachbarter Druckköpfe bekannt sind und berücksichtigt werden. Eine Aufteilung der vier Muster für die einzelnen Tinten erlaubt es, die Überprüfung bei kurzen Seitenlängen durchzuführen. Zur Auswertung wird für jede Tinte der kontrastreichste Farbkanal des RGB-Sensors gewählt. Bei Schwarz und Magenta entspricht dies dem grünen Kanal, bei Cyan dem roten und bei Gelb dem blauen. Die runden Marken dienen der Bildauswertung als Orientierung und legen die Position der Druckköpfe fest. Sind deren Positionen im Kamerabild ermittelt, so lässt sich daraus ableiten, wo sich die 16 Reihen zu je etwa 160 Linien befinden. Ähnlich der Messung der Gleichmäßigkeit der Farbbichte werden die Pixelwerte im Kamerabild entsprechend der Linienlänge gemittelt, um die Einflüsse von Rauschen des Bildsensors, einzelnen falsch positionierten Tröpfchen und Unreinheiten im Substrat zu reduzieren. Anschließend wird quer zur Druckrichtung eine Minimasuche über die Zeile an Pixelwerten durchgeführt, um die Pixel mit den niedrigsten Pixelwerten und somit die Position der gedruckten Linien zu finden. Wenn an einer erwarteten Stelle keine Linie gefunden wurde, handelt es sich um einen Düsenausfall, der an die Steuerelektronik der Druckmaschine gemeldet wird.

Düsen, die ihren Tropfen nicht senkrecht, sondern unter einem Winkel auf das Papier feuern, sind nicht in einem optimalen Zustand. Ab einem Versatz von einem einfachen Düsenabstand kann nicht mehr von korrekter Funktionsweise der Düse gesprochen werden, da sie die erstrebte Rasterzelle nicht mehr mit Tinte bedeckt, stattdessen aber auf einer benachbarten Rasterzelle zur doppelten Auftragsmenge führt. Genau genommen kann von einem Düsenausfall nur gesprochen werden, wenn kein Tropfen mehr die Düse verlässt, jedoch ist stark versetzt positionierte Tinte noch kritischer zu betrachten, da zusätzlich Tinte in unvorhergesehenen Bereichen aufgetragen wird. Die Bestimmung des Versatzes und die Messung dessen Intensität fundiert auf der Liniensuche. Das Patent von Beauchamp und Conejo (1998) beschreibt eine Vorrichtung und ein Verfahren einer solchen Bestimmung von gegenüber der erwarteten Position versetztem Tropfenausstoß. Da die gedruckten Linien im Kamerabild mehr als ein Pixel in der Breite beeinflussen, wird mit den Pixelwerten benachbarter Pixel eine Subpixelbestimmung durchgeführt. Das heißt, dass anhand der Pixelwerte von zwei oder mehr benachbarten Pixeln ein Gradient bestimmt wird, um das Zentrum einer gedruckten Linie feiner als durch ganzzahlige Pixelpositionen festzulegen. Ist die exakte Position aller Linien aus einer Düsenreihe gegeben, so lässt sich der Positionsversatz jeder Linie gegenüber der erwarteten Position errechnen. Durch Mittelung der Abstände aller Linien einer Düsenreihe wird gegebenenfalls eine Verformung des Papiers, etwa durch Schrumpfung, kompensiert und die Sollpositionen der gedruckten Linien errechnet. Die Differenz zu der gemessenen Position ergibt die Abweichung. Eine Mittelung über alle Düsen des Kopfes, anstatt nur über eine Reihe, würde einen leichten Fehler einbringen. Da die Linien nicht alle gleichzeitig gedruckt werden, hat die bewegte Papierbahn die Möglichkeit, sich zwischenzeitlich quer zur Druckrichtung zu bewegen. Folglich hätten die Linienreihen zueinander aufgrund dieser Bewegung einen Versatz quer zur Druckrichtung, der bei einer Mittelung über den gesamten Kopf nicht von versetzt positionierten Linien unterscheidbar wäre. Alle Düsen, deren Abweichung den einfachen Düsenabstand überschreiten, werden der Steuerelektronik gemeinsam mit den Düsenausfällen gemeldet. Es sei angemerkt, dass durch die Nutzung vertikaler Linien in diesem Fall nicht messbar ist, ob die Tropfenpositionierung einem Versatz längs der Druckrichtung unterliegt. Für diesen Zweck wären Querlinien im Testdruckmuster erforderlich.

Neben dem direkten Melden von Ausfällen und versetzt positionierten Linien an die Druckmaschinensteuerung, werden die quer zur Druckrichtung gemessenen Positionen aller Linien mit korrekter Düsenzuordnung geloggt. Dank der Subpixelbestimmung ist die Messung auf zwei Dezimalen genau. Um Düsenausfälle und großen Positionsversatz während des Druckbetriebs zu kompensieren, ist eine kurze Regelschleife nötig. Für die zuvor beschriebenen Messmethoden befindet sich das Inspektionssystem im besten Fall direkt hinter der Druckeinheit. Die Recheneinheit übermittelt nach der Analyse die ausgefallenen und versetzt druckenden Düsen an die Druckmaschine. Sobald ein solcher Fehler erkannt wurde, werden für die betroffenen Düsen

---

Maßnahmen zur Wiederherstellung der Funktionalität eingeleitet und die Kompensation gestartet. Nach dem Patent von Schneider (2020b), das im Rahmen dieser Arbeit entstanden ist, werden gemeldete Düsen weiterhin in Auffrischungsbereichen und der NFD-Seite gedruckt und ansonsten die Waveform zur Durchmischung der Tinte angesteuert. Um eine visuelle Verschlechterung durch Düsenausfälle in Nutzseiten zu verdecken, ist es möglich, auf Redundanz zu setzen. Durch den Einbau von Druckköpfen mit zwei Düsen für jede Druckposition oder bei Verwendung zweier Köpfe für dieselbe Tinte hintereinander lassen sich wie im Patent von Karz (1996) zwei Betriebsmodi nutzen. Entweder drucken die Köpfe abwechselnd, was aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeit zweier Ausfälle an derselben Position die Verfügbarkeit deutlich erhöht und somit kein Streifen resultiert, sondern nur jede zweite Rasterzelle unbedruckt ist. Alternativ übernimmt im zweiten Betriebsmodus der redundante Kopf unter Kenntnis der Positionen der Düsenausfälle die Druckaufgaben der fehlerhaften Düsen. Ein ähnlicher Mechanismus lässt sich nach dem eigens in Schneider (2020c) patentierten Verfahren in dem schmalen Bereich anwenden, in dem sich benachbarte Druckköpfe überlappen. Wird dort ein Düsenausfall erkannt, lässt er sich von der nicht verwendeten Düse des Nachbarkopfes an derselben Druckposition ersetzen. Es existieren weitere Ansätze, die auf Redundanz verzichten und Düsenausfälle auf anderem Weg kompensieren. Dazu werden die zu druckenden Tröpfchen auf die benachbarten Düsen verteilt. Ein vergleichbares Verfahren wird in den Patenten von Silverbrook (2003) und Mantell und Folkins (2008) beschrieben. Bei hohem Positionsfehler wird die entsprechende Düse deaktiviert und anschließend dieselbe Maßnahme wie bei Ausfällen ergriffen. Im Fall von 600 dpi und den vorliegenden Linienbreiten gilt dies bei einer Abweichung von mehr als 42 µm, also dem einfachen Düsenabstand. Damit wird erreicht, dass die größeren Tintenmengen den vermeintlichen Streifen von beiden Seiten auffüllen und keine Qualitätsminderung sichtbar bleibt. Wenn grundsätzlich viele große Tropfen erzeugt werden, stößt diese Methode zur Kompensation an ihre Grenzen. Dann werden an den betroffenen Stellen Tröpfchen anderer Tinten gedruckt, um einen möglichst guten Kontrast zu bewahren. Ein schwarzer Streifen fällt in einer blauen Fläche weniger auf als ein weißer. Schwarz kann mit Magenta und Cyan kompensiert werden und bei Gelb ist wegen des ohnehin geringen Unterschieds zu papierweißem Hintergrund hinsichtlich des menschlichen Sehempfindens keine Maskierung nötig.

Diese Methoden zur Kompensation lassen sich auf 1200 dpi übertragen, jedoch ist eine Abschaltung von versetzt druckenden Düsen durch die schmälere Linien und kleineren Tropfen nicht nach denselben Prinzipien und Richtlinien möglich. Es muss von Fall zu Fall und substratabhängig ermittelt werden, ab welchem Versatz ein visueller Effekt für das menschliche Auge entsteht. Darauf basierend ist zu entscheiden, ob ein kritischer Versatz vorliegt und ob eine Kompensation des Fehlers den optischen Eindruck des Druckprodukts verbessert.

### 2.3. Limitierungen gegenwärtiger Systeme

Die beiden Tabellen 2.1 und 2.2 zeigen anhand der zahlreichen roten Kreuze im unteren Bereich, dass gegenwärtige Inspektionssysteme einige Limitierungen aufweisen. Besonders die düsengenaue Zuordnung von Düsenausfällen ohne Testseite, eine Trendanalyse von Düsenausfällen und die Erkennung von Grundierung werden bisher nicht abgedeckt. Die folgende Auflistung zeigt diese und weitere Schwächen, welche in dieser Arbeit adressiert und partiell überwunden werden:

- **Schwächen der Kamera:** In dem verfügbaren Inspektionssystem von *Tecna* ist die Auflösung zu gering, um detaillierte Untersuchungen zu erlauben. Andere Kameras, wie *AccuCam* von *QuadTech* und der *Panther* von *Tectonic International* haben einen zu kleinen Aufnahmebereich. Auch der Sichtbereich des von CPP entwickelten Kamerasystems wurde auf 37 cm ausgelegt. Systeme mit einzelner Kamera, die den ersten beiden Anforderungen gerecht werden, haben eine zu geringe Zeilenfrequenz, denn mit hoher Auflösung und schneller Taktung genügt für die genutzte Aufnahmebreite der etablierte

---

Standard Camera Link nicht zur Datenübertragung. Die Überprüfung der Eignung des Kamerasystems für die benötigten Anforderungen wird durch ein Simulationsmodell der optischen Bilderfassung in Kapitel 4 behandelt.

- **Fehlerbezug auf Druckmaschine:** Viele Hersteller von Inspektionssystemen erlauben den PDF-Vergleich und die Untersuchung der Datenintegrität. Dabei werden im direkten Vergleich mit dem Druckjob oftmals auch Farbbregisterfehler oder starke Schwankungen der Farbdichte erkannt. Jedoch sind diese Inspektionssysteme nicht in der Lage, Zusammenhänge zwischen den gefundenen Fehlern und den verwendeten Druckköpfen, bzw. den einzelnen Druckdüsen herzustellen. Inspektionssysteme, die in diese Kategorie gehören, sind jene der Hersteller *BST Eltromat*, *Erhardt+Leimer*, *Isra Vision* und *QuadTech*. Das einzige bekannte Inspektionssystem, das in der Lage ist, die Fehlstellung der Köpfe zu messen, ist das CPP-interne Kamerasystem. Im Gegensatz zu Offsetdruckmaschinen lässt sich beim Inkjet-Druck auf Druckbildfehler während des laufenden Druckvorgangs reagieren, indem beispielsweise die Verteilung von Tinte im Druckbild nachgeregelt wird. Damit eine Korrektur des Druckbildes möglich ist, genügt es nicht, einen Fehler im Druckbild zu finden, sondern es gilt die Fehlerursache zu bestimmen, also beispielsweise die fehlerhafte Düse zu ermitteln. Für die Messung der Tropfenpositionierung während des Druckens wird in Kapitel 5 eine Lösung mit direktem Bezug auf die Druckmaschine vorgestellt.
- **Hohe Makulatur oder Unterbrechung der Kundenseiten:** Die wenigen Anbieter *Axode*, *Hunkeler* und CPP, die eine Messung von Düsenausfällen bereitstellen und düsengenau zuordnen, nutzen dafür spezielle Testseiten. Diese Lösung ist für die Messung der Gleichmäßigkeit der Farbdichte und fehlerhaft ausgerichteter Druckköpfe praktikabel, da diese während der Installation der Druckmaschine gedruckt werden und damit ein Bestandteil der korrekten Installation sind. Für die Messung von Düsenausfällen während des produktiven Einsatzes ist dies allerdings keine hinreichende Lösung, da hierfür eine kontinuierliche Überwachung erforderlich ist. Beim Inkjet-Druckprozess unterliegen die einzelnen Düsen Verschleiß und Alterungsprozessen, die von der dynamischen Nutzung und Reinigung abhängen. Dadurch kommt es in nicht absehbaren Zeiträumen zu Defekten oder Fehlfunktionen der Düsen oder bei Nichtbenutzung zum Eintrocknen des Druckstoffs. Im produktiven Umfeld werden tausende von Inkjet-Düsen gleichzeitig verwendet, wodurch die Ausfallrate um ein Vielfaches steigt. Ein einzelner Düsenausfall ist nicht mit einer defekten Druckmaschine gleichzusetzen, doch er mindert die Qualität des Druckprodukts. Je nach Qualitätsanspruch bedeutet dies ein Wiederholen des Druckvorgangs, was mit einem zusätzlichen Bedarf an Zeit, Tinte und Papier einhergeht. Keines der gegenwärtigen Inspektionssysteme löst dieses Problem hinreichend, da bei diesen Lösungen in definierten Intervallen eine vollständige Seite zur Messung von Düsenausfällen gedruckt wird. Nachdem diese mit dem Kamerasystem aufgenommen wurde, muss sie speziell markiert und aussortiert werden. Dabei handelt es sich um einen Eingriff in die kontinuierliche Produktion und eine zusätzliche Seite an Makulatur. Im Falle der Untersuchung mit dem CPP-internen Kamerasystem werden solche Testseiten standardmäßig alle 60 Seiten gedruckt und die einzelnen Seiten anschließend in ein separates Ausgabefach geführt. Das Messintervall ist immerhin einstellbar, aber bleibt ein Kompromiss: Der Bediener wählt mit einer Verkürzung des Intervalls einen höheren Anteil an Makulatur und mit selteneren Messungen das Risiko, Düsenausfälle über längere Zeit nicht zu bemerken. Ein zweiter Aspekt ist, dass eine Aussortierung bei einer Rollendruckmaschine nicht in gleichem Maße realisierbar ist, wie bei Bogendruckmaschinen. Bei Rollendruckmaschinen werden für das Separieren von Testseiten zusätzlicher Aufwand und Kosten in der Nachverarbeitung notwendig. Die Reduktion der Makulatur wird mit Testdruckmustern innerhalb des Beschnitts in Kapitel 5 adressiert. Eine erweiterte Einsparung an Makulatur soll durch die entwickelte Trendanalyse in Kapitel 7 realisiert werden.

- 
- **Erkennung von Düsenausfällen für Grundierung:** Kaum eines der verfügbaren Systeme ist in der Lage, Düsenausfälle unsichtbarer Tinten und Flüssigkeiten wie Grundierung zu überwachen. Lediglich *Parvis*, *PC Industries* und *Tectonic International* bieten die Option, eine spezielle Beleuchtung zur Erfassung von UV-Tinten einzusetzen (Tectonic International LTD 2018). Jedoch handelt es sich bei der Grundierung um eine Flüssigkeit, die nur in feuchtem Zustand auf UV-Licht reagiert und selbst dann nur schwach. Kein verfügbares Inspektionssystem bietet für diesen Zweck bisher eine Auswertung. Selbst die Anforderung, Düsenausfälle für sichtbare Tinten zu detektieren, wird von den Kamerasystemen der Hersteller *Erhardt+Leimer*, *Isra Vision*, *QuadTech* und *BST Eltromat* nicht ermöglicht, wie sich der Tabelle 2.1 entnehmen lässt. Grundierung beeinflusst die Wechselwirkung zwischen Substrat und Tinte, weswegen der korrekte Auftrag der Grundierung sichergestellt werden muss. Deshalb wird in dieser Arbeit in Kapitel 6 eine Lösung vorgestellt, wie sich selbst für Grundierung, welche mit Druckköpfen aufgetragen wird, Düsenausfälle unter Verwendung von Inspektionssystemen erfassen lassen.
  - **Interaktion von Kamerasystem und Druckmaschine:** Die meisten Inspektionssysteme arbeiten unabhängig von der Druckmaschine mit eigener Ansteuerung und Recheneinheit, wie zuvor in Abbildung 2.14 dargestellt. Das heißt, dass spezifische Sensoren zur Erfassung von Papiergeschwindigkeit und Druckbildposition bereits fester Bestandteil des Inspektionssystems sind und im Umkehrschluss kein Zugriff auf Sensordaten der Druckmaschine möglich ist. Die Inspektionssysteme von *KBA* und *Hunkeler* sind solche Inselsysteme und werden hinter dem Produktionsdrucker als Modul in die Papierbahn eingesetzt oder an deren Ende im Gehäuse der Druckmaschine montiert. Sie haben nur geringe, einseitige oder keine Vernetzung mit der Druckmaschine. Bei *EyeC*, *Erhardt+Leimer* und *Manroland* erhalten die Inspektionssysteme als Referenz den Druckjob und übermitteln im Fall unzureichender Gütekriterien oder Rahmenbedingungen Warnungen oder Fehlermeldungen, um den Bediener der Druckmaschinen darauf hinzuweisen. Einzelne Systeme wie der *ROLAND InlineInspector 2.0* von *Manroland* bringen zusätzliche Komponenten mit, um durch Streifeneinschuss fehlerhafte Seiten zu markieren (manroland sheetfed GmbH 2015b). Die Inhalte der Kapitel 5 bis 7 erfordern eine enge Interaktion zwischen Kamerasystem und Druckmaschine, besonders um eine schnelle Behandlung von Fehlverhalten zu ermöglichen.
  - **Schnelle Behandlung von Fehlverhalten:** Die Regelschleife zwischen Ausfall einer Düse und Kompensation derselben ist bei gegenwärtigen Systemen sehr lange. Voraussetzung zur Kompensation fehlerhafter Druckdüsen ist, dass die Druckmaschine überhaupt die Bildaufbereitung im laufenden Druckvorgang nachregeln kann. Die Qualitätsreduktion, die durch die fehlerhafte Düse entsteht, manifestiert sich auf allen bedruckten Seiten, bis
    - ein Testmuster gedruckt wird,
    - das Testmuster zum Kamerasystem transportiert und aufgezeichnet wurde,
    - das Testmuster ausgewertet wurde,
    - die Resultate der Messung in der Druckmaschinensteuerung als Kompensation in die Druckseiten eingearbeitet wurden und
    - der Puffer fertig gerasterter Druckseiten abgearbeitet ist.

Die Inspektionssysteme von *Axode* und *Hunkeler*, die in der Lage sind, Düsenausfälle genau zuzuordnen, befinden sich hinter der Druckmaschine und verursachen große Verzögerungen durch die weite Distanz zur Druckeinheit. Wenn es diesen Inspektionssystemen möglich ist, Düsenausfälle an die Druckmaschine zu übermitteln, bleiben bei Produktionsgeschwindigkeit von  $80 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  mindestens 13 m Substrat unberücksichtigt. Damit sind sie aber anderen Herstellern weit voraus, da sonstige Inspektionssysteme Düsenausfälle höchstens im PDF-Vergleich als Fehler erkennen. Die Vorteile eines Inspektionssystems, das kurz hinter der Druckeinheit verbaut ist, werden in Kapitel 5 angesprochen. Der zweite stark

---

vertretene Kritikpunkt ist die Verzögerung, bis eine Testseite gedruckt wird. Es ist nicht möglich, die verwendeten Testmuster auf jeder Seite zu drucken, da ansonsten keine Kundenseiten mehr gedruckt werden können. Die Hälfte des gewählten Messintervalls stellt die durchschnittliche Verzögerung dar, bis ein Druckfehler erkannt wird. Hierbei haben die Systeme aus den gezeigten Tabellen 2.1 und 2.2, die ohne Testseite Düsenausfälle im Druckbild erkennen, den Vorteil, die Qualitätsminderung bei erstem Auftreten zu melden. Jedoch mangelt es dann an einer düsengenauen Zuordnung, die für eine korrekte Kompensation unabdingbar ist. Eine Lösung die sowohl die düsengenaue Zuordnung als auch den Verzicht auf ganze Testseiten und die Überprüfung von Düsenausfällen auf jeder Seite vereint, wird in Kapitel 5 vorgestellt. Für eine zusätzliche Beschleunigung der Fehlerbehandlung sorgt die Trendanalyse aus Kapitel 7.

Die vorhergehende Auflistung zeigt deutlich, dass gegenwärtige Inspektionssysteme keine zufriedenstellende Lösung zur Kontrolle von Düsenausfällen in Rollendruckmaschinen bieten. Diese Arbeit dient dem Zweck, Methoden und Lösungen zu schaffen, die den Stand der Technik und der Wissenschaft in dieser Problematik übertreffen und erweitern. Dabei sei hier nochmals erwähnt, dass in Rahmen dieser Arbeit von einer korrekt arbeitenden Waveform und Vorstufe ausgegangen wird.





---

## 3. Material, Testumgebung und Methoden

---

Im vorherigen Kapitel wurden die erforderlichen Grundlagen und die Limitierungen existierender Systeme beschrieben. In diesem Kapitel wird erklärt, welche Hilfsmittel und Herangehensweisen im Zuge dieser Arbeit Anwendung finden, um die in Kapitel 1.2 vorgestellten Ziele zu erreichen. Im Folgenden werden die genutzte Druckmaschine und das Kamerasystem beschrieben. In den weiteren vier Abschnitten dieses Kapitels folgen die Beschreibungen der experimentellen Aufbauten und Druckmuster, die zur Durchführung dieser Arbeit nötig sind.

### 3.1. Druckmaschine und Kamerasystem

Die entwickelten Testdruckmuster wurden auf der Hochleistungs-Produktionsdruckmaschine ProStream 1200 gedruckt und mit dem integrierten Kamerasystem allPixa pro aufgezeichnet.

#### 3.1.1. Druckmaschine

Als Druckmaschine steht in dieser Arbeit die Rolle-zu-Rolle-Produktionsdruckmaschine für grafische Anwendungen von CPP zur Verfügung. Die Druckmaschine ist in Abbildung 3.1 dargestellt und besteht aus zwei hintereinander aufgebauten Druckeinheiten, die jeweils eine Seite der kontinuierlich durchgeführten Papierbahn bedrucken. Die Druckeinheit ist mit fünf seitenbreiten Anordnungen für Grundierung und die vier Tinten CMYK bestückt. Für eine bedarfsgerechte Applikation der Grundierung werden fünf Druckköpfe des Modells KJ4B-QA verwendet und für die vier Tinten kommen jeweils fünf nebeneinander positionierte Inkjet-Druckköpfe KJ4B-Z zum Einsatz. Alle Druckköpfe sind derart installiert und eingestellt, dass ihre Druckbereiche bündig nebeneinander liegen. Die Druckmaschine nutzt die maximale Druckfrequenz der Druckköpfe und ist für eine symmetrische Druckauflösung von 1200 dpi eingestellt, was einer Produktionsgeschwindigkeit von  $80 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  entspricht. Die Druckköpfe der Grundierung benetzen das Substrat mit einer ebenfalls symmetrischen Auflösung von 600 dpi. Der Raster Image Processor kombiniert AM- und FM-Raster, indem sowohl die Verteilung als auch die Tropfenvolumen passend zur druckenden Datendatei angepasst werden. Dabei wird aus dem kontinuierlichen Wertebereich an Graustufen der Datendatei eine Bitmap mit reduzierter Farbtiefe von 2 bit pro Zelle erzeugt, die sich den vier verschiedenen Tropfenvolumen der verwendeten Druckköpfe zuordnen lassen. Für einen stabilen Bahntransport sorgt ein aktives Führungssystem, das vor der Druckeinheit die Papierbahn an einer definierten Position hält. Hinter der Druckeinheit durchläuft die Papierbahn eine Trocknung, in der die Tinten fixiert werden, und anschließend eine Kühlung, in der die Papierbahn temperiert wird. Nach der Kühlung befindet sich jeweils ein angebautes Kamerasystem. Die Papierbahn wird in der Nachverarbeitung lediglich auf eine Rolle aufgewickelt, von der die zu untersuchenden Seiten herausgeschnitten werden.

#### 3.1.2. Verwendete Druckköpfe

Für diese Arbeit wird der Inkjet-Druckkopf KJ4B-Z von *Kyocera* genutzt. Die Druckbreite dieses Druckkopfes beträgt 112,43 mm, was durch eine Düsenanordnung in 32 Reihen zu je 166 Düsen erreicht wird. Diese

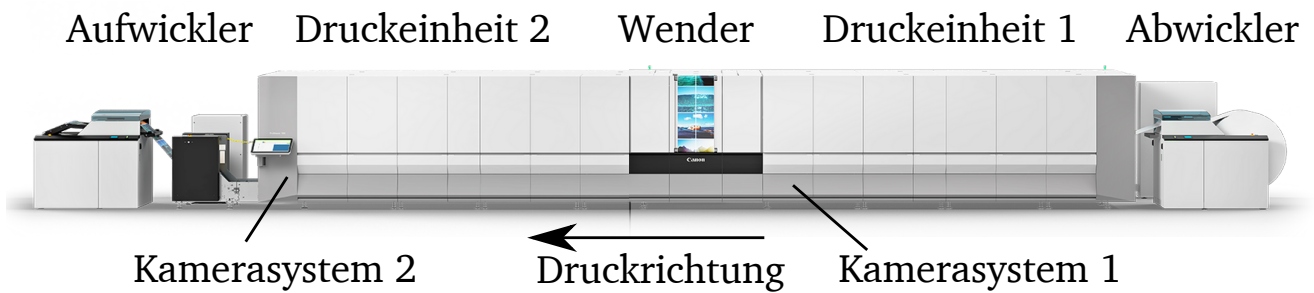


Abbildung 3.1.: Die dargestellte Druckmaschine von CPP besteht aus zwei Druckeinheiten zum Bedrucken von Vorder- und Rückseite der Substratbahn. Die maximale Druckauflösung beträgt 1200 dpi bei einer maximalen Druckgeschwindigkeit von  $80 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ . Rechts wird am Abwickler die Substratrolle abgewickelt und dann in Druckrichtung nach links durch die Druckmaschine bewegt und anschließend im Aufwickler zur Rolle aufgewickelt. Hinter jeder der beiden Druckeinheiten ist ein Kamerasystem in der Druckmaschine integriert.

Anordnung ist in Abbildung 3.2 exakt dargestellt. Der Abstand zweier benachbarter Düsen entspricht  $21,167 \mu\text{m}$ , folglich ermöglichen diese Druckköpfe für das Raster eine Auflösung von 1200 dpi. Zwischen der ersten und letzten Düsenreihe besteht ein Abstand von  $32,174 \text{ mm}$ . Die rote Markierung in Abbildung 3.2 umrahmt eine Abfolge von 32 benachbarten Düsen. In den Zwischenräumen der Düsenreihen befinden sich

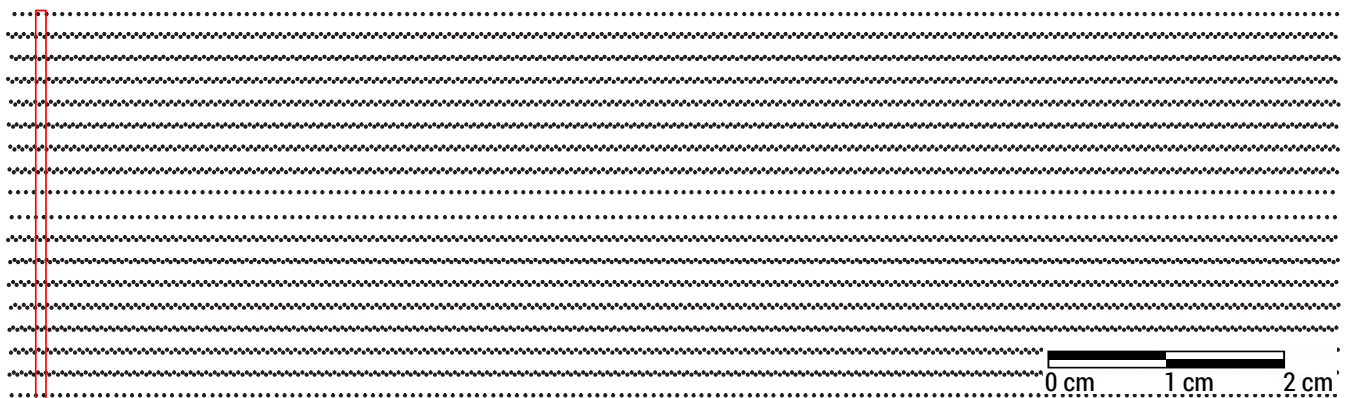


Abbildung 3.2.: Zeichnung des Düsenbereichs eines Kyocera KJ4B-Z Druckkopfes mit 5312 Düsen und einem markierten Bereich von 32 benachbarten Düsen (Kyocera Corporation 2014). Es gibt 32 Düsenreihen, um die piezoelektrischen Aktuatoren versetzt zueinander anordnen zu können und damit die hohe Auflösung zu erreichen. Die Düsenreihen sind um jeweils  $21,167 \mu\text{m}$  zueinander versetzt angeordnet, damit jede Düse eine separate Spur bedruckt. Dieser Versatz entspricht einer Druckauflösung von 1200 dpi.

die Tintenammern und die piezoelektrischen Aktuatoren der jeweiligen angrenzenden Düsenreihen. Zwei Düsenreihen werden durch jeweils einen Tintenkanal versorgt. Anders als rechts in Abbildung 2.10 gezeigt, sind die Reihen nicht treppenförmig versetzt, sondern zur Optimierung des Platzbedarfs und Reihenabstands in folgender Anordnung: Die erste Düse von links befindet sich in Reihe 31, die zweite in Reihe 14, gefolgt von 27, 10, 23, 6, 19, 2, 17, 12, 21, 4, 25, 8, 29, 16, 1, 30, 15, 26, 11, 22, 7, 18, 3, 32, 13, 20, 5, 24, 9 und 28. Danach wiederholt sich die Abfolge. Aufgrund dieser verstreuten Anordnung und dem weiten Abstand der Düsenreihen ist eine sachgemäße Installation des Druckkopfes besonders wichtig. Für diesen Druckkopf sind drei verschiedene Waveformen definiert, die drei unterschiedlich große Tropfen erzeugen,

---

wie beispielsweise 2 Picoliter (pl), 4 pl und 6 pl. Die Waveform, durch die 6 pl ausgestoßen werden, nutzt zwei schnell aufeinander folgende Tröpfchen, die auf derselben Stelle des Substrats auftreffen. Die maximale Druckfrequenz der Düsen liegt bei 63 kHz.

Als weiterer Druckkopf wird das Modell KJ4B-QA von *Kyocera* verwendet. Dieser Druckkopf besteht aus insgesamt 2558 Düsen, die auf 16 Reihen aufgeteilt sind. Mit einem Düsenabstand von 42,33  $\mu\text{m}$  wird je Kopf eine bedruckbare Breite von 108,29 mm erreicht. Die Druckauflösung beträgt 600 dpi und es stehen drei Waveformen für 5 pl, 7 pl und 12 pl zur Verfügung, die sich mit maximal 40 kHz ansteuern lassen. Dieser Druckkopf wird in der verwendeten Druckmaschine zum bedarfsgerechten Bedrucken von Grundierung genutzt.

### 3.1.3. Verwendetes Substrat

Als Bedruckstoff wird für die Untersuchungen in dieser Arbeit das gestrichene Papier *UPM Finesse Matt 480MM-115G* vom Hersteller *UPM* eingesetzt. Es hat eine Breite von 480 mm und ein Flächengewicht nach ISO 536 von  $115 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$ . Dieses Papier hat laut Angaben des Herstellers einen Weißgrad nach D65 (ISO 2470-2) von 99,5%, eine CIE-Weiße von 124% und eine Opazität nach ISO 2471 von 95,6% (*UPM GmbH 2017*). Das Papier *Finesse Matt* wird als Referenzpapier für die vorliegenden Experimente sowohl zum Bedrucken als auch zur optischen Bilderfassung verwendet. Das Papier befindet sich als Rolle in der Druckmaschine.

### 3.1.4. Kamerasystem

Als Kamerasystem kommt das bereits in Kapitel 2.2.2 erwähnte CPP-interne Kamerasystem zum Einsatz. Dieses Kamerasystem besteht aus zwei Zeilenkameras *allPixa pro* (*Chromasens GmbH 2022a*) von *Chromasens* mit je 4608 Photoelementen pro Farbkanal RGB. Weitere technischen Daten der Kamera sind in der Tabelle A.1 im Anhang A.1 aufgeführt. Die drei RGB-Zeilen des Bildsensors haben ihre maximale spektrale Empfindlichkeit bei den Wellenlängen 620 nm (Rot), 550 nm (Grün) und 460 nm (Blau). Beide Kameras sind in einem gemeinsamen Gehäuse mit Objektiven *Apo-Componon 4.0/60* (*Jos. Schneider Optische Werke GmbH 2008a*) von *Schneider Kreuznach* montiert. Die Objektive haben eine feste Brennweite, um eine Auflösung von 600 ppi zu erreichen. Durch eine Überlappung von typischen 489 px kann eine Aufzeichnungsbreite von 369,4 mm realisiert werden. Die maximale Aufnahmefrequenz liegt bei 31 kHz, weshalb eine Bildauflösung von 600 Zeilen pro Zoll (lines per inch (lpi)) bei einer Papierbewegung von  $78 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  erreicht wird. Unterhalb der Linsen befinden sich zwei passiv gekühlte Lichtleisten *Corona II* (*Chromasens GmbH 2020*) von *Chromasens* und der dazugehörige Lichtcontroller, der beide Leisten steuert. Die Lichtleisten sind 390 mm breit und nutzen jeweils 25 Licht emittierende Dioden (LEDs) *OSLON Square® LUW CQAR (streetwhite)* (*Osram Opto Semiconductors GmbH 2013*) von *Osram* im Abstand von 20 mm zueinander und je einen diffusen Spiegel. In den Lichtcontrollern lässt sich über den bereitgestellten Strom zwischen 200 mA und 1800 mA die Lichtintensität der LEDs steuern. Das optische Bilderfassungssystem erreicht bereits bei 200 mA einen ausreichenden Lichteinfall zur kontrastreichen Aufzeichnung von Druckseiten. Die Sensorantwort jedes einzelnen Photoelements wird durch die Kameraelektronik digitalisiert in 8 Bit ausgegeben, d. h. das während der Aufnahmedauer auf das Photoelement fallende Licht wird in einen ganzzahligen Wert zwischen 0 und 255 übersetzt. Im resultierenden Kamerabild entspricht der Wert zwischen 0 und 255 dem Pixelwert des jeweiligen Pixels. Ein Pixel lässt sich eindeutig einem Photoelement auf dem Bildsensor zuordnen. Die Kamera wurde in der Druckmaschine mit dem oben beschriebenen Substrat *Finesse Matt* kalibriert. Bei ausgeschalteter Beleuchtung wurde der Bias für den Dunkelabgleich bestimmt. Die Skalierung der Sensorantwort erfolgt mit *Finesse Matt* auf 80% des maximalen Wertebereichs, also auf den Pixelwert 200. Dabei wurden die LED-Lichtleisten mit einem konstanten Strom von 200 mA betrieben.

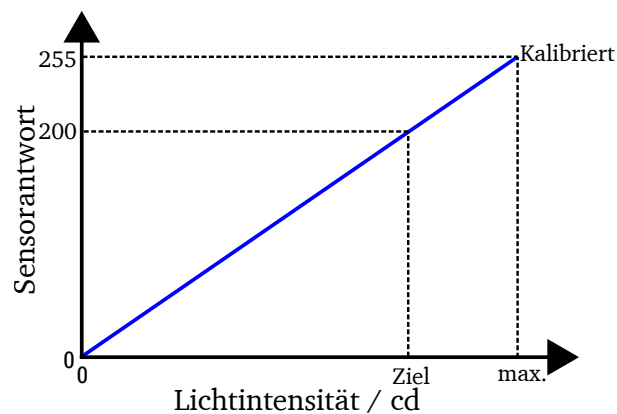


Abbildung 3.3.: Das Kamerasystem ist in der vorliegenden Arbeit kalibriert, sodass die beabsichtigte Sensorantwort des Bildsensor von 200 bei unbedrucktem Substrat *Finesse Matt* vom Hersteller *UPM* und einer Stromversorgung der LED-Lichtleisten von 200 mA erreicht wird. Durch die gewählte Kalibrierung wird bei Substraten mit stärkerer Remission eine Sättigung der Sensorantwort mit 255 (8 bit) vermieden.

Hinter den beiden Druckeinheiten ist je ein Kamerasystem eingebaut, das an die Steuerung der Druckmaschine angebunden ist. Im Anwendungsfall dieser Arbeit werden Takt- und Aufzeichnungssignal von der Druckmaschinensteuerung erzeugt, der die Position und Länge jeder gedruckten Seite bekannt sind. Alternativ lassen sich Beginn und Länge der Aufzeichnung direkt vom Bediener festlegen. Das Kamerabild wird zur verbundenen Recheneinheit übertragen, die mit zwei *Matrix Vision* Framegrabberkarten *mvHyperion CLm* bestückt ist. Die Recheneinheit nutzt ein echtzeitfähiges Linux-Betriebssystem und verarbeitet die erfassten Bildzeilen, fügt sie zu einem kompletten Kamerabild zusammen und speichert sie auf der Festplatte. Zusätzlich ist auf der Recheneinheit die Auswertesoftware von CPP für deren Inspektionssystem installiert. Diese Anwendung erlaubt eine Untersuchung des CPP eigenen Testdruckmusters mit den existierenden Methoden, wie sie im Kapitel 2.2.4 beschrieben sind. Die vollständige Integration des Inspektionssystems in die Druckmaschine bringt den Vorteil, dass eine Seite direkt nach deren Druck aufgenommen wird. Außerdem können die Ergebnisse der Auswertung direkt an die Bildaufbereitung übertragen und zur weiteren Verarbeitung des Druckjobs verwendet werden. Die Erkennung von Druckfehler ermöglicht eine sofortige Kompensation oder Korrektur, die gleich darauf verifiziert wird. Der Einbau des Kamerasystems in die Druckmaschine erlaubt die Ermittlung der Leistungsfähigkeit und Limitierungen des Inspektionssystems unter tatsächlichen Druckbedingungen. Wie schnell wertet die Recheneinheit die Kamerabilder aus? Wie viel Zeit vergeht von der Qualitätseinbuße bis zur Kompensation? Dies sind Fragen, die durch einen integrierten Aufbau beantwortet werden können. Die Verwendung des Inspektionssystems in der Druckmaschine erlaubt komplett integriertes Testen der entwickelten Algorithmen, der Performance und der Kompensation.

### 3.2. Experimenteller Aufbau der optischen Bilderfassung

Im Rahmen der Entwicklung des Simulationsmodells der optischen Bilderfassung werden in dieser Arbeit in Kapitel 4 die folgenden drei Teilprozesse realisiert und betrachtet.

- Entwicklung des Programmcodes, der das Simulationsmodell repräsentiert.
- Verifikation des Simulationsmodells anhand des bestehenden Kamerasystems.
- Nachweis der Übertragbarkeit des Simulationsmodells auf ein Prototyp-Kamerasystem.

---

Die Geräte, die zur Durchführung der Untersuchung genutzt werden, sind der im Folgenden beschriebene Simulationscomputer, die hochauflösende Messkamera, das Prototyp-Kamerasystem und der Laboraufbau. Für die Experimente zum Simulationsmodell wird die Druckmaschine nicht genutzt.

### 3.2.1. Simulationscomputer

Das Simulationsmodell der optischen Bilderfassung in dieser Forschungsarbeit erreicht hohe Komplexität und erfordert aufwändige Berechnungen. Für diese Zwecke wurde ein Simulationscomputer genutzt, der zwei *Intel Xeon E5-2667 v3* Prozessoren mit jeweils acht Kernen zu je 3,2 GHz und 128 GB Arbeitsspeicher besitzt. Auf dem Computer waren zum Zeitpunkt der Untersuchungen das 64-Bit Betriebssystem *Windows 7 Professional* und die Mathematiksoftware *Matlab R2017* von *The Mathworks* installiert. Das Simulationsmodell ist ein Programmcode, der in *Matlab* entwickelt wurde und im Rahmen der Verifikation auf dem Simulationscomputer ausgeführt wird.

### 3.2.2. Messkamera

Im Rahmen dieser Forschung wurden hochauflösende Kamerabilder einer Kalibrierseite und von Tropfenformationen als Referenzen angefertigt. Für diesen Zweck kam die Messkamera *Prosilica GT4907C* mit dem Flächensensor *ON Semi KAI-16070 TRUESENSE Gen 2* mit einer Pixelgröße von  $7,4 \mu\text{m}$  und einem Linsensystem für die Kameraauflösung von  $3,66 \mu\text{m}$  je Pixel zum Einsatz. Die Messkamera ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Sie befindet sich im Messlabor und wurde dort kalibriert. Die Messkamera und eine darunter befindliche Unterlage sind in der Lage, sich translatorisch zueinander zu bewegen, wodurch ein auf der Unterlage befindliches Objekt schrittweise aufgezeichnet werden kann. Eine entsprechende Bildbearbeitungssoftware auf dem angeschlossenen Auswerte-PC fügt die einzeln aufgezeichneten Kamerabilder zu einem größeren Bereich aneinander.

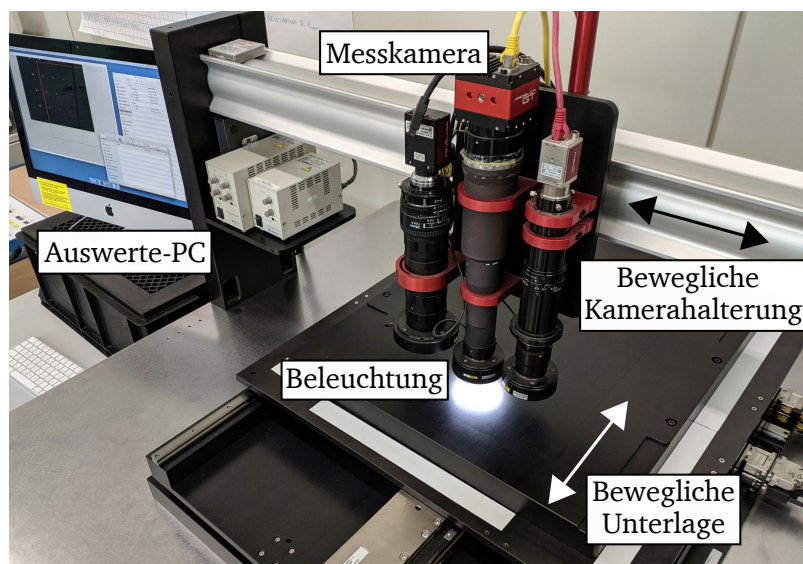


Abbildung 3.4.: Die Darstellung zeigt die bei dieser Arbeit verwendete Messkamera *Prosilica GT4907C*. Es handelt sich um ein bewegliches Kamerasystem oberhalb einer beweglichen Unterlage. Die Messkamera erlaubt hochauflösenden Aufnahmen zahlreicher kleiner Ausschnitte, die anschließend mittels einer Bildbearbeitungssoftware zusammengefügt werden.

---

### 3.2.3. Kalibrierseite

Die in Abbildung 3.5 abgebildete Kalibrierseite wurde in der dargestellten Form durch das oben beschriebene Kamerasystem aufgenommen. Die Vorlage ist auf Fotopapier belichtet. Die Kalibrierseite dient grundsätzlich als Referenz zur Kalibrierung von Bilderfassungssystemen und Auswertesoftware und ist in dieser Form käuflich erwerbbar. Durch die genaue Herstellungsweise des Kalibriermuster wurde es in dieser Arbeit mehrfach als Vergleichsgrundlage genutzt. Die oberen beiden grün eingerahmten Bereiche werden im Kapitel 4.3 explizit als Kamerabilder genutzt. Aufgrund der Symmetrie des optischen Abbildungssystems im Simulationsmodell beginnen beide grün eingerahmten Bereiche im optischen Zentrum des Kamerabildes. Für die Verifikation des Simulationsmodells wurde der rot markierte Bereich mit der Messkamera aufgezeichnet. Weitere Details der Kalibrierseite werden in dieser Arbeit nicht verwendet. Ergänzend zu den markierten Bereichen wurde die gesamte Kalibrierseite durch das Prototyp-Kamerasystem auf dem Laboraufbau aufgenommen. Prototyp-Kamerasystem und Laboraufbau sind in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

### 3.2.4. Prototyp-Kamerasystem

Das Prototyp-Kamerasystem ist der Nachfolger des oben beschriebenen Kamerasystems. Es handelt sich um die Kamera *allPixa wave* (Chromasens GmbH 2022b) von *Chromasens* mit Zeilensensoren über 15360 Photoelemente pro Farbe RGB. Die wichtigsten technischen Daten sind in der Tabelle A.1 im Anhang A.1 aufgeführt. Die enorme Breite erfordert eine Umlenkung des Strahlenganges, die durch zwei Spiegel realisiert wird. An der Kamera ist ein Festbrennweiten-Linsensystem *Apo-Componon 90/4,5* (Jos. Schneider Optische Werke GmbH 2008b) von *Schneider Kreuznach* angebracht, das zur Aufzeichnung in 600 dpi eingestellt ist. Der LED-Lichtcontroller bleibt derselbe, wie bei dem oben beschriebenen Kamerasystem und wird aufgrund der zusätzlichen Bildbreite durch einen zweiten seiner Art ergänzt, um auch die breiteren LED-Lichtleisten zu versorgen. Die Lichtleisten wurden auf eine Breite von jeweils 570 mm erweitert, um ein Substrat für eine seitenbreite Anordnung mit bis zu fünf Druckköpfen auszuleuchten. Durch die größere Entfernung von Bildsensor zum Substrat ist ein höherer Strombedarf für die Beleuchtung nötig, weswegen die Lichtleisten in dieser Konfiguration wassergekühlt werden. Für diese Arbeit stand ein Prototyp zur Verfügung, der mit der Datenschnittstelle Camera Link ausgestattet ist. Diese Schnittstelle kann die gewünschte Auflösung der optischen Bilderfassung in Druckrichtung nur bei Papierlaufgeschwindigkeiten von bis zu  $39 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  bereitstellen. Für einen zukünftigen Einsatz bei bis zu  $80 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  ist die Nachfolgekamera *allPixa evo* von *Chromasens* eingeplant, die mit einer Datenübertragung von bis zu  $20 \frac{\text{Gb}}{\text{s}}$  über SFP+-Module und Glasfaserleitungen als Anbindung ausgestattet ist. Für die Zwecke dieser Arbeit genügt die geringere Datenrate des Prototyps, da bei der Verwendung dieser Zeilenkamera die Untersuchung der optischen Bilderfassung gegenüber der vollen Produktionsgeschwindigkeit im Vordergrund steht. Die Datenblätter von Beleuchtung, Objektiv und Bildsensor werden im Experiment für die Verifikation der Übertragbarkeit des Simulationsmodells der optischen Bilderfassung genutzt.

### 3.2.5. Laboraufbau

Der Laboraufbau dient dem Zweck, mit einem der oben beschriebenen Kamerasysteme eine optische Bilderfassung einer bewegten Vorlage durchzuführen, ohne eine vollständige Druckmaschine zu benötigen. Die Vorlage wird in Form einer einzelnen Seite auf dem Laboraufbau befestigt und wurde, außer im Fall der Kalibrierseite, zu einem früheren Zeitpunkt von der oben beschriebenen Druckmaschine angefertigt. Durch den Laboraufbau wird es möglich, dieselbe Vorlage mit den oben beschriebenen Kamerasystemen mehrfach zu digitalisieren. Der Laboraufbau ist eine Konstruktion aus Profilen, die mit einer motorisch angetriebenen

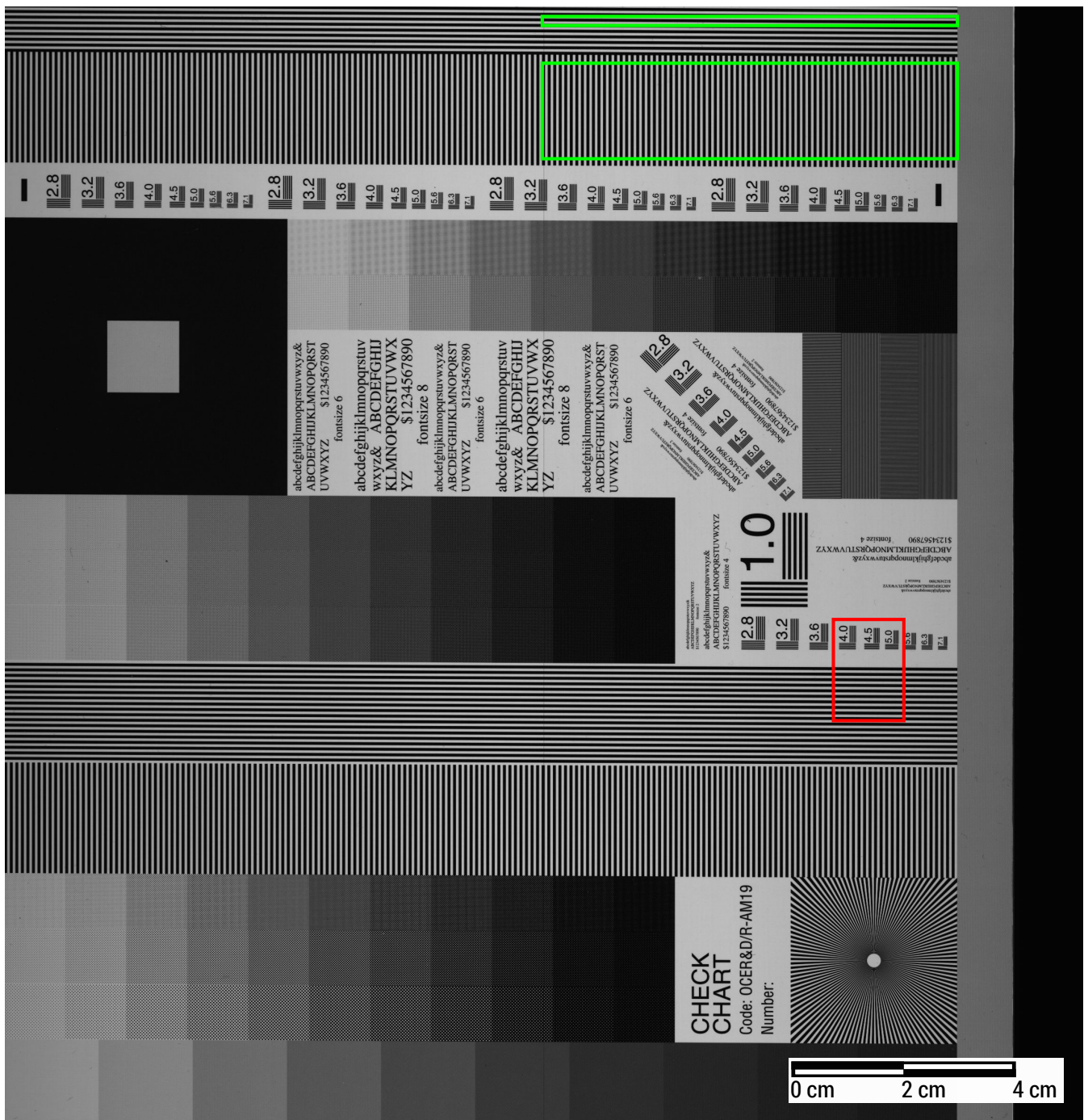


Abbildung 3.5.: Die Abbildung zeigt eine Aufnahme des Kalibrierungsmusters mit der Bezeichnung OCER&D/R-AM19 durch das Kamerasystem. Die Kalibrierseite wurde von Canon Production Printing Netherlands zur Verfügung gestellt. Die zwei oberen, grün eingerahmten Bereiche, die in der Mitte des Kamerabildes beginnen, werden zur Parametrisierung des Simulationsmodells verwendet. Der rot eingerahmte Bereich wurde mit der Messkamera aufgezeichnet und dient der Verifikation des Simulationsmodells als Referenz. Der rot markierte Bereich wurde gewählt, da er unterschiedlich feine Strukturen beinhaltet, auf die in Kapitel 4.3 noch genauer eingegangen wird.

