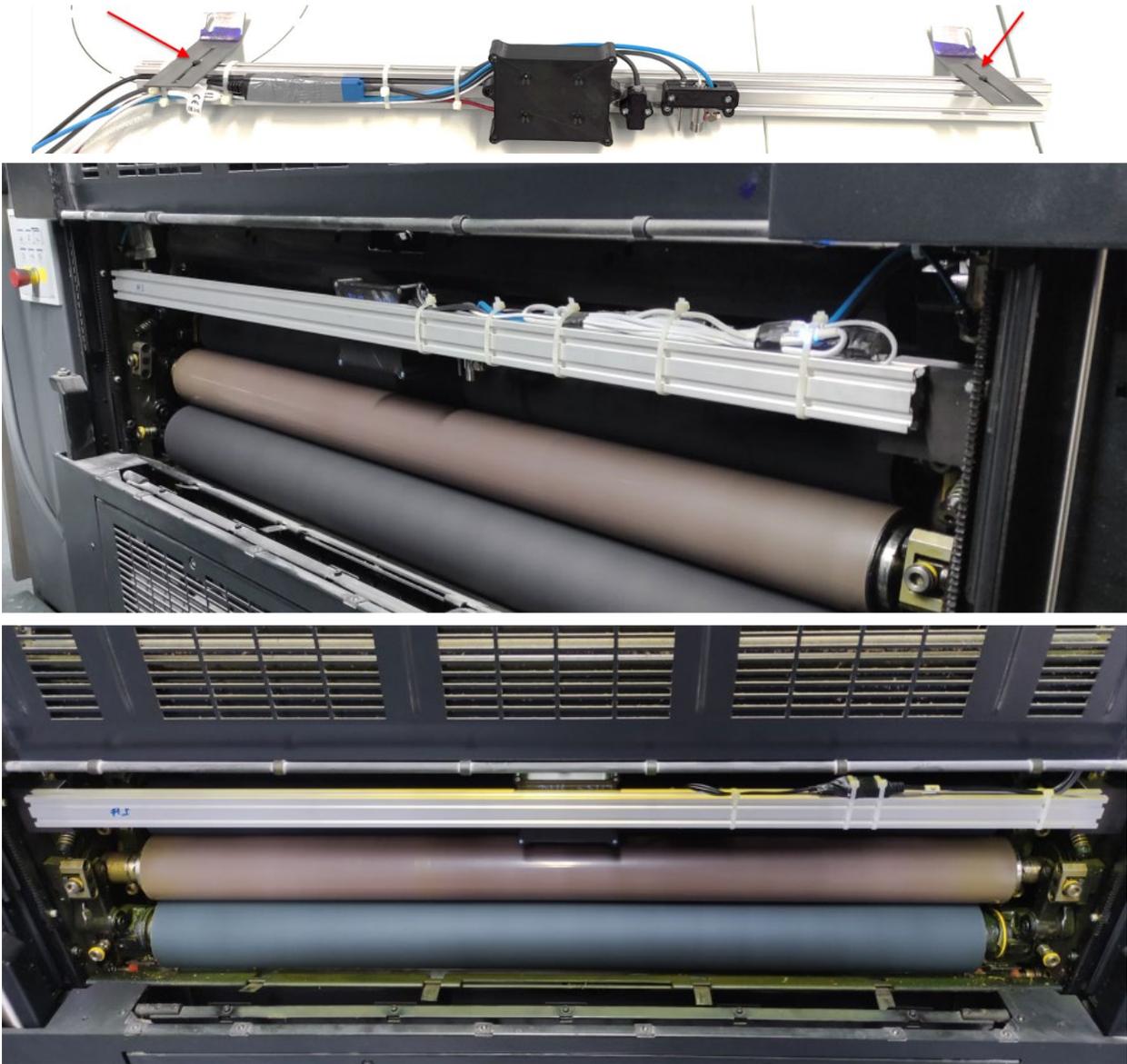


# Kontrolle des Farb-Wasser-Gleichgewichts durch KI

Knödl, Felix; Dörsam, Edgar; Schneider, Tizian; Schütze, Andreas



Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung auf TUpriints: 2024

URN: [urn:nbn:de:tuda-tuprints-273761](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-273761)

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

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

# Schlussbericht vom 17.05.2024

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 22060 N

## Thema

Kontrolle des Farb-Wasser-Gleichgewichts durch KI

## Berichtszeitraum

01.10.21 bis 31.12.23

## Forschungsvereinigung

Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. - FKM

Lyoner Straße 18

60528 Frankfurt am Main

## Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1:

Technische Universität Darmstadt - Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren

Magdalenenstraße 2

64289 Darmstadt

Forschungseinrichtung 2:

Universität des Saarlandes - Lehrstuhl für Messtechnik

Universität Campus, Gebäude A5.1

66123 Saarbrücken

Gefördert durch:

## Inhaltsverzeichnis

Thema.....	3
Berichtszeitraum.....	3
Forschungsvereinigung .....	3
Forschungseinrichtung(en).....	3
1. Einleitung und Motivation .....	5
2. Problemstellung .....	5
3. Zielsetzung.....	6
4. Methodik .....	6
5. Grundlagen .....	8
5.1. Offsetdrucktechnik.....	8
5.2. Maschinelles Lernen.....	8
6. Identifikation von relevanten und dominanten Prozessparameter.....	11
7. Voruntersuchungen.....	14
7.1. Auswahl von geeigneten Sensoren.....	14
7.2. Untersuchung von Farb-Feuchtmittel-Emulsionen mit Gassensoren.....	15
7.3. Vorversuche bei den Druckmaschinenherstellern (DMH).....	18
8. Messaufbau und Entwicklung einer Messtraverse.....	24
9. Messkampagne I – DMH.....	27
9.1. Vorbereitung Messkampagne I - DMH B.....	28
9.2. Auswertung und Modellbildung - DMH B .....	29
9.3. Erkenntnisse aus den Versuchen bei DMH B und Anpassungen für die Versuche bei DMH A.....	35
9.4. Vorbereitung Messkampagne I - DMH A.....	36
9.5. Auswertung und Modellbildung - DMH A .....	37
10. Vergleich und Fazit der Ergebnisse aus Mess- kampagne I.....	40
11. Messkampagne II - Druckerei .....	41
11.1. Vorbereitung Messkampagne II.....	41
11.2. Auswertung und Modellbildung .....	44
12. Auswertung von Langzeitmaschinendaten - Druckerei .....	54
13. Vergleich der Ergebnisse aus Messkampagne I und Messkampagne II.....	56
14. Neuer Modellansatz zur Empfehlung relativer Feuchtpoti-Änderungen.....	58
15. Zusammenfassung und Ausblick .....	60
16. Literaturverzeichnis.....	63

## 1. Einleitung und Motivation

Durch die Arbeit der rund 130.000 Mitarbeiter in den 7.484 Druckereien (überwiegend KMU) wird in Deutschland ein jährlicher Umsatz von ungefähr 20 Mrd. € erwirtschaftet, was die Herstellung von Druckerzeugnissen zu einem der wichtigsten Wirtschaftszweige der Bundesrepublik macht [Bvd20]. Der Offsetdruck stellt dabei mit ca. 50 % des Umsatzes die wohl wichtigste Drucktechnologie zur Erzeugung von Druckerzeugnissen in Deutschland dar [Big14]. Der Offsetdruck ist ein Flachdruckverfahren, bei dem die druckenden und nichtdruckenden Stellen in einer Ebene liegen. Beim Drucken wird zunächst auf die Druckform ein dünner Film von Feuchtmittel aufgetragen, so dass die Druckfarbe nur auf den zu druckenden Stellen haften kann [Kip01], [Rie89], [Han93]. Für die Regelung der auf die Druckform aufzutragenden Farbschichtdicke haben sich am Markt verschiedene Regelalgorithmen etabliert [Len13]. Im Gegensatz dazu sind die Einstellung und Regelung der aufzutragenden Feuchtmittelmenge bzw. -schichtdicke nicht automatisiert. Diese wird bis heute – auch bei modernen Druckmaschinen – noch manuell eingestellt und als Reaktion auf Schwankungen des Raumklimas über den Tag mehrmals händisch korrigiert. Das aus dem Verhältnis zwischen Farb- und Feuchtmittel-Schichtdicke resultierende Farb-Wasser-Gleichgewicht (FWG), welches eine Emulsion von Druckfarbe und Feuchtmittel beschreibt, ist für einen qualitativ hochwertigen Druck essenziell. Wegen der ständig erforderlichen händischen Eingriffe wird dies in der Druckbranche als das seit Jahrzehnten ungelöstes Problem des Offsetdrucks angesehen [Wal87, Ros06, Fri87, Web21]. Durch den zu verzeichnenden Rückgang von fachlich qualifiziertem Druckpersonal und der Notwendigkeit, kleine und mittelständische Offset-Druckereien auch zukünftig gegenüber dem Digitaldruck und großen Unternehmen wettbewerbsfähig zu halten, muss der Offsetdruckprozess weiter automatisiert und somit das zentrale Problem der Regelung des Farb-Wasser-Gleichgewicht gelöst werden [Bvd20, Mic20].

## 2. Problemstellung

Die Vielzahl der auf das Farb-Wasser-Gleichgewicht einwirkenden Größen ist primär der Grund, dass die bisher untersuchten Ansätze im Allgemeinen zunächst in einer Laborumgebung entwickelt und danach auf industrielle Druckmaschinen übertragen wurden. Dabei wurden neben Ansätzen zur Farb- und Feuchtwerkskonstruktion viele verschiedene Messtechnikansätze wie beispielsweise zur photometrischen Messung der Farbschichtdicke oder zur Feuchtmittelschichtdickenmessung mittels Laser-Triangulation untersucht [Spi18, Sar15]. Auch eher untypische Messansätze, wie das Detektieren von Klangveränderungen im Farbspaltungsprozess analog zur akustischen Vorgehensweise von erfahrenem Druckpersonal, wurden bereits untersucht [Vol07]. Eine automatische Regelung der Emulsion ist bis heute mit diesen – wenn auch teilweise vielversprechenden – Ansätzen allerdings noch nicht realisierbar. Dies liegt an verschiedensten Faktoren, wie beispielsweise dem in einem Druckwerk vorliegenden geringen Bauraum gegenüber der erforderlichen Größe der entwickelten Messaufbauten oder Limitationen wie dem bei schwarzer Druckfarbe vorliegendem Absorptionsverhalten von Licht, den Welligkeiten der Oberflächen von Walzen und deren Rotationsgeschwindigkeiten (Bogenoffsetdruck bis zu 5 m/s) sowie vieler weiterer Einflüsse, die in einem realen, industriellen Druckprozess auftreten [Web21, Kub20]. Die internationale Literaturlage zu Farb- und Feuchtwerken und damit auch zum Farb-Wasser-Gleichgewicht ist sehr dürrig. Die Ursache liegt zum einen darin, dass die deutschen und japanischen Hersteller von konventionellen Druckmaschinen zusammen auf einen geschätzten Weltmarktanteil von 80% kommen und selbst wenig publizieren. Zudem sind Studien der Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e.V. als vertraulich eingestuft. Zum anderen gibt es weltweit nur wenige

wissenschaftliche Forschungsstellen für Drucktechnologien, wobei sich keine ausschließlich auf den Offsetdruck fokussiert. So gibt es für den Offsetdruck weder spezielle Konferenzen noch spezielle wissenschaftliche Journals. Auch in dem einzigen wissenschaftlichen Journal für die Druckbranche (JPMTR - Journal of Print and Media Technology Research) gibt es keine Veröffentlichung zum Farb-Wasser-Gleichgewicht im Offsetdruck. Einige wenige wissenschaftliche Veröffentlichungen beschäftigen sich auf einem sehr abstrakten Niveau mit dem Farb-Wasser-Gleichgewicht [Bla16], [Roi23], [Rie23], welche jedoch auch keine Lösungsansätze für die Praxis enthalten.

Die seit Jahrzehnten bekannte, jedoch trotz modernster Messaufbauten nicht zufriedenstellend lösbare Herausforderung einer automatisierten Einstellung des Farb-Wasser-Gleichgewicht im Offsetdruck soll deshalb in diesem Forschungsvorhaben durch Verwendung der vorhandenen und zusätzlicher Sensorik sowie dem Einsatz datengetriebener Modelle (Sensorfusion) realisiert werden.

### **3. Zielsetzung**

Bisherige Ansätze zur Messung einzelner, konkreter Größen und die darauf aufbauende robuste Beherrschung des Farb-Wasser-Gleichgewichts sind nicht zufriedenstellend. Vielmehr wird vermutet, dass bedingt durch die hohe Komplexität des Druckprozesses und der Vielzahl der auf die Emulsion wirkenden Einflussgrößen die gesuchte Information verteilt in Signalen verschiedener Sensoren und Maschinenparametern vorhanden ist. Deshalb wird in diesem Forschungsvorhaben ein Ansatz für die Kontrolle des Farb-Wasser-Gleichgewichts auf Basis von Sensorfusion und Methoden des maschinellen Lernens verfolgt. Ziel ist es, das von vielen Einflussgrößen abhängige und sich im Prozess dynamisch verändernde Farb-Wasser-Gleichgewicht erstmalig ansatzweise automatisiert in einem konstanten Prozessfenster zu halten. Zuvor ist zu Beginn eines Druckauftrags das Farb-Wasser-Gleichgewicht durch erfahrenes Druckpersonal richtig einzustellen. Dadurch soll trotz variierender Randbedingungen eine hohe Druckqualität für große sowie kleine Druckaufträge rechnergestützt sichergestellt werden. Gleichzeitig werden damit die Produktivität und Effizienz von Druckmaschinen im Allgemeinen erhöht, was unmittelbar den knapp 7500 Druckereien (überwiegend KMU) zugutekommt [Bvd20]. Durch die Forschungsergebnisse und die Umsetzung der generierten Handlungsempfehlungen wird nicht nur nachhaltiger produziert und der Prozessbeobachtungsaufwand für das Druckpersonal reduziert, was Zeit für andere Tätigkeiten schafft, sondern darüber hinaus auch die Makulatur (nicht verkaufbare Druckerzeugnisse) vermindert, Kosten und Zeit gespart, Kundenreklamationen verringert, ein Aussortieren von Druckprodukten mit mangelhafter Qualität vermieden und die Planbarkeit erhöht.

### **4. Methodik**

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird ein Ansatz zur Kontrolle des Farb-Wasser-Gleichgewichts auf Basis von Sensorfusion und Methoden des Maschinellen Lernens (ML) untersucht. Diese interdisziplinäre Aufgabenstellung zwischen Drucktechnologie und ML wird vom Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD), Prof. E. Dörsam, Technische Universität Darmstadt, <https://www.idd.tu-darmstadt.de/>, und dem Lehrstuhl für Messtechnik (LMT), Prof. A. Schütze, Universität des Saarlandes, <https://www.lmt.uni-saarland.de/>, gemeinsam durchgeführt. Hierzu werden Daten in insgesamt zwei Messkampagnen an industriellen Druckmaschinen erhoben. Die Daten werden anschließend mittels der am LMT bereits verfügbaren open source Toolbox zum automatisierten ML ausgewertet und in

datengetriebene Modelle überführt, die letztendlich eine Handlungsempfehlung zur korrekten Nachjustierung des Farb-Wasser-Gleichgewichts für das Druckpersonal ableiten sollen [Kle19, Sch18\_1]. Die Handlungsempfehlungen setzen voraus, dass durch das Druckpersonal zu Beginn eines Druckauftrags das Farb-Wasser-Gleichgewicht korrekt eingestellt worden ist. Mit den Handlungsempfehlungen wird im weiteren Betrieb das Farb-Wasser-Gleichgewicht dann im gewünschten Prozessfenster gehalten, so dass eine kontinuierlich hohe Druckqualität erwartet werden kann.

In dieser Untersuchung werden keine Laborversuche durchgeführt. D. h. alle Druckversuche finden auf realen, handelsüblichen Bogen-Offsetdruckmaschinen im Format 3B (ca. 70 cm x 100 cm) statt. Aus dem Projektbegleitenden Ausschuss stellen Druckmaschinenhersteller A und Druckmaschinenhersteller B für erste Voruntersuchungen und eine Messkampagne jeweils eine Druckmaschine zur Verfügung (im Folgenden wird Druckmaschinenhersteller mit DMH abgekürzt). Der Vorteil liegt darin, dass direkt an den Druckmaschinen Messwerte ermittelt werden können und so eine Skalierung von Labor auf die Praxis entfällt. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass Messaufbauten für die spätere Messkampagne in einer Druckerei entwickelt und erprobt werden können. Nachteilig ist allerdings, dass die zur Verfügung stehende Zeit sehr beschränkt ist und auch das für das Drucken zur Verfügung stehende Papier nur begrenzt vorhanden ist. Die ursprünglich in der Beantragung vorgesehenen Druckversuche in einem Klimazelt konnten aufgrund von Corona-Pandemie-Beschränkungen und deren Nachwirkungen nicht durchgeführt werden.

Die Vorgehensweise lässt sich in die Abschnitte **Vorüberlegungen**, **Vorversuche**, **Messkampagne I** und **Messkampagne II** unterteilen und wird im Folgenden beschrieben.

In den **Vorüberlegungen** sollen zunächst dominante und relevante Parameter identifiziert werden, welche Einfluss auf das Farb-Wasser-Gleichgewicht haben. Hierzu wird unter anderem eine Expertenbefragung durchgeführt. Im Anschluss werden geeignete zusätzliche Sensoren ermittelt, welche in den sehr begrenzten Bauraum eines Farb- und Feuchtwerks einer Offsetdruckmaschine eingebaut werden können. Im Speziellen wird ein Konzept entwickelt wie ein Teil der Sensoren innerhalb einer Druckmaschine sicher angebracht werden können.

Durch **Vorversuche** an Druckmaschinen bei zwei Druckmaschinenherstellern (DMH) sollen das Messkonzept und die Auswertemethoden entwickelt und erprobt werden. Insbesondere ist zu überprüfen, wie die notwendige Messtechnik betriebssicher in die Druckmaschinen eingebaut werden kann, so dass der laufende Druckbetrieb nicht beeinträchtigt wird. Aus dem Projektbegleitenden Ausschuss stellen DMH A und DMH B jeweils eine Druckmaschine zur Verfügung. Gleichzeitig soll untersucht werden, welche Tools des MLs benötigt werden und geeignet sind.

Den Vorversuchen schließt sich eine **Messkampagne I** an, welche wiederum bei den beiden DMH auf den jeweiligen Druckmaschinen durchgeführt wird. Zu Beginn der Messkampagne I sollen die zu verwendenden zusätzlichen Sensoren feststehen und anhand eines Versuchsplans relevante Zustände der Druckmaschinen angefahren werden. Während die Sensoren kontinuierlich Messdaten erfassen, werden die Maschinenparameter separat in Logbüchern dokumentiert. Die während der Messkampagne erfassten Messdaten werden im Anschluss mit den Maschinenparametern zu einem gemeinsamen Datensatz zusammengeführt, der dann gefiltert, sortiert und synchronisiert wird. Auf Basis dieses Datensatzes werden schließlich eine Modellierung und Auswertung anhand der ML-Toolbox der Universität des Saarlandes durchgeführt.

In **Messkampagne II** wird eine Druckproduktion in einer Druckerei begleitet, die sich über zwei Wochen erstreckt. Auf der vorher ausgewählten Bogen-Druckmaschine werden die von der Druckerei eingeplanten Druckaufträge abgearbeitet. Parallel werden mit dem entwickelten Messkonzept Messdaten erfasst sowie das Druckpersonal beobachtet und befragt. D. h., es werden keine Maschinenzustände gezielt angefahren, sondern nur als ein Beobachter agiert. Mit den generierten Datensätze erfolgt nachfolgend eine Modellierung und Auswertung mit der ML-Toolbox der Universität des Saarlandes. Abschließend werden die Erkenntnisse aus Messkampagne I und II verglichen und Rückschlüsse gezogen.

## **5. Grundlagen**

In den beiden folgenden Abschnitten werden die Grundlagen der Offsetdrucktechnik und des Maschinellen Lernens dargelegt. In Bezug auf das Maschinelle Lernen wird im Speziellen auf die vom Lehrstuhl der Messtechnik der Universität des Saarlandes entwickelte Toolbox näher eingegangen, da diese im Projekt angewandt wurde.

