

# Schlussbericht vom 30.04.2023

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 21377 N

## Thema

Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens und Sensors zur  
Farbschichtdickenmessung an einer Offset-Druckmaschine

## Berichtszeitraum

01.10.2020-30.09.2022

## Forschungsvereinigung

Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. - FKM

## Forschungseinrichtung(en)

Institut für Lasertechnologien in der Medizin und Meßtechnik an der Universität Ulm

Gefördert durch:

## **Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens und Sensors zur Farbschichtdickenmessung an einer Offset-Druckmaschine**

### **Wissenschaftlicher Schlussbericht**

#### **Kurzfassung:**

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines Verfahrens zur berührungslosen und zerstörungsfreien Farbschichtdickenbestimmung von Druckfarben an einer laufenden Offset-Druckmaschine unter realen Druckbedingungen. Das Projekt war ein Folgeprojekt zum IGF-Vorhaben Nr. 18829 N: Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur kombinierten Schichtdicken- und Feuchtmittelmessung an einer Offset-Druckmaschine. In diesem Vorgängerprojekt wurde bereits ein Laborsystem zur Messung der Farbschichtdicke erstellt und getestet. In diesem Folgeprojekt sollten die Systemparameter weiter optimiert, das System verkleinert und vereinfacht werden und die Korrelation der Farbschichtdicke mit der Farbdichte auf dem gedruckten Bogen untersucht werden.

Zunächst wurden die spektralen Eigenschaften der vier Grundfarben beim Offsetdruck untersucht, um die beim Vorgängerprojekt wellenlängenbedingt vorliegenden starken Absorptionsunterschiede der Farben bei der Anregungswellenlänge von 808 nm zu verringern. Bei der spektralen Untersuchung erwies sich der Wellenlängenbereich um 400 nm als besser geeignet, da die Druckfarben in diesem Spektralbereich annähernd gleiche Absorptionswerte haben. Als Ergebnis dieser Untersuchung wurde ein Anregungslaser mit der Wellenlänge von 405 nm gewählt. Zur Vereinfachung und Verkleinerung des Sensorsystems wurde außerdem der Infrarotdetektor mit Stirlingkühlung durch einen IR-Detektor mit 4-fach Peltierkühlung ersetzt. Ebenso wurde der Lock-in-Verstärker gegen eine Messkarte und eine digitale Lock-in-Auswertung ausgetauscht. Das Sensorsystem wurde aufgebaut und sowohl im Labor als auch abschließend an der Druckmaschine getestet. Im Laboraufbau konnte eine gute lineare Korrelation zwischen dem photothermischen Phasensignal und der gravimetrisch gemessenen Schichtdicke der Druckfarbe auf der Messwalze auch mit dem neuen Messsystem bestätigt werden. An der Druckmaschine konnte auch die Korrelation zwischen der Farbdichte und der Phase des photothermischen Signals aufgenommen werden. Eine lineare Korrelation konnte bei den Volltondrucken, jedoch nicht bei den Rasterdrucken gezeigt werden.

Insgesamt konnten die Arbeitspakete wie geplant durchgeführt werden.

## Ausgangslage nach dem Vorgängerprojekt (IGF-Vorhaben Nr. 18829 N)

Im vorangegangenen Forschungsprojekt konnte gezeigt werden, dass photothermische Messverfahren prinzipiell für die Inline-Farbschichtdickenmessung geeignet sind. Für die Skalenbuntfarben Cyan, Magenta und Gelb konnte eine sehr gute Korrelation zwischen der gravimetrisch ermittelten Farbschichtdicke auf der Messwalze, dem in Lock-in-Technik detektierten photothermischen Phasensignal und der densitometrisch ermittelten Volltondichte erzielt werden. Dies ist in Abbildung 1 exemplarisch für die Farbe Cyan dargestellt.

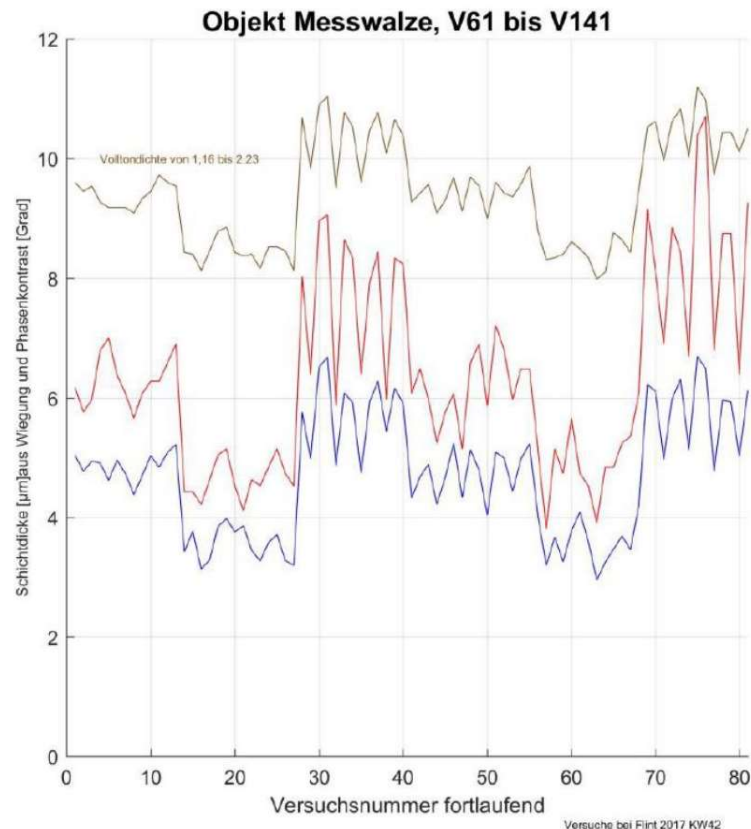


Abbildung 1: Gravimetrisch bestimmte Farbschichtdicke (rot) - variierend von 4,2 µm-10,6 µm, photothermisch bestimmte Phasendifferenz auf Messwalze (blau) - variierend von 3,0-6,7 Grad und densitometrisch bestimmte Volltondichte (grau) - variierend von 1,16 bis 2,23. Man erkennt, dass das photothermische Signal sowohl der gravimetrisch bestimmten Schichtdicke als auch der Volltondichte sehr gut folgt

Der Kurvenverlauf folgt dabei in Übereinstimmung der Duktoreinstellung, die feinen Variationen lassen sich durch veränderte Maschinenparameter erklären. Diese sehr gute Korrelation der Messwerte, die auch statistisch mit Regressionsanalysen betätigt werden konnte, ließ eine gute Langzeitstabilität erwarten, da die Messungen über viele Stunden verteilt durchgeführt wurden. Dieses Verfahren wurde in diesem Folgeprojekt weiter für die Integration an der Druckmaschine verbessert. Dazu gehört neben einer Vereinfachung der Komponenten und einer Verkleinerung des Systems vor allem auch die direkte Messung auf der Farbauftragswalze anstatt einer separaten Messwalze und direkte Korrelation zwischen der photothermisch gemessenen Phasendifferenz und der photometrisch bestimmten Farbdichte.

## **Motivation/wirtschaftliche Problemstellung und Stand der Forschung am ILM Ulm**

Ein hoher Anteil der weltweit erstellten Druckprodukte – mehr als 70 % - wird auf Offset-Druckmaschinen hergestellt. Trotz neuer Technologien, wie dem Internet auf dem Info- und Werbemarkt und dem Digitaldruck für Home- und Office-Anwendungen, wird der Offset-Druck durch seine Performance im Massen- und Spezialgeschäft auch in absehbarer Zeit einen großen Anteil am weltweiten Druckaufkommen haben und aus verschiedenen Gründen, wie z.B. ganz neuen Anwendungen oder neuen Märkten in Schwellenländern, das absolute Druckaufkommen weiter steigern können. Aus Wettbewerbsgründen ist eine ständige Weiterentwicklung der Offset-Anlagen erforderlich und für die Hersteller von großer Bedeutung. Die Entwicklungen zielen in verschiedene Richtungen, z.B. Qualitätssteigerung der Druckprodukte, Drucken von 3D-Effekten, Sicherheitsmerkmalen oder elektronischen Schaltungen, ressourcenschonendes Drucken durch Einsparen von Farbe, Papier und Energie und umweltschonendes Drucken durch Automatisierung und Einsatz umweltfreundlicher Materialien. Gerade die Automatisierung ermöglicht bereits die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit des Offset-Drucks gegenüber dem digitalen Inkjet-Druck bei Kleinauflagen ab 100 Exemplaren. Für den weiteren Fortschritt ist es u.a. erforderlich, die Prozesse in der Maschine, z.B. die Interaktionen von Farbe, Wasser und Umgebung bei den verschiedensten Randbedingungen mit Sensoren zu erfassen, um daraus belastbare Modelle zu entwickeln. So können die Wirtschaftlichkeit, Qualität und Ressourcenschonung beim Druck verbessert werden. Ein wichtiger Beitrag dazu wäre, die Farbverteilung und die Farbströme im Offset-Farbwerk mit einem geeigneten Messverfahren genau bestimmen zu können. Studien der Forschungsgesellschaft Druckmaschinen zeigten, dass zum damaligen Zeitpunkt schien kein Verfahren aussichtsreich und kein verfügbares Messgerät praxistauglich zu sein schien, Farbschichtdicken inline im Farbwerk unter den spezifischen Randbedingungen zufriedenstellend messen zu können.

Die photothermischen Messverfahren (vgl. Abbildung 2) beruhen im klassischen Fall auf der durch amplitudenmodulierte oder gepulste Bestrahlung erzeugten Erwärmung einer Probenoberfläche, die sich durch Diffusion in der Probe und im umgebenden Medium ausbreitet. Die Temperaturverteilung wird dabei durch die Materialeigenschaften, den Aufbau und die Geometrie der Probe beeinflusst. Die durch Strukturänderungen, Variation thermischer Parameter, Defekte oder Inhomogenitäten im Material geänderte Temperaturantwort auf die periodische oder gepulste Anregung kann mit Hilfe angepasster Techniken erfasst und registriert werden. Für den Einsatz im produktionsnahen Umfeld eignet sich die radiometrische Detektion am besten. Die Messsignale Amplitude (Temperaturerhöhung im Bereich der Bestrahlung) und Phase (Zeitverzögerung der thermischen Antwort gegenüber der Anregung) zeigen zerstörungsfrei und berührungslos Unterschiede der thermischen Materialeigenschaften an der Oberfläche und in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz auch in oberflächennahen Bereichen an.

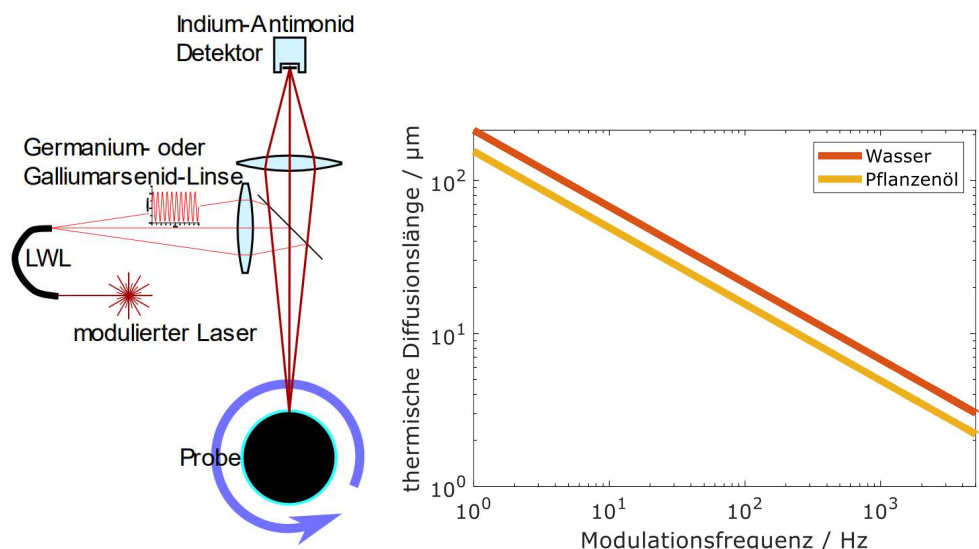


Abbildung 2: Prinzip photothermischer Messverfahren (links) und thermische Diffusionslängen für Pflanzenöl und Wasser (rechts)

Im vorangegangenen Forschungsprojekt (IGF-Vorhaben Nr. 18829 N) konnte gezeigt werden, dass photothermische Messverfahren prinzipiell für die Inline-Farbschichtdickenmessung geeignet sind. Nachdem die grundsätzliche Eignung des photothermischen Messverfahrens zur Schichtdickenbestimmung von Druckfarben im vorausgegangenen Projekt bei den Wellenlängen 808 nm und eingeschränkt mit 10,6 μm sowohl im Labor als auch an der Druckmaschine gezeigt werden konnte, sind nun in einem weiteren Schritt Verfahren und Sensorhardware so weiterentwickelt worden, dass der Einsatz an einer Offset-Druckmaschine unter realen Bedingungen möglich ist. Dabei wurde gleichzeitig auch, die im Vorprojekt zu Tage getretenen Limitierungen hinsichtlich der Messbarkeit aller Farben und teilweiser Beschränkung der Schichtdicke überwunden, die durch die sehr unterschiedliche, farbspezifische Absorption der Druckfarben und die hohe Modulationsfrequenz hervorgerufen wird. Die Modulationsfrequenz scheint bei erhöhter Absorption (Schwarz@808 nm) die messbare Schichtdicke auf 2-3 μm zu limitieren (vgl. Abbildung 3). Dies kann durch die frequenzabhängige thermische Diffusionslänge von ca. 3 μm bei 2008 Hz erklärt werden (vgl. Abbildung 2).

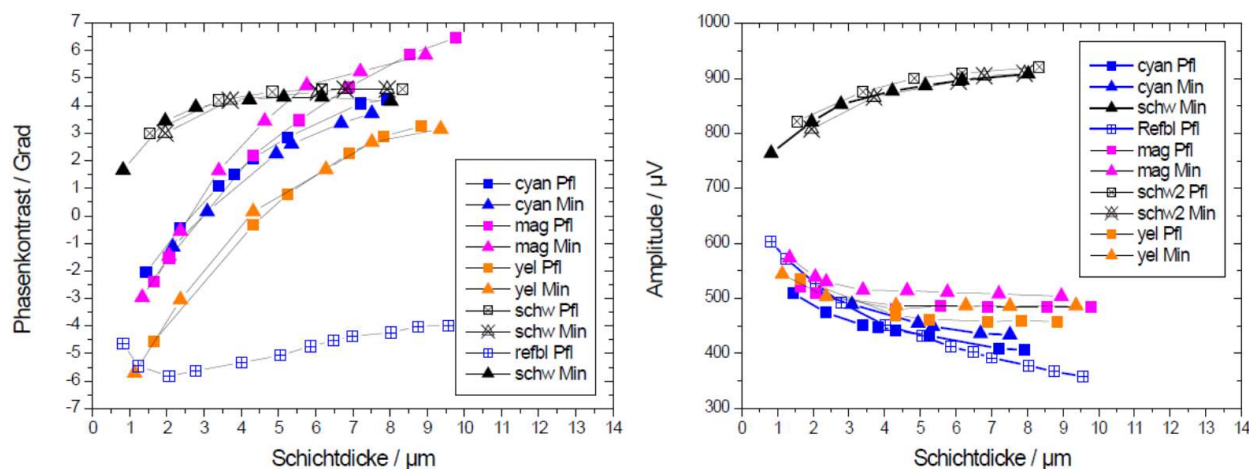


Abbildung 3: links: Kalibrierkurven zur photothermischen Schichtdickenbestimmung für Messungen bei 808 nm Laserwellenlänge bei der Modulationsfrequenz 2008 Hz für versch. Farben auf Gummiwalze) rechts: Amplitude des photothermischen Signals.

## Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

### AP 1: Verbesserung der Systemkonfiguration

#### AP 1.1 Auswahl der idealen Parameter für das photothermische Messverfahren

##### *Aufbau der Simulationsumgebung zur Optimierung des Messsystems*

Da die Farbschichtdicke auf Mess- oder Farbauftragswalzen nur sehr aufwändig und nur ungenau messbar ist, wurde das Schichtsystem Farbschicht – Walzengummi – Walzenkern einschließlich einer periodischen thermischen Anregung durch Laserstrahlung in einem Simulationsmodell abgebildet. Dieses Simulationsmodell wurde mit Python implementiert und basiert auf einer vom Institut für Lasertechnologien in der Medizin und Meßtechnik publizierten Veröffentlichung von Reitzle et al.<sup>1</sup> Das Modell beschreibt eine linear zeitabhängig Wärmeleitungsgleichung, welche einen Stapel von Schichten mit anisotropen Wärmeleitfähigkeiten über den Fourier-Laplace-Raum löst. Sie umfasst interne Wärmequellen, konvektive äußere Grenzen mit variierenden äußeren Fluidtemperaturen und Schichten in Raum und Zeit mit gleichmäßiger Verschiebungsgeschwindigkeit der thermischen Laserquelle. Als Probenkörper wurde in der Simulation ein Zylinder implementiert, dessen Mantelumfang der Länge des Mediums ( $q_x$ ) entspricht. Die Bewegung der Wärmequelle über die Oberfläche des Zylindermantels und deren Periodizität wurde entsprechend des Durchmessers und der Drehfrequenz der Walze festgelegt. Die Wärmequelle wurde als Oberflächenabsorber beschrieben. Dies ist eine geeignete Näherung, da die Strahlung der Wärmequelle nur geringfügig in das Medium/die Walzenoberfläche eindringt (Farbschichtdicken  $< 15 \mu\text{m}$ ).