Walze, einigen Sensoren und einem der beiden oben beschriebenen Kamerasystemen ausgestattet ist. Abbildung 3.6 zeigt den Laboraufbau mit dem Prototyp-Kamerasystem. Der komplette Laboraufbau wird von

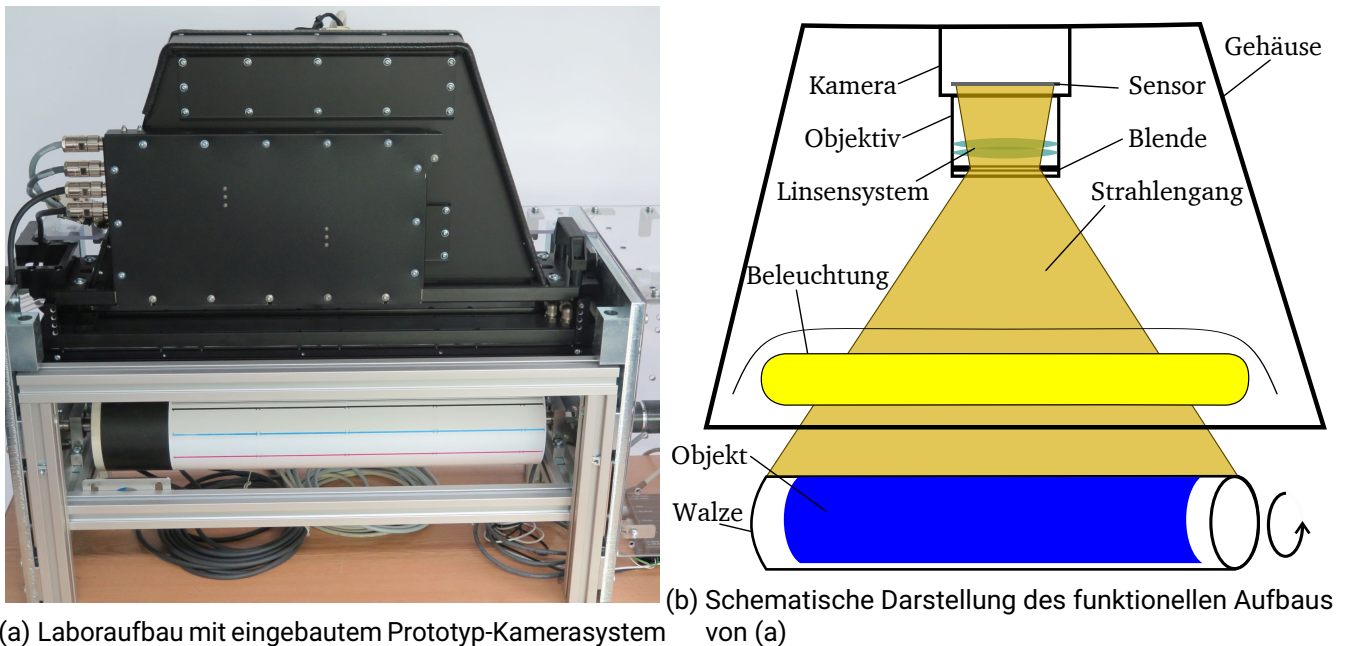


Abbildung 3.6.: Laboraufbau mit motorisch angetriebener Walze und Prototyp-Kamerasystem inklusive Beleuchtung. Auf der Walze ist eine Druckprobe des Linienmusters zur Düsenausfallkontrolle angebracht. Die linke Abbildung zeigt den tatsächlichen Laboraufbau (a) und die rechte Abbildung die schematische Anordnung des Aufbaus (b).

einem Desktop-PC mit *Microsoft Windows 7* gesteuert und überwacht. Die Walze hat einen Durchmesser von 121 mm und eine Breite von 600 mm und erlaubt somit das Anbringen von Ausdrucken mit der bedruckbaren Breite der Druckmaschine. Die Walze hat eine schwarze Gummioberfläche, um das Durchscheinen einer bedruckten Rückseite und das Verrutschen des Papiers während des Betriebs zu vermeiden. Die Geschwindigkeit der Walze wird vom Desktop-PC über den seriellen Anschluss RS232 an den Motorcontroller *EPOS 70/10* der *Maxon Motor AG* vorgegeben. Der Motorcontroller regelt den daran angeschlossenen Motor auf Geschwindigkeiten bis zu  $2500 \frac{U}{min}$ . Durch ein eingebautes Getriebe mit der Übersetzung 1:6 erreicht die Umfangsgeschwindigkeit der Walze bis zu  $160 \frac{m}{min}$ . Oberhalb der Walze befindet sich eine Halterung, in die ein Kamerasystem eingesetzt ist. Er garantiert den richtigen Abstand zur Oberfläche des aufgeklebten Papiers und eine korrekte Fokussierung des Objektivs. Am linken Ende der Walze ist der Encoder *DFS60A-BGPC65536* des Herstellers *Sick* angebracht, der die Geschwindigkeit erfasst und an ein FPGA *Cyclone IV* von *Altera* übermittelt, das die Taktfrequenz von 600 lpi für die Kamera berechnet. Der zweite Sensor ist ein digitaler Druckmarkenleser vom Hersteller *Wenglor* mit der Bezeichnung *WPO4NAT80S875*. Er dient als Schaltsensor, der auf die Walze ausgerichtet ist und bei schwarz eingefärbten Stellen reagiert, indem der digitale Schaltausgang des Sensors aktiviert wird. Das FPGA prüft das Signal des Schaltsensors auf ein bestimmtes Muster eines Barcodes. Wenn der Barcode mit der programmierten Einstellung übereinstimmt, sendet das FPGA ein High-Signal an den digitalen Eingang des Kamerasystems für eine vorgegebene Anzahl an Bildzeilen. Die Kamera verwendet die Schaltinformation zusammen mit dem Takt, um gemäß Abbildung 2.16 bei jedem Impuls eine Bildzeile aufzuzeichnen und diese über die Datenschnittstelle, genauso wie in der Druckmaschine, an die angeschlossene Recheneinheit zu senden, wo die Bildauswertung erfolgt. Der Desktop-PC und die Recheneinheit sind über Ethernet miteinander verbunden und befinden sich im



---

selben Netzwerk, um einen Fernzugriff auf die Kamerabilder und die Übermittlung von Steuerbefehlen zu ermöglichen. Der Laboraufbau wird genutzt, um mit dem Kamerasystem und dem Prototyp-Kamerasystem für die Verifikation des Simulationsmodells der optischen Bilderfassung Kamerabilder der auf Fotopapier belichteten Kalibrierseite aufzuzeichnen.

### 3.2.6. Beschreibung der Experimente

Das Simulationsmodell der optischen Bilderfassung dient dazu, die Bilderfassung eines realen Kamerasystems nachzubilden. Der genaue Aufbau des entwickelten Simulationsmodells ist in Kapitel 4.1 beschrieben. Hier folgen die Grundlagen der Experimente zur Erstellung und Verifikation des Simulationsmodells der optischen Bilderfassung für das Kapitel 4.3. Das erste Experiment dient dem Nachweis der Vergleichbarkeit eines aufgezeichneten Kamerabildes mit einem simulierten Simulationsbild und somit der Verifikation des Simulationsmodells. Darüber hinaus wird im zweiten Experiment unter Verwendung der Datenblätter der Komponenten Prototyp-Objektiv und Prototyp-Kamera das Simulationsmodell der optischen Bilderfassung auf das Prototyp-Kamerasystem übertragen. Aus den Simulationsergebnissen wird ermittelt, ob sich für das Prototyp-Kamerasystem konkrete Optimierungen hinsichtlich der Komponenten, z. B. Anzahl der LEDs in der Beleuchtung, ableiten lassen. Lässt sich die Übertragbarkeit des Simulationsmodells in diesem Experiment verifizieren, so besteht der Nachweis, dass für die konzeptionelle Auslegung eines Bilderfassungssystems die Komponenten in der Planungsphase nicht physikalisch vorliegen müssen. Als Folgerung lässt sich mit Hilfe des Simulationsmodells zur optischen Bilderfassung die Eignung für einen beabsichtigten Verwendungszweck überprüfen.

Für die Durchführung der Experimente wird das Simulationsmodell der optischen Bilderfassung mit den Eigenschaften des Kamerasystems und des Prototyp-Kamerasystems parametrisiert, um deren spezifische Charakteristik nachzubilden. Dazu wurden die folgenden Parameter eingesetzt, um das Modell an die zu untersuchenden Komponenten zur optischen Bilderfassung anzupassen:

- Intensität und Anordnung der LEDs der Beleuchtung
- Erfasste Punktspreizfunktion
- Optische Verzeichnung aus Objektivdatenblatt
- Wellenlängenabhängige Transmission aus Objektivdatenblatt
- Relative Transmission aus Objektivdatenblatt
- Größe und Anordnung der Photoelemente des Bildsensors aus dem Kameradatenblatt

Zum Vergleich mit dem Simulationsmodell wird auf dem zuvor beschriebenen Laboraufbau jeweils ein Kamerabild von Kamerasystem und Prototyp-Kamerasystem aufgezeichnet. Dazu wird auf dessen drehender Walze die auf Fotopapier belichtete Kalibrierseite befestigt, die auch für die Parametrisierung des Simulationsmodells verwendet wird. Die Vergleichbarkeit von Kamerabild und Simulationsbild wird über die folgenden gemessenen Parameter nachgewiesen:

- Signal-Rauschabstand des resultierenden Simulationsbildes
- Pixelwertverlauf eines Simulationsbildes
- Analyseergebnis eines Linienmusters

Während der gesamten Versuchsdurchführung wurde die Zielauflösung des Simulationsbildes von 600 dpi konstant gehalten. Im Zentrum der optischen Bilderfassung sind die Pixel auf einen Pixelwert von 200 referenziert.

Im Rahmen der Verifikation des Simulationsmodells mit dem bestehenden Kamerasystem wird der rot umrahmte Bereich der Kalibrierseite aus Abbildung 3.5 genutzt. Wie oben beschrieben wird die Messkamera eingesetzt, um ein hochauflösendes Kamerabild des rot umrahmten Bereichs zu erzeugen. Dieses Kamerabild

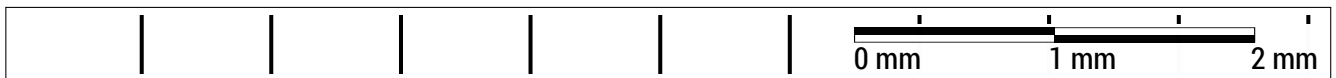


Abbildung 3.7.: Die Darstellung zeigt eine rechteckige zweidimensionale Anordnung von Pixeln, die als Input für das Simulationsmodell verwendet wird. Das Linienmuster erstreckt sich im Simulationsmodell über die gesamte Breite der Bilderfassung und besteht aus  $77,6 \mu\text{m}$  breiten schwarzen, vertikalen Linien, deren Pixel den Pixelwert 0 aufweisen. Alle weiteren Pixel haben den Pixelwert 255.

durchläuft als digitale Datei das Simulationsmodell der optischen Bilderfassung auf dem Simulationscomputer und wird nachfolgend als Simulationsbild bezeichnet. Parallel dazu wurde das Kamerasystem auf dem Laboraufbau angebracht. Das Kamerasystem ist auf die Oberfläche der Walze fokussiert, um eine Auflösung von 600 dpi entlang des Zeilensensors zu realisieren. Auf der Walze ist die Kalibrierseite aufgebracht. Die Motorsteuerung versetzt die Walze in eine Drehbewegung, sodass eine Oberflächengeschwindigkeit von  $80 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  erreicht wird. Von dem Kamerabild des Kamerasystems wird ebenfalls der rot umrahmte Bereich herausgeschnitten und in direkten Vergleich mit dem Simulationsbild gestellt. Als zweites Kriterium wird der SNR von Kamera- und Simulationsbild verglichen. Der SNR berechnet sich aus dem gemittelten Pixelwert  $\mu_{signal}$  in einem vorgegebenen Bereich geteilt durch die Standardabweichung  $\sigma_{signal}$  der Pixelwerte desselben Bereichs. Der resultierende Bruch wird gemäß folgender Gleichung 3.1 mit dem Logarithmus in Dezibel umgerechnet.

$$SNR = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{\mu_{signal}}{\sigma_{signal}} \right) \quad (3.1)$$

In diesem Fall handelt es sich bei dem vorgegebenen Bereich, für den der SNR berechnet wird, jeweils um eine Spalte des Kamera- bzw. Simulationsbildes, da sie einem Photoelement des Bildsensors entspricht. Des Weiteren wird zum Vergleich der Pixelwerte ein simples Linienmuster gemäß Abbildung 3.7 als Objekt und Input für die Simulation innerhalb des Simulationsmodells erzeugt. Das Linienmuster weist eine Auflösung von 3600 dpi auf. Auf einer durchgängig weißen Fläche mit Pixelwerten von 255 befinden sich  $77,6 \mu\text{m}$ , also 11 px breite Bereiche schwarzer Pixel mit Pixelwert 0. Aus diesem hochauflösenden Linienmuster wird durch die Simulation ein Simulationsbild mit 600 dpi berechnet, das den oben aufgezählten geometrischen und spektralen Charakteristika des Kamerasystems unterliegt.

Für die Verifikation der Übertragbarkeit auf das Prototyp-Kamerasystem wird ein komplexeres Muster verwendet. Ähnlich der Abbildung 2.21 wurde ein hochauflösendes Linienmuster mit mehreren Linienreihen gemäß Abbildung 3.8 in 3600 dpi erzeugt. Das Simulationsbild wird durch die Analyse der Bestimmung von Düsenausfällen aus Kapitel 2.2.4 ausgewertet. Eine erfolgreiche Auswertung ist Voraussetzung für die Nutzbarkeit des Prototyp-Kamerasystems. Das Ergebnis der Bildanalyse des Simulationsbildes wird Ergebnissen des Kamerasystem gegenübergestellt. Darüber hinaus werden im Experiment in Kapitel 4 anhand des resultierenden Simulationsbildes der SNR und der Verlauf der Pixelwerte ermittelt, um zu prüfen, ob über die Breite der Erfassung ausreichender Kontrast und hohe Lichtintensität gewährleistet sind. Um das Simulationsbild hinsichtlich SNR und Pixelwerten zu optimieren, wird die Simulationsberechnung für das Prototyp-Kamerasystem mit mehreren Anordnungen der LEDs in der Beleuchtung durchgeführt. Verglichen werden die LED-Anordnungen aus Abbildung 3.9, deren Ausgangsform Abstände von 20 mm zwischen den LEDs hat. In den abgewandelten Anordnungen, die für die Simulationsberechnung genutzt werden, ist der Abstand im äußeren Viertel, Sechstel und Achtel jeweils auf 15 mm, bzw. 10 mm reduziert.

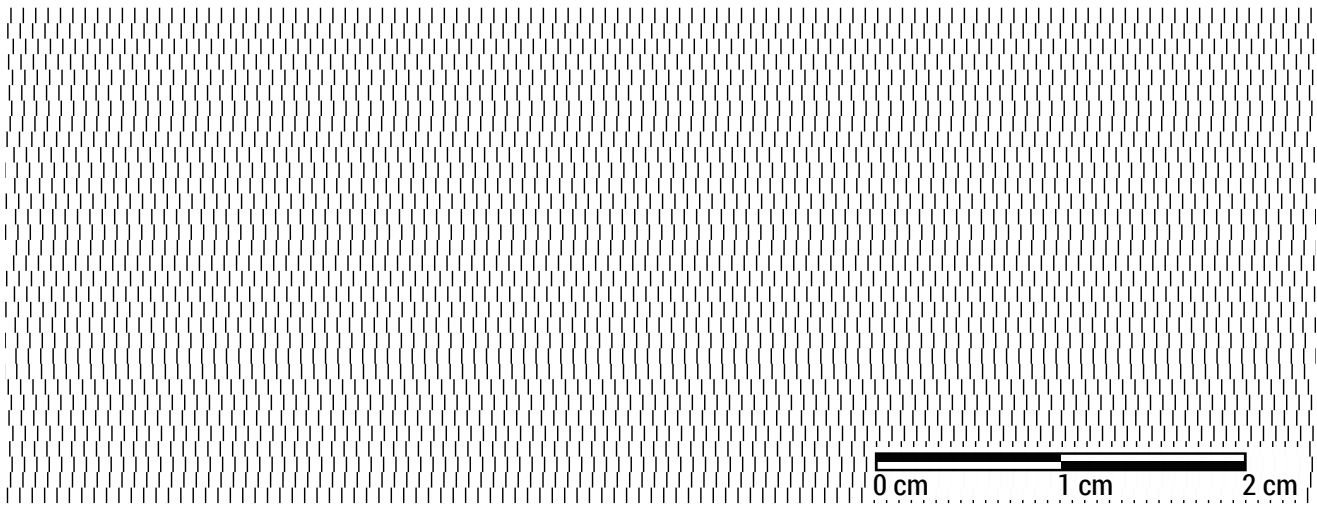


Abbildung 3.8.: Das dargestellte Muster ist eine komplexere, mehrreihige Form des zuvor dargestellten Linienmusters aus Abbildung 3.7. Dieses Muster wird für die Verifikation der Übertragbarkeit auf das Prototyp-Kamerasystem verwendet.

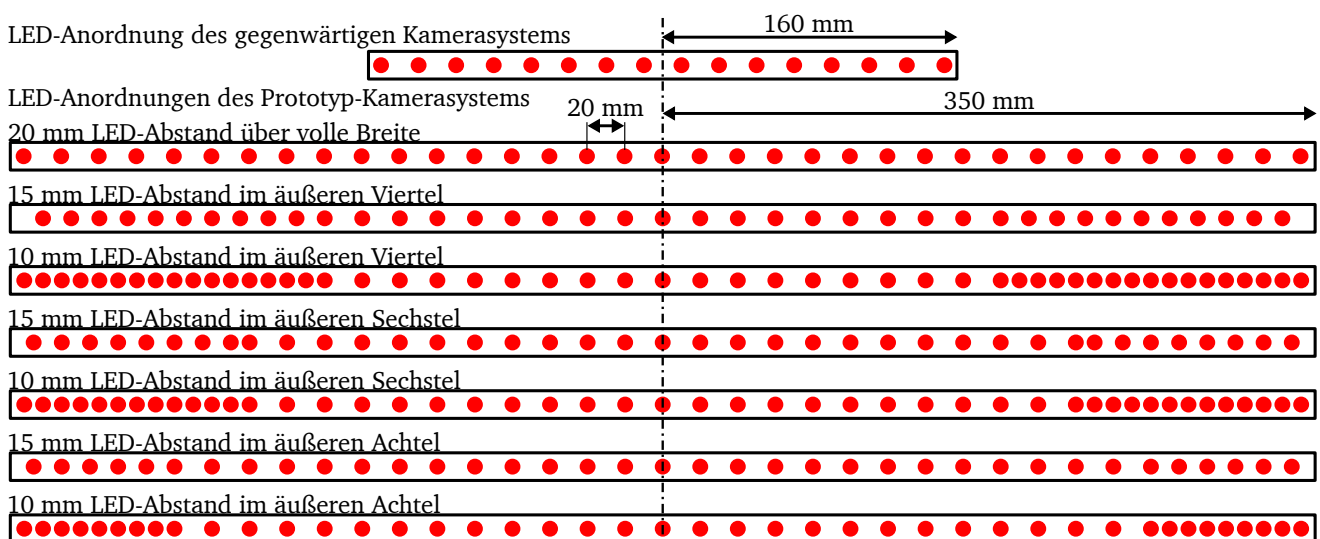


Abbildung 3.9.: Die schematische Darstellung zeigt die Anordnungen der LEDs, wie sie für das Simulationsmodell genutzt werden. Alle Lichtleisten sind symmetrisch zum optischen Abbildungssystem aufgebaut. Die oberste LED-Anordnung entspricht der Beleuchtung aus dem gegenwärtigen Kamerasystem aus Kapitel 3.1. Die weiteren sieben LED-Anordnungen werden zum Vergleich von SNR und Pixelwertverlauf bei der Untersuchung der Übertragbarkeit des Simulationsmodells angewandt.

---

### 3.3. Experimenteller Aufbau zur Messung der Tropfenpositionierung

Das Experiment für die Messung der Tropfenpositionierung hat zum Ziel, ein möglichst kurzes Testdruckmuster zu finden, das sich im Beschnitt der zu bedruckenden Seite positionieren lässt. Gleichzeitig soll mit diesem kurzen Testdruckmuster die Überprüfung von Düsenausfällen und die Messung des Positionsversatzes gedruckter Tropfen realisiert werden. Um ein optimales Testdruckmuster zu finden, werden im Rahmen dieser Arbeit zahlreiche digitale Testdruckmuster erzeugt, die mit der oben genannten Druckmaschine gedruckt werden. Das gewählte Substrat *Finesse Matt* wird auf Vorder- oder Rückseite, aber nicht beidseitig mit den zu untersuchenden Testdruckmustern bedruckt. Die Druckseiten sind so angelegt, dass sich jeweils auf der gegenüberliegenden Seite keine Druckinformationen befinden. Die Aufzeichnung der Ausdrücke erfolgt separat und zeitversetzt auf dem Laboraufbau (siehe Abschnitt 3.2.5) durch das oben beschriebene Kamerasystem. Zusätzlich wurden mit der unter Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Messkamera hochauflösende Kamerabilder von den gedruckten Druckmustern angefertigt, um das entstandene Druckbild auf dem Substrat detailliert zu bewerten. Die ausführliche Versuchsbeschreibung folgt in den weiteren Abschnitten.

#### 3.3.1. Beschreibung der Versuchsparameter

Bei der Durchführung des Versuchs wird die Messung von Düsenausfällen in zwei Stufen auf zuverlässige Erkennbarkeit qualifiziert. Vorab wird eine Untersuchung von Linienformen vollzogen. Im ersten Schritt wird eine genaue Betrachtung eines einfarbigen Musters durchgeführt, hierbei wird angestrebt, auf einer minimalen Anzahl an bedruckten Rasterzellen das Fehlen von Linien und Positionsversatz hinreichend genau zu ermitteln. Dazu erfolgt mit den geeignetsten Linienformen aus der Voruntersuchung die Optimierung der Abstände. Anschließend wird in der zweiten Stufe die Kombination mehrerer Tinten geprüft. Für die einzelnen Untersuchungen wurden Parameter entsprechend der folgenden Auflistung variiert:

- Linienformen Vorversuch
  - Linienlänge
  - Tropfengröße
  - Impulsfolge
- Positionsbestimmung Stufe 1
  - Linienabstand
  - Reihenabstand
- Positionsbestimmung Stufe 2
  - Kombinationen von verschiedenen Tinten
  - Kombination unterschiedlich vieler Tinten
  - Abstände der Linien

Das Ziel des Experiments ist die Ermittlung, wie wenig Makulatur für eine Düsenausfallerkennung und eine Positionsbestimmung der Tropfenpositionierung nötig ist. Dabei wird untersucht, wie sich das Testdruckmuster im Beschnitt unterbringen lässt, der über die gesamte Breite der seitenbreiten Anordnung geht, aber in Druckrichtung kürzer als 5 mm sein soll. Für jede Düse lässt sich anhand der durchgeführten Messung nachweisen, ob eine Linie gedruckt wurde. Wenn eine Linie gedruckt wurde, lässt sich bestimmen, ob diese Linie mehr als  $15 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$  von der erwarteten Position abweicht. Um dies zu prüfen, werden die folgenden Parameter gemessen:

- Linienformen Vorversuch
  - Linienbreite

- Niedrigster Pixelwert
- Mittlere Fragmentierung der Linie
- Positionsbestimmung Stufe 1
  - Länge des gesamten Musters
  - Korrekte Anzahl und Zuordnung der Düsenausfälle
  - Anzahl der versetzt gedruckten Linien
  - Mittlere Differenz des Positionsversatzes der Linien zum Referenzdruckmuster  $\Delta p$
  - Standardabweichung des Positionsversatzes  $\sigma$
- Positionsbestimmung Stufe 2
  - Gemessene Parameter von Stufe 1
  - Länge des Musters je beteiligter Tinte
  - Unterscheidbarkeit der Tinten über RGB-Kanäle

Als Rahmenbedingungen wurden neben 1200 dpi-Druckköpfen und 600 dpi-Kamerasystem die folgenden Parameter während der Versuche eingestellt und beibehalten.

- Tropfenvolumen je Tropfengröße
- Tintenformulierung
- Waveformen
- Grundierungsauftrag von  $0,8 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$
- Papier *UPM Finesse Matt 115*  $\frac{\text{g}}{\text{m}^2}$  und 480 mm breit
- Bahngeschwindigkeit  $80 \frac{\text{m}}{\text{min}}$
- Druckauflösung von symmetrisch 1200 dpi
- Tinten beschränken sich auf CMYK
- Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Umgebung während des Druckens
- Kamerakomponenten
- Kameraauflösung von symmetrisch 600 dpi
- Auffrischungsbereich vor dem Linienmuster gemäß Beschreibung im nächsten Abschnitt

### 3.3.2. Testdruckmuster

Die Testdruckmuster für den Vorversuch bestehen aus einzelnen Tropfen und Aneinanderreihungen von bedruckten Rasterzellen. Diese Aneinanderreihungen (auch: Impulsfolgen) von einem bis sechs Dots bestehen aus unterschiedlichen Kombinationen der drei Tintenmengen. Da für diesen Vorversuch die Form der resultierenden Einfärbung auf dem Substrat untersucht wird, werden die bedruckten Bereiche voneinander getrennt, dass keine gegenseitige Beeinflussung (z. B. *Cross Talking*) stattfindet. Jede Impulsfolge wird auf der Testseite mit jeder Tinte 12-mal erzeugt.

Alle Testdruckmuster, die für die beiden Stufen des Experiment zur Positionsbestimmung verwendet wurden, bestehen aus einem Auffrischungsbereich, einem Hilfsbereich und einem Linienmuster. Dieser grundsätzliche Aufbau ist in allgemeiner Form im eigenen Patent von Schneider, Körner u. a. (2018c) festgehalten und im Folgenden genau beschrieben. Eine exemplarische Darstellung, wie das Testdruckmuster aussehen kann ist in Abbildung 3.10 zu sehen. In dieser exemplarischen Darstellung erstreckt sich das Testdruckmuster über 4,95 mm, wovon das Linienmuster eine Länge von 2,03 mm einnimmt. Ein noch kürzeres Muster wäre unter Anwendung der Erkenntnisse aus dem eigenen Patent von Schneider (2021) erreichbar, bei dem Linien noch dichter gepackt werden und mittels Verzeichnung und Homogenitätsuntersuchung nach ausgefallenen Düsen gesucht wird, doch damit wäre keine Bestimmung des Positionsversatzes möglich. Zu Beginn des hier verwendeten Musters wird ein Auffrischungsbereich ① gedruckt, wodurch

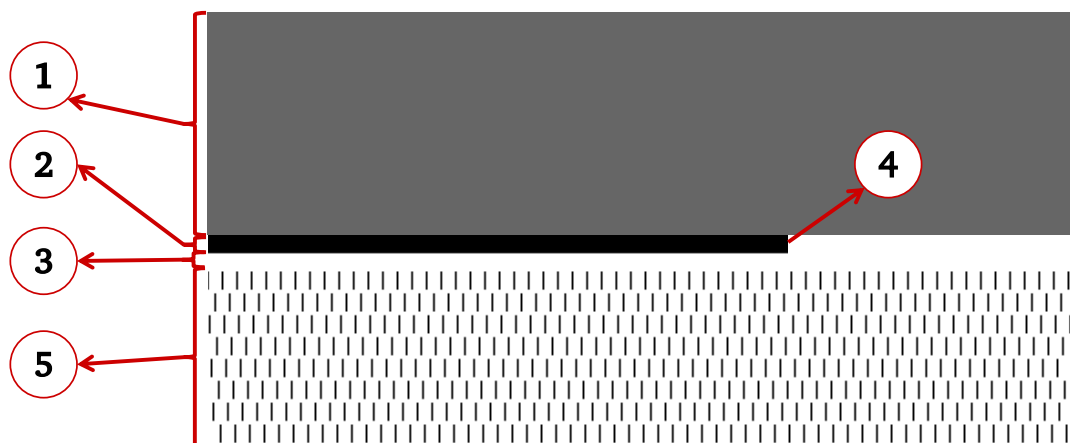


Abbildung 3.10.: Entwickeltes kurzes Linienmuster zur Kontrolle von Düsenausfällen im Beschnitt zwischen den Seiten (Schneider, Körner u. a. 2018c). In der oberen Hälfte werden alle Tinten zur Auffrischung gedruckt ① und darunter befindet sich in einer Tinte ein zusätzlicher Bereich ② der die Kopfgrenze ④ markiert, ein Freibereich ③ als Abstandshalter und das Linienmuster ⑤ mit acht Linienreihen. Die Gesamthöhe beträgt 4,95 mm.

leichte Eintrocknungen durchgespült werden und frische Tinte in die Düsen kommt. Im Auffrischungsbereich werden alle vier Tinten nochmals für 60 Dots gedruckt, wobei sich jeweils zwei Tinten überlagern. Innerhalb des ersten 60 Dots langen Bereichs befinden sich Cyan und Magenta und im zweiten Bereich Schwarz und Gelb. Diese Balken werden mit der maximalen Tropfengröße über die volle Breite der Papierbahn gedruckt. Bei dem 1200 dpi-Raster entspricht der Auffrischungsbereich damit einer Länge von 2,54 mm. Die Trocknung ist in der Lage diese Flächenlast von 200%, also zwei Tinten in jeder Rasterzelle mit maximaler Tropfengröße, zu trocknen und es wird zusätzlicher Raum für das Linienmuster gewonnen. Unterhalb davon befindet sich ein unbedruckter, 20 Dots hoher Hilfsbereich ③, um das Linienmuster hinreichend von dem Auffrischungsbereich unterscheiden zu können. Sofern das System mehr als einen Druckkopf pro Tinte hat, ist dies durch einen 10 Dots hohen, bedruckten Bereich ② im Hilfsbereich gekennzeichnet. Er wird nur mit der Tinte gedruckt, die auch für das aktuelle Linienmuster zum Einsatz kommt und nur von den Köpfen an ungeraden Positionen. So wird an der Kante des Balkens der Übergang zweier Köpfe erkannt. Am Beispiel von fünf Druckköpfen je seitenbreiter Anordnung wird der Balken von den Druckköpfen an der ersten, dritten und fünften Stelle gedruckt. Dies ermöglicht die Erfassung der Kopfgrenzen ④. Das Linienmuster ⑤ besteht aus mehreren Reihen mit Linien, von denen jeweils eine Linie einer definierten Druckdüse eines Druckkopfes zugewiesen wird. Um die Auswahl der im Experiment verwendeten Linienmuster eindeutig zu beschreiben, werden im Folgenden die vier Kennwerte *Impulsfolge*, *Linienanordnung*, *Tintenkombination* und *Querversatz* eingeführt. Die Impulsfolge ist eine Abfolge von Zahlen zwischen 0 und 3, die die jeweilige Waveform repräsentieren. Die Anzahl der Zahlen entspricht der Länge der Linie. Aus Platzgründen wird in Übersichten und Tabellen ein mehrmaliges Wiederholen derselben Tropfengröße in der Impulsfolge durch eine entsprechende Potenz gekennzeichnet. Das Druckbild einer Linie, bei der beispielsweise sechs aufeinander folgenden Rasterzellen die maximale Tropfengröße zugeordnet ist, gefolgt von einer unbedruckten Rasterzelle hat folglich die Impulsfolge 3333330, bzw.  $3^60$ . Die Linienanordnung ist ein Vektor von Zahlen, der die erste sich wiederholende Sequenz von Linien darstellt. Die Zahlen beschreiben die Rasterzellen der Linien, angefangen bei der obersten Reihe bis zur untersten Reihe. Die Länge des Vektors entspricht folglich der Anzahl an Reihen im Linienmuster. Für mehr Übersichtlichkeit werden die Linienanordnungen in den Ergebnistabellen durch Platzhalter mit folgender Zuweisung ersetzt:

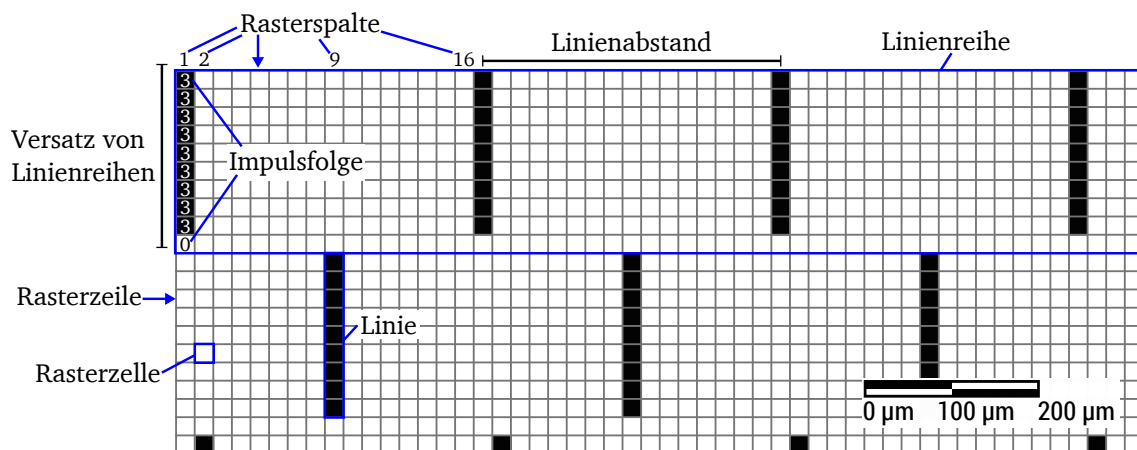
- ①  $\hat{=}$  {17,10,19,12,21,14,23,16,24,11,22,15,20,13,18,9,32,2,25,4,27,6,29,8,31,1,26,7,30,5,28,3}
- ②  $\hat{=}$  {1,9,17,25,2,10,18,26,3,11,19,27,4,12,20,28,5,13,21,29,6,14,22,30,7,15,23,31,8,16,34,32}
- ③  $\hat{=}$  {1,9,17,2,10,18,3,11,19,4,12,20,5,13,21,6,14,22,7,15,23,8,16,24}
- ④  $\hat{=}$  {1,9,2,10,3,11,4,12,5,13,6,14,7,15,8,16}
- ⑤  $\hat{=}$  {1,7,2,8,3,9,4,10,5,11,6,12}
- ⑥  $\hat{=}$  {1,5,2,6,3,7,4,8}

Die erste Linienanordnung entspricht dem Referenzmuster. Bei mehrfarbigen Mustern gibt es zusätzlich die Tintenkombination und den Querversatz. Diese Kennwerte geben die Anfangsbuchstaben der beteiligten Tinten CMYK und die horizontale Verschiebung des Musters zwischen den jeweils genutzten Tinten an. Sprich die Muster der verwendeten Tinten sind grundsätzlich identisch, aber um beispielsweise 4, 6 oder 8 Rasterspalten seitlich zueinander verschoben. Die Abbildung 3.11 veranschaulicht die Systematik der Kennwerte.

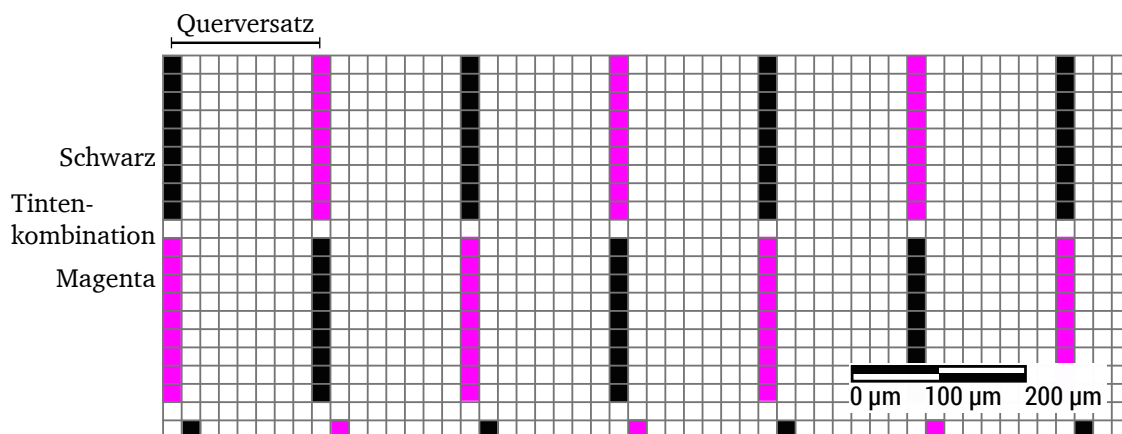
Zur vollautomatisierten Erzeugung der Testdruckmuster wurden im Rahmen dieser Arbeit Skripte geschrieben, die mit den Kennwerten des Linienmusters gespeist werden. Die Ausgabedatei ist auf die Druckmaschine angepasst, wodurch die fertig gerasterten Testdruckmuster nicht mehr die Druckbildaufbereitung durchlaufen, sondern sich den Druckköpfen zuweisen lassen. Wird der Druckbereich der seitenbreiten Anordnung durch Substratkante, Überlappung der Druckköpfe oder andere seitenbreite Anordnungen begrenzt, wird das Testmuster ebenfalls angepasst und um den entsprechenden inaktiven Bereich reduziert, um die korrekte Zuordnung der Druckdaten zu den Düsen beizubehalten. Für die computergestützte Auswertung der Linienmuster werden die eigens programmierten Skripte verwendet, die auf den Prinzipien beruhen, wie sie im folgenden Abschnitt 3.3.3 beschrieben sind.

### 3.3.3. Methodik und Bildauswertung

Von allen ausgedruckten Testdruckmustern wird in einem separaten Prozess auf dem Laboraufbau aus Kapitel 3.2.5 mit dem oben beschriebenen Kamerasystem ein Kamerabild aufgezeichnet. Die Kamerabilder der Testdruckmuster sind im Format .TIFF gespeichert und dienen der programmierten Bildauswertung als Input. Im Experiment in Kapitel 5.4 wird die Form von Linien bei einer Auflösung von 600 dpi für unterschiedliche Impulsfolgen bewertet. Im Vorversuch wird insbesondere für sehr kurze Impulsfolgen die Form der Einfärbung auf dem Substrat untersucht, daher werden diese Druckbilder zusätzlich mit der Messkamera aufgenommen. Unter der Messkamera wird die Breite der Linie gemessen und bestimmt, ob die Linie aus mehreren Fragmenten besteht. Für hinreichend gute Linien darf die Linie eine durchschnittliche Fragmentierung, also Aufteilung in Teilpunkte, von 1,3 nicht überschreiten. Bei der Aufnahme mit dem Kamerasystem, dessen Sensorantwort auf den Bereich von 0 (schwarz) bis 255 (weiß) kalibriert ist, muss der Pixelwertunterschied zwischen gedruckter Linie und derer Umgebung im Kamerabild mindestens 70 betragen. Auf Basis der geeignetsten Linien aus dem Vorversuch werden die Testmuster für die beiden Stufen der Positionsbestimmung generiert. Für die Überprüfung von Testdruckmustern, bei denen eine ausreichend genaue Positionsbestimmung möglich sein muss, werden vollständige Linienmuster erzeugt, die alle Düsen eines Druckkopfes ansteuern. Ein geeignetes Testdruckmuster in den beiden Stufen der Positionsbestimmung qualifiziert sich durch Bestehen der nachfolgenden Anforderungen: Linien müssen bei Positionsversatz von bis zu 80  $\mu\text{m}$  immer noch von benachbarten Linien unterscheidbar sein, indem zwischen den Linienpositionen mindestens ein Pixel ist, dessen Pixelwert sich von den Pixelwerten der beiden umliegenden Linienzentren um mindestens 20 unterscheidet.



(a) Exemplarisches einfarbiges Linienmuster in Schwarz mit Impulsfolge =  $3^9 0$  und Linienanordnung = ④.



(b) Exemplarisches mehrfarbiges Linienmuster mit selber Impulsfolge und Linienanordnung, wie (a). Zusätzlich ist die dargestellte Tintenkombination = MK und der Querversatz = 8.

Abbildung 3.11.: Die beiden Abbildungen zeigen den grundsätzlichen Aufbau der im Experiment genutzten einfarbigen (a) und mehrfarbigen (b) Testdruckmuster. Es handelt sich um Linienmuster, wobei die Länge und Anordnung der Linien über die Kennwerte *Impulsfolge*, *Linienanordnung*, *Tintenkombination* und *Querversatz* beschrieben sind.

Im Kamerabild gilt es, das Linienmuster korrekt auszuwerten. Das Analyseprogramm orientiert sich am unteren Rand des Auffrischungsbereichs und sucht dann bei einem System mit mehreren Köpfen nach der Kante, die den Druckkopfrand quer zur Druckrichtung identifiziert. Diese virtuelle Trennlinie trennt das Linienmuster und teilt es entsprechend der Anzahl der Druckköpfe in Bereiche auf. Für den ersten und letzten Kopf ist der Rand des Bildes die Begrenzung oder bei schmäleren Substraten entsprechend die Bahnkante. Die Position des Linienmusters ist durch den definierten Abstand zum Auffrischungsbereich bekannt. Es wird anhand der Tinte des Balkens zur Unterscheidung der Druckköpfe der Farbkanal mit dem höchsten Kontrast gewählt. Bei der Ermittlung der Linienpositionen wird das Kamerabild auf den kontrastreichsten Farbkanal reduziert und per laufender Mittelung gefiltert, um Verunreinigungen im Substrat und Störungen durch Satelliten zu kaschieren. Aufgrund der Bildauflösung von 600 dpi nehmen die Linien im Kamerabild nur halb so viele Pixel Länge gegenüber der Anzahl an Rasterzellen im Testdruckmuster ein, was auch bei der Mittelung berücksichtigt wird. Für alle Reihen wird die zentrale Pixelzeile separiert und über die Breite des Kopfes untersucht. Die verbleibende Zeile, die auch als Vektor von Pixelwerten betrachtet werden kann,



durchläuft eine Extremasuche, die durch geeignete Schwellenwerte für alle Drucklinien die Position des Pixels mit dem geringsten Pixelwert erkennt. Basierend auf dieser Koordinate wird eine subpixelgenaue Bestimmung mit dem hinreichend genauen und präzisen, linearen Filter 4. Ordnung nach Blais und Rioux (1986) durchgeführt. Die Linienmitte ergibt sich aus den Pixelwerten des zentralen Pixels und der vier benachbarten Pixel. Die Art der Subpixelbestimmung nach Blais und Rioux wurde gewählt, da sie gegenüber gleichartige Verfahren genauer arbeitet (Fisher und Naidu 1996). Der angewandte lineare Filter berechnet sich nach Blais und Rioux (1986) zu

$$\delta = \frac{g(x)}{g(x) - g(x+1)}, \quad (3.2)$$

falls das Pixel rechts des Maximums dunkler ist als das Pixel links davon, andernfalls

$$\delta = \frac{g(x-1)}{g(x-1) - g(x)} - 1. \quad (3.3)$$

In beiden Fällen stellt  $x$  die Position des Pixels dar und  $\delta$  gibt die Positionsabweichung zu dem Pixel mit dem geringsten Pixelwert der Linie an. Der Wert  $g(x)$  berechnet sich dabei aus dem linearen Filter 4. Ordnung (Blais und Rioux 1986)

$$g_4(x) = f(x-2) + f(x-1) - f(x+1) - f(x+2). \quad (3.4)$$

Hierbei entspricht  $f(x)$  dem Pixelwert des Extremums an der Pixelposition  $x$ . Die Gleichung 3.4 verrechnet somit die Pixelwerte der vier benachbarten Pixel innerhalb der Pixelzeile. Das Ergebnis  $g_4(x)$  wird dann in Gleichung 3.2 oder 3.3 verwendet. Dieser Vorgang wird grundsätzlich für alle anderen Reihen und Köpfe wiederholt. Alle ermittelten Positionen werden zusammengefasst und zur weiteren Verwendung gespeichert. Hierbei fließt das Wissen über nicht-druckende Bereiche ein, da in diesen Bereichen keine Linien zu erwarten sind. Die gefundenen Linien werden exakt den entsprechenden Düsen zugeordnet, aus denen sie gedruckt wurden.

Die Existenz, Position und Standardabweichung der Linien aus den Testdruckmustern wird mit den Ergebnissen aus einer Referenzmessung der Testseite verglichen. Die Entwicklung des Referenzdruckmusters ist in Kapitel 5.2 beschrieben. Die Länge des Testdruckmusters wird berechnet aus der Anzahl der Linienreihen, multipliziert mit der Anzahl an Dots pro Linie. Die Länge des gesamten Musters ist ein zentrales Kriterium, da die Bestrebungen dieses Experiments ein möglichst kurzes Testdruckmuster zum Ziel haben. Aus den gemessenen Werten wird eine Punktzahl ermittelt und der Referenzmessung gegenübergestellt, um so die Messqualität des jeweiligen Linienmusters zu qualifizieren. Die Punktzahl wird durch eine Scorecard ermittelt, bei der die gemessenen Kriterien mit jeweiliger Gewichtung entsprechend ihrer Bedeutung einfließen. Von anfänglich hundert Punkten verliert jedes Muster 10 Punkte pro falsch detektiertem Düsenausfall, 0,3 Punkte pro zusätzlicher versetzt positionierter Linie bezüglich der Referenz, 0,3 Punkte je Mikrometer Positionsversatz und 3 Punkte pro Mikrometer Differenz der Standardabweichung zur Referenz.

Die zweite Stufe des Experiments zur Verkürzung des Musters untersucht die verschiedenen Kombinationen mehrerer Tinten. Die Unterscheidbarkeit der Tinten wird über geeignete Zusammenführung und Betrachtung im jeweils kontrastreichsten Farbkanal ergänzt. Durch den kontrastärmsten Farbkanal wird der Einfluss der jeweiligen Tinte ausgeblendet. Des Weiteren gelten dieselben Anforderungen wie in der ersten Stufe.

### 3.4. Experimenteller Aufbau zur Erkennung von Düsenausfällen für Grundierung

Alle gedruckten Druckmuster werden auf der oben beschriebenen Druckmaschine angefertigt und mit dem integrierten Kamerasystem aufgezeichnet. Zusätzlich zum oben beschriebenen, gestrichenen Substrat UPM

*Finesse Matt* wird für dieses Experiment das 480 mm breite, unbehandelte Substrat *Tauro* mit  $110 \frac{g}{m^2}$  vom Hersteller *Sappi Global* genutzt. Dieses Substrat *Sappi Tauro* hat laut Herstellerangaben einen Weißgrad nach D65 (ISO 2470-2) von 104%, eine CIE-Weiße von 144% und eine Opazität nach ISO 2471 von 95,5% (Sappi Limited 2014).

Die Entwicklung eines Verfahrens zur Visualisierung von Grundierung wurde grundsätzlich durch das Patent von Greger und Brenner (2018) abgedeckt, das aus dem Hause CPP stammt. Darin wird beschrieben, dass durch ein spezielles mehrschichtiges Druckmuster identifiziert werden kann, wo Grundierung aufgetragen wurde. Hierbei wird zwischen gestrichenem und unbehandeltem Substrat unterschieden. Für gestrichenes Substrat zeigt Abbildung 3.12 die drei Schichten, aus denen sich das mehrschichtige Druckmuster zusammensetzt. Das linke Bild stellt die erste Schicht mit niedrigem Tonwert dar, für die in dieser Arbeit Gelb verwendet wird. Diese Schicht wird überlagert von einem feinen Gitter kontrastreicher Tinte, wie mittig gezeigt ist. Dafür wird in diesem Experiment Magenta genutzt. Rechts ist das Linienmuster dargestellt, das für die Grundierung vorgesehen ist. Da es das Ziel der Grundierung ist, dem Ineinanderfließen verschiedener

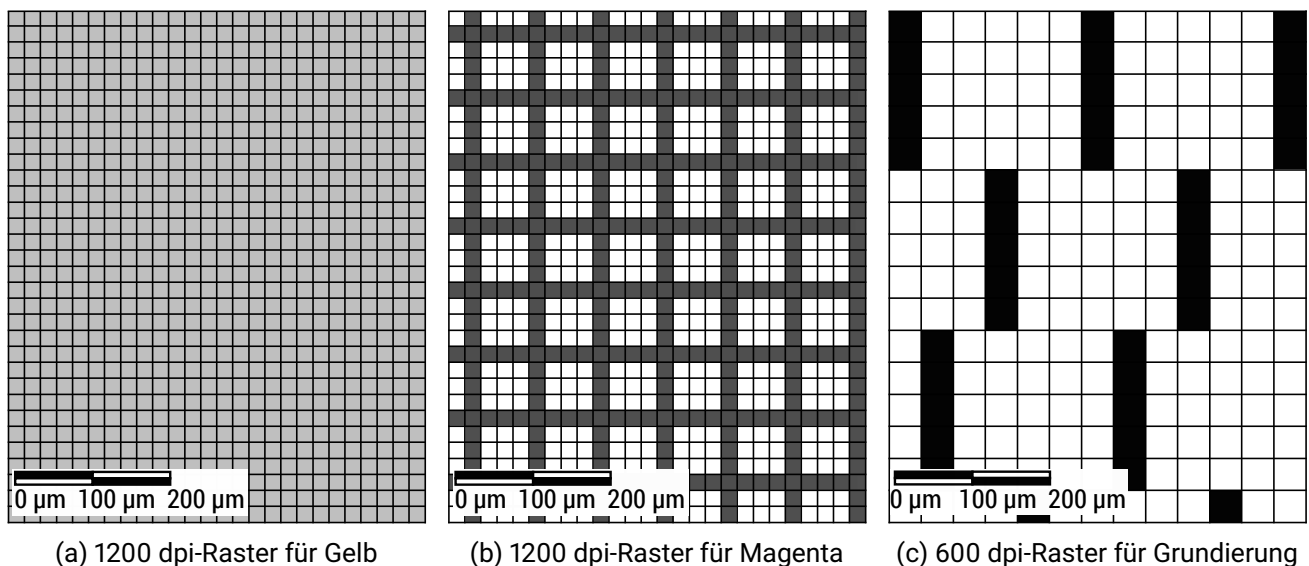


Abbildung 3.12.: Das Druckmuster zur Erkennung von Düsenausfällen auf gestrichenem Papier besteht aus drei Schichten, die übereinander gedruckt werden. Eine Tinte wird mit niedrigem Tonwert flächig aufgetragen (a), eine kontrastreiche zweite Tinte wird als feines Gitter gedruckt (b) und mit der Grundierung wird ein Linienmuster gedruckt (c).

Tinten beim Drucken vorzubeugen, wird diese Charakteristik im Patent von Greger und Brenner (2018) als Erkennungsmerkmal genutzt, um die Präsenz der Grundierung zu identifizieren. Das verstärkte Zerfließen feiner Strukturen einer Tinte auf einer kontrastreichen zweiten Tinte erzeugt großflächig betrachtet ein resultierendes Druckbild höherer Farbdichte als für die Struktur vorgesehen. An Stellen mit aufgetragener Grundierung behält das Druckmuster seine Struktur bei, sprich das feine Gitter aus Abbildung 3.12b ist im Druckbild deutlich erkennbar. In der patentierten Lösung wird ausgenutzt, dass die Druckköpfe der Tinte eine feinere Tropfengröße (4 pl) und Auflösung (1200 dpi) haben als die Druckköpfe mit 12 pl und 600 dpi, die für die Grundierung verwendet werden. Mit dem zusätzlichen Verlaufen der Flüssigkeit auf dem Substrat überdeckt die Linie der Grundierung einer einzelnen Düse eine Breite von vier Rasterpalten des Druckbildes. Bei unbehandelten Substraten wird ein zweites mehrschichtiges Druckmuster genutzt, das in Abbildung 3.13 zu sehen ist. Bei Nutzung dieses Druckmusters entsteht eine Farbverfälschung, beziehungsweise eine Änderung des Farbumfangs. Zwei Schichten werden durch unterschiedliche Tinten flächig

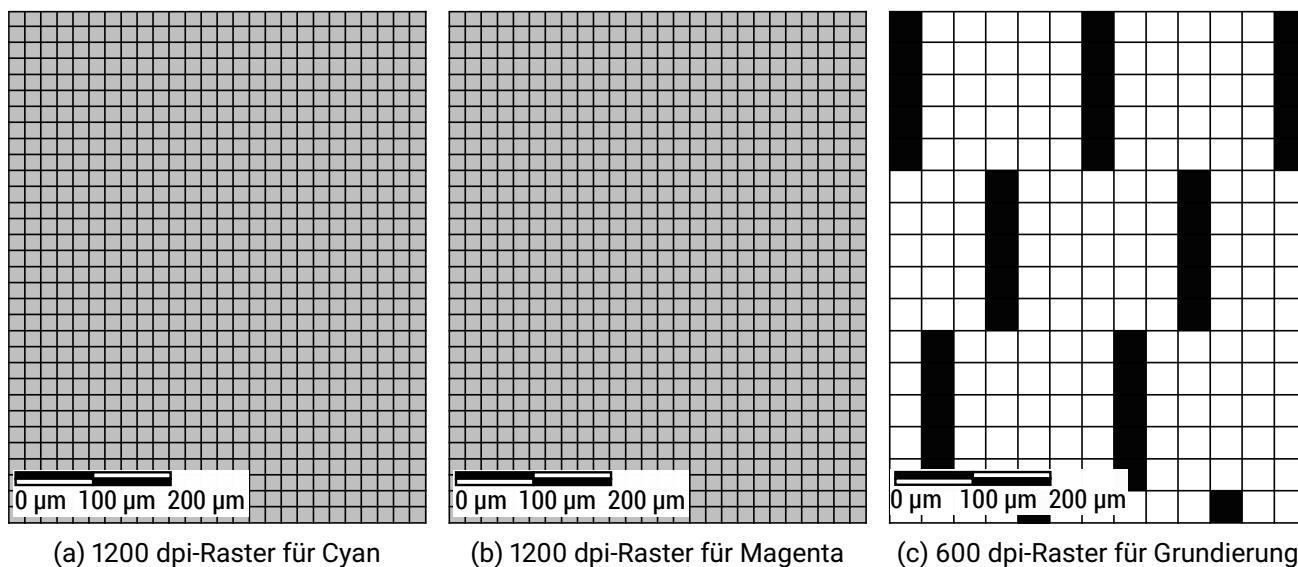


Abbildung 3.13.: Das Druckmuster zur Erkennung von Düsenausfällen auf unbehandeltem Substrat besteht aus drei Schichten, die übereinander gedruckt werden. Zwei Tinten werden mit niedrigem Tonwert flächig aufgetragen (a und b) und mit der Grundierung wird ein Linienmuster gedruckt (c).

mit geringem Tonwert gedruckt und die dritte Schicht ist wie zuvor das Linienmuster für die Grundierung. Die Farbverfälschung wird besonders deutlich bei den Sekundärfarben Orange, Grün und Violett, also ohne die Nutzung von Schwarz. Abgesehen von leichten Papierabhängigkeiten erreicht Violett, also eine Mischung aus Cyan und Magenta, jeweils mit geringen Tonwerten, die höchste Abweichung der Farbdichte zwischen grundierter und nicht grundierter Fläche. Dabei erfährt der Farbton der gedruckten Fläche an den grundierten Stellen eine Verschiebung im Farbraum. Der Einflussbereich ist jedoch kleiner als der des ersten Prinzips und beeinflusst im 1200 dpi-Raster lediglich bis zu drei Rasterspalten. In dieser Arbeit wird für das unbehandelte Substrat *Sappi Tauro* als Druckmuster jeweils 30% des maximalen Tonwerts für Magenta und Cyan verwendet und flächig aufgetragen.