### **5.1. Offsetdrucktechnik**

Der Offsetdruck ist ein Druckverfahren, das in der Druckindustrie weit verbreitet ist. Es zeichnet sich durch seine Fähigkeit aus, qualitativ hochwertige Drucke in großen Mengen zu produzieren. Beim Offsetdruck handelt es sich um ein indirektes Flachdruckverfahren, bei dem die Druckfarbe nicht direkt von der Druckplatte auf das zu bedruckende Substrat (Papier, Karton, Folie, Blech, ...) übertragen wird, sondern über einen sogenannten Gummituchzylinder. Dieser Gummituchzylinder überträgt die Druckfarbe von der Druckplatte auf das zu bedruckende Substrat, typischerweise Papier oder Karton. Der Name "Offset" stammt von der Tatsache, dass die Druckfarbe zuerst auf einen Zwischenzylinder, dem beschriebenen Gummituchzylinder, übertragen wird, bevor sie auf das Substrat weitergegeben wird [Kip01], [Rie89].

Der Prozess des Offsetdrucks beginnt mit der Erstellung einer Druckplatte, die üblicherweise aus Aluminium besteht und mittels Belichtungstechniken mit dem gewünschten Druckbild versehen wird. Diese Druckplatte wird dann auf den Plattenzylinder aufgespannt. Während des Druckvorgangs wird die Druckplatte mit Druckfarbe und Feuchtmittel versehen, wobei die nichtdruckenden Bereiche der Platte, die das Bild nicht enthalten, mit Feuchtmittel (welches Isopropanol (IPA) enthält) befeuchtet werden. Die Druckfarbe haftet nur an den druckenden Teilen der Platte und wird dann auf das Gummituch übertragen. Das Gummituch, das auf einem Zylinder befestigt ist, nimmt die Druckfarbe von der Druckplatte auf. Da das Gummituch weicher ist als die Druckplatte, passt es sich gut an die Oberfläche des zu bedruckenden Materials an, was zu einem gleichmäßigen Druckergebnis führt. Das bedruckte Material wird dann durch die Druckmaschine geführt und kann anschließend weiterverarbeitet werden. Die verwendete Druckfarbe und das verwendete Feuchtmittel werden durch die Druckerei bestimmt und von den verschiedensten Herstellern bezogen. Der Offsetdruck zeichnet sich durch seine hohe Druckqualität, seine Fähigkeit zur Reproduktion von feinen Details und Farbnuancen sowie seine Vielseitigkeit aus. Er wird für eine Vielzahl von Druckprodukten eingesetzt, darunter Zeitungen, Zeitschriften, Bücher, Broschüren, Werbematerialien und Verpackungen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Offsetdruck ein komplexes, indirektes Druckverfahren ist, das für die Massenproduktion hochwertiger Druckerzeugnisse weit verbreitet ist.

### **5.2. Maschinelles Lernen**

Maschinelles Lernen bezeichnet einen Bereich der künstlichen Intelligenz, der sich mit der Entwicklung von Algorithmen und Techniken beschäftigt, durch die Computer automatisch aus

Daten lernen können, ohne explizit programmiert zu werden. Durch die Anwendung von statistischen Methoden und Optimierungsalgorithmen werden diese Computermodelle trainiert, Muster und Zusammenhänge in den Daten zu erkennen und Vorhersagen oder Entscheidungen zu treffen. Maschinelles Lernen ermöglicht es Computern, aus Erfahrungen zu lernen und ihre Leistungsfähigkeit in verschiedenen Anwendungsgebieten kontinuierlich zu verbessern, indem sie Daten analysieren und auf neue Situationen reagieren können.

Im Zusammenhang mit vielen Parametern, die miteinander verbunden sind, kann maschinelles Lernen dazu verwendet werden, komplexe Beziehungen und Muster zwischen diesen Parametern zu erkennen. Durch die Analyse großer Datenmengen können ML-Algorithmen die Abhängigkeiten zwischen den Parametern erlernen und verstehen. Dies kann in verschiedenen Anwendungsgebieten relevant sein, einschließlich dem Offsetdruck. Bei Druckmaschinen existieren eine Vielzahl von Parametern, Signalen und Regelgrößen, welche teilweise bereits automatisiert am Leitstand erfasst oder vor Auftragsbeginn in der Druckvorstufe festgelegt und über den Leitstand der Druckmaschine zur Verfügung gestellt werden [Web21]. Solche Daten sind aufgrund der Komplexität und der Vielzahl an Quereinflüssen mit klassischen Signalverarbeitungsmethoden häufig nur noch schwer interpretierbar bzw. verwertbar. Durch die steigende Leistungs- und Funktionsdichte ist die gesuchte Information häufig verteilt in den Signalen verschiedener Sensoren enthalten und somit kann durch klassische Signalverarbeitungsmethoden nicht das gesamte Potential der Daten ausgeschöpft werden [VDM15, Wue16].

Ein erheblicher Anteil der aktuellen Forschungsprojekte im Bereich der Zustandsüberwachung und Qualitätssicherung beschäftigt sich aus diesem Grund mit Methoden des maschinellen Lernens, um komplexe Wirkzusammenhänge in Form von verschleierte Mustern aus den Daten zu extrahieren und Informationen über den Zustand von technischen Systemen in datengetriebenen Modellen zu bündeln [Sch19, Leu16]. Der Einsatz solcher Verfahren ist gerade in kleineren und mittelständigen Unternehmen problematisch, da die Personalkosten für Experten auf dem Gebiet des maschinellen Lernens für viele Anwendungen zu hoch sind [Lee20].

Am LMT wurde ein vollautomatisierter Baukasten zum maschinellen Lernen entwickelt, der ohne Expertenwissen im Bereich des maschinellen Lernens und ohne detailliertes physikalisches Modell des Prozesses angewendet werden kann. Umgesetzt ist dies durch eine Kombination verschiedener, sich auf theoretischer Seite ergänzender Algorithmen für die Merkmalsextraktion und Merkmalsselektion. Durch anschließende Dimensionsreduktion und Klassifikation wird der minimale Klassifikationsfehler mittels Kreuzvalidierung für alle Kombinationen bestimmt und die bestmöglichen Methoden für den jeweiligen Datensatz ausgewählt. Abbildung 1 zeigt die schematische Darstellung des Methodenbaukastens. Die generelle Funktionsweise des Methodenbaukastens sowie spezifische Informationen zu allen implementierten Methoden kann [Sch18\_1] entnommen werden.

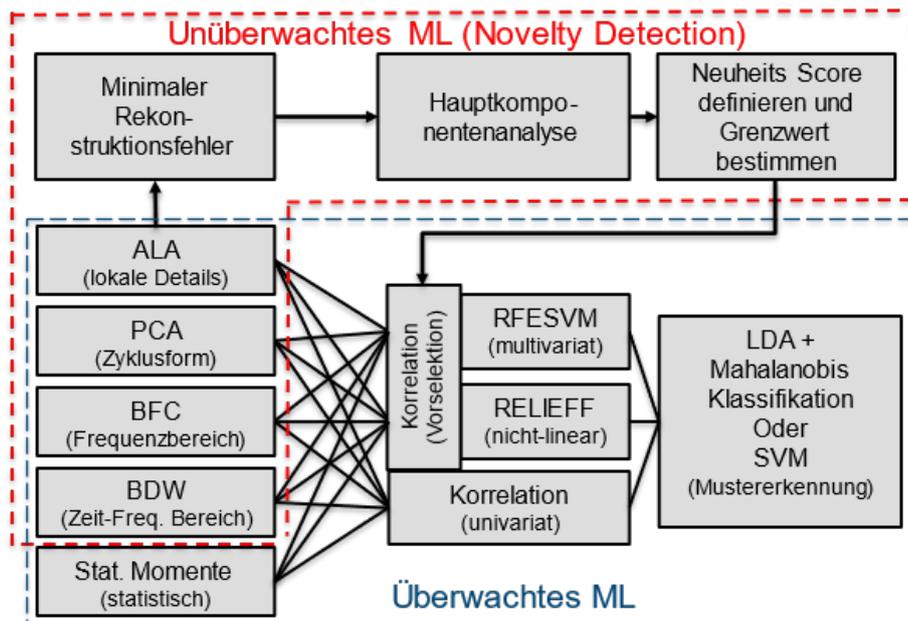


Abbildung 1: Struktur der automatisierten Toolbox des LMT für das Maschinelle Lernen

Das Eingreifen in einen Prozess auf Basis der Vorhersage eines datengetriebenen Modells bedingt eine Nachvollziehbarkeit des hergeleiteten Modells und das sich daraus ergebende Vertrauen des zuständigen Personals. Gerade bei aktuell viel diskutierten Methoden wie beispielsweise dem Deep Learning mittels neuronaler Netze handelt es sich um Blackbox-Verfahren, die nur sehr begrenzt Einblick in den Entscheidungsprozess des Modells gestatten. Im Gegensatz dazu kann beim hier betrachteten Baukasten nach den Schritten der Merkmalsextraktion und -selektion davon ausgegangen werden, dass die gesuchte Information bereits konzentriert in den noch vorhandenen Merkmalen enthalten ist. Daher können an dieser Stelle einfache, lineare Verfahren im Schritt der Mustererkennung verwendet werden. Aus diesem Grund erfolgt die abschließende Dimensionsreduktion und Klassifikation mittels Linearer Diskriminanzanalyse in Kombination mit einem Mahalanobis-Distanz-Klassifikator. Dadurch besteht die Möglichkeit einer physikalischen Plausibilisierung der selektierten Merkmale sowie des gesamten Modells, da Entscheidungen direkt auf gemessene Merkmale zurückgeführt werden [Sch18\_1]. Abgesehen von den eingesetzten Methoden des maschinellen Lernens haben bereits durchgeführte Projekte gezeigt, dass die Datenqualität häufig über den Erfolg von Data Science Projekten entscheidet. In vielen Fällen ergeben sich somit bestimmte Anforderungen bezüglich Auflösung, Bandbreite sowie Synchronität der Daten, um bestimmte Zustände oder Fehlermechanismen sichtbar zu machen. Neben dedizierter Sensorik können unter anderem auch Prozesssensoren oder Logbücher (Stillstände, Wartungsarbeiten, usw.) in eine Modellbildung mit einbezogen werden. Zur Verbesserung des Druckprozesses wurden bisher an Druckmaschinen noch keine Methoden des maschinellen Lernens eingesetzt [Web21].

## 6. Identifikation von relevanten und dominanten Prozessparameter

Im Offsetdruck spielen für die Herstellung von qualitativ hochwertigen Druckprodukten eine Vielzahl von Maschinen-, Material- und Auftrags- sowie Umgebungsparametern eine wesentliche Rolle. Im Zuge dieses Projektes wurde anhand von Literaturrecherche und Expertenbefragung eine Sammlung von potentiell relevanten und dominanten Einflüssen identifiziert, welche in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden. Es sei hier ergänzend angemerkt, dass viele der in der älteren Literatur (z.B. [Kip01, [Bou08], [Han93], [Rie89]) noch genannten Probleme und Auswirkungen des Farb-Wasser-Gleichgewicht heute in modernen Druckmaschinen nicht mehr auftreten. Im Speziellen werden die Parameter, welche für ein stabil bleibendes Farb-Wasser-Gleichgewicht relevant sind, näher betrachtet und im Folgenden Druckfehler eines instabilen Farb-Wasser-Gleichgewicht erläutert. Ein Abdriften des Farb-Wasser-Gleichgewichts in Richtung „zu viel Wasser“ erzeugt beispielsweise fehlerhafte Druckbilder wie das sogenannte „Schablonieren“ (Abbildung 2, links) oder das „Emulgieren“ (Abbildung 2, Mitte) der Druckfarbe. Ebenso schlägt sich durch „zu wenig Wasser“ im Farb-Wasser-Gemisch der Druckfehler „Schmierer“ im Druckbild nieder (Abbildung 2, rechts).

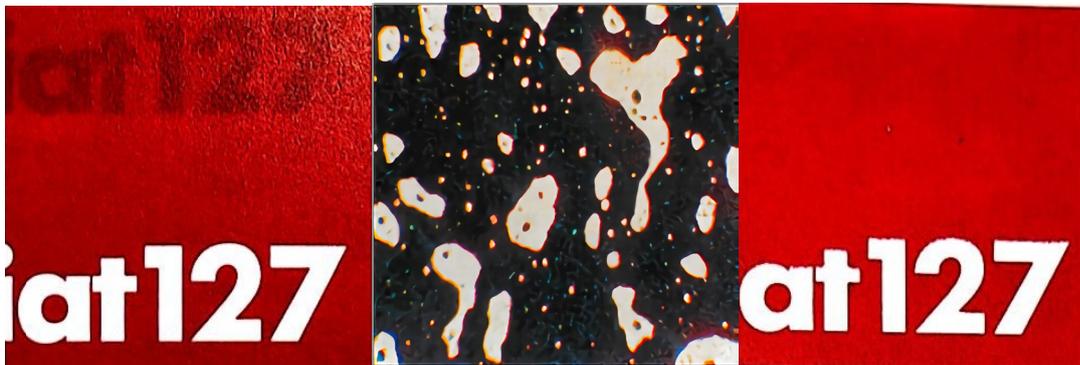


Abbildung 2: Druckfehler Schablonieren (links); Emulgieren der Druckfarbe (Mitte); Druckfehler Schmierer (rechts)

Sobald diese Druckfehler auftreten, besteht die Gefahr, dass es zu einer Störung im gesamten Druckprozess kommt, was zu einem Abbruch dessen führen kann. Beispielsweise kann ein Druckbogen am Gummituch kleben bleiben, wenn „zu wenig Feuchtmittel“ im Prozess vorhanden ist oder es kann zu dem zuvor genannten „Emulgieren“ der Druckfarbe kommen, was eine Anreicherung des Feuchtmittels in der Druckfarbe bis hin zum Farbkasten bedeutet und eine Reinigung des Farbwerkes sowie erneute Zufuhr frischer Druckfarbe erforderlich machen kann. Diese negativen Auswirkungen auf das Druckbild und den Druckprozess selbst stellen zwar selten auftretende Extrema im Offsetdruckprozess dar, können jedoch bei wenig erfahrener Druckpersonal oder insbesondere bei unbekanntem Konstellationen von Druckfarbe, Feuchtmittel und verwendeter Druckmaschine auftreten, weshalb im Allgemeinen eine zuverlässige und erprobte Konstellation der soeben benannten Aspekte im Offsetdruck Anwendung findet. Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens werden daher insbesondere bei der Planung und der Versuchsdurchführung diese Prozessgrenzen für einen abbruchfreien und reibungslosen Druckprozess bedacht.

Die dem Druckprozess zugeführte Menge an Feuchtmittel wird direkt über die Einstellung des „Feuchtpoti“<sup>1</sup> eingestellt. Somit wird dieser als Steuergröße für ein stabiles Farb-Wasser-

<sup>1</sup> Ein in der Praxis verwendeter Begriff zur Einstellung der Feuchtmittelmenge über ein Potenziometer. Heute in modernen Offsetdruckmaschinen oft über eine Bedienung am Bildschirm realisiert.

Gleichgewicht definiert. Die Einstellung des Feuchtpoti erfolgt manuell durch das Personal, wodurch erhebliche menschliche Einflüsse auf den Druckprozess und damit auch auf die Stabilität des Farb-Wasser-Gleichgewichts gegeben sind.

Im Folgenden wird eine Auflistung der identifizierten, vorherrschenden Parameter im Offsetdruck vorgenommen:

**Maschinenparameter:**

- Druckgeschwindigkeit, Dukturhub, Hebertaktung, Färbung der einzelnen Farbzonen, Einsatz der Brückenwalze, Variabilität der Drehzahl der Feuchtauftragswalze, Beistellung des Gegendruckzylinders und Temperierung der Verreiberwalzen

**Material- und Auftragsparameter:**

- Druckfarbe, Feuchtmittel, Substrat, Sujet bzw. Druckform

**Umgebungsparameter:**

- Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit inner- und außerhalb der einzelnen Druckwerke, Gaskennwerte flüchtiger organischer Verbindungen innerhalb der einzelnen Druckwerke

Aus Expertengesprächen des Projektbegleitenden Ausschusses geht hervor, dass eine Vielzahl der genannten Parameter im Prozess teilweise nicht messbar oder beliebig veränderbar sind oder nur eine geringe Relevanz gegenüber der Einstellung des Farb-Wasser-Gleichgewicht darstellen. Die Parameter im Druckprozess wurden in messbare und veränderbare Parameter unterteilt. Zudem können Kennwerte des verwendeten Feuchtmittels Einflüsse auf das Farb-Wasser-Gleichgewicht haben. Dazu zählen der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit, die Temperatur sowie die verwendeten Zusatz- und Hilfsstoffe.

Im Rahmen der Expertenbefragung wurde von vier Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses zudem ein Fragebogen zu den Einflüssen auf das Farb-Wasser-Gleichgewicht beantwortet. In Tabelle 1 sind die erreichten Prozentpunkte der einzelnen Kategorien zu entnehmen. Dabei bedeuten 100 Prozentpunkte, dass alle vier Experten einem Punkt zugestimmt haben. Außer bei den Auftragsdaten und Druckvorstufe sowie dem Gummituchzylinder und dem Druckplattenzylinder, Trocknung, Leitstand und Gegendruckzylinder sind alle Kategorie mit über 87,5 Prozentpunkten bewertet worden. Insofern möglich werden diese Einflussbereiche bei der Gestaltung und Auswertung der Versuche im Besonderen beachtet.

Tabelle 1: Ergebnisse einer Expertenbefragung über Fragebogen zum Einfluss auf das Farb-Wasser-Gleichgewicht, 100 Prozentpunkte bedeuten, dass alle vier Experten einem Punkt zugestimmt haben.

Einfluss auf das Farb-Wasser-Gleichgewicht	Prozentpunkte
A1 Druckfarbe	100
A2 Farbwerk	100
B1 Feuchtmittel	100
B2 Feuchtwerk	100
B3 Feuchtmittelaufbereitung	87,5
C Substrat	100
D Prozess- und Qualitätskontrolle	100
E Einfluss des Menschen	100
F Auftragsdaten und Druckvorstufe	50
G Gummituchzylinder	37,5
X Druckplattenzylinder, Trocknung, Leitstand, Gegendruckzylinder	< 25

Entsprechend der Expertenbefragung und der Diskussion im Projektbegleitenden Ausschuss wurden für die Druckversuche folgende Parameter für die Voruntersuchungen und die Messkampagne I festgelegt:

- Die Druckversuche finden auf Bogen-Druckmaschinen von zwei verschiedenen Herstellern statt.
- Dadurch werden auch zwei verschiedene Farb-/Feuchtwerkkonzepte untersucht.
- Die Druckmaschinen nutzen verschiedene Feuchtmittel und Feuchtmittelaufbereitungstechnologien.
- Es werden verschiedene Druckfarbenserien von zwei Druckfarbenherstellern verwendet.

Mit dieser Vorgehensweise werden auch die Vorgaben der Vorwettbewerblichkeit erfüllt.

## 7. Voruntersuchungen

Die folgenden Abschnitte erläutern die Auswahl der Sensoren, welche weiteren Aufschluss über die physikalischen Gegebenheiten in der Druckmaschine liefern sollen. Es werden erste Laboruntersuchungen mit einer Auswahl von Gassensoren im Zusammenhang mit Druckfarbe und Feuchtmittel durchgeführt sowie die Vorversuche bei den Druckmaschinenherstellern DMH A und DMH B vorgestellt.

### 7.1. Auswahl von geeigneten Sensoren

Ausgehend von der Vermutung, dass das Farb-Wasser-Gleichgewicht im Wesentlichen von der Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der Druckmaschine beeinflusst wird, wurde entschieden, einen kombinierten Temperatur-Luftfeuchte-Sensor zu verwenden. Die Wahl fiel auf den SHT35-DIS-F (Sensirion, US), da dieser eine Filtermembran besitzt und damit auch bei hoher Luftfeuchtigkeit in Zusammenhang mit auftretendem Farbnebel innerhalb eines Druckwerkes einer Druckmaschine eingesetzt werden kann. Abbildung 3 zeigt den Aufbau des SHT35 Sensors (links) und das Controller-Board, welches als Funktionschnittstelle zwischen Datenerfassungsgerät und Sensoren verwendet wird.