##### *Erzielte Ergebnisse der Simulation*

Die Simulation beschreibt den „Steady State“ nach der Erwärmungsphase, in dem sich die Walze bei den vordefinierten Parametern im thermischen Gleichgewicht befindet.

Es wurden 3 Schichten dargestellt und die Strahlungsquelle bewegte sich wie zuvor beschrieben entlang des Mantelumfanges der Walze an der Oberfläche der Farbschicht. In der Simulation können sowohl die Parameter Dichte, Wärmekapazität, Schichtdicke der 3 Schichten als auch der Spotdurchmesser, die Modulationsfrequenz der Laseranregung und die Rotationsfrequenz der Walze eingestellt und auf ihren Einfluss untersucht werden.

Als Ergebnis der Simulation sind in Abbildung 4 die komplexen Werte (Amplitude und Phase) des Wärmesignals auf dem Messwalzenmantel dargestellt.

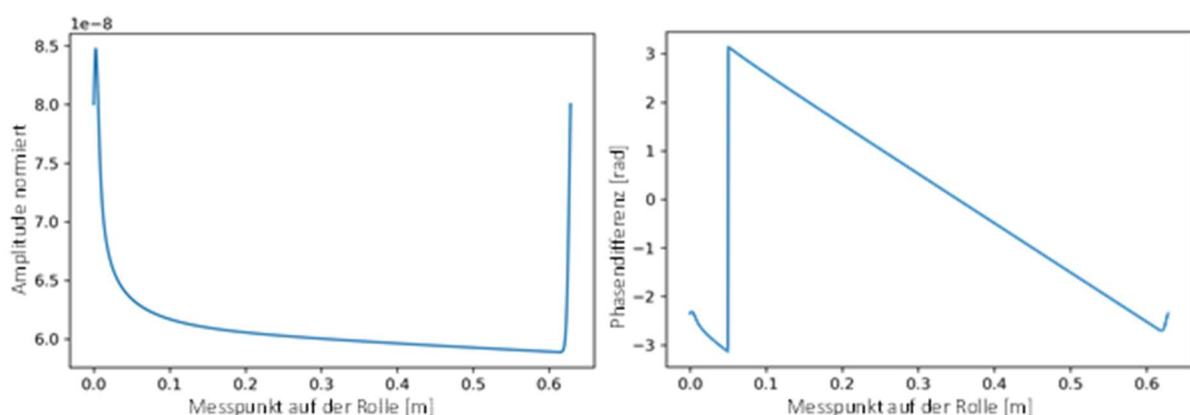


Abbildung 4: Wärmesignal im Steady State: Amplitude (links) und Phasenverschiebung (rechts) über den Weg des Walzenumfangs/der Rolle. Hierfür wurden folgende Beispielparameter angenommen: Aluminiumwalze, Walzendurchmesser 0,2 m, Farbschichtdicke  $1 \mu\text{m}$ , Spotdurchmesser 5 mm

<sup>1</sup> Reitzle et al. Semi-analytical solution of the time-dependent heat equation for three-dimensional anisotropic multi-layered media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 134, 2019, 984-992, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.174>.

Der kleineren Walzendurchmessern ergibt sich eine stabilere Phase im Bereich um den Anregungspunkt (Abbildung 2: flacher Verlauf des Phasendifferenzwerts im unteren rechten Bild am linken und rechten Kurvenrand).

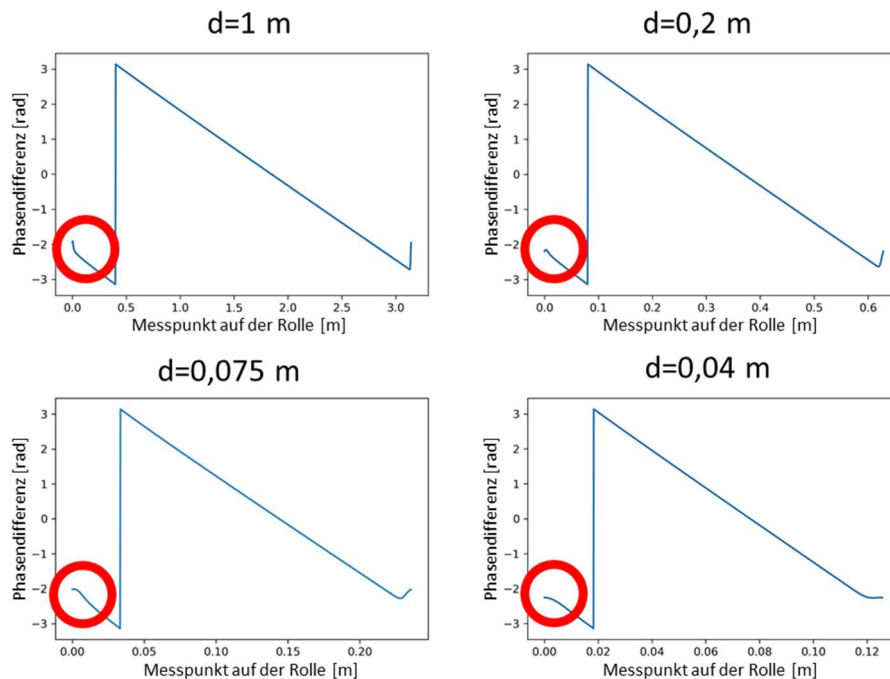


Abbildung 5: Phasenverschiebung über den Weg des Walzenumfangs/der Rolle bei verschiedenen Durchmessern in Meter. Bei geringem Durchmesser ist das Phasensignal auch in der Umgebung des Messpunkts 0,00 m relativ stabil, verglichen mit größeren Durchmessern, bei denen der Verlauf der Phasendifferenzwerte eine größere Steigung hat. Hierfür wurden folgende Beispielparameter angenommen: Aluminiumwalze, Walzendurchmesser 0,2 m, Farbschichtdicke 1  $\mu\text{m}$ , Spotdurchmesser 5 mm

Eine der wichtigsten erforderlichen Eigenschaften muss eine Korrelation zwischen der Farbschichtdicke auf der Farbwalze und der detektierten Phasenverschiebung zwischen Anregungs- und Detektionssignal sein. Um eine gute Auflösung zu erhalten, sollte sich die Phasendifferenz möglichst stark in Abhängigkeit von der Farbschichtdicke ändern. In der Simulation konnte gezeigt werden, dass sich der Phasendifferenzwert am stärksten bei einer geringfügigen Verstimmung zwischen der Laseranregungsfrequenz und der Walzenrotationsfrequenz von 1%-2% ändert (vgl. Abbildung 6). Unter diesen Bedingungen verschiebt sich die Lage stärkster und schwächster Bestrahlung auf der Walze bei jeder Umdrehung nur geringfügig.

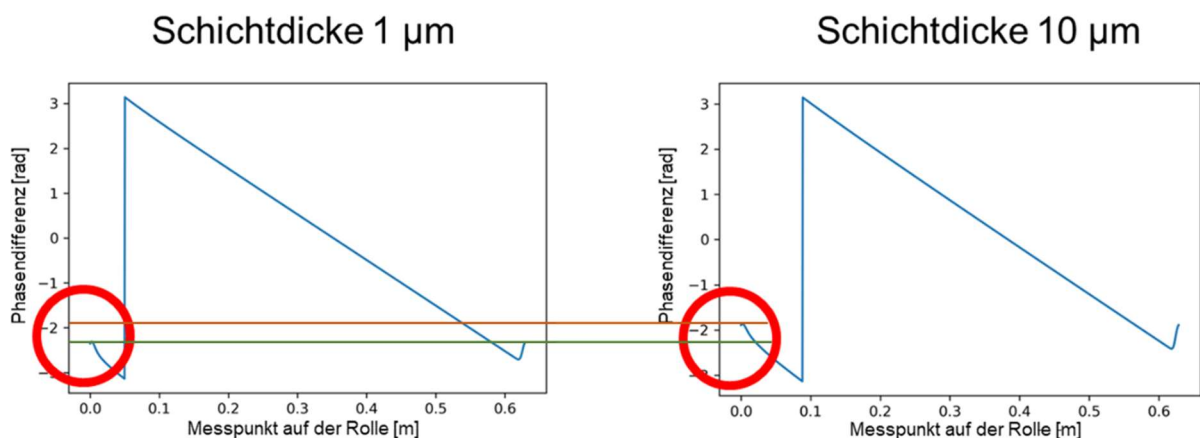


Abbildung 6: Phasenverschiebung über dem Weg des Walzenumfangs der Rolle bei verschiedenen Schichtdicken Durchmessern in Meter. Eine Verstimmung von Anregungsfrequenz zur Rotationsfrequenz von 1%-2% führt zur stärksten Phasendifferenz im Messpunkt (0,0 m). Hierfür wurden folgende Beispielparameter angenommen: Anregungsfrequenz 101 Hz, Rotationsfrequenz (Walze) 100 Hz, Aluminiumwalze, Walzendurchmesser 0,2 m, Farbschichtdicke 1  $\mu\text{m}$ , Spotdurchmesser 5 mm. Die Phasendifferenz beträgt  $23^\circ$  bei einem Schichtdickenunterschied von 9  $\mu\text{m}$ .

Weiterhin hat die Modulationsamplitude der Anregungsstrahlung zwar keinen direkten Einfluss auf die Phasendifferenz, jedoch einen wesentlichen Einfluss auf das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und somit auf die Messgenauigkeit. Hierbei ist ein Kompromiss zwischen bestmöglichem SNR und dem Leistungseintrag zu finden, weil eine zu hohe Leistung photochemische Prozesse in der Druckfarbe, eine Schädigung der Walze oder thermische Veränderungen in der Druckfarbe hervorrufen kann. In diesem Zusammenhang wurden für die Messungen konventionelle Druckfarben verwendet und die Strahlungsdosis pro Fläche so festgelegt, dass thermische Veränderungen der Druckfarbe oder gar thermische Schäden an der Farbwalze ausgeschlossen werden können.

Die von der Modulationsfrequenz abhängige thermische Diffusionslänge (Abbildung 2 rechts) bestimmt wesentlich das Messintervall, in dem Farbschichtdicken gemessen werden können. Vom projektbegleitenden Ausschuss wurde festgelegt, dass Schichtdicken bis 15  $\mu\text{m}$  gemessen werden sollen. Deshalb wurde die Modulationsfrequenz der Laseranregung in den Bereich um 100 Hz gelegt, weil die thermische Diffusionslänge von Ölfarben bei dieser Frequenz  $\sim 15 \mu\text{m}$  beträgt.

### **Experimentelle Bestimmung der optimalen Wellenlänge**

Mit der Laseranregung soll ein modulierter Wärmeeintrag in die Farbschicht erfolgen. Da die Absorption der Farben bei der im Vorprojekt verwendeten NIR-Laserquelle (808 nm) nur schwach und vor allem sehr unterschiedlich ist, ergeben sich auch sehr unterschiedliche farbabhängige Messsignale. Dies würde eine farbabhängige Kalibrierung erforderlich machen. Um dies zu vermeiden, wurde mit spektralen Untersuchungen ein Wellenlängenbereich gesucht, in dem die Absorptionsunterschiede der verschiedenen Druckfarben minimiert sind. Deshalb wurden die Absorptionskoeffizienten  $\mu_a$  der unterschiedlichen Farben spektral aufgelöst bestimmt. Zur Messung wurden die Farbproben wegen ihrer sehr starken Absorption und Streuung verdünnt und anschließend nach einer vom ILM publizierten Messmethode (Bergmann et al.<sup>2</sup>) spektral vermessen (Abbildung 4).

Die verdünnte Farbe wurde in eine Küvette gefüllt und auf einer Ulbrichtkugel befestigt (Abbildung 8)

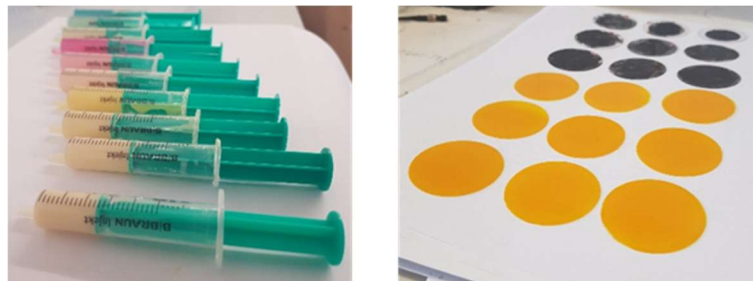


Abbildung 7: Druckfarben in Verdünnungsstufen mit dem Bindemittel der Druckfarben als flüssiges Verdünnungsmittel (links) und die damit vorbereiteten Messküvetten zur Absorptionsbestimmung (rechts)

Aus den Messdaten wurden dann der Absorptionskoeffizient und der Streukoeffizient bestimmt. Das Messprozedere wurde für jede Farbe mit je drei Verdünnungsstufen durchgeführt.

<sup>2</sup> Bergmann et al. Precise determination of the optical properties of turbid media using an optimized integrating sphere and advanced Monte Carlo simulations. Part 2: experiments. Applied Optics Vol. 59, Issue 10 pp. 3216-3226 (2020), <https://doi.org/10.1364/AO.385939>



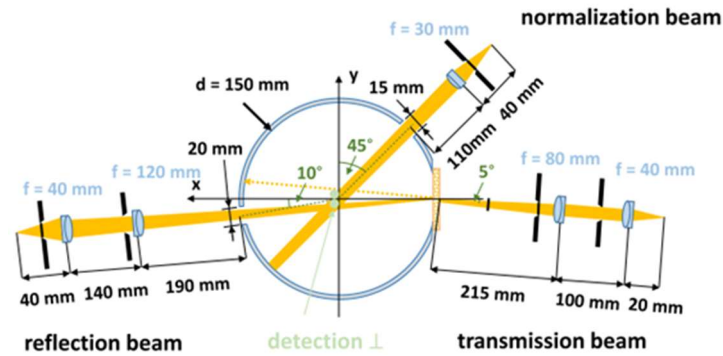


Abbildung 8: Bestimmung der Absorptionskoeffizienten – schematische Darstellung nach Bergmann et al. (Applied Optics Vol. 59, Issue 10 pp. 3216-3226 (2020), <https://doi.org/10.1364/AO.385939>)

### Ergebnisse der spektral aufgelösten Absorptionsmessung

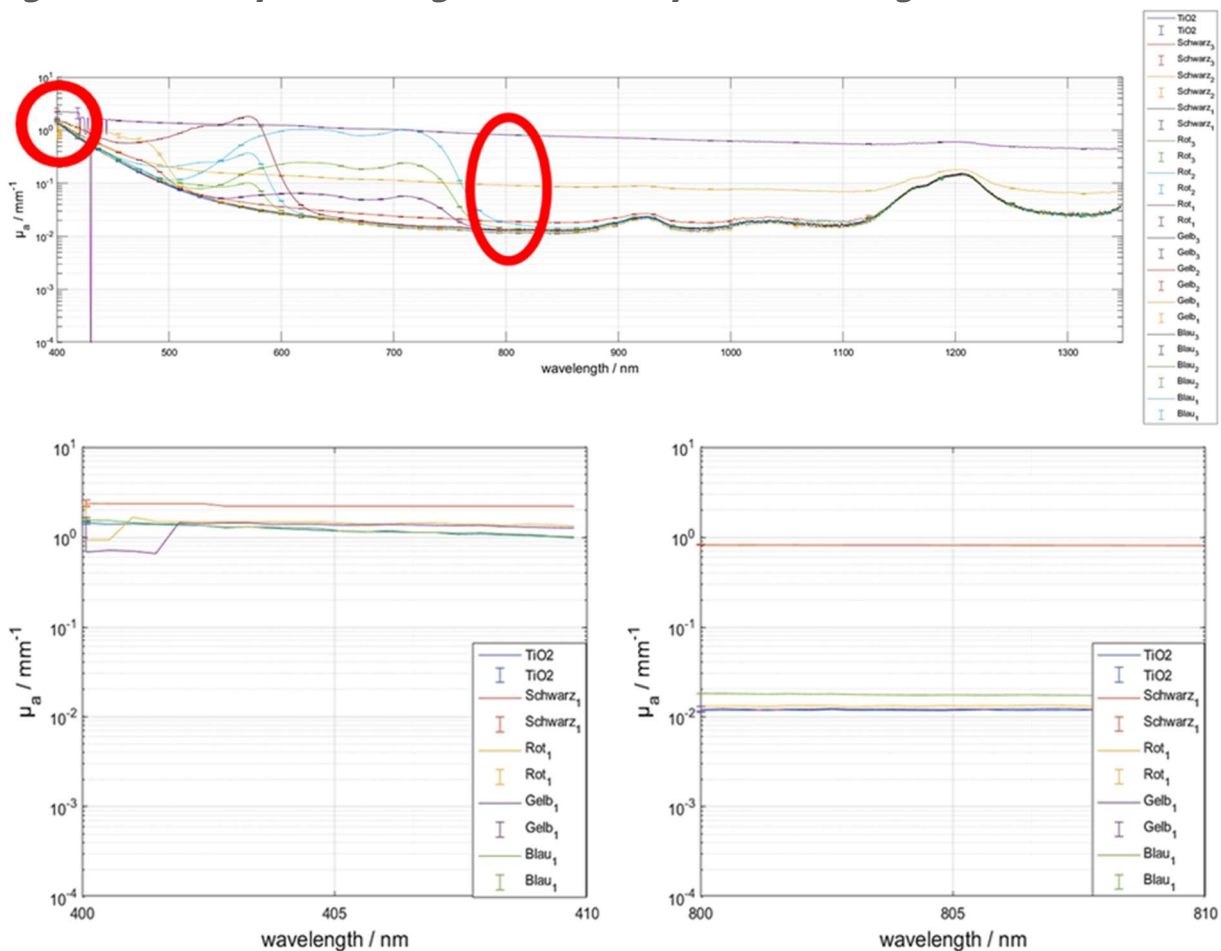


Abbildung 9: Absorptionskoeffizient  $\mu_a$  über die Wellenlänge der verschiedenen Verdünnungsstufen der Farben (C, Y, M und B) sowie des Bindemittels

In Abbildung 9 ist der Absorptionskoeffizient  $\mu_a$  der verschiedenen Verdünnungsstufen der Farben (C, Y, M und B) sowie des Bindemittels über der Wellenlänge aufgetragen. Das obere Diagramm der Abbildung 9 zeigt das gesamte gemessene Spektrum von 400 nm - 1350 nm. Durch die Darstellung der verschiedenen Verdünnungsstufen ist deutlich der Einfluss des Pigments von dem des Bindemittels zu unterscheiden. Vor allem im sichtbaren Spektralbereich ist der Einfluss der verschiedenen Farbpigmente gut zu erkennen und zeigt erwartungsgemäß starke Absorptionsunterschiede. Um 400 nm verschwinden die farbspezifischen Unterschiede fast vollständig und die Absorption ist in diesem Bereich am höchsten.