### 3.5. Experimenteller Aufbau zur Trendanalyse des Positionsversatzes

Das Experiment zur Trendanalyse des Positionsversatzes baut auf den Ergebnissen von Kapitel 5 auf und verwendet das Konzept von Testdruckmustern im Beschnitt zur Düsenausfallmessung. Es wird eine Testseite mit vier kurzen Linienmustern in den Tinten CMYK mit einer Linienlänge von 10 px und Linienabstand von 12 px erzeugt. Mit den Kennwerten aus Kapitel 3.3.2 wird das Linienmuster mit der Impulsfolge  $3^{10}$  und der Linienanordnung ④ genutzt, da damit eine minimal längere, aber stabilere Alternative zum Muster mit der Impulsfolge  $3^{70}$  erreicht wird. Mit denselben Rahmenbedingungen und Versuchsparametern wie beim Experiment in Kapitel 3.3 wird die Testseite durch die Druckmaschine mehrfach hintereinander gedruckt, vom integrierten Kamerasystem aufgezeichnet und mit dem Algorithmus aus Kapitel 3.3.3 ausgewertet. Ausgangspunkt dieses Experiments sind die Messergebnisse zum Positionsversatz und die Zeitstempel der jeweiligen Messungen. Bei diesen Versuchen wurden nur die schwarz gedruckten Testdruckmuster ausgewertet, von denen eines beispielhaft in Abbildung 3.14 dargestellt ist. Zur besseren Erkennung der einzelnen Linien ist in Abbildung 3.15 eine Vergrößerung des Linienmusters dargestellt. Zur Anwendung der Linienanalyse durch das Vorhersagemodell wird *Matlab* herangezogen. Ausgehend von den Messergebnissen



Abbildung 3.14.: Kamerabild des kurzen Linienmusters gemäß Kapitel 5, um auf jeder Seite eine Messungen durchzuführen. Das abgebildete Linienmuster beinhaltet gedruckte Linien für alle Düsen eines gesamten Druckkopfes.



Abbildung 3.15.: Die Darstellung zeigt eine Vergrößerung der obigen Abbildung 3.14 des Linienmusters, in der die einzelnen Linien besser zu erkennen sind.

des Positionsversatzes aller Düsen wurden zur Bestimmung einer optimalen Trendanalyse im Experiment die Parameter entsprechend der folgenden Auflistung variiert:

- Länge der laufenden Mittelung
- Schrittweite für Bezug zwischen Mittelungen
- Gewichtungsfaktor von trägem gegenüber dynamischem Modellverhalten
- Kritisches Zeitintervall

Durch diese Parametervariation werden die optimale Mittelungsweite und Schrittweite bestimmt, die zu einem stabilen Kompensationsverhalten führen. Die Mittelungsweite beschreibt die Anzahl an Messungen, die bei der laufenden Mittelung berücksichtigt werden, und die Schrittweite beschreibt die Distanz zwischen zwei miteinander in Bezug stehenden laufenden Mittelungen. Des Weiteren wird anhand der Messreihen an Positionsversätzen zahlreicher Düsen ein Regressionsmodell konzipiert, das die Verläufe und das Verhalten des Positionsversatzes von Druckdüsen bestmöglich beschreibt. Das entwickelte Regressionsmodell wird anschließend angewandt und dazu eingesetzt, zukünftige Abweichungen der gedruckten Linien zu deren Sollpositionen zu ermitteln, um vorherzusagen, zu welchem Zeitpunkt der Linienversatz den Schwellwert übersteigt. Als Schwellwert, ab dem eine gedruckte Linie als eine versetzt positionierte Linie bewertet wird, wird der einfache Düsenabstand, also  $21\ \mu\text{m}$ , verwendet. Es wird angestrebt, das Regressionsmodell derart zu designen, dass über 90% der Vorhersagen eintreffen. Die Anzahl der Seiten, auf denen Druckfehler durch versetzte Linien zu sehen sind, soll damit um 50% reduziert werden. In diesem Experiment wird die Güte und Vorhersagegenauigkeit eines solchen Regressionsmodells erforscht. Dazu werden die folgenden Kennzahlen und Werte ermittelt:

- Gemittelter Positionsversatz
- Anzahl und Art der Meldungen von versetzten Linien
- Zeitintervall bis zum Erreichen des Schwellwertes
- Stabilität des Kompensationsverhaltens
- Vorhersagegenauigkeit

Für alle 5312 Düsen sind 27468 Messungen der Positionsabweichungen in Mikrometern in einer Tabelle eingetragen. Die Auswertedauer betrug durchschnittlich 0,303 Sekunden pro Kamerabild. Die Bestandteile der Programmierung des Regressionsmodells wie die laufende Mittelung sind in Kapitel 7.2 beschrieben. Die

---

Qualität dieser laufenden Mittelung wird in Kapitel 7.3 geprüft, indem die Anzahl und Art der Meldungen von versetzt positionierten Linien bei unterschiedlicher Mittelungsweite verglichen werden. Um die Stabilität des Kompensationsverhaltens zu bestimmen, wird ermittelt, wie viele der vorhergesagten Ausfälle einzeln oder in Gruppen auftreten. Ebenso wird bestimmt, wie viele aufeinander folgende Messungen unterhalb des Schwellwertes liegen. Es werden dabei diese vier Kategorien verwendet:

- Einzelne Ausfälle
- Gruppierte Ausfälle
- Einzelne Gutfälle
- Gruppierte Gutfälle

Als Gutfälle werden Messungen bezeichnet, deren Positionsversatz unterhalb des Schwellwertes liegt. Als *gruppiert* wird ein Gutfall oder Ausfall eingestuft, sobald mindestens der vorangegangene oder nachfolgende Messwert denselben Zustand gegenüber dem Schwellwert hat. Je mehr Gutfälle und Ausfälle gruppiert auftreten, desto stabiler ist das Kompensationsverhalten. Um eine optimale Schrittweite zu erhalten, werden die ermittelten Zeitintervalle bis zum Erreichen des Schwellwertes der tatsächlichen Dauer bis zur nächsten Messung einer versetzt positionierten Linie gegenübergestellt. Die Vorhersagegenauigkeit wird in Kapitel 7.4 für unterschiedliche Parametrisierungen im Box-Whisker-Plot aufgetragen. Diese Genauigkeit ergibt sich daraus, wie viele der gemachten, relevanten Vorhersagen, die innerhalb des kritischen Zeitintervalls liegen, mit der Realität übereinstimmen.



---

## 4. Simulationsmodell der optischen Bilderfassung

---

Um das Verhalten und die Eigenschaften von Systemkomponenten für die optische Bilderfassung zu verstehen, ist es nötig, diese modellhaft zu simulieren. Da sich Systeme und Technologien weiterentwickeln, ist neue Kamerahardware erforderlich, um beispielsweise breitere Substrate oder höhere Geschwindigkeiten zu unterstützen. Modellbasierte Entwicklung ist ein bewährtes Vorgehen, um die Kompatibilität zwischen einzelnen Komponenten zu überprüfen. Das entwickelte Simulationsmodell unterstützt die Planung und Konstruktion neuer Hardware für Bilderfassungssysteme. Im folgenden Kapitel wird der in dieser Arbeit entstandene Aufbau und Programmcode des Simulationsmodells der optischen Bilderfassung beschrieben. Im Unterkapitel 4.2 werden die beiden programmierten Softwareanwendungen *psfMeasure* und *curveGenerator* beschrieben, die bei der Parametrierung des Simulationsmodells unterstützen. Das bereits im Markt eingeführte CPP-interne Kamerasystem mit integrierter *allPixa Pro* von *Chromasens* dient der Parametrierung und Verifikation des Simulationsmodells. Das entwickelte Simulationsmodell erzeugt ein simuliertes Kamerabild (Simulationsbild), dessen Vergleichbarkeit mit einem Kamerabild der realen optischen Bilderfassung im Kapitel 4.3 verifiziert wird. Im anschließenden Folgeexperiment des Kapitel 4.3 wird die Übertragbarkeit des Simulationsmodells auf das Prototyp-Kamerasystem verifiziert.

### 4.1. Beschreibung des entwickelten Simulationsmodells

Das Simulationsmodell der optischen Bilderfassung besteht aus den vier Prozesskomponenten Objekt, Beleuchtung, optisches Abbildungssystem und Bildsensor. Diese vier Prozesskomponenten lassen sich dem Aufbau eines physikalischen Bilderfassungssystems gemäß Abbildung 2.14 zuordnen. Hinter jeder Prozesskomponente verbirgt sich Programmcode, der Eingabewerte verarbeitet und Ausgabewerte an die nachfolgende Prozesskomponente weitergibt. Entsprechend der Austauschbarkeit eines Bildsensors oder Objektivs ist das Simulationsmodell modular aufgebaut, sodass beispielsweise die Prozesskomponente des Bildsensors durch einen alternativen Programmcode ersetzt werden kann. In Abbildung 4.1 ist der Ablauf des Simulationsmodells gezeigt. Die mittlere Spalte zeigt die erwähnten Prozesskomponenten, die den Signalweg eines als Objekt genutzten Testmusters über Beleuchtung, das optische Abbildungssystem und die Diskretisierung im Bildsensor hin zu einem Simulationsbild beschreiben. Die linke Spalte zeigt für die Prozesskomponenten zusätzliche, spezifische Eingabeargumente, welche die konkrete, zu simulierende Kameratechnik charakterisieren. Dazu wird beispielsweise die Anordnung der LEDs festgelegt oder aus dem Datenblatt des Objektivs die Verzeichnung übertragen. Die rechte Spalte beschreibt die Prozesskomponenten in wenigen Worten. Das Resultat des Simulationsmodells der optischen Bilderfassung – das Simulationsbild – wird abschließend bereitgestellt und erlaubt eine Überprüfung mit bereits etablierten Mitteln der Bildanalyse. Damit soll verifiziert werden, ob das Simulationsmodell eine ausreichende Güte für die beabsichtigte Anwendung besitzt. Auf den nachfolgenden Seiten werden die Prozesskomponenten und Charakteristika der Software im Detail beschrieben. Das Simulationsmodell der optischen Bilderfassung ist symmetrisch zur Mitte des Bildsensors aufgebaut, weshalb in allen Prozesskomponenten nur jeweils die rechte Hälfte von Simulationsbild und Kamerakomponenten betrachtet und simuliert werden. Entsprechend werden in folgenden Darstellungen und Abbildungen auch nur Resultate einer Sensorhälfte, also beispielsweise die Pixel von der Mitte bis zum rechten Rand des Bildsensors aufgeführt.

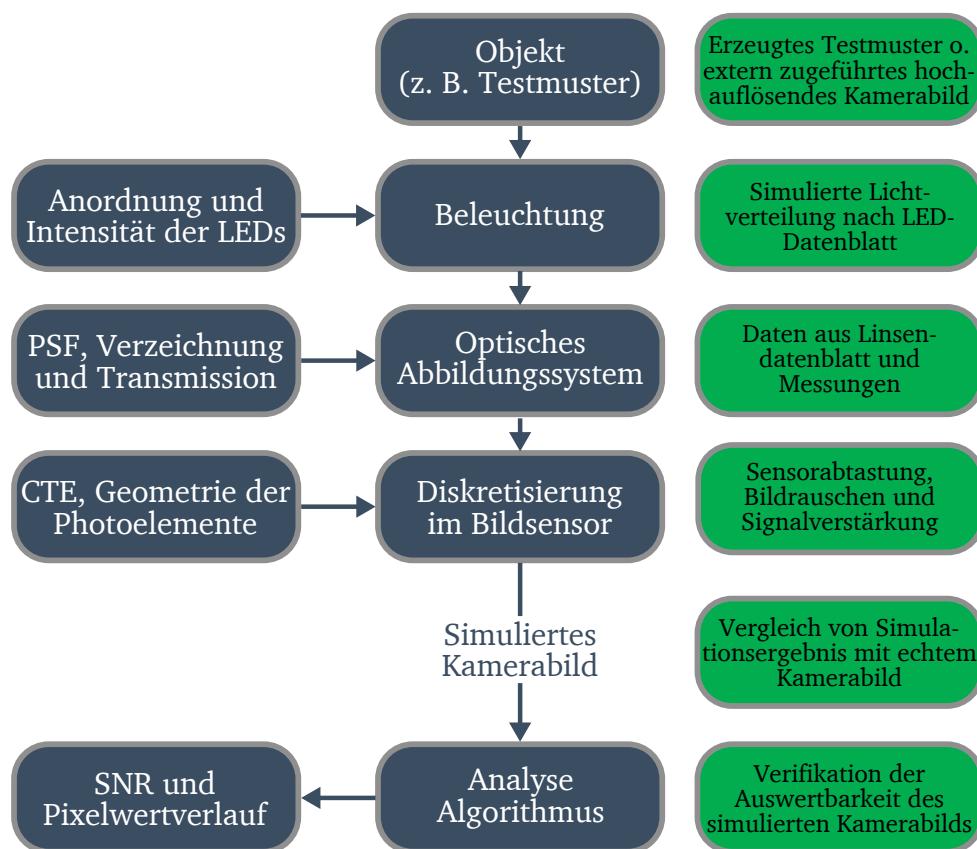


Abbildung 4.1.: Veranschaulichung des Simulationsmodells zur optischen Bilderfassung mit Eingabeargumenten links, Prozesskomponenten in der Mitte und in der rechten Spalte eine genauere Beschreibung der jeweiligen Prozesskomponente. Jede Prozesskomponente entspricht einem austauschbaren und anpassbaren Programmcode des modularen Aufbaus. Nach Durchlaufen der Simulation lässt sich das Simulationsergebnis mit einem Kamerabild des physikalischen Kamerasystems vergleichen. Der Vergleich von Simulationsergebnis und Kamerabild erfolgt über die Auswertung durch bestehende Algorithmen sowie den SNR und den Pixelwertverlauf.

#### 4.1.1. Objekt

Der Ausgangspunkt für das Modell – das Objekt – ist eine rechteckige zweidimensionale Matrix von Pixeln mit zugehörigen Pixelwerten, auf welche sämtliche Simulationsschritte angewandt werden. Das Objekt ist wahlweise ein Muster, das direkt im Modell erzeugt wird oder ein externes Kamerabild. Der Nutzer des Simulationsmodells legt die Quelle zu Beginn der Simulation fest. Das im Modell erzeugte Muster besteht aus schwarzen Linien, deren Anzahl, Breite und Abstand sich in der Software über eine Eingabemaske definieren lassen. Das Muster wird als zweidimensionale Anordnung von Pixeln erzeugt, wobei die Pixel der schwarzen Linien einen Pixelwert von 0 und die sonstigen Pixel einen Pixelwert von 255 haben. Die Software erlaubt zusätzlich, das Muster in beliebiger Auflösung, in Schwarz-Weiß oder als Farbbild (RGB), sowie mit beliebiger Anzahl an Pixelzeilen zu erzeugen und erlaubt somit die Steuerung der Komplexität der Simulation. Wenn ein externes Kamerabild geladen wird, z. B. ein Kamerabild in hoher Auflösung von der Messkamera oder ein 600 dpi-Druckmuster, wird die Simulation auf dieses externe Bild angewandt, die Pixelwerte sind dann jedoch abhängig vom externen Bild. Bei hoher Auflösung, großer Bildhöhe und drei



---

Farbflächen überschreiten die benötigten Ressourcen leicht 8 GB Arbeitsspeicher. Zum Testen gilt es, den verfügbaren Speicher zu berücksichtigen oder besser nur einen Farbkanal zu wählen. Für die nachfolgend beschriebenen Simulationsberechnungen wird nur eine Hälfte des Objektes für das Simulationsbild genutzt, da der Bildsensor und das Objektiv achsensymmetrisch zum Zentrum des optischen Abbildungssystems sind.

#### 4.1.2. Beleuchtung

In der ersten Prozesskomponente, die das Objekt durchläuft, wird das Beleuchtungsprofil für die LED-Leiste erzeugt. Die Intensität der LEDs wird im Modell durch Parametrierung des bereitgestellten Stroms für die LED-Leiste kontrolliert. Abgesehen von der Intensität muss innerhalb der Prozesskomponente die geometrische Anordnung der LEDs gewählt werden. Dazu stehen Parameter wie die Anzahl der LEDs und deren Abstand zueinander zur Verfügung. Aus diesen beiden Werten wird ein Vektor mit LED-Positionen für die gesamte Breite des simulierten optischen Abbildungssystems erzeugt. Jede LED erzeugt im Modell eine Leuchtintensität in Form einer Gauß'schen Kurve, die aus dem LED-Datenblatt abgeleitet wird. Die Überlagerung aller Einzelkurven unter Betrachtung ihrer Anzahl und Entfernung ergibt die Gesamtbeleuchtung über die Breite des Abbildungssystems hinweg. Abhängig von dem eingestellten Abstand der LEDs ergeben sich Schwankungen in der Intensität, die in späteren Prozesskomponenten auszugleichen sind. Die Gesamtbeleuchtung wird mit dem ursprünglichen Simulationsbild verrechnet, wodurch sich ein modifiziertes Simulationsbild ergibt, das um die Eigenschaften der Beleuchtung ergänzt wurde. Dieses Simulationsbild wird am Ende des Programmcodes dieser Prozesskomponente normalisiert und an die nächste Komponente weitergegeben. Als zusätzlicher Output in Form der Beleuchtungsintensität werden dichter gepackte LEDs oder höhere Ströme berücksichtigt, die im weiteren Verlauf des Modells in der Diskretisierung genutzt werden.

#### 4.1.3. Optisches Abbildungssystem

Die Prozesskomponente des optischen Abbildungssystems wird im Simulationsmodell dazu verwendet, um die Unschärfe der Punktspreizfunktion (PSF) und die Transmission des Objektivs ins Simulationsbild zu integrieren. Die PSF erzeugt aus harten Kanten einen weichen Verlauf vergleichbar mit der Darstellung in Abbildung 4.2, in der ein Ausschnitt der normierten Pixelwerte aus dem Simulationsbild dargestellt wird. Die blaue Linie zeigt die steilen Flanken des ursprünglich erzeugten Musters. Die rote Linie stellt die normierten Pixelwerte des Simulationsbildes nach der Faltung mit der PSF und den daraus resultierenden weichen Verlauf dar. Bei Anwendung der Faltung von Simulationsbild und PSF wird ein Bereich um das betrachtete Pixel herum berücksichtigt, um den resultierenden Pixelwert zu berechnen. An den Rändern des Simulationsbildes führt die Faltung zu einer Verwendung nicht verfügbarer Pixel, wodurch diese Bereiche fälschlicherweise geringere Pixelwerte haben. Entsprechend dürfen Pixelwerte im Randbereich des Simulationsbildes nicht genutzt werden. Im Simulationsmodell wird die zweidimensionale PSF in Form von zwei eindimensionalen Linienspreizfunktionen (Line Spread Function (LSF)) genutzt, um sie getrennt voneinander anzuwenden. Bei Simulationsbildern mit weniger als 300 Pixelzeilen wird nur die horizontale LSF, also quer zur Papierlaufrichtung, angewandt. Erst Simulationsbildern mit mehr als 300 Pixelzeilen werden zusätzlich mit einer vertikalen LSF, also in Papierlaufrichtung, gefaltet. Nach Anwendung der vertikalen LSF wird ein Sechstel der Länge der LSF an Pixelzeilen oben und unten vom Simulationsbild entfernt. Für die horizontale LSF, die im Simulationsmodell unabhängig von der Anzahl an Pixelzeilen immer angewandt wird, gilt dies auch für die rechte Kante (Sensorende). In der Mitte des Bildes würde das Entfernen von Pixelspalten aufgrund der symmetrischen Betrachtung zu einem verschobenen Endergebnis führen, weshalb diese Spalten auf einen festen Wert von 0,9 gesetzt werden. Die im Modell angewandte,

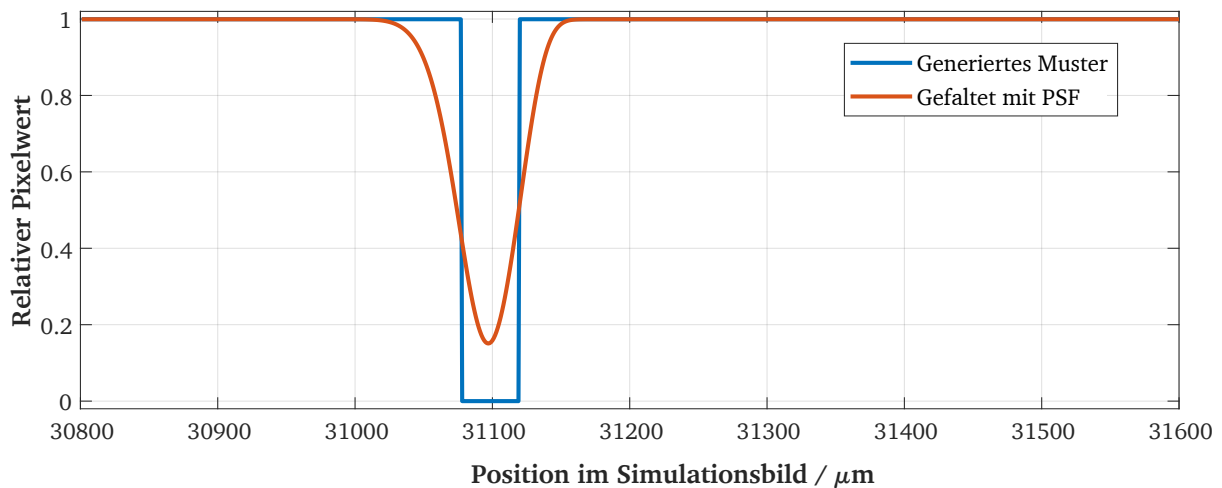


Abbildung 4.2.: Vergleich der normierten Pixelwerte einer Linie an Position 31100 µm vor (blaue Linie) und nach (rote Linie) der Faltung mit der Punktspreizfunktion (PSF). Die Linie nach der Faltung streut breiter und die Bandbreite der Pixelwerte nimmt ab.

diskrete Faltung ist in der folgenden Formel 4.1 beschrieben.

$$F_{conf}[i] = (F * LSF)[i] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} F[m]LSF[i - m] \quad (4.1)$$

Eine Zeile des Simulationsbildes wird durch  $F[i]$  dargestellt, wobei  $i$ , bzw.  $m$  für die Pixelposition im Simulationsbild, bzw. in der LSF steht. Die LSF ist normalisiert und diskretisiert in derselben Auflösung mit der das Objekt abgetastet wurde. Die LSF lässt sich auf zwei Wegen errechnen. Die erste Möglichkeit ist eine Messung der Kantenspreizfunktion (Edge Spread Function (ESF)) mit anschließender Ableitung nach dem Ort. Die zweite Möglichkeit ist eine Bestimmung der LSF durch inverse, diskrete Fourier-Transformation  $iDFT$  der Modulationsübertragungsfunktion (Modulation Transfer Function (MTF)) gemäß Formel 4.2 nach Boreman (2001):

$$LSF = iDFT[MTF] \quad (4.2)$$

Die MTF ist ein Qualitätsmerkmal des Objektivs und ein wesentliches Kriterium für dessen Eignung in Bilderfassungssystemen. Die entsprechende MTF kann vom Hersteller des Objektivs für bestimmte Bereiche oder Blendenstufen des Objektivs angefordert werden. Die MTF ist eine Funktion, die den Kontrast zwischen schwarzen und weißen Linien in Bezug auf ihre Breite beschreibt. Das zugrundeliegende Prinzip basiert auf einem Linienmuster mit abwechselnd schwarzen und weißen Linien mit jeweils definierter Breite. Je geringer die Linienbreite ist, ohne dass ein unscharfes Grau entsteht, desto besser ist das Objektiv.

Eine weitere Charakteristik von Objektiven ist die relative Transmission, die sich dem Datenblatt entnehmen lässt. Die relative Transmission sinkt mit zunehmendem Abstand vom optischen Zentrum, wodurch das Simulationsbild zum Sensorrand hin typischerweise geringere Pixelwerte aufweist. Der Verlauf der normierten relativen Transmission für die gesamte maximale Sensorbreite ist als mathematische Funktion in der Prozesskomponente des optischen Abbildungssystems hinterlegt und wird nach Anwendung der PSF mit dem Simulationsbild verrechnet. Ein weiterer Bestandteil dieser Prozesskomponente ist der Transmissionsgrad des Objektivs für die einzelnen Spektralfarben. Der Anteil des Transmissionsgrads wird ebenfalls aus dem Datenblatt des Objektivs für die drei Farbkanäle Rot ( $\sim 620$  nm), Grün ( $\sim 550$  nm) und Blau ( $\sim 460$  nm) entnommen. Dabei entsprechen die Wellenlängen den Wellenlängen maximaler spektraler Empfindlichkeit der korrelierenden drei farbigen Sensorzeilen. Mit dem Transmissionsgrad wird jeder der drei

---

Farbkanäle individuell skaliert. Das Simulationsbild wird abschließend gegebenenfalls auf den maximalen Erfassungsbereich des Objektivs reduziert. Der Bereich des Simulationsbildes, der außerhalb des Objektivs liegt, wird im Simulationsbild entfernt und bei der weiteren Verarbeitung nicht mehr berücksichtigt.

#### 4.1.4. Diskretisierung im Bildsensor

Bei der Prozesskomponente der Diskretisierung wird das hochauflösende Simulationsbild durch Zusammenfassen von Pixelzeilen und -spalten auf die gewünschte Auflösung umgerechnet. Dabei wird das Verhältnis von hoher zu gewünschter Auflösung genutzt, um die Anzahl an hochauflösenden Pixeln zu bestimmen, die zu einem Pixel im niedrig aufgelösten Simulationsbild zusammengefasst werden. Zusätzlich wird die Verzeichnung des Objektivs nach der von Zhang (2000) beschriebenen Methodik durch Dehnen oder Stauchen des Objekts mit dem entsprechenden Wert aus dem Datenblatt berücksichtigt. So wird die Anzahl der hochauflösenden Abtastpunkte für einen niedrig aufgelösten Pixel geringfügig über die Sensorbreite variiert. Durch die Einstellung des Parameters *CCDshift* kann der Anwender einen zusätzlichen Versatz zwischen der Mitte des Objektivs und der Mitte des Bildsensors einstellen, um eine leichte Verschiebung zu simulieren. Die für CCD typische Übertragungseffizienz (CTE) wird in dieser Prozesskomponente ebenfalls berücksichtigt. Die Energieausbeute von Photoelementen reduziert sich abhängig von der Entfernung des Photoelements im Bildsensor zum Mikrocontroller, da Ladungen die Sensorzeile entlang zum Mikrocontroller durchgereicht werden. Im Simulationsmodell wird diese Reduktion durch eine anteilige Minderung der Pixelwerte realisiert. Danach erfolgt die Abtastung in Papierlaufrichtung auf die Zielauflösung ebenfalls durch Zusammenfassung der hochauflösenden Pixel im Simulationsbild.

Im Rahmen des Simulationsmodells wird der Signal-Rauschabstand (SNR) simuliert, die Pixelwerte auf 8 Bit diskretisiert und mit einer vordefinierten Skalierung angepasst. Der SNR wird in Dezibel (dB) angegeben und in Form eines normalverteilten Bildrauschens, also zufällig schwankender Pixelwerte simuliert. Das Bildrauschen wird in dieser Prozesskomponente mit dem Simulationsbild verrechnet. Bei einer Simulation mit einem externen hochauflösenden Kamerabild, z. B. durch die Messkamera (siehe Abbildung 3.4), ist damit zu rechnen, dass das Bildrauschen im Simulationsbild im Vergleich zum Kamerabild zu stark wird, da es sich um eine Überlagerung des Bildrauschens aus dem externen, hochauflösenden Kamerabild und dem in dieser Prozesskomponente simulierten Bildrauschen handelt. Die vordefinierte Skalierung der Pixelwerte richtet sich nach der Mitte des simulierten, optischen Abbildungssystems. Alle Pixelwerte des Simulationsbildes werden so skaliert, dass der Pixelwert in der Mitte des optischen Abbildungssystems den zu Beginn der Simulation konfigurierten Wert zwischen 0 und 255 einnimmt. Mit dem konfigurierten Pixelwert werden Faktoren aus der Leuchtintensität der LED-Leiste und der Einstellung der Blende multipliziert, die aufeinander abgestimmt sein müssen. Anschließend werden die exakten Werte auf ganze Zahlen zwischen 0 und 255 gerundet. Dies führt zum endgültigen Simulationsbild, das bei korrekter Anwendung des Simulationsmodells das Kamerabild eines entsprechenden realen Kamerasystems nachbildet.

## 4.2. Weitere entwickelte Softwareanwendungen

Neben dem Simulationsmodell der optischen Bilderfassung wurden mit *psfMeasure* und *curveGenerator* im Rahmen dieser Arbeit zwei unabhängige Hilfsprogramme geschaffen, die die Anwendung des Simulationsmodells unterstützen und Anpassungen an unterschiedliche Hardware ermöglichen und in diesem Kapitel genauer beschrieben sind. Ein Teil der verwendeten Funktionen im Simulationsmodell der optischen Bilderfassung wird aus den Ergebnissen der Hilfsprogramme abgeleitet. Die Applikation *psfMeasure* ermöglicht die Messung der Punktspreizfunktion, während die Applikation *curveGenerator* die Nachbildung von Funktionskurven aus Bildern erlaubt. Mit dem *curveGenerator* werden beispielsweise die Funktionen

---

der relativen Transmission und der Modulation erzeugt, die sich an den Kurve aus dem Objektivdatenblatt orientieren und anschließend im Simulationsmodell der optischen Bilderfassung genutzt werden.

#### 4.2.1. Messung der Punktstreiffunktion

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben ist, kann die PSF des optischen Abbildungssystems nicht nur aus der MTF berechnet werden, sondern auch vollständig anhand von Pixelwerten eines Kamerabildes bestimmt werden. Da die PSF des Objektivs gemäß Abbildung 4.2 für eine Streuung von einfallendem Licht auf benachbarte Photoelemente im Bildsensor sorgt, lässt sich umgekehrt aus dem Kamerabild auf die PSF schließen. Dies ermöglicht nicht nur die Ermittlung der vom Hersteller simulierten Verzeichnung des Objektivs, die im Datenblatt als Diagramm dargestellt ist, sondern auch den Einfluss von tatsächlichen geometrischen Abweichungen, die bei der Herstellung des Objektivs entstehen. Die im Rahmen dieser Arbeit in *Matlab* programmierte Software *psfMeasure* erfüllt den Zweck einer solchen Berechnung der PSF anhand des Kamerabildes. Ausgangsbasis der Vermessung der PSF ist ein Kamerabild eines Objektes mit bekannten geometrischen Maßen und hohem Kontrast, sprich einem hohen Pixelwertunterschied. Das Kamerabild wird mit der vorliegenden Zeilenkamera und dem Objektiv bei einer Transportgeschwindigkeit von  $80 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  aufgezeichnet. Als Objekt wird die auf Fotopapier belichtete Kalibrierseite aus Abbildung 3.5 genutzt. Das Druckmuster der Kalibrierseite beinhaltet in den grün eingerahmten Bereichen horizontal, also quer zur Bewegungsrichtung des Objekts (vgl. Abbildung 4.3), und vertikal verlaufende 0,5 mm breite, schwarze Balken auf weißem Substrat, wodurch im Kamerabild ein hoher Unterschied der Pixelwerte erreicht wird. Durch den hochwertigen Herstellungsprozess der Kalibrierseite sind die Maße der belichteten Objekte



Abbildung 4.3.: Leicht geneigter schwarzer Balken der Kalibrierseite aus Abbildung 3.5 zur Bestimmung der Punktstreiffunktion.

auf der Kalibrierseite bis auf wenige Mikrometer exakt und die Geradlinigkeit der Kanten ist gegenüber Inkjet-Druck vielfach genauer und präziser. Im Kamerabild muss die Kalibrierseite zwischen  $0,2^\circ$  und  $0,5^\circ$  geneigt sein, damit die Kante des schwarzen Balkens mehrere Pixelzeilen durchquert. Das Kamerabild eines einzelnen solchen Balkens dient der Software *psfMeasure* als Input.

Im Fall des horizontal verlaufenden Balkens wird der senkrecht dazu orientierte Anteil der PSF berechnet, der maßgeblich von der Belichtungs- und Auslesedauer der Photoelemente der Zeilenkamera und der Bewegung des Objekts beeinflusst wird. Hingegen wird bei den vertikalen Balken aus dem zweiten grün umrahmten Bereich aus Abbildung 3.5 der horizontale Anteil der PSF berechnet, der von der Verzeichnung des Objektivs abhängt. Die Unterscheidung von vertikaler und horizontaler PSF ermöglicht die Entkopplung des Anteils des Objektivs von der Unschärfe, die durch die Bewegung des Objekts während der Aufnahme entsteht.

Anhand der beiden Kanten des schwarzen Balkens und deren bekanntem Abstand von 0,5 mm werden in der Software zwei parallele Geraden erzeugt, deren Steigung der Neigung der Kalibrierseite entspricht. Der lotrechte Abstand der beiden Geraden beträgt exakt 0,5 mm. Anschließend berechnet die Software *psfMeasure* für jedes Pixel  $P_{i,j}$  in der Umgebung der Kanten des Balkens den kürzesten Abstand  $d_{i,j}$  vom Zentrum des Pixels  $P_{i,j}$  zur approximierten Kante, bzw. der erzeugten Gerade. Die Werte  $i$  und  $j$  stehen dabei für die Kamerabildzeile und -spalte des jeweiligen Pixels. Die Abbildung 4.4 veranschaulicht die eben beschriebene Vermessung der Pixelwerte um die Kanten. Im Schema in Abbildung 4.4 ist verdeutlicht, dass

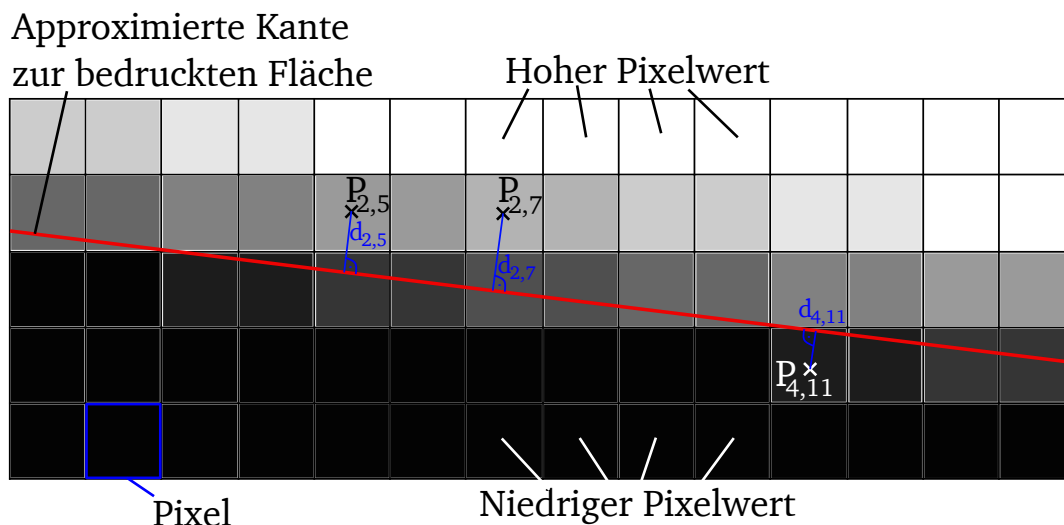


Abbildung 4.4.: Schematische Darstellung des Kamerabildes des geneigten schwarzen Balkens aus Abbildung 4.3. Die rote Linie approximiert die Kante des schwarzen Balkens. Für jeden Pixel  $P_{i,j}$  im Kamerabild wird der Abstand  $d_{i,j}$  zwischen dem Zentrum des Pixels und der approximierten Kante gemessen. Die weißen Kästchen repräsentieren hohe Pixelwerte und damit unbedruckte Bereiche der Vorlage, schwarz eingefärbte Kästchen hingegen entsprechen dem schwarzen Balken. Durch die Verzeichnung des optischen Abbildungssystems kommt es im Bereich der Kante zu feinen Abstufungen der Pixelwerte.

durch die geringe Neigung des schwarzen Balkens die Pixelwerte entlang einer Pixelzeile einen kontinuierlichen, detaillierten Gradienten aufweisen. Dadurch lässt sich eine feine Abtastung und Genauigkeit bezüglich des Abstands zur Kante erreichen. Aus dem Abstand  $d_{i,j}$  und dem Pixelwert jedes Pixels  $P_{i,j}$  lässt sich die Darstellung in Abbildung 4.5 erzeugen. Durch Auftragen des Pixelwertes gegenüber dem gemessenen Abstand zur Kante für alle in Abbildung 4.3 gezeigten Pixel wird eine Abtastung um die Kante von hundertstel Mikrometern erreicht. Eine derart feine Abtastung wäre für die Messung der PSF nicht erforderlich, doch sie hilft hier, durch Mittelung die Kurvennachbildung zu vereinfachen. Die Messwerte in Abbildung 4.5 beschreiben das Kantenspreizverhalten, das den direkte Zusammenhang zwischen den Pixelwerten und dem exakten Abstand zur Position der Kante darstellt. Im letzten Teil der Software wird die Exponentialfunktion ermittelt, die die Kurvenform der gemessenen Pixelwerte approximiert. Da die Transmission des Objektivs abhängig von der Wellenlänge ist, wird die Form einer Kante in jedem Farbkanal individuell gemessen. In Abbildung 4.5 sind die Messwerte für den roten Kanal dargestellt sowie die daraus ermittelte ESF als schwarze Kurve. Um abschließend die zweidimensionale PSF zu erhalten, müssen die beiden eindimensionale ESF – horizontal und vertikal – abgeleitet und anschließend überlagert werden.

Die Prozesskomponente des optischen Abbildungssystems des Simulationsmodells verwendet die ESF, wie sie in der Software *psfMeasure* generiert wird. So kann sie nach der Approximation direkt in das Simulationsmodell eingefügt werden und wird dort differenziert, um die LSF im Modell zu nutzen. Im Modell wird der Zusammenhang zwischen Pixelwert und Abstand von Pixel zu Kante umgekehrt verwendet, sodass die Pixelwerte im Simulationsbild unter Kenntnis der LSF in Abhängigkeit des Abstands zur Kante simuliert werden.

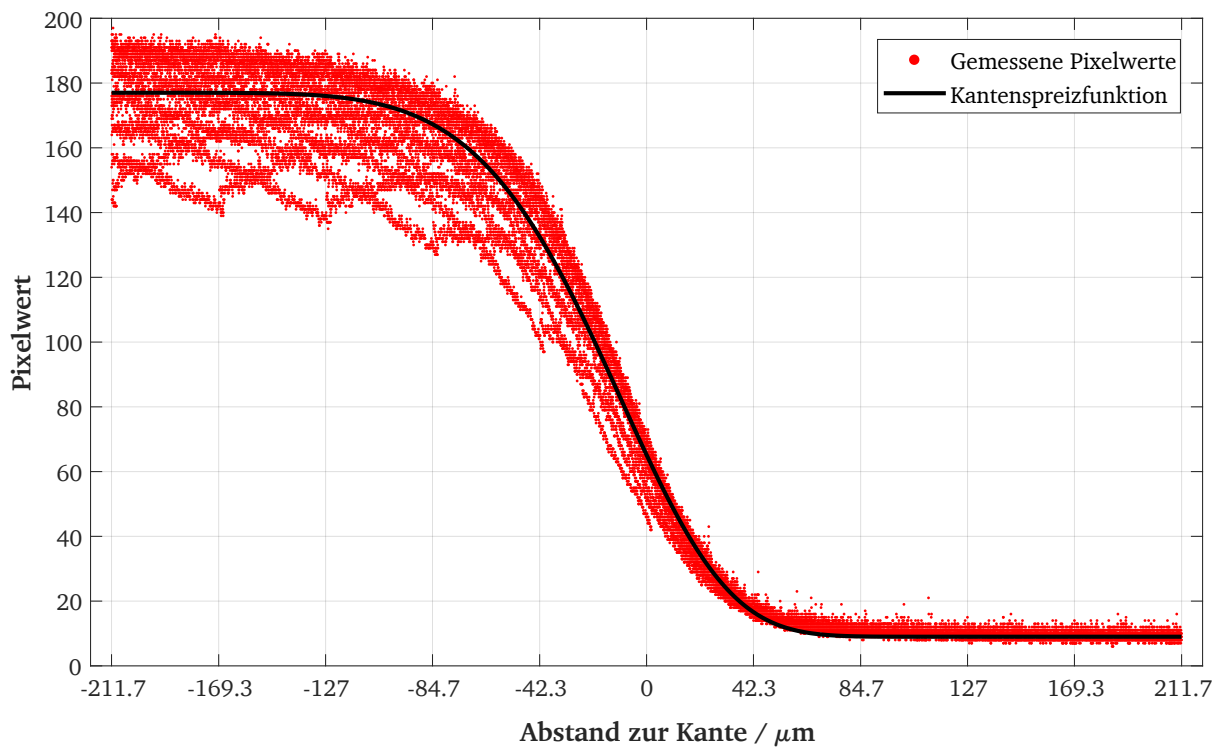


Abbildung 4.5.: In dem Kamerabild ermittelte Pixelwerte aufgetragen über deren Abstand  $d_{i,j}$  von der Mitte des entsprechenden Pixels zur approximierten Kante des Schwarz-Weiß-Übergangs für den roten Farbkanal. Die schwarze Linie zeigt die optimierte Kurve der ESF. Die niedrigeren Pixelwerte auf der linken Seite des Diagramms ergeben sich durch die diskreten Zeilen und Spalten im Kamerabild.

## 4.2.2. Nachbildung von Funktionskurven

Zur einfachen Nachbildung von Funktionskurven aus Datenblättern wurde im Rahmen dieser Arbeit die Software *curveGenerator* entwickelt. Der *curveGenerator* ist eine eigenständige Softwareanwendung, die in *Matlab* mit einer grafischen Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 4.6) programmiert wurde, um den

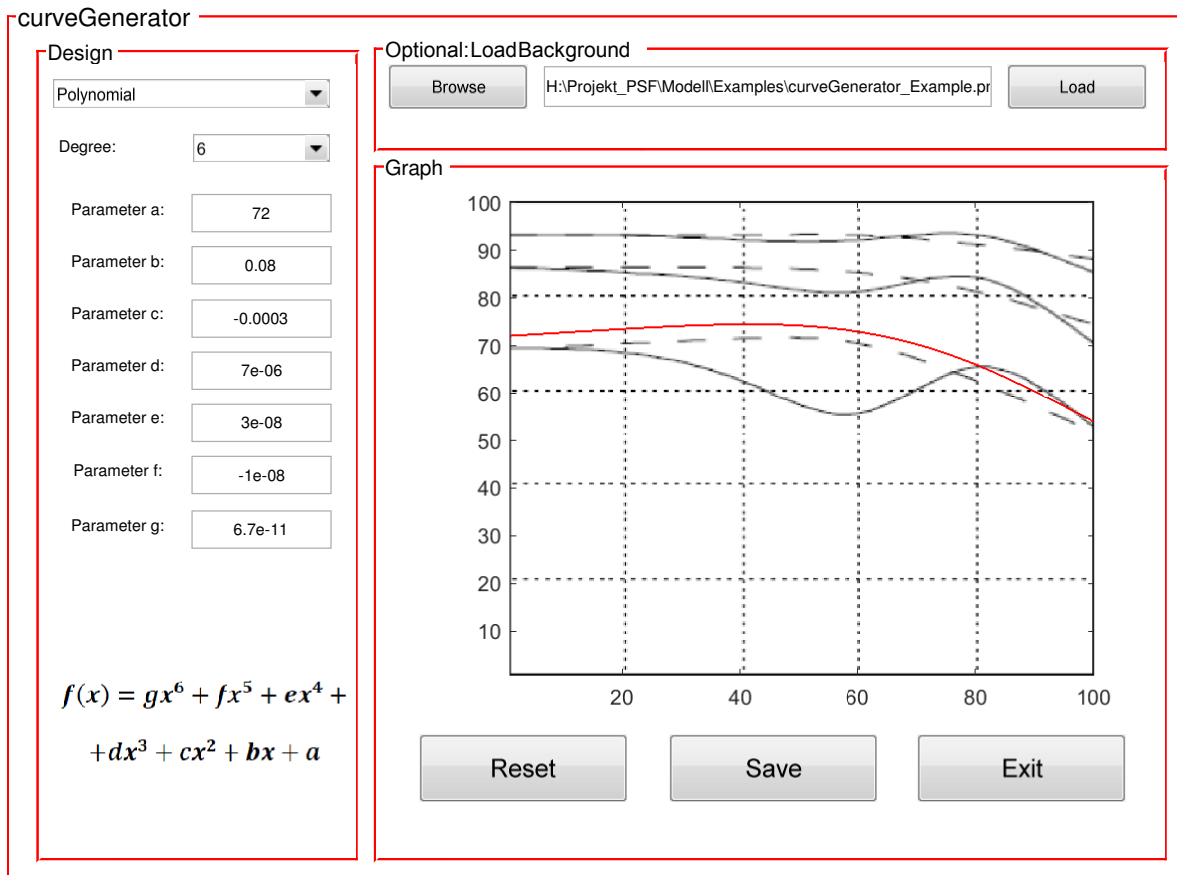


Abbildung 4.6.: Grafische Benutzeroberfläche des entwickelten Tools *curveGenerator* um Kurven aus Datenblättern nachzubilden. Die rote Kurve ist bereits bis auf die Konstante im Parameter a an die darunter liegende gestrichelte Linie angepasst.

Anwender beim Entwerfen und Nachbilden von Funktionen mit einer bestimmten Form in Echtzeit zu unterstützen. Mit einigen leicht editierbaren Parametern können verschiedene Arten von Kurven dargestellt werden, um sie an die Original-Kurven anzupassen. Die Darstellung ist bisher für einen der folgenden Terme möglich, durch die sich die meisten und relevantesten Formen von Funktionskurven nachbilden lassen:

- Polynom bis 6. Grad

$$f(x) = g \cdot x^6 + f \cdot x^5 + e \cdot x^4 + d \cdot x^3 + c \cdot x^2 + b \cdot x + a \quad (4.3)$$

- Exponentialfunktion

$$f(x) = a \cdot e^{b \cdot x^c + d} + e \quad (4.4)$$

- Sinusfunktion

$$f(x) = a \cdot \sin(b \cdot x^c + d)^e + f \quad (4.5)$$

---

Diese Funktionen können in der Bedienoberfläche mit bis zu sieben Parametern gestaltet werden und die resultierende Kurve wird sofort im Diagramm dargestellt. Nach Auswahl einer Funktion in der linken oberen Ecke erscheinen im Feld *Design* die benötigten Parameter der entsprechenden Funktion. Optional ist es möglich, ein Bild mit Kurven als Vorlage zu laden und als Hintergrund in das rechte Diagramm einzublenden. Als Vorlage für die Kurven lassen sich Grafiken aus dem Datenblatt verwenden, um die Nachbildung der Kurven als Funktion zu erleichtern. Im Bereich *Graph* der dargestellten Bedienoberfläche (Abbildung 4.6) ist die Modulation des Objektivs als Hintergrund eingeblendet. Durch die eingegebenen Werte in den Parameterfeldern ergibt sich die rote Kurve als Überlagerung zum eingefügten Diagramm. Nach demselben Prinzip wurden neben der Modulation auch die Verläufe der relativen Transmission und der Verzeichnung des Objektivs über die Sensorbreite als Hintergrund eingefügt und als Funktion nachgebildet. Beim Speichern werden sowohl die empirisch ermittelten Koeffizienten als auch die vollständige Formel gesichert, die in den Prozesskomponenten des Simulationsmodells der optischen Bilderfassung verwendet werden.

### 4.3. Verifikation des Simulationsmodells

Dieser Abschnitt beschreibt die Auslegung, Verifikation und Feinabstimmung der Simulation mit dem bestehenden Kamerasystem aus Kapitel 3. Die Datenblätter von Bildsensor, Objektiv und Beleuchtung sind über die Hersteller zugänglich und liegen vor. Aus ihnen wurden die erforderlichen Parameter entnommen und in das Modell eingetragen, um eine vergleichbare optische Bilderfassung zu simulieren. Dafür werden die Ergebnisse der beiden hierfür programmierten Hilfskripte in das Modell übernommen und eine Feinabstimmung durch einen Vergleich mit tatsächlichen Aufnahmen vorgenommen.

#### 4.3.1. Anpassung des Simulationsmodells an das Kamerasystem

Als Objekt für das Simulationsmodell wird ein hochauflösendes Kamerabild der Messkamera verwendet, das im nächsten Kapitel genauer beschrieben wird. Weiterhin wurden in den Prozesskomponenten des Simulationsmodells die folgenden Anpassungen an die physikalische Hardware vorgenommen.

##### Beleuchtungsverteilung des Kamerasystems

Um die Verteilung der Beleuchtung nachzubilden, wird die Anordnung der LEDs der verwendeten Lichtleiste im Simulationsmodell hinterlegt. Die relative spektrale Emission und die Abstrahlcharakteristik werden dem Datenblatt der verbauten LEDs entnommen (Osram Opto Semiconductors GmbH 2013). Bei einem konstanten Abstand von jeweils 20 mm zwischen den 16 LEDs des betrachteten Bereichs überlagern sich die Leuchtintensitäten benachbarter Leuchtdioden und sorgen für eine nahezu homogene Ausleuchtung des Objektes gemäß Abbildung 4.7. Durch die diffuse Anstrahlung schwankt die Lichtintensität im Simulationsmodell lediglich um 0,06%. Entsprechend dem Transmissionsgrad des Objektivs und den Farbfiltern der Sensorzeilen für RGB werden für dieselben Wellenlängen die relative spektralen Emissionen 0,23 (620 nm, Rot), 0,43 (550 nm, Grün) und 0,4 (460 nm, Blau) ins Modell übertragen. Bei diesen Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die Verstärkungsfaktoren für die RGB-Kanäle innerhalb der Kamera in der Lage sind die relativen Unterschiede zwischen den Farbkanälen auf ein einheitliches Niveau auszugleichen.