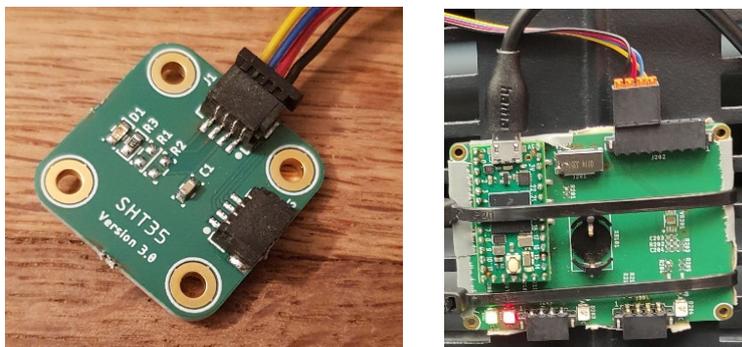


Abbildung 3: links, Platine mit SHT35 (analoger Aufbau der Gassensoren); rechts, Platine des Controller-Boards

Des Weiteren wurden PT100-Temperatursensoren innerhalb der Druckwerke sowie ein Infrarottemperatursensor CSmicro LT15H (optris, DE), welche mit Sicht auf die Verreiberwalze oberhalb der vierten Farbauftragswalze gerichtet wurde, eingesetzt. Diese Sensoren wurden teilweise (je nach Verfügbarkeit) bei den Vorversuchen bei den Druckmaschinenherstellern und bei den Messkampagnen I und II durchgehend eingesetzt.

Ebenso steht die Vermutung, dass über die Gaskonzentration des eingesetzten Isopropanol (IPA) im Feuchtmittel in der Umgebungsluft eines Druckwerkes Rückschlüsse auf das Farb-Wasser-Gleichgewicht gezogen werden kann. Daher wurde eine Auswahl an Gassensoren getroffen:

- SPG40 (Sensirion, CH)
- ZMOD4410, 4450 und 4510 (Renesas, JP)
- BME680, 688 (Bosch, DE)
- Triple-Sensor (UST Umweltsensortechnik, DE)

Wegen ihrer hohen Empfindlichkeit und gleichzeitig guten Robustheit wurden Metalloxid-Halbleiter-Gassensoren (engl. Metal Oxide Semiconductor, MOS) eingesetzt. MOS-Sensoren werden je nach Zielgas und Schichtzusammensetzung bei Temperaturen zwischen 150 C und 450 C betrieben, integrierte Heizer erlauben die Einstellung der Temperatur, die durch Rückmessung des Heizerwiderstandes (meist Platin) geregelt werden kann. Neben klassischen Dickschichtsensoren auf Keramikbasis, die sehr hohe Heizleistungen erfordern, aber auch eine

hohe Robustheit versprechen, sind heute integrierte digitale MOS-Sensoren verfügbar, die mittels miniaturisierter Substrate eine deutlich geringere Heizleistung erfordern und direkt im Gehäuse mit einer Elektronik für die Ansteuerung- und Messwerterfassung in einem ASIC (application specific integrated circuit) kombiniert werden.

Das LMT verfügt über eine langjährige Erfahrung mit diesen Sensoren speziell für die Quantifizierung von flüchtigen organischen Verbindungen (engl. Volatile Organic Compounds, VOC) in komplexen Umgebungen [Sch17], wie dies beim Offsetdruck in den Druckwerken erwartet wird. Das Funktionsprinzip der Sensoren beruht primär auf der Bedeckung der granularen Metalloxid-Oberfläche mit Luftsauerstoff, wodurch Energiebarrieren zwischen den Körnern entstehen. Reduzierende Gase, insbesondere VOC, können mit dem adsorbierten Sauerstoff reagieren und senken dadurch die Energiebarriere. Gemessen wird im Allgemeinen der Schichtwiderstand, der folglich bei Anwesenheit von reduzierenden Gasen sinkt. Die Sensoren sind aufgrund des Funktionsprinzips wenig selektiv, eine Verbesserung der Selektivität ist möglich durch den Einsatz mehrerer Sensoren mit unterschiedlichen Sensorschichten (sog. Multisensorarrays) oder durch dynamische Variation der Betriebstemperatur (engl. Temperature Cycled Operation, TCO) oder eine Kombination beider Ansätze. Der TCO-Betrieb steigert zudem noch die Sensitivität durch gezielte Nutzung von Nicht-Gleichgewichts-Zuständen und verbessert die Stabilität, da die Sensorschichten bei hoher Temperatur von schwerflüchtigen Adsorbaten freigebrannt werden [Bau15, Sch20].

Die eingesetzten Sensoren nutzen sowohl klassische keramische Sensoren (UST-Tripelsensor mit drei unterschiedlichen Sensorschichten auf einem gemeinsamen Keramikheizer) als auch hochintegrierte digitale Sensoren (Einzelsensoren: Bosch BME680, 688; Renesas ZMOD4410, 4450 und 4510; Vierfachsensoren: Sensirion SGP40), wobei die digitalen Sensoren zusätzlich im TCO betrieben wurden, um eine höhere Selektivität und Stabilität zu erzielen.

Bei den Voruntersuchungen wurde zusätzlich auch ein Ultraschallmikrofon getestet, aber auf Grund der ungenügenden Messqualität für die Messkampagnen I und II wieder verworfen. Näheres zu dieser Untersuchung folgt in Kapitel 7.3.

Von großem Interesse wäre die Vermessung der Flussmengen des Feuchtmittels gewesen. Das Feuchtmittel befindet sich in jeder Druckeinheit in einer Wanne mit näherungsweise konstanter Füllhöhe. Von dort aus gelangt es in das Druckwerk und von dort wiederum über den Platten- und Gummituchzylinder auf das zu bedruckende Substrat. Mit der präzisen Kenntnis des Verbrauchs an Feuchtmittel wären Rückschlüsse auf das derzeitige Farb-Wasser-Gleichgewicht innerhalb der Druckeinheit möglich. Das Feuchtmittel wird allerdings zentral für die gesamte Druckmaschine aufbereitet, d.h. für mehrere Druckwerke gleichzeitig. Zudem gelangt nicht das gesamte in einem Druckwerk zugeführte Feuchtmittel auf das Substrat, da es sich teilweise auf dem Weg von der Wanne zum Substrat verflüchtigt. Es fanden Überlegungen statt, wie es möglich wäre, den Zufluss von der zentralen Aufbereitungseinheit zu den einzelnen Druckwerken zu ermitteln. Eine geeignete Sensorik ist jedoch nicht bekannt und eine messtechnische Aufrüstung wäre im zeitlichen Rahmen nicht möglich gewesen, weswegen der Ansatz ebenfalls verworfen wurde.

## **7.2. Untersuchung von Farb-Feuchtmittel-Emulsionen mit Gassensoren**

Um die Verwendbarkeit der ausgewählten Gassensoren zu analysieren, wurden diese unter Laborbedingungen mit von den Druckmaschinenherstellern (DMH) zur Verfügung gestellten Druckfarben und Feuchtmitteln untersucht. Hierzu wurde ein Becherglas mit einem Deckel

verwendet in das drei Gassensoren integriert werden können. Durch eine elektrische Widerstandsänderung der Gassensoren kann auf den IPA-Gehalt geschlossen werden. Die Gassensoren werden über ein selbst entwickeltes Controllerboard ausgelesen (Abbildung 4, links). Es wurden Konzentrationen von 10% bis 30% Gewichtsanteil Feuchtmittel in der Druckfarbe untersucht, die Schrittweite beträgt 2%. Die Emulsionen wurden mit Hilfe eines Ultraschall-Homogenisierers UP400St (Hielscher, DE) hergestellt (Abbildung 4, rechts).

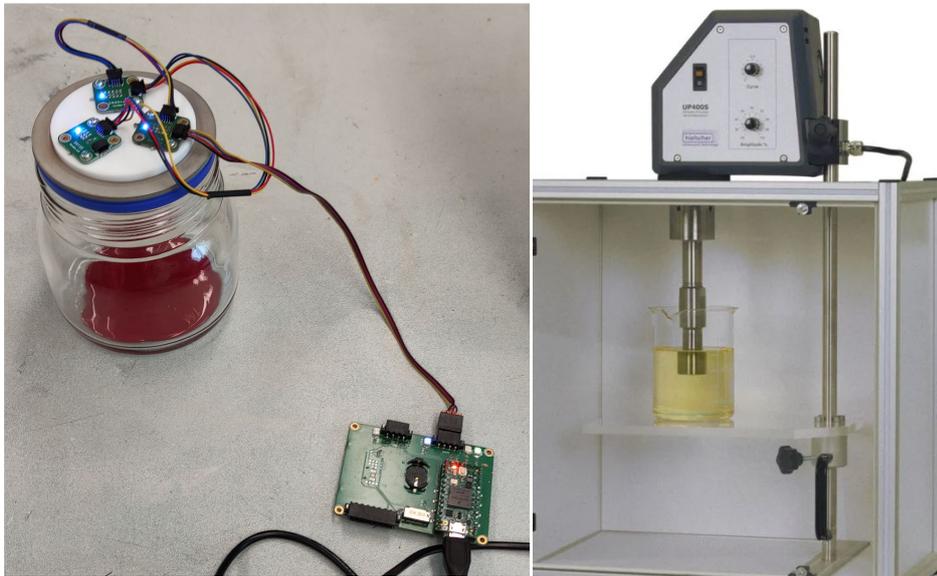


Abbildung 4: Messaufbau zur Erprobung verschiedener Gassensoren zur Messung der IPA-Konzentration bei verschiedenen Feuchtmittelkonzentrationen in der Druckfarbe(links) und verwendeter Ultraschall-Homogenisierer zur Herstellung der Emulsionen(rechts).

In Abbildung 5 sind zwei unterschiedliche Emulsionen im fertig gemischten Zustand dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Emulsion mit 10 % Gewichtsanteil (Abbildung 5, links) das Feuchtmittel vollständig in der Druckfarbe aufnimmt. Bei der Emulsion mit 30 % Gewichtsanteil (Abbildung 5, rechts) hingegen ist ein Teil des Feuchtmittels nicht in die Druckfarbe einemulgiert, was sich durch kleine Feuchtmitteltropfen abzeichnet.

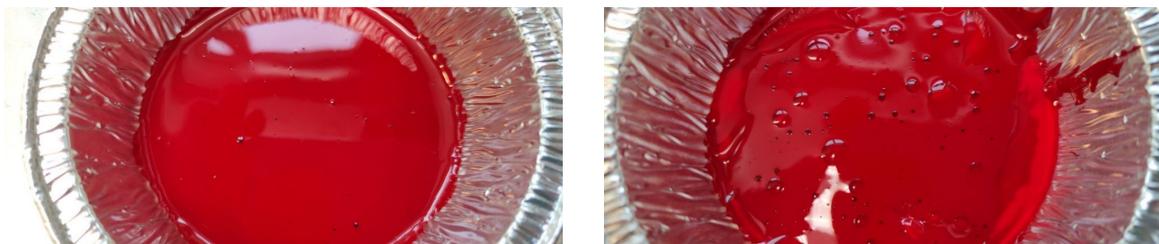


Abbildung 5: Beispiele gemischter Emulsionen. Links: 10 Gewichts-% Feuchtmittel; Rechts: 30 Gewichts-% Feuchtmittel

In Abbildung 6 ist beispielhaft der elektrische Widerstand des Gassensors SGP40 bei einer Heizertemperatur von 175 °C in der Schicht 0 des Sensors über die Feuchtmittelkonzentrationen von 10% bis 30% für aufgetragen. Die Messungen wurden jeweils über einen Zeitraum von 30 Minuten erstellt, sodass sich ein Gleichgewichtszustand einstellen konnte. Es ist zudem erkennbar, dass der elektrische Widerstand mit zunehmender Konzentration sinkt. Es konnte also ein Zusammenhang zwischen Feuchtmittelkonzentration und ausgegebenen Widerstand erkannt werden.

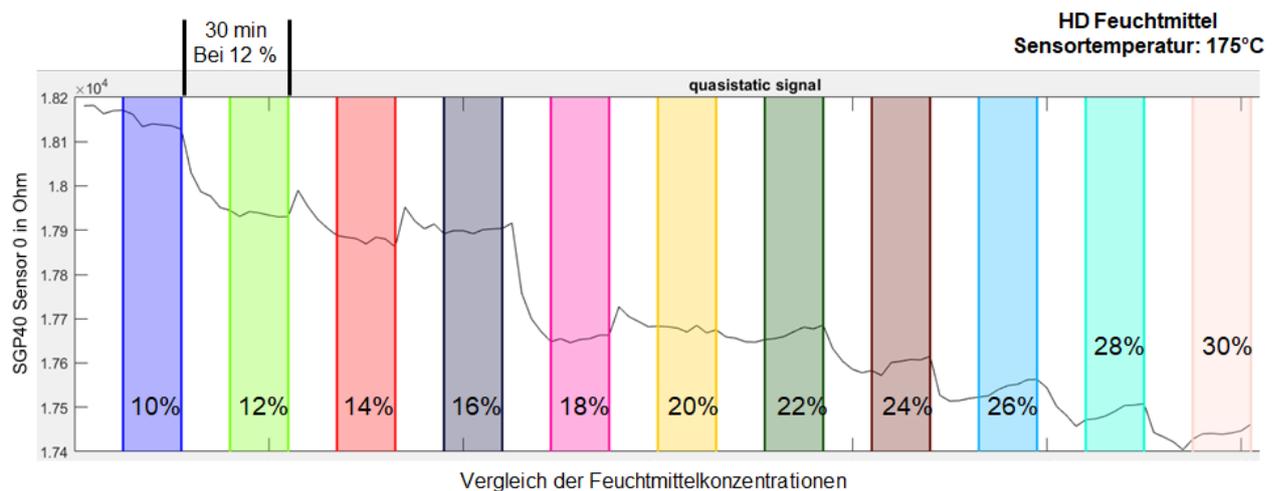


Abbildung 6: Gassensors SGP40 (Sensorschicht 0) bei 175 °C. Gemessene Widerstände über Feuchtmittelkonzentration.

In Abbildung 7 ist eine Messung des Gassensors SPG40 (Sensorschicht 0) bei 225 °C dargestellt. Die Heizertemperatur wurde damit gegenüber der Messung aus Abbildung 6 um 50 °C erhöht. Hier kann kein klarer Zusammenhang zwischen der Feuchtmittelkonzentration und dem elektrischen Widerstand des Gassensors ermittelt werden. Es ist daher festzustellen, dass die Heizertemperatur einen erheblichen Einfluss bei der Bestimmung der IPA-Konzentration hat.

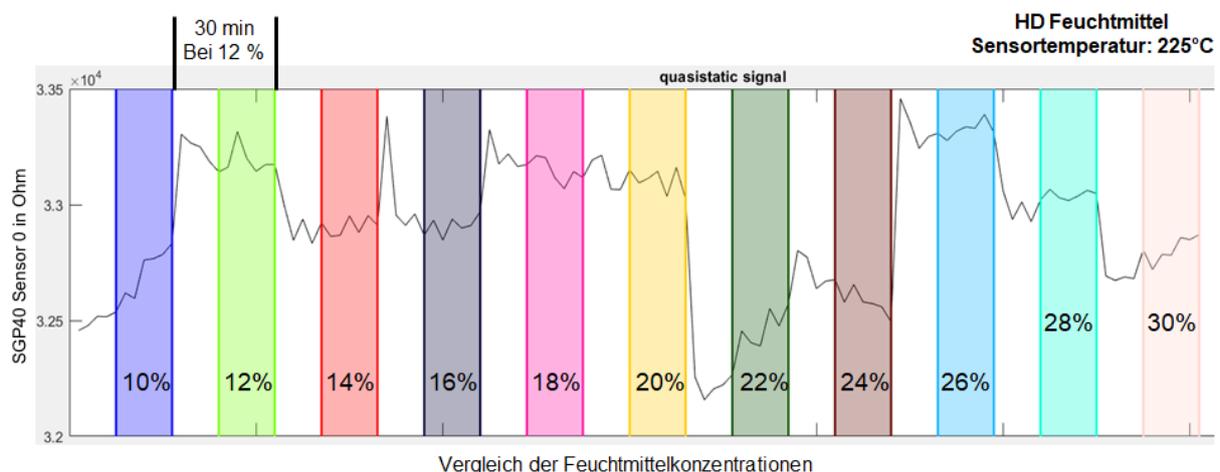


Abbildung 7: Gassensors SGP40 (Sensorschicht 0) bei 225 °C. Gemessene Widerstände über Feuchtmittelkonzentration.

Die Gassensoren sprechen bei unterschiedlichen Heizertemperaturen unterschiedlich gut auf das zu detektierende IPA an. Die geeignete Heizertemperatur muss daher für jeden Gassensor sorgfältig ermittelt werden. Auch die insgesamt vier Sensorschichten des SGP40 Gassensors sind unterschiedlich aufgebaut und haben ebenso einen Einfluss auf die Detektierbarkeit von IPA.

Nach den Vorversuchen wurden die Parameter der Heizzyklen der Gassensoren wie folgt festgelegt, wobei hierbei die Erfahrungen des LMT ebenso eingingen wie die Ergebnisse der Vorversuche: Die Gesamtzykluszeit beträgt 20 Sekunden, dabei wird für 4 Sekunden auf 400 °C aufgeheizt, anschließend auf 175 °C heruntergekühlt, dann wieder auf 400 °C für 4 Sekunden aufgeheizt und schließlich auf 300 °C heruntergekühlt. Aufgrund der geringen thermischen Zeitkonstante von ca. 10ms folgt der Gassensor der Solltemperatur nahezu ideal. Abbildung 8 verdeutlicht diese Heizvorgänge und den daraus entstehenden Temperaturzyklus eines

Gassensors (orange) und das resultierende dynamische Sensorsignal (blau). Man erkennt, dass nach den Temperatursprüngen der Widerstand jeweils auf einen neuen Gleichgewichtswert relaxiert. Zur Auswertung der dynamischen Sensorsignale werden die Zyklen in Abschnitte von 1 s Dauer unterteilt und in jedem Abschnitt Mittelwert und Steigung des Widerstands als Merkmal extrahiert. Im weiteren Verlauf der Messkampagnen I und II wurden die Messzyklen auch teilweise angepasst. Darauf wird in den entsprechenden Kapiteln näher eingegangen.

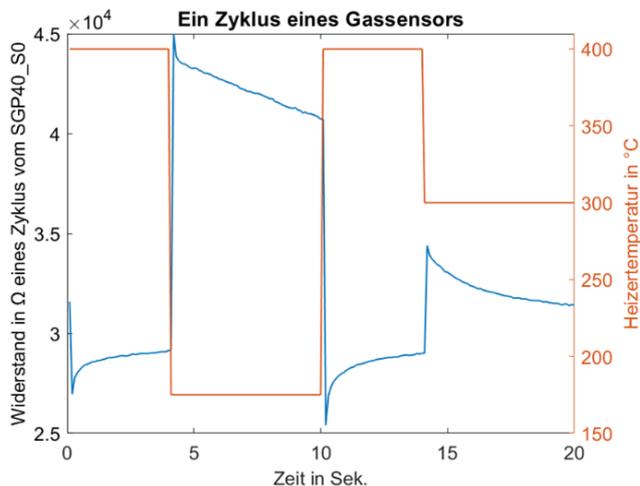


Abbildung 8: Temperaturzyklus (orange) und Sensorantwort (blau) des SGP40 Gassensors (Schicht 1)

### 7.3. Vorversuche bei den Druckmaschinenherstellern (DMH)

Bei den Vorversuchen bei den Druckmaschinenherstellern (DMH) sollen das Messkonzept und die Auswertemethoden entwickelt und erprobt werden. Insbesondere ist zu überprüfen, ob die notwendige Messtechnik betriebssicher in die Druckmaschinen eingebaut werden kann, so dass der laufende Druckbetrieb nicht beeinträchtigt wird.