Die unteren Darstellungen (in der oberen Darstellung rot markiert) zeigen rechts den Wellenlängenbereich der im Vorprojekt genutzt wurde und links den Wellenlängenbereich bei dem die Absorptionsunterschiede der Farben sich am wenigsten unterscheiden.

Im unteren rechten Diagramm sind die aus dem Vorprojekt beschriebenen Absorptionsunterschiede im nahen Infrarot-Bereich deutlich erkennbar und erklären die im Vorprojekt festgestellten großen absorptionsbedingten Unterschiede des photothermischen Signals der unterschiedlichen Farben. Der gesuchte Wellenlängenbereich, bei dem die farbabhängige Absorption die geringsten Unterschiede aufweist, liegt bei  $\sim 400$  nm, da die Absorption in diesem Bereich wesentlich durch das Bindemittel bestimmt ist. Zudem weisen die Farben dort gleichzeitig eine etwa 100-fach höhere Absorption als im nahinfraroten Spektralbereich auf. Während bei Erwärmung mit Strahlung im nahinfraroten Spektralbereich vor allem der Walzenkörper erwärmt wird, kann bei Erwärmung mit Strahlung im Bereich von 400 nm davon ausgegangen werden, dass ein nennenswerter Anteil der Strahlung vom Bindemittel der Farbe absorbiert wird. Da die Farbe auf der Farbauftragswalze bei jeder Umdrehung neu mit frischer Farbe vermischt wird, kann erwartet werden, dass eine Kumulation der Wärme durch die bei jeder Rotation eingebrachte Energie durch die zyklische Vermischung und Austausch der Farbe auf der Farbauftragswalze stark gedämpft wird.

## **AP 1.2 Auswahl und Integration einer geeigneten Strahlquelle**

### ***Durchgeführte Arbeiten***

Nachdem sich in den Ergebnissen von AP 1.1 herauskristallisiert hat, dass sich der Wellenlängenbereich um 400 nm gut für die Anregung eignet, fiel die Wahl auf eine 405 nm Laserdiode mit einer Leistung von 1 W. Durch die 100-fach höhere Absorption der Farben bei dieser Wellenlänge konnte die Laserleistung von 30 W bei 808 nm im Vorgängerprojekt deutlich reduziert werden, was auch im Sinne des Laserschutzes eine erhebliche Verbesserung ist.

Da sich die Robustheit der Strahlquelle, insbesondere der im Vorprojekt verwendeten Lichtleitfaser als kritisch erwiesen hat, sollte diese durch eine neue Laserdiode entweder im Freistrahl ohne Lichtleitfaser oder mit einer robusten Laserdiode mit Fasereinkopplung ersetzt werden. Mit der Optikdesignsoftware Zemax wurde ein Konzept entwickelt, aus dem elliptischen Abstrahlprofil der Laserdiode unter Verwendung von Asphären und Zylinderlinsen ein nahezu kreisrundes und weitestgehend homogenisiertes Strahlprofil zu erzeugen.

### ***Ergebnisse des Optikdesigns***

Das elliptische Strahlprofil der gewählten Laserdiode weist eine meridionale Divergenz von  $13^\circ$  und eine sagittale Divergenz von  $45^\circ$  auf. Um auf der Messwalze einen gleichmäßigen Anregungsfleck von bis zu 2 mm zu erreichen, wurde zunächst unmittelbar nach der Laserdiode im Freistrahl eine asphärische Sammellinse positioniert, um die orthogonale Divergenz zu kollimieren. Im Anschluss folgen eine plankonkave und plankonvexe Zylinderlinse, um Ausdehnung des Laserstrahl in x- und y-Richtung auf die gleiche Größe zu bringen. Zuletzt folgt eine Sammellinse, die den vorher kollimierten Strahlengang auf die gewünschte Spotgröße fokussiert. Dieses Optikdesign wurde entsprechend im Aufbau umgesetzt (siehe Abbildung 10). Alternativ wurden auch weitere Optikdesigns getestet, wie in Abbildung 11 dargestellt – Neben einer längs zur Rotationsrichtung der Farbwalze elliptischen und kollimierten Anregung, die bereits bei niedrigen Frequenzen, d.h. wenige Modulationsperioden bei einer Umdrehung der Farbwalze schon eine gleichmäßige Erwärmung/Heizband erzeugt, wurde auch eine einfache Optik mit einer Asphäre (Abbildung 11 Mitte) und einer Asphäre mit in Reihe geschaltetem Teleskop (Abbildung 11 unten) getestet. Dabei wurde die längliche Anregung unter anderem wegen des Messprinzips und der neuen Messmethodik (kurze Messungen im Sekundenbereich anstatt durchgehender Messung) verworfen. Die einfachen Optiken wurden zudem ursprünglich designt, um einen kollimierten Anregungsstrahlengang für ein einfacheres Handling des späteren Sensors zu erhalten, weil bei diesen Optiken keine Fokusebene entsteht, die bei Abweichung des Abstands von der Sollage zu hohen Leistungsdichten und damit zur Überhitzung und Beschädi-

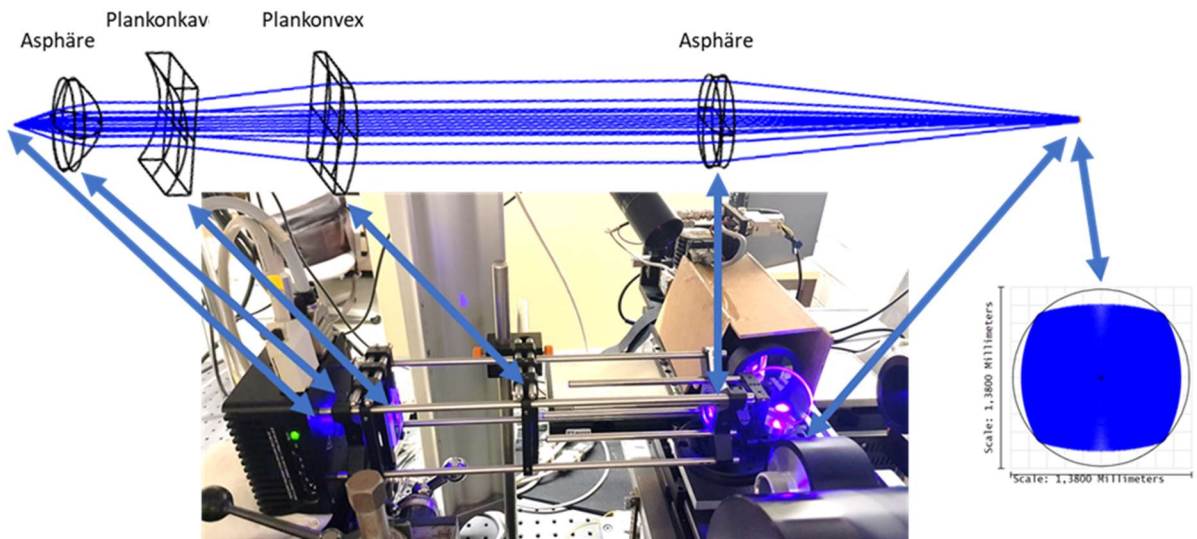


Abbildung 10: Neues Optikdesign (oben) und dessen Implementierung (unten) – Der optische Strahlengang beginnt links an der auf einem Kühlelement befestigten Laserdiode (links) und endet mit der Abbildung auf der Messwalze (rechts)

gung der Farbauftragswalze führen können. Testmessungen ergaben, dass das Optikdesign in Abbildung 10 das beste Messsignal bzw. SNR erzeugt. Um die Gefahr der thermischen Schädigung der Farbauftragswalze durch die Laserstrahlung zu minimieren, wurde die Halterung für den Sensor so konzipiert, dass der Fokus der Laserstrahlung in jedem Fall vor der Oberfläche der Farbauftragswalze und diese damit im divergenten Abschnitt des Strahlengangs liegt.

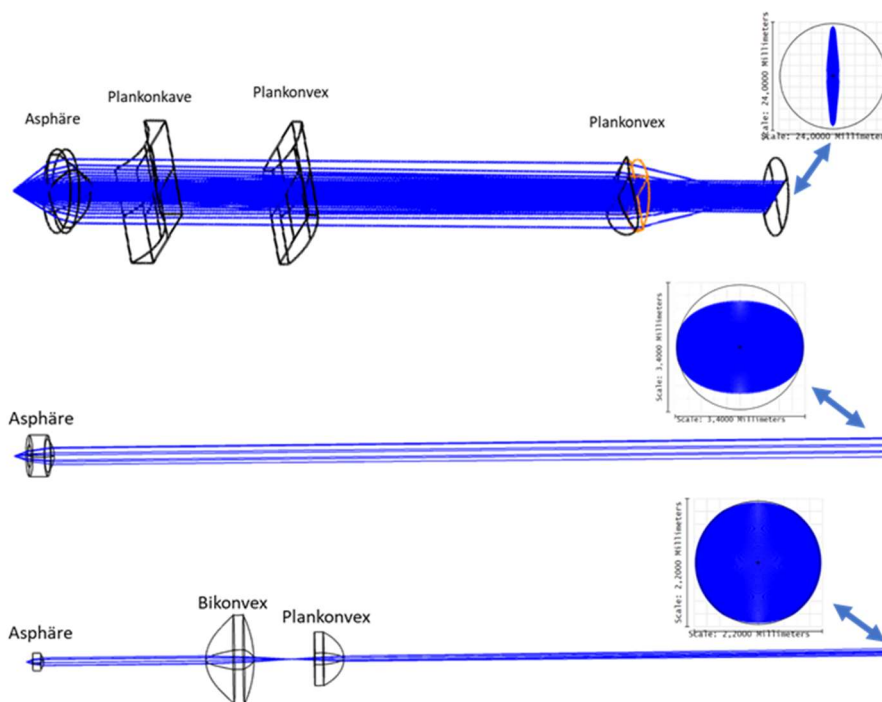


Abbildung 11: Verschiedene getestete alternative Optikdesigns, die letztendlich nicht zur Anwendung in der Sensoreinheit kamen: länglich kollimierte Anregung (oben) sowie eine einfache Kollimierungsoptik (Mitte) als auch eine Zoomoptik, deren Spotdurchmesser sich mit einem Teleskopaufbau variabel einstellen lässt (unten)

## AP 1.3 Verkleinerung des Systems

### *Durchgeführte Arbeiten*

Da der bisherige Laboraufbau nicht für den routinemäßigen Einsatz an einer Offsetdruckmaschine unter Produktionsbedingungen geeignet ist, wurde eine Verbesserung, Vereinfachung und Miniaturisierung des Sensormoduls vorgenommen.

Zunächst wurde die Möglichkeit geprüft, den bisherigen IR-Detektor zu ersetzen. Obwohl die bisher eingesetzten IR-Detektoren eine sehr hohe Sensitivität bieten, sind diese aufgrund ihrer wartungsintensiven Handhabung, hohen Anschaffungskosten (Stirlingkühlung) und Aspekten der Arbeitssicherheit (Flüssigstickstoffkühlung) nur begrenzt für den Einsatz unter Produktionsbedingungen geeignet. Bei den IR-Detektoren ist vor allem eine adäquate Kühlung von großer Bedeutung, da aufgrund der schwachen thermischen Strahlung und den kleinen Modulationsamplituden das thermische Rauschen der Sensoren möglichst effizient unterdrückt werden muss.

### *Erzielte Ergebnisse*

Die Wahl fiel auf einen alternativen IR-Detektor mit 4-stufiger Peltier-Kühlung. Mit dieser Kühlung ist die Langzeitstabilität und Rauschminimierung des Messsignals gewährleistet und es muss nicht auf eine kostenintensive Sterling-Kühlung oder serviceintensive Stickstoffkühlung zurückgegriffen werden.

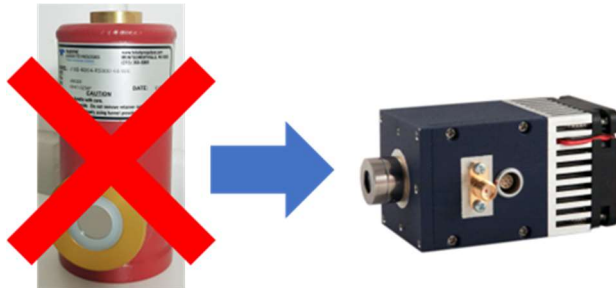


Abbildung 12: Bisheriger stickstoffgekühlter IR-Detektor (J10D-M204-R500U-60) (links) und der neue IR-Detektor mit 4-fach Peltierkühlung (PVI-4TE-5-1x1, rechts) ([https://vigo.com.pl/wp-content/uploads/2018/07/MIPXC-F\\_users\\_guide.pdf](https://vigo.com.pl/wp-content/uploads/2018/07/MIPXC-F_users_guide.pdf))

Da die Kühlung jedoch nicht so gut ist ( $-80\text{ °C}$  statt  $-196\text{ °C}$ ) lässt dies zunächst ein schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) vermuten. Die Versuche mit dem neuen Detektor zeigten jedoch, dass die Signalstärke bzw. SNR in einer ähnlichen Größenordnung liegt, wie beim bisherigen Detektor. Die Datenblätter des alten und neuen Detektors zeigen ein leicht verschobenes Empfindlichkeitsspektrum aber eine vergleichbare Sensitivität (J10D-M204-R500U-60  $D \cdot \lambda_{\text{Peak}} \geq 1 \cdot 10^{11}$ , PVI-4TE-5-1x1:  $D \cdot \lambda_{\text{peak}} \geq 3 \cdot 10^{11}$ ).

Die IRA-Strahlungsquelle mit 808 nm wurde wie schon in AP 1.2 dargestellt durch eine 405 nm Laserdiode ersetzt. Durch die 100-fach höhere Absorption bei 405 nm konnte die optische Leistung der Anregungsstrahlungsquelle von 30 W bei 808 nm auf 1 W optische Leistung bei thermischer Anregung mit 405 nm reduziert werden, ohne einen Verlust des Leistungseintrag während der Messung befürchten zu müssen. Allein diese Reduzierung ermöglicht geringere Ströme und Kühlleistung, welche wesentlich kompaktere Abmessungen für den Laser als auch die Kühleinheit des Lasers zulassen.



Abbildung 13: Laserdiode 405 nm (L405G1) und Mount (LDM90) – Quelle: <https://www.thorlabs.de/>

Die Optikparameter für den Anregungsstrahlengang wurden durch die Optiks simulation in AP 1.2 weitestgehend festgelegt wurden (~430 mm Gesamtlänge). Durch Faltung des Strahlengangs konnte die Sensorlänge sehr kompakt gehalten werden.

Die Messung der Rotationsfrequenz der Messwalze erfolgte mit einem optischen Drehzahlmesser (UT 372 von UNI-T, Genauigkeit  $\pm 0,04\%$ ).

Die Auswahl der verschiedenen benötigten Elektronikkomponenten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Erforderliche (Opto-)Elektronikkomponenten für das Sensormodul nach benötigter Funktion

| <b>(Elektronik-)Komponente</b>                         | <b>Funktion</b>  |
|--|--|
| Stromtreiber für Laserdiode und TEC (Peltierkühlung)   | Spannungsgesteuerte, modulierbare Stromversorgung für Laser und Kühltemperaturregelung     |
| Laserdiode, TEC und IR-Detektor                        | Anregung und Signaldetektion   |
| IR-Detektor mit Vorverstärker und TEC (Peltierkühlung) | Rauscharme Signaldetektion   |
| Spannungsverstärker                                    | Verstärker für das Signal des IR-Detektors   |
| A/D- und D/A-Wandler                                   | Echtzeitfähiger Signalwandler für die Anregungsmodulation und das Auslesen des Messsignals |
| Optische Drehzahlmessung                               | Drehzahlbestimmung der Farbauftragswalze   |

Für die Steuerungs- und Datenaufnahmeeinheit ist eine echtzeitfähige A/D-Wandlereinheit erforderlich.