##### Optisches Abbildungssystem des Kamerasystems

Beim optischen Abbildungssystem werden gemäß dem Datenblatt des Objektivs die Verzeichnung sowie relative und spektrale Transmission im Simulationsmodell hinterlegt. Aufgrund des Aufbaus des Kamerasystems



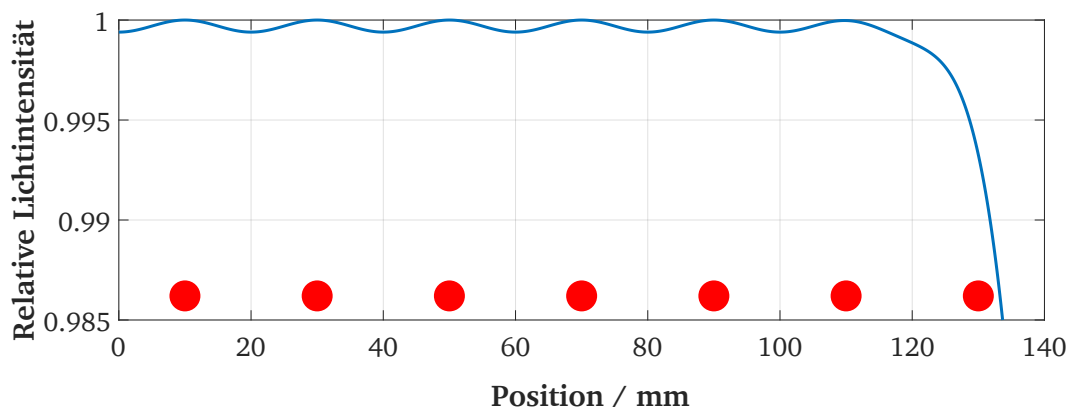


Abbildung 4.7.: Verlauf der relativen Lichtintensität der Beleuchtung des Kamerasystems im Simulationsmodell. Die LEDs der Lichtleiste befinden sich im Abstand von 20 mm. Das Diagramm zeigt aufgrund der gegebenen Symmetrie nur die rechte Hälfte einer LED-Leiste. Die Positionen der verbauten LEDs sind wie bei Abbildung 3.9 durch die eingetragenen roten Punkte veranschaulicht. Die Leuchtintensität im Simulationsmodell schwankt um 0,06%.

ergibt sich für das optische Abbildungssystem eine fixe Vergrößerung von -0,24. Die Blende des vorliegenden Kamerasystems ist fest auf 5,6 eingestellt. Wird entsprechend der errechneten Vergrößerung von -0,24 zwischen den im Objektivdatenblatt eingetragenen Kurven interpoliert, resultiert die rote quadratisch zunehmende Linie in Abbildung 4.8a, die am Rand des optischen Abbildungsbereichs einen Wert von 0,05% erreicht. Dies bedeutet, dass ein Objekt an diesem Punkt des Abbildungssystems um 0,05% näher an der

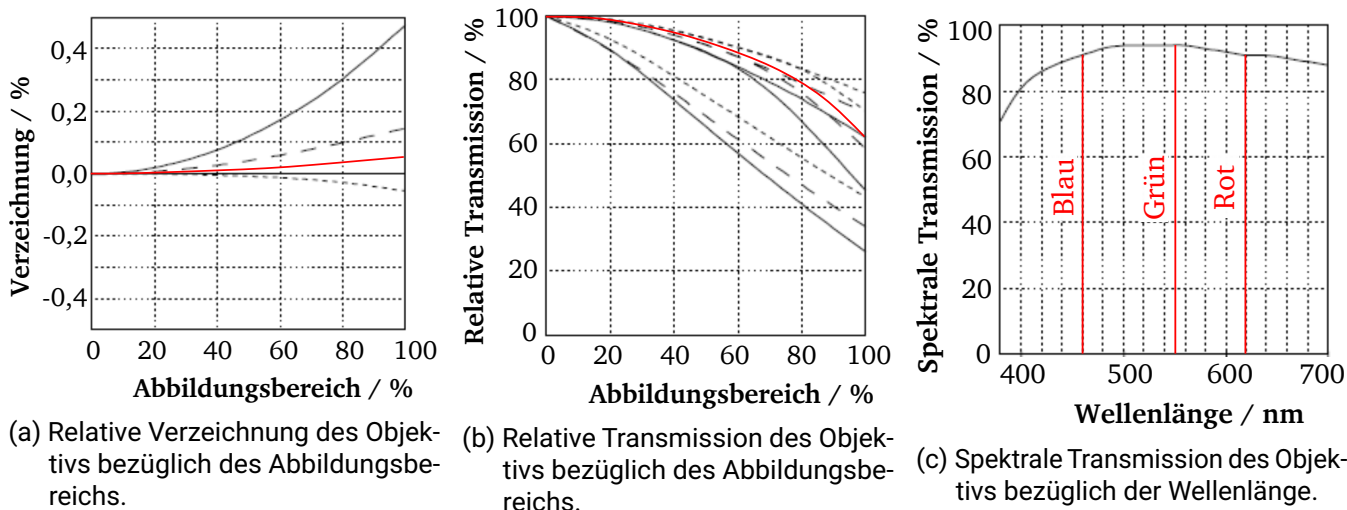


Abbildung 4.8.: Die drei abgebildeten Diagramme stammen aus dem Datenblatt des Objektivs (Jos. Schneider Optische Werke GmbH 2008a). Sie zeigen die relative Verzeichnung sowie die relative und spektrale Transmission. Die Diagramme wurden durch rote Markierungen ergänzt, die den vorliegenden Arbeitspunkt des Kamerasystems veranschaulichen.

optischen Achse wiedergegeben wird. Die Abbildung 4.8b zeigt die relative Transmission abhängig von dem prozentualen Abstand zwischen Zentrum und äußerstem Rand des Abbildungsbereichs. Für das vorliegende Kamerasystem ergibt sich für die relative Transmission  $T_{rel}$  abhängig von der Entfernung  $x$  zum optischen

---

Zentrum die folgende Gleichung:

$$T_{rel} = 1 - \left( \cos\left(\frac{-x}{112} + \frac{\pi}{2}\right) \right)^4, \quad x \in [0; 100] \quad (4.6)$$

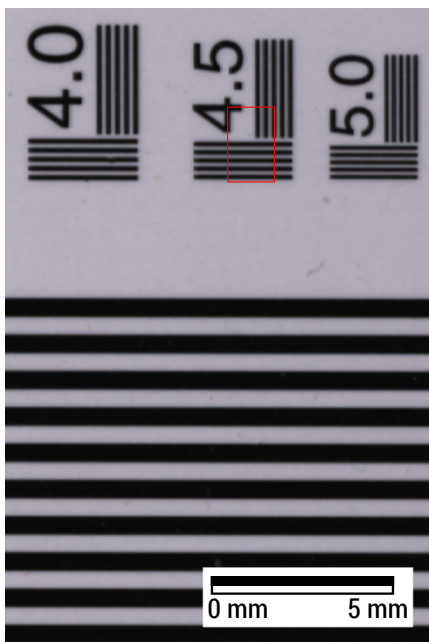
Das optische Zentrum entspricht  $x = 0$  und der äußere Rand des Abbildungsbereichs liegt bei  $x = 100$ . Die relative Transmission  $T_{rel}$  kann Werte zwischen 1 und 0 einnehmen, wobei 0 einer völligen Absorption einfallenden Lichts entspricht. Diese Gleichung wurde mit der oben beschriebenen Software *curveGenerator* entsprechend der roten Linie in Abbildung 4.8b nachgebildet. Die spektrale Transmission ist gemäß Abbildung 4.8c dem Datenblatt des Objektivs zu entnehmen. Sie liegt abhängig von der Wellenlänge bei 92% (620 nm, Rot), 94% (550 nm, Grün) und 92% (460 nm, Blau). Durch das oben in Abschnitt 4.2.1 beschriebene Verfahren zur Messung der Punktspreizfunktion wurden für alle drei Farben RGB und jeweils in vertikale und horizontale Richtung die Kantenspreizfunktionen ermittelt und deren Funktionsterm in das Simulationsmodell eingetragen.

### Bildsensor des Kamerasystems

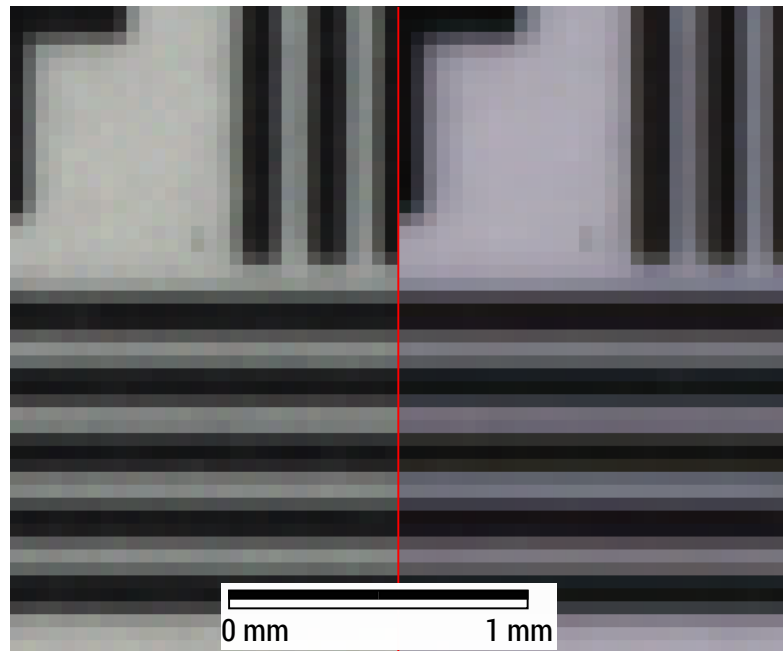
In der Prozesskomponente *Diskretisierung im Bildsensor* des Simulationsmodells werden alle Eigenschaften des Bildsensors des Kamerasystems hinterlegt. Dies sind die Anzahl der Photoelemente (4608), deren Größe (10  $\mu\text{m}$ ), die Anzahl der Bildsensorzeilen (RGB) und die CTE von 99.9997%. Außerdem werden der beabsichtigte Pixelwert der Kalibrierung (200) und das Bildrauschen von bis zu 20 Pixelwerten als Bedingungen eingetragen. Mit dem so parametrisierten Simulationsmodell wurden die Berechnungen des Simulationsbildes gemäß des experimentellen Aufbaus aus Kapitel 3.2 durchgeführt.

#### 4.3.2. Vergleich von Simulationsbild und Kamerabild

Für die Verifikation des Modells werden die Kalibrierseite und die Messkamera aus Kapitel 3.2 genutzt. Mit der Messkamera wurde der in Abbildung 4.9a gezeigte Bereich von ca. 11,8 mm mal 17,8 mm der Kalibrierseite aufgezeichnet. Das Simulationsmodell der optischen Bilderfassung wurde auf das hochauflösende Kamerabild dieses Bereichs angewandt, wodurch ein Simulationsbild mit einer Auflösung von 600 dpi und einer Größe von 279 px auf 415 px resultierte. Von demselben Ausschnitt wurde ein Kamerabild durch die vorliegende Kamera *allPixa pro* des Kamerasystems aufgezeichnet. Um Unterschiede der Pixelwerte zu erkennen, ist in der Abbildung 4.9b jeweils ein nochmals reduzierter Bereich von 30 px auf 50 px des resultierenden Simulationsbildes (links) und Kamerabildes (rechts) zur Veranschaulichung in vergrößerter Form dargestellt. An den aufeinanderfolgenden durchgängigen schwarzen Balken ist die hohe Übereinstimmung der Pixelwerte deutlich erkennbar. Die Ausschnitte aus dem Simulationsmodell und dem Kamerabild wurden verglichen, indem der betragsmäßige Unterschied der Pixelwerte auf den gesamten Wertebereich von 0 bis 255 normiert und anschließend in Prozent umgerechnet wurde. Das Ergebnis des Vergleichs zeigt, dass sich die beiden Bilder zu 95,6% decken. Aufgeteilt auf die drei Farbkanäle ergeben sich Übereinstimmungen von 95,8% (Rot), 94,2% (Grün) und 96,8% (Blau). Dabei führten schon geringe Abweichungen in der eingestellten Auflösung zu sichtbar anderer Skalierung im letztendlich resultierenden Simulationsbild. Bei 0,1% Abweichung der Auflösung des hochauflösenden Kamerabildes der Messkamera resultiert bereits eine verminderte Übereinstimmung von 92,8%, gegenüber den ursprünglichen 95,6%. Das Simulationsergebnis weist höhere Pixelwerte im grünen Farbkanal und stärkeres Rauschen auf als das Kamerabild. Die Farbabweichung ergibt sich aus der Kalibrierung in der realen Kamera, während in der Simulation kein Farbgleich durchgeführt wird. Das erhöhte Rauschen im Simulationsbild wurde bereits erwähnt und beruht darauf, dass als Input ein hochauflösendes Kamerabild der Messkamera mit eigenem Bildrauschen verwendet wird, das sich mit dem simulierten Rauschen im Simulationsmodell überlagert. Für die weitere Verifikation werden in der Software



(a) Prüfausschnitt der Kalibrierseite.



(b) Vergleich von Simulationsbild (links) und Kamerabild (rechts).

Abbildung 4.9.: Prüfausschnitt der Kalibriermuster aus Abbildung 3.5. Dieser Ausschnitt wurde mit der Messkamera aufgenommen und als Input für das Simulationsmodell verwendet. Zum Vergleich wurde mit dem realen Kamerasystem von demselben Ausschnitt ein Kamerabild aufgezeichnet. Der rot umrahmte Bereich von (a) ist in Darstellung (b) zur Veranschaulichung gegenübergestellt. Simulationsbild (links) und Kamerabild (rechts) zeigen zu 95,6% identische Pixelwerte was an den durchgängigen Balken zu sehen ist. Im grünen Farbkanal hat das Simulationsbild etwas höhere Werte als das Kamerabild.

erzeugte, ideale Bildmuster als Objekte für die Simulation verwendet. Damit entfällt die Abhängigkeit von Substrat und Messkamera.

Der SNR von Kamerabild und Simulationsbild wird zum direkten Vergleich in Abbildung 4.10 logarithmisch in dB über die rechte Hälfte des Bildsensors aufgetragen. Darin ist zu sehen, dass beide Verläufe deutlichem Rauschen unterliegen und zum rechten Rand des Bildsensors absinken. Gegenüber dem vorliegenden Kamerasystem lässt sich in der Simulation die Berechnung des SNR bis zum Rand des optischen Abbildungssystems durchführen, wo der SNR nur noch etwa 35 dB beträgt. Die vertikale rote Linie in Abbildung 4.10 zeigt das Ende des Bildsensors. Beide Kurven des simulierten und des aus dem Kamerabild berechneten SNR weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Die Differenz des Simulationsergebnisses zum Verlauf des Kamerasystems beträgt durchschnittlich 0,6 dB, bzw. 1,56%, mit einer Toleranz von 0,4 dB bis 0,73 dB.

Ein exemplarisches Simulationsergebnis des intern bereitgestellten Linienmusters ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Im Ergebnis ist von links nach rechts ein kontinuierliches Absinken der Pixelwerte sichtbar, das charakteristisch ist für die Reduktion der Lichtintensität zum Bildfeldrand hin. Der geringste Pixelwertunterschied zwischen schwarzen Linien und Umgebung tritt am Rand des Abbildungssystems auf. Dieses Verhalten korreliert mit dem Verlauf der relativen Transmission des Objektivs aus Abbildung 4.8b. Während das Simulationsmodell die Berechnung bis zum Rand des Objektivs durchführt, ist das Kamerasystem so eingerichtet, dass der Bildsensor auf 4608 px limitiert ist, wodurch am Rand des Bildsensors ein hinreichender Pixelunterschied von 170 zwischen Linie und Umgebung erreicht wird. Dieser Rand des Bildsensors ist in Abbildung 4.11 durch die rote Linie markiert.

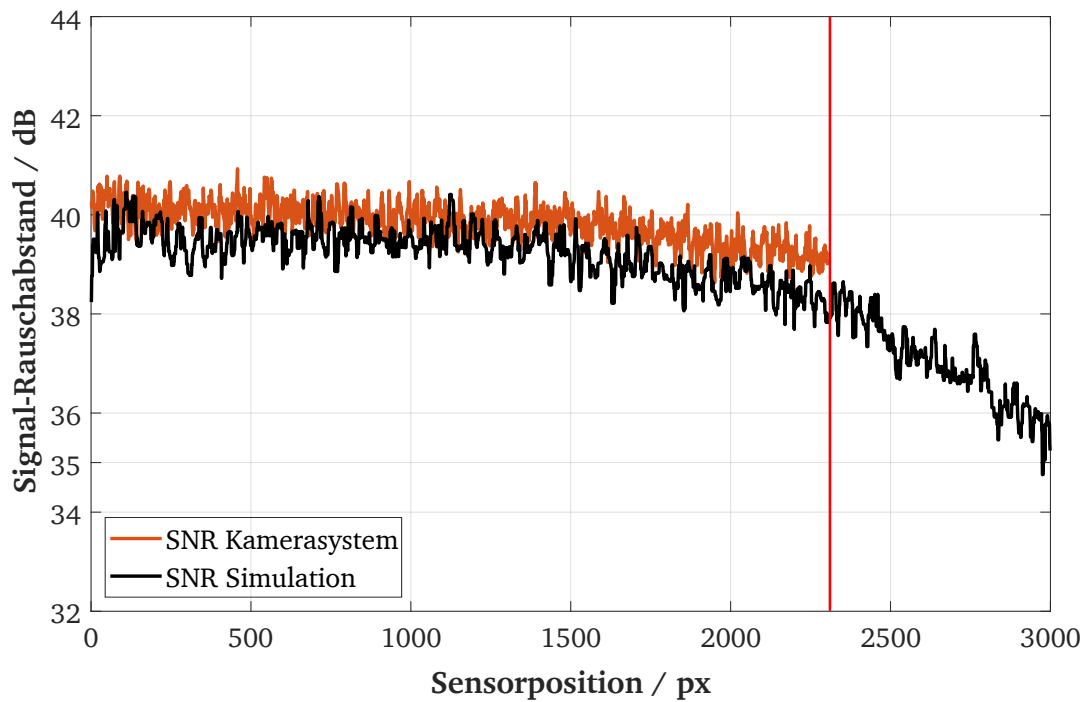


Abbildung 4.10.: Signal-Rauschabstand des vorliegenden Kamerasystems über die rechte Hälfte des Bildsensors. In der Grafik sind zum direkten Vergleich der gemessene SNR (orange) und der simulierte SNR (schwarz) dargestellt. Die vertikale rote Linie markiert den Rand des Bildsensors des Kamerasystems. Die Simulationsberechnung erlaubt eine Bestimmung des SNR bis zum Rand des optischen Abbildungssystems. Der simulierte SNR liegt durchschnittlich 0,6 dB unterhalb der gemessenen Werte.

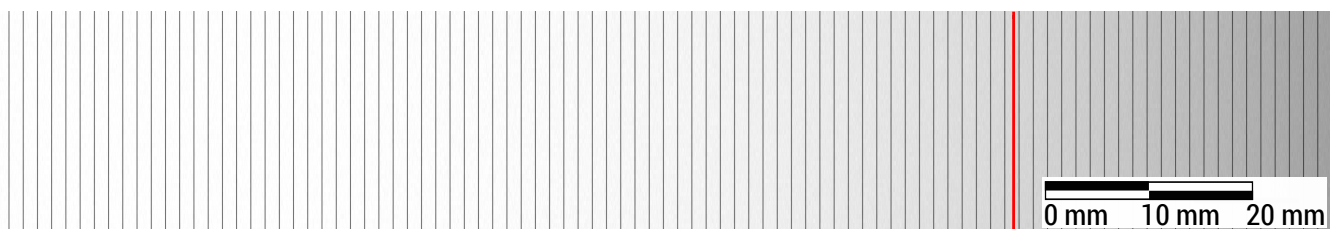


Abbildung 4.11.: Simulationsergebnis des Linienmusters für die rechte Hälfte des optischen Abbildungssystems. Am rechten Rand nehmen die Pixelwerte ab, was mit dem Verlauf der relativen Transmission aus Abbildung 4.8b korreliert. Die rote Linie markiert die Grenze des Bildsensors des Kamerasystems, der Bildbereich rechts davon kann von der Kamera nicht aufgezeichnet werden.

### 4.3.3. Übertragbarkeit des Simulationsmodells

Für die experimentelle Durchführung zur Verifikation der Übertragbarkeit des Simulationsmodells zur optischen Bilderfassung erfolgt die Simulationsberechnung unter Anwendung der Parameter aus den Datenblättern der Komponenten (Zeilensensor und Objektiv) des Prototyp-Kamerasystems. Die Simulationsergebnisse werden zeigen, wie sich das Prototyp-Kamerasystem laut den Parametern aus den Datenblättern verhält und ob Kontrast und Bildqualität für die weitere Bildanalyse ausreichen. Die Aufgabe dieses Experiments besteht darin, mit dem generischen, also einem auf beliebige Zeilenkameras und Objektive anwendbaren Simulationsmodell, die Verwendbarkeit neuer oder anderer Hardware zu überprüfen. Dies wird rein über den Austausch der Parameter der Komponenten des Prototyp-Kamerasystems im Simulationsmodell untersucht und simuliert. Auf dem Laboraufbau gemäß Kapitel 3.2 wurde mit der vorliegenden Prototyp-Kamera die Kalibrierseite aufgezeichnet und gemäß der Methodik in Kapitel 4.2.1 die ESF für jeden Farbkanal gemessen. Diese ESF wurde in das Modell eingetragen. Mit den weiteren eingearbeiteten Parametern Geometrie der Sensorzeile, relative Helligkeit, Verzeichnung und Transmission aus den Datenblättern der Komponenten des Prototyp-Kamerasystems liefert die Simulation einen SNR, wie er in Abbildung 4.12 gezeigt ist. Dabei wurde dieselbe Art der Beleuchtung beibehalten, wie sie im bereits

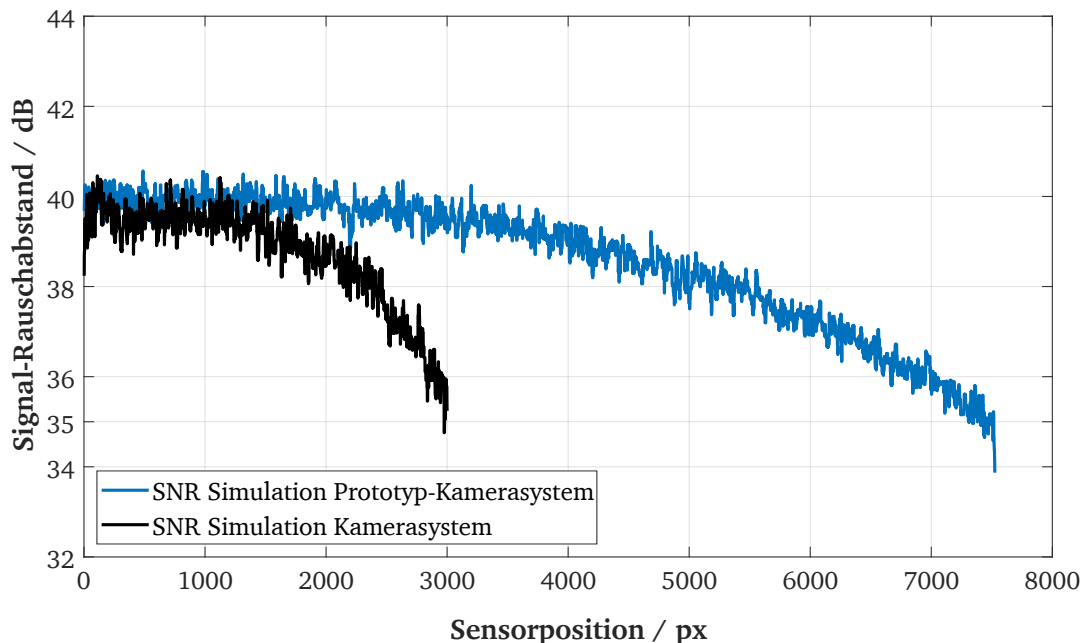


Abbildung 4.12.: Der Signal-Rauschabstand ist in der Simulation für die Sensormitte auf 40 dB ausgerichtet. Im Vergleich zum bestehenden Kamerasystem (schwarz), das nur 3000 px abbilden kann (vgl. auch Abb. 4.10), ist der Verlauf des SNR beim Prototyp-Kamerasystems (blau) höher. Erst am Rand des Prototyp-Kamerasystems bei 7525 px treten Werte von unter 35 dB auf.

existierenden Kamerasystem Anwendung fand, jedoch auf die Breite des optischen Abbildungsbereichs des Prototyp-Objektivs erweitert. Im Zentrum des optischen Abbildungssystems erreicht das Simulationsbild den erwarteten SNR von 40 dB. Zum Vergleich ist in Abbildung 4.12 nochmals der simulierte Verlauf des SNR des gegenwärtigen Kamerasystems dargestellt. Das Prototyp-Kamerasystem zeigt am Rand des Bildsensors eine starke Reduktion des SNR, im äußersten Aufnahmebereich bei 7525 px liegt er bei 34 dB. Im entsprechenden Linienmuster ist der Effekt in Abbildung 4.13a in gleichem Maß zu erkennen. Zum Bildrand hin lassen sich wegen des geringen Kontrasts die schwarzen Linien kaum vom Hintergrund unterscheiden. Am äußersten Pixel des Zeilensensors verbleibt ein Pixelwert von 42. Selbst im Zentrum des Sensors liegt der

Pixelwert des Hintergrunds nur bei etwa 73 anstatt bei 200. Eine Auswertung mit der Bildanalysesoftware für Linienmuster gemäß Kapitel 2.2.4 verlief erfolglos. Für größtmöglichen Informationsgehalt sollte der komplette Pixelwertbereich ausgenutzt werden, sprich der Hintergrund bei 200 liegen und schwarze Linien einen Pixelwert von 0 haben. Die obere Kalibrierung auf 200 ist nötig, damit bei stärker remittierenden Substraten oder anderer Lichtverteilung der Bereich bis zum Pixelwert von 255 als Reserve vorhanden ist. Liegt die Remission höher als die vorgesehene Reserve, wird dies als Überbelichtung des Sensors bezeichnet, wodurch der Pixelwert auf 255 begrenzt wird. Um den bestehenden Pixelwert von 73 in der Simulation auf den erforderlichen Pixelwert von 200 zu erhöhen, ist eine Anpassung der Beleuchtung erforderlich. Aus der Simulationsberechnung ergibt sich, dass der Strom der LEDs von ursprünglich 200 mA auf 555 mA gesetzt werden muss, um durch die erhöhte Lichtintensität in der Sensormitte den Pixelwert von 200 im Simulationsbild zu erhalten. Dadurch änderte sich der Verlauf des SNR im Vergleich mit denen aus Abbildung 4.12 nicht. Das resultierende Simulationsbild ist in Abbildung 4.13b dargestellt und erreicht im äußersten Bereich nun einen Pixelwert von 112. Mit dieser Anpassung des Stroms in der Beleuchtung

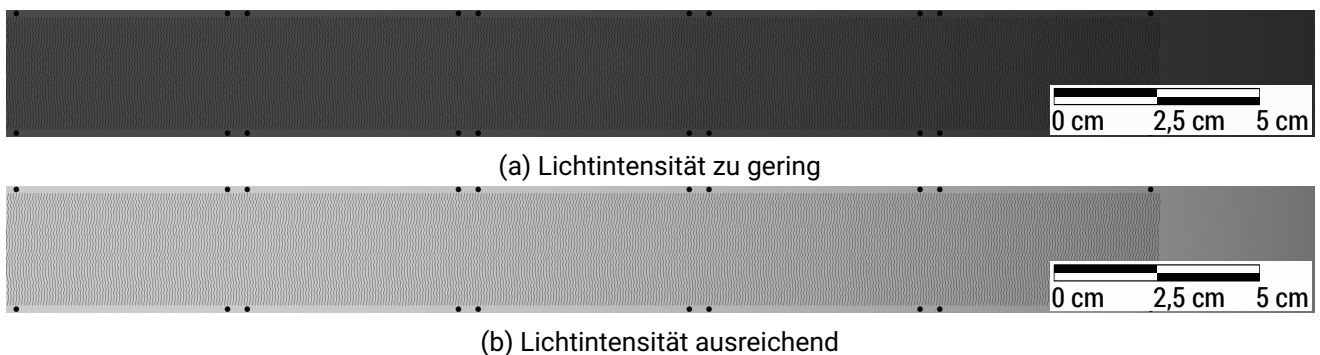


Abbildung 4.13.: Das Simulationsbild des Linienmusters aus Abbildung 3.8 mit den Parametern des Prototyp-Kamerasystem und der LEDs-Stromstärke von 200 mA des bestehenden Kamerasystems (a) zeigt sehr geringe Pixelwerte. Somit ist in der Abbildung (a) nichts erkennbar. Die Pixelwerte der unbedruckten Stellen des Substrats liegen bei 73 und liefern damit einen zu geringen Kontrast zu den Linien, um eine korrekte Analyse durchzuführen. Zur Erhöhung des Kontrasts wurde für die zweite Darstellung (b) die Beleuchtung mit einem Strom von 555 mA angesteuert, wodurch sich die Intensität der LEDs gegenüber (a) erhöht. Damit erreichen die Pixel um die Linien über die gesamte Breite des Simulationsbildes ausreichend hohe Pixelwerte zur anschließenden Bildanalyse.

konnte das dargestellte Muster durch die Bildanalysesoftware für Linienmuster ausgewertet werden. Um den Verlauf des simulierten SNR am Rand des Abbildungsbereichs zu erhöhen und nicht nur die simulierte Remission über die gesamte Breite anzuheben, hilft eine intensivere Beleuchtung im Randbereich. In der Simulation wurde die Prozesskomponente der Beleuchtung gegen eine andere Anordnung von LEDs ausgetauscht. Im Randbereich des Sensors wurden die LEDs dichter gruppiert als in der originalen Version der Lichtleiste, bei der die LEDs über die volle Breite der Lichtleiste in einem Abstand von 20 mm zueinander aufgebaut waren. Der Einfluss dieses Abstands auf den Pixelwertverlauf wurde durch Parametervariation in der Simulation untersucht. Dazu wurde der LED-Abstand entsprechend zu Abbildung 3.9 in Kapitel 3.2.6 jeweils im äußeren Viertel, Sechstel und Achtel des optischen Abbildungssystem auf 15 mm, bzw. 10 mm reduziert. Die resultierenden sechs Verläufe des SNR und der simulierten Pixelwerte sind in den beiden Abbildungen 4.14 und 4.15 dargestellt. Dabei war die Beleuchtung weiterhin darauf ausgelegt, in der Sensormitte einen Pixelwert von 200 zu erreichen. Der SNR und der Pixelwertverlauf weisen an den Stellen, wo die Anzahl der LEDs erhöht und deren Abstand verringert wurde, wie erwartet sichtbar angestiegene,

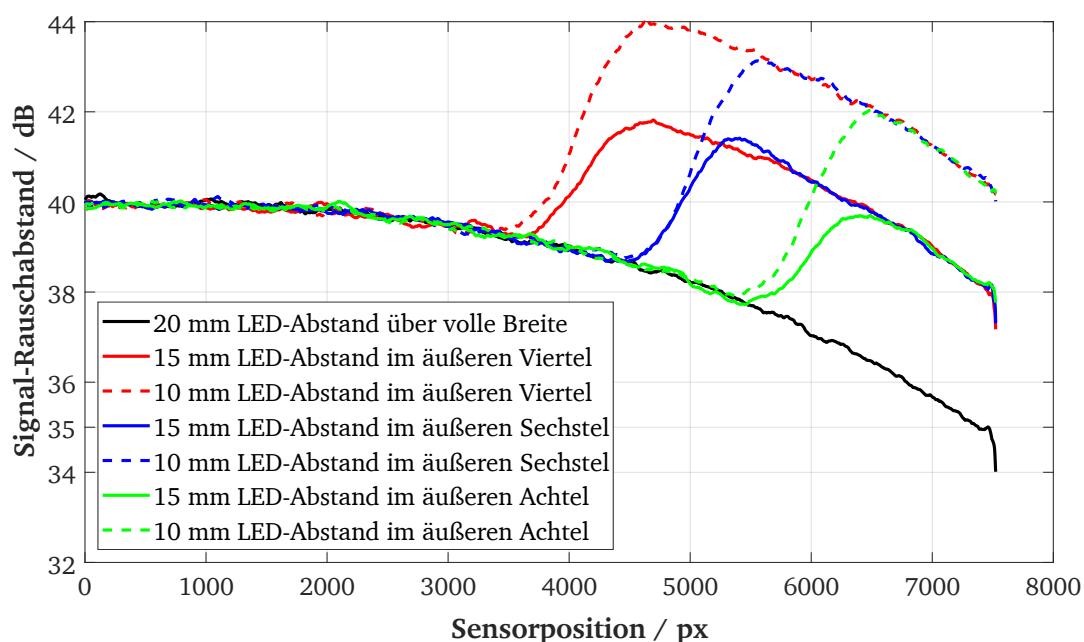


Abbildung 4.14.: Gegenüberstellung des SNR bei verschiedenen LED-Anordnungen in der Simulation. Durch Verringerung des Abstands der LEDs am Rand wird eine Zunahme des SNR erreicht. Die farbigen Kurven zeigen an, wie stark sich der SNR erhöht, wenn die Abstände der LEDs in der Beleuchtung im äußeren Viertel, Sechstel bzw. Achtel des optischen Abbildungsbereichs von ursprünglich 20 mm auf 15 mm, bzw. 10 mm reduziert werden.

simulierte Werte im Vergleich zum ursprünglichen Verlauf auf. An den äußersten Sensorpixeln erreicht die LED-Anordnung mit 15 mm-Abständen den Pixelwert 162 und durch die doppelte LED-Dichte, bei einem LED-Abstand von 10 mm, im äußeren Bereich wird der Wert 208 erreicht. Um die Pixelwerte im Zentrum des Sensors auf 200 zu halten, sind nur leicht abweichende LED-Ströme für die Beleuchtung nötig. In Abbildung 4.15 erreichen die Kurven mit 10 mm-Abständen der LEDs in der Simulation die Sättigung des Bildsensors, wodurch der Pixelwert auf 255 limitiert ist. Dies ist ein strikt unerwünschtes Verhalten, das negativen Einfluss auf die Bandbreite der Sensorantwort hat. Somit wird das Objekt im gesättigten Bereich nicht mehr realitätsgetreu abgebildet.

#### 4.3.4. Ergebnisse

Der SNR von 34 dB im äußersten Aufnahmebereich bei 7525 px des Prototyp-Kamerasystems ist bei gleicher Konfiguration wie für das bisherige Kamerasystem zu gering für ausreichend akkurate Ergebnisse. Sowohl der niedrige SNR als auch der geringe Kontrast hängen mit dem gegenüber dem bestehenden Kamerasystem deutlich größeren Abstand zwischen Sensor und Objekt zusammen. Die Bildanalyse verläuft erfolgreich, wenn der Strom der LEDs in der Beleuchtung auf mindestens 555 mA eingestellt ist. Damit wird im Zentrum des optischen Abbildungssystems ein Pixelwert von 200 erreicht und die Linien nahe des Randes weisen einen Kontrast der Pixelwerte von 96 auf. Durch diesen Kontrast der Pixelwerte folgt, dass die Verzeichnung des Objektivs gemäß der Simulation einen ausreichend geringen Einfluss auf die Liniengüte hat. Die Güte des optischen Abbildungssystems ist somit für das Prototyp-Kamerasystem geeignet. Durch Steigern des LED-Stroms wird im optischen Zentrum eine kontrastreiche Abbildung erreicht, aber der SNR lässt sich allein dadurch nicht erhöhen, weshalb niedrige Werte im Randbereich des optischen Abbildungssystems verbleiben. Folglich ist eine angepasste Lichtverteilung für das Prototyp-Kamerasystem

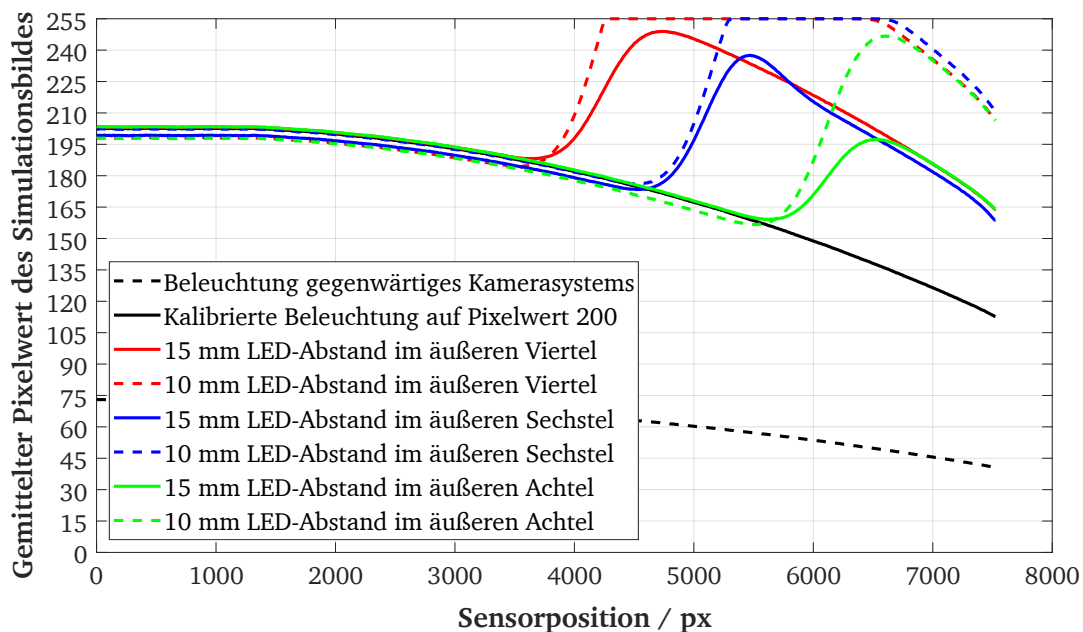


Abbildung 4.15.: Gegenüberstellung der Pixelwertverläufe bei verschiedenen LED-Anordnungen in der Simulation. Die farbigen Kurven zeigen an, wie stark in der Simulation die Remission auf die Photoelemente und damit der Pixelwert steigt, wenn die Abstände der LEDs in der Beleuchtung im äußeren Viertel, Sechstel oder Achtel des optischen Abbildungsbereichs von ursprünglich 20 mm auf 15 mm, bzw. 10 mm reduziert werden. Die gemessenen gemittelten Pixelwerte ergeben sich aus dem Lichteinfall durch Kalibrierung der Beleuchtung auf den Pixelwert 200 in der Sensormitte. Hierfür wurde der Strom der LEDs leicht variiert. Dichter angeordnete LEDs im Randbereich führen dort zu einer besseren Ausleuchtung.

erforderlich, um die Pixelwerte und den SNR in den Außenbereichen zu erhöhen. Wie die Abbildungen 4.14 und 4.15 zeigen, bieten dichter angeordnete LEDs eine mögliche Lösung. Vier Anordnungen an LEDs haben in der Simulation geeignete Verhältnisse zwischen Signal und Rauschen erreicht. Das sind gemäß Abbildung 4.14 LED-Anordnungen mit 15 mm-Abständen für den Bereich zwischen dem äußeren Viertel und Achtel sowie 10 mm-Abständen im äußeren Achtel, wobei dadurch bereits eine starke Unstetigkeit des SNR auftritt. Bei Betrachtung der Pixelwertverläufe ist die Auswahl geeigneter Anordnungen deutlicher eingeschränkt, denn die ersten beiden Verläufe mit 10 mm LED-Abstand sorgen für eine Sättigung des Kamerasensors und sind daher auszuschließen. Abgesehen von 15 mm-Abständen im äußeren Achtel zeigen alle Pixelwertverläufe eine unerwünschte Unstetigkeit, die der Sättigung des Bildsensors sehr nahe kommt und damit die erforderliche Dynamik für unterschiedliche Substrate zu sehr einschränkt. Um einen flachen Verlauf von SNR und erfasster Remission über die Breite des Sensors zu erhalten, sind kontinuierlich abnehmende Abstände zwischen den LEDs zum Rand der Beleuchtung hin erforderlich. Da die verwendeten LEDs der Beleuchtung eine Grundfläche von 3 mm auf 3 mm einnehmen, ist eine Anordnung kontinuierlich geringer werdender Abstände von zentral 20 mm auf 15 mm im Rand des Erfassungsbereichs in der Praxis baulich umsetzbar.

Der aktuelle Zustand des Simulationsmodells ist zur Qualifizierung von Bilderfassungskomponenten geeignet, daher wurden Konzept und Anwendung im eigenen Patent (Schneider 2020d) niedergeschrieben. Es bleibt jedoch Raum für Optimierungen und weitere Details. Die PSF wurde gemessen, vgl. Kapitel 4.2.1, da es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war, sie aus der Modulationskurve im Datenblatt des Objektivs abzuleiten. Eine errechnete PSF auf Basis der Angaben des Datenblatts wäre zwar weniger genau als eine



---

gemessene PSF, aber dafür leichter anzuwenden, da die Simulationsberechnungen dadurch komplett ohne vorliegende Hardware möglich wären. Die Modulation des Objektivs sinkt gemäß dem Datenblatt des Objektivs im Randbereich des optischen Abbildungssystems, was bedeutet, dass der Kontrast äquidistanter Linienpaare zum Rand des Objektivs abnimmt. Diese Abnahme wurde bisher nicht in die Simulation einbezogen, obwohl diese Informationen aus den verfügbaren Messungen abgeleitet wurden und mit einer gewichteten PSF realisierbar wären. Andererseits ist die gemessene PSF in verschiedene Farbkanäle aufgeteilt, was durch Daten aus dem Objektivdatenblatt nicht möglich ist. Wie die Ergebnisse aus dem Vergleich zwischen Kamerabild und Simulationsbild in Kapitel 4.3.2 zeigen, liefert das Simulationsmodell auch unter Anwendung der gemessenen PSF nahezu identische Gradienten der Pixelwertverläufe gegenüber einem Kamerabild. Aus den Ergebnissen des Simulationsmodells lässt sich für das Prototyp-Kamerasystem der nötige Strom und eine geeignete LED-Anordnung schließen, durch die ein hinreichender Verlauf von SNR und erfassten Pixelwerten erreicht wird. Bei einem Strom von 555 mA und einer LED-Anordnung, deren Abstand zum Rand des optischen Abbildungssystems kontinuierlich von 20 mm auf 15 mm reduziert wird, um dem Rückgang der relativen Helligkeit aus dem Objektivdatenblatt entgegenzuwirken, lassen sich geeignete Kamerabilder erzielen. Das Simulationsmodell ist in der Lage, Erkenntnisse der Parametervariation quantitativ darzustellen und erlaubt die Unterstützung bei der Suche nach geeigneten Parametern. Simulationsbilder des Linienmusters aus dem Simulationsmodell, vgl. Abbildung 4.13b, lassen sich mit der Analysesoftware auswerten.



---

## 5. Messung der Tropfenpositionierung während des Drucks

---

In dieser Arbeit wird eine Möglichkeit vorgestellt, eine regelmäßige Überprüfung der korrekten Funktionsweise aller Düsen der Druckköpfe in einer Inkjet-Produktionsdruckmaschine durchzuführen. Im Kapitel 2.1.3 wurden bereits unterschiedliche Ursachen für nicht oder fehlerhaft positionierte Tröpfchen aufgelistet. Viele Ursachen, wie Luftströmungen, Verschleiß oder Eintrocknen von Düsen sind Umgebungsbedingungen zuzuschreiben. Diese lassen sich nur schwer kontrollieren und somit ist das Auftreten solcher Düsenausfälle meist unvorhersehbar. Die hier vorgestellte Messung der Tropfenpositionierung dient dazu, solche fehlerhafte Düsen zu detektieren und auf deren Auftreten zeitnah während des Druckprozesses zu reagieren. Die Untersuchungen sollen explizit für eine Rollendruckmaschine erfolgen. Zu diesem Zweck wird eine Lösung vorgestellt, bei der die vollständige Überprüfung durch ein Linienmuster im Beschnitt erfolgt. Rollendruckmaschinen drucken auf einer unterbrechungsfreien Papierbahn. Im Gegensatz zu Bogendruckmaschinen, bei denen sich einzelne Bogen bei Fehldrucken entfernen lassen, wird bei Rollendruckmaschinen die bedruckte Papierbahn erst in der Nachverarbeitung auf das gewünschte Format geschnitten und gefaltet. Das Endformat lässt sich um eine Beschnittzugabe erweitern, auf der die Überprüfung der korrekten Funktionsweise aller Düsen durchgeführt wird. Aus diesem Grund wird das Testdruckmuster zur Überprüfung auf eine experimentell zu ermittelnde minimale Länge reduziert, was der Nachverarbeitung eine Gleichbehandlung aller bedruckten Seiten erlaubt. Da die feststehenden Düsen der Druckeinheit über die Breite der Druckmaschine verteilt sind, beschränkt sich die Flexibilität dieser Untersuchung auf die Länge des Testdruckmusters in Druckrichtung. Je kürzer die Linien zur Überprüfung der korrekten Funktionalität sind und je dichter sie angeordnet werden, umso weniger Beschnitt und damit Makulatur ist erforderlich. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Ermittlung und Verifikation eines solchen Musters minimaler Länge in Druckrichtung.

### 5.1. Entwicklung eines Referenzmusters für 1200 dpi

Im Grundlagenkapitel 2.2.4 wurde der existierende Ansatz zur Messung der Tropfenpositionierung für 600 dpi-Druckköpfe bei Bogendruckmaschinen vorgestellt: Ein Testdruckmuster besteht hierbei aus 16 Reihen an Linien a 40 Dots. Jede der Linien wird von einer anderen Düse gedruckt. Für ein solches Testdruckmuster ist eine separate Testseite erforderlich, die von einem Kamerasystem digital erfasst wird und in der Nachverarbeitung aussortiert werden muss. Die direkte Übertragung jenes Ansatzes auf die verwendeten Druckköpfe mit 1200 dpi wurde in dieser Arbeit entwickelt und untersucht. Die Einzelheiten sind in diesem Abschnitt beschrieben. Die Testseite beinhaltet ein Linienmuster für jede Tinte, wobei pro Düse eine Linie von 40 Dots gedruckt wird. Das Linienmuster besteht aus 32 Reihen zu je 166 Linien entsprechend dem verwendeten Druckkopf KJ4B-Z aus Kapitel 3. Die Linienreihen sind derart angeordnet, dass die vorderste Düsenreihe hinsichtlich der Druckrichtung die erste Linienreihe druckt und die dahinter liegenden Düsenreihen der Reihe nach aufsteigend deren Linien positionieren. Die vier Linienmuster für die verfügbaren Tinten werden hintereinander auf der Testseite gedruckt. Dieses angepasste Testdruckmuster ermöglicht durch ein Kamerasystem und anschließende Bildauswertung eine genaue Düsenzuordnung und die exakte Ermittlung von Ausfällen aufgrund fehlender Linien. Darüber hinaus ist für die gedruckten

---

Linien die Bestimmung des Positionsversatzes zur Sollposition vergleichbar zum existierenden Konzept aus Kapitel 2.2.4 möglich. Durch die Zuordnung von Linien zu Düsen ist es wichtig, dass das Testdruckmuster an das Druckkopflayout angepasst wird. Für die Auswertung des Linienmusters ist es notwendig, dass die Bildauswertung weiß, welche Linie von welcher Düse gedruckt wurde. Das Testdruckmuster enthält nur diejenigen Linien, deren zugeordnete Düsen tatsächlich drucken. Um dies zu gewährleisten, werden die Druckdaten für das Testdruckmuster in der Druckmaschine unter Kenntnis der gerätespezifischen Parameter und des zu bedruckenden Bereichs auf dem Substrat generiert. Da die Testseite mit den Testdruckmustern nicht die Vorstufe und Bildaufbereitung durchlaufen, ist es wichtig zu beachten, dass die Druckdaten niemals über den Rand des Bedruckstoffes hinausgehen, da dieser überstehende Teil der Druckköpfe deaktiviert ist. Die drei wesentlichen Aspekte, weshalb einzelne Düsen nicht verwendet werden, sind Breite und Position des Substrats sowie die Ausrichtung der Druckköpfe in der seitenbreiten Anordnung. Der Druckbereich ändert sich in Abhängigkeit von der Ausrichtung der Papierbahn, z. B. mittig, rechts- oder linksbündig und der Breite des aktuell verwendeten Substrats. Die Ausrichtung der seitenbreiten Anordnung muss bekannt sein, um abgeschaltete Düsen bei überlappenden Druckköpfen zu berücksichtigen und die Druckdaten der verschiedenen Tinten zueinander abzugleichen. Dies wird ebenfalls per Software auf die einzelne Düse genau korrigiert und muss somit bei der Erzeugung der Testdruckmuster zur Düsenausfallkontrolle berücksichtigt werden, um eine genaue Zuordnung sicherzustellen. Dazu werden je nach Versatz der seitenbreiten Anordnungen quer zur Druckrichtung die Düsen am Rand deaktiviert, deren Druckbereich nicht von den seitenbreiten Anordnungen der anderen Tinten abgedeckt werden kann. Somit sind die Freiheitsgrade der geometrischen Anordnung der Druckeinheit gemäß Abschnitt 2.1.5 bei der Erzeugung des Testdruckmusters berücksichtigt. Die Testseite wird entsprechend der deaktivierten Bereiche angepasst. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine düsengenaue Zuordnung im Testdruckmuster angestrebt, da somit der Algorithmus zur Auswertung und Zuordnung von Linien zu Düsen unverändert bleibt. Durch Modifikation der Druckdaten mit Kenntnis der nicht druckenden Düsen im Randbereich des Kopfes bleibt die Zuordnung zur Düse erhalten.

Da in der vorliegenden Druckmaschine nicht einzelne Bogen, sondern eine Seite einer kontinuierlichen Papierbahn zu erfassen ist, ist ein zusätzliches Startsignal zu Beginn der Bilderfassung erforderlich. Zu diesem Zweck wurde ein 5 mm langer Strichcode gemäß Abbildung 5.1 entwickelt und in die Testseite integriert. Der Strichcode wird während des laufenden Druckvorgangs von einem Markensensor eindeutig



Abbildung 5.1.: Der Strichcode wird auf den Beginn der Testseite gedruckt und von einem Markensensor gelesen. Damit wird die Bilderfassung durch das Kamerasystem mit dem Transport des Substrats synchronisiert.

identifiziert. Der Markensensor ist kurz vor der Position der Kamera eingebaut, um die Bilderfassung durch die Kamera zuverlässig mit der Position der Testseite zu synchronisieren und robust gegen etwaige Verformung der Papierbahn zu sein. Solche Verformungen sind ansonsten aufwendig zu kompensieren, da sie durch wechselnde Bahnspannung, Quellen durch Flüssigkeitseintrag oder Schrumpfen durch Trocknung variieren und diese Einflussfaktoren temperatur- und zeitabhängig sind (Schneider 2013; Galle 2007).

## 5.2. Vermeidung von Wechselwirkung zwischen Düsenreihen

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit ergaben, dass das zuvor beschriebene Testdruckmuster bei 1200 dpi-Druckköpfen zu einem systematischen Fehlverhalten der Druckdüsen führt. Durch die besondere

---

Anordnung der Linien und Aktivierungsreihenfolge der Düsen wird eine Wechselwirkung zwischen zwei benachbarten Düsenreihen hervorgerufen. Das Fehlverhalten tritt auf, wenn alle Düsen einer Düsenreihe gleichzeitig drucken und unmittelbar nach deren Stopp alle Düsen der benachbarten Reihe beginnen. Diese Wechselwirkung führt zu Druckfehlern in starker bis sehr starker Ausprägung in der zweiten, nachfolgenden Linienreihe. Dabei sind die ersten gedruckten Tropfen der jeweiligen Linien nicht auf dem Substrat oder versetzt positioniert. Starke bis sehr starke Ausprägung bedeutet, dass von den 40 gedruckten Tropfen der Linie etwa 20 bis 30 Stück fehlen, Nebentropfen bilden oder verzögert, bzw. seitlich versetzt, auf dem Papier positioniert werden. Dieses Fehlverhalten tritt verstärkt bei den mittleren Düsen einer Düsenreihe auf. Aufgrund der vergleichbaren Form der resultierenden Linien mit dem gleichnamigen Sportgerät wurde in dieser Arbeit als Bezeichnung der Name *Hockeyschläger-Effekt* eingeführt. Abbildung 5.2 zeigt ein Bild des fehlerhaften Druckbilds, gescannt mit einer Auflösung von 2400 dpi. Eine detaillierte Untersuchung der

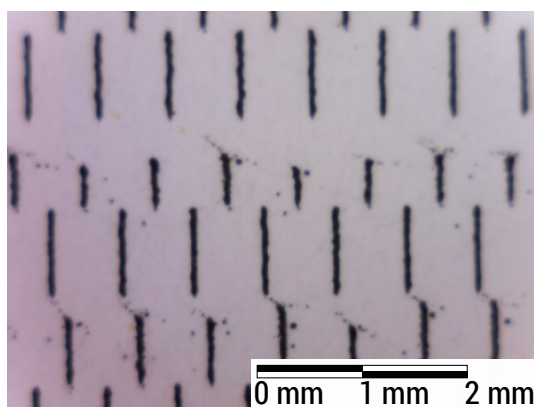


Abbildung 5.2.: Ausschnitt des NFD-Musters, bei dem in jeder zweiten Reihe der Anfang der Linien fehlt. Dieses Fehlverhalten wird aufgrund seiner Erscheinung als *Hockeyschläger-Effekt* bezeichnet. Die Düsen jeder zweiten Düsenreihe sind nicht in der Lage, die vorgesehenen Tropfen von Beginn an korrekt zu positionieren, da im gemeinsam genutzten Tintenkanal Auslastungsschwankungen auftreten.

Fehlerursache erfordert eine Bestimmung der inneren Strömungs- und Druckverhältnisse des Druckkopfes. In dieser Arbeit wird auf eine Strömungsanalyse verzichtet, jedoch werden die Umstände des Auftretens genauer untersucht. Während die 1200 dpi-Druckköpfe ein Fehlverhalten wie in Abbildung 5.2 aufweisen, arbeiten die 600 dpi-Druckköpfe desselben Herstellers bei einem vergleichbaren Testdruckmuster korrekt. Im Gegensatz zu den 600 dpi-Druckköpfen verlaufen die Düsenreihen des 1200 dpi-Druckkopfes über die gesamte Breite und werden zu je zwei benachbarten Reihen von einem Tintenkanal versorgt. Die vereinfachte schematische Darstellung in Abbildung 5.3 veranschaulicht die Anordnung der Düsenreihen und des Tintenkanals des 1200 dpi-Druckkopfes. Der *Hockeyschläger-Effekt* tritt nur in der zweiten Düsenreihe eines Tintenkanals auf, d. h. sobald der Volumenstrom einer Reihe stoppt und die zweite Reihe 1,27 ms später zu drucken beginnt. Diese Verzögerung entspricht bei  $80 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  exakt der doppelten Druckdauer für eine Linienreihe. Außerdem ist zu beobachten, dass das Fehlverhalten in der Mitte des Kopfes stärker auftritt als an den Rändern. Versorgungs- und Druckschwankungen sind hierfür mögliche Ursachen. Um den Effekt zu vermeiden, wurden für die Lösungssuche mehrere Testdrucke durchgeführt, die zeigen, dass das Fehlerbild im vorliegenden Testdruckmuster durch zwei Ansätze verhindert werden kann: Durch Vergrößerung des Zeitintervalls zwischen dem Drucken von zwei Düsenreihen mit demselben Tintenkanal oder durch Reduzierung der Anzahl aktiver Düsen in einer Reihe mittels Verteilung des Druckzeitpunkts über mehrere Linienreihen im Druckmuster. Beide Herangehensweisen reduzieren den Volumenstrom des Tintenkanals. Die vorliegende Beschreibung dieses *Hockeyschläger-Effekts* und die Erkenntnisse über deren Auftreten und

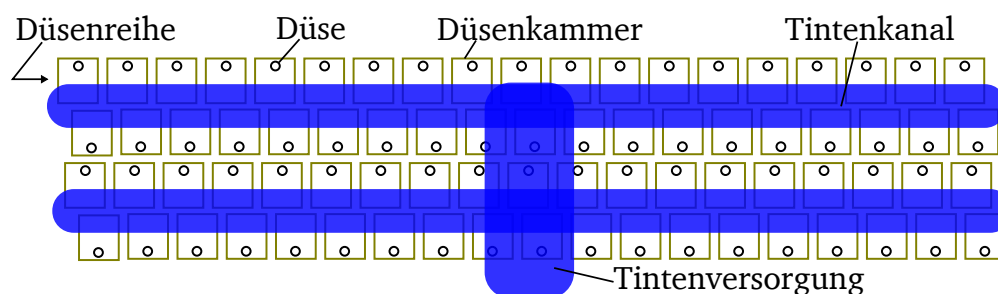


Abbildung 5.3.: Vereinfachte schematische Darstellung der Tintenversorgung im 1200 dpi-Druckkopf KJ4B-Z. Eine Düsenreihe geht über die gesamte Breite des Druckkopfs. Zwei benachbarte Düsenreihen werden von einem gemeinsamen Tintenkanal mit Tinte versorgt.