Zunächst wurden die spezifischen Eigenschaften und der Aufbau der Druckmaschinen der DMH A und der DMH B bestimmt. Dazu fanden jeweils Gespräche bei den DMH statt. Dort konnten die Druckmaschinen vor Ort besichtigt werden, um die Einbausituation weiterer Sensoren zu analysieren und zu diskutieren. Trotz der ungewissen Einbausituation wurden bereits einzelne Messsystemaufbauten mit zu diesem Termin genommen, um erste Erfahrungen mit den Sensoren an und in der Druckmaschine sammeln zu können. Zu diesen Messsystemen zählen unter anderem Ultraschallmikrofone, ein SHT35-Sensor und Gassensoren. Im Laufe dieser Besichtigungen und Testläufen der Druckmaschinen wurde zudem die Problematik des Farb-Wasser-Gleichgewicht ausführlich mit Experten der Offsetdrucktechnik der jeweiligen DMH diskutiert. Auf weitere maschinenseitig verbaute Sensorik wird nicht zurückgegriffen, da diese nicht vorhanden waren und/oder nicht über eine Schnittstelle an der Maschine abgegriffen werden konnten.

Aus terminlichen Gründen fanden die Vorversuche zunächst beim DMH A statt. Der vorbereitete Messaufbau zum Testen der Sensoren wurde eingebaut und während eines Druckversuchs wurden Messwerte generiert. In einer Sensorbox sind der SHT35-Temperatur-/Feuchtigkeitssensor (Sensirion, CH), drei Gassensoren (Bosch BME680, DE; Sensirion SGP40, CH; Renesas ZMOD4450, JP) untergebracht (siehe Abbildung 9, rechts). In Abbildung 9, links, ist die Verortung der Sensorbox schematisch dargestellt. Die Stelle der Anbringung der Sensorbox ist mit einem roten Punkt markiert. Dies war die zugänglichste Stelle an der

Druckmaschine für die Anbringung der Sensorbox. Die Gassensoren sind damit in Druckrichtung gesehen nach dem Feucht- und Farbwerk angeordnet. Das Ultraschallmikrofon (G.R.A.S. 46BE, DNK) wurde außerhalb der Druckmaschine so aufgestellt, dass es in Richtung des Platten- und Gummizylinders ausgerichtet ist, um mögliche Veränderungen der Farbspaltungsakustik wahrnehmen zu können. Zusätzlich wurde auch der Messaufbau des Ultraschallmikrofons in der Druckmaschine mittels Magnethalterung ausgeführt.

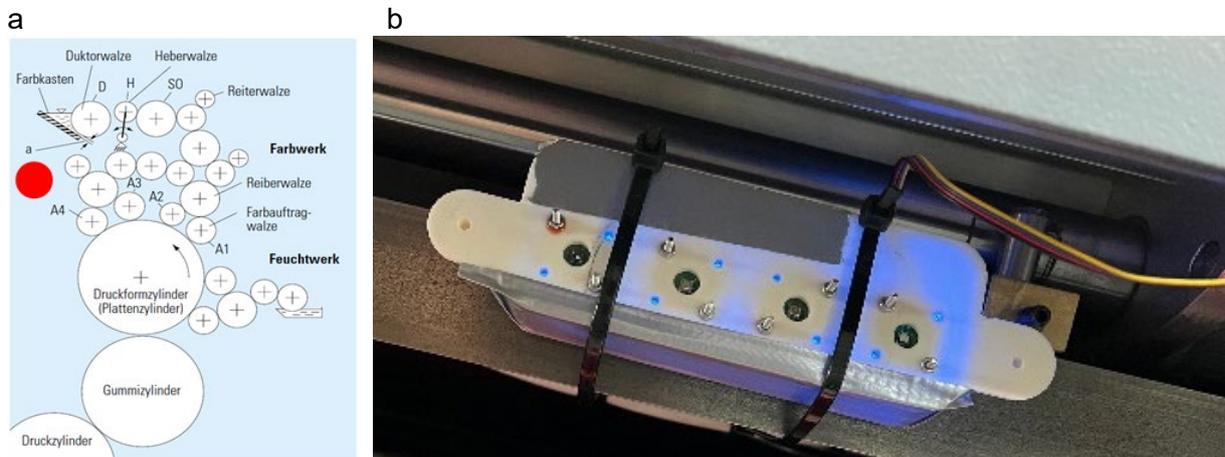


Abbildung 9: Verortung der Sensorbox gekennzeichnet durch einen roten Punkt (a) und angebrachte Sensorbox im Maschineninneren (b)

Nach dem Einbau der Sensorbox wurde die Druckmaschine in Betrieb genommen und über einen Zeitraum von ca. 30 Minuten hinweg Messwerte aufgezeichnet. In Abbildung 10 sind die aufgezeichneten Messwerte des SHT35-Sensors dargestellt. Die Spitzen im Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit (orangener Graph) zeigen die Zeiten, in denen auch tatsächlich gedruckt wurde. Zudem ist zu sehen, dass sich über die Dauer von 30 Minuten die Temperatur (blauer Graph) nur minimal erhöht.

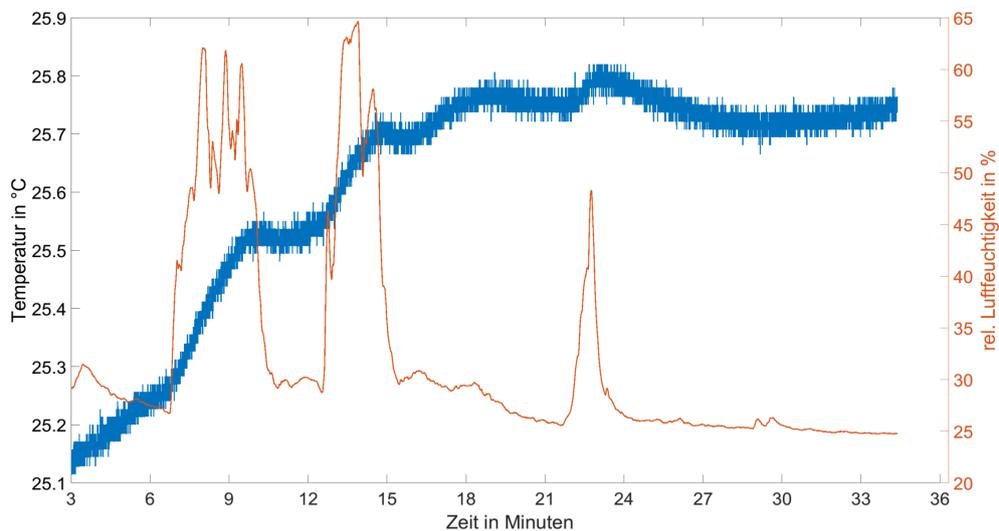


Abbildung 10: Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit (SHT35) über der Zeit während des Vorversuchs in der Druckmaschine

In Abbildung 11 ist zusätzlich zur relativen Luftfeuchtigkeit der Widerstandszyklus des SGP40-Gassensors im temperaturzyklischen Betrieb über die Zeit aufgetragen, die Spitzen nach unten entsprechen dabei jeweils einer Sensortemperatur von 400°C. Zu sehen ist, dass sich die Widerstände bei dieser Temperatur während des Druckvorgangs (ansteigende relative Luftfeuchtigkeit) prinzipiell nach unten verschieben. Es ist damit erkennbar, dass die

Gassensoren zusätzlich auf die Luftfeuchtigkeit reagieren. Für eine selektive Erfassung der IPA-Konzentration ist daher eine Musterauswertung des Signals im Temperaturzyklus erforderlich.

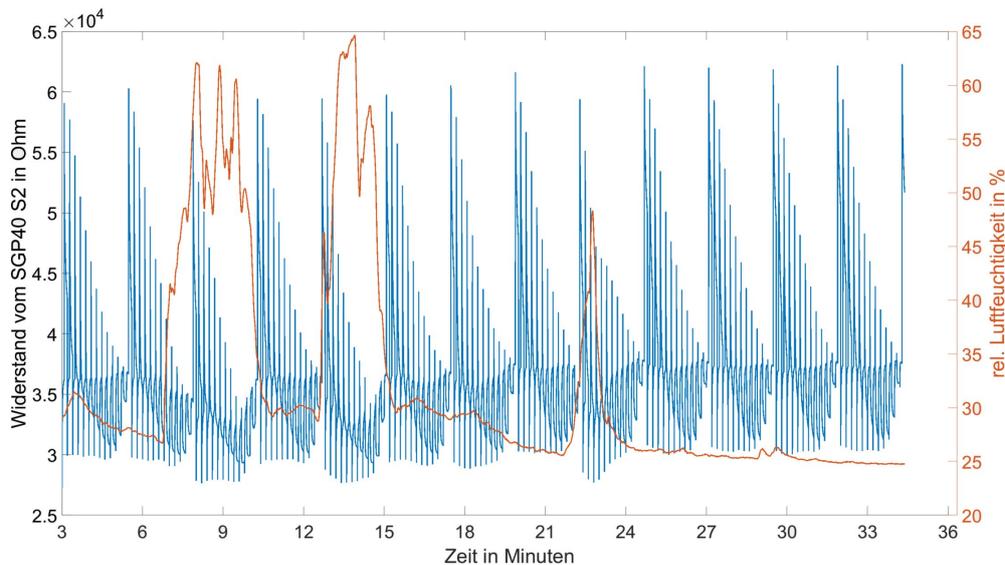


Abbildung 11: Widerstandssignale des SGP40 Gassensors im temperaturzyklischen Betrieb (blau) und relative Luftfeuchtigkeit (orange) über die Zeit während des Vorversuchs in der Druckmaschine

Im weiteren Verlauf soll nun im Speziellen der Bereich zwischen 3 Minuten und 12 Minuten betrachtet werden, da in diesem Bereich vorgegebene Feuchtpotiwerte angefahren wurden. Dadurch sollten erste Erkenntnisse über Änderungen des Messwertes des Gassensors SPG40 in Bezug auf das eingestellte Feuchtpoti erlangt werden. Die vorgegebenen Feuchtpotiwerte lagen bei 30 %, 45 % und 60 %, wobei der 30 %-Wert vom Druckpersonal als optimale Einstellung angesehen wird. In Abbildung 12 ist zu erkennen, dass die relative Luftfeuchtigkeit mit steigenden Feuchtpotiwert jeweils kurzzeitig ansteigt und dann wieder abfällt, vermutlich bedingt durch druckwerkinterne Regelmechanismen. Man erkennt hier eine Signaldynamik mit Zeitkonstanten deutlich unter 1 min, d.h. die Sensoren müssen idealerweise in kürzeren Zeitabständen messen, um die Prozesse beobachten zu können. Weitere Schlüsse lassen sich kaum ziehen, da die Versuchsdauer mit 3 min zu kurz ist, um einen Gleichgewichtszustand zu erreichen. Das quasistatische Sensorsignal des SGP40 bei 400 °C folgt den steigenden Feuchtpotiwerten, was angesichts der höheren IPA-Konzentration bei erhöhtem Feuchtpoti wegen der Abnahme des Widerstands mit steigender Gaskonzentration zu erwarten ist. Wenn die Druckmaschine nicht druckt, liegen diese Werte höher, da dann insgesamt weniger IPA in der Atmosphäre im Druckwerk vorliegt und damit der Widerstand höher ist. Diese erste Messung zeigt also, dass die Gassensoren tatsächlich wie erwartet eine Erkennung der IPA-Konzentration erlauben, die theoretisch zur Einstellung des Feuchtpoti-Wertes, in Kombination mit anderen Einstellungen und Sensordaten, geeignet erscheint (proof-of-concept); der Grundsatz des Projektes konnte damit bestätigt werden.

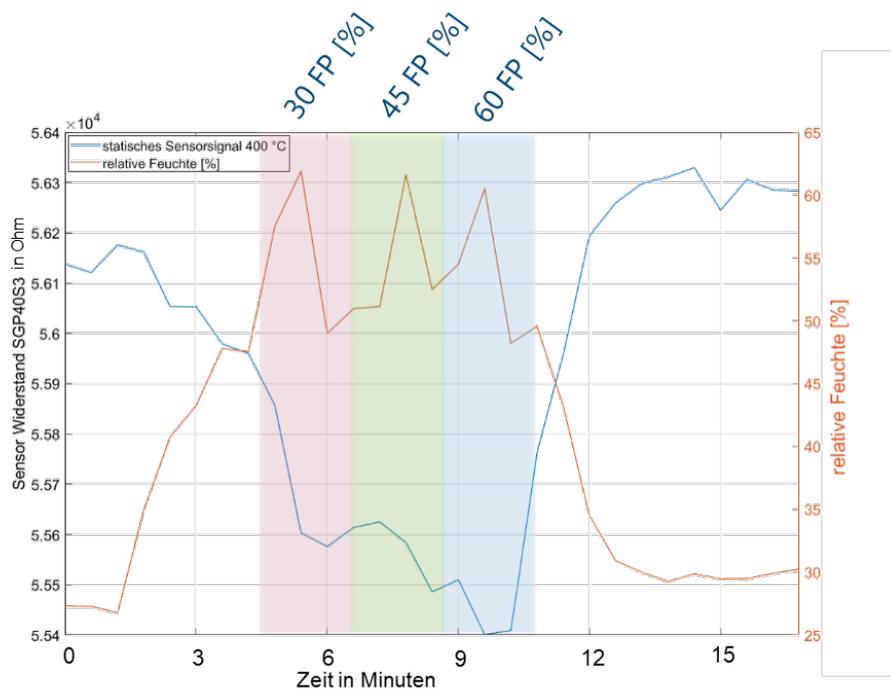


Abbildung 12: Quasistatischer Widerstand des SGP40 Gassensors bei 400 °C und absolute Luftfeuchtigkeit des SHT35 über die Zeit, Ausschnitt aus dem Vorversuch in der Druckmaschine

In Abbildung 13 ist die Auswertung des Ultraschallmikrofons (G.R.A.S. 46BE, DNK) dargestellt. Auf der linken Seite wird der Zeitbereich mit der entsprechenden Spannung dargestellt. Durch eine Kurzzeit-Fourier-Transformation wird dieser in den Frequenzbereich überführt. Es sind jedoch keine bedeutenden Frequenzänderungen zwischen den unterschiedlich eingestellten Feuchtpotiwerten zu erkennen. Gerade im hochfrequenten Bereich hätte eine Änderung erwartet werden können, jedoch konnten auch dort keine Unterschiede festgestellt werden. Aufgrund der sehr hohen Schallpegel im niederfrequenten Bereich kann davon ausgegangen werden, dass die höher frequenten Anteile vom Mikrophon nicht fein genug wahrnehmbar waren.

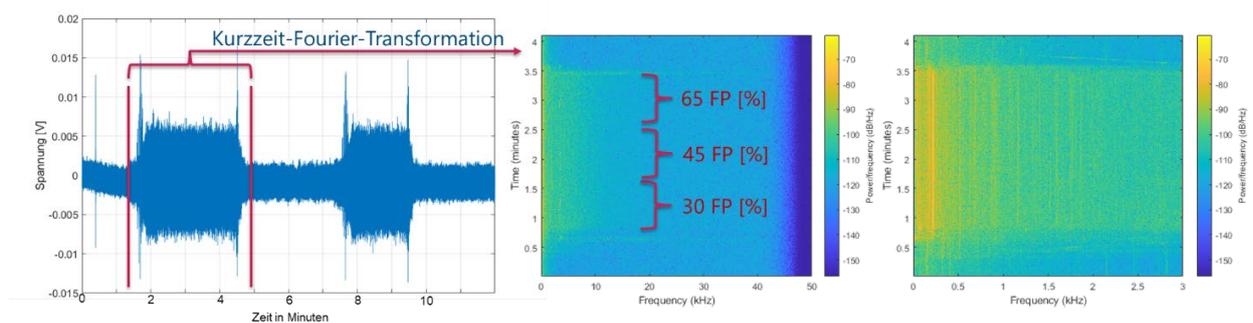


Abbildung 13: Auswertung des Ultraschallmikrofons im Zeit- und Frequenzbereich

Es zeigte sich jedoch auch bei den Vorversuchen, dass die verwendeten kostengünstigen Ultraschall-Mikrofone durch den hohen Schalldruckpegel an der Druckmaschine in ein sog. Clipping geraten. Die maximal erfassbare Lautstärke für die Mikrofone wird überschritten, sodass eine sinnvolle Auswertung nicht möglich war. Ein weiteres Ultraschall-Mikrofon, welches mit dem hohen Schalldruckpegel an einer Druckmaschine zuverlässig arbeiten konnte, war zum einen im wirtschaftlichen Rahmen nicht empfehlenswert und lieferte zum anderen nicht die vermuteten Ergebnisse, sodass dieser Ansatz - wie bereits erwähnt - verworfen wurde.

Mit der Sensorbox und den ersten Erfahrungen der Vorversuche bei DMH A wurden weitere Vorversuche bei dem DMH B durchgeführt. In Abbildung 14 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

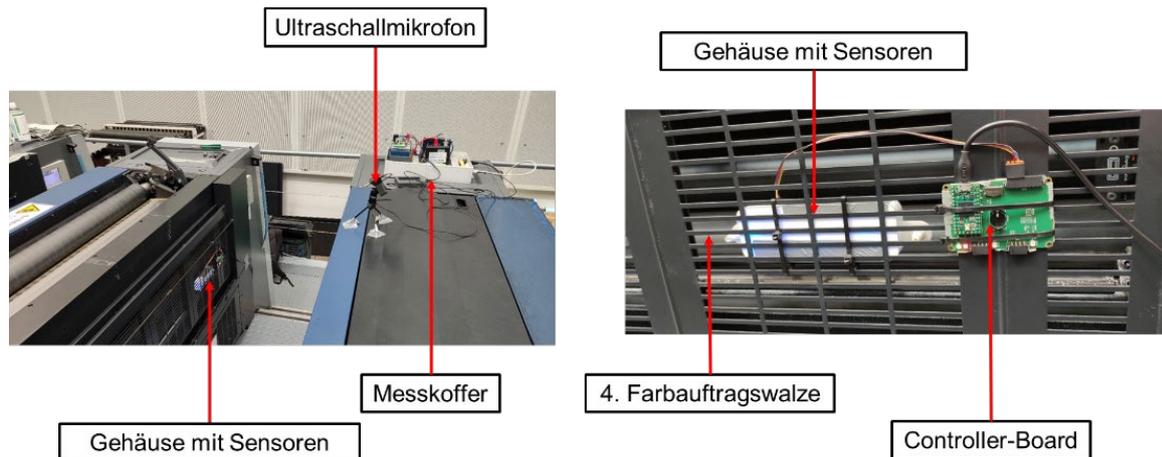


Abbildung 14: Versuchsaufbau beim DMH B

Bei diesen Untersuchungen wurden auch Messungen mit einem Spektrofotometer (Techkon SpectroDens) durchgeführt (siehe Abbildung 15). Diese Auswertung zeigt den Zusammenhang zwischen Feuchtpotieinstellung und farbmesstechnischen Merkmalen. Mit steigendem Feuchtpotiwert nehmen Farbdichte und a-Wert des Lab-Farbraums ab. Hingegen nehmen Luminanz und Tonwertzunahme bei steigendem Feuchtpoti ab.