Für den Funktionsdemonstrator wurde ein Datenlogger für die Aufzeichnung der Rohdaten gewählt, für dessen Ausgangskanäle eine Serie von Spannungswerten programmiert werden können, die nach dem Start der Messung mit festen Zeitschritten ausgegeben werden. Innerhalb derselben Zeitschritte werden die Messwerte an den Eingangskanälen eingelesen. Die Übertragung an ein angeschlossenes Notebook erfolgt in Blöcken über eine USB-Verbindung. Die Programmierung und Aufzeichnung der Messdaten wurden mit Python umgesetzt. Die Messwerte wurden direkt nach jeder Messung mit einem digitalen Lock-in Verfahren analysiert und zusammen mit dem berechneten Amplituden- und Phasenwert in einer Datei gespeichert.

Der Datenlogger T7-Pro von Labjack ermöglicht so gleichermaßen die Signalmodulation für die Anregung als auch die Aufnahme des Messsignals in Echtzeitgenauigkeit.

Die mechanische Konstruktion umfasst zwei Komponenten: Zum einem das Gehäuse des Sensormoduls, zum anderen die Halterung des Sensormoduls, mit der das Sensormodul direkt an der Offsetdruckmaschine befestigt werden kann. Abbildung 14 zeigt die Konstruktion des Sensormoduls.

### Schematische Zeichnung der Optik

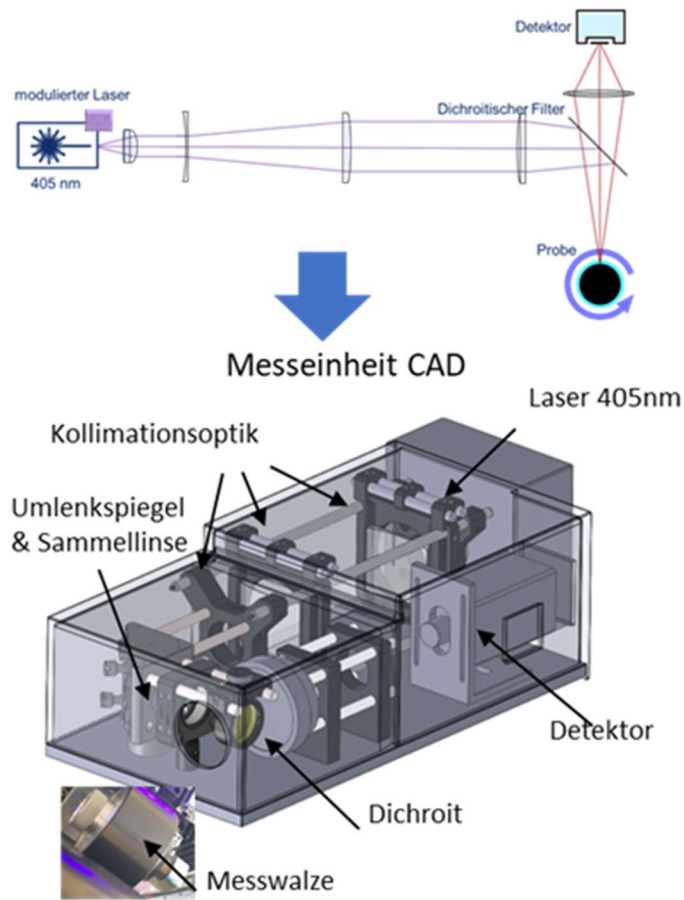
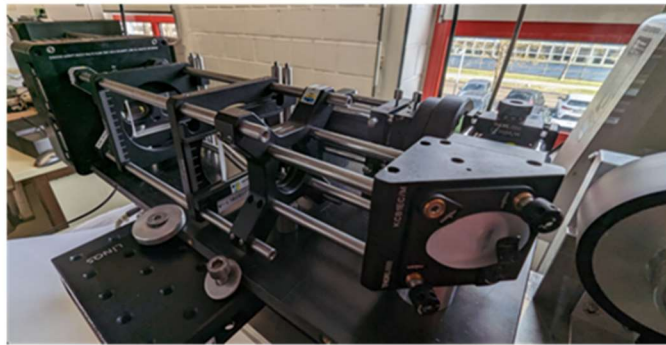


Abbildung 14: Sensoreinheit zu verschiedenen Entwicklungspunkten - Das gewählte Optikdesign für ein bestmögliches Messsignal (oben) und die Umsetzung der optischen Messeinheit mit gefaltetem Anregungsstrahlengang im CAD (unten)

### Messeinheit ohne Gehäuse



### Messeinheit mit Gehäuse



Abbildung 15: Aufgebaute Messeinheit ohne (oben) und mit aufgesetztem Gehäuse (unten)

Vorgaben für die Konstruktion waren die optischen Weglängen von Anregung und Detektion als auch die Dimensionen der benötigten Optikkomponenten. Sämtliche Optikkomponenten wurden aus Gewichtsgründen auf einer leichten CFK-Platte verschraubt. Zudem wurde die Höhe der Sensoreinheit im zur Druckmaschine zugewandten Bereich vermindert, dass die Einheit wie in Abbildung 16 dargestellt, so unter der Traverse platziert werden kann, dass der erforderliche Einstrahlwinkel als auch der erforderliche Arbeitsabstand (22 mm) zwischen Modul und der 4. Farbauftragswalze eingehalten werden kann.

Für eine weitestgehende optische Abschirmung als auch zur Verhinderung von Staubeintrag, Verschmutzung oder ähnlichem wurde eine zweiteilige Gehäusehaube angebracht (vgl. Abbildung 15 unten).

Durch die Faltung des Anregungsstrahlengangs und Parallelanordnung von Anregungs- und Detektionsstrahlengang ist es gelungen, das Sensormodul auf die vom projektbegleitenden Ausschuss geforderte Größe einer Schuhschachtel zu reduzieren.

Die Halter des Sensormoduls wurden nach Absprache mit Flint Group und Heidelberger Druckmaschinen von Heidelberger Druckmaschinen konstruiert und in einem 3D-Druck-Verfahren hergestellt. Durch das Design (Abbildung 16 und Abbildung 17) von Sensorhalter und Sensorgehäuse war es möglich die Sensoreinheit über Form- und Kraftschluss an einer mechanisch stabilen Traverse der Druckmaschine (Heidelberger Speedmaster) einfach, schnell und reproduzierbar zu positionieren und zu befestigen. Der Abstand des Sensormoduls zur Oberfläche der Farbauftragswalze kann durch Verschieben des Messmoduls längs der Halter eingestellt und über Verschraubungen in Langlöchern initial justiert und fixiert werden.

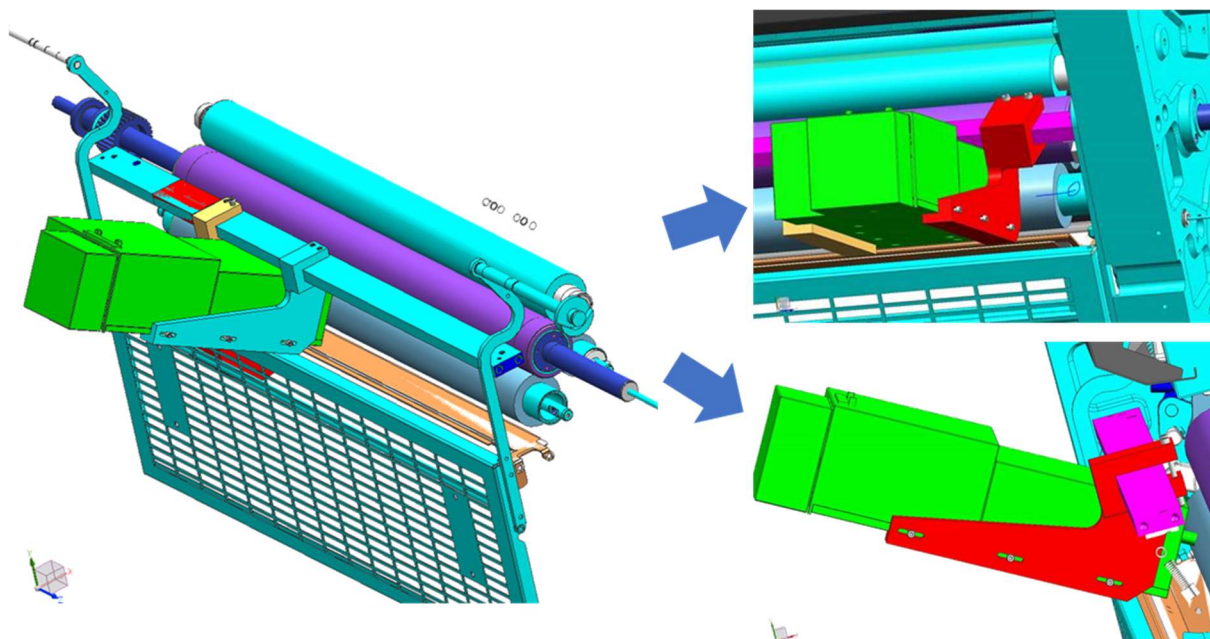


Abbildung 16: Sensoreinheit mit dem mechanischen Interface - Durch das Design des Halters und des Gehäuses kann die Sensoreinheit im optimalen Abstand und Winkel zur 4. Farbwalze eingestellt werden.

Die Konstruktion der Halter gewährleistet sowohl die senkrechte Einstrahlung bzgl. der Zylinderachse als auch die genau radiale Einstrahlung auf die Farbauftragswalze (siehe Abbildung 16), sodass ein optimales Signal gewährleistet werden kann. Ein baugleicher Halter wurde für den Drehzahlmesser adaptiert und kann somit auch optimal auf die Farbwalze ausgerichtet werden (siehe Abbildung 17 unten rechts)

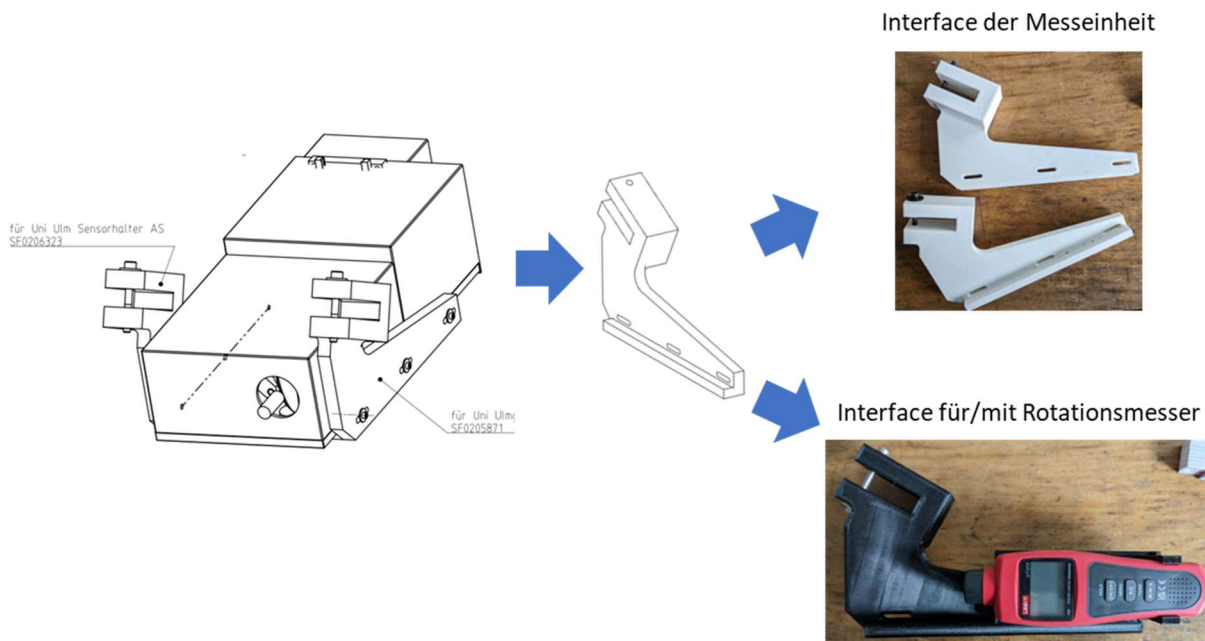


Abbildung 17: Design und Umsetzung des mechanischen Interfaces von Sensorgehäuse/Rotationsmesser und Traverse der Offsetdruckmaschine



## AP 2: Testreihen im Labor und an der Maschine

### AP 2.1 Evaluierung der Maßnahmen aus AP 1.1-1.2

#### *Durchgeführte Arbeiten*

Für die Messungen im Labor wurde der Farbwerk-Simulator aus dem Vorprojekt (IGF-Vorhaben Nr. 18829) verwendet. Der Farbwerk-Simulator (Abbildung 18) besteht unter anderem aus einer kleinen Drehbank mit geregelterm Antrieb. Die Einstellung der Rotationsgeschwindigkeit der Drehbank erfolgt mittels eines Poti und wird über eine elektronische Schaltung konstant geregelt. Die so erzielbaren Rotationsgeschwindigkeiten entsprechen dabei Druckgeschwindigkeiten von 7000 bis 20000 Drucken pro Stunde an realen Offset-Druckmaschinen (für einen Plattenzylinderdurchmesser mit 210 mm). An der Antriebsachse der Drehbank ist ein PVC-Zylinder ( $\varnothing$  15 cm) fest angeflanscht. Dieser PVC-Zylinder repräsentiert die Farbauftragswalze. Auf den PVC-Zylinder wird von einer Seite die drehbar gelagerte Messwalze mit federgeregelterm Anpressdruck über einen Schrittmotor angedrückt. Auf der gegenüberliegenden Seite wird ebenfalls eine drehbar gelagerte mit federgeregelterm Anpressdruck ausgestattete Gummiwalze (Verreiberwalze) an die Antriebswalze gedrückt (Abbildung 19). Diese Walze wird über einen Schrittmotor axial hin- und herbewegt, um eine Verreibung der Farbe zu gewährleisten, die mit einem Spatel auf den PVC-Zylinder aufgetragen wird.

Die Messwalze kann von ihrer konischen Aufnahme abgenommen werden, um sie mit einer hochauflösenden Waage (Auflösung 1 mg) wiegen zu können. Durch die Masse der Farbe auf der Messwalze und die Dichte der Farbe kann auf die Farbschichtdicke rückgerechnet werden. Mit einer Lichtschranke und einem Frequenzzähler wird die Umdrehungsgeschwindigkeit der Antriebswalze gemessen, so dass die gewünschte Rotationsgeschwindigkeit der Messwalze über das Verhältnis der Durchmesser von PVC-Zylinder und Messwalze eingestellt werden kann.

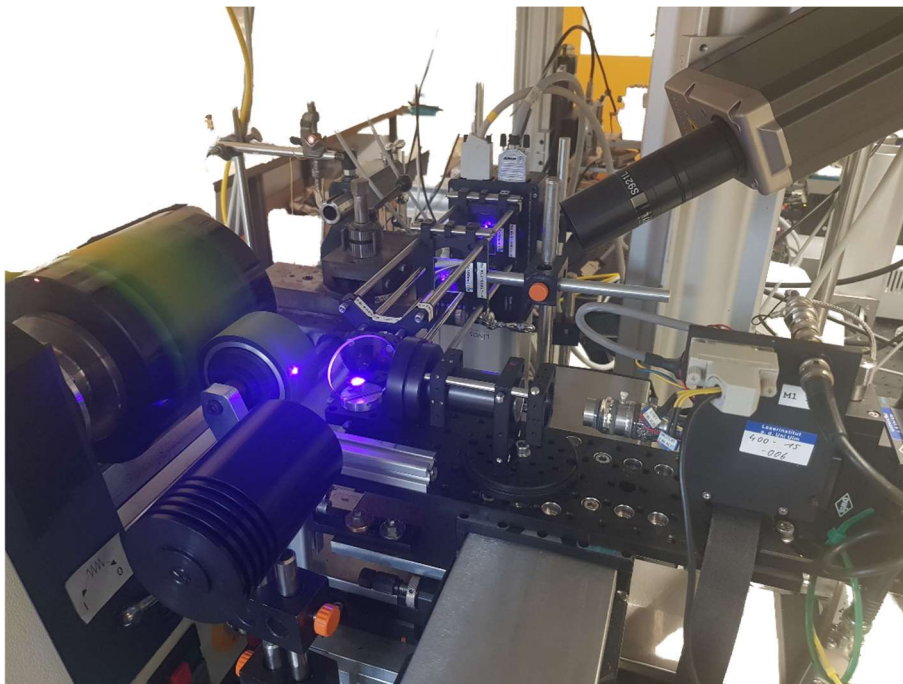


Abbildung 18: Seitenansicht des Farbwerk-Simulators. Unten links erkennt man die kleine Drehbank mit Antriebsachse und der angeflanschte, schwarze PVC-Zylinder. Mitte rechts befindet sich der auf Schrittmotoren montierte Sensor mit der kleineren schwarzen Messwalze ( $\rightarrow$  Mitte links mit Laserfleck) in Kontakt mit dem größeren PVC-Zylinder. Rechts oben erkennt man ein IR-Pyrometer zur Temperaturmessung im Anregungsfleck.