Ursache wurde im Patent von Schneider (2020a) festgehalten. Für ein fehlerfreies Testdruckmuster wird die erste Variante angewandt, da sie dem gegenwärtigen Konzept gemäß Kapitel 2.2.4 entspricht. Dazu werden benachbarte Düsenreihen im Linienmuster voneinander getrennt. Die ersten 16 Linienreihen werden aufsteigend durch die geradzahigen Düsenreihen gedruckt und anschließend die Linienreihen 17 bis 32 ebenfalls aufsteigend durch die ungeradzahigen Düsenreihen. Die resultierende Reihenfolge der druckenden Düsen in Druckrichtung ergibt sich zu Düsenreihen 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29 und 31. Abbildung 5.4 zeigt für die ursprüngliche und die modifizierte Anordnung der Linienreihen die Druckphasen jeder einzelnen Düsenreihe. Durch die geänderte Anordnung der Düsenreihen im Linienmuster ergibt sich zwischen den Druckvorgängen zweier Düsenreihen desselben Tintenkanals ein zeitlicher Abstand von 10,8 ms. Mit Kapitel 5.1 und Kapitel 5.2 wurde der existierende Ansatz regelmäßiger Prüfseiten zur Ermittlung der Düsenperformance aus Kapitel 2.2.4 auf die vorliegenden 1200 dpi-Druckköpfe übertragen. Für das resultierende Testdruckmuster wurde bei den Druckgeschwindigkeiten von  $40 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ ,  $80 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  und  $133 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  bestätigt, dass sich kein *Hockeyschläger-Effekt* zeigt. Das resultierende Testdruckmuster dient den weiteren Untersuchungen zu kürzeren Linienmustern als Referenz.

### 5.3. Linienmuster für Beschnitt

Um die Möglichkeiten des Kamerasystems auszuschöpfen und den Anforderungen von Rollendruckmaschinen bei der Verarbeitung von Druckaufträgen gerecht zu werden sowie die Grenzen des Kamerasystems zu ermitteln, ist eine Überarbeitung des Testdruckbildes erforderlich. Die Muster sollen im Rahmen dieser Arbeit auf den Beschnitt der Seiten gedruckt werden, der bei der Nachbearbeitung herausgeschnitten wird. Abbildung 5.5 veranschaulicht das Prinzip der Verwendung des Beschnitts zur Messung der Tropfenpositionierung. Dieses Verfahren kann auch für Druckmaschinen mit Einzelblättern verwendet werden, wenn für die Nachbearbeitung in Produktionsdruckereien ein Beschnitt am Beginn oder zum Ende des Bogens vorgesehen ist. Um bei Rollendruckmaschinen Testseiten in der meist gesonderten Nachverarbeitung auszusortieren, müssten diese Seiten entweder speziell markiert oder per Datenschnittstelle echtzeitfähig der Nachverarbeitung mitgeteilt werden. Dies erfordert zusätzlichen Aufwand für den Kunden und die Zusammenarbeit zwischen Herstellern von Druckmaschinen und Nachverarbeitung. Dieser Aufwand lässt sich vermeiden, wenn die Schneidemaschine mit jeder gedruckten Seite gleichermaßen umzugehen hat. Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept kombiniert das Testdruckmuster zur Kontrolle von Düsenausfällen mit dem in Kapitel 2.1.5 beschriebenen Auffrischungsbereich im Beschnitt. Auf diese Weise werden die Schwächen des bisherigen, ganzseitigen Ansatzes behoben und es erfolgt weiterhin eine Ermittlung von Düsenausfällen und Düsen mit fehlerhafter Tropfenpositionierung. Um das Muster im Beschnitt zu drucken,

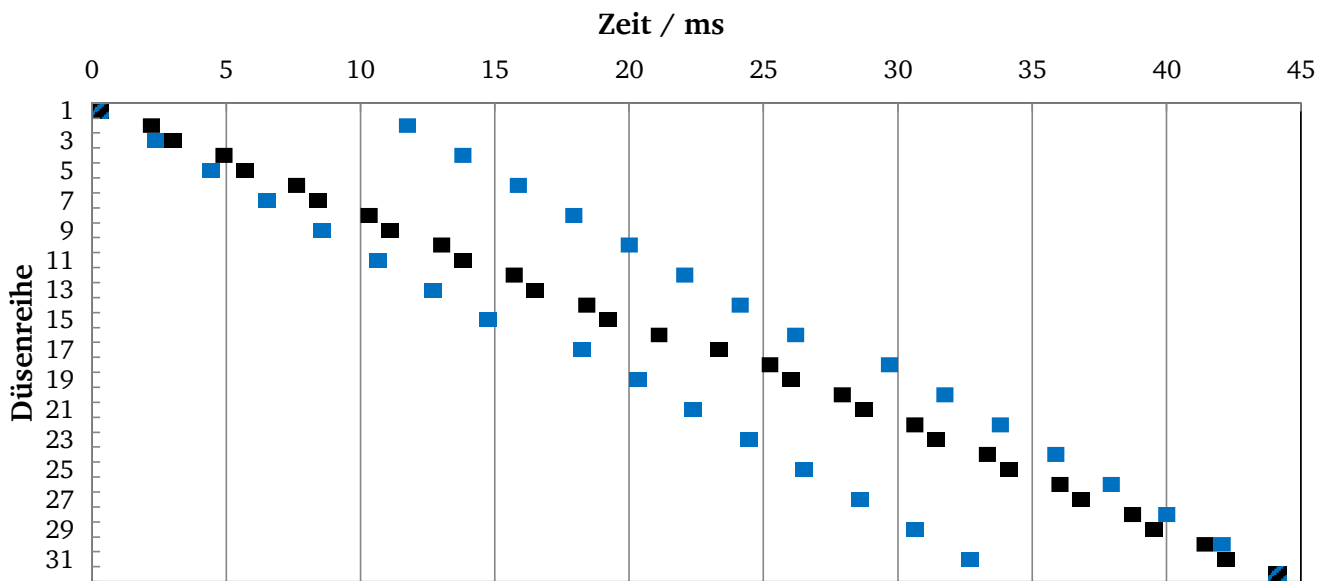


Abbildung 5.4.: Das dargestellte Gantt-Diagramm stellt die zeitliche Abfolge des Druckens der einzelnen Düsenreihen für die ursprüngliche (schwarz) und die modifizierte (blau) Anordnung des Linienmusters gegenüber. Horizontal ist die zeitliche Dauer und vertikal sind die 32 einzelnen Düsenreihen aufgetragen. Die erste sowie die letzte Düsenreihe drucken in beiden Anordnungen zum selben Zeitpunkt. Jeder Block entspricht der Dauer eines Druckvorgangs und ist 0,635 ms lang. Im ursprünglichen, schwarz eingetragenen Linienmuster ist die Druckpause zwischen zwei Düsenreihen desselben Tintenkanals exakt 1,27 ms lang. Im modifizierten Muster wurde dieser zeitliche Abstand auf 10,8 ms verlängert, um den *Hockeyschläger-Effekt* zu vermeiden.

wird es verkleinert. Dies wird durch Verkürzung der Linien, Verringerung der Abstände zwischen den Linien und Aufteilung der Tinten erreicht. Auf diese Weise werden auf jeder Seite alle Düsen einer Tinte überprüft. Die Überprüfung wird für alle anderen Tinten wiederholt, bis die erste Tinte erneut untersucht wird. Damit ergibt sich die Messfrequenz reziprok zur Anzahl der verwendeten Tinten. Werden beispielsweise die vier Tinten CMYK für den Druck verwendet, so wird auf jeder vierten Seite die Performance der Druckköpfe für die schwarze Tinte geprüft. Der Aufbau der Testdruckmuster ist in Kapitel 3.3.2 beschrieben. Sobald das Muster gedruckt ist, durchläuft es die Druckmaschine wie gewohnt einschließlich der Trocknung, bis es schließlich das Kamerasystem erreicht. Die Limitierung, wie kurz das Muster sein kann, um die in Kapitel 3.3.3 beschriebene Auswertung erfolgreich zu durchlaufen und welche Druckbedingungen dafür gelten müssen, werden im folgenden Experiment untersucht.

## 5.4. Experiment zur Messung der Tropfenpositionierung im Beschnitt

In diesem mehrstufigen Experiment wird untersucht, wie klein die minimale Fläche für ein Linienmuster zur Düsenkontrolle sein darf, bei der trotzdem die nötige Messqualität erreicht wird. Damit entsteht ein Minimum an nötiger Makulatur für Testzwecke bei gleichzeitiger Vereinfachung der Aussortierung bei Rollendruckmaschinen. Dieser Abschnitt ist unterteilt in den Vorversuch und die beiden Stufen zur Untersuchung von Linienmustern. Der experimentelle Aufbau, der diesem Experiment zugrunde liegt, sowie die Herangehensweise und Methodik wurde in Kapitel 3.3 beschrieben.

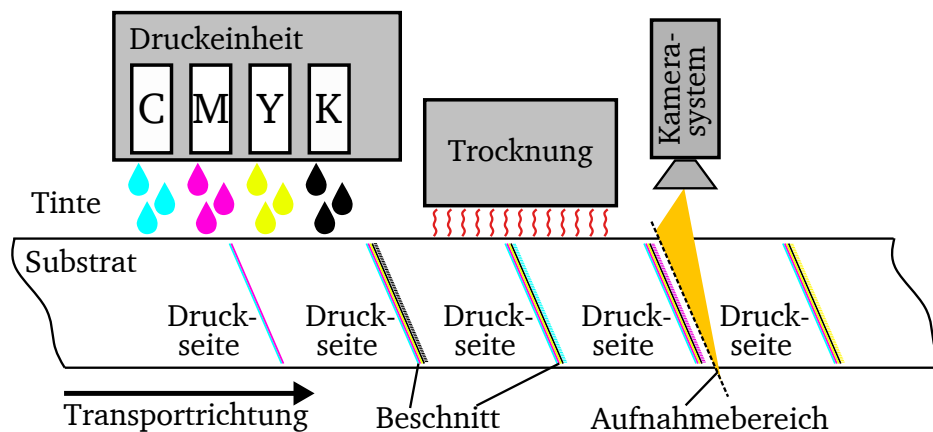
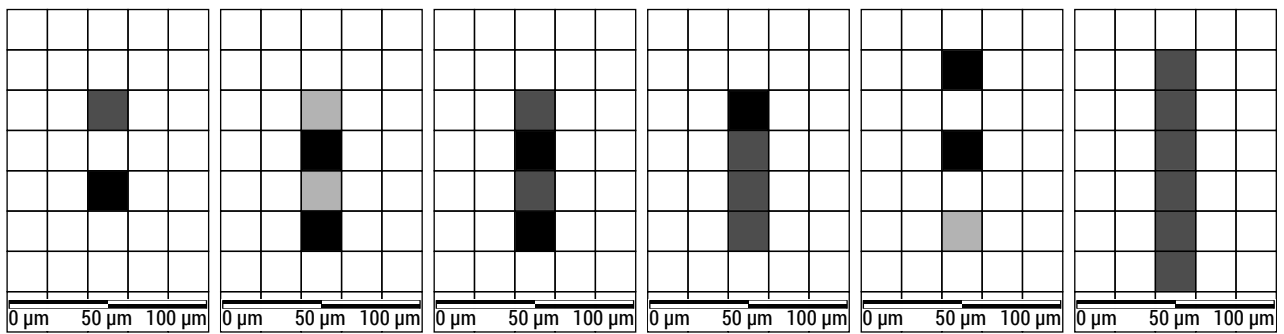


Abbildung 5.5.: Die Veranschaulichung zeigt einen Ausschnitt der kontinuierlichen Substratbahn einer Rollendruckmaschine. Auf der Substratbahn sind fünf bedruckte Seiten dargestellt, zwischen denen sich jeweils ein Beschnitt befindet. Im Beschnitt werden ein Auffrischungsbereich für die Düsen und die hier entwickelten Linienmuster gedruckt. Ein Linienmuster erlaubt die Kontrolle aller Linien einer Tinte und somit aller Düsen einer seitenbreiten Anordnung.

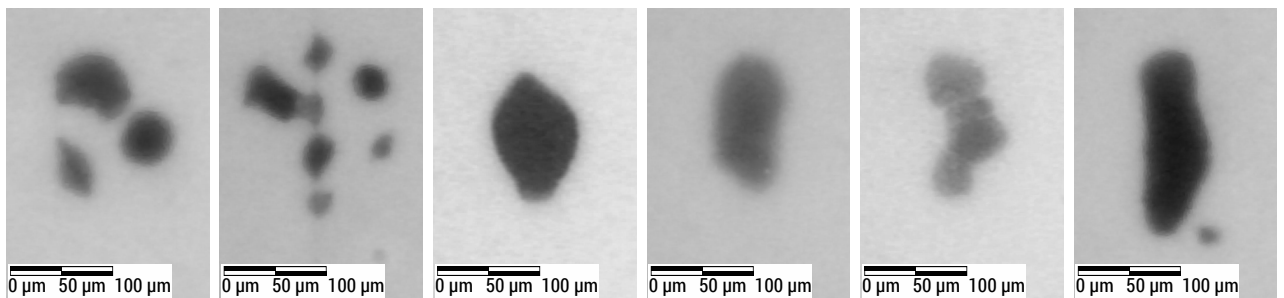
#### 5.4.1. Vorversuch zu Linienformen

Als Vorbereitung wurden die verschiedenen Linienmuster als Druckjobs erzeugt. Für den Vorversuch, der zur Qualifizierung von Linien dient, wurden freiliegende Linien mit unterschiedlichen Impulsfolgen gedruckt und untersucht. Jede Linienform wurde mit den vier Tinten Schwarz, Cyan, Magenta und Gelb jeweils 12-mal an unterschiedlichen Düsen und Positionen im Druckbild erzeugt. Die gedruckten Linien wurden am Laboraufbau aus Kapitel 3.2.5 mit dem Kamerasystem und durch die Messkamera aufgenommen und vermessen. Den Tabellen A.2 und A.3 im Anhang A.2 sind die gedruckten Abfolgen und die Werte der gemessenen Parameter zu entnehmen. Die Linienbreite in Mikrometern und die Fragmentierung wurden aus den Aufnahmen der Messkamera ermittelt und sind jeweils der Mittelwert der 12 Linien der vier Tinten. Der minimale Pixelwert wurde aus dem Kamerabild in 600 dpi bestimmt. Es wurden für Schwarz und Magenta der grüne Farbkanal verwendet, für Cyan wurde der rote Kanal genutzt und für Gelb der blaue. Da Zuverlässigkeit für die Düsenausfallmessung wichtig ist, wurde aus den zahlreichen Messungen das Worst-Case-Szenario, also der Pixelwert mit dem geringsten Kontrast, in die Tabellen A.2 und A.3 eingetragen. Um die Ergebnisse in einen visuellen Kontext zu setzen und einen Eindruck für das resultierende Druckbild zu erhalten, sind in Abbildung 5.6 einige Beispiele als digitales Druckmuster im Raster, in 600 dpi und in der 126-fachen Vergrößerung der Messkamera dargestellt. Die Abbildungen 5.6a bis 5.6f zeigen sechs ausgewählte digitale Druckmuster im Raster. Die resultierenden Druckbilder, wie sie sich unter der Messkamera zeigen sind in den Abbildungen 5.6g bis 5.6l dargestellt. Viele Linien mit freier Rasterzelle zwischen zwei Tropfen (Waveform 0) oder mit Waveform 1 weisen eine starke Streuung der einzelnen Tropfen auf, wie es in den Abbildungen 5.6g und 5.6h zu sehen ist. Dies wird durch die Fragmentierung beschrieben, die beispielhaft für die dargestellte Impulsfolge 203 den Wert 3 aufweist. Bei dieser Abbildung 5.6g lässt sich auch erkennen, dass die größte Waveform einen kleinen und einen mittelgroßen Tropfen erzeugt, welche sich während des Fluges nicht vereint haben. Die Abbildung 5.6i zeigt einen Fleck gelber Tinte im blauen Farbkanal, positioniert mit der Impulsfolge 2323. Es ist ein deutlich besserer Kontrast als bei den beiden Druckbildern der Magenta- und Cyantinte der Abbildungen 5.6j und 5.6k zu erkennen. Die Abbildungen 5.6k und 5.6l, die fünf, bzw. sechs Impulse lang sind, erwecken als einzige den Eindruck einer Linie gegenüber einem Fleck. Selbst für diese Impulsfolgen wurden unterschiedlich gut ausgeprägte Druckbilder beobachtet. Die darunter befindliche Reihe der Abbildungen 5.6m bis 5.6r zeigen Aufzeichnungen derselben Impulsfolgen,

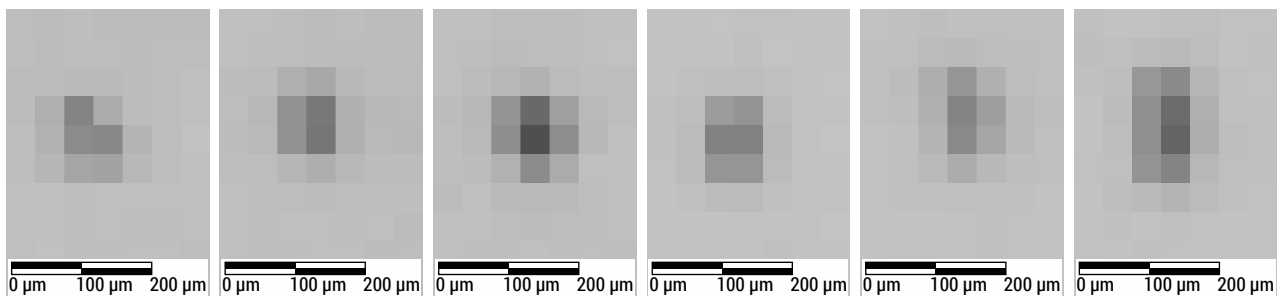




(a) Impulsfolge 203, K, Raster (b) Impulsfolge 1313, K, Raster (c) Impulsfolge 2323, Y, Raster (d) Impulsfolge 3222, C, Raster (e) Impulsfolge 30301, M, Raster (f) Impulsfolge 222222, K, Raster



(g) Impulsfolge 203, K, Messkamera (h) Impulsfolge 1313, K, Messkamera (i) Impulsfolge 2323, Y, Messkamera (j) Impulsfolge 3222, M, Messkamera (k) Impulsfolge 30301, C, Messkamera (l) Impulsfolge 222222, K, Messkamera



(m) Impulsfolge 203, K, 600 dpi (n) Impulsfolge 1313, K, 600 dpi (o) Impulsfolge 2323, Y, 600 dpi (p) Impulsfolge 3222, M, 600 dpi (q) Impulsfolge 30301, C, 600 dpi (r) Impulsfolge 222222, K, 600 dpi

Abbildung 5.6.: Raster und Kamerabilder ausgewählter Impulsfolgen und Tinten CMYK. Die Kamerabilder der Druckresultate sind im jeweils kontrastreichsten Farbkanal der entsprechenden Tinte dargestellt. Die Abbildungen a bis f zeigen das Raster der Impulsfolgen. Die weiteren Abbildungen sind Kamerabilder von der Messkamera mit 126-facher Vergrößerung (Abbildungen g bis l) und zum Vergleich mit dem Kamerasystem in 600 dpi (Abbildungen m bis r). Die resultierende Einfärbung des Substrats ist bis zu 200 µm lang, was bereits eine Detektion in Kamerabildern mit 600 dpi erlaubt.

die durch das Kamerasystem mit einer Auflösung von 600 dpi aufgezeichnet wurden. Aus diesen Bereichen wurde der Messwert des geringsten Pixelwertes gewonnen. Dieser ist bei den Abbildungen 5.6o und 5.6r geringer (besser) als bei den anderen dargestellten Druckbildern. Abhängig von der Abtastung entsteht

---

eine Verteilung eines Flecks auf mehrere Pixel oder es resultieren wenige, aber dafür dunklere Pixel. Die große Fragmentierung der Impulsfolgen 203 und 1313 zeigt sich bei 600 dpi durch niedrigeren Kontrast der Pixelwerte zum Hintergrund.

Die Kamerabilder in Abbildung 5.6 und die Messwerte im Anhang A.2 für den Vorversuch zeigen, dass besonders kurze Linien bei der optischen Bilderfassung mit 600 dpi nahezu verschwinden und unabhängig von verschiedenen Impulsfolgen im Rauschen des Hintergrundes untergehen. Viele Linien, die aus unterschiedlich großen Tropfen bestehen, erreichen eine starke Fragmentierung von 2 oder höher, die bei Kamerabildern mit 600 dpi zu mangelhaften Pixelwerten führen. Trotz einem Fleck von durchschnittlich 51,4  $\mu\text{m}$  für einen einzelnen Tropfen mit der Waveform 3 tritt besonders starke Fragmentierung auf, sobald auf einen Impuls zwischen zwei Tropfen verzichtet wird. Dies wird deutlich bei den Impulsfolgen 1303, 2303, 3003 und 30301. Alle Linien, die nur aus kleinen und mittleren Tropfen bestehen, erreichen keine ausreichende Reduktion der Remission, um bei 600 dpi die Pixelwerte hinreichend zu senken. Erst Impulsfolgen ab einer Länge von vier aufeinander folgenden bedruckten Rasterzellen mit Verwendung ausschließlich mittlerer und großer Tropfengrößen erfüllen die Anforderungen an eine erkennbare Linie. Dort ist der minimale Pixelwert niedriger als 130. Diese Ergebnisse gelten gleichermaßen für schwarze Tinte, wie auch im kontrastreichsten Farbkanal für Cyan, Magenta und Gelb.

#### 5.4.2. Untersuchung von einfarbigen Mustern

Für die Ausfalldetektion mit Bestimmung des Positionsversatzes wurden 60 einfarbige Testmuster erzeugt und auf insgesamt vier Druckseiten platziert. Auf einer zusätzlichen fünften Seite wurde als Referenz die auf 1200 dpi angepasste Testseite erzeugt, wie sie im Kapitel 5.1 erörtert wurde, inklusive der leicht überarbeiteten Linienanordnung gemäß Kapitel 5.2, um den *Hockeyschläger-Effekt* zu vermeiden. Für eine größere Vergleichsbasis wurden alle Linienmuster auf die drei mittleren Druckköpfe der Druckmaschine ausgerichtet. Diese fünf Seiten wurden jeweils auf der oben genannten Druckmaschine mehrfach gedruckt. Von jeder Seite wurden vier Proben durch das Kamerasystem aufgezeichnet. Die detaillierten Messergebnisse befinden sich in der Tabelle A.4 im Anhang A.2. Für jedes Linienmuster wurde die Gesamtlänge des Musters in Millimetern bestimmt. Diese Länge ergibt sich direkt aus der Anzahl der Rasterzellen und der Anzahl der Reihen. Die fünfte und dreizehnte Spalte enthalten die Anzahl der falsch detektierten Düsenausfälle. Ein grüner Haken zeigt an, dass die Anzahl korrekt erkannt wurde, wohingegen ein rotes Kreuz symbolisiert, dass bei mindestens einer Probe die Messung nicht möglich war. Die Menge von versetzten Linien wird mittels des Kriteriums bestimmt, ob die Linienposition mehr als 21  $\mu\text{m}$  von ihrer Sollposition abweichen. Das erste Muster mit 40 Dots entspricht dem Referenzmuster und dient dem Positionsversatz in Spalte 7 und 15 als Referenz und beträgt deshalb 0  $\mu\text{m}$ . Die jeweils letzte Spalte gibt die Standardabweichung der Linienpositionen über das gesamte Muster an. Für alle Einträge sind kleinere Werte besser. Die Messungen für die Impulsfolgen 3<sup>60</sup>, 3<sup>6</sup>, 3<sup>50</sup> und 03<sup>40</sup> bei 16 Reihen ließen sich nicht in allen Proben ohne fehlerhaft detektierte Düsenausfälle durchführen. Dies war auch bei 12 Reihen für die kurzen Impulsfolgen unterhalb von 03<sup>60</sup> der Fall. In den ausgewerteten Bildern ist an diesen Stellen zu sehen, dass die Linien nur sehr niedrigen Kontrast zeigen oder in Druckrichtung zu stark versetzt sind. Bei der Linienanordnung © treten in mindestens einer Probe von fast allen Impulsfolgen fehlerhaft gemessene Ausfälle auf. Veranschaulicht durch die roten Kreuze in Tabelle A.4 war jeweils mindestens eine Probe der Impulsfolgen 3<sup>6</sup> und 03<sup>40</sup> bei 12 Reihen und 03<sup>50</sup> bei acht Reihen überhaupt nicht durch die Analyse auswertbar. Gemäß der Tabelle A.4 verhält sich die gemessene Anzahl versetzt positionierter Linien invers zur Linienlänge. Die Werte für die mittlere Differenz des Positionsversatzes der Linien  $\Delta p$  zum Referenzdruckmuster schwanken sehr stark, sowohl bezüglich der Impulsfolge als auch der Linienanordnung. Sie streuen in Hinblick auf das Referenzmuster zwischen Werten von 12,4  $\mu\text{m}$  und 32,3  $\mu\text{m}$ . Die Standardabweichung der Linien eines Musters liegt bei 32 Reihen abhängig von der Impulsfolge zwischen 5,73  $\mu\text{m}$  und 20,17  $\mu\text{m}$ , bei 24 Reihen

---

zwischen 8,02  $\mu\text{m}$  und 10,17  $\mu\text{m}$ . Bei 16 Reihen ergibt sich eine Standardabweichung von 7,88  $\mu\text{m}$  bis 10,61  $\mu\text{m}$ ; bei 12 Reihen liegt sie zwischen 5,05  $\mu\text{m}$  und 16,35  $\mu\text{m}$  und für die besonders kurzen Muster mit nur 8 Reihen schwankt die Standardabweichung zwischen 8,35  $\mu\text{m}$  und 16,89  $\mu\text{m}$ . Die geringsten Standardabweichungen treten bei den 12-reihigen Mustern auf, welche bis zu einer Linienlänge von 8 Impulsen mit der Güte der Referenzmessung vergleichbar sind.

Die Auswertung von gedruckten Linienmustern, bei denen für alle Linien eine Existenz- und Positionsbestimmung durchgeführt wurde, zeigt zunehmende Ungenauigkeit, je kürzer das Muster ist. Bei Betrachtung der Ergebnisse für den Positionsunterschied zur Referenz muss immer berücksichtigt werden, dass die gemessenen Linien zu unterschiedlichen Zeiten und auf verschiedenen Seiten gedruckt wurden. Die Präzision einer Düse ändert sich gegebenenfalls von einer zur nächsten Drucksequenz und wird zusätzlich von umliegenden aktuierten Düsen beeinflusst. Wie schon im Vorversuch gezeigt und hier bestätigt, weisen Linien mit weniger als sechs gedruckten Tropfen starke Unregelmäßigkeiten auf und sind für zuverlässige Messungen nicht geeignet. In einzelnen Fällen verzögern sich die ersten paar ausgestoßenen Tropfen, wodurch sich die Linien nicht an gleicher Position in Druckrichtung befinden. Somit verläuft die Detektion der kurzen Linien über eine durchgängige auszuwertende Pixelzeile fehlerhaft. Bei den Mustern mit acht Reihen und der Linienanordnung ⑥ liegen benachbarte Linien derart dicht beieinander, dass sie sich bei etlichen Messungen und unabhängig von der Linienlänge nicht unterscheiden lassen. Dies führt zu falsch bestimmten Düsenausfällen, selbst bei den Impulsfolgen 3<sup>10</sup> und 3<sup>9</sup>. Besonders vielversprechend sind Muster mit 24 und 12 Reihen. Da 12 und 24 keine ganzzahligen Teiler der 32 Düsenreihen sind und sich somit eine Düsenreihe auf mehrere Linienreihen aufteilt, reduzieren sich Wechselwirkungen und Auslastungsschwankungen wie beispielsweise der *Hockeyschläger-Effekt*. Trotz deutlicher Positionsunterschiede treten für dieses Muster geringe Standardabweichungen und wenig versetzte Linien auf. Dies zeigt trotz deutlichem Unterschied zum Referenzmuster eine in sich präzise Positionierung der Linien eines Musters. Die 16-reihigen Muster weisen geringe Standardabweichungen zwischen etwa 8  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$  auf, wobei kürzere Linienlängen mit einer kontinuierlichen Zunahme (Verschlechterung) der Standardabweichung korrelieren. Die Linienanordnung ⑤ zeigt bis zur Linienlänge von 7 Dots, trotz geringeren Abständen, durchweg nochmals bessere Standardabweichungen von unter 7  $\mu\text{m}$  und geringe Mengen an versetzten Linien. Ein weiteres Zusammenrücken als auf 12 Reihen ist wegen der Unterscheidbarkeit nicht praktikabel und der zusätzliche Platzgewinn ist bei weiterer Verkürzung der Linien nur marginal. Das Experiment zeigt, dass das Linienmuster auf bis zu 8 Dots mal 12 Reihen reduziert werden kann. Dabei ist es sinnvoller, eine Rasterzelle Abstand zu erlauben, anstatt alle acht Dots zu bedrucken. Das kürzeste Muster lässt sich also auf 2,01 mm unterbringen. Für andere Papiersorten oder schwierigere Bedingungen erlaubt eine geringfügige Verlängerung auf bis zu 2,54 mm eine erhöhte Zuverlässigkeit mit der Impulsfolge 3<sup>10</sup>. Abbildung 5.7 fasst die Ergebnisse der ersten Stufe zusammen, indem sie für alle Varianten die Musterlänge der Messqualität gegenüberstellt. Dazu wurde gemäß der in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Methodik für jedes Muster eine Punktzahl zwischen 0 und 100 Punkten relativ zum Referenzmuster ermittelt. Die beiden Muster, die den besten Kompromiss aus Platzbedarf und Sicherheit in der Auswertung bieten, sind durch rote Kreise hervorgehoben, sie sind für den Einsatz im Beschnitt zu empfehlen. Die Impulsfolge 3<sup>70</sup> erreicht bei 12 Reihen eine Messqualität von 88% und ist 2,01 mm lang. Die 2,54 mm lange Impulsfolge 3<sup>10</sup> erreicht bei gleicher Linienanordnung eine Messqualität von 93%.

### 5.4.3. Untersuchung von mehrfarbigen Mustern

In der zweiten Stufe der Positionsbestimmung werden mehrere Tinten kombiniert und untersucht, ob dadurch bei hinreichender Messgüte eine zusätzliche räumliche Einsparung erreicht wird. Es werden acht Kombinationen aus den vier Tinten untersucht. In der Übersichtstabelle 5.1 ist beschrieben, welche Tinten in welchem Farbkanal des Bildsensors den höchsten Kontrast erzielen. Dabei sind die Pixelwerte zwischen 0

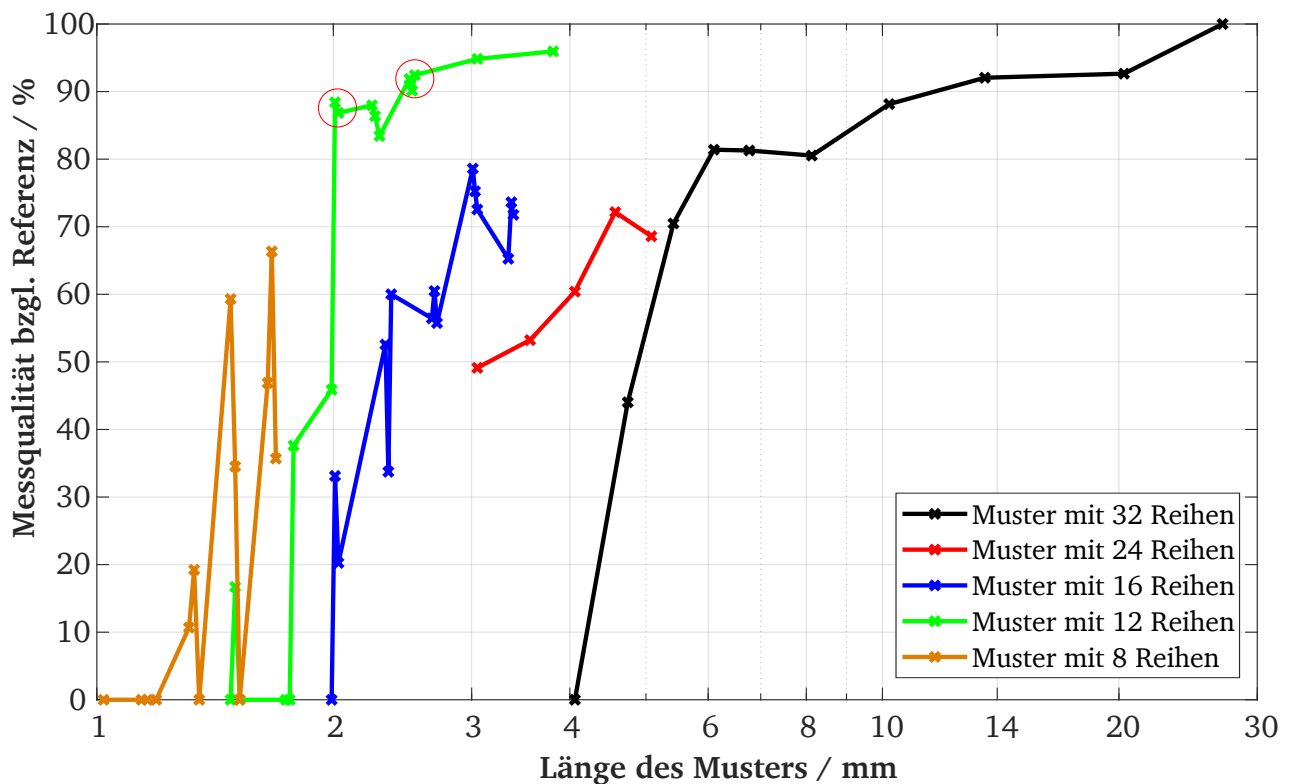


Abbildung 5.7.: Gegenüberstellung von Länge des Musters zur Qualität der Auswertung aller Varianten von einfarbigen Linienmustern. Die Messqualität wurde entsprechend der Versuchsbeschreibung in Kapitel 3.3.1 unter Verwendung einer Scorecard ermittelt. Die beiden besten Muster sind durch rote Kreise markiert.

und dem Hintergrund 200 in fünf Stufen zu je 40 Einheiten unterteilt. Folglich steht ++ für einen Pixelwert von 0 bis 40 und -- für einen Pixelwert zwischen 161 und 200. Die Testdruckmuster wurden mit *Matlab* als Pixelmatrix für unterschiedliche Linienanordnungen und die gewählten Tintenkombinationen auf insgesamt zwei Seiten zusammengestellt und auf der beschriebenen Druckmaschine gemeinsam mit der Referenzseite gedruckt. Erneut wurden von allen drei Seiten jeweils vier Proben durch das Kamerasystem aufgezeichnet. Die detaillierten Ergebnisse der Messung befinden sich in Tabelle A.5 im Anhang A.2. Es werden dieselben Kriterien verglichen wie bei den einfarbigen Linienmustern, nämlich die Länge des Linienmusters, die Anzahl von Düsenausfällen und versetzt positionierten Linien, der durchschnittliche Positionsunterschied gegenüber dem Referenzmuster und die Standardabweichung. Darüber hinaus wurde in der Spalte 7 der Bruchteil der Musterlänge bestimmt, der je Tinte anfällt. Die gemessenen Werte in den Spalten *Ausfälle korrekt*, *Anzahl versetzter Linien* und *Positionsversatz ( $\Delta p$ )* beziehen sich auf die Gesamtzahl aller Linien aller Tinten des jeweiligen Musters. Die Standardabweichung wird für jede Tinte separat berechnet. Genauso wie in der ersten Stufe, gilt für alle eingetragenen Werte, dass sie aufgrund der Grenzwertbetrachtung dem jeweils schlechtesten Ergebnis, d. h. den höchsten Messwerten aus den gemessenen Proben, entsprechen. Die ersten vier Zeilen der Tabelle A.5 resultieren aus dem Referenzmuster gemäß der Beschreibung in Kapitel 5.1 und dienen allen weiteren Messungen als Referenz. Für Cyan zeigen sich hier 47 versetzt positionierte Linien, für Gelb sind es 22, während die anderen Tinten nur jeweils eine versetzte Linie aufweisen. Bei der Anzahl an versetzten Linien in den weiteren Mustern ist davon auszugehen, dass die versetzt detektierten Linien vorwiegend Cyan und gelb zuzuordnen sind. Fehlerhaft detektierte Ausfälle

Tabelle 5.1.: Qualitative Höhe des Kontrasts der Tinten im jeweiligen Farbkanal. Ein Plus beschreibt gegenüber einem Minus eine höhere Differenz der Pixelwerte im Kamerabild zwischen bedruckter und unbedruckter Fläche.

Tinte \ Farbkanal	Rot	Grün	Blau
Cyan	++	+	--
Magenta	-	++	+
Gelb	--	--	++
Schwarz	++	++	++

treten bei dem kürzesten Vierfarbmuster mit 16 Reihen, den beiden Dreifarbmustern CMY mit 16 und 12 Reihen sowie bei der Kombination von Cyan und Magenta mit 12 Reihen auf. Bei geringer Reihenzahl von CMYK- und CMY-Kombinationen sowie bei zweifarbigen Mustern mit nur 12 Reihen treten große Anzahlen von versetzten Linien auf. Bei zweifarbigen Mustern mit Cyan, welches in der Messung des Referenzmusters vergleichbar viele versetzte Linien hat, ist deren Anzahl ebenfalls höher als bei zweifarbigen Mustern ohne Cyan. Der Positionsversatz  $\Delta p$  weist zwei Ausreißer für die kurzen Kombinationen CY auf und schwankt ansonsten durchweg eng um die 10  $\mu\text{m}$ -Marke. Bei allen 12-reihigen Mustern sind wesentlich höhere Standardabweichungen gegenüber der Messung im Referenzmuster zu sehen. Bei den anderen Mustern sind die errechneten Werte der Standardabweichung etwa 1–2  $\mu\text{m}$  höher als bei der Referenzmessung.

Die Kombination mehrerer Tinten in einem Linienmuster erweist sich als vielversprechend, denn dadurch lassen sich die Abstände zwischen Linien im Gegensatz zu den einfarbigen Mustern nochmals reduzieren, womit ein anteilig kürzeres Muster pro Tinte resultiert, als es in Stufe 1 möglich war. Die Packdichte der Linien lässt sich jedoch nicht mit der Anzahl der kombinierten Tinten vervielfachen, wodurch ein insgesamt längeres Muster entsteht, das zu Beginn jeder Seite gedruckt werden muss. Die hohen Werte von Cyan im Referenzmuster wirken sich auch auf die Kombinationen aus und führen dort zu erhöhten Anzahlen von versetzt positionierten Linien und größerer Standardabweichung. In den drei- und vierfarbigen Mustern stimmen die gemessenen Positionen besser mit der Referenz überein, jedoch lassen sich die vielen Tinten weniger effektiv über die drei Farbkanäle separieren. Leicht reduzierte Pixelwerte durch Linien fremder Tinten im gefilterten Bild erhöhen die Wahrscheinlichkeit der Falschdetektion. Bei den dichtesten Mustern aller Kombinationen kommt es leichter zu Überlagerungen von Linien unterschiedlicher Tinten, welche die Farbdarstellung auf dem Papier und damit im aufgenommenen Bild verändern. Dadurch entsteht für betroffene Linien ein übermäßig großer Positionsversatz. Eine Messung aller vier Tinten CMYK pro Seite erfordert mindestens 24 Reihen und somit 5,08 mm an Länge der Substratbahn. Damit wäre die maximale Messfrequenz, sprich eine Messung aller Tinten CMYK auf jeder Seite, erreicht und ein Muster bräuchte anteilig nur 1,27 mm, aber auf jeder einzelnen Seite wäre der Bereich für Nutzdaten um diese 5,08 mm reduziert. Abbildung 5.8 fasst die Ergebnisse der zweiten Stufe zusammen. Dazu wurde nach demselben Prinzip wie bei Stufe 1 die Scorecard-Bewertung durchgeführt und für die mehrfarbigen Varianten die Musterlänge der Messqualität gegenübergestellt. Die beste vierfarbige Option und die beiden zusammengehörigen zweifarbigen Muster sind durch die roten Kreise in Abbildung 5.8 markiert. In der oberen rechten Ecke befindet sich die Messung des Referenzmusters, dargestellt als schwarzes Kreuz. Unter den zweifarbigen Mustern erweisen sich CK und MY als die beste Kombination von Doppelmustern, die abwechselnd zu drucken sind. Kombiniert mit Schwarz zeigt Cyan mit 89% gegenüber der Referenz die genauesten Resultate, nämlich geringere Anzahlen versetzter Linien und eine geringere Standardabweichung als mit Magenta oder Gelb. Das Zusammenlegen der verbleibenden Tinten Magenta und Gelb zeigt zudem ebenfalls ein sehr gutes Ergebnis von 98%, die im Falle des 16-reihigen Musters laut der Tabelle A.5 direkt

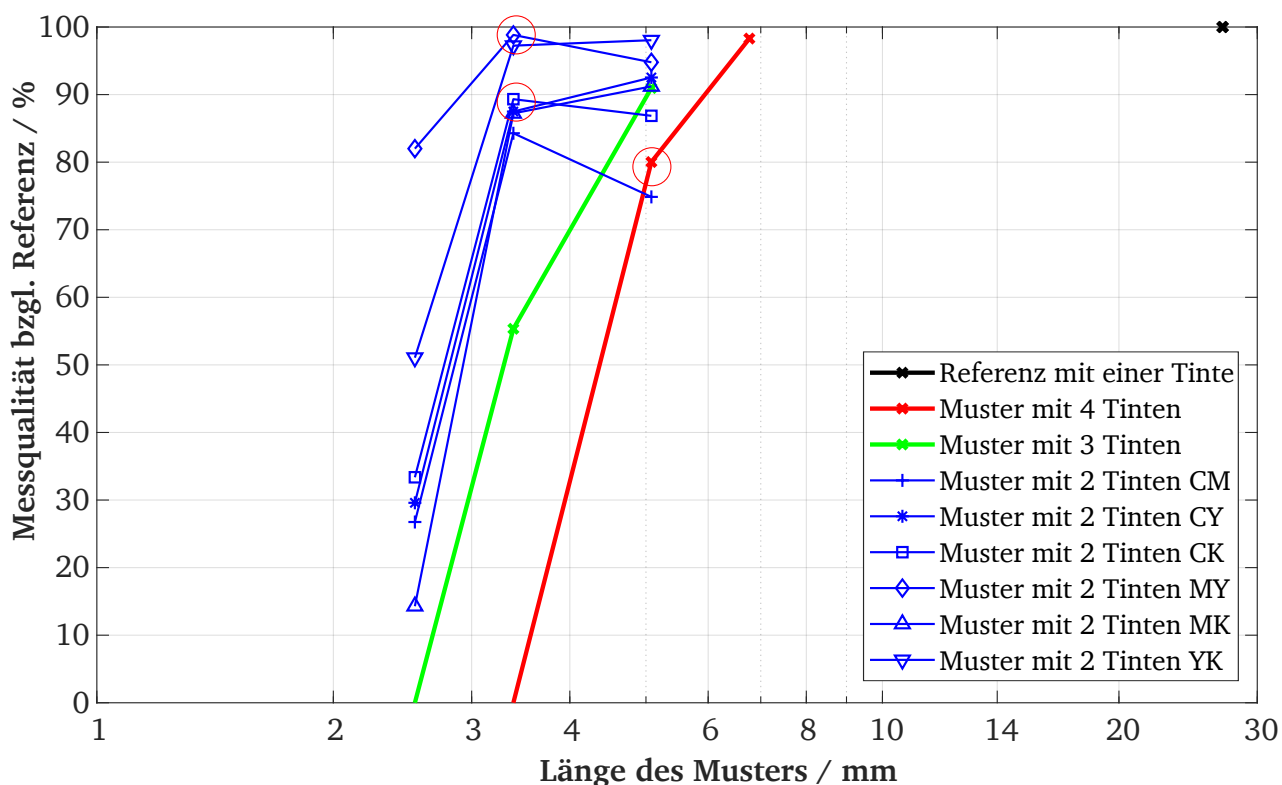


Abbildung 5.8.: Gegenüberstellung von Musterlänge zur Qualität der Auswertung aller Varianten von mehrfarbigen Linienmustern. Die besten Kombinationen aus zwei und vier Tinten sind durch rote Kreise markiert. Das Referenzmuster befindet sich in der rechten oberen Ecke.

mit denen der Referenzen vergleichbar sind. Die 3,39 mm Gesamtlänge der zweifarbigen Linienmuster bringen einen größeren Nutzen für den Druckprozess als eine Verdopplung der Messfrequenz durch ein vierfarbiges Muster. Das Drucken eines dreifarbiges Linienmusters abwechselnd mit einem schwarzem Muster erreicht in Bezug auf die Standardabweichungen nicht die Güte der beiden zweifarbigen Muster, kann jedoch in Betracht gezogen werden, falls 5,08 mm Platzbedarf toleriert werden und ein besonderes Augenmerk auf Schwarz gelegt wird.

#### 5.4.4. Ergebnisse

Gemäß der anfänglich aufgestellten Hypothese in Kapitel 3.3.1 lässt sich ein Prüfmuster der Düsenperformance auf unter 5 mm Länge komprimieren und erzielt dabei noch hinreichende Genauigkeit in der Auswertung. Dies bedeutet, dass durch das vorgestellte Verfahren gegenüber dem ganzseitigen Konzept von Kapitel 2.2.4 Makulatur vermieden wird. Das einfarbige Linienmuster mit der Impulsfolge 3<sup>70</sup> und Linienanordnung ⑤, das im Experiment ein Optimum aus Messqualität und Musterlänge erreicht hat, ist in Abbildung 5.9 beispielhaft in Cyan dargestellt. Bei den 2,01 mm langen einfarbigen Linienmustern mit der Impulsfolge 3<sup>70</sup> und Linienanordnung ⑤ je Seite entsteht nur ein Drittel der Makulatur gegenüber derer bei Nutzung des Referenzmusters gemäß dem bisherigen Konzept gemäß Kapitel 2.2.4, bei dem jede sechzigste Seite komplett Makulatur ist. Da das Linienmuster im Beschnitt auf jeder Seite ausgewertet wird, erreicht dieses Verfahren die 15-fache Messfrequenz. Die Prüfung einer einzelnen Tinte kann auf jeder Seite durchgeführt werden. Dies führt zu schnellerer Erkennung von Fehlverhalten als bei einzelnen Testseiten, die in regelmäßigen Abständen zwischen den Kundenseiten gedruckt werden. Die Erkennung von Fehlern nach

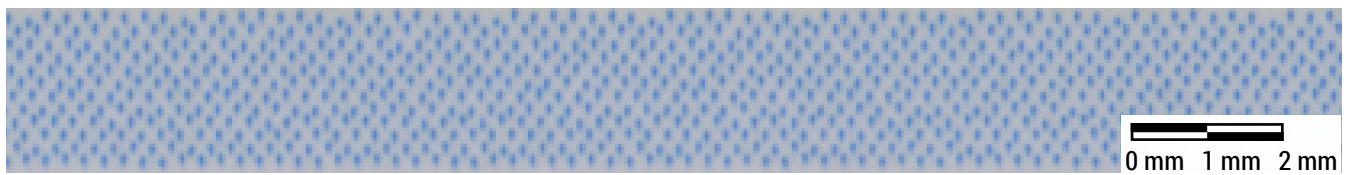
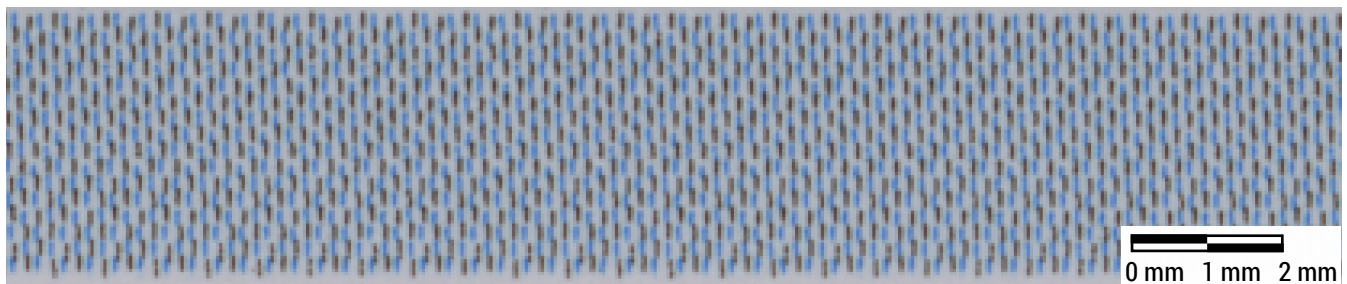
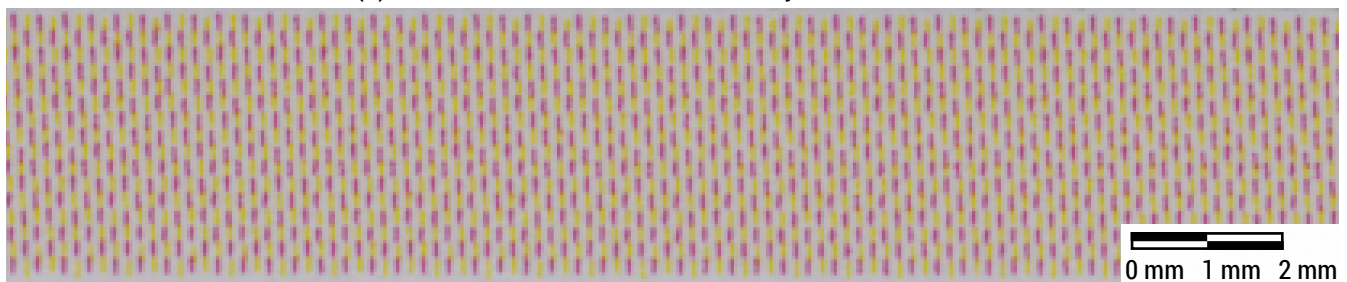


Abbildung 5.9.: Kamerabild des Testdruckmusters 3<sup>70</sup> in Cyan. Das Linienmuster besteht in Druckrichtung aus 95 Dots, also 2,01 mm. Es wurde in 600 dpi aufgezeichnet. Im Vergleich zum Referenzmuster liegt die Messqualität bei 88%.

vier Seiten, wenn vier Tinten gedruckt werden, reduziert die Makulatur im Vergleich zu ganzen Testseiten bei einem typischen Abstand von 60 Seiten: Innerhalb der Messwiederholung im Abstand von 60, bzw. vier Seiten lässt sich nicht mit Sicherheit sagen, wann der anschließend detektierte Qualitätsverlust eingetreten ist. Somit sind bei der Messwiederholung im Abstand von 60 Seiten maximal 60 und durchschnittlich 30 Seiten als Makulatur zu betrachten. Für jeden auftretenden, inakzeptablen Düsenausfall werden folglich bis zu 56 (durchschnittlich 28) Seiten Makulatur gegenüber dem gegenwärtigen Konzept eingespart. Bei Nutzung der am besten geeigneten, mehrfarbigen Linienmuster (siehe Abbildung 5.10) werden zwei Tinten auf insgesamt 3,39 mm untergebracht, wodurch gegenüber dem gegenwärtigen Konzept 32% der Makulatur eingespart werden und die Messfrequenz verdreißigfacht wird. Somit wird bei Auftreten eines Düsenfehlers



(a) Kombiniertes Linienmuster aus Cyan und Schwarz.



(b) Kombiniertes Linienmuster aus Magenta und Gelb.

Abbildung 5.10.: Kamerabilder der Kombination an zweifarbigem Linienmuster, die die geringste Makulatur verursachen. Die Kombination aus Cyan und Schwarz (a) sowie Magenta und Gelb (b) im 16-reihigen Linienmuster zeigen laut der durchgeführten Experimente die höchste Messqualität und damit die beste Unterscheidbarkeit der Farben bei der Bildauswertung.

die Makulatur durch fehlerhaft bedruckte Seiten um bis zu 58 (durchschnittlich 29) Seiten reduziert. Aus dem durchgeführten Experiment zu mehrfarbigen Linienmustern ergeben sich als beste Linienmuster die Kombinationen aus Cyan/Schwarz und Magenta/Gelb. Kombinierte Muster mit vier Tinten zeigen bereits bei 24-reihiger Anordnung eine geringe Messqualität von 80% und sind damit aufgrund der erhöhten Länge

---

des Musters nicht für einen Beschnitt unterhalb von 5 mm geeignet. Sowohl bei einfarbigen als auch bei mehrfarbigen Linienmustern erlauben die verkürzten Testmuster im Beschnitt eine Gleichbehandlung jeder Seite und machen die Aussortierung von Testseiten überflüssig.