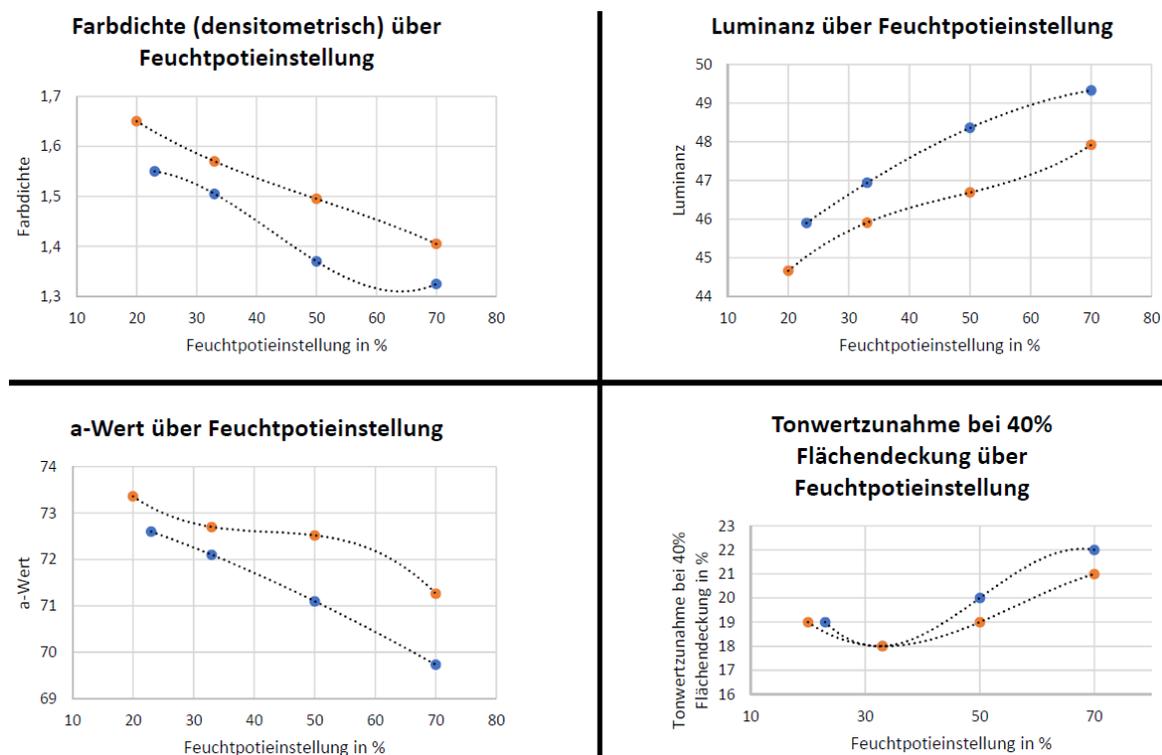


Abbildung 15: Ergebnisse der Untersuchungen mit einem Spektrofotometer (Techkon SpectroDens) beim DMH B

Die Ergebnisse der Vorversuche mit den Gassensoren beim DMH B zeigten vergleichbare Ergebnisse zu den oben dargestellten Ergebnissen der Vorversuche beim DMH A.

Aus diesen ersten Vorversuchen wurde klar, dass die Verwendung eines Ultraschallmikrofons nicht zielführend sein wird. Die Gassensoren hatten bei den Vorversuchen bisher noch zu lange

Zyklus-Zeiten, um mit diesen eine sinnvolle Auswertung durchführen zu können. Dies lag zudem auch an der stark verkürzten Versuchszeit, die zur Verfügung gestellt wurde und der sich dementsprechend sehr schnell ändernden Einstellung des Feuchtpotis. Für die nun folgenden Messkampagnen musste eine Messtraverse entwickelt werden, welche die zusätzliche Sensorik sicher innerhalb der Druckmaschine verortet und einen barrierefreien Zugang zum Wechseln der Druckplatten weiterhin ermöglicht. Zusätzlich werden aus der Erkenntnis der Vorversuche die Zyklus-Zeiten der Gassensoren reduziert.

## 8. Messaufbau und Entwicklung einer Messtraverse

Für die Sensorik und die Datenaufnahme wurde ein CompactRIO von National Instruments (cRIO 9047, USA) als zentrales Datenerfassungssystem eingesetzt. Bei der Auslegung war stets die Größe einer Druckmaschine zu berücksichtigen, welche Kabellängen von bis zu 20 m erforderlich macht. Derart lange Kabel können, besonders bei hochfrequenten, analogen Signalen, zu fehlerhafter Datenübertragung führen. Alle Aufbauten wurden im Vorhinein getestet und es wurden geschirmte Kabel bzw. Kabel mit einer Kompensationsmessung (PT100) verwendet. Die Gassensoren und die SHT35 wurden mit Hilfe eines am LMT entwickelten Boards mit einem Mess-PC verbunden. Der IR-Sensor wurde direkt mit dem Mess-PC verbunden. In Abbildung 16 ist der prinzipielle Aufbau der Messtechnik dargestellt. Der cRIO wurde verwendet, um die PT100 Temperatursensoren auszulesen. Die dunkelblauen Pfeile vom cRIO zu den roten Sternen symbolisieren die an der Seitenwand auf Maschinenbedienerseite angebrachten Sensoren und die vom cRIO zu den roten Punkten verlaufenden grauen Pfeile symbolisieren die Erfassung der PT100-Temperatursensoren im Inneren der Druckmaschine. Der Mess-PC selbst übernimmt die Aufgabe des Auslesens der Gassensoren und des SHT35 (grüne Pfeile) und zusätzlich in Druckwerk 1 (gelber Pfeil) das Auslesen des Infrarot-Temperatursensors und der Gassensoren sowie SHT35. Bei der Messkampagne I beim DMH A wird zusätzlich noch der Triple-Sensor ausgelesen. Dies gilt nicht für die Messkampagne beim DMH B, da zu dieser Zeit der Triple-Sensor noch nicht vorhanden war.

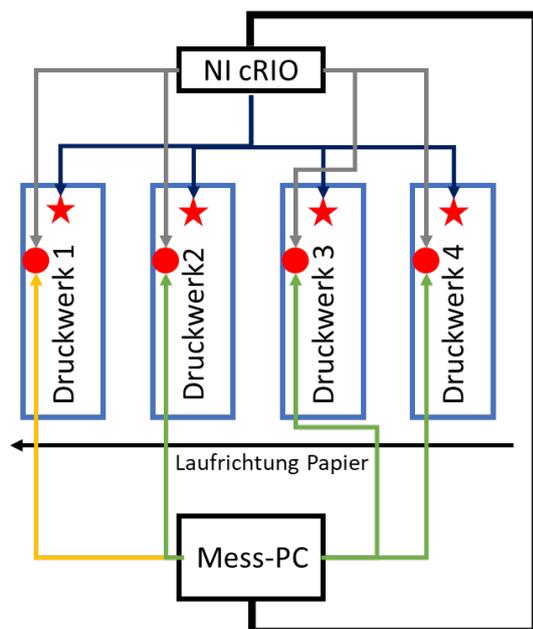


Abbildung 16: Prinzipieller Aufbau der Messtechnik

Die PT100, SHT35 und der Infrarot-Temperatursensor wurden mit einer Abtastrate von einem Hz ausgelesen (jede Sekunde ein Wert). Die Gassensoren wurden entsprechend ihrer Zykluszeiten ausgelesen. Da eine Verbindung zwischen cRIO und Mess-PC besteht, wurden die Daten auf dem Mess-PC gesammelt abgespeichert.

Eine weitere Herausforderung bestand im geringen frei verfügbaren Bauraum innerhalb des Druckwerks, welcher die Positionierung der Sensoren stark einschränkte. Dazu wurde nach Rücksprache mit den DMH und Betrachtung von CAD-Modellen der Druckwerke und der Druckmaschinen vor Ort eine Messtraverse entwickelt. Über diese Traverse können die Sensoren an einer definierten Position montiert und die Traverse selbst an den Seitenwänden der Druckmaschine sicher fixiert werden. In Abbildung 17 ist eine aufgebaute Messtraverse

dargestellt, welche mit Hilfe der schwarzen Adapter (jeweils an den Enden des Aluminiumprofils) an die Seitenwände der Druckmaschine montiert werden kann.

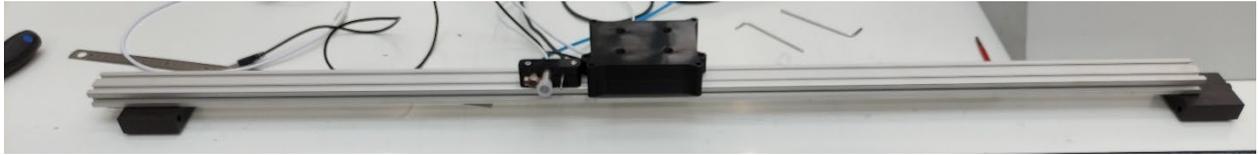


Abbildung 17: Messtraverse mit angebrachter Sensorbox und Sensorhalterung sowie Adaptern zu Montage an den Seitenwänden der Druckmaschine

Zur Anbringung der Messtraverse an der Druckmaschine wurden die in Abbildung 18 in rot hervorgehobenen Befestigungsmöglichkeiten genutzt. Auf der linken Seite sind eine Bohrung und ein Gewinde zu erkennen, auf der rechten Seite nur eine Bohrung. Diese Bohrungen sind symmetrisch und eignen sich daher zur Aufnahme der Messtraverse. Dementsprechend besitzen die Adapter an der Messtraverse jeweils einen Zapfen und auf der einen Seite eine Bohrung mit Schraube, um die Messtraverse gegen Verdrehung zu sichern.

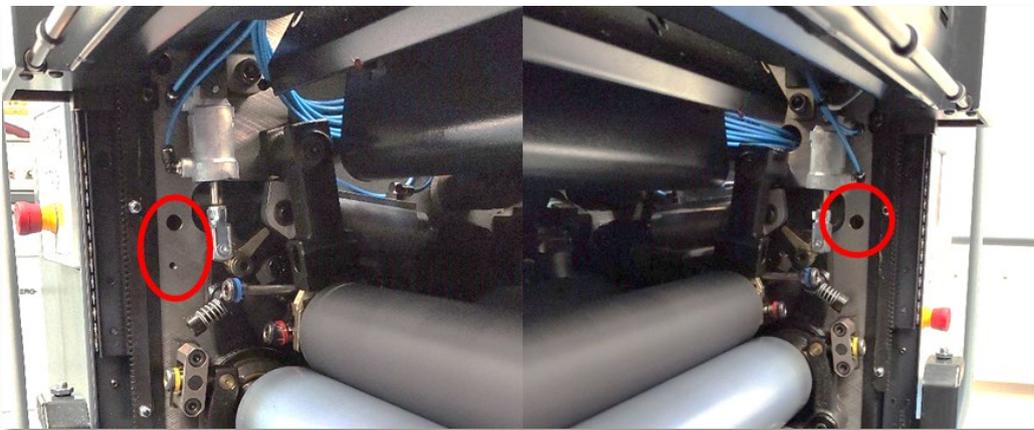


Abbildung 18: Befestigungsmöglichkeiten an den Seitenwänden der Druckmaschine

In Abbildung 19 ist in einer CAD-Darstellung zusätzlich die Befestigung des Adapters und Messtraverse an der Seitenwand der Antriebseite dargestellt. Im Besonderen ist hier die Sicherung gegen Verdrehung der Messtraverse erkennbar.

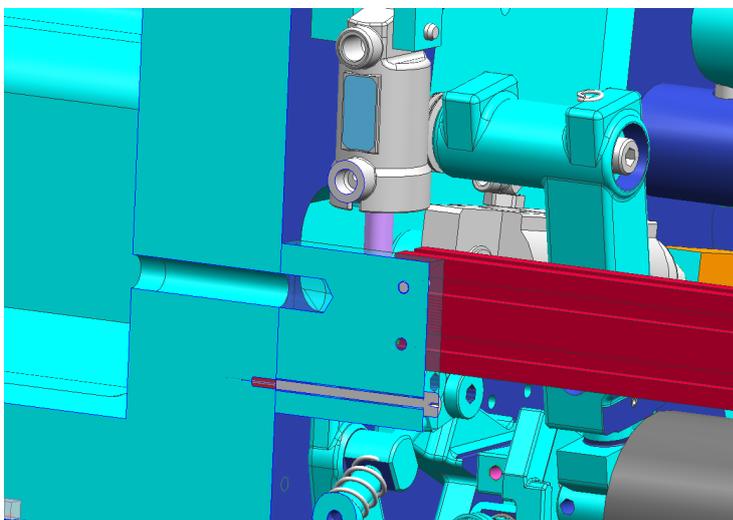


Abbildung 19: CAD-Darstellung der Verbindung zwischen Adapter der Messtraverse und Seitenwand der Druckmaschine

In Abbildung 20 ist eine im Druckwerk eingebaute Messtraverse zu sehen. Die Druckmaschine verfügt über vier Druckwerke, in denen jeweils eine Messtraverse verbaut wurde. Die volle Funktionsfähigkeit der Druckmaschine bleibt durch den Einbau unberührt.



Abbildung 20: Einbausituation der Messtraverse in die Druckmaschine (vgl. Abbildung 9, links)

Die Sensorik muss gegen die in den Druckwerken vorherrschende raue Umgebung geschützt werden. In den Druckwerken entsteht ein feiner Farbnebel, welcher sich auf die Sensorik niederschlagen kann. Dieser Farbnebel könnte den Messaufnehmer bedecken und damit den Sensor unwirksam machen oder sich auf der Elektronik absetzen und Übertragungsfehler verursachen. Aus diesem Grund wurden Gehäuse konstruiert und mittels 3D-Druck hergestellt. Das Gehäuse und die Halterung lassen sich einerseits mit der Traverse verbinden und sind andererseits zum Schutz der Sensoren geeignet (Abbildung 21). Die unterschiedlichen Gassensoren sowie der SHT35-Sensor sind in den Gehäusen untergebracht und der PT100-Temperatursensor sowie der Infrarotsensor sind an der Halterung befestigt.

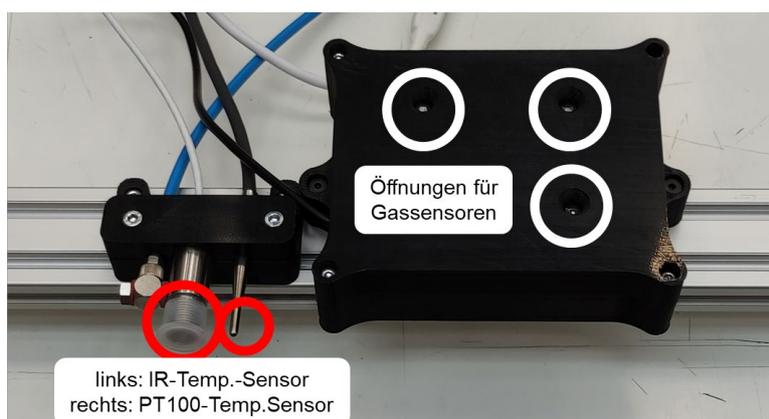


Abbildung 21: Sensorgehäuse (rechts) bzw. -halter (links) auf der Messtraverse

## 9. Messkampagne I – DMH

Die Versuche der Messkampagne I wurden beim Druckmaschinenhersteller DMH B im Zeitraum vom 25.07.22 bis 27.07.22 und beim DMH A im Zeitraum vom 25.10.22 bis 27.10.22 durchgeführt. Beide Versuche wurden jeweils von einem direkten Ansprechpartner der Unternehmen sowie erfahrenem Druckpersonal begleitet. Am ersten Tag der Versuchsdurchführungen wurde der Versuchsplan in einem Briefing besprochen und die zusätzliche Sensorik verbaut. Am folgenden Tag fand die Versuchsdurchführung statt. Der dritte Tag diente zum Abbau der Messtechnik und dem Rücksetzen der Druckmaschine in den Ausgangszustand.

Bei der Erstellung des Versuchsplans mussten zusätzliche Randbedingungen eingehalten werden. Eine harte Randbedingung war die zur Verfügung stehende Anzahl der bedruckbaren Bogen. Da die Verfügbarkeit von Papiersubstraten sinkend und die Anschaffungskosten hoch sind, wurde eine Bogenanzahl von 40.000 beim DMH B und eine Bogenanzahl von 50.000 beim DMH A vereinbart, um den Versuchsplan zu konfigurieren. Zu variierende Parameter waren die Druckfarbe, die Druckgeschwindigkeit, die Färbung, die Druckformen bzw. Sujets und die Einstellung des Feuchtpoti. Als Druckfarben wurden jeweils die Skalenfarben Magenta und Schwarz (Black) von zwei Druckfarbenherstellern gewählt und beschafft. Besonders die Skalenfarbe Magenta ist beim Einstellen eines optimalen Farb-Wasser-Gleichgewichts schwerer handhabbar als andere Skalenfarben, weshalb diese unter anderem ausgewählt wurde. In Abbildung 22 sind die beiden verwendeten Druckformen abgebildet, welche für den Druck mit nur zwei Skalenfarben angepasst wurden. Es fand jeweils nur ein einmaliger Wechsel der Druckformen während der Versuche statt. Die ausgewählten Druckformen mussten geeignet sein, prinzipielle Unterschiede im Einfärbungsverhalten aufzuzeigen. In Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurde eine Druckform mit einer gleichmäßigen und eine mit einer ungleichmäßigen Flächendeckung gewählt. Dies beschreibt, wie viel Druckfarbe über die Breite hinweg verbraucht wird.

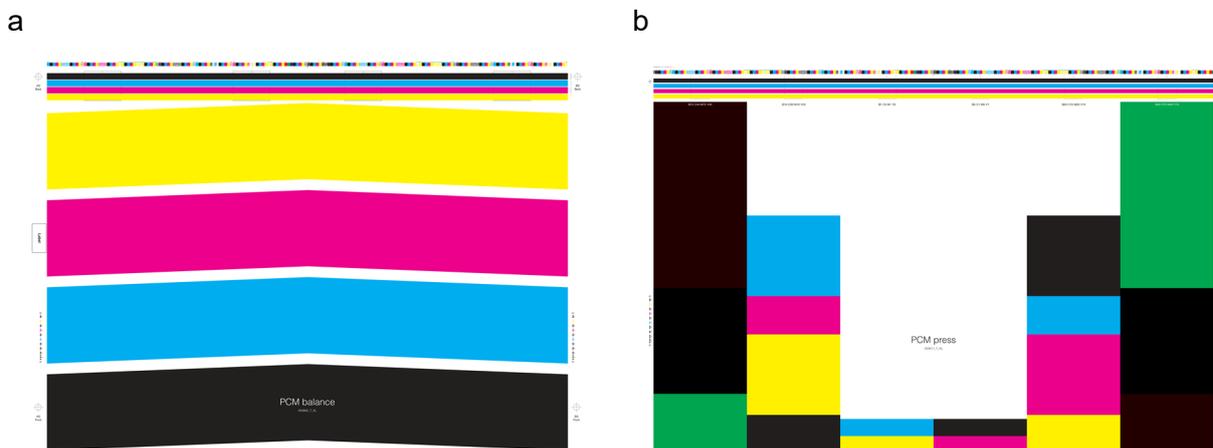


Abbildung 22: Testdruckform PCM balance (a); Testdruckform PCM press (b)

Alle weiteren Parameter wurden konstant gehalten, um einen stabilen Druckprozess zu gewährleisten.

Ein weiterer zentraler Punkt der Mess- und Datenplanung ist die Erstellung einer Übersicht über die Daten, welche die Anlagen in Form von Logbüchern aus der jeweiligen Druckmaschine zur Verfügung stellen. In den Logbüchern sind beispielsweise Zeitstempel mit den entsprechenden Parametern wie z. B. Druckgeschwindigkeit, Feuchtpotiwert, Färbung sowie farbtechnische Merkmale protokolliert. Die Logbücher haben bei den verschiedenen Druckmaschinen jeweils andere Inhalte und andere Strukturen, so dass die Fusionierung von Messdaten und Einträgen

in den Logbüchern entsprechend angepasst werden muss. Die zur Verfügung stehenden Druckmaschinen verfügen auch über ein sogenanntes Inline-Farbmesssystem. Das System basiert auf einer Kamera, welche in den Druckmaschinen eingebaut ist und während des Drucks fortlaufend Farbdichte-Messwerte (unter anderem die Farbdichte in den einzelnen Farbzonen) der gedruckten Bogen ermittelt. Diese Messwerte sind jedoch nicht in den Logbüchern einsehbar. Die Logbücher werden von den Druckmaschinen automatisch erstellt und stehen im Nachhinein seitens der DMH zur Verfügung. Die Daten der Logbücher und die gemessenen Daten der Sensoren können daher erst nach der Versuchsdurchführung fusioniert werden.

## 9.1. Vorbereitung Messkampagne I - DMH B

Vor der eigentlichen Durchführung der Druckversuche wurde, wie bereits erwähnt, am Tag zuvor der Versuchsplan beim DMH besprochen. Der Versuchsplan ist in Abbildung 23 dargestellt. Die gelb hinterlegten Zellen stellen die Wiederholversuche dar, um beim anschließenden Verarbeiten der Daten im ML-Modell unter anderem eine Validierungsgrundlage zu schaffen. Die Wiederholversuche wurden auch eingeplant, um bspw. an einem späteren Zeitpunkt, wenn die Druckmaschine „warm“ gelaufen ist, mögliche Veränderungen der aufgezeichneten Parameter nachvollziehen zu können. Bei den Versuchen beim DMH B werden insgesamt 16 Variationen untersucht, wobei 8 Variationen Wiederholungen darstellen. In den einzelnen Spalten des Versuchsplans sind von links nach rechts gelesen der Beginn der einzelnen Variation, der Beginn zum Suchen der Schmiergrenze, die Versuchsnummer und der entsprechende Teilversuch sowie die variierten Parameter Druckform, Färbung, Druckgeschwindigkeit und Feuchtpotwert dargestellt. Der Feuchtpotwert wurde nicht händisch eingetragen, da diese in den Logbüchern der Druckmaschine automatisch mit aufgezeichnet wurde. Zusätzlich zeigt die letzte Spalte eine Beschreibung.