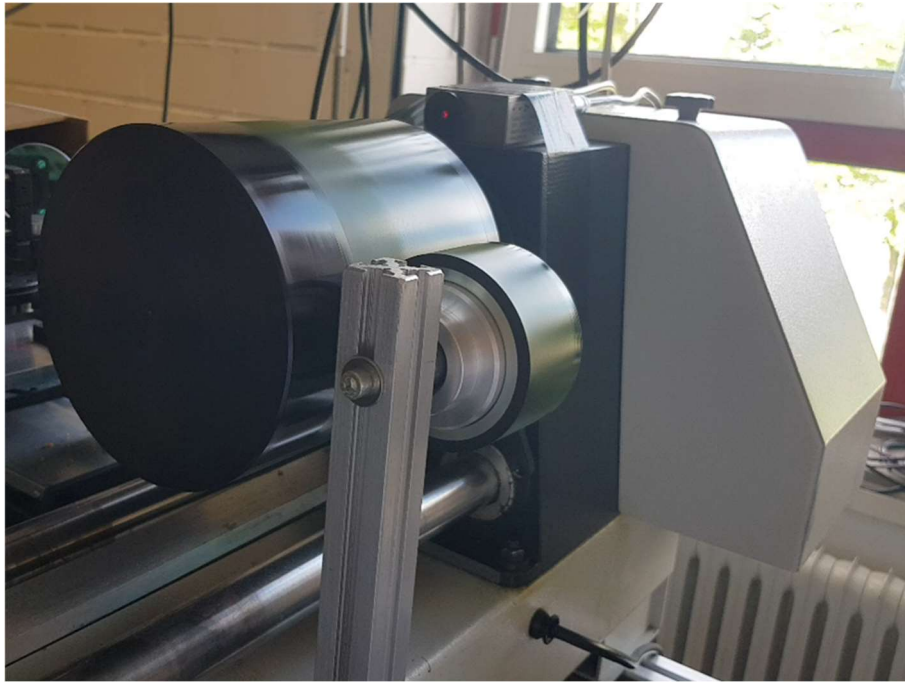


Abbildung 19: Die Rückansicht des Farbwerk-Simulators. Mittig erkennt man eine zweite Gummiwalze (→ Verreiberwalze), die über Federkraft geregelt von hinten auf den PVC-Zylinder (→Antriebswalze) aufsetzt. Die Verreiberwalze wird über einen Schrittmotor axial mit einem Hub von 1 cm hin und her bewegt, so dass sie den Kontaktbereich der vorderen Messwalze in axialer Richtung auf beiden Seiten jeweils 0,5 cm überfährt. Mittig oben erkennt man den Detektor der Lichtschranke.

Mit dem Laboraufbau lassen sich folgende Parameter variieren: Die Farbschichtdicke (gravimetrisch), die Druckgeschwindigkeit (mittels Poti der Drehbank), verschiedene Farben, die Anregungsleistung des Lasers, verschiedene Walzenmaterialien. Begrenzt kann der Einfluss des Duktors getestet werden, da nur Farbe hinzugefügt und nicht abgenommen werden kann. Einflüsse wie Feuchtmittel (Feuchtwerk nicht simulierbar), Flächendeckung (keine Druckplatte) und der Einfluss realer Druckumgebung (Druckkanal, Maschinenschwingungen, kontinuierlicher Farbfluss, etc.) können nicht im Laboraufbau dargestellt werden.

Um die Ergebnisse der Maßnahmen aus AP 1.1-1.2 zu evaluieren, wurden zunächst Optimierungen am Laboraufbau vorgenommen, um die Störeinflüsse zu reduzieren, welche die Korrelation von Phasendifferenz und Schichtdicke bei den Laborversuchen beeinträchtigen könnten. Die Bewertung der Strahlungsquelle (405 nm) sollte analog zu dem Verfahren im Vorprojekt – IGF-Vorhaben Nr. 18829 N durchgeführt werden.

Dabei erfolgt zunächst eine Wägung und anschließend bei konstanter Rotationsgeschwindigkeit eine Lock-in-Messung der Messwalze ohne Farbe. Die Messwerte dieser Messung dienen als Referenz. Daraufhin wird Farbe in den Farbwerksimulator eingebracht und solange gemessen, bis die Farbe gleichmäßig verteilt wurde und sich ein stabiles Phasensignal bei der Lock-in Messung eingestellt hat. Durch erneutes Wiegen wird Masse der Farbe auf der Messwalze gemessen und daraus die Schichtdicke berechnet. Durch Berechnung der Phasendifferenz zwischen dem Phasenwert der Messung mit Farbschicht zum Referenzwert, lässt sich die Phasendifferenz in Abhängigkeit zur Farbschichtdicke ermitteln. Durch weiteren Farbauftrag lässt sich eine komplette Kalibrierkurve für eine Farbe erstellen.

Eine Fehlerquelle im bisherigen Prozedere ist die „Repositionierung“ der Farbwalze auf der konischen Messwalzenaufnahme nach jeder Wägung. Messungen mit einer Messuhr zeigten Verschiebungen und Verkippen der Messwalze von mehreren 1/10 Millimetern bei axialer Krafteinwirkung auf die Messwalze. Deshalb kann der Wechsel der Messwalze die Achsparallelität von Messwalze und Antriebswalze verschlechtern. So kann die Schichtdicke auf der Messwalze in axialer Richtung inhomogen sein. Um dies zu minimieren wurde die Messwalzenaufnahme versteift, um deren Stabilität wesentlich zu verbessern. Zudem wurde eine

Schraube installiert, mit welcher die Messwalze von der Walzenaufnahme gedrückt und damit weitestgehend kraftfrei entnommen werden kann. Weiterhin wurden die Einstellparameter der Verreiberwalze über die Variation des Verfahrenswegs optimiert, um eine optisch gleichmäßige Farbschicht ohne sichtbare Verreiberspuren zu erhalten.



Abbildung 20: Laboraufbau – Optimierungen der Halterungen und der Verreibungsparameter, sodass ein stabileres und gleichmäßigeres Farbschichtergebnis zu erhalten

Ebenso wurde mittels Korrelationsmessungen zwischen aufgebrachtener Farbmenge auf der Antriebs-Walze und der Gewichtszunahme der Messwalze bzw. der Farbschichtdicke eine indirekte Wägung ermöglicht. Dabei verhielt sich die Farbschichtdickenzunahme auf der Messwalze proportional zur Farbmengenzugabe auf der PVC-Walze/Antriebswalze. So konnte durch Wiegen der aufgebrachtene Farbmenge auf den PVC-Zylinder und einer Anfangs- und Endwägung der Messwalze auf das Wiegen der Messwalze nach jedem Farbauftrag verzichtet werden. Damit wurde der Störeinfluss durch den Ausbau der Messwalze auf die Messung minimiert und die thermische Einschwingdauer für jeden neuen Messpunkt verkürzt.

### **Erzielte Ergebnisse**

Das Ergebnis der Versuche mit allen vier Farben (K, M, Y und C) ist in Abbildung 21 zu sehen. In der Abbildung ist die Phasendifferenz über der Schichtdicke bei einer Rotationsfrequenz von 12000 D/h und einer Laseranregung von 101 Hz dargestellt.

Das Ergebnis zeigt, dass die Strahlungsquelle gleichermaßen für alle Farben geeignet ist und dass im gesamten geforderten Messbereich für die Farbschichtdicke (2-15  $\mu\text{m}$ ) eine lineare Abhängigkeit zwischen der Phasendifferenz und der Farbschichtdicke besteht. Dies war bei der Laseranregung mit der Wellenlänge 808 nm und der Modulationsfrequenz von 2008 Hz nicht der Fall. Mit diesen Parametern nahm die Steigung mit größer werdender Schichtdicke mehr und mehr ab (vgl. Abbildung 3)

Bei sonst gleichen Parametern ist die Phasendifferenz von Schwarz verglichen mit den anderen Farben etwas geringer. Damit kann jedoch bestätigt werden, dass der gesamte vorgesehene Messbereich mit diesen Parametern für alle Farben abgedeckt werden kann.

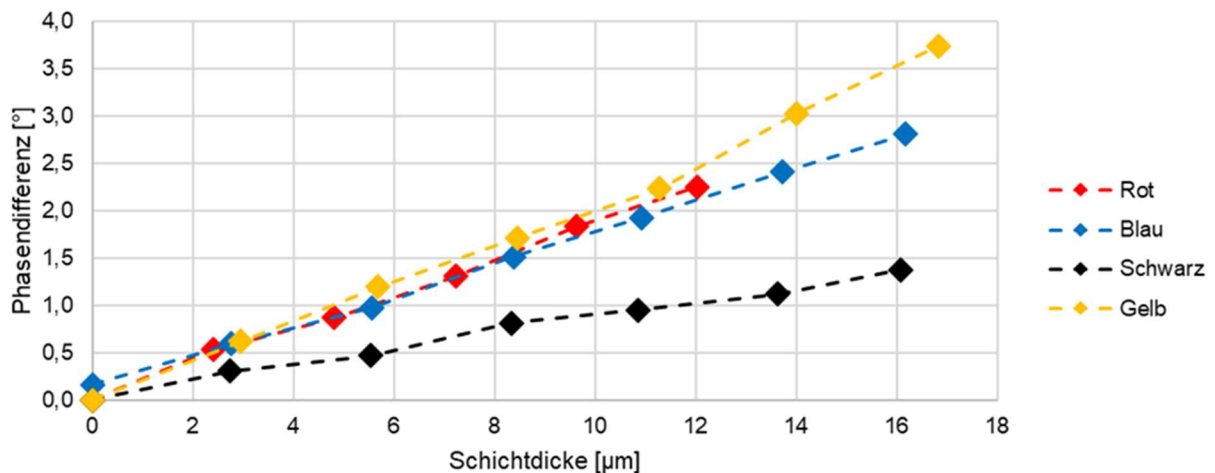


Abbildung 21: Phasendifferenzverlauf für Standardfarben bei 12000 D/h und 101 Hz über die Schichtdicke dargestellt. Für den gewünschten Messbereich lässt sich bei diesen Parametern eine streng monotone Korrelation feststellen

## AP 2.2 Durchführung von Messungen mit allen Skalenfarben an der Druckmaschine

### Durchgeführte Arbeiten

Aufgrund zeitlicher Verzögerungen durch einen unvorhersehbaren Defekt am verwendeten IR-Detektor und hohe Auslastung der Versuchsdruckmaschine war nur ein Messtermin mit zwei Versuchstagen möglich. Die Messungen wurden bei der Flint Group in Stuttgart-Feuerbach an einer Offsetdruckmaschine Speedmaster von Heidelberger Druckmaschinen durchgeführt. Wie in Abbildung 22 dargestellt, muss eine der Schutzvorrichtungen der Druckmaschine für die Messungen entfernt werden, um die Sensoreinheit und den separaten Drehzahlmesser anzubringen. Daher wurden während des Betriebs und der Messungen Absperrzonen gekennzeichnet, sodass die Betriebssicherheit gewährleistet blieb. Entgegen der Planung mussten die Haltebacken der Halterung für den Sensor gekürzt und statt mit einer Schraube mit Zwingen an der Traverse geklemmt werden, da Haltebacken zu lang waren und die Farbwalze berührt hätten (Abbildung 22). Der Messbereich des Sensormodul wurde die Farbzonen 6 und 7 der Farbwalze 4 ausgerichtet.



Abbildung 22: Montierte Sensoreinheit (rechts im Bild) plus Rotationsmesser (links im Bild) an einer Quertraverse an einem der Druckwerke. Die Ausrichtung erfolgte auf die 4.te Farbauftragswalze.

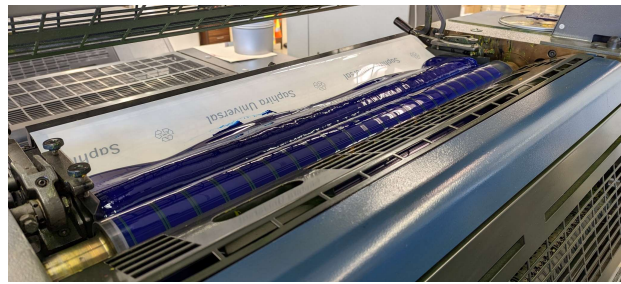


Abbildung 23: Duktort mit eingefüllter Farbe – die Farbaufnahme lässt sich für jede Druckzone einzeln einstellen.

Der erforderliche Abstand der Sensoreinheit zur Messwalze (22 mm) konnte unkompliziert und schnell mit einer Messlehre eingestellt werden. Der Drehzahlmesser wurde am Rand der 4. Farbwalze positioniert und eine Reflexmarke auf dem metallischen Rand angebracht. Das Sensormodul wurde für die Versuche mit folgenden Geräten verbunden: Neben dem TEC-Controller für die IR-Detektorkühlung wurden der Laser- und Kühl-(TEC-)Controller an den Laserdiodenmount angeschlossen, um die Temperatur der Laserdiode zu regeln und die optische Leistung über die Eingangsspannung am Lasercontroller modulieren zu können. Das vorverstärkte Detektionssignal des IR-Detektors wurde auf einen Spannungsverstärker geleitet, der an den Datalogger angeschlossen wurde. Dieser wurde über eine USB-Verbindung an den Messcomputer angeschlossen. Der analoge Ausgang des Datalogger wurde an den Lasertreiber angeschlossen, um die spannungsgesteuerte Modulation der Laserleistung zu steuern. Zur Kontrolle wurden das Anregungs- und das Messsignal zusätzlich an ein Oszilloskop angeschlossen. Die Steuerung des Dataloggers bzw. die Durchführung und Auswertung der Messung erfolgte über den Messcomputer bzw. die Messsoftware.

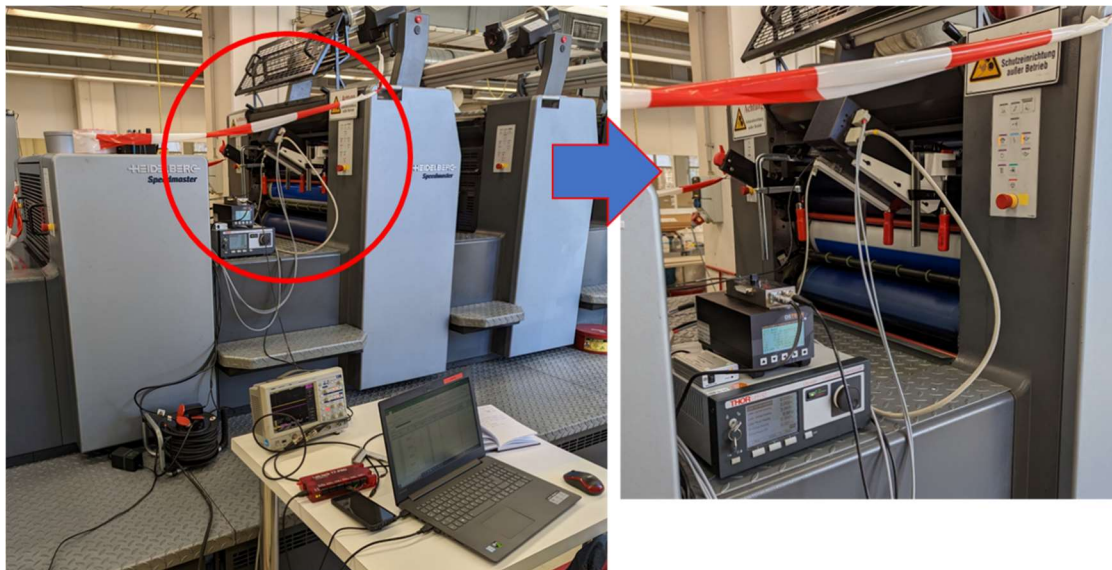


Abbildung 24: Komplettaufbau für die Schichtdickenmessung – Die Sensoreinheit wird über den Messcomputer/Messsoftware gesteuert, indem die Software ein definiertes Messprogramm auf den Datalogger (links) lädt, welches die Anregungsmodulation und die Datenerfassung regeln. Die Modulation geht auf den Lasercontroller (rechts) welcher zusammen mit dem TEC-Controller die Lasereinheit steuert. Der IR-Controller gewährleistet die Sensitivität des IR-Sensors, welcher sein Messsignal auf den Spannungsverstärker gibt, welches anschließend auf den Datalogger übertragen wird.

Im Vergleich mit dem apparativen Aufwand im Vorprojekt konnte eine erhebliche Reduktion und Vereinfachung des Messequipments erreicht werden konnte. Beim Sensormodul konnte die angestrebte Größe erreicht und auch die Montage vereinfacht werden sowie die notwendige Elektronik und deren Abmessungen erheblich verkleinert werden. Durch die weitgehende Verwendung von Standardkomponenten konnten auch die Kosten für den Funktionsdemonstrator im Vergleich zu den preisintensiven Laborgeräten stark reduziert werden.

Nach der erfolgreichen Montage des Systems wurde die Sensoreinheit auf ihre Vibrationsstabilität getestet. Dabei zeigten die im Druckbetrieb auftretenden Vibrationen keinen Einfluss auf die mechanische Stabilität oder die Signalqualität.

Aufgrund der beschränkten Versuchsdauer konnten nur Messungen mit den Skalenfarben Cyan (Novavit 4 F 918 SUPREME BIO) und Schwarz (Novavit 918 SUPREME BIO) durchgeführt. Weiterhin wurden die Druckgeschwindigkeit (10.000 D/h und 12.000 D/h), das Feuchtepoti (Sollpoti,+5,+15), die Duktoreinstellung (30 %, 50 %, 70 %) und Farbdichte(5 % Raster und 100 % Vollton) variiert.