## 5.5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Im vorausgehenden Experiment wurde für die vorliegenden Druckköpfe KJ4B-Z von *Kyocera* ein optimiertes Testdruckmuster für die Messung der Tropfenpositionierung im Beschnitt ermittelt. Das resultierende Testmuster besteht aus 12 Linienreihen und der Abstand zweier Linien quer zur Druckrichtung beträgt jeweils 12 Dots. Diese Anordnung wird quer zur Druckrichtung wiederholt, bis jeder Düse des Druckkopfes je eine Linie zugeordnet ist. Je länger die Linien sind, desto genauer kann die Abweichung von ihrer Zielposition bestimmt werden, aber dadurch steigt auch der Anteil an Makulatur pro Seite. Darüber hinaus müssen alle Linien zuverlässig von benachbarten Linien, vorherigem Auffrischungsbereich und nachfolgenden Kundendaten unterscheidbar sein. Um besagte Unterscheidbarkeit zu begünstigen, sind die Reihen nicht in einem einfachen Treppemuster angeordnet, sondern in zwei alternierenden Serien: Für das sich ständig wiederholende Muster, bestehend aus 12 Linien, befindet sich an vorderster Stelle in Druckrichtung die Linie für die erste, dann die siebte, zweite, achte, dritte, neunte, vierte, zehnte, fünfte, elfte, sechste und schließlich die zwölfte Düse. Die Besonderheit dieses Musters ist, dass die Anzahl der Linienreihen (12) kein ganzzahliger Teiler der Anzahl an Düsenreihen (32) im verwendeten *Kyocera*-Druckkopf ist. Folglich ist jeweils ein Drittel der Düsen jeder Düsenreihe am Druckprozess von drei verschiedenen Linienreihen beteiligt. Umgekehrt wird jede Linienreihe in gleichen Anteilen von acht unterschiedlichen Düsenreihen erzeugt. Die Zuordnung der Linienreihen zu den Düsenreihen erfolgt gemäß der Tabelle A.6 im Anhang A.3. Die Spalten der Tabelle A.6 zeigen für jede der drei Druckphasen einer Düsenreihe den lokalen und zeitlichen Abstand zwischen dem Beginn des Testdruckmusters und dem Tropfenausstoß der Düsen in der jeweiligen Linienreihe und Druckphase. Die lokale Entfernung  $\Delta s$  wird in Dots, also Rasterzellen angegeben. Sie ist die Summe aus dem Versatz der jeweiligen Düsenreihen in Druckrichtung, welcher der Druckkopfspezifikation der *Kyocera Corporation* (2014) zu entnehmen ist, und dem Abstand der Linienreihen im Testdruckmuster in Druckrichtung. Bei dem vorgestellten Linienmuster mit der Impulsfolge 3<sup>7</sup>0 und Linienanordnung © sind zwei aufeinander folgende Linienreihen um 8 Dots in Druckrichtung zueinander versetzt. Die Zeitdifferenz  $\Delta t$  wird in Millisekunden ausgedrückt und ist durch die Druckreihenfolge und die Druckgeschwindigkeit von  $80 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  festgelegt.  $\Delta t$  beschreibt die Dauer zwischen dem Zeitpunkt, zu dem die ersten Tropfen des Linienmuster gedruckt werden, und dem Zeitpunkt, zu dem je ein Drittel der Düsen einer Düsenreihe ihren ersten Tropfen für die jeweilige Druckphase ausstößt. Die Zeitdifferenz ergibt sich somit als Bruch der lokalen Entfernung geteilt durch die Druckgeschwindigkeit. Die Druckphasen, in denen die jeweiligen Düsenreihen das besagte Linienmuster erzeugen, sind zur Verdeutlichung im Gantt-Diagramm in Abbildung 5.11 als schwarze Blöcke dargestellt. Die blauen Blöcke repräsentieren das Referenzmuster, das in Kapitel 5.1 und 5.2 entwickelt wurde. In Anlehnung an die Abbildung 5.4 beschreiben die Blöcke wieder die aktive Zeit der Düsen zur Erzeugung des Testdruckmusters bei einer eingestellten Geschwindigkeit von  $80 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ . Im Gegensatz zum Referenzmuster beträgt die Druckdauer für eine verkürzte Linie lediglich 0,111 ms (Referenz: 0,635 ms) und das Gesamtmuster ist um 1185 Dots, also 92,6%, kürzer und um 18,8 ms, bzw. 42,3%, schneller gedruckt. Das Diagramm in Abbildung 5.11 zeigt, dass auch für diese Abfolge die Zeitabstände zwischen Ende und Anfang zweier benachbarter Düsenreihen kleiner als die zuvor erwähnten 1,27 ms sind. Das bedeutet, dass beim Drucken des Testmusters in diesem Fall der *Hockeyschläger-Effekt* nicht ausgeschlossen werden kann. Dem steht jedoch die Aufteilung der Düsen einer Düsenreihe auf drei unterschiedliche Linienreihen entgegen, wodurch die Tintenversorgung nur zu einem Drittel des maximalen Volumenstroms beansprucht wird. Durch diese Aufteilung traten während des Druckprozesses des Testdruckmusters die unter Kapitel 5.2 beschriebenen Wechselwirkungen nicht auf. Die



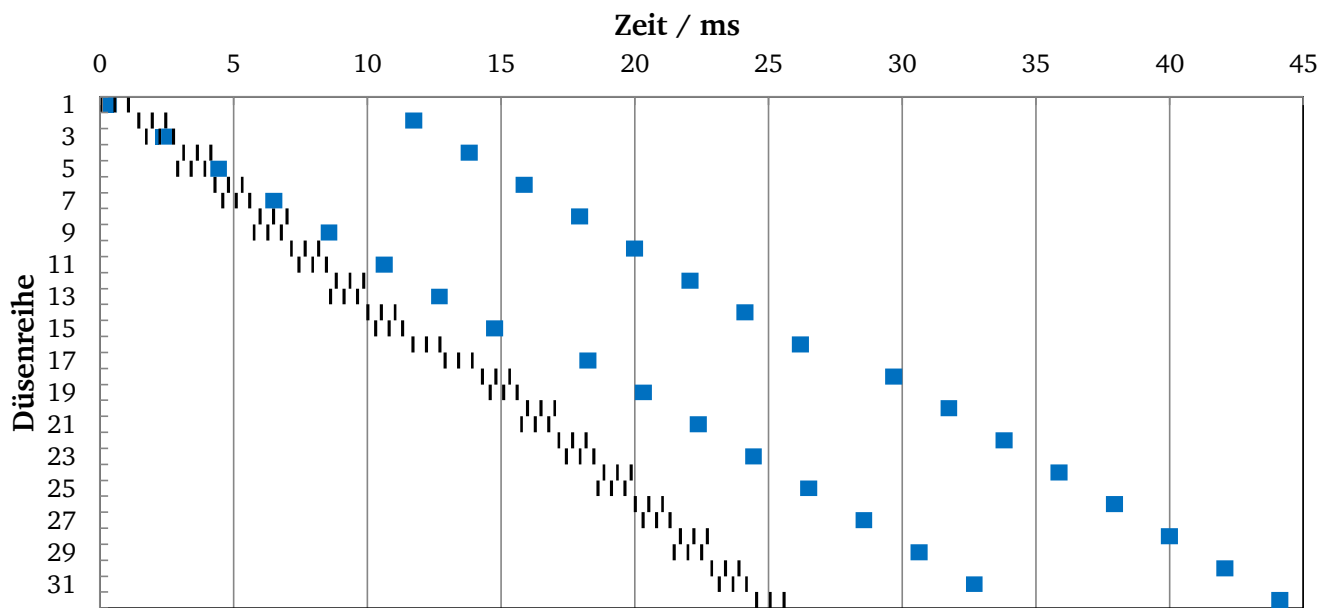


Abbildung 5.11.: Das dargestellte Gantt-Diagramm veranschaulicht die zeitliche Abfolge des Drucks der einzelnen Düsenreihen für das verkleinerte Linienmuster (Schwarz) gegenüber dem Referenzmuster (Blau). Die zeitliche Abfolge des Referenzmusters wurde bereits in Abbildung 5.4 gezeigt. Durch die kürzeren Linien im Testdruckmuster und deren dichtere Anordnung besitzen die Druckphasen des verkürzten Musters (schwarze Blöcke) eine kürzere Dauer und einen zeitlich geringeren Abstand zwischen den einzelnen Druckphasen als die zeitliche Druckabfolge des Referenzmusters (blaue Blöcke).

folgende Tabelle 5.2 zeigt die direkte Gegenüberstellung des vorgestellten Konzepts zum Referenzmuster angewandt auf das Beispiel der vorliegenden Rollendruckmaschine. Wird die Makatulrlänge der Testmuster verglichen, resultiert beim Referenzmuster mit einem Messintervall über 60 Seiten eine Länge von 4,95 mm, beim verkürzten Testmuster hingegen ein Platzbedarf von etwa 2,01 mm pro Seite. Dies entspricht etwa 40% der Makulatur des Referenzmusters. Die Gesamtmenge an Makulatur  $Mak_{Gesamt}$  setzt sich gemäß Gleichung 5.1 zusammen:

$$Mak_{Gesamt} = Mak_{Druck} + Mak_{Transport} + Mak_{Analyse} + Mak_{Kompensation} + Mak_{Speicher} \quad (5.1)$$

Bei der betrachteten Druckmaschine entspricht die Makulatur  $Mak_{Speicher}$  einem Puffer von 20 druckfertig aufbereiteten Seiten. Für die Berechnung in Tabelle 5.2 wird eine Seitenlänge von 304,8 mm genutzt. Dies

Tabelle 5.2.: Gegenüberstellung des Konzepts mit einem Referenzmuster auf jeder sechzigsten Seite und des einfarbigen, verkürzten Linienmusters mit der Impulsfolge 3<sup>7</sup>0 und Linienanordnung © im Beschnitt. Die Werte gelten bei einer Seitenlänge von 304,8 mm und einer Transportgeschwindigkeit von 80  $\frac{m}{min}$ .

Konzept	Musterlänge pro Seite	Analysedauer je Muster	Messfrequenz	Makulatur je Düsenausfall	Tintenbedarf pro Düse je Muster
Referenzmuster	4,95 mm	3 s	0,073 $\frac{1}{s}$	33,74 m	240 pl
Verkürztes Muster	2,01 mm	1,5 s	1,1 $\frac{1}{s}$	23,26 m	42 pl

---

entspricht 12 Zoll, bzw. einer DIN A4 Seite zuzüglich Beschnitts. Die Entfernung zwischen Druckeinheit und Kamerasystem beträgt 12,7 m und geht als  $Mak_{Transport}$  in Gleichung 5.1 ein. Dieser Posten macht allein fast die Hälfte des verursachten Abfalls aus und würde nahezu vollständig wegfallen, wenn sich das Kamerasystem unmittelbar hinter der Druckeinheit befände. Beispielsweise würde die Gesamtmakulatur für beide Konzepte um 12,2 m geringer ausfallen, wenn das Kamerasystem in einem Abstand von 0,5 m hinter der Druckeinheit eingebaut wäre. Somit wäre die Tinte zwar nicht getrocknet, aber im Gegensatz zur Messung der Farbdichte hätte das Erfassen von Linien aus feuchter Tinte eine vernachlässigbar geringe Auswirkung auf die Messqualität. Die Makulatur  $Mak_{Druck}$  bis ein Testmuster gedruckt wird, entspricht durchschnittlich der Hälfte des Abstandes zwischen zwei Testmustern. Sie beträgt somit beim Referenzmuster 18,3 m und beim verkürzten Linienmuster lediglich 1,2 m. Die Makulatur für die Analyse  $Mak_{Analyse}$  und die Kompensation  $Mak_{Kompensation}$  bestimmen sich aus deren Rechenzeit multipliziert mit der vorherrschenden Bahngeschwindigkeit von  $80 \frac{m}{min}$ . Die Einbringung der Kompensation dauert etwa 1 s und unterscheidet sich zwischen den beiden Konzepten nicht. Die Analysedauer für alle fünf Köpfe einer seitenbreiten Anordnung ist beim Referenzmuster mit 3 s doppelt so lange wie die 1,5 s im verkürzten Muster. Die Gesamtmakulatur, die bei jedem Düsenausfall zustande kommt, ergibt sich beim Referenzmuster zu 33,74 m und beim vorgeschlagenen verkürzten Muster zu 23,26 m. Diese Werte finden sich in der Tabelle 5.2. Wird nur eine Tinte gedruckt, die auf jeder Seite geprüft wird, reduzieren sich die Makulatur marginal auf 22,8 m. Ein Ansatz, wie bei Rollendruckmaschinen keine Makulatur entsteht, wurde im eigenen Patent von Schneider und Stöckle (2019) beschrieben. Dabei wird in der Reinigungsposition durch eine zusätzliche Vorrichtung ein Bedruckstoff unter die Druckköpfe gebracht, auf dem das Testdruckmuster gedruckt und anschließend auf Düsenausfälle überprüft wird. Da es sich um eine aufwändig zu integrierende Apparatur handelt, die bereits bei der Entwicklung vorgesehen werden muss, wird hier weiter der Ansatz verfolgt, die benötigte Fläche eines Testdruckmusters auf dem produktiv genutzten Substrat zu minimieren. Der Tintenverbrauch der beiden Konzepte aus Tabelle 5.2 zeigt für das Referenzmuster zwar einen um 198 pl höheren Bedarf je genutzter Düse, allerdings wird das Referenzmuster nur auf jeder sechzigsten Seite gedruckt, während das verkürzte Linienmuster von jeweils einer Farbe auf jeder vierten Seite gedruckt wird. Wird folglich der Tintenbedarf je Düse auf 60 Seiten gerechnet, nutzt das verkürzte Linienmuster insgesamt 630 pl an Tinte und damit die 2,6-fache Menge des Referenzmusters. Dieser erhöhte Tintenbedarf steht der 15-fach höheren Messfrequenz und der verringerten Makulatur nachteilig gegenüber.

---

## 6. Erkennung von Düsenausfällen für Grundierung

---

Um flexibel zahlreiche Substrate bedrucken zu können, empfiehlt sich der Auftrag einer Grundierung, oft wird im deutschen Sprachgebrauch der englische Begriff *Primer* verwendet. In Kapitel 2.1.2 wurden einige Eigenschaften und der Zweck der Grundierung beschrieben: Die Grundierung ist eine farblose Flüssigkeit, welche die Interaktion zwischen Tinte und Substrat derart beeinflussen soll, dass eine höhere Qualität erreicht wird. Der Einfluss der Grundierung zeigt sich besonders bei gestrichenen Papieren und dort umso mehr beim Drucken verschiedener Tinten übereinander. Mit der Grundierung werden klare Kanten erreicht und das Ineinanderfließen der Tinten minimiert, wie Abbildung 2.8 zeigt. Bezüglich des Versuchsaufbaus wurde in Kapitel 3.1 der verwendete Inkjet-Druckkopf zum Auftragen der Grundierung beschrieben und erklärt, dass im vorliegenden Fall das Substrat während des Druckvorgangs mit der Grundierung benetzt wird. Dies erlaubt einen Auftrag der Grundierung an genau den Stellen, wo tatsächlich Tinte gedruckt wird und spart somit Verbrauchsmaterial. Durch die Verwendung von Inkjet-Druckköpfen besteht, genauso wie bei den Tinten, das Risiko, dass einzelne Düsen ausfallen oder verstopfen und somit ein Aufbringen der Grundierung auf das Substrat partiell verhindert wird. Die Herausforderung besteht also darin, herauszufinden, ob alle Düsen funktionieren. Diese Funktionskontrolle kann bei der farblosen, transparenten Grundierung im Gegensatz zur Düsenausfallmessung bei Tinte gemäß Kapitel 5 nicht direkt visuell beurteilt werden. In gegenwärtigen Systemen werden Lösungsansätze genutzt, die durch ultraviolettes oder infrarotes Licht die Eigenschaften der Grundierung ausnutzen, unter entsprechender Beleuchtung sichtbar zu sein. In dieser Arbeit wird das Kamerasystem gemäß Kapitel 3.1 genutzt, bei dem für die Untersuchung der Grundierung keine zusätzliche oder wechselnde Beleuchtung zum Einsatz kommt. In der Beschreibung des experimentellen Aufbaus in Kapitel 3.4 wurden mehrschichtige Testdruckmuster gezeigt, durch welche die ansonsten farblose Grundierung optisch erfassbar wird. Teilaspekt dieser Arbeit ist es, eine zuverlässige digitale Bildauswertung des mehrschichtigen Druckmusters sowie eine Kompensation von ausgefallenen Düsen zu entwickeln.

### 6.1. Visualisierung von Düsenausfällen bei Grundierung

Vor Anwendung der Untersuchung erfolgt eine Bestimmung, ob es sich bei dem Substrat um gestrichenes oder unbehandeltes Papier handelt, um das effektivere der beiden beschriebenen Verfahren aus Kapitel 3.4 zu nutzen. Auf der entsprechenden, farbigen Schicht wird für die Grundierung ein Linienmuster erzeugt, bei dem jede Düse ihre eigene Linie druckt, die gut von den anderen Linien unterscheidbar ist. Um diesen Abstand zur Unterscheidung zu gewährleisten, wird jede der 16 Düsenreihen des verwendeten 600 dpi-Druckkopfes von *Kyocera* auf zwei Linienreihen aufgeteilt. Das Linienmuster wird für die komplette Breite aller Druckköpfe erzeugt. Oberhalb des Linienmusters befindet sich im Testdruckmuster zusätzlich ein Bereich, der von allen Düsen flächig mit Grundierung bedruckt wird, um die Funktionsfähigkeit der Düsen zu fördern. Die entsprechenden Druckköpfe drucken das Druckmuster, in welchem sich die drei Schichten von Grundierung und zwei Tinten übereinander befinden. Anschließend wird im resultierenden Druckbild bewertet, welche Linien sichtbar sind. Für diesen Prozess wurde in dieser Arbeit ein automatisiertes Konzept entwickelt, bei dem die Resultate noch während des laufenden Druckvorgangs vorliegen. Somit wird die Untersuchung bestmöglich in die Abläufe und Umgebung der Rollendruckmaschine integriert.

---

## 6.2. Digitale Erfassung des Testdruckmusters

Das integrierte Kamerasystem zeichnet das Testdruckmuster auf und erzeugt ein entsprechendes Kamerabild. In den Abbildungen 6.1a und 6.1b sind jeweils ein kleiner Ausschnitt des Kamerabildes der Testdruckmuster für gestrichenes und unbehandeltes Substrat dargestellt. An den Stellen, an denen das gestrichene Substrat

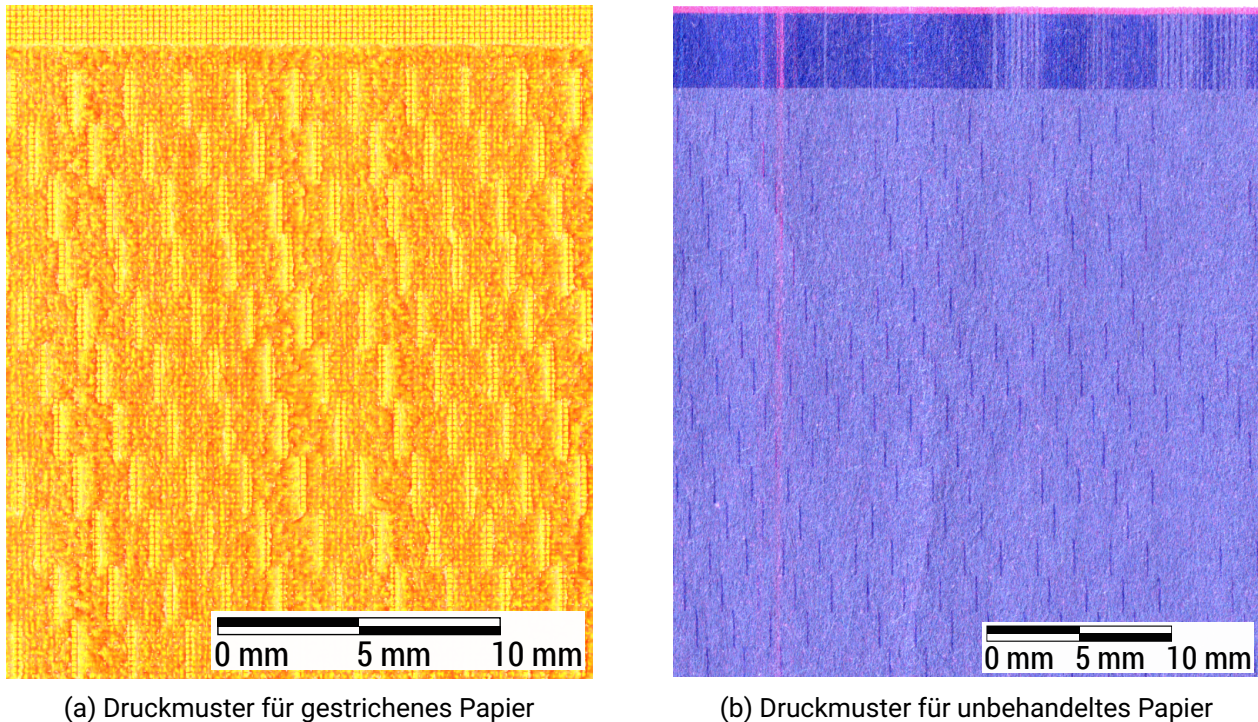


Abbildung 6.1.: Ausschnitt des Kamerabildes von den Druckmustern zur Erkennung von Grundierung. Die Druckmuster entsprechen dem in Kapitel 3.4 beschriebenen Prinzip für gestrichenes (a) und unbehandeltes (b) Substrat. Anhand dieser Kamerabilder lassen sich Düsenausfälle von Grundierung feststellen. Im linken Bild sind alle Linien vorhanden, während beim rechten Druckbild (b) etliche Düsenausfälle auftreten.

grundiert wurde, wie z. B. im oberen Bereich mit flächig aufgetragener Grundierung, lässt sich das feine Gitter in Magenta auf der gelben Schicht deutlich erkennen, während es auf den restlichen Flächen zu einem starken Ineinanderfließen der Tinten kommt. Somit lassen sich grundierete Bereiche visuell von Bereichen ohne Grundierung unterscheiden. Für einen menschlichen Betrachter ist in diesem Fall die Überprüfung fehlender Grundierung sehr aufwändig. Im Kamerabild des Testdruckmusters für unbehandeltes Substrat ist eine solche visuelle Begutachtung besser durchführbar. Im rechten Teil der Abbildung 6.1b sind zahlreiche Düsenausfälle anhand der fehlenden Linien zu erkennen. Dies ist aufgrund der Häufung sogar im oberen Bereich flächig aufgetragener Grundierung ersichtlich. Bei Vergleich des oberen Bereichs mit den nicht grundierten Flächen zeigt sich durch die Grundierung eine deutliche Erhöhung der Farbdichte.

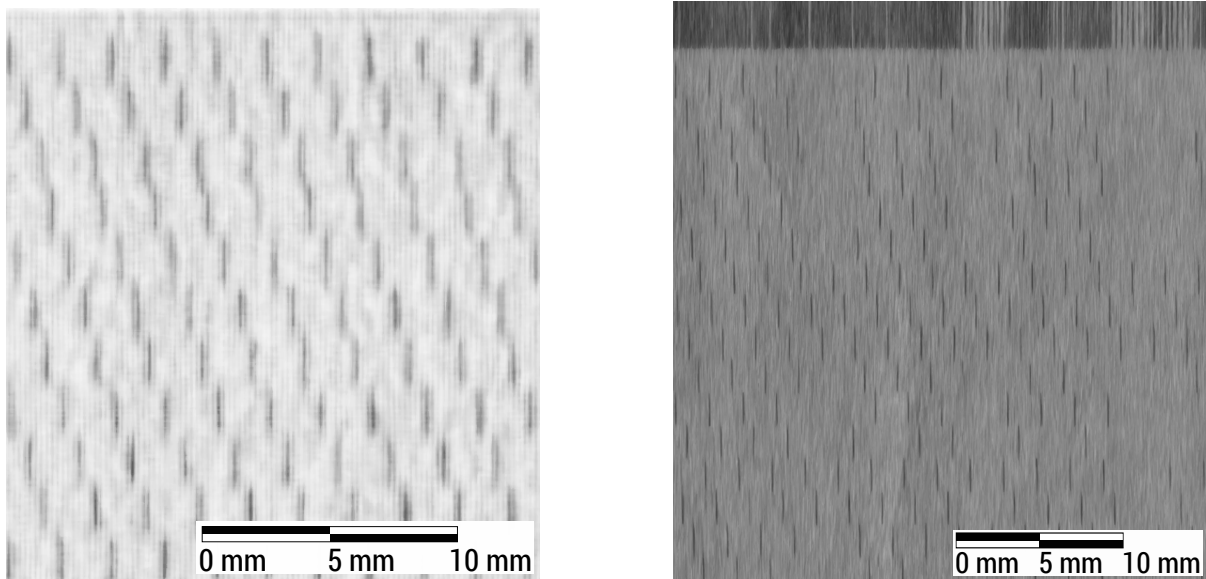
## 6.3. Bildauswertung des erfassten Testdruckmusters

Für die Auswertung wird zuerst der Kontrast optimiert, um die Liniensuche zu erleichtern. Dazu wird der grüne Farbkanal ausgewählt, da er den besten Kontrast zu Magenta liefert, welches in beiden Druckmusterar-

ten einen hohen Anteil besitzt. Im Fall der Untersuchung auf unbehandelten Papieren wird der Gammawert des verbleibenden Farbkanals erhöht. Beim Testdruckmuster für gestrichenes Substrat wird stattdessen das Kamerabild invertiert, damit die Linienstrukturen niedrigere Pixelwerte gegenüber der Umgebung aufweisen. Anschließend wird für beide Druckmusterarten ein asymmetrischer Medianfilters gemäß Gleichung 6.1 mit primärer Ausrichtung entlang der Druckrichtung angewandt, um lokales Rauschen zu reduzieren, ohne dabei die Linien im Kamerabild zu maskieren.

$$g'[m, n] = \text{median}\{g[i, j]\}, \{i \in v, j \in w\} \quad (6.1)$$

Nach Anwendung des Medianfilters ergibt sich der resultierende Pixelwert  $g'[m, n]$  des Pixels in der Kamerabildzeile  $m$  und der Kamerabildspalte  $n$  aus dem Median der umliegenden Pixelwerte  $g[i, j]$  des ursprünglichen Kamerabildes. Dabei befinden sich die Pixelkoordinaten  $i$  und  $j$  in der näheren Umgebung  $v$ , bzw.  $w$  des zentralen, zu berechnenden Pixels. Im vorliegenden Fall wurde für  $v$  ein Bereich von 20 px angewandt, da dies der Anzahl der bedruckten Rasterzellen entspricht und die Auflösungen von Raster und Kamerabild gleichermaßen bei 600 dpi liegen. Der horizontale Filterbereich unterscheidet sich zwischen den beiden Druckmusterarten aufgrund des Einflussbereichs der Grundierung. Für Kamerabilder von gestrichenem Substrat wurden für die Umgebung  $w$  8 px gewählt, während die schmalen Linien im Kamerabild von unbehandeltem Substrat nicht horizontal gefiltert werden:  $w = 1$  px. Jeweils ein Ausschnitt der beiden resultierenden, aufbereiteten Kamerabilder ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Anhand der aufbereiteten



(a) Aufbereitetes Kamerabild des orangenen Druckmusters (b) Aufbereitetes Kamerabild des violetten Druckmusters

Abbildung 6.2.: Darstellung der beiden Ausschnitte aus Abbildung 6.1 in aufbereiteter Form für die Bildauswertung. Die Differenz der Pixelwerte an Positionen mit und ohne Grundierung wurde durch Bildbearbeitung erhöht. Der in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus zur Liniensuche ist in der Lage, in diesen aufbereiteten Kamerabildern Düsenausfälle anhand von Fehlstellen innerhalb des Linienmusters für Grundierung zu finden.

Kamerabilder der Testdruckmuster detektiert die Bildauswertung den unteren Rand des oberen Bereichs flächig aufgetragener Grundierung und von dort aus in einem definierten Abstand die Linienreihen. Über die gesamte Breite der Druckköpfe werden mittels Maximasuche die Positionen sowie die Präsenz der Linien der Grundierung ermittelt. Durch Kenntnis von Druckbreite und Anordnung des Testdruckmusters liegt der

Bildauswertung die erwartete Anzahl an Linien vor und Fehlstellen lassen sich zu entsprechenden Düsen zuordnen.

## 6.4. Kompensation ausgefallener Düsen

Wenn eine Düse ausgefallen ist, wirkt sich dies negativ auf die Qualität des Druckerzeugnisses aus. Es entstehen die in Kapitel 2.1.4 beschriebenen Wechselwirkungen, nämlich ein Ineinanderfließen übereinander gedruckter Tinten und ein unkontrolliertes Einziehverhalten ins Substrat. Unter Kenntnis der ausgefallenen Düsen, lassen sich während dem laufenden Druckprozess Maßnahmen ergreifen, um dem Qualitätsverlust entgegenzuwirken, ohne dass eine Reinigung oder gar ein Austausch der Druckköpfe durchgeführt werden muss. Die Druckmaschinensteuerung ist durch die skalierbare Rasterarchitektur in der Lage, die ausgefallenen Düsen während des Druckvorgangs zu kompensieren. Die Grundierung wird für einen optimalen Effekt nicht in jeder Rasterzelle mit größtmöglichem Tropfen gedruckt. Dabei würde das Substrat zu viel Feuchtigkeit aufnehmen und die Kosten für die Verbrauchsstoffe unnötig hoch sein. Bei CPP wurde für verschiedenste Substrate bereits die optimale Menge und Verteilung an Grundierung ermittelt, um die geforderte Druckqualität zu erhalten. Die optimale Menge an Grundierung wird bereits erreicht, wenn etwa die Hälfte der verfügbaren Düsen angesteuert werden. Ergibt die Analyse, dass einzelne Düsen ausgefallen sind, werden deren Flüssigkeitsvolumen für kommende Druckbilder auf benachbarte Düsen verteilt, um weiterhin flächendeckend eine ausreichende Menge an Grundierung auf das Substrat aufzutragen. Dabei wird auf die verfügbaren Tropfengrößen des 600 dpi-Druckkopfes Rücksicht genommen. Für die drei verschiedenen Tropfenvolumen 5, 7 und 12 pl ist in Abbildung 6.3 eine solche Kompensation einer ausgefallenen Düse #2 durch die zwei benachbarten Düsen dargestellt. Die Abbildung 6.3a zeigt den Auftrag der Grundierung

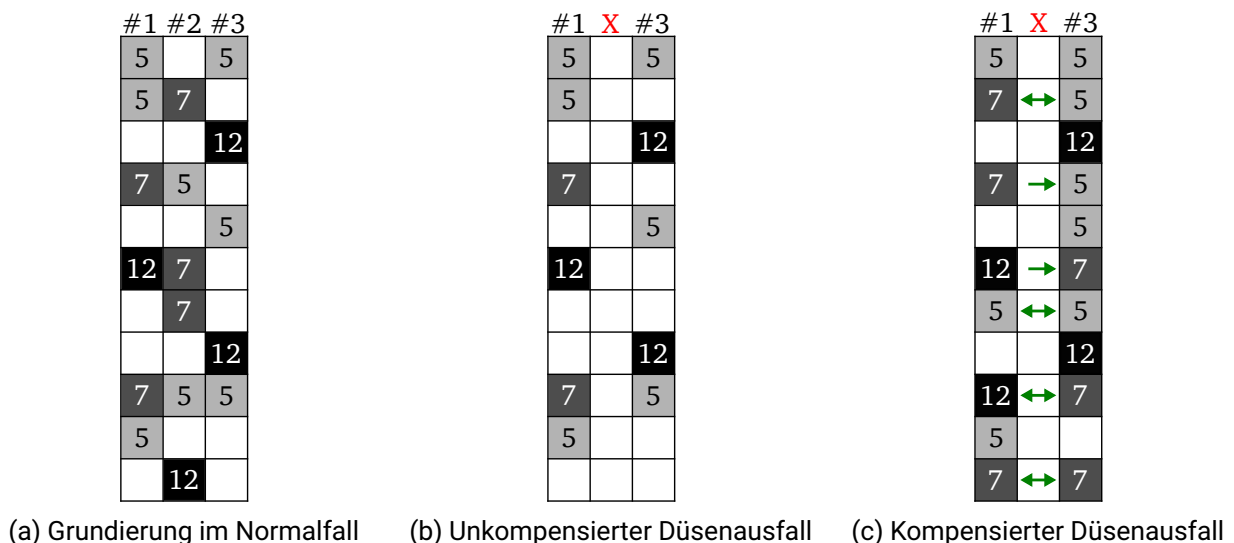


Abbildung 6.3.: Exemplarische Zuordnung im Raster für drei Düsen für Grundierung im Normalzustand (a), bei Düsenausfall (b) und bei Kompensation (c) der ausgefallenen Düse #2. Durch den detektierten Düsenausfall der Düse #2 werden die fehlenden Tropfenvolumen 5, 7 und 12 pl auf die Rasterzellen der benachbarten Düsen umverteilt.

im Raster, um einen flächendeckenden Effekt der Grundierung zu erreichen, dies ist der Normalfall. Die eingetragenen Zahlen geben dabei beispielhafte Volumen für die einzelnen Rasterzellen wieder. Die mittlere Abbildung 6.3b zeigt den Fehlerzustand, den es zu vermeiden gilt: Ein Düsenausfall sorgt für einen Streifen,

---

auf dem sich keine Grundierung befindet. In der rechten Abbildung 6.3c ist der Korrekturzustand dargestellt, bei dem die vorgesehenen Volumen der ausgefallenen Düse auf die benachbarten Düsen bestmöglich verteilt wurden. Die fehlenden 7 pl in der zweiten Zeile werden beispielsweise so aufgeteilt, dass die links befindliche Düse in der Rasterzelle derselben Zeile mit dem nächstgrößeren Volumen gedruckt wird und durch die rechts befindliche Düse ein neuer Tropfen positioniert wird. In der untersten Zeile wird der große 12 pl-Tropfen zu jeweils 7 pl auf beide benachbarten Rasterzellen aufgeteilt. Durch etwas größere Volumen der Tropfen aus Nachbardüsen wird tendenziell eher erreicht, die entstandene Fehlstelle im Druckbild zu schließen. Das Ergebnis der kompensierten Volumenverteilung erzeugt den im Normalfall geforderten, flächendeckenden Effekt.





---

## 7. Trendanalyse des Positionsversatzes

---

Wie in Abschnitt 2.2.4 erörtert, sind Düsen, deren Tropfen das Substrat unter einem ungewollten Positionsversatz von mehr als einfachem Düsenabstand treffen, noch problematischer als Düsenausfälle, da sie Tinte in der Umgebung auftragen, wo sie nicht vorgesehen ist. Deshalb ist mit Düsen, die eine versetzt positionierte Linie erzeugen, in gleichem Maße umzugehen, wie mit Düsenausfällen: Die problematische Düse wird für produktiv genutzte Druckdaten abgeschaltet und durch geeignete Maßnahmen kompensiert.

Aus ersten Beobachtungen zahlreicher Messungen der Linienpositionen zeigt sich, dass einigen Düsenausfällen ein wachsender, jedoch oft unstetiger und nicht monotoner Positionsversatz vorweg geht. Die betroffene Düse ist nicht mehr in der Lage, ihre Tröpfchen lotrecht auf das Papier aufzubringen, sondern druckt unter einem Winkel zur Düsenachse. Die resultierende Fehlpositionierung der gedruckten Linie nimmt über mehrere Messungen betrachtet zu, bis schließlich keine durchgängige Linie mehr zustande kommt, sondern nur noch eine lose, zufällig verstreute Anordnung an Einzelpunkten. Wird durch eine Messung eine versetzt positionierte Linie ermittelt, so wurde bereits auf etlichen Seiten in diesem fehlerhaften Zustand gedruckt, bevor Gegenmaßnahmen ergriffen werden können. Zusätzlich birgt die nicht stetig monotone Zunahme des Positionsversatzes die Gefahr, dass die Messung einer Linie Ergebnisse liefert, die um den Schwellwert für erhöhten Positionsversatz fluktuieren. Auf diese Weise wird beispielsweise bei einer Messung die Düse als akzeptabel ausgewertet, obwohl die Abweichung zum Schwellwert innerhalb der Messungenauigkeit liegt. Damit setzen für eine vermeintlich gute Düse die Korrekturmaßnahmen bis zur darauffolgenden Messung aus. Die folgenden Abschnitte beschreiben eine Lösung, wie mittels eines Regressionsmodells das Korrekturverhalten in der Druckmaschine stabilisiert wird und sich Maßnahmen gegen erhöhten Positionsversatz frühzeitig ergreifen lassen.

### 7.1. Dauer zwischen Auftreten und Kompensation von Positionsfehlern

Ebenfalls bereits beschrieben in Kapitel 2.3 ist die lange Verzögerung, bis auf Ausfälle reagiert werden kann. Zwischen dem Auftreten übermäßig versetzt positionierter Tinte und dessen Kompensation vergeht einige Zeit, die hier als kritische Dauer bezeichnet wird. Die kritische Dauer setzt sich aus den folgenden Schritten zusammen:

- Erstmaliges fehlerhaftes Drucken mit erhöhtem Positionsversatz
- Verzögerung, bis Testmuster gedruckt wird
- Transport des Testmusters zum Inspektionssystem
- Aufzeichnen des Testdruckmusters
- Auswerten des Testdruckmusters
- Übermitteln der Ergebnisse an die Bildaufbereitung
- Anwenden des Kompensationsalgorithmus
- Drucken des Seitenpuffers bis zur ersten kompensierten Seite
- Drucken der Seiten mit aktiver Kompensation

Abhängig von Druckgeschwindigkeit und Seitenlänge ergibt sich eine Strecke der Substratbahn, die mit der vorliegenden Qualitätseinbuße gedruckt wurde. Ausgehend vom Konzept ganzseitig gedruckter Testdruckmuster gemäß Kapitel 2.2, führt die Übertragung dieses Ansatzes auf die vorliegende Rollendruckmaschine

zu einer erzeugten Menge an Makulatur, wie sie in Tabelle 5.2 und Gleichung 5.1 dargestellt ist. In Kapitel 5 wurden die kurzen Linienmustern im Beschnitt als wirksame Maßnahme zur Reduktion des Papierabfalls vorgestellt. Als zweite Verbesserung gegenüber gegenwärtiger Kamerasystem wurde ein Einbau der Kamera nahe der Druckeinheit empfohlen. Im folgenden Abschnitt wird ein weiteres Verfahren erläutert, das es ermöglicht, die verbleibende Menge an Makulatur erneut zu reduzieren. Dazu wird das beobachtete Verhalten des wachsenden Positionsversatzes genauer untersucht.

## 7.2. Trendanalyse des Positionsversatzes von Linien

Es wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Regressionsmodell entwickelt und programmiert, um das Verhalten der Tropfenpositionierung zu verfolgen und anhand der letzten Messungen den zukünftigen Positionsversatz zu bestimmen. Damit lässt sich der zukünftige Verlauf über einige Messintervalle abschätzen. Dieser Ansatz zur Prognose zukünftigen Verhaltens ist unabhängig von den vorgestellten Ansätzen vorheriger Kapitel anwendbar. Bei ausreichend genauer Ermittlung des Positionsversatzes lässt sich die Trendanalyse auf die Testseiten aus Kapitel 2.2.4 anwenden sowie in Kombination mit kurzen Düsenausfallmustern im Beschnitt oder bei der vorgestellten Ausfallerkennung für Grundierung. Die Leistungsfähigkeit des Regressionsmodells ist am höchsten in Verbindung mit den kurzen Messintervallen der kurzen Linienmuster im Beschnitt aus Kapitel 5. Für das Regressionsmodell wird eine laufende Mittelung über einige Messungen hinweg durchgeführt, um Ausreißer auszugleichen und stabil gegen fluktuierende Messwerte zu sein. Die schematische Darstellung von Messwerten einer Düse, siehe Abbildung 7.1, liefert eine Veranschaulichung des Regressionsmodells. Im ersten Zeitintervall erfolgt keine Mittelung, da nicht die hinreichende, im Experiment zu

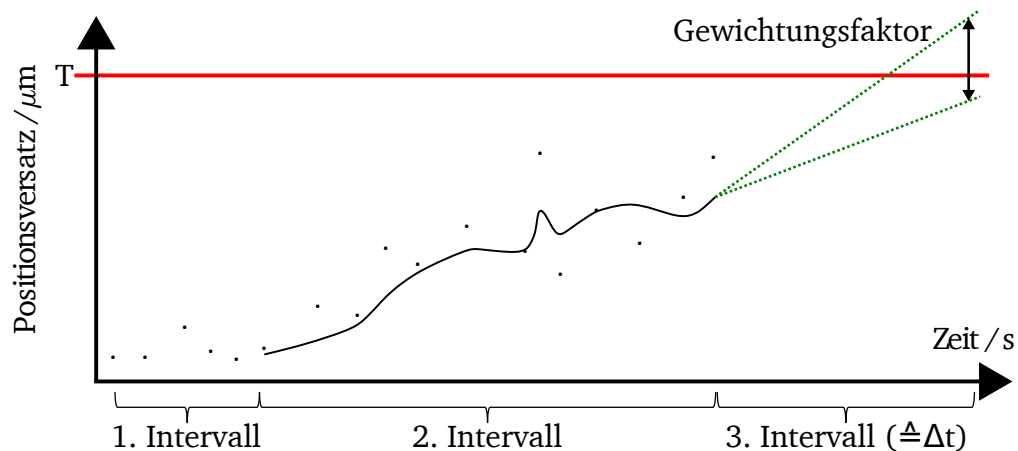


Abbildung 7.1.: Schematische Darstellung einer Folge von Messwerten des Positionsversatzes einer Düse als Punkte. Die durchgezogene Linie stellt die laufende Mittelung dar. Die grünen, gepunkteten Linien im 3. Intervall beschreiben den vom Regressionsmodell bestimmten zukünftigen Verlauf der Messwerte abhängig von dem Gewichtungsfaktor. So wird ermittelt, wann der Positionsversatz voraussichtlich den rot gekennzeichneten Schwellwert  $T$  überschreitet. Das 3. Intervall reicht von der aktuellen Messung bis zum vorhergesagten Überschreiten des Schwellwertes nach der Dauer  $\Delta t$ .

ermittelnde Menge an Messungen verfügbar ist. Danach wird der Positionsversatz per Regressionsmodell beobachtet und verfolgt. Nach einem zweiten Intervall liefert das Regressionsmodell die potentielle weitere Entwicklung der Messwerte abhängig von einem zu ermittelnden Gewichtungsfaktor. Die rote Linie markiert den Schwellwert  $T$  (Threshold) für erhöhten Positionsversatz und am Ende des dritten Intervalls wird

dieser Schwellwert dem Regressionsmodell nach überschritten. Die Vorhersage des Regressionsmodells ist die Dauer  $\Delta t$  des dritten Intervalls die Aufschluss darauf gibt, ab wann eine Kompensation notwendig ist und wie viel Makulatur sich damit vermeiden lässt. Durch ein simples Gütekriterium, bzw. eine Fallunterscheidung wird ermittelt, wann der Positionsversatz einer Düse den Schwellwert  $T$  einer versetzten Linie überschreitet. Die betroffene Düse ist infolgedessen zu deaktivieren und zu kompensieren. Durch Variation des Gewichtungsfaktors resultiert eine unterschiedliche Dauer  $\Delta t$  der Vorhersage und somit des dritten Intervalls bis zum Überschreiten des Schwellwertes. Dies wird in der Kalkulation berücksichtigt. Gemessene Düsen werden bei Erfüllung mindestens einer der beiden folgenden Bedingungen kompensiert. Im ersten Fall handelt es sich um eine versetzte Linie, wenn der gemittelte Positionsversatz  $p_{mittel}(k)$  größer als der Schwellwert  $T$  mit  $21 \mu\text{m}$  ist:

$$p_{mittel}(k) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} |p(k-i)| > T \quad (7.1)$$

Bei jeder Messung  $k$  wird der Positionsversatz  $p(k)$  der letzten  $n$  Messungen gemittelt. Die zweite Bedingung tritt ein, wenn das bei der Vorhersage ermittelte, dritte Zeitintervall  $\Delta t$  geringer ist als die kritische Dauer  $\Delta t_{kritisch}$ , die technisch nötig ist, bis eine Kompensationshandlung einsetzt. Die kritische Dauer lässt sich aus der bereits errechneten Gesamtmakulatur  $M_{Ges}$ , vgl. Tabelle 5.2, geteilt durch die Druckgeschwindigkeit bestimmen. Im vorliegenden Fall bei  $80 \frac{\text{m}}{\text{min}}$  und einer Makulatur von  $23,26 \text{ m}$  ergibt sich eine kritische Dauer  $\Delta t_{kritisch} = 17,45 \text{ s}$ . Vorhergesagte Überschreitungen des Schwellwertes, deren Auftreten weniger als diese kritische Dauer in der Zukunft liegen, lassen sich nicht vollständig vermeiden. Zu jeder erfolgten Messung  $k$  wurde der Positionsversatz  $p(k)$  und der Zeitpunkt der Aufzeichnung  $t(k)$  gemessen. Der gemittelte Positionsversatz in Gleichung 7.1 wird mit jedem neuen Kamerabild erneut anhand der letzten  $n$  durchgeführten Messungen errechnet. Das Zeitintervall ergibt sich gemäß

$$\Delta t = \frac{T - p_{mittel}(k)}{m} < \Delta t_{kritisch} \quad (7.2)$$

Für die gemittelte Geradensteigung  $m$  gilt:

$$m = \frac{p_{mittel}(k) - p_{mittel}(k-v)}{t(k) - t(k-v)} \cdot (1-G) + \frac{p_{mittel}(k) - p_{mittel}(k-2 \cdot v)}{t(k) - t(k-2 \cdot v)} \cdot G \quad (7.3)$$

Die Variable  $v$  beschreibt die Schrittweite zur Bildung der gemittelten Geradensteigung. Eine Schrittweite von  $v = 1$  bedeutet folglich, dass die Steigung zwischen aktuellem und vorherigem gemitteltem Positionsversatz ins Verhältnis gesetzt wird mit Steigung aus aktuellem und vorvorletztem Positionsversatz. Mit der Erhöhung der Schrittweite werden zunehmend ältere Messungen in die Berechnung der Geradensteigung  $m$  einbezogen. Der Gewichtungsfaktor  $G$  beschreibt die Dynamik des Regressionsmodells, indem er festlegt, in welchem Verhältnis jüngere Messungen gegenüber älteren Messungen für die Berechnung der Steigungen berücksichtigt werden sollen. Mit  $G = 0.8$  herrscht beispielsweise ein träges Systemverhalten, das sich besonders bei einem großen Abstand zwischen Druckköpfen und Kamerasystem empfiehlt, da ältere Werte stärker gewichtet werden. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Regressionsmodell aus Gleichung 7.2 und 7.3 basiert somit auf einer Kombination zweier mit  $G$  gegenläufig gewichteter, linearer Extrapolationen. Das eben beschriebene prinzipielle Vorgehen wurde im Patent von Schneider und Stöckle (2021b) festgehalten.

Die Wahl der Parametrierung des Regressionsmodells resultiert in einer Vorhersagequalität, die widerspiegelt, wie zuverlässig der errechnete Positionsversatz sein wird. Im folgenden Experiment wird das Regressionsmodell parametrisiert und die am besten geeigneten Werte für den Gewichtungsfaktor, Mittelungsweite und Schrittweite ermittelt. Dies ist ausschlaggebend dafür, in welchem Maße die zuvor beschriebene kritische Dauer von der Vorhersage des Regressionsmodells überbrückt wird.

### 7.3. Stabilisierung des Kompensationsverhaltens

Das dritte und letzte Experiment dieser Arbeit ist eine Machbarkeitsstudie zur Stabilisierung des Umgangs mit Messergebnissen des Positionsversatzes von gedruckten Linien und der Vorhersage des zukünftigen Verlaufs durch ein Regressionsmodell. Als erster Schritt der Verarbeitung der Messwerte erfolgt eine Bereinigung der Messungen. Dabei werden unplausible und fehlgeschlagene Auswertungen aussortiert. Nach dieser Reduzierung bleiben 22110 Auswertungen a 5312 Düsen, also fast 120 Millionen Messwerte für das Regressionsmodell erhalten. Der Verlauf der Messwerte wird für jede Düse unabhängig durch eine laufende Mittelung geglättet. Während die meisten Düsen im Bereich von  $\pm 10 \mu\text{m}$  um den Nullpunkt fluktuieren, zeigen einzelne Düsen stark abweichendes Verhalten. Für die Düse an der Position 3208 im beobachteten Druckkopf der ersten Druckeinheit ist dies beispielsweise der Fall. In der Abbildung 7.2 sind die Verläufe der Rohwerte und der gemittelten Werte über die durchgeführten, gültigen Messungen aufgetragen. Die eingetragene rote Linie zeigt den geglätteten Verlauf für eine Mittelungsweite von 15 Messungen.

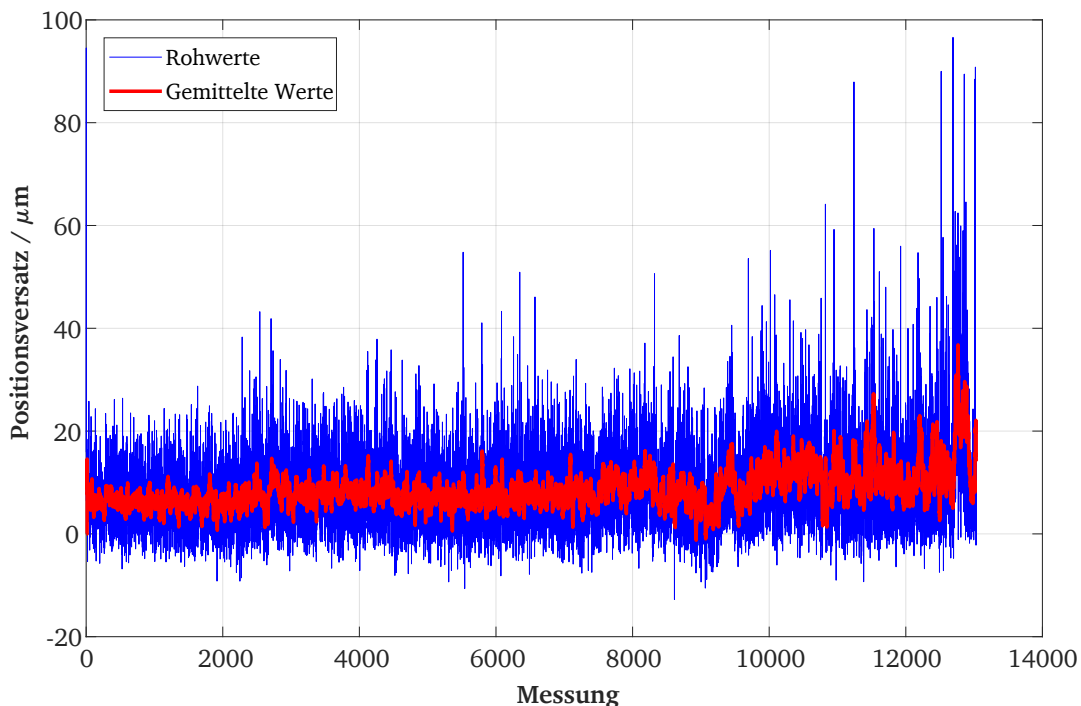


Abbildung 7.2.: Verlauf der originalen Messwerte (blau) des Positionsversatz der Düse 3208 im beobachteten Kopf in der ersten Druckeinheit gegenübergestellt mit den Werten nach der laufenden Mittelung (rot) mit einer Mittelungsweite von 15 Messungen, aufgetragen über alle durchgeführten Messungen.