Startzeit/Beginn Variation	Startzeit/Suchen Schmiergrenze	VersNo	Teilversuch	Testform	Färbung	Druckgeschw. Bogen/h	FePot-Werte	Beschreibung
12:31:51	siehe LOG	1	A	220525	-15%	12000	siehe LOG	Einrichten der Form. Anfahren Schmiergrenze, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V1A
12:36:49	-	1	B	220525	-15%	12000	siehe LOG	Anfahren Schmiergrenze+5%, Färbung einregeln, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V1B
12:44:15	siehe LOG	2	A	220525	15%	12000	siehe LOG	Einrichten der Form. Anfahren Schmiergrenze, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V2A
12:49:15	-	2	B	220525	15%	12000	siehe LOG	Anfahren Schmiergrenze+5%, Färbung einregeln, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V2B
13:09:20	13:06:00	3	A	220525	-15%	12000	siehe LOG	Einrichten der Form. Anfahren Schmiergrenze, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V3A
13:14:05	-	3	B	220525	-15%	12000	siehe LOG	Anfahren Schmiergrenze+5%, Färbung einregeln, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V3B
13:21:43	13:18:52	4	A	220525	15%	12000	siehe LOG	Einrichten der Form. Anfahren Schmiergrenze, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V4A
13:26:28	-	4	B	220525	15%	12000	siehe LOG	Anfahren Schmiergrenze+5%, Färbung einregeln, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V4B
14:15:38	13:46:05	5	A	220525	15%	16000	siehe LOG	Einrichten der Form. Anfahren Schmiergrenze, 4 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V5A
14:19:12	-	5	B	220525	15%	16000	siehe LOG	Anfahren Schmiergrenze+5%, Färbung einregeln, 4 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V5B
14:25:33	14:22:59	6	A	220525	-15%	16000	siehe LOG	Einrichten der Form. Anfahren Schmiergrenze, 4 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V6A
14:29:06	-	6	B	220525	-15%	16000	siehe LOG	Anfahren Schmiergrenze+5%, Färbung einregeln, 4 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V6B
09:48:18	09:35:00	11	A	220524	-15%	12000	siehe LOG	Einrichten der Form. Anfahren Schmiergrenze, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V11A
09:58:39	-	11	B	220524	-15%	12000	siehe LOG	Anfahren Schmiergrenze+5%, Färbung einregeln, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V11B
10:10:09	10:03:37	12	A	220524	15%	12000	siehe LOG	Einrichten der Form. Anfahren Schmiergrenze, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V12A
10:15:15	-	12	B	220524	15%	12000	siehe LOG	Anfahren Schmiergrenze+5%, Färbung einregeln, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V12B
10:24:57	10:22:25	13	A	220524	-15%	12000	siehe LOG	Einrichten der Form. Anfahren Schmiergrenze, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V13A
10:29:35	-	13	B	220524	-15%	12000	siehe LOG	Anfahren Schmiergrenze+5%, Färbung einregeln, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V13B
10:36:34	10:34:38	14	A	220524	15%	12000	siehe LOG	Einrichten der Form. Anfahren Schmiergrenze, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V14A
10:46:31	-	14	B	220524	15%	12000	siehe LOG	Anfahren Schmiergrenze+5%, Färbung einregeln, 5 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V14B
11:07:32	10:05:05	15	A	220524	15%	16000	siehe LOG	Einrichten der Form. Anfahren Schmiergrenze, 4 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V15A
11:11:11	-	15	B	220524	15%	16000	siehe LOG	Anfahren Schmiergrenze+5%, Färbung einregeln, 4 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V15B
11:17:19	11:14:59	16	A	220524	-15%	16000	siehe LOG	Einrichten der Form. Anfahren Schmiergrenze, 4 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V16A
11:20:59	-	16	B	220524	-15%	16000	siehe LOG	Anfahren Schmiergrenze+5%, Färbung einregeln, 4 Min. drucken, 6 Bogen ziehen, markieren mit V16B

Abbildung 23: Versuchsplan der Messkampagne I beim DMH B

Prinzipiell wird die folgende Vorgehensweise für die Durchführung des Versuchsplans beim DMH B angewendet:

1. Das Druckpersonal führt alle Arbeitsschritte aus, die für die Einrichtung der Druckmaschine erforderlich sind. Dazu gehört das Einfüllen der Druckfarbe in die Farbkästen, das Aufspannen der Druckformen auf den Druckzylinder und das Einstellen der Register durch Probedrucke.
2. Starten der Versuchsreihe: Die Schmiergrenze für jedes der vier verwendeten Druckwerke wurde gesucht, welche für eine vordefinierte Haltezeit (4 bzw. 5 min) jedes Versuchspunktes des Versuchsplans konstant gehalten wurde. Die Schmiergrenze entspricht der Einstellung, bei der gerade so eben kein Schmieren mehr entsteht.
3. Erhöhen des Feuchtpotis um 5 Prozentpunkte (dies stellt die Standardprozedur dar, um das Druckergebnis in den Schöndruck zu überführen) und wiederum Halten dieser Parameter über den vordefinierten Zeitraum (4 bzw. 5 min).
4. Im Anschluss wird entweder der Parameter Färbung oder Druckgeschwindigkeit auf einen neuen Wert gesetzt und für die folgende Variation wieder die Schmiergrenze eingestellt (Wiederholung ab 2.).

Am Ende jeder Variation werden 6 Bogen zum Zweck der Auswertung der Druckkontrollstreifen gezogen. Auf diesen werden Uhrzeit und die Variations-Kennung notiert.

Wie in Kapitel 6 bereits erläutert, ist das Prozessfenster für Feuchtmittel nach unten und oben begrenzt. Bei Überschreiten dieser Grenzen kommt es an der unteren Grenze zum Schmieren und an der oberen Grenze zum Emulgieren. In der Praxis des Offsetdruckens ist ein verbreitetes Vorgehen das Anfahren der Schmiergrenze (die untere Grenze des Prozessfensters), um von dieser aus dann 5 %-Punkte bei der Einstellung des Feuchtpotis aufzuschlagen. Dazu werden testweise Bogen gedruckt und mit der Feuchtpotiwert experimentiert, bis die gewünschten Qualitätsparameter erreicht werden. Ziel ist es, eine Einstellung zu finden, bei der ein Schmieren gerade nicht mehr erkennbar ist. Auf diesen Gedanken wurde bei der Erstellung des Versuchsplans zurückgegriffen.

## **9.2. Auswertung und Modellbildung - DMH B**

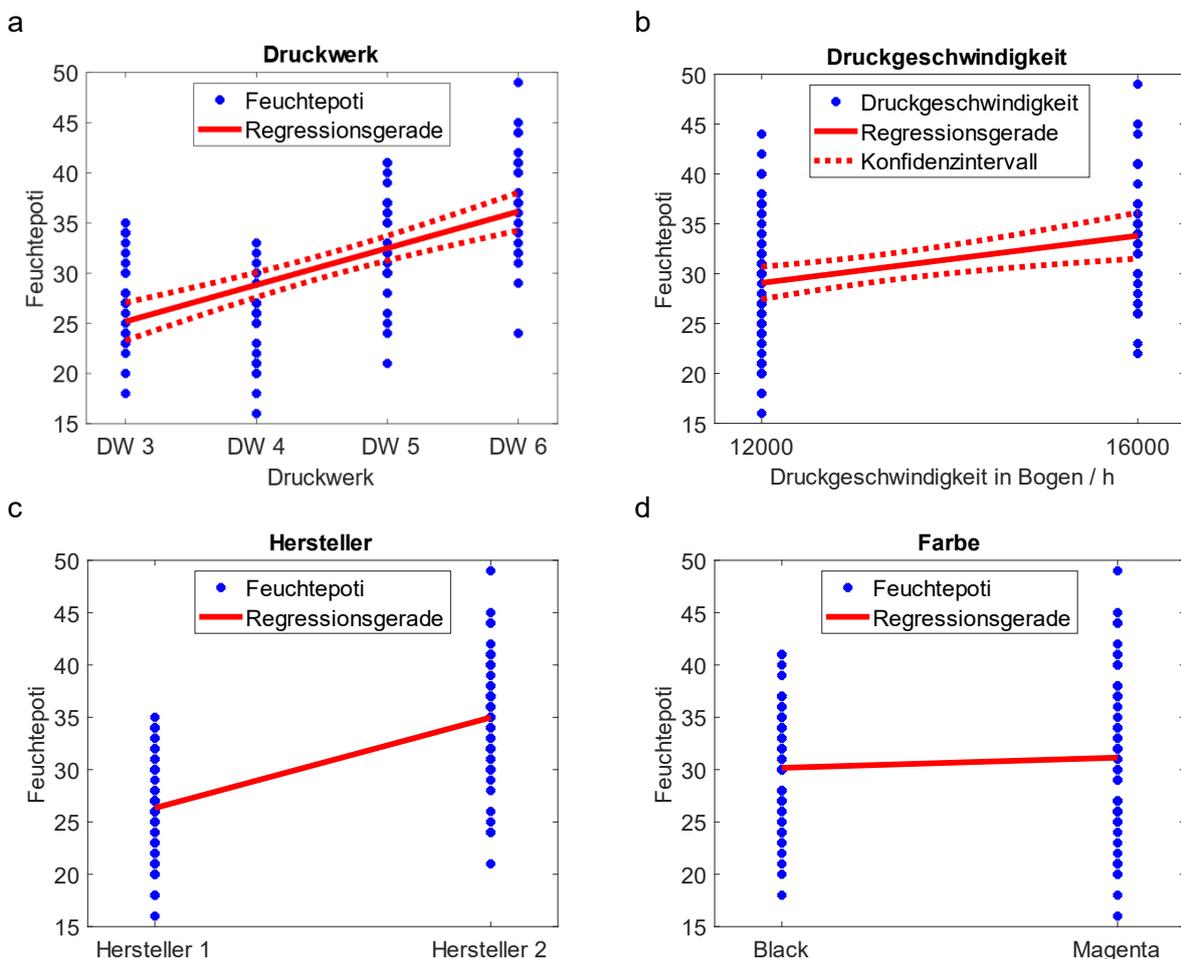
Bei der Auswertung der Versuche werden zunächst nur ausgewählte Parameter der Logbucheinträge in Bezug auf die Feuchtpotiwerte mittels Regressionsanalyse betrachtet. Hierdurch können signifikante Parameter zunächst identifiziert werden. Vor der eigentlichen Auswertung der Daten der Messkampagne I wurde eine grobe Sichtung der Sensordaten und Visualisierung der dieser durchgeführt, um zu prüfen, ob die Aufzeichnung vollständig funktioniert hat. Dabei konnten keine Unregelmäßigkeiten festgestellt werden. Die Sensordaten werden im nächsten Schritt in ein MATLAB-Dateiformat umgewandelt und so geordnet, dass sie mit der ML-Toolbox des Lehrstuhls für Messtechnik der Universität des Saarlandes kompatibel sind. Die Sensordaten werden anschließend mit den während der Versuche aufgezeichneten Logbucheinträgen anhand der Zeitstempel fusioniert und synchronisiert. Diese zusammengeführte Datentabelle kann dann im Anschluss an die ML-Toolbox überführt werden, um eine Modellbildung und Vorhersage zur Einstellung des Feuchtpotis vorzunehmen.

Die Bogen werden nach den Versuchen auf Parameter wie Tonwertzunahme, Lab-Werte und Farbdichte vermessen, welche mit Soll-Werten aus dem Prozessstandard Offset (PSO) verglichen werden können. Die Auswertung der farbmestechnischen Kennwerte der Druckbogen wurde bei den Versuchen beim DMH B seitens des DMH durchgeführt. Kennwerte wurden nach SCTV-Standard ermittelt. Abweichungen werden mit den Standardwerten nach

Prozess-Standard-Offset (PSO) abgeglichen, um eine Bewertung der Druckqualität zu gewährleisten. Bekannte und gängige Druckfehler konnten durch visuelle Betrachtung der Druckbogen nicht ausgemacht werden. Die weiteren Qualitätsmerkmale wurden durch das IDD ermittelt.

Die Auswertung wird im Wesentlichen mittels der ML-Toolbox in MATLAB durchgeführt. Ziel ist es, Zusammenhänge zwischen dem Farb-Wasser-Gleichgewicht, der Druckqualität und den von den Maschinen und Sensoren aufgezeichneten Daten herzustellen.

In der folgenden Abbildung 24 sind Regressionsanalysen zu verschiedenen Prozessparametern in Bezug auf das Feuchtpoti dargestellt. Umso größer die Steigung der Regressionsgeraden desto höher ist der Einfluss auf das Feuchtpoti. Besonders großer Einfluss konnte zwischen den einzelnen Druckwerken (a), der Druckgeschwindigkeit (b) und dem Hersteller der Druckfarben (c) beobachtet werden. Einen weniger starken Einfluss auf das Feuchtpoti haben die Färbung (d), die einzelnen Teilversuche bezüglich Schmiergrenze und +5 % zzgl. Schmiergrenze (e) sowie die verwendete Druckform (f).



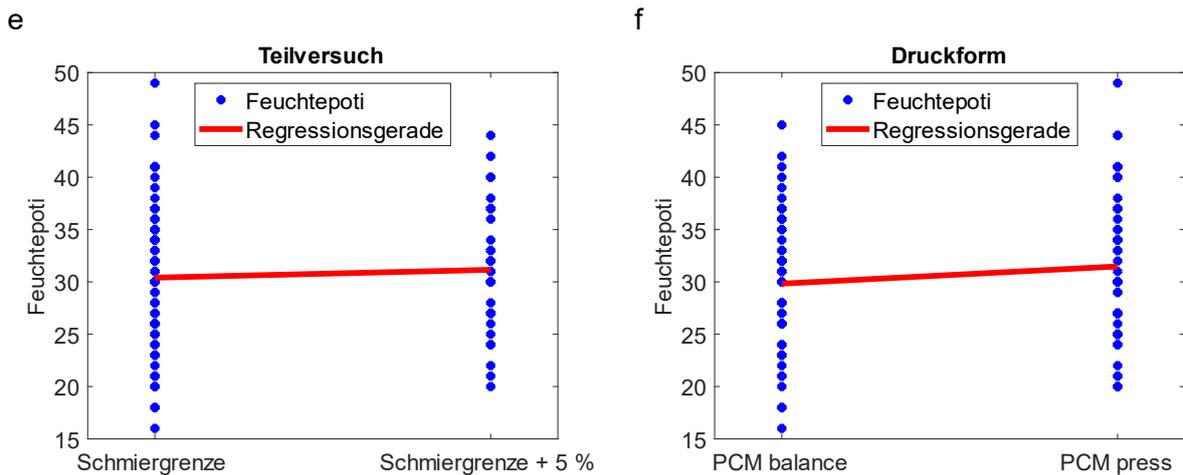


Abbildung 24: Regressionsanalysen ausgewählter Druckparameter auf das Feuchtpoti

Eine Auswertung der Daten zeigt, welche Sensoren Signale erzeugen, die eine hohe Korrelation zur Zielgröße (Feuchtpoti) aufweisen. In Abbildung 25 sind einzelne Merkmale (das sind bei den zyklisch betriebenen Gassensoren die Mittelwerte und Steigungen in 1-Sekunden-Abschnitte des Temperaturzyklus) nach ihrer Relevanz und nach einer Auswahl der eingesetzten Sensoren sortiert. Je weiter links ein Eintrag liegt, desto höher die Korrelation. Die horizontalen Linien unterteilen die Merkmale nach Sensoren, die rechts in der Grafik genannt sind. So lässt sich beispielsweise ablesen, dass die gemessene Temperatur und absolute Luftfeuchtigkeit mit dem Sensor SHT35 von Sensirion eine hohe Korrelation zum Wert des Feuchtpotis zeigt. Für den zweiten Bereich von oben „ZMOD4450“ (Gassensor) lässt sich für diesen Sensor keine hohe Korrelation zur Zielgröße ermitteln. Für den zweiten Gassensor SGP40 zeigt sich eine hohe Korrelation zum Feuchtpoti. S0 bis S3 stehen für die vier unterschiedlichen Schichten des SGP40, alle Schichten liefern demnach mit der Zielgröße korrelierende Informationen.

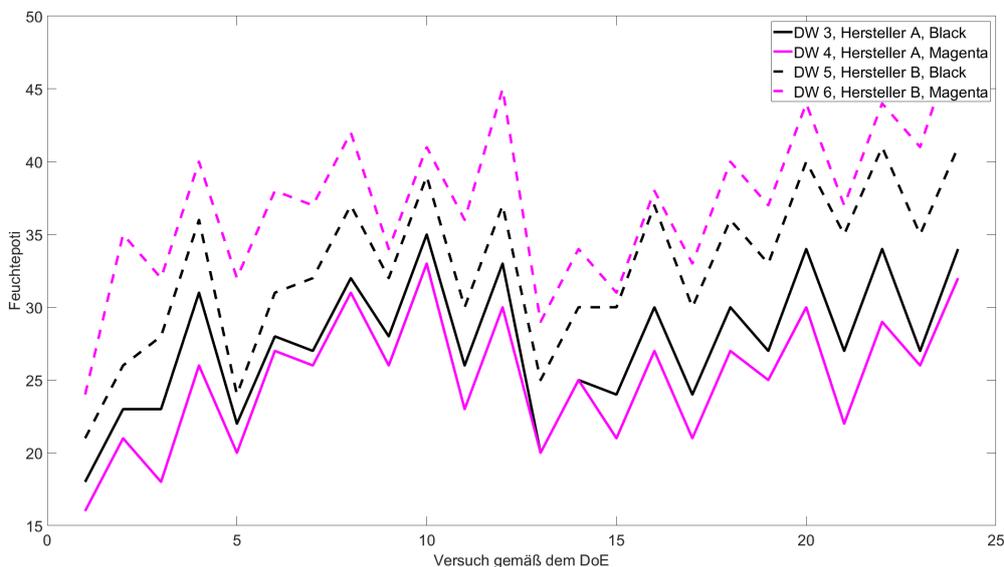


Abbildung 25: Einstellung des Feuchtpotis über den einzelnen Versuchsvariationen bezüglich der Druckfarben der beiden Druckfarbenhersteller

In der folgenden Abbildung 26 sind die Korrelationen der einzelnen Schichten des SGP40 und des ZMOD4410 dargestellt. Unter (a) wird der Durchschnitt in jeder Temperaturstufe abgebildet und bei (b) wird das quasistatische Sensorsignal betrachtet. Zu erkennen ist, dass der SGP40 eine höhere Korrelation als der ZMOD4410 zum Feuchtpoti besitzt. Eine besonders hohe Korrelation besteht bei der Sensorschicht S3. Daher wird für die weiteren Versuche nur noch auf

den SGP40 zurückgriffen und bevorzugt die Sensorschicht S3 für die Modellbildung und Auswertung verwendet.