Um die geforderte Verstimmung von Anregungsfrequenz des Lasers und der Rotationsfrequenz zu gewährleisten, wurden für die Rotationsfrequenz von 10.000 U/h 101 Hz und für 12.000 U/h 101,5 Hz als Anregungsfrequenz verwendet. Die Rotationsfrequenz gibt die Anzahl der Umdrehungen der Druckplatte an. Aufgrund unterschiedlicher Durchmesser ist die Umdrehungszahl der 4. Farbauftragswalze 9,4 Hz bei 10.000 U/h bzw. 11,2 Hz bei 12.000 U/h. Somit werden bei der nominellen Drehzahl von

$$10.000 \text{ U/h: } \frac{101 \text{ Modulationsperioden/s}}{9,4 \text{ U/s}} = 10,74 \text{ Modulationsperioden/U}$$

$$12.000 \text{ U/h: } \frac{101,5 \text{ Modulationsperioden/s}}{11,2 \text{ U/s}} = 9,06 \text{ Modulationsperioden/U}$$

auf der Farbauftragswalze appliziert. Damit ist gewährleistet, dass die periodische Erwärmung der Farbwalze nicht in Resonanz ist. Für die Versuche wurden die Parameter in folgender Reihenfolge variiert: Druckgeschwindigkeit, Feuchtepotential, Dukt, Druckfarbe und Flächendeckung (Druckplatte). Für die Wechsel der Druckplatte und der Skalenfarbe wurde die Sensoreinheit samt der Elektronik ab- und wieder angebaut. Dabei erwies sich die Halterkonstruktion als sehr vorteilhaft, da Ab- und Anbau innerhalb von wenigen Minuten durchgeführt werden konnte.

Für jede Parameterkombination wurden mindestens 20 Einzelmessungen (Messdauer je 3,5 s) mit der Messsoftware ausgeführt. Für jede Messung wurde die Phasendifferenz und die Amplitude des Messsignals mit dem digitalen Lock-in-Verfahren bestimmt. Zudem wurde für jede Parameterkombination die Drehzahl mit dem optischen Drehzahlmesser gemessen, ebenso die Temperatur auf der Farbwalze nahe dem Messpunkt mit einem Pyrometer (Festo 845). Der Messpunkt selbst war unzugänglich und konnte deshalb nicht gemessen werden. Am Ende jedes Messzyklus, wurde die Farbdichte auf einem Druckbogen von einem Mitarbeiter der Flint Group mit einem Farbdensitometer (Abbildung 25) im selben Areal bestimmt (Farbzone 6 und 7) in dem auch die Farbschicht photothermisch gemessen wurde. Sämtliche Versuche wurden ausschließlich mit einseitiger Makulatur durchgeführt.



Abbildung 25: Die Bestimmung der Farbdichte erfolgte an einem geeigneten Arbeitsplatz (links), indem auf einem Druckbogen (unten rechts) die Farbdichte mittels eines Farbdensitometers (oben rechts) bestimmt wurde.

### Erzielte Ergebnisse

In Abbildung 26 sind sämtliche Messwerte aus 1026 Einzelmessungen für die 48 verschiedenen Druckparameterkombinationen dargestellt. Die senkrechten Linien markieren jeweils den Bereich einer Parameterkombination. Die durchgezogene rote Linie gibt den Mittelwert des radiometrischen Signals jeder Messung an. Es wird deutlich, dass das Signal während eines Messtags nahezu kontinuierlich ansteigt. Die Amplitude des radiometrischen Signals wird nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz maßgeblich durch die Temperatur bestimmt. Beim Wechsel von blauer auf schwarze Druckfarbe ist ein kleiner Rückgang zu sehen. Dies ist vermutlich auf das erforderliche Waschen der Druckwalzen beim Farbwechsel zurückzuführen. Die parallel durchgeführte Temperaturmessung auf der Farbübertragungswalze neben dem Messpunkt (gestrichelte Linie) zeigt über den ganzen Messtag Temperaturen zwischen 27,5°C und 30,7°C. Erwartungsgemäß bestimmt die Duktoreinstellung die Farbschichtdicke und damit das photothermische Signal am meisten. Ausgehend von der Solleinstellung 50 (rote Kreise mit dunkelroter Füllung) wurde der Farbauftrag mit der Duktoreinstellung 30 reduziert (rote Kreise mit grüner Füllung). Dies resultierte in einer Veränderung der Farbschichtdicke und damit zu einem veränderten Phasensignal. Erwartungsgemäß unterscheiden sich die Phasensignale bei 12.000 U/h deutlich von denen bei 10.000 U/h da die Phasenlage durch die unterschiedliche Verstimmung von Drehfrequenz und Modulationsfrequenz bestimmt wird. In der Übersicht fällt auf, dass die Werte der Einzelmessungen für die blaue Druckfarbe innerhalb einer Parameterkombination vor allem bei den Duktoreinstellungen 50 und 30 stärker streuen, während sie bei schwarzer Druckfarbe im Laufe der Wiederholungsmessungen stetig leicht abnehmen. Am zweiten Versuchstag war das radiometrische Signal anfangs deutlich niedriger und die Streuung der Messwerte war vor allem bei blauer Druckfarbe sehr groß (Abbildung 29 untere beiden Bildreihen).

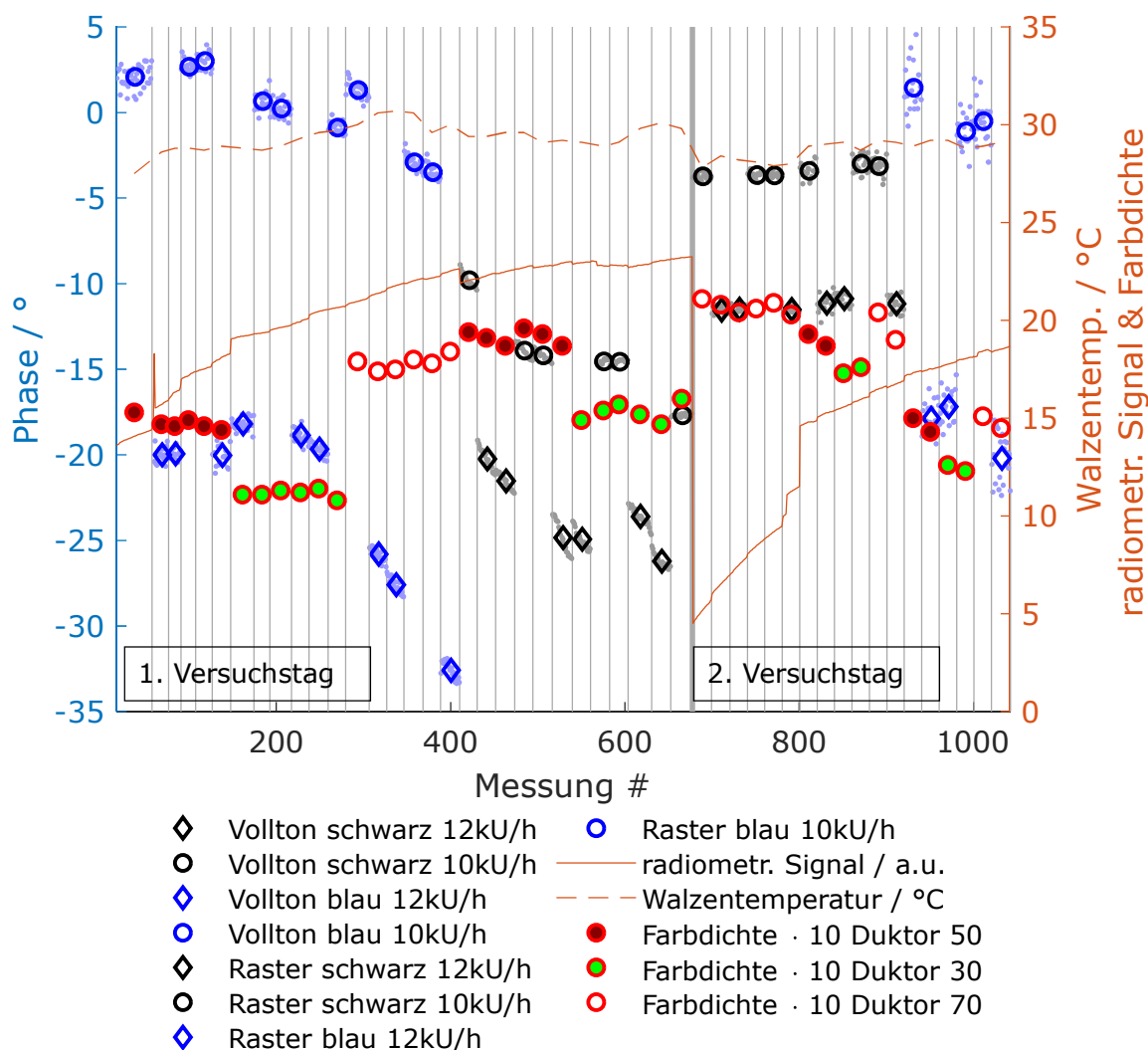


Abbildung 26: Überblick über alle Messwerte aus 1026 Einzelmessungen für die 48 verschiedenen Druckparameterkombinationen. Die senkrechten Linien markieren jeweils den Bereich einer Parameterkombination. Die feinen Punkte markieren die Phasendifferenz des photothermischen Messsignals, die Rauten und Kreise deren Mittelwerte für 12.000 bzw. 10.000 U/h für die jeweiligen Farben. Die roten Kreise geben die gemessenen Farbdichten multipliziert mit 10 auf der rechten Ordinate wieder. Die Farbe der Füllung charakterisiert die betreffende Duktoreinstellung. Die gestrichelte Linie zeigt die Walzentemperatur in der Nähe des photothermischen Messpunkts auf der rechten Ordinate. Die durchgezogene rote Linie zeigt das gemittelte radiometrische Signal jeder Einzelmessung und ist damit ein Maß für die Temperatur im Messpunkt. Die Variationen der Feuchte sind nicht gekennzeichnet. Die Reihenfolge der Variation ist über alle Versuche Soll-einstellung +5% +15%)

Ziel der Untersuchungen war, das gemessene photothermische Phasensignal mit der Farbdichte zu korrelieren. Um die Darstellung übersichtlicher zu gestalten, wurden die Messwerte des photothermischen Phasensignals für die verschiedenen Druckgeschwindigkeiten separat dargestellt. Für beide Druckgeschwindigkeiten lässt sich nur für die Volltonplatten ein Trend ableiten. Während die Phase bei den Messungen mit schwarzer Druckfarbe mit der Farbdichte für beide Druckgeschwindigkeiten zunimmt, fällt sie bei den Messungen mit blauer Druckfarbe tendenziell leicht ab. Ein systematischer Unterschied bei unterschiedlicher Feuchteinstellung (jeweils Punkttriple) konnte weder bei den Farbdichtewerten noch bei den photothermischen Phasenwerten festgestellt werden.



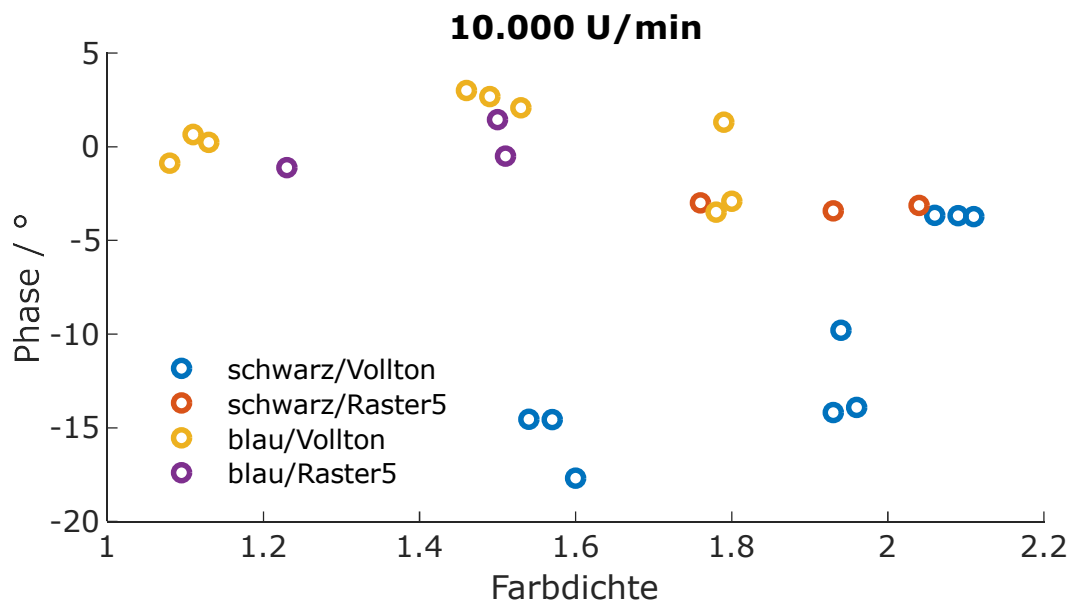


Abbildung 27: Abhängigkeit des photothermischen Phasensignals von der Farbdichte auf dem Druckbogen für 10.000 U/min

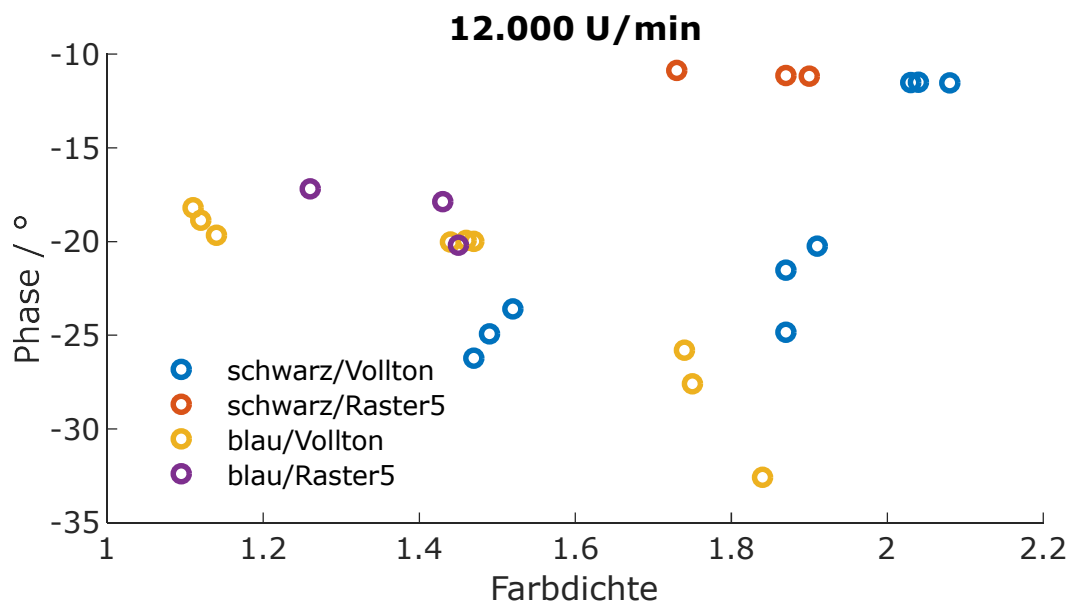


Abbildung 28: Abhängigkeit des photothermischen Phasensignals von der Farbdichte auf dem Druckbogen für 12.000 U/min

### AP 2.2.1 Untersuchungen zum Einfluss der Flächendeckung auf die Messung

Durch Variation der Flächendichte mit Volltonplatte und der 5% Rasterplatter sollte der Einfluss der Flächendeckung auf die Phase des photothermischen Signals untersucht werden. Allerdings stand für die Versuche mit der 5% Rasterplatte nur wenig Zeit zur Verfügung, so dass nur Druckversuche mit der Sollfeuchte durchgeführt werden konnten. Dadurch konnten pro Druckeinstellung nur 3 Messwerte erhoben werden. Angesichts der Streuung der einzelnen Messwerte waren die Unterschiede der Mittelwerte zu gering, um eine Korrelation mit der Farbdichte zuzulassen. Lediglich bei der Einstellung Druckfarbe blau und 12.000 U/h zeichnet sich eine leichte Tendenz wie bei den Volltonfarben ab.