Gegen Ende des Beobachtungszeitraums, also etwa ab der Messung 12800 tritt ein deutlich erhöhter Positionsversatz auf, der den Schwellwert von  $21 \mu\text{m}$  für zahlreiche Messungen übersteigt. Trotzdem verhält sich der geglättete Verlauf in Abbildung 7.2 sprunghaft um den Schwellwert. Die eingetragene rote Linie, bei der über  $n = 15$  Messungen gemittelt wurde, beschreibt stabileres Verhalten hinsichtlich des Schwellwertes als die Rohwerte. Werden die Messwerte mit und ohne laufende Mittelung verglichen, so zeigt sich eine deutliche Verbesserung für das Kompensationsverhalten bei gemittelten Werten. Dies wird anhand aller Messwerte aus den beiden Druckeinheiten in den Alluvial-Diagrammen in Abbildung 7.3 verdeutlicht. Es sind vier der zahlreichen durchgerechneten Mittelungsweiten abgebildet: 3, 8, 15 und 50. Die Besonderheit der Alluvial-Diagramme ist, dass sie nicht nur den Zustand, also die Anzahl von

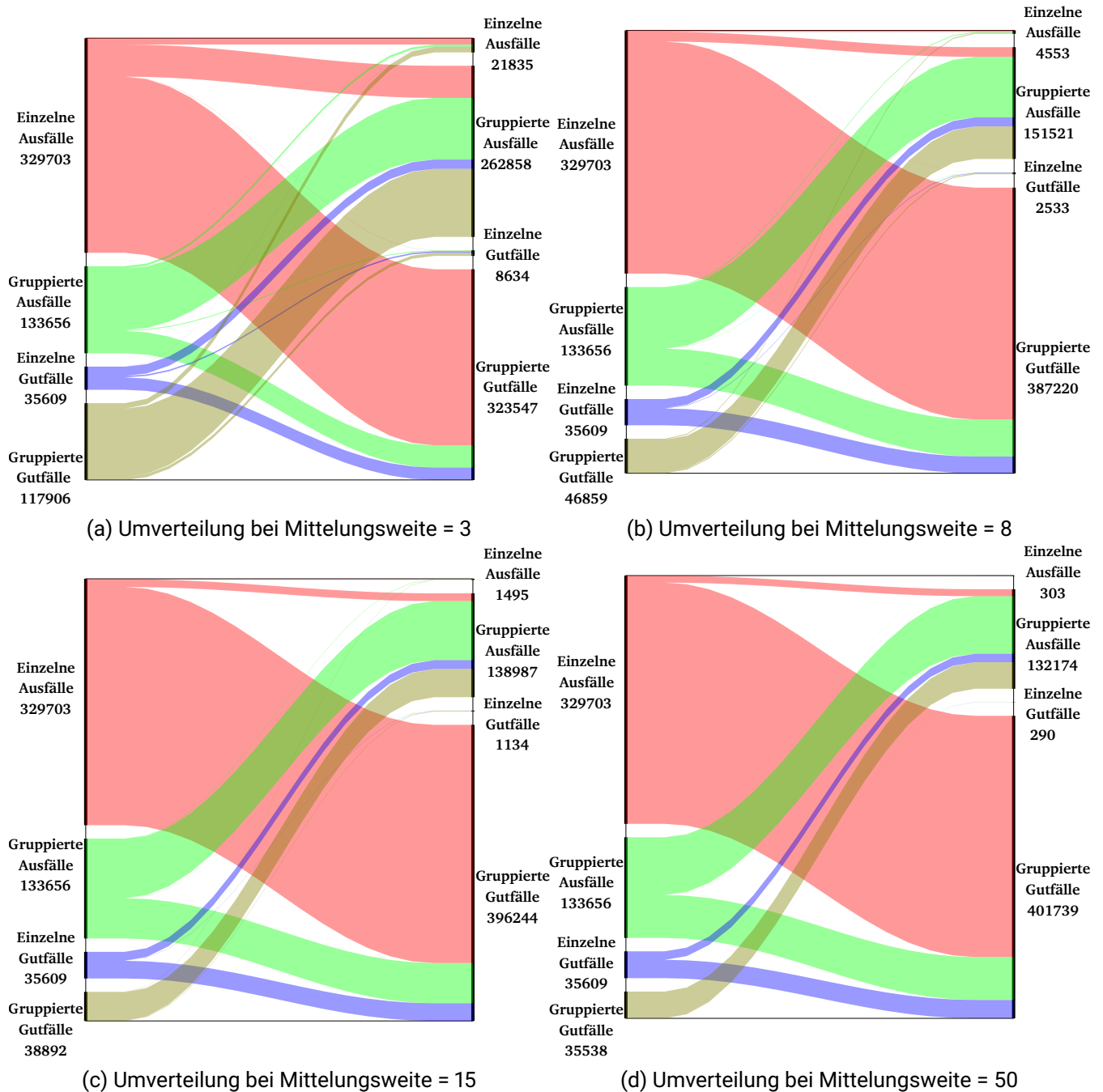


Abbildung 7.3.: Die Alluvial-Diagramme zeigen die Umverteilung von verschiedenen Ausgangszuständen in mehrere Endzustände an. In diesem Fall werden einzelne sowie gruppierte Düsenausfallmeldungen und Gutfallmeldungen dargestellt. Der Zustandswechsel erfolgt durch Anwendung der laufenden Mittelung. Das Ziel, den Gruppierungsgrad in Ausfällen und Gutfällen zu erhöhen, wird durch die Mittelung erfolgreich erreicht. Die knapp 117 Millionen unverändert gruppierten Gutfälle sind hier ausgeblendet.

---

Aus- und Gutfällen vor und nach der Mittelung anzeigen, sondern auch einen Eindruck geben, welche Mengenanteile durch die Mittelung aus dem ursprünglichen Zustand links jeweils in die vier Zustände auf der rechten Seite wechseln. Bezüglich der Diagramme ist anzumerken, dass aus Gründen der Übersichtlichkeit etwa 117 Mio. Messungen ausgeblendet wurden, die sowohl mit als auch ohne Mittelung in gruppierten Gutfällen eingeordnet sind. Als Gutfälle werden Messungen bezeichnet, die den Schwellwert für den Positionsversatz von 21  $\mu\text{m}$  nicht überschreiten, wohingegen Ausfälle einen Positionsversatz oberhalb von 21  $\mu\text{m}$  aufweisen. Die Ausgangssituation auf der linken Seite der Abbildungen 7.3 ist für alle vier Diagramme gleich, lediglich der dargestellte Anteil der gruppierten Gutfälle sinkt mit zunehmender Mittelungsweite, da weniger Messungen in dieser Kategorie eine Umwandlung in eine der anderen drei Kategorien erfahren. Von den ursprünglichen 329703 einzelnen Ausfällen bleibt nur ein Bruchteil erhalten, da bereits bei einer Mittelungsweite  $n = 3$  insgesamt 96,97% entsprechend dem Ziel des Vorgehens in Gruppierungen landen. Trotz der neu hinzugekommenen einzelnen Ausfälle reduziert sich deren Gesamtmenge auf nur 6,62%. Im Fall von acht gemittelten Werten verbleiben nur 1,38% der ursprünglichen einzelnen Ausfälle und bei noch längeren Mittelungen sind es unter 1%. Einzelne Gutfälle zeigen ähnliches Verhalten, was sehr gut ist, da das kurzzeitige Abschalten der Kompensation einer plötzlich guten Düse aufgrund der trägen Regelschleife viel zu spät einsetzen würde und damit zu zusätzlicher Makulatur führt. Von den ursprünglichen 35609 einzelnen Gutfällen werden 93,13% zu gruppierten Gutfällen. 6,38% bleiben als einzelne Gutfälle erhalten, was neutral gewertet wird. Allerdings zeigt sich, dass 0,49% aus anderen Zuständen zu einzelnen Ausfällen werden, was als negative Folge gewertet wird, sich aber aufgrund der geringen Menge gegenüber den anderen Zustandsänderungen relativiert. Unter diesem Aspekt, die einzeln auftretenden Messungen zu vermeiden, zeigen die Abbildungen 7.3c und 7.3d vielversprechendere Erfolge. Es verbleiben – kaum im Diagramm sichtbar – nur noch einige hundert einzelne, ungruppierte Messungen übrig. Jedoch haben sich durch die Mittelungsweite von 15, bzw. 50 Messungen, auch die gruppierten Ausfälle etwa halbiert. Bereits bei  $n = 8$  reduzieren sie sich um 42,36%, danach schwächt die Reduktion ab. Dies liegt daran, dass viele der gruppierten Ausfälle in sehr kleinen Gruppen von zwei oder drei Messungen vorliegen, die ähnlich wie einzelne Ausfälle herausgefiltert wurden. Eine Mittelungsweite von mehr als 15 Messungen ist damit aus diesem Gesichtspunkt nicht erforderlich, da nur eine geringe Zunahme der Kompensationsstabilität erwirkt wird, wohingegen zahlreiche Messungen für den Beginn der Mittelung nötig wären. Bereits bei geringer Mittelungsweite hilft die laufende Mittelung, die vereinzelt Ausfälle und Gutfälle massiv zu verringern. Schon bei einer Mittelung über drei Messungen sinkt die Anzahl der einzeln auftretenden Messungen um 93,3%. Dadurch wird das Kompensationsverhalten um das 4,4-fache stabiler. Das heißt, die Häufigkeit, wie oft Düsen zwischen Kompensation und normaler Nutzung umgeschaltet werden, beträgt nur noch 22,8% der Umschaltungen, die ohne laufende Mittelung nötig sind. Bei der Mittelungsweite  $n = 3$  ändert sich der Zustand der Düsen insgesamt 167019-mal, was durchschnittlich etwa 16 Zustandsänderungen pro Düse entspricht. Bei  $n = 8$  gemittelten Messungen reduziert sich die Anzahl der Zustandsänderungen weiter auf 28767 (etwa 3 pro Düse), was gegenüber den ursprünglichen Messungen die Stabilität des Kompensationsverhalten um den Faktor 25 erhöht.

## 7.4. Vorhersagegenauigkeit der Trendanalyse

Ausgehend von den fortlaufend gemittelten Messwerten wurde das Regressionsmodell entwickelt, um stark versetzte Tropfenpositionierung frühzeitig zu erkennen. Für die Vorhersage werden die Berechnungsformeln 7.3 und 7.2 aus Kapitel 7.2 angewandt. Mit jeder erneuten Messung erfolgt für jede Düse eine neue Vorhersage, wann es zum Ausfall kommen wird. Die Vorhersagen lassen sich wie in Abbildung 7.4 gezeigt gruppieren. Abhängig von der Mittelungsweite  $n$  und der Schrittweite  $v$  gibt es zu Beginn des Beobachtungszeitraums zahlreiche unberücksichtigte Messungen, diese liegen im 1. Intervall des ursprünglichen Schemas in Abbildung 7.1. Bei Düsenausfällen kommt es zu keiner Vorhersage, da kein Positionsversatz ermittelt

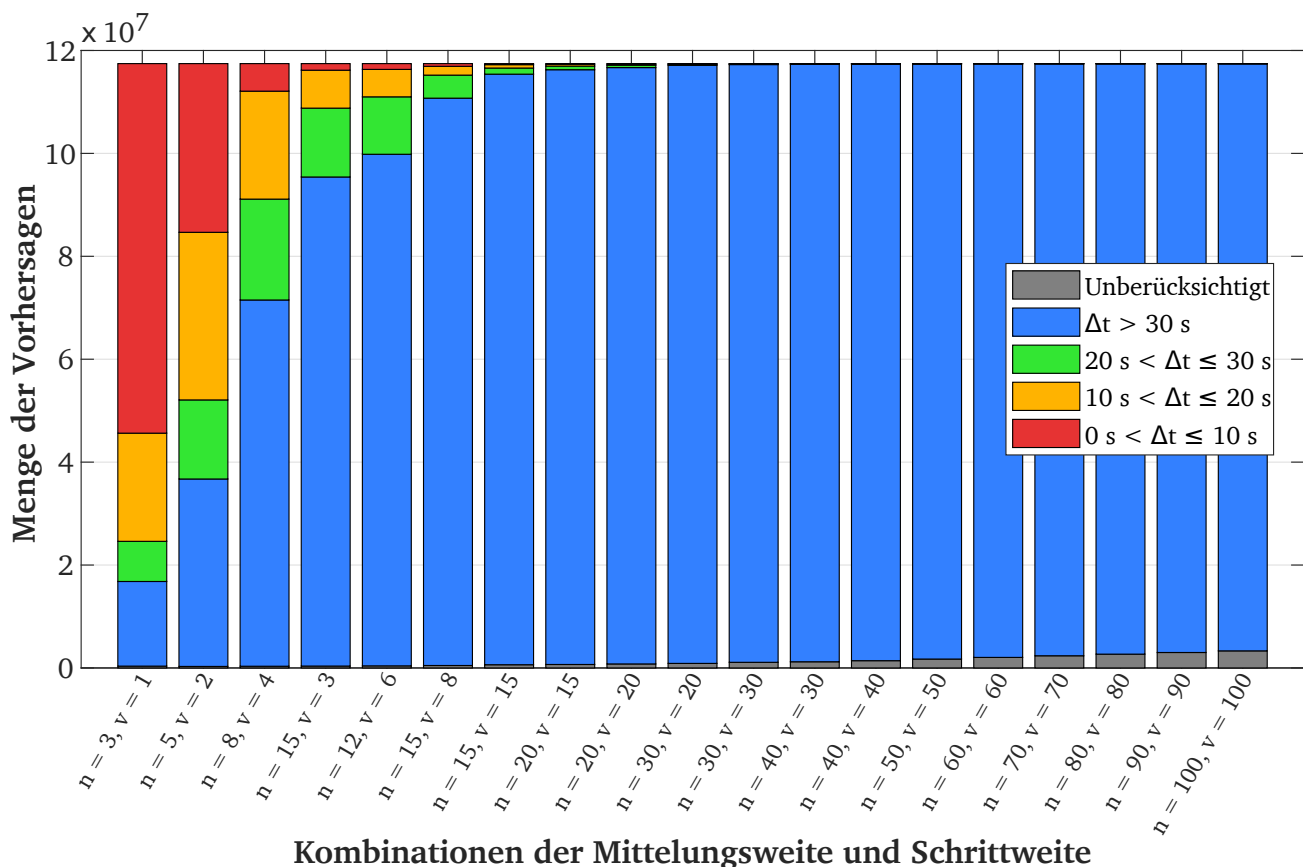


Abbildung 7.4.: Das Balkendiagramm zeigt, wie viele Vorhersagen in den jeweiligen zeitlichen Gruppen auftraten. Jeder Balken steht für einen anderen Parametersatz an Mittelungsweite  $n$  und Schrittweite  $v$ , aber gleichem Gewichtungsfaktor  $G = 0.5$ . Düsenausfälle, versetzte Linien und Messungen, bei denen nicht genug Werte für die Mittelung bereitstanden, sind als *Unberücksichtigt* zusammengefasst.

werden kann. Wird ein negatives Zeitintervall errechnet, dann handelt es sich bereits um eine versetzt positionierte Linie und die Vorhersage bringt keinen Mehrwert. Diese drei nicht nutzbaren Einstufungen sind in Abbildung 7.4 unter der Kategorie *Unberücksichtigt* zusammengefasst. Die weiteren Vorhersagen sind kumuliert in Gruppen von je zehn Sekunden. Intervalle mit über 30 s sind wiederum zusammengefasst. Sie befinden sich außerhalb des relevanten Zeitraums – der kritischen Dauer –, da bis zum vorhergesagten Ausfall noch weitere Messungen erfolgen. Von links nach rechts in Abbildung 7.4 nehmen die Mittelungsweite  $n$  und die Schrittweite  $v$  kontinuierlich zu. Mit steigender Mittelungsweite nimmt der Anteil unberücksichtigter Werte ebenfalls zu, da mehr Messungen bis zum Beginn der Mittelung nötig sind. Für den Fall von  $n = 30$  und  $v = 30$  sind bereits 1,1 Mio. Messungen unberücksichtigt und es gibt 25916 Vorhersagen für die nächsten 10 s, 57274 Vorhersagen zwischen 10 und 20 s und 103375 Vorhersagen zwischen 20 und 30 s. Ab  $n = 50$  und  $v = 50$  lässt sich in Abbildung 7.4 nicht mehr erkennen, wie groß die Anteile an Vorhersagen sind, deswegen wurden alle Vorhersagen unterhalb von 30 s nochmals in Abbildung 7.5 detaillierter dargestellt. Darin zeigt sich, dass die Anteile in den drei Zeitintervallen annähernd gleich groß sind. Im letzten betrachteten Szenario mit  $n = 100$  und  $v = 100$  sind bereits 3,3 Mio. Positionsversätze unberücksichtigt und es gibt nur noch 3192 Vorhersagen für die nächsten 10 s, 3650 Vorhersagen für das Zeitintervall zwischen 10 und 20 s und 4090 Vorhersagen zwischen 20 und 30 s.

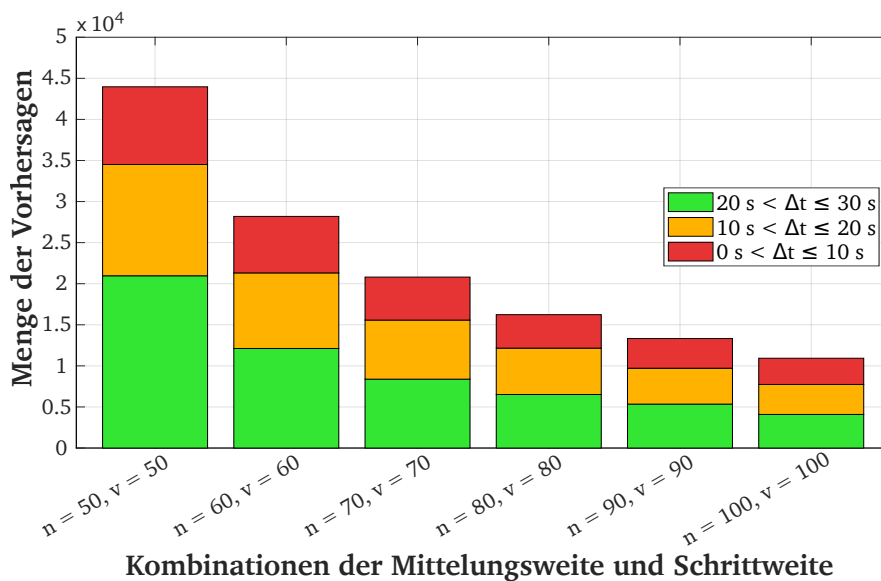


Abbildung 7.5.: In diesem detaillierteren Balkendiagramm sind nur noch die relevanten Vorhersagen mit einer Dauer  $\Delta t$  unterhalb von 30 s dargestellt. Des Weiteren wurde auf die langen Mittelungs- und Schrittweiten ab 50 Messungen reduziert. Alle Balken repräsentieren die Vorhersagen bei dem Gewichtungsfaktor  $G = 0,5$ .

Für den Betrachtungszeitraum bis zu 30 s zeigt der Box-Whisker-Plot in Abbildung 7.6 die relative Vorhersagegenauigkeit. Dies bedeutet, dass alle Vorhersagen untersucht wurde, welche eine Überschreitung des Schwellwertes innerhalb der kommenden 30 s ab der aktuellen Messung vorhersagen. Die dargestellte, relative Vorhersagegenauigkeit beschreibt, welcher Anteil dieser Vorhersagen tatsächlich in geringer zeitlicher Distanz zu einem aufgetretenen Ausfall bestimmt wurde. Die Abbildung 7.6 zeigt dieselben Parameterkombinationen, die bereits im Balkendiagramm in Abbildung 7.4 aufgetragen wurden. Die Spannweiten ergeben sich durch Variation des Gewichtungsfaktors  $G$ . Im linken Bereich zeigt sich, dass bei kurzer Mittelungsweite viele falsche Vorhersagen resultieren. Im rechten Bereich ist erkennbar, dass die Vorhersagegenauigkeit eine Sättigung erfährt. Ab der Mittelungs- und Schrittweite von 50 liegt die Quote bei 80% und die Zunahme der Vorhersagegenauigkeit schwächt ab. Bei Schrittweite  $v = 70$  wird noch eine Vorhersagegenauigkeit von 90% erreicht, was bei Schrittweite  $v = 60$  nur mit optimalem Gewichtungsfaktor leicht überschritten wird. Für das Regressionsmodell und die Trendanalyse sind deutlich mehr Messungen erforderlich, um zuverlässige Voraussagen über den Verlauf zu treffen, als zur Stabilisierung des Kompensationsverhaltens. Erst bei Mittelungs- und Schrittweite von jeweils 70 Messungen sind über 90% der Vorhersagen korrekt und die Vorhersagegenauigkeit erreicht den Bereich der Sättigung. Trotz wesentlich längerer Mittelungsweiten steigen die relativen Vorhersagegenauigkeiten bei Schrittweiten von 80, 90 und 100 Messungen nur noch gering. Um die Vorhersagen zu bewerten, sind in den Abbildungen 7.7a bis 7.7d vier Histogramme dargestellt, welche die Vorhersagegenauigkeit für vier Kombinationen aus Mittelungs- und Schrittweite gegenüberstellen. Anhand der tatsächlichen Messungen lässt sich zu jeder Vorhersage rückwirkend nachvollziehen, wie viel früher oder später für diese Düse der Positionsversatz den Schwellwert überschritten hat. Auf diese Weise wurde im Rahmen dieser Arbeit die Verifikation der Trendanalyse durchgeführt. Die Differenz des vorhergesagten Zeitpunktes und des tatsächlichen Ausfalls wurde in den Histogrammen in 1-Sekunde-Schritten zusammengefasst. Im Zentrum der Histogramme befinden sich die Vorhersagen, die exakt eintrafen, also z. B. das Überschreiten des Schwellwertes nach 23 s, wobei die entsprechende Düse tatsächlich nach 23 s einen größeren Positionsversatz als 21  $\mu\text{m}$  hatte. Zu



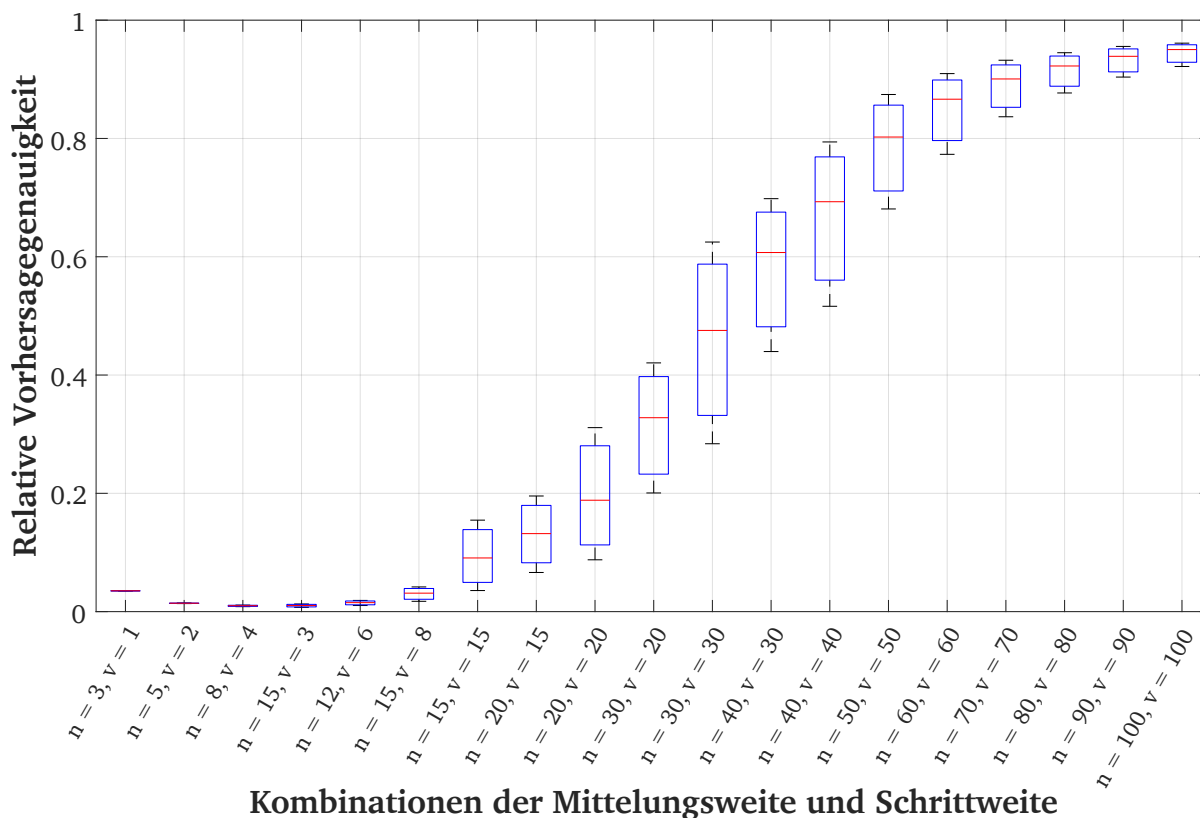
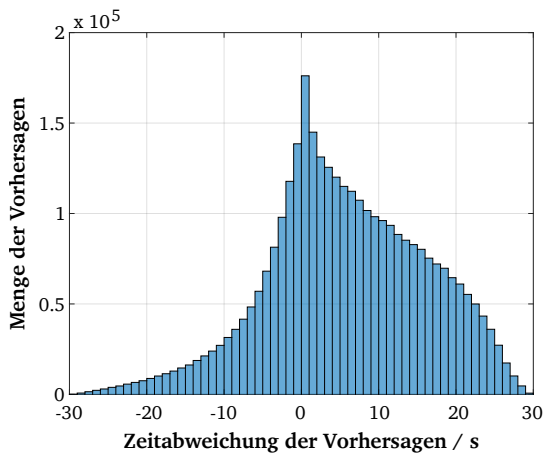
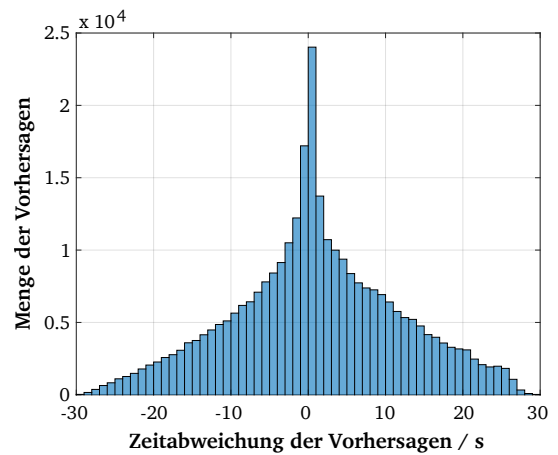


Abbildung 7.6.: Der Box-Whisker-Plot stellt die relative Vorhersagegenauigkeit bei Wahl der verschiedenen Parameter dar. Die Messfenster werden über Variation des Gewichtungsfaktors  $G$  zwischen 0 und 1 erreicht. Erst bei Mittelungswerte von  $n = 70$  und Schrittweite von  $v = 70$  treffen über 90% der Vorhersagen zu.

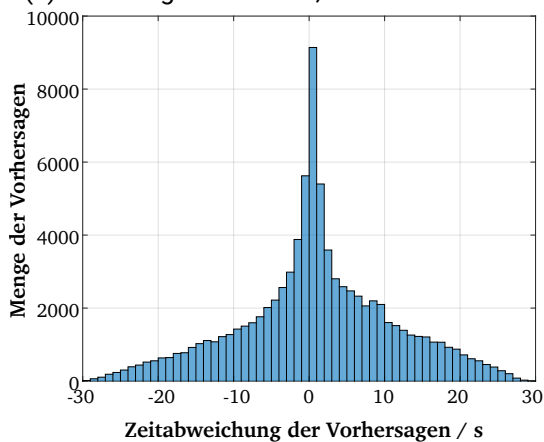
beachten sind dabei die verwendeten Ordinatenkalierungen, die sich bei diesen vier Histogrammen deutlich unterscheiden. Während bei den Abbildungen 7.7a und 7.7b fast 180000 und 25000 Vorhersagen genau waren, sind es in Abbildung 7.7d nur noch 670. Die starke Abnahme an Vorhersagen kommt maßgeblich durch die längere Mittelung zustande, denn dabei sind die Vorhersagen weniger stark dem Rauschen der Messungen ausgesetzt und sagen häufiger Ausfälle jenseits der 30 s voraus. Mit kurzer Mittelung kommt es bei den Vorhersagen, wie bereits in Abbildung 7.4 visualisiert, zu Millionen an zeitnah vorhergesagten Ausfällen, die nie wirklich eintreten. Zur Veranschaulichung der betrachteten kritischen Dauer für die Kompensation sind in den Abbildungen 7.7e und 7.7f noch Histogramme mit denselben Parametern wie in Abbildung 7.7d dargestellt, jedoch nur für Vorhersagen, die bis zu 20 s und bis zu 10 s in der Zukunft liegen. Diese Intervalle entsprechen dem orangenen und roten Segment des zuvor gezeigten Balkendiagramms aus Abbildung 7.5. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass der Verzicht auf das Langzeitintervall zwischen 20 s und 30 s hauptsächlich die ungenauen Vorhersagen reduziert, vgl. Abbildung 7.7e. Die genauen Vorhersagen im Zentrum des Histogramms lassen sich zeitnahen Ausfällen zuordnen. Ziel der Trendanalyse ist es, die nach der Mittelung etwa 135000 verbleibenden gruppierten Ausfälle aus Abbildung 7.3 frühzeitig vorherzusagen. In Abbildung 7.7d wird deutlich, dass trotz der hohen Vorhersagegenauigkeit aus Abbildung 7.6 die zeitliche Abweichung der Vorhersagen oft sehr hoch ist. Bei Gegenüberstellung der drei Abbildungen 7.7d, 7.7e und 7.7f ergeben sich die Anteile der Vorhersageintervalle an der Gesamtdarstellung. Werden nur die nächsten zehn Sekunden betrachtet, so befinden sich 86,6% der Vorhersagen innerhalb einer Spannweite von  $\pm 10$  s.



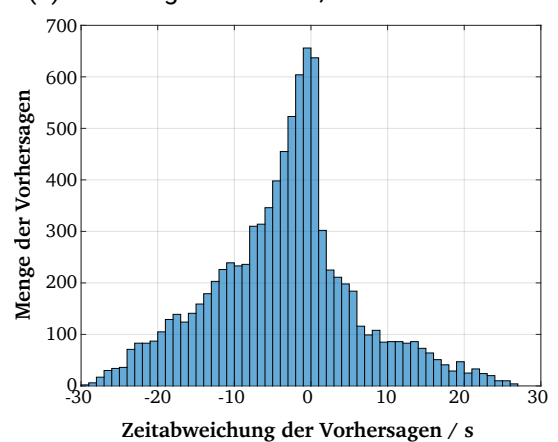
(a) Mittelungsweite  $n = 3$ , Schrittweite  $v = 1$



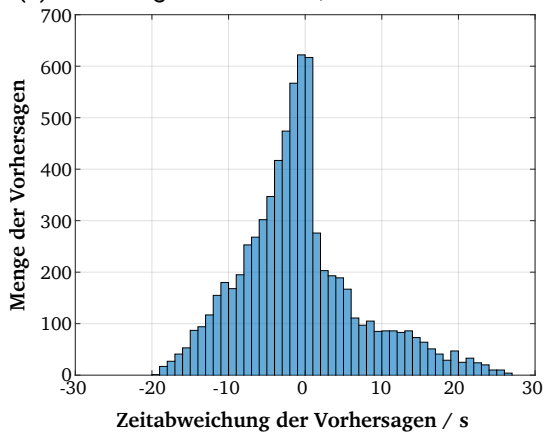
(b) Mittelungsweite  $n = 8$ , Schrittweite  $v = 4$



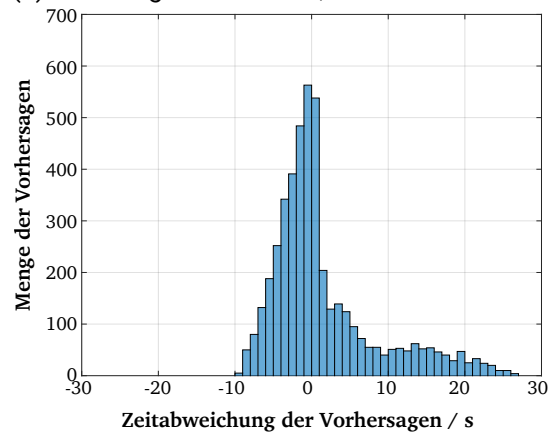
(c) Mittelungsweite  $n = 15$ , Schrittweite  $v = 3$



(d) Mittelungsweite  $n = 50$ , Schrittweite  $v = 50$



(e) Wie Abbildung 7.7d, maximale Vorhersage = 20 s



(f) Wie Abbildung 7.7d, maximale Vorhersage = 10 s

Abbildung 7.7.: Die Histogramme zeigen, um welche zeitliche Differenz die Vorsagen vom tatsächlichen Auftreten von Ausfällen entfernt sind. Jedes Diagramm beschreibt einen anderen Parametersatz für Mittelungsweite  $n$  und Schrittweite  $v$ . Als Gewichtungsfaktor wurde jeweils  $G = 0.5$  gewählt. Die Histogramme sind in Intervalle zu je 1 Sekunde unterteilt. Im Zentrum nehmen die genauesten Vorhersagen den größten Anteil der erfolgten Vorhersagen ein. Gegenüber Abbildung 7.7d wurden die gleichen Parameter genutzt, aber auf Vorhersagen reduziert, die maximal 20 s (e), bzw. 10 s (f) in der Zukunft liegen.

---

Dies entspricht 63,1% der 6240 Vorhersagen in derselben Spannweite bei Darstellung 7.7d. Bei Betrachtung von 20 s kommen für diese Spannweite von  $\pm 10$  s weitere 1718 Vorhersagen, also 27,5% hinzu. Daraus folgt, dass von den Vorhersagen zwischen 20 s und 30 s gerade mal 9,4% den Zeitpunkt des Ausfalls mit einer Genauigkeit besser als 10 s vorhersagen.

## 7.5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich aus der Trendanalyse des Positionsversatzes unter sorgfältiger Betrachtung der Limitierungen ein deutlicher Nutzen erzielen. Wie in Abbildung 7.1 gezeigt, besteht die Trendanalyse aus drei Intervallen: Der Vorbereitung mit ungenügend Messungen zur Mittelung, dem Mittelungsintervall und dem Vorhersageintervall. Die zusätzlichen unberücksichtigten Messungen, die durch längere Mittelungen resultieren, sind vernachlässigbar, sobald über mehrere Minuten gedruckt wird. Der Bonus an Stabilität der Kompensation und Genauigkeit der Vorhersagen, welcher der Einlaufverzögerung gegenübersteht, ist signifikant. Zumal bei der untersuchten Methodik von einfarbigen kurzen Testdruckmustern gemäß Kapitel 5 für den Fall von 304,8 mm langen Seiten bereits nach 64 s die 70 Messungen je Tinte durchgeführt wurden. Sowohl Mittelungsweite als auch Schrittweite sollten zwischen 50 und 70 gewählt werden, da bei geringeren Weiten das Rauschen zu stark und die Vorhersage gemäß Abbildung 7.6 zu ungenau ist. Des Weiteren darf unter den hier betrachteten Umständen die kritische Dauer nicht größer als 20 s sein, da über diesen Zeitraum hinweg der Trend nicht hinreichend genau bestimmbar ist. Die gesamte Berechnungsdauer der Vorhersage beschränkt sich dank effizientem, linearem Ansatz gemäß der Gleichungen 7.1 und 7.2 auf lediglich 2,7 ms pro Druckkopf. Für die 132000 gruppierten Ausfälle aus Abbildung 7.3d ergibt sich bei Mittelungs- und Schrittweite von 70 gemäß Abbildung 7.6 eine Vorhersagegenauigkeit von 90%. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 78,6% liegen die Vorhersagen zum Auftreten von versetzt positionierten Linien gemäß der Trendanalyse für die nächsten 20 s innerhalb einer Toleranz von  $\pm 10$  s. Die Wahrscheinlichkeit, dass Vorhersagen für die nächsten 10 s innerhalb der Toleranz von  $\pm 10$  s eintreten, liegt bei 86,8%. Eine korrekte Vorhersage von 10 s bedeutet eine Reduktion von 13,33 m an Makulatur. Gegenüber der bekannten Tabelle 5.2 aus Kapitel 5.5 wird für solche versetzt positionierten Linien die Makulatur von 23,26 m auf 9,93 m reduziert, wenn die hier vorgestellte Trendanalyse zum Einsatz kommt. Ebenfalls wurde in Kapitel 5.5 als Möglichkeit zur Reduktion von Makulatur eine alternative Positionierung des Kamerasystems mit einem Abstand von 0,5 m hinter der Druckeinheit erwähnt. Damit würde die kritische Dauer des Kompensationsverhaltens von 17,45 s auf 8,29 s reduziert. Für diese kritische Dauer lässt sich bei einer Mittelungs- und Schrittweite von 50 jegliche Makulatur von 46,5% aller Ausfälle vermeiden. Bei weiteren 26,2% der Ausfälle, basierend auf versetzt druckenden Düsen, werden mindestens 7,44 m an Makulatur vermieden.



---

## 8. Zusammenfassung & Schlussfolgerung

---

In dieser Dissertationsschrift wurde eine Methode zur Analyse der Tropfenpositionierung im Inkjet-Druck entwickelt, die eine Optimierung der Druckqualität und Verfügbarkeit von Inkjet-Produktionsdruckmaschinen erreicht. Dafür wurden der Druckprozess, optische Bilderfassungssysteme und Bildauswertungen betrachtet. Die Schritte, die dazu nötig waren und deren Ergebnisse werden in diesem Kapitel nochmals zusammengetragen und diskutiert. Zunächst wurden die Grundlagen zur Druck- und Kameratechnologie beschrieben. Aus der Vielfalt an Druckverfahren wurde der digitale Inkjet-Druck ausgewählt, da er zu den vielversprechendsten Non-Impact-Druckverfahren gehört. Inkjet erlaubt eine direkte Weitergabe der digitalen Druckinformationen bis zu den Druckköpfen, die den Druckstoff auf den Bedruckstoff auftragen. Die Untersuchungen dieser Arbeit wurden weiter eingegrenzt auf Fehler, die während des letzten Schrittes des Druckprozesses auftreten können. Das Zusammenspiel zwischen Druckkopf, Tinte und Substrat wurde beschrieben. Es wurden Messmethoden für integrierte Kamerasysteme aufgezeigt und ein Überblick über derartige existierende Inspektionssysteme gegeben. Dabei wurde ermittelt, wie weit Messmethoden zur Ausrichtung der Druckköpfe und Korrektur der Gleichmäßigkeit der Farbdichte sowie zum Abgleich zwischen Kamerabildern und der Druckvorlage bereits verbreitet sind. Allerdings weisen die bestehenden Methoden und Maßnahmen im Umgang mit Düsenausfällen und fehlpositionierten Drucklinien im Druckprodukt deutliche Defizite auf. Die Anwendung existierender Maßnahmen bringt starke Einschränkungen mit sich, wie beispielsweise den Bedarf einer speziellen Nachverarbeitung und große Mengen an Makulatur. Deshalb wurde sich im Rahmen dieser Arbeit darauf konzentriert, eine Methode zur Analyse der Tropfenpositionierung zu entwickeln und Fehler vor deren Auftreten vorherzusagen und zu behandeln. Für die Untersuchungen wurden eine 1200 dpi-Inkjet-Produktionsdruckmaschine sowie ein schnelles Kamerasystem genutzt. Das Kamerasystem ist in der Druckmaschine integriert und interagiert mit dieser. Die Kameraauflösung von 600 ppi bietet ein Optimum zwischen Detailgrad und Auswertegeschwindigkeit. Die weiteren verwendeten Materialien und Testumgebungen wurden anschließend zusammengefasst. Die vier Bestandteile **Simulationsmodell der optischen Bilderfassung**, **Messung der Tropfenpositionierung während des Druckens**, **Erkennung von Düsenausfällen für Grundierung** und **Trendanalyse des Positionsversatzes** greifen ineinander und adressieren die Analyse der Tropfenpositionierung. Unter den folgenden Abschnitten sind die Resultate der Arbeit zusammengefasst.

### Simulationsmodell der optischen Bilderfassung

Als Teil dieser Arbeit wurde ein modulares, übertragbares Kamerasimulationsmodell entwickelt und verifiziert. Das Modell beinhaltet die elementaren Komponenten der optischen Bilderfassung. Es wurde das Ziel erreicht, aus den Spezifikationen und Datenblättern von Zeilenkamera, Objektiv, und Beleuchtung eine Simulation aufzubauen, die in der Lage ist, die optische Bilderfassung von Druckprodukten modellbasiert nachzubilden. In den einzelnen austauschbaren Bausteinen werden Beleuchtungsverteilung, Punktspitzverhältnis, der optische Lichtweg und die zweidimensionale Diskretisierung im Bildsensor simuliert. Des Weiteren wurden zwei Applikationen programmiert: 1) Eine Software um aus Kamerabildern von geneigten Kanten das Kantenspreizverhalten des Objektivs zu messen; 2) Eine Software zur Nachbildung von Verläufen und Funktionskurven. Auf diese Weise wurden für zwei vorliegende Objektive genaue und präzise

---

Kantenspreizfunktionen je Farbkanal ermittelt. Die Verifikation des Modells zeigt, dass sich das Simulationsbild unter Anwendung der Charakteristika der erwähnten Komponenten zu 93,8% mit dem Kamerabild deckt. Im Experiment wurde die Übertragbarkeit des Modells verifiziert und die Eignung nicht physikalisch vorliegender Komponenten nachgewiesen. Durch das Modell wird abgebildet, dass für einen konstanten Verlauf des Signal-Rauschabstands und des Lichteinfalls über die Breite des Bildsensors die Leuchtintensität der externen Beleuchtung dem Rückgang der relativen Ausleuchtung aus der Objektivspezifikation entgegenwirken muss. Dies kann mit einer zunehmenden Dichte von LEDs oder einer höheren Leuchtintensität an den Rändern des Sichtfeldes realisiert werden. Das Simulationsmodell ist in der Lage, diese Erkenntnisse quantitativ darzustellen und erlaubt die Unterstützung bei der Suche nach geeigneten Parametern.

## Messung der Tropfenpositionierung während des Druckens

Die Düsenausfallerkennung im Beschnitt ermöglicht es, die Düsenperformance hochfrequent zu erfassen und erspart den Bedarf an spezialisierten Sortieranlagen in der Nachverarbeitung bei gleichzeitiger Reduktion von Makulatur. Beim Vergleich von Linienmustern mit kurzen Linien und dichten Musteranordnungen wurden Flächenbedarf und Messqualität der Ausfalldetektion gegenübergestellt, um das Optimum für Rollendruckmaschinen zu ermitteln. Dabei wurde ein großflächiges Referenzmuster für eine Druckauflösung von 1200 dpi entwickelt und der *Hockeyschläger-Effekt* entdeckt, der auf Schwankungen der Tintenversorgung im Druckkopf zurückzuführen ist und bei definierten Linienmustern auftritt. Die Vermeidung dieses resultierenden Druckfehlers wird über eine Umverteilung der Linienreihenfolge oder ein Vermeiden der Resonanzfrequenz erreicht. Die Messqualität der verkürzten Linienmuster gegenüber der Referenzmessung wurde über die Anzahl detektierter Düsenausfälle und versetzt positionierter Linien, gemittelter Positionsabweichungen und Standardabweichungen verifiziert. Bei den untersuchten 2,01 mm langen einfarbigen Mustern, bestehend aus zwölf Reihen zu je sieben bedruckten und einer unbedruckten Rasterzelle je Linie, erreicht die Messqualität 89% des Referenzmusters. Damit wird das optimale Verhältnis zwischen Messqualität und Musterlänge von einfarbigen Mustern erreicht. Für dieses Muster entsteht je Seite – betrachtet für 12 Zoll lange Seiten – etwa nur 40% der Menge an Makulatur gegenüber dem bisherigen Stand der Technik, bei dem jede sechzigste Seite vollständig Makulatur ist. Da das Linienmuster im Beschnitt auf jeder Seite ausgewertet wird, erreicht dieses Verfahren die 15-fache Messfrequenz. Die Prüfung einer einzelnen Tinte kann auf jeder Seite durchgeführt werden. Dies führt zur schnelleren Erkennung von Fehlverhalten als bei einzelnen Testseiten, die in regelmäßigen Abständen zwischen den Kundenseiten gedruckt werden. Die Erkennung von Fehlern nach vier Seiten, wenn vier Tinten gedruckt werden, reduziert die Makulatur im Vergleich zu ganzen Testseiten bei einem typischen Abstand von 60 Seiten. Für jeden auftretenden inakzeptablen Düsenausfall lassen sich bis zu 56 (durchschnittlich 28) Seiten Makulatur gegenüber dem gegenwärtigen Konzept einsparen. Bei Nutzung der am besten geeigneten mehrfarbigen Linienmuster werden zwei Tinten auf insgesamt 3,39 mm untergebracht, wodurch gegenüber dem Stand der Technik 33% der Makulatur eingespart werden und die Messfrequenz verdreifacht wird. Somit wird bei Auftreten eines Düsenfehlers die Makulatur durch fehlerhaft bedruckte Seiten um bis zu 58 (durchschnittlich 29) Seiten Makulatur reduziert. In beiden Fällen erlauben die kurzen Testdruckmuster im Beschnitt eine Gleichbehandlung jeder Seite und machen die Aussortierung von Testseiten überflüssig. Die Überwachung von Düsenausfällen ist damit flexibler und zugänglicher geworden, da nicht mehr eine regelmäßig eingeschleuste Testseite erforderlich ist, die die Nutzdaten unterbricht, sondern das Prüfmuster in kleinen Abschnitten am Beginn jeder Seite gedruckt wird.

---

## Erkennung von Düsenausfällen für Grundierung

Die Detektion von Düsenausfällen ist eine grundlegende Untersuchung nahe der Ursache von Druckfehlern. Grundierung dient der Steuerung des Einziehverhaltens von Tinten sowohl in gestrichene als auch unbehandelte Papiere. Auf beiden Papiersorten werden durch Grundierung schärfere Kanten und feinere Separation unterschiedlicher Tinten erreicht. Um Verbrauchsstoffe zu reduzieren, wird Grundierung mit Inkjet-Druckköpfen bedarfsgerecht aufgetragen und unterliegt damit – wie Tinten – dem Risiko eines Düsenausfalls. Durch die Erweiterung und Anpassung einer bestehenden Erfindung ist die Detektion von Düsenausfällen auch für farblose, transparente Grundierung verfügbar. Die Grundierung wird als Linienmuster mit hinreichendem Abstand zwischen benachbarten Linien deckungsgleich mit dem Druckmuster der Tinten auf dem Substrat positioniert. Das Druckmuster der Tinten besteht aus einem feinen Gitter aus durchgezogenen Linien einer Tinte und einer gleichmäßig bedruckten Fläche einer zweiten Tinte. Auf diese Weise erzeugen die Linien der Grundierung eine Änderung des Farbraums auf unbehandelten Substraten und eine Erhöhung der Farbdichte auf gestrichenen Papieren. Durch Aufzeichnung des Druckprodukts mit nachgeschalteter Farbkorrektur, Gammaanpassung und Kontrasterhöhung lassen sich in der Bildanalyse die Linien der Grundierung wiederfinden und auf Düsenausfälle prüfen. Aus dieser Detektion ergibt sich für den laufenden Druckbetrieb die Möglichkeit zur Kompensation, indem die Tropfen der fehlerhaften Düse auf Rasterzellen benachbarter Düsen umverteilt werden.

## Trendanalyse des Positionsversatzes

Um eine Vielzahl von Ausfällen zu vermeiden, wurde eine effiziente Trendanalyse entwickelt, die die Tropfenpositionierung während des laufenden Druckvorgangs verfolgt und Vorhersagen über das zukünftige Ausfallverhalten trifft. Die laufende Mittelung der Messwerte erreicht einen wesentlich stabileren Umgang mit versetzt druckenden Düsen, denn die stark fluktuierenden Messergebnisse des Positionsversatzes aus den kurzen Linienmustern können durch den trägen Regelkreis der Druckmaschine nicht sinnvoll gehandhabt werden. Somit wurden einzeln auftretende Messungen von Positionsfehlern oder Gutfällen mit deren benachbarten Messungen gemittelt und so der träge Regelkreis des Druck- und Bildauswertesystems einbezogen. Die Trendanalyse zeigt, dass sich 86,8% der Ausfälle auf 10 s genau vorhersagen lassen. Diese Zuverlässigkeit gilt nur für den Vorhersagehorizont von 10 s, danach sinkt sie auf 74,6%. Durch geeignete Positionierung des Kamerasystems hinter der Druckeinheit wird bei Zusammenwirken von kurzen Linienmustern und Trendanalyse die Regelzeit optimiert, sodass sich bei 46,5% aller Ausfälle jegliche Makulatur komplett vermeiden lässt. Dadurch bleibt die Druckqualität langfristig deutlich zuverlässiger auf einem konstant hohen Niveau erhalten, da einem auftretenden Ausfall stabil und frühzeitig durch die bereits existierenden Kompensationsmethoden entgegengewirkt werden kann. Unter Anwendung dieses Konzepts resultiert eine erhöhte Verfügbarkeit der Produktionsdruckmaschine.





---

# Literaturverzeichnis

---

- AIA (2012). *Specifications of the Camera Link Interface Standard for Digital Cameras and Frame Grabbers*.
- AIA (2013). *GigE Vision: Video streaming and device control over ethernet standard*.
- AIA (2015). *USB3 Vision*.
- Arnau, Antonio u. a. (2004). *Piezoelectric transducers and applications*. Bd. 2004. Springer.
- AVT LTD (2018). *Apollo 30K: 100% Inspection for HP Indigo 30000 folding carton press*. Hod-Hasharon, Israel. URL: [go.esko.com/apollo-30k-high](http://go.esko.com/apollo-30k-high) (besucht am 02.10.2022).
- Axode Corporation (2017). *Printing quality control solution for CANON Quality Department: Produktangebot vom 10.11.2017*. Frankreich.
- Axode Corporation (2018). *180 SERIES - The document identifiers you can count on even at 360,000 readings/hour*. Chicago, IL, U.S.A. URL: [www.axode.com/pdf/AX0180US.pdf](http://www.axode.com/pdf/AX0180US.pdf) (besucht am 05.04.2018).
- Baldwin Vision Systems (2017). *Vision Systems: Guardian PQV 100% Print Inspection*. Gurnee, IL, U.S.A. URL: [static1.squarespace.com/static/5cbf60d59d41491e0c1bb5eb/t/5d94f8f9d6263d0116667591/1570044155997/Guardian\\_PQV\\_RTM\\_201901\\_GERMAN.pdf](http://static1.squarespace.com/static/5cbf60d59d41491e0c1bb5eb/t/5d94f8f9d6263d0116667591/1570044155997/Guardian_PQV_RTM_201901_GERMAN.pdf) (besucht am 02.10.2022).
- Baumer Electric AG (2017). *Digitale Industriekameras - Mit dem Blick fürs Wesentliche: Product Booklet*.
- Beauchamp, Robert W. und Ignacio Ruiz Conejo (1998). „Calibration technique for mis-directed inkjet printhead nozzles“.
- Bell and Howell LLC (2013). *WebVision Print inspection system: 100% quality control at full production speed*. Durham, NC, U.S.A. URL: [www.bellhowell.net/en-US/Documents/webvision-datasheet.pdf](http://www.bellhowell.net/en-US/Documents/webvision-datasheet.pdf) (besucht am 09.04.2018).
- Blais, François und Marc Rioux (1986). „Real-time numerical peak detector“. In: *Signal processing* 11.2, S. 145–155.
- Blanc, Nicolas (2001). „CCD versus CMOS—has CCD imaging come to an end?“. In: *Photogrammetric Week 01*, S. 131–137.
- Blehschmidt, Jürgen (2013). *Taschenbuch der Papiertechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Blom, B. E. und T. J. Conner (1990). „Optical density and ink film thickness; a comparison of models“. In: *TAGA Proceedings*, S. 213–225.
- Boreman, Glenn D. (2001). *Modulation transfer function in optical and electro-optical systems*. Bd. 4. SPIE press Bellingham, Washington.

- 
- Brenn, Günter, D. Valkovska und K. D. Danov (2001). „The formation of satellite droplets by unstable binary drop collisions“. In: *Physics of fluids* 13.9, S. 2463–2477.
- Briggs, John C., Mike Murphy und Yichuan Pan (2000). „Banding characterization for inkjet printing“. In: *IS AND TS PICS CONFERENCE*, S. 84–88.
- Brünahl, Jürgen, Angus Condie u. a. (2017). „Xaar’s inkjet printing technology and applications“. In: *Handbook of Industrial Inkjet Printing: A Full System Approach*, S. 285–312.
- Brünahl, Jürgen und Alex M. Grishin (2002). „Piezoelectric shear mode drop-on-demand inkjet actuator“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 101.3, S. 371–382.
- BST eltromat International (2017a). *iPQ-Check: 100% Druckbildinspektion für Ihre Qualitätssicherung*. Bielefeld, Deutschland. URL: [bst.help/document/bste-b417-ipq-check-low/file/810/BSTe%20B417%20iPQ-Check%20Low](http://bst.help/document/bste-b417-ipq-check-low/file/810/BSTe%20B417%20iPQ-Check%20Low) (besucht am 02. 10. 2022).
- BST eltromat International (2017b). *Professionelle Qualitätskontrolle im Druckprozess: Produktangebot vom 26.09.2017*. Bielefeld, Deutschland.
- Chrétien, Michelle N. und Peter Gordon Odell (2012). *Inline calibration of clear ink drop mass*.
- Chromasens GmbH (2020). *Corona II + LED-Control Unit XLC4-1 Manual: Version R05 (CD40069)*. Konstanz. URL: [chromasens.de/sites/default/files/download-media/PMA\\_CHR\\_CD40069\\_R05\\_Manual\\_Corona-II\\_XLC4.pdf](http://chromasens.de/sites/default/files/download-media/PMA_CHR_CD40069_R05_Manual_Corona-II_XLC4.pdf) (besucht am 01. 10. 2022).
- Chromasens GmbH (2022a). *allPixa pro Manual: CD40127 Rev.04*. Konstanz. URL: [chromasens.de/sites/default/files/download-media/PMA\\_CHR\\_CD40127\\_R04%20allPIXA\\_pro\\_User%20Manual.pdf](http://chromasens.de/sites/default/files/download-media/PMA_CHR_CD40127_R04%20allPIXA_pro_User%20Manual.pdf) (besucht am 01. 10. 2022).
- Chromasens GmbH (2022b). *allPIXA wave camera Manual: CD40172 R06*. Konstanz. URL: [chromasens.de/sites/default/files/download-media/PMA\\_CHR\\_CD40172\\_R06\\_allPIXA\\_wave\\_UserManual\\_0.pdf](http://chromasens.de/sites/default/files/download-media/PMA_CHR_CD40172_R06_allPIXA_wave_UserManual_0.pdf) (besucht am 01. 10. 2022).
- CIE (2016). *ISO/CIE 11664-5:2016(E): Colorimetry - Part 5: CIE 1976 L\*u\*v\* Colour space and u', v' uniform chromaticity scale diagram*.
- CIE (2019). *Colorimetry - Part 4: CIE 1976 L\*a\*b\* Colour Space: ISO/CIE 11664-4:2019(E)*.
- Corrall, John (2017). „Konica Minolta’s inkjet printhead technology“. In: *Handbook of industrial inkjet printing: a full system approach*, S. 253–284.
- Dalsa, Teledyne (2018). *Piranha4 Cameras – Color 2K and 4K Trilinear and Quadlinear CMOS: Bedienungsanleitung 03-032-20180-04: Bedienungsanleitung 03-032-20180-04*. Ontario.
- Defay, Raymond, I. Prigogine und A. Bellemans (1966). *Surface tension and adsorption*. London: Longmans. ISBN: 9780582462847.
- Du Mez, Craig (2017). *Baldwin erweitert seine globale Plattform durch die Übernahme von QuadTech, Inc*. St. Louis, Missouri, U.S.A. URL: <https://de.baldwinvisionsystems.com/news-20171208> (besucht am 04. 10. 2022).
- Erhard+Leimer GmbH (2017a). *Funktionszusagen: Produktangebot vom 09.11.2017*. Stadtbergen.