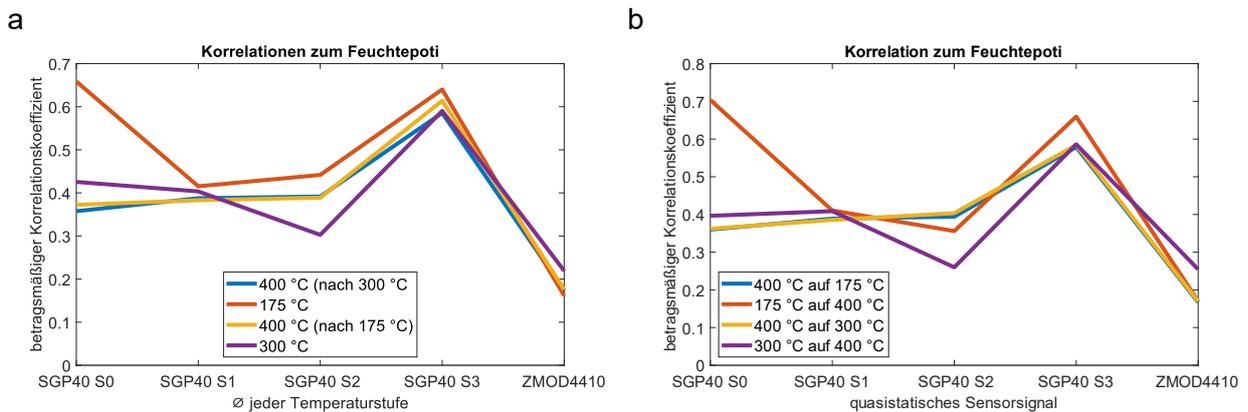


Abbildung 26: Korrelationen der SGP40 und ZMOD4410 Gassensoren zum Feuchtpoti

In Abbildung 27 findet ein Ranking der Korrelationskoeffizienten von SHT35, SGP40 und ZMOD4450 statt. Bezüglich des SHT35 ist zu erkennen, dass die abs. Luftfeuchtigkeit und die Temperatur wesentlich bessere Ränge belegen als die rel. Luftfeuchtigkeit. Der ZMOD4450 schneidet im Vergleich zum SGP40 im Ranking schlecht ab.

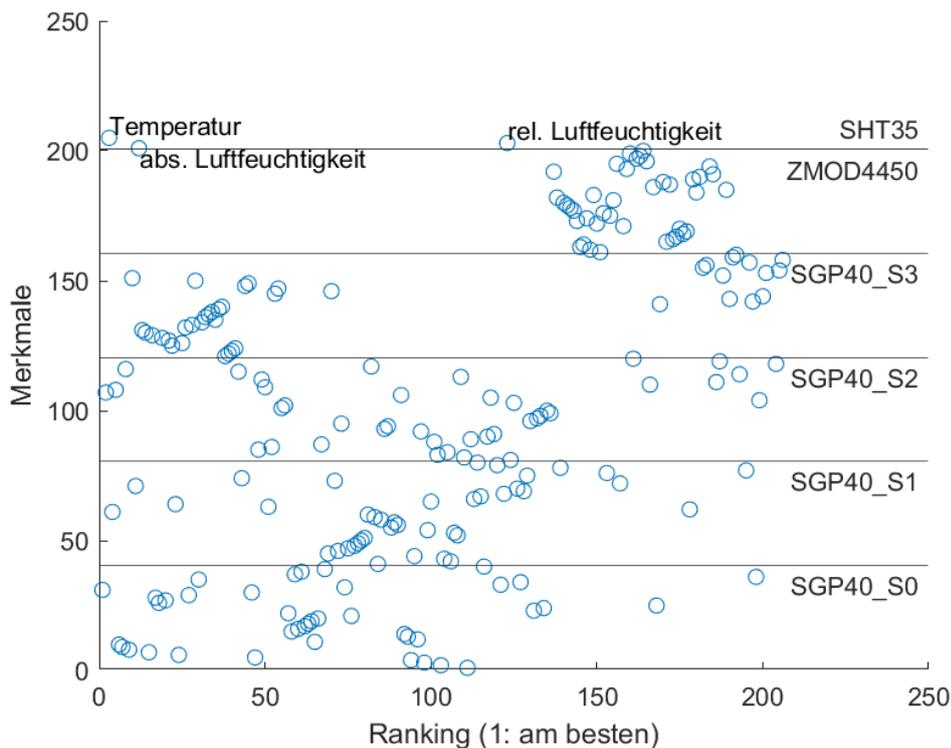


Abbildung 27: Relevanz ausgewählter Sensoren bzw. Merkmale für die Erfassung des Feuchtpotis ermittelt mittels Ranking der Korrelationskoeffizienten

Eine Erweiterung der ML-Toolbox um Methoden, welche für die aufgezeichneten Daten genauere Berechnungen ermöglicht, ist geplant und hat im Ansatz begonnen. Die ML-Toolbox kann aus den erfassten Sensordaten und Merkmalen automatisiert ein Modell zur Vorhersage eines Zielwertes, beispielsweise des Feuchtpoti-Stellwertes ermitteln. Letztlich kann damit, bei Vorliegen einer geeigneten Zielgröße in den Trainingsdaten der Versuchsreihen, ein Modell zur Ansteuerung des Feuchtpotis ermittelt werden, entweder als absolute Vorgabe (Prozentwert)

oder als Relativwert (Feuchtpoti erhöhen oder verringern). Im ersten Schritt sollte gezeigt werden, dass mittels ML-Modell der eingestellte Wert des Feuchtpotis reproduziert werden kann, d.h. dass anhand der Sensordaten der aktuelle Stellwert bestimmt werden kann; im zweiten Schritt sollte dann ein Modell zur Einstellung des Feuchtpotis als eigentliches Projektziel entwickelt werden.

Es wurden diverse Modelle mit der ML-Toolbox generiert, die möglichst genau den eingestellten Feuchtpoti-Wert reproduzieren sollen. Dazu wird der ML-Toolbox ein Datensatz bestehend aus den Sensordaten, den Maschinendaten (Logbucheinträge) und der Zielgröße – dem Feuchtpoti-Wert – übergeben (Trainingsdaten). Ein beliebig gewählter Anteil der Daten wird vorenthalten, bspw. alle Daten, welche während eines bestimmten Zeitfensters aufgezeichnet wurden (Testdaten), um die Übertragbarkeit des Modells zu validieren. Die ML-Toolbox führt diverse statistische Berechnungen durch, um das Modell an die Trainingsdaten anzupassen. Zuletzt wird das so gefundene Modell auf die Testdaten angewandt, um für diese die Zielgröße vorherzusagen. Ein Vergleich des Modellergebnisses mit den tatsächlichen Werten der Zielgröße im Experiment erlaubt eine Bewertung der Modellqualität. Durch Einschränkung der Modelle auf Teile der Daten, z. B. nur Gassensordaten oder nur Prozessparametern aus den Logbüchern, kann analysiert werden, wie gut die Vorhersage mit diesen Daten möglich ist.

Durch unterschiedliche Wahl der Trainingsdaten und Testdaten (Split) lassen sich weitere Erkenntnisse gewinnen. Mit zufällig ausgewählten Testdaten lässt sich validieren, welche der Modelle vielversprechend sind. Es konnte so ein Modell gefunden werden, dass die Feuchtpoti-Werte in guter Näherung vorhersagt. In einer weiteren Auswertung wurden die Daten von drei Druckwerken für das Training benutzt und auf die Daten des vierten Druckwerks als Testdaten angewandt. Hier war es nicht möglich, ein Modell zu finden, um die Zielgröße präzise vorherzusagen. Zwei mögliche Ursachen sind hierfür plausibel: die eingesetzten Sensoren, die nicht vorab kalibriert wurden, verhalten sich unterschiedlich und / oder jedes Druckwerk weist ein individuelles Verhalten auf.

Vor allem lässt sich jedoch ermitteln, welche Prozess- und Messdaten zur Erstellung notwendig oder hinreichend sind. So konnte für die vorhandenen Daten gezeigt werden, dass für die Bildung eines Modells bereits Gas-, Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren allein ausreichen. Auch mit ausschließlich den von der Maschine aufgezeichneten Daten lassen sich aussagekräftige Modelle generieren. Eine Kombination beider Datensätze lieferte die besten Ergebnisse zur Vorhersage des Feuchtpoti-Wertes. In Abbildung 28 ist die Vorhersage (automatische Empfehlung) in rot im Vergleich zu den eingestellten Feuchtpoti-Werten in blau für das Modell auf Basis der vollständigen Daten dargestellt.

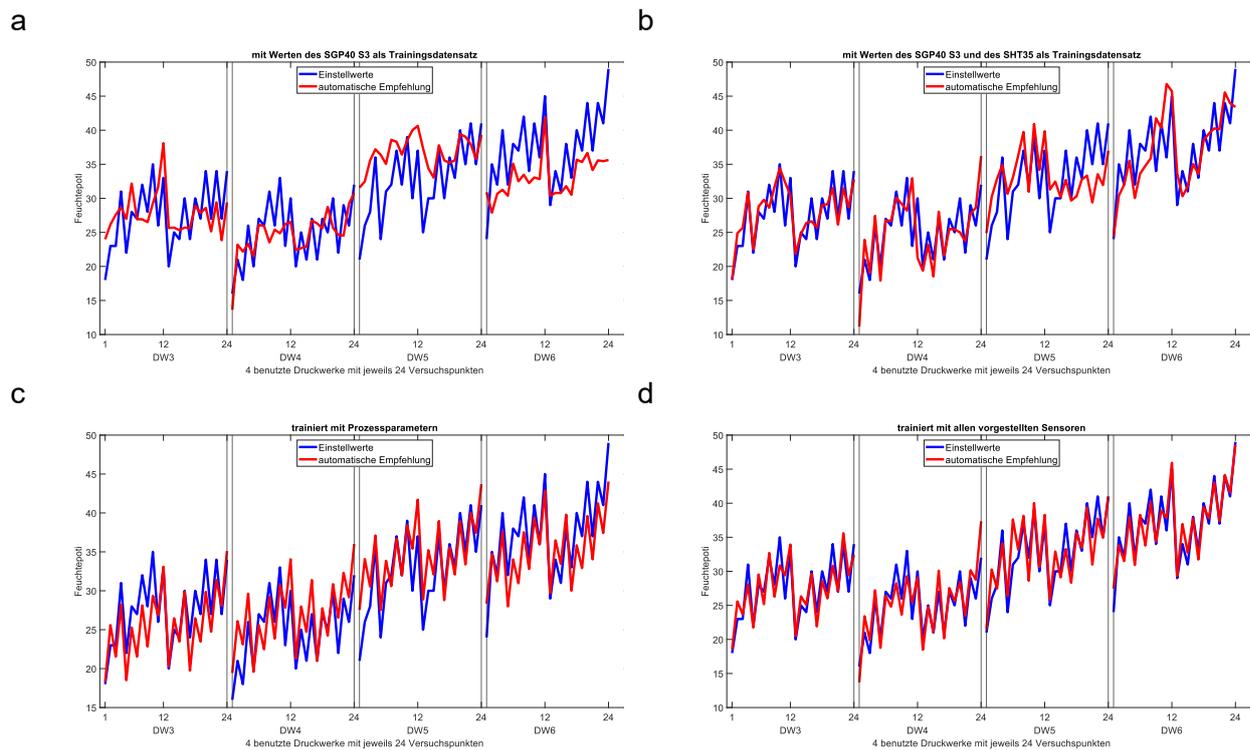


Abbildung 28: Trainingsdaten und angewendetes ML-Modell zur automatischen Empfehlung der Einstellung des Feuchtpotis

Die nachfolgende Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse der Modelle quantitativ. Hier ist zu beachten, dass ein Gesamtmodell für alle Druckwerke gebildet wurde, in das auch Daten aller Druckwerke eingeflossen sind. Prinzipiell ist eine Verbesserung möglich, wenn Druckwerk-spezifische Modelle erstellt werden, allerdings ist hierfür die Datenbasis der Vorversuche nicht ausreichend.

Modell basierend auf	SGP40 S3	SGP40 S3 + SHT35	Prozessparameter	Alle Sensoren + Prozessparameter
RMSE	4,8	3,6	3,2	2,1
RMSE <sub>rel</sub>	9,9 %	7,4 %	6,5 %	4,4 %

Abbildung 29: Übersicht der Fehler (RMSE: root mean squared error, mittlerer quadratischer Fehler) der einzelnen ML-Modelle in Einheiten des Feuchtpoti-Stellwertes bzw. relativ, bezogen auf den Dynamikbereich des Feuchtpotis in den Untersuchungen.

Die ML-Toolbox ist derart gestaltet, dass Zwischenschritte der Berechnungen, ausgewählte Parameter, Kenngrößen und Merkmale transparent sind. Das hat den Vorteil, dass sich präzise Aussagen treffen lassen. Ein Beispiel wäre: „Wenn dieser Sensor steigende Werte aufzeichnet, ist ein Verschieben des Farb-Wasser-Gleichgewicht zu beobachten“. Damit grenzt sich die ML-Toolbox gegen kommerziell erhältliche KI-Software oder weit verbreiteten KI-Methoden wie neuronalen Netzen ab. Des Weiteren sind diese tieferen Einblicke von wissenschaftlichem Interesse, um den Offsetdruckprozess besser verstehen zu können.

Ein wichtiger Aspekt der Bewertung der Ergebnisse betrifft ihre Validierung. Hierfür wurden die im Versuchsplan eingeplanten Wiederholversuche (gelb markiert in Abbildung 23) als Testpunkte gewählt und ein ML-Modell ohne diese Testpunkte erstellt. Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse (grün hinterlegt sind die Wiederholungsversuche als Testdaten). Die Ergebnisse (RMSE = 4,73,

$RMSE_{rel} = 10,8 \%$ ) zeigen, dass der Fehler für die Wiederholungsversuche deutlich größer ist als bei randomisierter Kreuzvalidierung. Dieser Effekt könnte zwei Ursachen haben: zum einen ist die Anzahl der Trainingspunkte deutlich geringer, da ein Drittel der Daten als Testdaten genutzt werden im Gegensatz zu einem Zehntel bei der oben genutzten 10-fachen Kreuzvalidierung. Möglich ist auch ein sog. Domain shift, d.h. die Randbedingungen haben sich zwischen Versuch und Wiederholung systematisch geändert, so dass das Modell Abweichungen zeigt, die nicht erfasst werden können. Angesichts des geringen zeitlichen Abstands der Wiederholversuche und der Erfassung der Umgebungsbedingungen ist dies hier aber weniger wahrscheinlich.

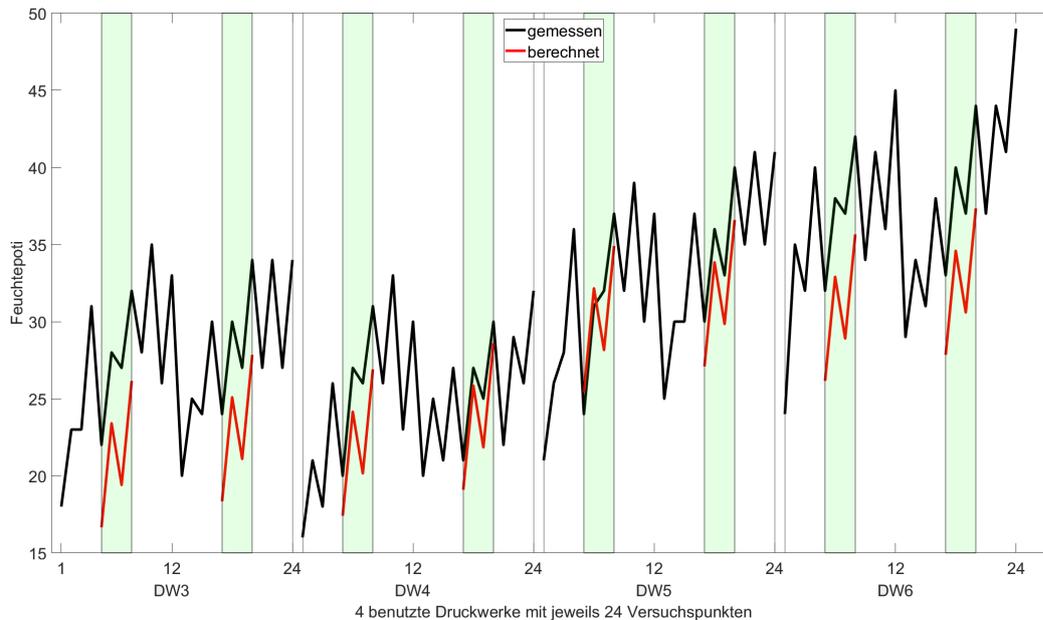


Abbildung 30: Validierung des Vorhersagemodells für den Feuchtpotwert mit Hilfe von Wiederholversuchen gemäß des Versuchsplans (weiß hinterlegt sind die Trainingsdaten, grün die Testdaten); die Ergebnisse zeigen eine deutliche Verschlechterung der Vorhersage im Vergleich zur 10-fachen Kreuzvalidierung.

### 9.3. Erkenntnisse aus den Versuchen bei DMH B und Anpassungen für die Versuche bei DMH A

Die Versuche beim DMH B haben den Ansatz des Projektes bestätigt, da die zusätzlich eingebauten Temperatur-, Feuchte- und Gassensoren eine Verbesserung der Modellbildung gegenüber den reinen Prozessparametern ermöglicht haben. Diese Erkenntnisse gilt es einerseits durch Versuche beim DMH A zu bestätigen, um die Universalität des Ansatzes zu zeigen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Wertebereiche der Feuchtpotis bei beiden Herstellern unterschiedlich sind (DMH A: 1 - 256; DMH B: 0 - 100), daher ist ein Vergleich eher anhand der relativen Fehler  $RMSE_{rel}$  möglich, der die relative Abweichung bezogen auf den Dynamikbereich der real vorkommenden Feuchtpoti-Werte angibt. Andererseits sollen Erkenntnisse der Versuche genutzt werden, um Messaufbau und Versuchsplanung zu verbessern. Zudem wurden mehrere Typen des Gassensors SGP40 eingesetzt mit unterschiedlichen Betriebsmodi: zusätzlich zum Zyklus mit 20 s Dauer wurde ein Zyklus mit 4 s Dauer genutzt, um eine höhere zeitliche Dynamik zu erzielen. Die bisherigen Versuche zeigten, dass damit eine bessere Abbildung der zeitlichen Dynamik möglich sein sollte. Ebenfalls neu war der statisch betriebene Triplesensor mit drei Sensorschichten und dedizierter Ausleseelektronik (bereitgestellt von PA-Mitglied UST), von dem komplementäre Daten und ein robusterer Betrieb im Vergleich zu den mikrostrukturierten Gassensoren erwartet wurde.

## 9.4. Vorbereitung Messkampagne I - DMH A

Die Versuche bei DMH A wurden im Wesentlichen analog zur Messkampagne bei DMH B durchgeführt. Der Versuchsplan wurde an einer Stelle entscheidend angepasst, indem nach Anfahren der Schmiergrenze (zu niedrige Einstellung des Feuchtpoti) nicht nur Versuche bei +5% Feuchtpoti (Gut-Wert), sondern auch bei +10 % (zu hohe Einstellung) durchgeführt wurden. Die Reihenfolge dieser zwei Zusatzpunkte wurde zudem quasi zufällig variiert, um ein robusteres ML-Modell erzielen zu können. Damit kann im Nachgang nicht nur eine absolute Empfehlung für das Feuchtpoti gegeben werden (Einstellung auf xx %), sondern auch eine relative Empfehlung (Feuchtpoti erhöhen bzw. reduzieren). In Abbildung 31 und Abbildung 32 ist die angepasste Messtraverse zu erkennen. Im Speziellen musste eine andersartige Befestigungsmöglichkeit in der Druckmaschine gestaltet werden, welche in Form von Befestigungslaschen aus Stahlblech erfolgte. In der Sensorbox wurden jetzt nur noch SHT35 und SPG40 (unterschiedliche Messzyklen und Temperaturen) verwendet.



Abbildung 31: Angepasste Messtraverse mit Sensoren und neuen Befestigungslaschen zur Montage in der Druckmaschine

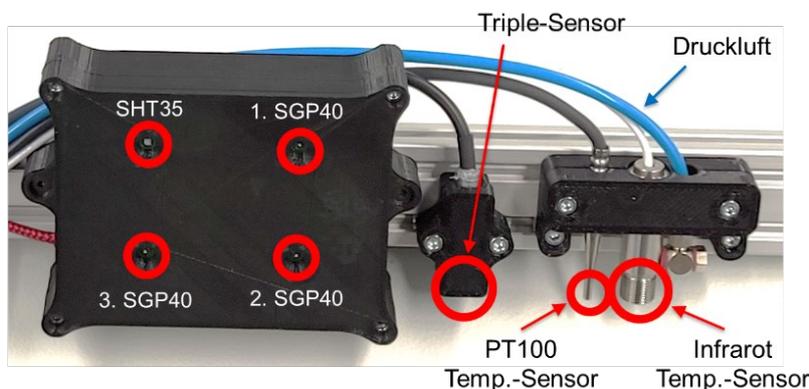


Abbildung 32: Sensorbox mit Gas- und Temperatur-/Feuchtesensoren sowie Sensorhalterungen für Triple-Sensor, Infrarottemperatursensor und PT100

Mit dem DMH A wurden insgesamt 36 Variationen untersucht, von denen 16 Wiederholungen waren. Da die Versuche beim DMH A nach den Versuchen beim DMH B stattfanden, wurden erste Erkenntnisse in einem überarbeiteten Versuchsplan umgesetzt. Es wurden Variationen mit weiteren höheren Feuchtpoti-Werten von + 10 % untersucht (ohne dass die Gefahr des „Emulgieren“ bestand). Als Abschluss der Versuchsreihe beim DMH A wurden zusätzlich ungewöhnlich hohe Feuchtpoti-Werte angesteuert, sodass ein „Emulgieren“ der Druckfarbe provoziert wurde. Die folgenden Tabellen zeigen die Versuchsplanung mit den durchgeführten Variationen, die dunkelgrünen und dunkelblauen Blöcke sind jeweils Wiederholungsversuche. Der Versuchsplan ist in Abbildung 33 abgebildet.