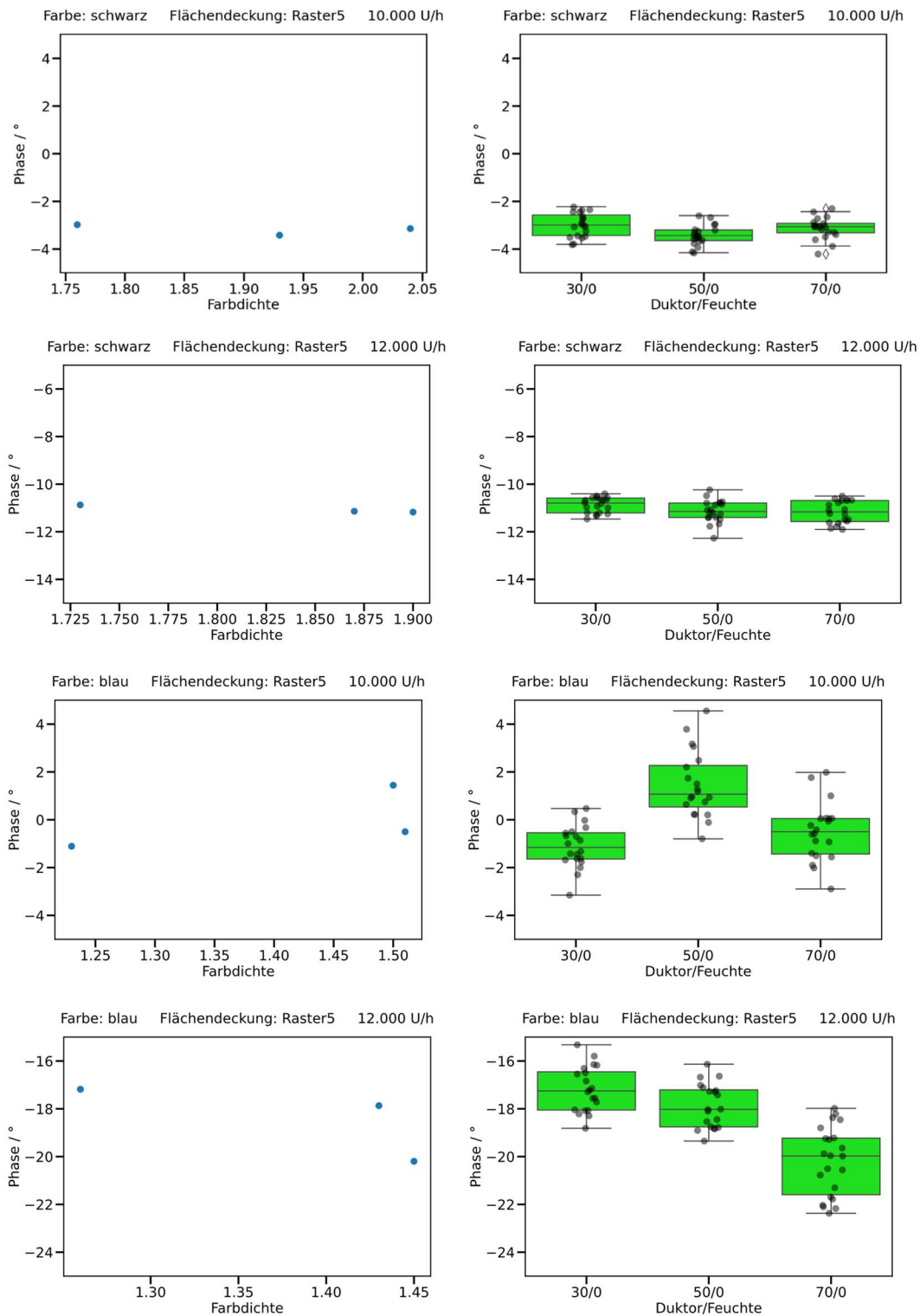


Abbildung 29: Mittelwerte der Messserien pro Druckeinstellung (links) und Verteilung der Einzelmesswerte (rechts) für die Rasterplatte mit 5% Flächendeckung

### AP 2.2.2 Modellgleichung zur Berechnung der Farbdichte auf dem Druckbogen aus der Farbschichtdicke der 4. Farbauftragswalze

Die Modellgleichung zur Vorhersage der Farbdichte auf dem Druckbogen sollte durch eine lineare Korrelation der Farbdichte mit der Phasenverschiebung des photothermischen Signals erstellt werden. Da die Temperaturabhängigkeit der Phasenmessung das Signal scheinbar deutlich beeinflusst, sind im Rahmen der Dissertation, die zu diesem Thema weitergeführt wird,

weitere Untersuchungen erforderlich, die aber innerhalb des Zeitrahmens dieses Projekts nicht mehr durchgeführt werden konnten.

### AP 2.2.3 Untersuchungen zum Temperatureinfluss (Messungen mit kalibriertem Pyrometer)

Ziel dieses Arbeitspaketes war, den Einfluss der Absoluttemperatur der Farbwalze/Druckfarbe auf die Phasendifferenz abzuschätzen und idealerweise zu quantifizieren. Die Messungen zur Untersuchung des Temperatureinflusses wurden aufgrund begrenzter Verfügbarkeit der Offsetdruckmaschine mit dem Laboraufbau durchgeführt. In einem kommerziellen System kann auf das Pyrometer verzichtet werden, wenn die Absolutmesswerte des IR-Detektors mit einer pyrometrischen Messung korreliert und der IR-Detektor damit kalibriert wird. Dann kann die Temperatur der Druckfarbe direkt aus dem Absolutwert des radiometrischen Messsignals des IR-Detektors berechnet werden.

Obwohl das Farbwerk auf 30°C temperiert ist, kann es aufgrund verschiedener Einflüsse wie Walken, Laseranregung, Raumlüftung, Schwankungen der Umgebungstemperatur, Farbwechsel oder passive Walzentemperierung jederzeit zu Temperaturänderungen der Druckfarbe auf der Farbauftragswalze kommen. Die Änderung der Temperatur  $\Delta T$  führt ebenfalls zu Veränderungen der Wärmekapazität, Dichte und Wärmeleitfähigkeit von Walze und Farbe, wodurch eine Änderung der Phase des photothermischen Signals entstehen kann. Dies lässt sich in Abbildung 30 und Abbildung 31 für die leere Farbwalze und in Abbildung 32 und Abbildung 33 für die Farbwalze mit einer Schicht schwarzer Druckfarbe erkennen.

In Abbildung 30 wird die Phasendifferenz des photothermischen Signals der Messwalze über der Zeit dargestellt. In der gleichen Darstellung wird die gemessene Pyrometertemperatur im Messpunkt dargestellt. Durch die Laseranregung und das Walken der Gummiwalze entsteht eine Temperaturerhöhung, die mit einer Änderung der Phase einhergeht. Da bei der leeren Farb-/Messwalze eine zeitabhängige Veränderung der Druckfarbe ausgeschlossen ist, lässt sich die Phasenänderung eindeutig der Temperaturänderung zuweisen. Noch deutlicher wird dies, wenn man wie in Abbildung 31 die Phasendifferenzwerte mit den Temperaturwerten korreliert und darüber abbildet. Die Regressionsgerade hat eine Steigung von knapp  $-0,5^\circ/\text{K}$ , d.h. bei einer Temperaturzunahme von 1 K sinkt die Phase im photothermischen Signal um  $0,5^\circ$ .

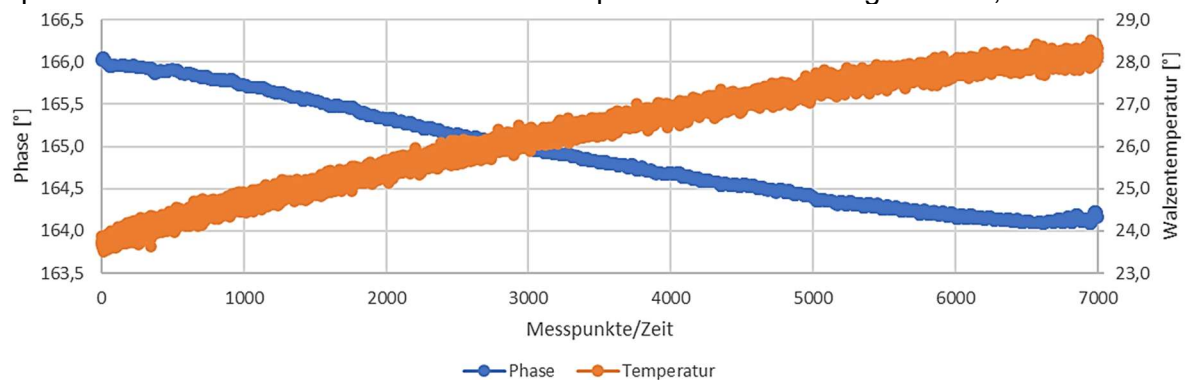


Abbildung 30: Phasenverlauf der leeren Farbwalze über die Zeit (8000 D/h) mit dem zugehörigen Temperaturverlauf über die Zeit

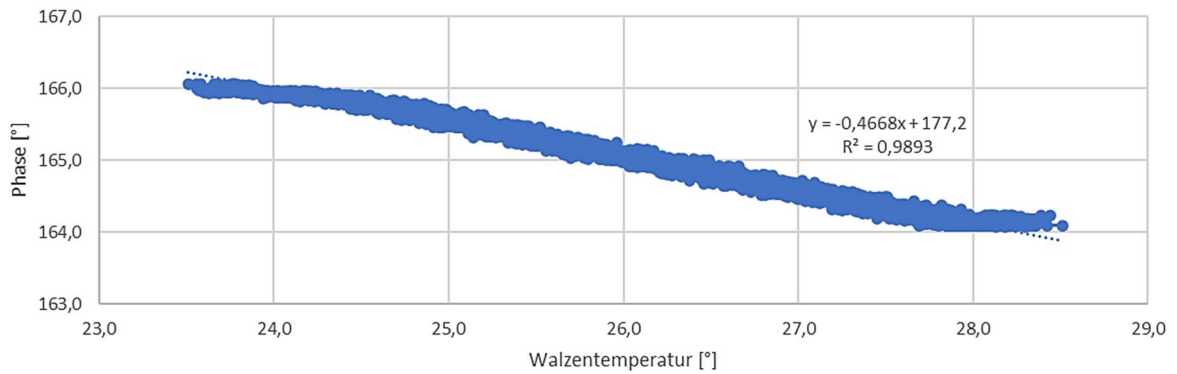


Abbildung 31: Phasenverlauf der leeren Farbwalze über die Zeit (8000 D/h) mit dem zugehörigen Bestimmtheitsmaß und der linearen Gleichung

Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  weist hier auf eine sehr starke Korrelation zwischen Phasendifferenz und Temperatur im Messpunkt hin.

Die gleiche Auswertung wurde mit einer mit schwarzer Druckfarbe beauftragten Messwalze durchgeführt (Abbildung 32 und Abbildung 33). Auch hier lässt sich diese Korrelation beobachten, wobei hier auch chemische Veränderungen in der Farbe aufgrund des langen Messzeitraums nicht vollständig ausgeschlossen werden können. Werden solche Effekte vernachlässigt, kann eine gemessene Phasendifferenz des photothermischen Signals mit Hilfe der Formel der Regressionskoeffizienten für die gemessene Temperatur korrigiert werden. Somit lässt sich eindeutig ein Einfluss der Temperatur auf die Phasendifferenz feststellen und sollte idealerweise bei einem späteren Messsystem über einen Korrekturfaktor mitberücksichtigt werden.

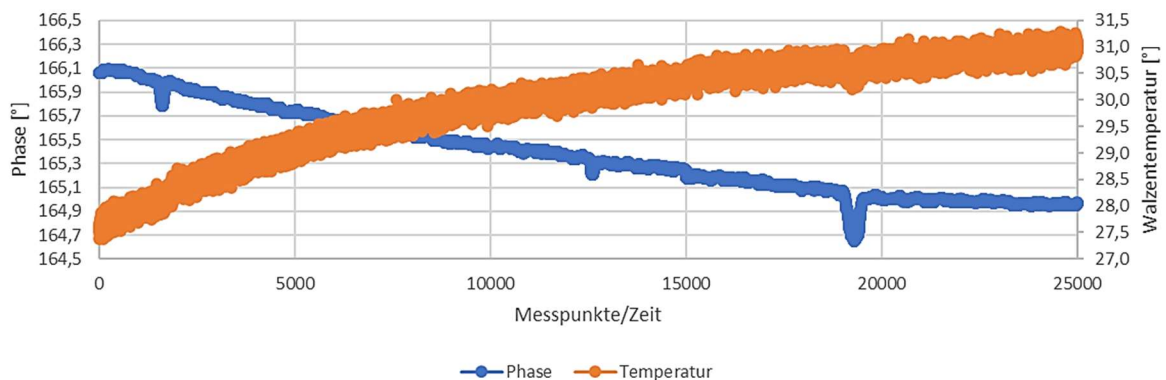


Abbildung 32: Phasenverlauf der Farbe schwarz auf der Farbwalze über die Zeit (8000 D/h) mit dem zugehörigen Temperaturverlauf über die Zeit

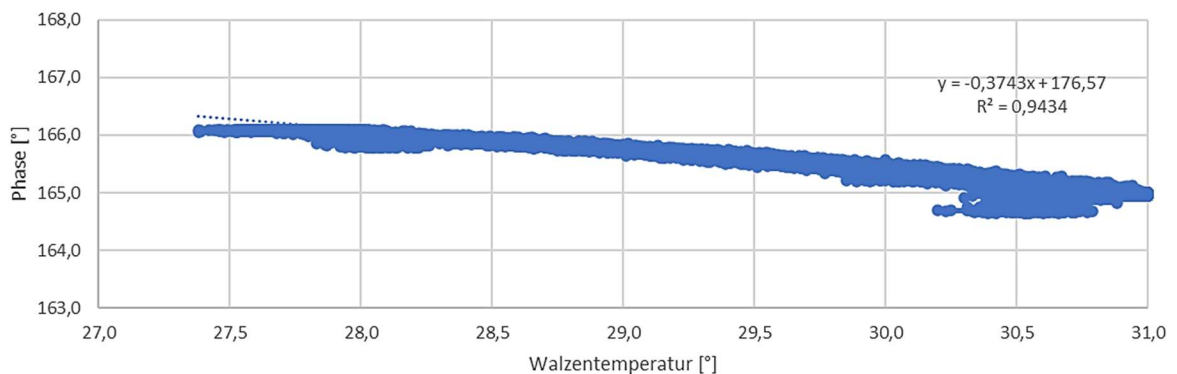


Abbildung 33: Phasenverlauf der Farbe schwarz auf der Farbwalze über die Zeit (8000 D/h) mit dem zugehörigen Bestimmtheitsmaß und der linearen Gleichung

Für eine exaktere Untersuchung müssten an dieser Stelle jedoch die Messzeiträume stark verkürzt werden, was eine aktive Temperierung der Messwalze im Laboraufbau erfordern würde. Dies konnte im Laboraufbau nicht realisiert werden.

#### **AP 2.2.4 Untersuchungen zur Wartezeit nach dem Einschalten der Druckmaschine**

Während der Druckversuche wurden verschiedene Wartezeiten betrachtet. Während bei der Änderung von Druckgeschwindigkeit und Feuchtepotential eine Einschwingdauer von ca. 30 s beobachtet werden konnte, dauerte das Einschwingen der Farbschichtdicke bei einer Änderung der Duktoreinstellung ca. 45 s. Bei einer Änderung der Farbe oder der Druckplatte war die Einlaufphase noch einmal höher. Die Dauer einer Einzelmessung betrug wie zuvor beschrieben etwa 3 s, wobei bis zu 20 Einzelmessungen pro Messpunkt durchgeführt wurden. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um auch die Schwankungen des Messsignals abzubilden und zu prüfen.

#### **AP 2.2.5 Messsoftware, Modellerstellung und Echtzeitschichtdickenausgabe**

Eine der teuersten Komponenten im Messsystem ist der Lock-in Verstärker. Als Ersatz für diese Hardware, mit der Phasendifferenz und Amplitude zwischen Anregungsmodulation und dem photothermischen Messsignal gemessen werden, kommen zwei Softwarelösungen in Frage: Eine Auswertung mit Fourier-Transformation oder eine Auswertung mit einem digitalen Lock-In Verstärker (LIA).

Beide Auswertelgorithmen wurden mit Matlab implementiert. Um die Auswertungsalgorithmen zu evaluieren, wurden Messdaten mit dem Farbwerk-Simulator generiert, die mit dem zur Datenerfassung ausgewählten Datenlogger Labjack T7-Pro aufgenommen wurden. Für diese Versuche wurde der Laboraufbau auf 8.000 U/h eingestellt und abgewartet bis das Phasensignal nach dem Lock-in Verstärker (→ dem Laborgerät SR830 von Stanford Research) eine stabile Phasendifferenz erreicht hat. Dann wurde das Anregungssignal (Sinus mit 101 Hz, moduliert über SR830) und das Detektorsignal in 13 Messintervallen zu je 50 s mit den Datenlogger mit 220 Hz aufgezeichnet (→bester Kompromiss nach Nyquist von Auflösung und Sampling Rate). Pro Messung ergab dies 11.000 Messpunkte. In Abbildung 34 sind exemplarisch die Rohdaten des Detektionssignals einer Messung dargestellt.