- 
- Erhard+Leimer GmbH (2017b). *SMARTSCAN 100%-Inspection*. Stadtbergen, Deutschland. URL: [www.erhardt-leimer.com/fileadmin/content/product/brochures/DT/SMARTSCAN\\_PRO--251434-DE-03\\_EL.pdf](http://www.erhardt-leimer.com/fileadmin/content/product/brochures/DT/SMARTSCAN_PRO--251434-DE-03_EL.pdf) (besucht am 02.10.2022).
- Everett, Douglas Hugh (1972). „Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units, appendix II: Definitions, terminology and symbols in colloid and surface chemistry“. In: *Pure and Applied Chemistry* 31.4, S. 577–638.
- EyeC GmbH (2020). *Your vision for quality. EyeC ProofRunner: Broschüre ProofRunner*. Hamburg, Deutschland. URL: [www.eyec.com/fileadmin/files/downloads/pdf/Brochure-EyeC-ProofRunner-DE.pdf](http://www.eyec.com/fileadmin/files/downloads/pdf/Brochure-EyeC-ProofRunner-DE.pdf) (besucht am 02.10.2022).
- Fischer, Carsten (2001). „Geometrische Optik“. In: *Technische Optik in der Praxis*, S. 1–34.
- Fisher, R. B. und D. K. Naidu (1996). „A comparison of algorithms for subpixel peak detection“. In: *Image technology*. Springer, S. 385–404.
- Freudenberg, Frank (19. Juni 2017). *Océ internal report on paper qualification V2.3.2*. Poing.
- FUTEC Europe GmbH (2017). *Smart camera as QC tool for digital printing machines: Produktangebot vom 18.10.2017*. Duisburg, Deutschland.
- Galle, Alexander (2007). *Regelungstechnische Untersuchung der Bedruckstoffförderung in Rollendruckmaschinen: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2007*. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-200701598>.
- Gan, H. Y. u. a. (2009). „Reduction of droplet volume by controlling actuating waveforms in inkjet printing for micro-pattern formation“. In: *Journal of micromechanics and microengineering* 19.5, S. 055010.
- Goldmann, Gerd (2007). *Digitaldruck: Technik und Drucktechnologien der Océ Drucksysteme*. Océ Printing Systems.
- Greger, Oliver und Walter Brenner (2018). „Verfahren zum Detektieren einer fehlerhaften Aufbringung eines im aufgebracht Zustand unsichtbaren Beschichtungstoffes, insbesondere eines Primers, zum Bedrucken eines Aufzeichnungsträgers und entsprechendes Drucksystem: Offenlegungsschrift“. DE102017101527A1.
- Heard, P. J. u. a. (2004). „Visualisation of the distribution of ink components in printed coated paper using focused ion beam techniques“. In: *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 244.1-3, S. 67–71.
- Heidelberger Druckmaschinen AG (2016). *Verlässliche Qualität produzieren: Prinect Farbmesssysteme*. Heidelberg, Deutschland. URL: [www.heidelberg.com/global/media/de/global\\_media/products\\_-\\_prinect/pdf\\_41/downloads/pb\\_color\\_measurement\\_systems.pdf](http://www.heidelberg.com/global/media/de/global_media/products_-_prinect/pdf_41/downloads/pb_color_measurement_systems.pdf) (besucht am 02.10.2022).
- Hoath, Stephen D. (2016). *Fundamentals of inkjet printing: the science of inkjet and droplets*. John Wiley & Sons.
- Holst, Gerald C. (2007). „CMOS/CCD sensors and camera systems“. In: *CMOS/CCD sensors and camera systems/Gerald C. Holst*.
- Hudd, Alan (2011). „Inkjet printing technologies“. In: *The chemistry of inkjet inks*, S. 3–18.

- 
- Hunkeler AG (2017a). *Clarifications requests about Océ RFP for 30 inch WI: Produktangebot vom 24.10.2017*. Wikon, Schweiz.
- Hunkeler AG (2017b). *Finishing für Digitaldruck: Excellence in Paper Processing*. Wikon. URL: [www.hunkeler.ch/finishing-fuer-digitaldruck/](http://www.hunkeler.ch/finishing-fuer-digitaldruck/) (besucht am 01.10.2022).
- Isra Vision (2017). *Funktionszusagen: Produktangebot vom 06.11.2017*. Darmstadt, Deutschland.
- Isra Vision (2022). *Always stay within Your Quality Specification and Push Your Productivity: PrintSTAR: Product Info*. Darmstadt, Deutschland. URL: [www.isravision.com/de/druck/anwendungen/flexible-verpackungen/druck/100ige-inline-druckinspektion-flexibler-verpackungen/](http://www.isravision.com/de/druck/anwendungen/flexible-verpackungen/druck/100ige-inline-druckinspektion-flexibler-verpackungen/) (besucht am 02.10.2022).
- Isra Vision AG (2015). *ISRA VISION AG: Portfolioausbau für Oberflächeninspektion durch Firmenübernahme: ISRA setzt Wachstumsstrategie fort und erweitert Kerngeschäft mit Akquisition*. Darmstadt, Deutschland.
- Jang, Daehwan, Dongjo Kim und Jooho Moon (2009). „Influence of fluid physical properties on ink-jet printability“. In: *Langmuir* 25.5, S. 2629–2635.
- JIIA (2015). *CoaXPress Standard*.
- Jos. Schneider Optische Werke GmbH (2008a). *Datenblatt V-Mount Macro Lens Apo-Componon 4.0/60-0016: Version 2.0*. Bad Kreuznach. URL: [schneiderkreuznach.com/fileadmin/user\\_upload/bu\\_industrial\\_solutions/industrieroptik/Unifoc\\_Lenses/V-Mount\\_Macro-Lenses/Apo-Componon\\_4.0-60.pdf](http://schneiderkreuznach.com/fileadmin/user_upload/bu_industrial_solutions/industrieroptik/Unifoc_Lenses/V-Mount_Macro-Lenses/Apo-Componon_4.0-60.pdf) (besucht am 30.08.2018).
- Jos. Schneider Optische Werke GmbH (2008b). *Datenblatt V-Mount Macro Lens Apo-Componon 4.5/90-0018: Version 2.0*. Bad Kreuznach. URL: [schneiderkreuznach.com/fileadmin/user\\_upload/bu\\_industrial\\_solutions/industrieroptik/Unifoc\\_Lenses/V-Mount\\_Macro-Lenses/Apo-Componon\\_4.5-90.pdf](http://schneiderkreuznach.com/fileadmin/user_upload/bu_industrial_solutions/industrieroptik/Unifoc_Lenses/V-Mount_Macro-Lenses/Apo-Componon_4.5-90.pdf) (besucht am 30.08.2018).
- Karz, Robert S. (1996). „Redundant full width array thermal ink jet printing for improved reliability“.
- KBA-Sheetfed Solutions AG & Co. KG (2016). *Optimale Druckqualität made by KBA: Messen, Steuern und Regeln mit System*. Radebeul, Deutschland. URL: [www.koenig-bauer.com/fileadmin/user\\_upload/01\\_Sheetfed/01\\_Produnkte/PDF\\_Downloads/Measuring\\_Systems/Messtechnik\\_2016\\_deutsch\\_web.pdf](http://www.koenig-bauer.com/fileadmin/user_upload/01_Sheetfed/01_Produnkte/PDF_Downloads/Measuring_Systems/Messtechnik_2016_deutsch_web.pdf) (besucht am 02.10.2022).
- Kipphan, Helmut (2001). *Handbuch der Printmedien: Technologien und Produktionsverfahren*. Springer Science & Business Media.
- Komori Corporation (2016). *The Connected Future: Komori at drupa 2016*. Tokio, Japan. URL: [www.komori.com/en/eu/information/download/assets/pdf/op88.pdf](http://www.komori.com/en/eu/information/download/assets/pdf/op88.pdf) (besucht am 02.10.2022).
- Kyocera Corporation (2014). *Inkjet Printhead Development Specification for OPS*. Kyoto.
- Leach, Robert (2012). *The printing ink manual*. Springer Science & Business Media.
- Levlin, Jan-Erik und L. Nordman (1967). „On the penetration of ink into paper“. In: *Paper in the Printing Processes*. Elsevier, S. 33–55.
- Li, Renai u. a. (2015). „Ink Penetration of Uncoated Inkjet Paper and Impact on Printing Quality“. In: *BioResources* 10.4, S. 8135–8147.

- 
- Liou, Tong-Miin, Chia-Yen Chan und Kuan-Cheng Shih (2010). „Effects of actuating waveform, ink property, and nozzle size on piezoelectrically driven inkjet droplets“. In: *Microfluidics and Nanofluidics* 8.5, S. 575–586. ISSN: 1613-4990. DOI: 10.1007/s10404-009-0488-4.
- Lithec GmbH (2017). *LithoInspect Inline: 100% Inline Inspektion für Druckprodukte*. Miesbach, Deutschland. URL: [lithec.de/product/lithoInspect\\_inline#](http://lithec.de/product/lithoInspect_inline#) (besucht am 02. 10. 2022).
- Liu, Yu-Feng u. a. (2013). „Control of droplet formation by operating waveform for inks with various viscosities in piezoelectric inkjet printing“. In: *Applied physics A* 111.2, S. 509–516.
- Lovász, Kálmán (1967). „Penetration of ink into paper“. In: *Paper in the Printing Processes*. Elsevier, S. 25–32.
- Lund, Mark D. und Jefferson P. Ward (1997). „On-page inkjet printhead spitting system“.
- manroland sheetfed GmbH (2015a). *Quality Management printnetwork Farbmess- und Regelsysteme*. Offenbach, Deutschland. URL: [www.manrolandsheetfed.com/en-GB/documents/2774/product-overview-color-measurement-de-en.pdf](http://www.manrolandsheetfed.com/en-GB/documents/2774/product-overview-color-measurement-de-en.pdf) (besucht am 02. 10. 2022).
- manroland sheetfed GmbH (2015b). *ROLAND InlineInspector 2.0 mit PDF-Abgleich und QualityMask*. Offenbach, Deutschland. URL: [www.manrolandsheetfed.com/en-GB/documents/2776/factsheet-inlineinspector-2-en.pdf](http://www.manrolandsheetfed.com/en-GB/documents/2776/factsheet-inlineinspector-2-en.pdf) (besucht am 02. 10. 2022).
- Mantell, David A. und Jeffrey J. Folkins (2008). „Ink jet printer having print head with partial nozzle redundancy“.
- Mantell, David A., O’NEIL Jason und Kenneth R. Ossman (2010). „Systems and methods for detecting print head defects in printing clear ink“.
- Mitsubishi Electric Europe B.V. (31. Jan. 2017). *CONTACT IMAGE SENSOR (CIS) – KD series for Web Surface Inspection: User’s Manual – TM-XH719A*. Ratingen.
- Mohilnik, Egor (2015). „Measuring of Coalescence through Line-Composition in High Resolution Printing Engines Using Latex Inks“. Masterarbeit. München: Hochschule für angewandte Wissenschaften München.
- Moutinho, Isabel M. T., Paulo J. T. Ferreira und Margarida L. Figueiredo (2007). „Impact of surface sizing on inkjet printing quality“. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 46.19, S. 6183–6188.
- Mühlbauer GmbH & Co. KG (2018). *TEMA PI-WEB: Hersteller Produkt Webseite*. Roding, Deutschland. URL: [www.muehlbauer.de/products/vision-inspection/tema-industrial-inspection/print-inspection/for-web-sheets/tema-pi-web/](http://www.muehlbauer.de/products/vision-inspection/tema-industrial-inspection/print-inspection/for-web-sheets/tema-pi-web/) (besucht am 02. 10. 2022).
- Omron Microscan Systems Inc (2017). *LVS-7000 - An In-Line Process Control System that Improves the Quality Inspectoin Process: Broschüre*. Renton, WA, U.S.A. URL: [files.microscan.com/downloadcenter/LVS-7000\\_Brochures.zip](http://files.microscan.com/downloadcenter/LVS-7000_Brochures.zip) (besucht am 02. 10. 2022).
- Omron Microscan Systems Inc (2018). *LVS 7000 Operations manual: Version 5.6.X*. Renton, WA, U.S.A.
- Osman Arslan, Zygmunt Pizlo und Jan P. Allebach (2005). „Softcopy banding visibility assessment“. In: *Image Quality and System Performance II*. Bd. 5668. SPIE, S. 38–50. DOI: 10.1117/12.593684.
- Osram Opto Semiconductors GmbH (2013). *Datenblatt OSOLON Square® LUW CQAR (streetwhite) Version 1.4*. Regensburg. URL: [dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-5537536/LUW%5C%20CQAR%5C%20\(streetwhite\)\\_EN.pdf](http://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-5537536/LUW%5C%20CQAR%5C%20(streetwhite)_EN.pdf) (besucht am 01. 10. 2022).

- 
- Papageorgiou, Demetrios T. (1995). „On the breakup of viscous liquid threads“. In: *Physics of fluids* 7.7, S. 1529–1544.
- PARVIS systems and services s.p.a. (2018). *QA Systems: PROXIMA-i*. Mailand, Italien. URL: [www.parvis.it/qa-systems/](http://www.parvis.it/qa-systems/) (besucht am 02. 10. 2022).
- Paschotta, Rüdiger (2008). *Encyclopedia of laser physics and technology*. Bd. 1. Wiley-vch.
- Q.I. Press Control (2016). *QIPC-INTRO JetControl Misprint Detection: Broschüre JetControl*. Oosterhout, Niederlande. URL: [qipc-intro.com/Uploads/Editor/GB\\_JetControl.pdf](http://qipc-intro.com/Uploads/Editor/GB_JetControl.pdf) (besucht am 07.04.2018).
- Q.I. Press Control (2017). *IBS 100 Full Inspection Control Colour and Register Control System: Produktangebot vom 10.11.2017*. Oosterhout, Niederlande.
- QuadTech Europe (2012a). *QuadTech Farbregelungs- und Bahneninspektionssystem mit AccuCam: Broschüre AccuCam*. Weesp, Niederlande. URL: [www.quadtechworld.com/downloads/brochures/CCS\\_Inspection\\_wAccu\\_de.pdf](http://www.quadtechworld.com/downloads/brochures/CCS_Inspection_wAccu_de.pdf) (besucht am 07.04.2018).
- QuadTech Europe (2012b). *QuadTech Inspektionssystem mit SpectralCam: Broschüre AccuCam*. Weesp, Niederlande. URL: [www.quadtechworld.com/downloads/brochures/Color\\_Control\\_w\\_SpectralCam\\_PKG\\_de.pdf](http://www.quadtechworld.com/downloads/brochures/Color_Control_w_SpectralCam_PKG_de.pdf) (besucht am 07.04.2018).
- Rayleigh (1878). „On the instability of jets“. In: *Proceedings of the London mathematical society* 1.1, S. 4–13.
- Saito, Hiroshi und Haruyuki Nakajo (2017). „Metal Nanoparticle Conductive Inks for Industrial Inkjet Printing Applications“. In: *Handbook of Industrial Inkjet Printing: A full system approach*, S. 215–224.
- Sappi Limited (2014). *Tauro: Produktinformationsblatt*. Johannesburg, Südafrika. URL: [www.umurkagit.com.tr/sites/default/files/2021-06/Sappi%20-%20Tauro.pdf](http://www.umurkagit.com.tr/sites/default/files/2021-06/Sappi%20-%20Tauro.pdf) (besucht am 02. 10. 2022).
- Schneider, Claus (2013). „Modularer Aufbau von Bahnlaufsimulation und Farbregeisterdarstellung an einer großindustriellen Tintenstrahl Druckmaschine mit Matlab/Simulink“. Semesterthesis. München: Technische Universität München.
- Schneider, Claus (2020a). „Verfahren und Steuereinheit zum Druck eines Testbildes, sowie ein entsprechendes Testbild: Offenlegungsschrift“. DE102019101687A1.
- Schneider, Claus (2020b). „Verfahren und Vorrichtung zum Ansteuern eines Aktors eines Tintenstrahl Drucksystems: Offenlegungsschrift“. DE102019104931A1.
- Schneider, Claus (2020c). „Verfahren und Vorrichtung zum Ansteuern von Druckelementen eines Tintenstrahl Drucksystems: Offenlegungsschrift“. DE102019104932A1.
- Schneider, Claus (2020d). „Verfahren zum Ermitteln einer Konfiguration eines Kamerasystems zum Erfassen von Druckbildern: Patent“. DE102019122950B3.
- Schneider, Claus (2021). „Verfahren zum Ermitteln von fehlerhaften Druckdüsen einer Druckvorrichtung: Offenlegungsschrift“. DE102019134721A1.
- Schneider, Claus, Philippe Körner u. a. (2018a). „Verfahren und Steuereinheit zur Erkennung eines Zustands einer Düse zum Drucken von pigmentloser Flüssigkeit: Offenlegungsschrift“. DE102016122764A1.

- 
- Schneider, Claus, Philippe Körner u. a. (2018b). „Verfahren zur Erkennung einer Querbewegung zwischen einer Druckeinheit und einem Aufzeichnungsträger: Patent“. DE102016120752A1.
- Schneider, Claus, Philippe Körner u. a. (2018c). „Verfahren zur Ermittlung des Zustands mindestens einer Düse eines Tintenstrahl-Drucksystems: Offenlegungsschrift“. DE102016120753A1.
- Schneider, Claus und Christoph Rummelsberger (2020). „Automatisierte Vorrichtung zur Einstellung von Druckköpfen: Offenlegungsschrift“. DE102018133342A1.
- Schneider, Claus und Ulrich Stöckle (2019). „Drucksystem und Verfahren zum Erfassen eines Zustands einer Druckvorrichtung eines Drucksystems: Patent“. DE102017129231A1.
- Schneider, Claus und Ulrich Stöckle (2021a). „Verfahren und eine Vorrichtung zum korrekten Ermitteln von Einfärbeintensitäten in mindestens einem in einer Grundfarbe einer Druckvorrichtung gedruckten Druckbild: Offenlegungsschrift“. DE102019127278A1.
- Schneider, Claus und Ulrich Stöckle (2021b). „Verfahren und Verarbeitungseinheit zur Vorhersage und Kompensation eines Düsenausfalls: Offenlegungsschrift“. DE102019127279A1.
- Schneider, Claus und Ulrich Stöckle (2021c). „Verfahren und Vorrichtung zum Synchronisieren einer ersten Druckvorrichtung mit einer zweiten Komponente, insbesondere einer zweiten Druckvorrichtung: Offenlegungsschrift“. DE102019127277A1.
- Silverbrook, Kia (2003). „Ink jet fault tolerance using adjacent nozzles“.
- Stöckle, Ulrich (2013). „Study on Inkjet Banding: Analysis and Optimization“. Bachelorarbeit. München: Hochschule für angewandte Wissenschaften München.
- Stöckle, Ulrich (2018). „Verfahren und Steuereinheit zur Stabilisierung eines Tintenmeniskus in einem Tintenstrahl-Drucksystem: Patent“. DE102016113929A1.
- Stöckle, Ulrich und Philippe Körner (2017). „Verfahren zum Reduzieren einer lokal erhöhten Viskosität von Tinte in einem Tintendruckkopf eines Tintendruckers während des Druckbetriebs: Offenlegungsschrift“. DE102015116656A1.
- Stöckle, Ulrich und Philippe Körner (2018). „Verfahren zum Ansteuern von Druckdüsen und Druckgerät zum Ausführen eines solchen Verfahrens: Patent“. DE102016124603A1.
- Tecnav Srl (2014). *WebVision 100% quality control*. Ivrea, Italien. URL: [www . tecnau . com / PDFs / WebVision\\_Brochure\\_A4\\_View . pdf](http://www.tecnau.com/PDFs/WebVision_Brochure_A4_View.pdf) (besucht am 02. 10. 2022).
- Tecnav Srl (2017). *Funktionszusagen: Produktangebot vom 16.11.2017*. Ivrea, Italien.
- Tectonic International LTD (2018). *Print Inspection: Hersteller Produkt Webseite*. Aberdare, Wales. URL: [www.tectonicinternational.com/print-inspection/](http://www.tectonicinternational.com/print-inspection/) (besucht am 02. 10. 2022).
- Torigoye, Makoto (1996). „High-quality Imaging Technologies for Color Bubble Jet Printers“. In: *IS AND T ANNUAL CONFERENCE*, S. 369–370.
- UPM GmbH (2017). *UPM Finesse matt: Produktdatenblatt*. Augsburg, Deutschland. URL: [www . upmpaper . com / siteassets / images / products -- services / paper - catalog / public / upm \\_ finesse \\_ matt \\_ de \\_ 231352 . pdf](http://www.upmpaper.com/siteassets/images/products--services/paper-catalog/public/upm_finesse_matt_de_231352.pdf) (besucht am 02. 10. 2022).

- 
- Videk Ink (2017). *Mobile Webinspection Budgetary Proposal and Quotation: Produktangebot vom 9.11.2017*. Fairport, NY, U.S.A.
- Videk Ink (2018). *Videk DocuVision® Pro Web Inspection Systems: Verify on the fly for exceptional color output*. Fairport, NY, U.S.A. URL: [www.videk.com/\\_files/ugd/6fa791\\_edb0f6b59f2941fab013aed00bfd0add.pdf](http://www.videk.com/_files/ugd/6fa791_edb0f6b59f2941fab013aed00bfd0add.pdf) (besucht am 02. 10. 2022).
- Vision Experts GmbH (2018). *Qualitätssicherung für pharmazeutische Verpackungen – 100% Inspektion und Sicherheit für Packungsbeilagen, Faltschachteln, Etiketten und Blister: Produktinformationen*. Karlsruhe, Deutschland. URL: [www.vision-experts.de/files/ve\\_pharma\\_d\\_new\\_1.pdf](http://www.vision-experts.de/files/ve_pharma_d_new_1.pdf) (besucht am 13.04.2018).
- Wijshoff, Herman (2010). „The dynamics of the piezo inkjet printhead operation“. In: *Physics reports* 491.4-5, S. 77–177.
- Wu, Hsuan-Chung, Huey-Juan Lin und Weng-Sing Hwang (2004). „A numerical study of the effect of operating parameters on drop formation in a squeeze mode inkjet device“. In: *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 13.1, S. 17.
- Yoshinori, KATO (2014). „FUJIFILM Group’s Inkjet Printhead and Technology“. In: *Fujifilm Research & Development* 59, S. 27–31.
- Zainuddin, Ahmad Anwar u. a. (2017). „Optimization of printing techniques for electrochemical biosensors“. In: *AIP Conference Proceedings*. Bd. 1808, S. 020066.
- Zapka, Werner, Sarah Pausch und Hans-Peter Rapp (2008). „Improved Reliability in Industrial Inkjet Printing“. In: *NIP & Digital Fabrication Conference*. Bd. 2008, S. 865–868.
- Zhang, Zhengyou (2000). „A flexible new technique for camera calibration“. In: *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 22.11, S. 1330–1334.
- Zollner, Werner u. a. (2016). „Verfahren zur Verbesserung der Systemstabilität von Inkjet-Drucksystemen: Offenlegungsschrift“. DE102015103102A1.



---

## Liste eigener Publikationen

- Schneider, Claus (2013). „Modularer Aufbau von Bahnlaufsimulation und Farbbregisterdarstellung an einer großindustriellen Tintenstrahlmaschine mit Matlab/Simulink“. Semesterthesis. München: Technische Universität München.
- Schneider, Claus, Philippe Körner u. a. (2018). „Verfahren zur Erkennung einer Querbewegung zwischen einer Druckeinheit und einem Aufzeichnungsträger: Patent“. DE102016120752A1.
- Schneider, Claus, Philippe Körner u. a. (2018). „Verfahren zur Ermittlung des Zustands mindestens einer Düse eines Tintenstrahl-Drucksystems: Offenlegungsschrift“. DE102016120753A1.
- Schneider, Claus, Philippe Körner u. a. (2018). „Verfahren und Steuereinheit zur Erkennung eines Zustands einer Düse zum Drucken von pigmentloser Flüssigkeit: Offenlegungsschrift“. DE102016122764A1.
- Schneider, Claus und Ulrich Stöckle (2019). „Drucksystem und Verfahren zum Erfassen eines Zustands einer Druckvorrichtung eines Drucksystems: Patent“. DE102017129231A1.
- Schneider, Claus und Christoph Rummelsberger (2020). „Automatisierte Vorrichtung zur Einstellung von Druckköpfen: Offenlegungsschrift“. DE102018133342A1.
- Schneider, Claus und Christoph Rummelsberger (2021). „Automated device for adjusting print heads: Patent“. US10,899,140.
- Schneider, Claus (2020). „Verfahren und Steuereinheit zum Druck eines Testbildes, sowie ein entsprechendes Testbild: Offenlegungsschrift“. DE102019101687A1.
- Schneider, Claus (2021). „Method and controller for printing a test image, and corresponding test image: Patent“. US10,922,593.
- Schneider, Claus (2020). „Method for determining print nozzles with errors of printing device: Offenlegungsschrift“. JP-2021094859-A.
- Schneider, Claus (2020). „Verfahren und Vorrichtung zum Ansteuern eines Aktors eines Tintenstrahl-drucksystems: Offenlegungsschrift“. DE102019104931A1.
- Schneider, Claus (2021). „Method and device for controlling an actuator of an inkjet printing system: Patent“. US11,207,882.
- Schneider, Claus (2020). „Verfahren und Vorrichtung zum Ansteuern von Druckelementen eines Tintenstrahl-drucksystems: Offenlegungsschrift“. DE102019104932A1.
- Schneider, Claus (2020). „Verfahren zum Ermitteln einer Konfiguration eines Kamerasystems zum Erfassen von Druckbildern: Patent“. DE102019122950B3.
- Schneider, Claus und Ulrich Stöckle (2021). „Verfahren und Verarbeitungseinheit zur Vorhersage und Kompensation eines Düsenausfalls: Offenlegungsschrift“. DE102019127279A1.
- Schneider, Claus und Ulrich Stöckle (2022). „Method and controller for predicting and compensating for a nozzle failure: Patent“. US11,338,575.
- Schneider, Claus und Ulrich Stöckle (2020). „Method and processing unit for predicting and compensating for nozzle failure: Offenlegungsschrift“. JP-2021062616-A.

- 
- Schneider, Claus und Ulrich Stöckle (2021). „Verfahren und Vorrichtung zum Synchronisieren einer ersten Druckvorrichtung mit einer zweiten Komponente, insbesondere einer zweiten Druckvorrichtung: Offenlegungsschrift“. DE102019127277A1.
- Schneider, Claus und Ulrich Stöckle (2022). „Method and device for synchronizing a first printing device with a second printing device: Patent“. US11,292,252.
- Schneider, Claus und Ulrich Stöckle (2021). „Verfahren und eine Vorrichtung zum korrekten Ermitteln von Einfärbeintensitäten in mindestens einem in einer Grundfarbe einer Druckvorrichtung gedruckten Druckbild: Offenlegungsschrift“. DE102019127278A1.
- Schneider, Claus (2021). „Verfahren zum Ermitteln von fehlerhaften Druckdüsen einer Druckvorrichtung: Offenlegungsschrift“. DE102019134721A1.
- Schneider, Claus (2020). „Method and device for determining faulty print nozzles of a printing device: Offenlegungsschrift“. US2021/0178,754.
- Medovy, Vladimir und Claus Schneider (2020). „Verfahren und Abtasteinheit zur Erkennung einer Düsen-Beeinträchtigung: Offenlegungsschrift“. DE102020131473A1.

---

## A. Anhänge

---

### A.1. Spezifikationen der benutzten Kamerasysteme

Die folgende Tabelle A.1 listet die technischen Daten der beiden verwendeten Kameras *allPixa pro* und *allPixa wave* auf. Die *allPixa pro* ist die Kamera des in Kapitel 3.1.4 beschriebenen Kamerasystems und bildet eine elementare Komponente der vorliegenden Arbeit. Die *allPixa wave* ist die Kamera aus dem Prototyp-Kamerasystem aus Kapitel 3.2.4.

Tabelle A.1.: In der dargestellten Tabelle finden sich die technischen Daten der Kamera *allPixa pro* des hauptsächlich in der Arbeit genutzten Kamerasystems und von der Kamera *allPixa wave* aus dem Prototyp-Kamerasystem.

Technische Daten	allPixa pro	allPixa wave
Sensor	Trilinearer CCD-Farbzeilensensor	Trilinear CMOS Sensor
Anzahl der Pixel	4096 x 3 Pixel	15.360 x 3 Pixel
Aktive Pixelgröße	10 $\mu\text{m}$ * 10 $\mu\text{m}$	5,6 $\mu\text{m}$ x 5,6 $\mu\text{m}$
Max. Zeilenrate	50,8 kHz	47,42 kHz
Datenformat	3 x 8/10 Bit Farbe	3 x 8/10/12 Bit Farbe
Video-Output	Camera Link @ 85MHz Full, Medium, Base	Camera Link @ 85Mhz Full (80/64 Bit), Medium, Base
Trigger Modi	Freilauf / Externer Trigger	Freilauf / Externer Trigger
Schnittstellen	Camera Link Full/Medium/Base Power supply (Hirose) External I/O (15 pin DSub) RS232	Camera Link Full/Medium/Base Power supply (Hirose) External I/O (15 pin DSub) RS232
Spannungsversorgung	24 V DC +/- 10 % < 19 W	12 – 24 V DC +/-10 % < 19 W
Betriebstemperatur	0°C bis 60°C (Gehäusetemperatur)	0°C bis 60°C (Gehäusetemperatur)
Gehäusemaße (LxHxT)	102 mm x 100 mm x 77 mm	102 mm x 100 mm x 58 mm
Objektivanschlüsse	F-Mount, C-Mount, M72x0.75	M95 x 1mm
Zertifizierungen	CE, RoHS	CE, RoHS

### A.2. Messungen der Tropfenpositionierung

Im Experiment zur Messung der Tropfenpositionierung in Kapitel 5.4 wurden drei Messreihen durchgeführt. Die Ergebnisse der Linienmessung sowie von ein- und mehrfarbigen Mustern werden in den folgenden drei Abschnitten in tabellarischer Form dargestellt.

## Ergebnisse der Linienmessungen

Im Experiment kurzer Linienmuster in Kapitel 5.4.1 wurden Druckbilder mit ein bis sechs aufeinander folgenden Tropfen einer Düse erzeugt, um zu prüfen welche Form die eingefärbte Fläche auf dem Substrat einnimmt. Die Impulsfolgen und deren Messergebnisse sind in den folgenden beiden Tabellen A.2 und A.3 aufgeführt.

Tabelle A.2.: Erster Teil der Tabelle mit untersuchten Impulsfolgen und gemessenen Parametern.

Impulsfolge	Linienlänge / px	Linienbreite / $\mu\text{m}$	Min. Pixelwert	Fragmentierung	Impulsfolge	Linienlänge / px	Linienbreite / $\mu\text{m}$	Min. Pixelwert	Fragmentierung	Impulsfolge	Linienlänge / px	Linienbreite / $\mu\text{m}$	Min. Pixelwert	Fragmentierung
1	1	34,4	183	1,2	1202	4	67,8	144	1,2	21212	5	72,2	136	1,1
2	1	50,9	167	1,1	1203	4	66,6	150	1,2	21221	5	76,1	138	1,1
3	1	51,4	164	1,2	1212	4	70,8	190	1,1	21223	5	80,3	127	1,1
11	2	51,1	166	1,1	1213	4	71,4	138	1,0	22222	5	81,2	120	1,1
12	2	59,4	154	1,0	1222	4	78,2	135	1,2	23032	5	81,9	133	1,2
13	2	60,9	152	1,1	1231	4	72,2	138	1,1	23122	5	77,5	137	1,2
21	2	59,5	161	1,1	1232	4	81,4	127	1,1	23131	5	75,5	135	1,2
22	2	63,8	152	1,1	1303	4	77,5	145	1,6	23132	5	81,4	125	1,1
23	2	68,8	152	1,2	1313	4	73,1	140	1,3	23212	5	80,5	130	1,1
31	2	57,3	156	1,1	1322	4	81,9	131	1,1	23221	5	79,5	129	1,1
32	2	69,8	151	1,2	1323	4	81,1	125	1,1	23223	5	83,6	129	1,1
33	2	69,5	151	1,1	1331	4	80,2	140	1,1	23231	5	79,0	131	1,1
101	3	40,3	176	2,1	2012	4	63,8	156	1,5	23232	5	83,5	126	1,2
102	3	57,8	162	1,2	2021	4	66,5	150	1,4	23311	5	79,6	131	1,8
103	3	56,2	158	1,3	2111	4	63,6	152	1,4	23313	5	84,5	127	1,1
111	3	53,7	157	1,2	2112	4	68,4	143	1,2	23321	5	84,6	125	1,2
112	3	64,1	151	1,3	2121	4	68,9	146	1,1	30301	5	73,1	155	2,3
113	3	66,8	149	1,1	2222	4	77,9	138	1,5	30302	5	77,4	147	1,4
121	3	60,5	151	1,0	2323	4	84,3	133	1,1	30303	5	76,5	144	1,4
122	3	72,3	136	1,0	2303	4	75,0	147	1,9	31121	5	74,5	142	1,3
123	3	72,6	138	1,0	2313	4	75,6	143	1,1	31302	5	73,2	145	1,4
131	3	66,8	154	1,1	2321	4	79,7	129	1,3	31311	5	69,8	144	1,7
132	3	73,8	140	1,0	3003	4	61,8	154	1,7	31313	5	75,6	136	1,1
133	3	73,2	139	1,1	3022	4	74,2	148	1,3	32023	5	79,9	139	1,3
201	3	53,7	165	1,7	3103	4	64,3	156	1,5	32112	5	76,2	138	1,1
202	3	63,9	160	1,2	3112	4	70,1	191	1,6	32113	5	76,3	136	1,3
203	3	65,5	160	1,4	3113	4	71,3	145	1,3	32123	5	78,8	132	1,2

Tabelle A.3.: Fortsetzung der Tabelle A.2 mit weiteren Impulsfolgen und gemessenen Parametern.

Impulsfolge	Linienlänge / px	Linienbreite / $\mu\text{m}$	Min. Pixelwert	Fragmentierung	Impulsfolge	Linienlänge / px	Linienbreite / $\mu\text{m}$	Min. Pixelwert	Fragmentierung	Impulsfolge	Linienlänge / px	Linienbreite / $\mu\text{m}$	Min. Pixelwert	Fragmentierung
211	3	59,7	157	1,4	3121	4	69,3	143	1,3	32212	5	79,1	133	1,1
212	3	64,3	148	1,1	3122	4	76,8	146	1,1	32311	5	80,0	130	1,5
213	3	69,4	141	1,2	3131	4	70,5	136	1,2	33033	5	85,9	145	1,5
221	3	66,9	150	1,1	3222	4	82,0	130	1,0	33121	5	75,8	140	1,3
222	3	76,5	143	1,2	3231	4	80,4	134	1,1	33122	5	78,5	137	1,2
223	3	73,6	136	1,1	3333	4	86,3	121	1,1	33133	5	82,9	133	1,1
231	3	70,2	148	1,1	10101	5	38,3	170	2,4	33211	5	79,9	134	1,7
232	3	76,3	134	1,0	11111	5	58,8	154	1,5	33212	5	80,6	134	1,1
233	3	77,5	125	1,1	11221	5	77,4	135	1,3	33232	5	83,9	125	1,3
301	3	54,4	157	1,5	11223	5	82,7	134	1,1	33333	5	88,2	122	1,2
302	3	68,5	156	1,5	12021	5	68,7	154	1,2	111111	6	61,0	152	1,3
303	3	70,0	155	1,6	12111	5	66,3	148	1,5	202021	6	69,8	150	1,4
311	3	63,4	152	1,6	12121	5	69,5	138	1,2	212121	6	73,6	141	1,2
312	3	68,7	147	1,1	12122	5	77,5	130	1,1	222222	6	83,2	125	1,1
313	3	67,5	141	1,1	12131	5	73,9	139	1,1	303031	6	77,4	146	1,4
321	3	72,2	152	1,2	12221	5	78,5	138	1,2	313131	6	78,0	134	1,3
322	3	77,2	139	1,1	12222	5	79,5	124	1,0	323232	6	88,2	120	1,1
323	3	78,8	142	1,1	12321	5	80,7	130	1,2	330033	6	78,6	141	1,6
331	3	69,9	149	1,2	12323	5	87,6	122	1,2	333333	6	91,0	114	1,3
332	3	77,5	131	1,0	13022	5	77,1	138	1,2	1111111	7	65,1	145	1,2
333	3	79,3	131	1,2	13031	5	78,0	140	1,4	2222222	7	88,2	119	1,1
1001	4	37,0	174	2,0	13112	5	71,5	148	1,1	3333333	7	95,2	113	1,2
1011	4	53,7	190	1,4	13211	5	76,6	132	1,6	11111111	8	63,4	142	1,1
1111	4	57,1	155	1,3	13213	5	78,9	134	1,2	22222222	8	90,0	112	1,0
1113	4	70,1	137	1,2	13222	5	86,2	119	1,0	33333333	8	94,7	111	1,3
1122	4	76,4	139	1,1	20202	5	70,4	151	1,4					
1131	4	73,4	144	1,3	21112	5	73,2	145	1,3					

## Ergebnisse der einfarbigen Muster

Die hier aufgeführten Ergebnisse der einfarbigen Muster beziehen sich auf die Untersuchungen in Kapitel 5. Im Experiment in Kapitel 5.4.2 werden für unterschiedliche Linienmuster die Länge des Druckbildes mit der Messqualität gegenübergestellt. Als Referenz wird das Testdruckmuster gemäß Kapitel 5.2 genutzt. Aus der Tabelle A.4 lassen sich in zwei Spalten die Kennzahlen (Impulsfolge und Linienanordnung) zur Identifikation der Linienmuster und die Messergebnisse entnehmen. Bei den Messwerten entsprechen die eingetragenen Werte zum Zweck von Grenzwertbetrachtungen den Ergebnissen der jeweils schlechtesten Proben.

Tabelle A.4.: Tabelle mit untersuchten, kompakten Linienmustern und gemessenen Parametern. Die erste Zeile der linken Hälfte beschreibt das Referenzmuster. Steht in der Spalte "Ausfälle korrekt" eine Zahl, so entspricht dies der Anzahl korrekt gemeldeter Ausfälle. Ein rotes Kreuz bedeutet, dass die Anzahl gemessener Ausfälle falsch war. Das Zeichen  $\Delta p$  steht für den Positionsversatz und  $\sigma$  repräsentiert die Standardabweichung des Versatzes aller Linien.

Impulsfolge	Linienanordnung	Reihen	Musterlänge / mm	Ausfälle korrekt	Anzahl versetzter Linien	$\Delta p$ zu Referenz / $\mu\text{m}$	$\sigma$ / $\mu\text{m}$	Impulsfolge	Linienanordnung	Reihen	Musterlänge / mm	Ausfälle korrekt	Anzahl versetzter Linien	$\Delta p$ zu Referenz / $\mu\text{m}$	$\sigma$ / $\mu\text{m}$
3 <sup>40</sup>	①	32	27,1	✓	2	0	5,08	3 <sup>15</sup>	⑤	12	3,81	✓	3	12,8	5,05
3 <sup>30</sup>	②	32	20,3	✓	5	15	5,73	3 <sup>12</sup>	⑤	12	3,05	✓	3	13,4	5,36
3 <sup>20</sup>	②	32	13,5	✓	6	13,1	6,02	3 <sup>10</sup>	⑤	12	2,54	✓	7	15,8	5,52
3 <sup>15</sup>	②	32	10,2	✓	8	20,9	6,34	3 <sup>90</sup>	⑤	12	2,52	✓	10	17	5,87
3 <sup>12</sup>	②	32	8,13	✓	16	30,7	7,1	03 <sup>80</sup>	⑤	12	2,5	✓	6	15,8	5,81
3 <sup>10</sup>	②	32	6,77	✓	19	23,3	7,29	3 <sup>9</sup>	⑤	12	2,29	✓	20	24,5	6,35
3 <sup>9</sup>	②	32	6,1	✓	18	22,1	7,47	3 <sup>80</sup>	⑤	12	2,26	✓	15	23,7	5,95
3 <sup>8</sup>	②	32	5,42	✓	50	18,1	8,31	03 <sup>70</sup>	⑤	12	2,24	✓	15	18,4	5,95
3 <sup>7</sup>	②	32	4,74	✓	96	26,5	11,69	3 <sup>8</sup>	⑤	12	2,03	✓	13	18,3	6,53
3 <sup>6</sup>	②	32	4,06	✓	635	20,4	20,17	3 <sup>70</sup>	⑤	12	2,01	✓	11	16,5	6,39
3 <sup>10</sup>	③	24	5,08	✓	61	14,5	8,2	03 <sup>60</sup>	⑤	12	1,99	4	19	19,4	6,15
3 <sup>9</sup>	③	24	4,57	✓	53	12,4	8,02	3 <sup>7</sup>	⑤	12	1,78	1	69	16,5	14,19
3 <sup>8</sup>	③	24	4,06	✓	82	15,8	8,7	3 <sup>60</sup>	⑤	12	1,76	9	237	14,5	16,35
3 <sup>7</sup>	③	24	3,56	✓	88	19	10,17	03 <sup>50</sup>	⑤	12	1,74	8	50	15	7,93
3 <sup>6</sup>	③	24	3,05	✓	104	27	9,14	3 <sup>6</sup>	⑤	12	1,52	✗	194	14,6	11,17
3 <sup>10</sup>	④	16	3,39	✓	40	27,4	7,95	3 <sup>50</sup>	⑤	12	1,5	2	150	20,1	9,37
3 <sup>90</sup>	④	16	3,37	✓	44	16	8,07	03 <sup>40</sup>	⑤	12	1,48	✗	53	18	7,44
03 <sup>80</sup>	④	16	3,34	✓	72	13,8	8,28	3 <sup>10</sup>	⑥	8	1,69	2	92	20,1	8,84
3 <sup>9</sup>	④	16	3,05	✓	43	22,4	7,89	3 <sup>90</sup>	⑥	8	1,67	✓	59	21,8	8,42
3 <sup>80</sup>	④	16	3,03	✓	40	15,5	7,98	03 <sup>80</sup>	⑥	8	1,65	2	64	15,8	8,34
03 <sup>70</sup>	④	16	3,01	✓	27	18,3	7,88	3 <sup>9</sup>	⑥	8	1,52	5	171	19,5	11,5
3 <sup>8</sup>	④	16	2,71	✓	87	24,4	8,89	3 <sup>80</sup>	⑥	8	1,5	2	96	17,9	9,05
3 <sup>70</sup>	④	16	2,69	✓	72	26,4	8,61	03 <sup>70</sup>	⑥	8	1,48	1	55	16,3	8,38
03 <sup>60</sup>	④	16	2,67	✓	77	32,3	8,87	3 <sup>8</sup>	⑥	8	1,35	5	350	21,1	14,89
3 <sup>7</sup>	④	16	2,37	✓	77	20,5	8,86	3 <sup>70</sup>	⑥	8	1,33	3	115	14,3	9,27
3 <sup>60</sup>	④	16	2,35	2	87	25,7	9,43	03 <sup>60</sup>	⑥	8	1,31	4	110	15,9	9,13
03 <sup>50</sup>	④	16	2,33	✓	98	22,4	9,05	3 <sup>7</sup>	⑥	8	1,19	11	395	32,8	16,89
3 <sup>6</sup>	④	16	2,03	1	159	20,2	10,61	3 <sup>60</sup>	⑥	8	1,16	5	314	22,4	14,45
3 <sup>50</sup>	④	16	2,01	1	118	29,1	9,53	03 <sup>50</sup>	⑥	8	1,14	✗	132	22,5	9,58
03 <sup>40</sup>	④	16	1,99	8	137	23	10,52	3 <sup>6</sup>	⑥	8	1,02	13	421	26	14,8

## Ergebnisse der mehrfarbigen Muster

Die Tabelle A.5 zeigt die Kennzahlen und Ergebnisse zur zweiten Stufe des Experiments aus Kapitel 5. Im Unterkapitel 5.4.3 wurden Linienmuster untersucht, die mehrere Tinten kombinieren.

Tabelle A.5.: Tabelle mit untersuchten Linienmustern mit kombinierten Tinten und gemessenen Parametern. Die ersten vier Zeilen stellen das Referenzmuster dar. Die ersten fünf Spalten sind die vorgegebenen Geometrien des jeweiligen Musters, gefolgt von den resultierenden Längen. Die rechten sieben Spalten sind die Ergebnisse der Versuche. Das Zeichen  $\Delta p$  steht für den Positionsversatz und  $\sigma$  repräsentiert die Standardabweichung des Versatzes aller Linien.

Impulsfolge	Linienanordnung	Reihen	Tintenkombination	Querversatz	Musterlänge / mm	Länge je Tinte / mm	Ausfälle korrekt	Versetzte Linien	$\Delta p$ / $\mu\text{m}$	$\sigma$ Cyan / $\mu\text{m}$	$\sigma$ Magenta / $\mu\text{m}$	$\sigma$ Gelb / $\mu\text{m}$	$\sigma$ Schwarz / $\mu\text{m}$
3 <sup>40</sup>	①	32	C	32	27,1	27,1	✓	47	0	4,97			
3 <sup>40</sup>	①	32	M	32	27,1	27,1	✓	1	0		3,46		
3 <sup>40</sup>	①	32	Y	32	27,1	27,1	✓	22	0			4,61	
3 <sup>40</sup>	①	32	K	32	27,1	27,1	✓	1	0				3,83
3 <sup>10</sup>	②	32	CMYK	8	6,77	1,69	✓	31	10,3	5,62	4,59	4,87	5,33
3 <sup>10</sup>	③	24	CMYK	6	5,08	1,27	✓	51	10	5,94	5,2	6,43	6,96
3 <sup>10</sup>	④	16	CMYK	4	3,39	0,85	145	40	10,1	5,75	4,22	5,15	6,02
3 <sup>10</sup>	③	24	CMY	8	5,08	1,69	✓	50	10,2	6,53	5,1	5,4	
3 <sup>10</sup>	④	16	CMY	5	3,39	1,13	2	98	9,4	7,51	4,77	5,24	
3 <sup>10</sup>	⑤	12	CMY	4	2,54	0,85	54	160	10,8	8,48	5,38	6,74	
3 <sup>10</sup>	③	24	CM	12	5,08	2,54	✓	64	10,1	7,55	6,65		
3 <sup>10</sup>	③	24	CY	12	5,08	2,54	✓	57	9,9	6,58		5,7	
3 <sup>10</sup>	③	24	CK	12	5,08	2,54	✓	56	8,4	6,07			5,47
3 <sup>10</sup>	③	24	MY	12	5,08	2,54	✓	6	10,5		5,02	5,44	
3 <sup>10</sup>	③	24	MK	12	5,08	2,54	✓	3	7,9		4,26		5,07
3 <sup>10</sup>	③	24	YK	12	5,08	2,54	✓	4	12,8			4,54	5,17
3 <sup>10</sup>	④	16	CM	8	3,39	1,7	✓	62	8	6,62	4,85		
3 <sup>10</sup>	④	16	CY	8	3,39	1,7	✓	58	19,2	6,99		5,94	
3 <sup>10</sup>	④	16	CK	8	3,39	1,7	✓	44	9,9	6,02			5,75
3 <sup>10</sup>	④	16	MY	8	3,39	1,7	✓	3	12		4,59	4,67	
3 <sup>10</sup>	④	16	MK	8	3,39	1,7	✓	6	8,6		4,65		5,64
3 <sup>10</sup>	④	16	YK	8	3,39	1,7	✓	2	13,1			4,86	5,29
3 <sup>10</sup>	⑤	12	CM	6	2,54	1,27	2	151	12,6	8,37	6,25		
3 <sup>10</sup>	⑤	12	CY	6	2,54	1,27	✓	214	17,6	9,09		7,7	
3 <sup>10</sup>	⑤	12	CK	6	2,54	1,27	✓	179	12,9	7,41			9,21
3 <sup>10</sup>	⑤	12	MY	6	2,54	1,27	✓	26	11,5		5,88	6,74	
3 <sup>10</sup>	⑤	12	MK	6	2,54	1,27	✓	193	10,8		6,03		9,65
3 <sup>10</sup>	⑤	12	YK	6	2,54	1,27	✓	104	10,5			8,02	7,58

---

### **A.3. Aufbau des resultierenden Druckmusters**

In dem Experiment in Kapitel 4.3 wurde ein Testdruckmuster für die Überprüfung von Düsenausfällen im Beschnitt entwickelt, das trotz kurzer Länge auf der Substratbahn eine hohe Messqualität liefert. Die Tabelle A.6 zeigt für jede der drei Druckphasen einer Düsenreihe den örtlichen und zeitlichen Abstand zwischen dem Beginn des Musters und dem Tropfenausstoß der Düsen in der jeweiligen Linienreihe und Druckphase.



Tabelle A.6.: Die Tabelle zeigt das Orts- und Zeitverhalten des Tropfenausstoßes jeder Düsenreihe beim Drucken des Testdruckmusters. Die eingetragenen Werte repräsentieren das Linienmuster mit der Impulsfolge 3<sup>7</sup>0 und Linienanordnung ⑤ für eine Druckgeschwindigkeit von 80  $\frac{\text{m}}{\text{min}}$ . In diesem Linienmuster hat jede Düsenreihe drei Druckphasen, in denen jeweils ein Achtel der Linien einer Linienreihe (LR) gedruckt werden. Für jede Druckphase wurden der Positionsunterschied  $\Delta s$  und die Zeitdifferenz  $\Delta t$  zum Druckbeginn des Linienmusters ermittelt.

Düsenreihe	1. Druckphase			2. Druckphase			3. Druckphase		
	LR	$\Delta s / \text{Dots}$	$\Delta t / \text{ms}$	LR	$\Delta s / \text{Dots}$	$\Delta t / \text{ms}$	LR	$\Delta s / \text{Dots}$	$\Delta t / \text{ms}$
1	1	0	0	5	32	0,51	9	64	1,02
2	2	88	1,40	6	120	1,91	10	152	2,41
3	3	106	1,68	7	138	2,19	11	170	2,70
4	4	194	3,08	8	226	3,59	12	258	4,10
5	1	180	2,86	5	212	3,37	9	244	3,87
6	2	268	4,25	6	300	4,76	10	332	5,27
7	3	286	4,54	7	318	5,05	11	350	5,56
8	4	374	5,94	8	406	6,45	12	438	6,95
9	1	360	5,72	5	392	6,22	9	424	6,73
10	2	448	7,11	6	480	7,62	10	512	8,13
11	3	466	7,40	7	498	7,91	11	530	8,41
12	4	554	8,79	8	586	9,30	12	618	9,81
13	1	540	8,57	5	572	9,08	9	604	9,59
14	2	628	9,97	6	660	10,48	10	692	10,99
15	3	646	10,26	7	678	10,76	11	710	11,27
16	4	734	11,65	8	766	12,16	12	798	12,67
17	1	810	12,86	5	842	13,37	9	874	13,87
18	2	898	14,26	6	930	14,76	10	962	15,27
19	3	916	14,54	7	948	15,05	11	980	15,56
20	4	1004	15,94	8	1036	16,45	12	1068	16,95
21	1	990	15,72	5	1022	16,22	9	1054	16,73
22	2	1078	17,11	6	1110	17,62	10	1142	18,13
23	3	1096	17,40	7	1128	17,91	11	1160	18,42
24	4	1184	18,80	8	1216	19,30	12	1248	19,81
25	1	1170	18,57	5	1202	19,08	9	1234	19,59
26	2	1258	19,97	6	1290	20,48	10	1322	20,99
27	3	1276	20,26	7	1308	20,76	11	1340	21,27
28	4	1364	21,65	8	1396	22,16	12	1428	22,67
29	1	1350	21,43	5	1382	21,94	9	1414	22,45
30	2	1438	22,83	6	1470	23,34	10	1502	23,84
31	3	1456	23,11	7	1488	23,62	11	1520	24,13
32	4	1544	24,51	8	1576	25,02	12	1608	25,53