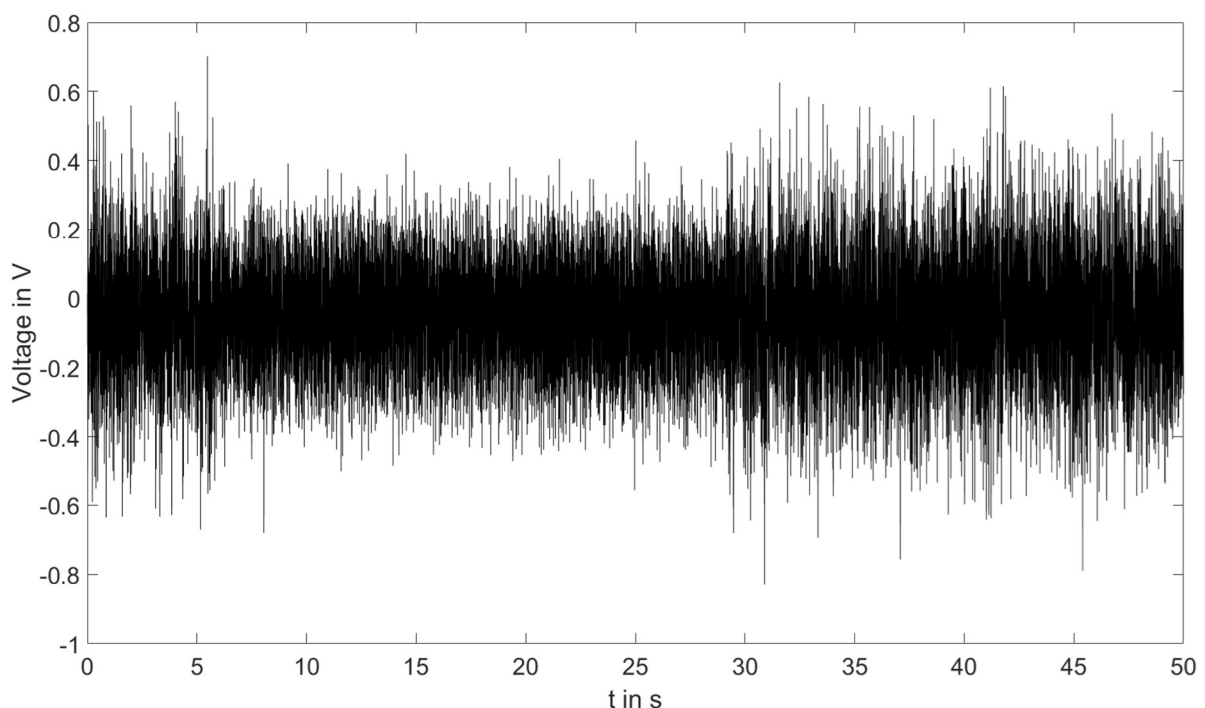
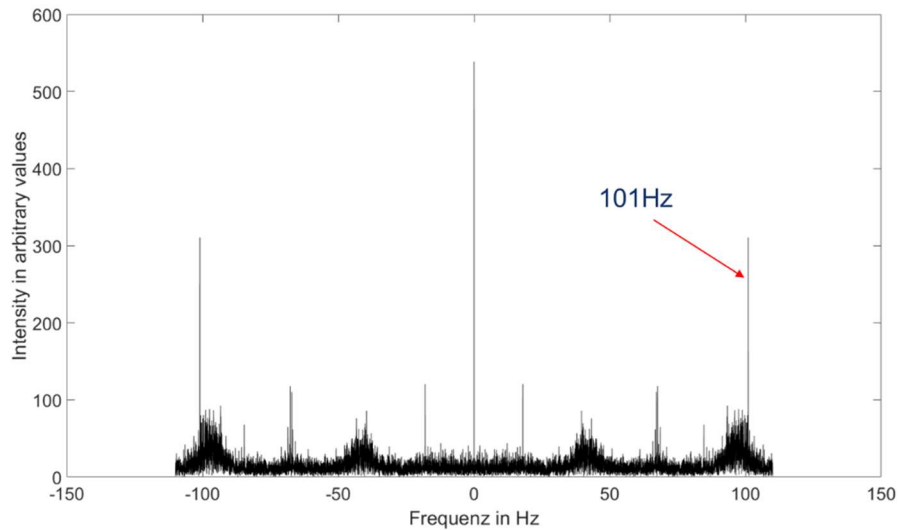


Abbildung 34: Detektionssignal (in Volt) einer Farbschichtdickenmessung am Farbwerk-Simulator über die Messzeit dargestellt.

Im Anschluss wurden die Rohdaten für den Vergleich zwischen FFT und Lock-In-Algorithmus verwendet. Führt man eine Fourier-Transformation mit den Rohdaten des Detektionssignal aus, erhält man wie in Abbildung 35 dargestellt, das Signal in der Frequenzdomäne. Hier ist ein Intensitätsspek bei der Anregungsfrequenz von 101 Hz deutlich zu erkennen.



1.

Abbildung 35: Detektionssignal (vgl. vorherige Abbildung) in der Frequenzdomäne nach Anwendung der Fourier-Transformation

Da die Anregungsfrequenz bekannt ist, lässt sich diese leicht aus dem Rohsignal isolieren, wie in der nächsten Abbildung dargestellt ist.

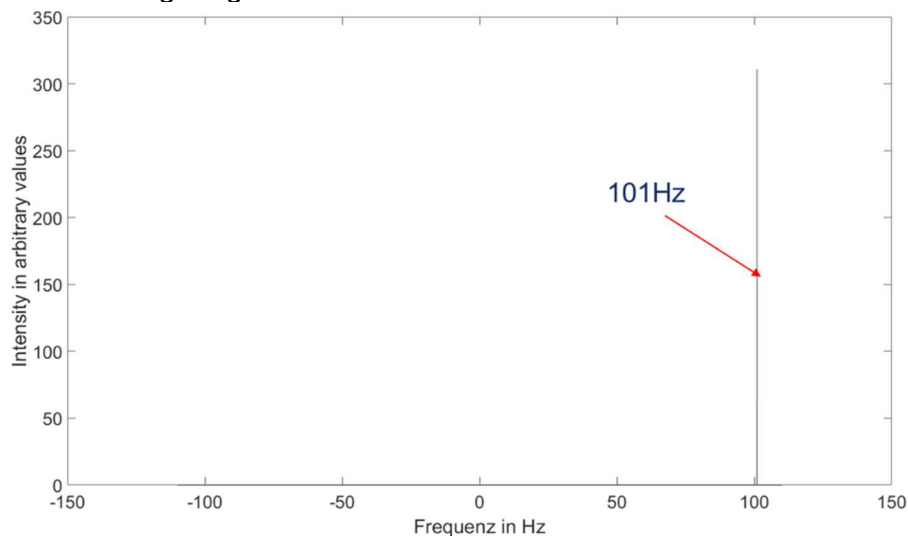


Abbildung 36: Gefiltertes Rohsignal nach der Anregungsfrequenz von 101 Hz

Durch die Rücktransformation des gefilterten Signals (Anregungs- und Detektionssignal) kann aus dem Winkel des komplexen Wertes zur Realteilachse die Phase von Anregungs- und Detektionssignal für jeden Zeitpunkt der Messung dargestellt werden (siehe Abbildung 37). Mittels der Differenz der Phasenwerte von Detektion und Anregung zu jedem Zeitpunkt kann somit die Phasendifferenz über die FFT ermittelt werden.

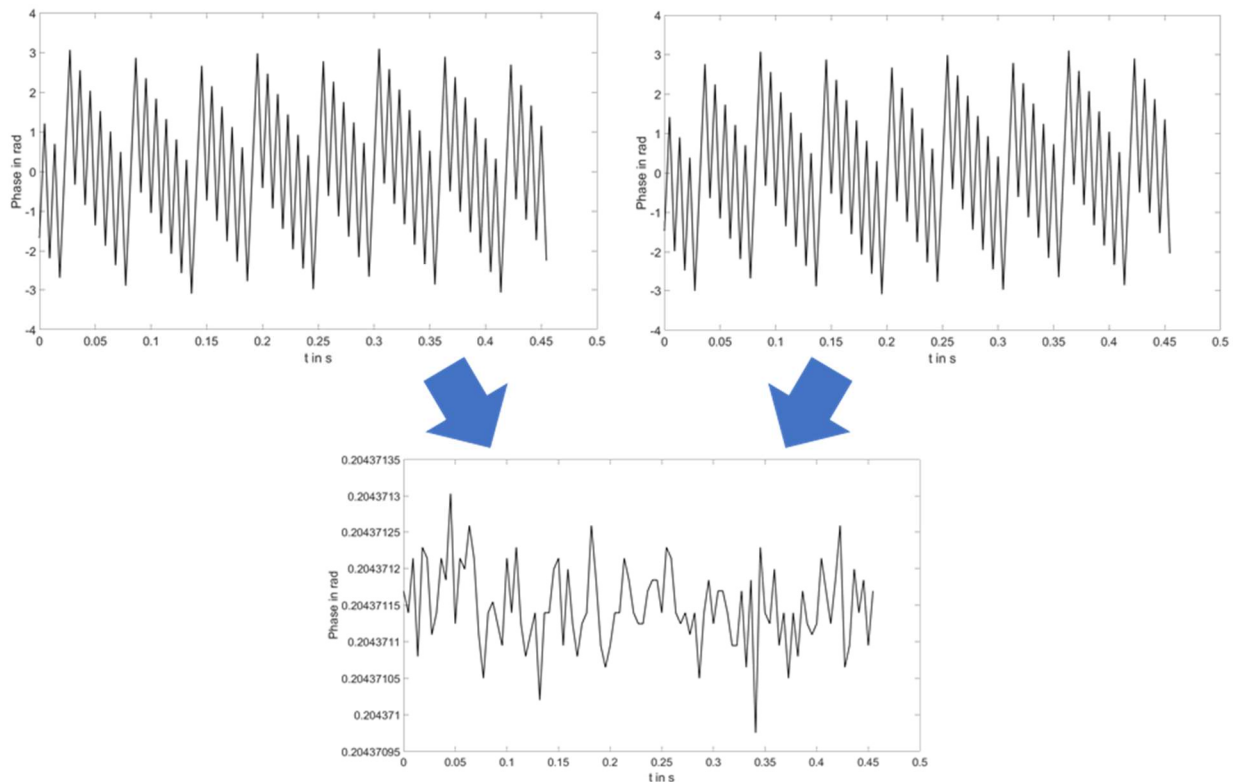


Abbildung 37: FFT-Rücktransformation und die daraus berechnete Phase des Messsignals (oben links) und des Anregungssignals (oben rechts). Werden diese voneinander abgezogen, erhält man die Phasendifferenz (unten mittig) für die gesamte Messung

Beim digitalen Lock-in Verstärker (LIA) als Alternativverfahren werden Referenzmodulationsfunktionen mit bekannter Phase  $\theta_{ref} = 0$  jeweils mit den synchronen Signalwerten multipliziert. Die Eingangswerte bei der LIA sind die periodischen Anregungs- und Detektionssignale

$$V_{in} = V_{signal} \cdot \cos(\omega_{ref}t + \theta_{signal})$$

Multipliziert man das Signal  $V_{in}$  jeweils mit den Referenzfunktionen

$$V_{ref,cos} = V_{ref} \cdot \cos(\omega_{ref}t)$$

$$V_{ref,sin} = V_{ref} \cdot \sin(\omega_{ref}t)$$

formt um und wendet einen Tiefpassfilter in Form einer Mittelung der Werte über die Zeit an, erhält man wiederum zwei Funktionen

$$X = \frac{1}{2} V_{signal} V_{ref} \cdot \cos(\theta_{signal})$$

$$Y = \frac{1}{2} V_{signal} V_{ref} \cdot \sin(\theta_{signal})$$

Damit ergibt sich die Phase des Signals  $\theta_{ref}$  gegenüber dem Referenzsignal mit Phase  $\theta_{ref} = 0$  zu

$$\theta_{signal} = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$$

und die Amplitude

$$A = 2 \cdot \sqrt{X^2 + Y^2}$$

Die Auswertung wird sowohl für die Anregungs- als auch für die Detektionssignale durchgeführt. Damit erhält man die Phasenlage der Signale bzgl. der Referenzmodulation  $V_{ref}$  mit Phase  $\theta_{ref} = 0$ . Durch Differenzbildung der Phasenlage von Anregungs- und Detektionssignal erhält man die Phasendifferenz zwischen diesen beiden Signalen. Abbildung 38 zeigt die mit den beiden beschriebenen Verfahren berechneten Phasendifferenzen. Obwohl die Signale, die in die Algorithmen eingehen, eine sehr niedrige Amplitude haben und verrauscht sind und die Algorithmen gänzlich unterschiedlich sind, ist eine sehr gute Übereinstimmung der Messwerte zu erkennen. Lediglich bei Messung 2 ist ein nennenswerter Unterschied zu erkennen.

Da für die Fast-Fourier-Transformation die Modulationsfrequenz aus den Messdaten extrahiert werden muss und dabei ein Diskretisierungsfehler auftreten kann, wurde für die Messsoftware der digitale Lock-in Verstärker implementiert. Für die Messung kann man entweder die Sinus- und Kosinus-Referenzmodulationswerte analog ausgeben und wieder aufzeichnen oder man speichert sie direkt digital mit den Messwerten ab. Da der Datenlogger in unserem Fall pro Modulationsperiode 256 Spannungswerte für die Steuerung der Laserdiode ausgibt und synchron 256 Messwerte aufnimmt, ist die Synchronität und damit die Phasenrichtigkeit garantiert und die digitalen Sinus- und Kosinus-Referenzwerte können direkt abgespeichert werden.

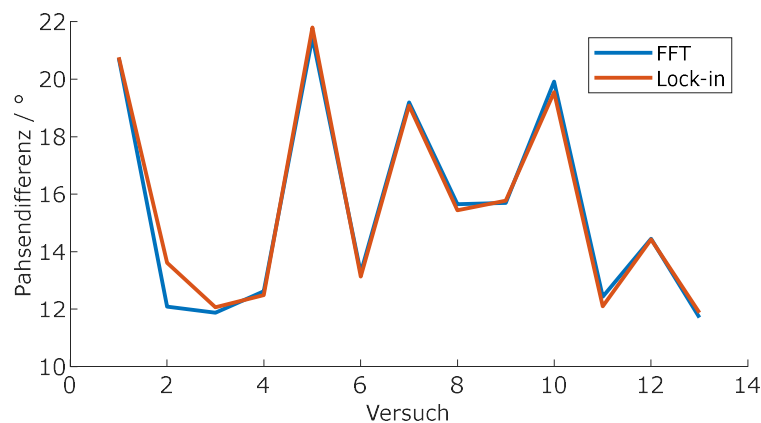


Abbildung 38: Phasendifferenz zwischen Anregungs- und Detektionssignal von 13 Messungen zur Evaluierung der Phasenbestimmung mit Fast-Fourier-Transformation und dem digitalen Lock-in Verfahren.

### AP 2.3 Messungen am Wasserlack

Vom projektbegleitenden Ausschuss wurde beschlossen, sich im Rahmen dieses Projekts auf die Messung konventioneller Druckfarben auf Ölbasis zu beschränken. Wenn die prinzipielle Anwendbarkeit und Praktikabilität für Druckfarben auf Ölbasis positiv getestet werden kann, erfordert eine Übertragung auf wasserbasierte Druckfarben möglicherweise lediglich eine Modifikation des Systems hinsichtlich des verwendeten Anregungslasers (Wellenlänge, Laserleistung ...) sowie entsprechende Kalibriermessungen.



## Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)  
HPA-Gruppe A 13,2 PM
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)  
Nicht zutreffend
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)  
Nicht zutreffend

## Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten entsprachen in vollem Umfang dem beantragten und bewilligten Antrag und waren daher notwendig und angemessen. Da der durchführende Projektmitarbeiter erst 6 Wochen nach Projektstart eingestellt werden konnte, war eine zweimonatige kostenneutrale Laufzeitverlängerung erforderlich.

## Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

### Durchgeführte und geplante spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Forschungsvorhabens

| Maßnahme   | Ziel   | Rahmen                                    | Datum/Zeitraum   |
|--|--|---|--|
| Mündliche und schriftliche Präsentation der Ergebnisse im PA | Diskussion über die Zielsetzung, Anforderungen, Ergebnisse und nächste Schritte<br><br>Berücksichtigung von Anregungen, Wünschen und Verbesserungen des PA<br><br>Ergebnistransfer in die Wirtschaft | PA-Sitzung in Präsenz, online oder hybrid | 06.10.2020 Kickoff<br>24.02.2021<br>28.06.2021<br>21.10.2021<br>10.03.2022<br>07.07.2022<br>1 noch ausstehende Sitzung |
| Zwischenbericht  | Ergebnisse sollen potenziellen Anwendern zugänglich gemacht werden, um die Möglichkeiten zur Nutzung der Forschungsergebnisse aufzuzeigen<br><br>Ergebnistransfer in die Wirtschaft                  | Veröffentlichung des Zwischenberichts     | April 2022   |
| Information an die Unternehmen des PA                        | Präsentation des Zwischenberichts  | FGD Verteilung per E-Mail                 | März 2022  |
| Beratung von Unternehmen zur berührungslosen und             | Etablierung der photothermischen   | nach Bedarf telefonisch oder vor Ort      | bei Anfrage  |

|                                       |                                    |                      |                       |
|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| zerstörungsfreien Qualitätsprüfung    | Messtechnik in der Wirtschaft      |                      |                       |
| Publikation der Forschungsergebnisse  | Ergebnistransfer in die Wirtschaft | Homepage des ILM     | Am Ende der Laufzeit  |
| Messsystem zur Evaluierung überlassen | Möglichkeit zum Testen             | Wird noch vereinbart | Zum Ende der Laufzeit |

### **Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Laufzeit des Forschungsvorhabens**

| Maßnahme  | Ziel  | Rahmen  | Datum/Zeitraum                           |
|---|---|---|--|
| Erstellung eines Arbeitsblattes   | FGD-Arbeitsblatt für interessierte Unternehmen  | Frankfurt FGD   | Nach Projektende                         |
| Beratung von Unternehmen zur berührungslosen und zerstörungsfreien Qualitätsprüfung | Etablierung der photothermischen Messtechnik in der Wirtschaft  | Nach Bedarf telefonisch, Treffen bei FGD/VDMA   | Nach Bedarf                              |
| Vorstellung der Ergebnisse auf Fachtagungen/Messen                                  | Information der Fachöffentlichkeit  | drupa Düsseldorf<br>fogra Symposium<br>innpPRINT Leipzig  | Nach Abschluss der Dissertation          |
| Abschlussbericht  | Ergebnisse sollen potenziellen Anwendern zugänglich gemacht werden, um die Möglichkeiten zur Nutzung der Forschungsergebnisse aufzuzeigen<br><br>Ergebnistransfer in die Wirtschaft | Informationstagung  | nach Bedarf nach Abschluss des Vorhabens |
| Publikation der Ergebnisse in Fachjournalen   | Information der Fachöffentlichkeit  | Fachzeitschrift z.B. Deutscher Drucker, Druck & Medien, Druckspiegel, Ink World, Farbe und Lack | Nach Projektende                         |
| Pflegen des Laborsystems  | Möglichkeit zum Testen, Anpassung nach Bedarf   | Bei Mitgliedern der FGD   | Nach Projektende                         |