Versuchszeitraum	Startzeit Suchen Schmiergrenze	Startzeit Variation	Uhrzeit Bogen gezogen	Reihenfolge Druckfarbe	Druckform	Druckgeschw. Bogen/h	VersNo	Teilversuch	Kennung	Instruktionen
26.10. Mi Vormittag	09:49:30	10:02:14	10:06:42	X	PCM press	12.000	1	A	VX1A	Anfahren Schmiergrenze, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		10:06:42	10:11:35	X	PCM press	12.000	1	B	VX1B	+5% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		10:11:35	10:16:15	X	PCM press	12.000	1	C	VX1C	+10% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
	10:20:00	10:46:24	10:49:55	X	PCM press	16.000	2	A	VX2A	Anfahren Schmiergrenze, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		10:49:55	10:54:03	X	PCM press	16.000	2	C	VX2C	+5% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		10:54:03	10:57:53	X	PCM press	16.000	2	B	VX2B	+10% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
	11:09:50	11:12:00	11:16:26	X	PCM press	12.000	3	A	VX3A	Anfahren Schmiergrenze, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		11:16:26	11:21:15	X	PCM press	12.000	3	B	VX3B	+5% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		11:21:15	11:30:26	X	PCM press	12.000	3	C	VX3C	+10% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
	11:35:00	11:36:59	11:40:30	X	PCM press	16.000	4	A	VX4A	Anfahren Schmiergrenze, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		11:40:30	11:44:20	X	PCM press	16.000	4	C	VX4C	+5% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		11:44:20	11:48:05	X	PCM press	16.000	4	B	VX4B	+10% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen

Versuchszeitraum	Startzeit Suchen Schmiergrenze	Startzeit Variation	Uhrzeit Bogen gezogen	Reihenfolge Druckfarbe	Druckform	Druckgeschw. Bogen/h	VersNo	Teilversuch	Kennung	Instruktionen
26.10. Mi Mittag	12:05:00	12:08:20	12:12:55	X	PCM balance	12.000	11	A	VX11A	Anfahren Schmiergrenze, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		12:12:55	12:17:44	X	PCM balance	12.000	11	B	VX11B	+5% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		12:17:44	12:22:30	X	PCM balance	12.000	11	C	VX11C	+10% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
	13:01:00	13:03:05	13:06:39	X	PCM balance	16.000	12	A	VX12A	Anfahren Schmiergrenze, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		13:06:39	13:10:27	X	PCM balance	16.000	12	B	VX12B	+5% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		13:10:27	13:14:12	X	PCM balance	16.000	12	C	VX12C	+10% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
	13:20:40	13:21:54	13:26:26	X	PCM balance	12.000	13	A	VX13A	Anfahren Schmiergrenze, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		13:26:26	13:31:14	X	PCM balance	12.000	13	C	VX13C	+5% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		13:31:14	13:35:58	X	PCM balance	12.000	13	B	VX13B	+10% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
	13:39:30	13:40:39	13:44:10	X	PCM balance	16.000	14	A	VX14A	Anfahren Schmiergrenze, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		13:44:10	13:54:05	X	PCM balance	16.000	14	C	VX14C	+5% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		13:54:05	13:57:55	X	PCM balance	16.000	14	B	VX14B	+10% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen

Versuchszeitraum	Startzeit Suchen Schmiergrenze	Startzeit Variation	Uhrzeit Bogen gezogen	Reihenfolge Druckfarbe	Druckform	Druckgeschw. Bogen/h	VersNo	Teilversuch	Kennung	Instruktionen
26.10. Mi Nachmittag	14:15:50	14:18:10	14:22:41	Y	PCM balance	12.000	1	A	VY1A	Anfahren Schmiergrenze, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		14:22:41	14:27:24	Y	PCM balance	12.000	1	B	VY1B	+5% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		14:27:24	14:35:40	Y	PCM balance	12.000	1	C	VY1C	+10% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
	14:37:30	14:39:05	14:43:37	Y	PCM balance	12.000	2	A	VY2A	Anfahren Schmiergrenze, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		14:43:37	14:48:28	Y	PCM balance	12.000	2	C	VY2C	+5% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		14:48:28	14:53:18	Y	PCM balance	12.000	2	B	VY2B	+10% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
	14:57:40	14:59:00	15:02:18	Y	PCM balance	16.000	3	A	VY3A	Anfahren Schmiergrenze, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		15:02:18	15:09:09	Y	PCM balance	16.000	3	B	VY3B	+5% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		15:09:09	15:12:54	Y	PCM balance	16.000	3	C	VY3C	+10% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
	15:16:00	16:08:30	16:13:22	Y	PCM balance	16.000	4	A	VY4A	Anfahren Schmiergrenze, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		16:13:22	16:17:09	Y	PCM balance	16.000	4	C	VY4C	+5% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen
		16:17:09	16:20:56	Y	PCM balance	16.000	4	B	VY4B	+10% Feuchte, Färbung einregeln, 4,5 Min. drucken, 3 Bogen ziehen

Abbildung 33: Versuchsplan der Messkampagne I beim DMH A

### 9.5. Auswertung und Modellbildung - DMH A

Analog zu den Untersuchungen zuvor wurde für einzelne Sensoren und Merkmale die Korrelation zur Zielgröße Feuchtpoti untersucht, siehe Abbildung 34. Man erkennt, dass bei DMH A die Korrelation der gemessenen absoluten Luftfeuchte deutlich niedrigere Korrelationen als bei DMH B zeigt und die relative Luftfeuchte praktisch gar keine Korrelation aufweist. Dies ist vermutlich auf eine interne Regelung in der Druckmaschine zurückzuführen.

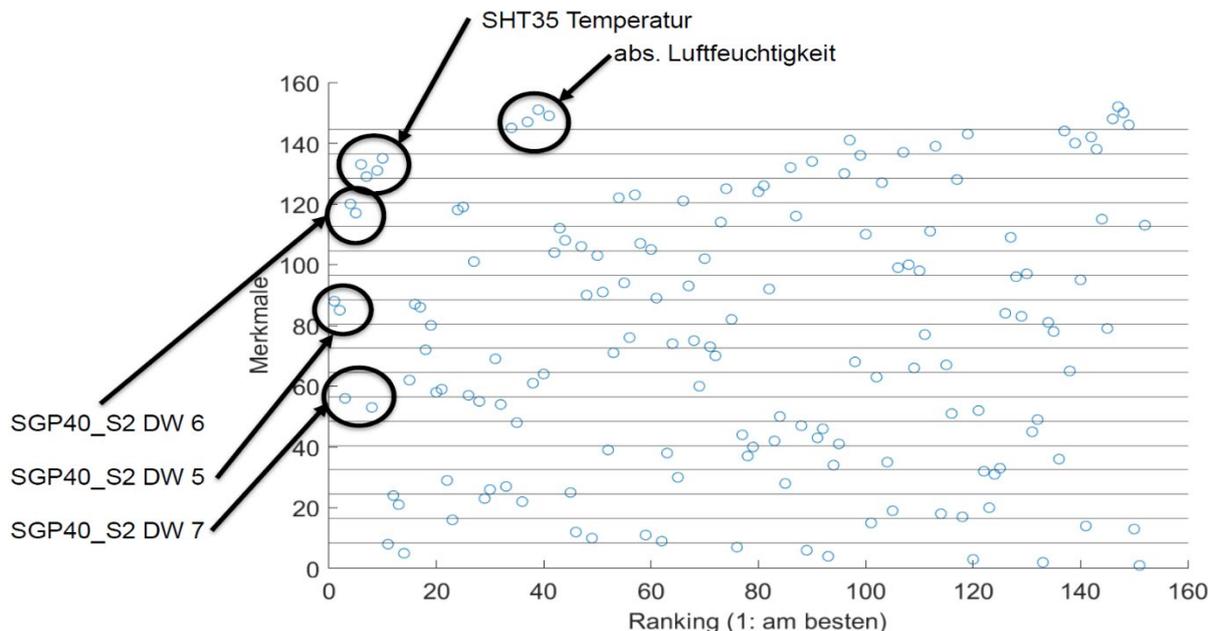


Abbildung 34: Korrelation der einzelnen Merkmale der zusätzlichen Sensorik zum Feuchtpotiwert. Man erkennt, dass bei DMH A die absolute Luftfeuchte eine deutlich geringere Korrelation zeigt als bei DMH B

Es wurden wieder diverse Modelle mit der ML-Toolbox generiert, wobei als Zielgröße wieder die möglichst genaue Reproduktion des eingestellten Feuchtpoti-Wertes gewählt wurde. Dazu wird der ML-Toolbox ein Datensatz bestehend aus den Sensordaten, den Maschinendaten (Prozessparameter) und der Zielgröße – dem Feuchtpoti-Wert – übergeben (Trainingsdaten). Es wurde wieder eine 10-fach randomisierte Kreuzvalidierung durchgeführt, um das Modell zu validieren und ein Overfitting auszuschließen, da die Anzahl der Datenpunkte je Versuchspunkt ähnlich groß ist wie die Anzahl der Beobachtungen. In Abbildung 35 ist die Vorhersage (automatische Empfehlung) in rot im Vergleich zu den eingestellten Feuchtpoti-Werten in blau für das Modell auf Basis der vollständigen Daten dargestellt.

Wie bei DMH B konnte anhand der aufgenommenen Daten gezeigt werden, dass für die Bildung eines Modells bereits Gas-, Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren allein ausreichen. Hier wurde verglichen, ob der verkürzte Zyklus mit 4 s Zeitkonstante eine Verbesserung gegenüber dem bisherigen Zyklus mit 20 s Zeitkonstante liefert (siehe Abbildung 35 a und b). Es zeigt sich eine geringfügige Verbesserung der Vorhersage ( $RMSE_{rel} = 6,5\%$  für den 4 s Zyklus gegenüber  $RMSE_{rel} = 8,5\%$  für den 20 s Zyklus), allerdings ist während der eigentlich konstanten Versuchspunkte ein systematischer Anstieg bzw. Abfall (Drift) des Vorhersagewertes zu erkennen, der eher darauf deutet, dass die durch den kürzeren Zyklus größere Zahl von Beobachtungen zu einem besseren Ergebnis führt.

Wie bei DMH B lassen sich auch ausschließlich mit den von der Maschine aufgezeichneten Daten bereits aussagekräftige Modelle generieren, siehe Abbildung 35 c, mit einem  $RMSE_{rel} = 7,4\%$ . Die Kombination beider Datensätze liefert wiederum die besten Ergebnisse zur Vorhersage des Feuchtpoti-Wertes, auch bei Verwendung des 20 s Zyklus für die Gassensoren mit einem  $RMSE_{rel} = 3,6\%$ . Dieser Wert ist nochmal etwas besser als das bei DMH B erzielte Ergebnis ( $RMSE_{rel} = 4,4\%$ ), allerdings sind diese Werte wegen des unterschiedlichen Wertebereichs der Feuchtpotis sowie der unterschiedlichen Versuchspläne nur eingeschränkt vergleichbar.

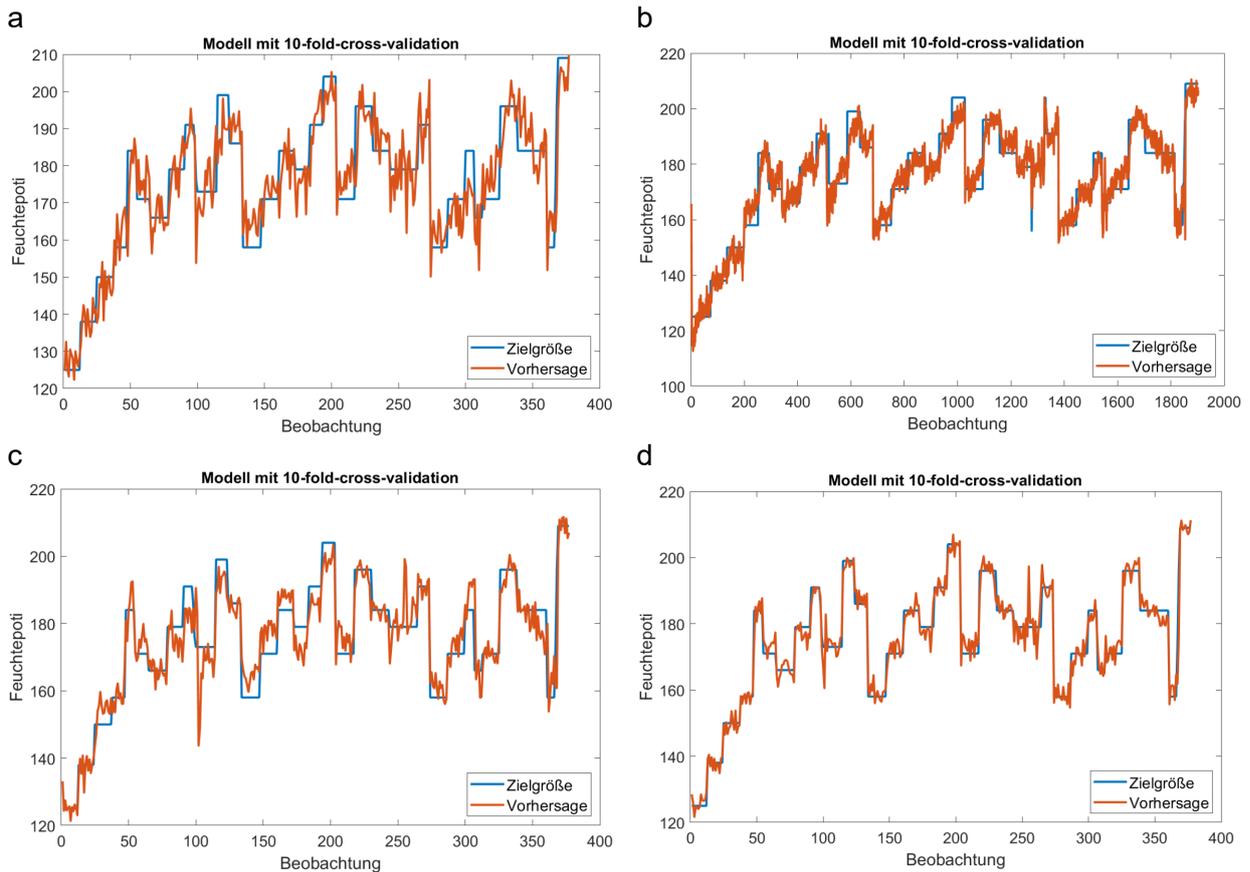


Abbildung 35: Trainingsdaten und angewendetes ML-Modell zur automatischen Empfehlung der Einstellung des Feuchtepotis: a) nur Feuchte- und Gassensordaten mit 20 s Zyklus; b) nur Feuchte- und Gassensordaten 4 s Zyklus; c) Prozessparameter und Feuchtesensor, alle 20 s; d) alle Sensordaten und Prozessparameter mit 20 s Zyklus.

Die nachfolgende Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse der Modelle quantitativ im Überblick.

Modell basierend auf	Feuchte- und Gassensor 20 s Zyklus	Feuchte- und Gassensor 4 s Zyklus	Prozessparameter	Alle Sensoren + Prozessparameter
RMSE	7,0	5,4	6,2	3,0
RMSE <sub>rel</sub>	8,5 %	6,5 %	7,4 %	3,6 %

Abbildung 36: Übersicht der Fehler (RMSE: root mean squared error, mittlerer quadratischer Fehler) der einzelnen ML-Modelle in Einheiten des Feuchtepoti-Stellwertes bzw. relativ, bezogen auf den Dynamikbereich des Feuchtepotis in den Untersuchungen.

Auch die Betrachtung der Temperatursensoren über die Versuchsdauer, siehe Abbildung 37, liefert noch zusätzliche Erkenntnisse. Auffällig ist zum einen, dass die außen gemessenen Temperaturen deutlich höhere Werte haben als in den Druckwerken, aber auch, dass diese sich langsamer ändern und dabei deutlich stärker korrelieren. In den Druckwerken ergeben sich einerseits deutlich schnellere Änderungen, aber teils auch sehr unterschiedliche Temperaturverläufe zwischen den Druckwerken, siehe Markierungen in Abbildung 37a. Ein testweise in einem Druckwerk eingesetzte IR-Strahlungssensor (ausgerichtet auf die Verreiberwalze), brachte keine Erkenntnisse, da hiermit lediglich der Betriebszustand erfasst werden konnte.

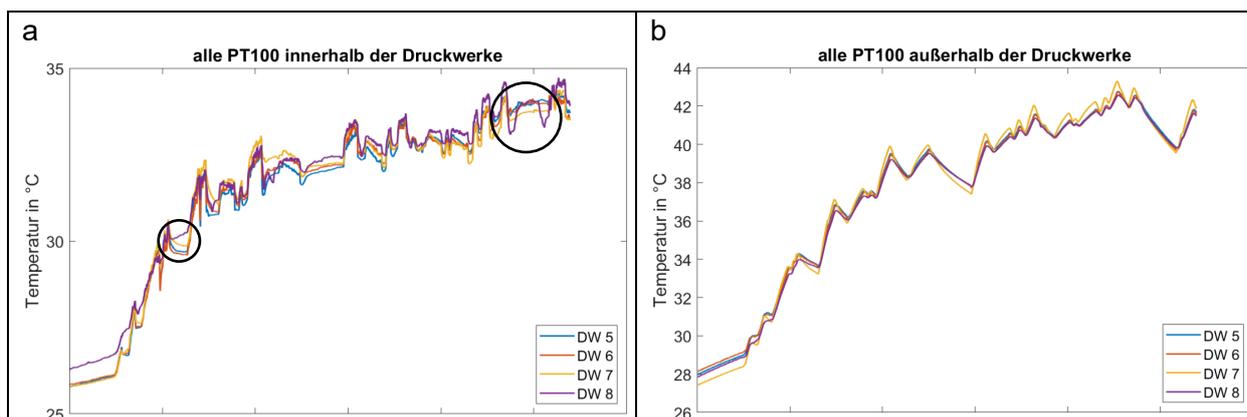


Abbildung 37: Vergleich der Temperaturverläufe in den vier Druckwerken und außen bei DMH A. Die Versuche umfassten insgesamt 7,5 h. An der Steigung der Temperaturen außerhalb der Druckwerke ist über den Tag relativ gut zu erkennen, wann gedruckt wurde (positive Steigung) und wann die Druckmaschine stillstand.

## 10. Vergleich und Fazit der Ergebnisse aus Messkampagne I

Die Versuche der Messkampagne I bei beiden DMH haben den Ansatz des Projektes bestätigt: die zusätzlich eingebauten Temperatur-, Feuchte- und speziell Gassensoren ermöglichen eine Verbesserung der Modellbildung gegenüber den reinen Prozessparametern mit der Zielgröße Feuchtpotiwert. Auch wenn die Ergebnisse nicht quantitativ direkt vergleichbar sind, so sind die erzielten  $RMSE_{rel}$ -Werte von rund 4 % doch vielversprechend, weil sie zeigen, dass die von erfahrendem Druckpersonal eingestellten Werte anhand der Prozessparameter und Sensorwerte so genau reproduziert werden können, dass ein stabiler Betrieb der Druckmaschine möglich sein sollte. Es muss aber nochmals darauf hingewiesen werden, dass die bisher erstellten Modelle nicht dem eigentlichen Projektziel entsprechen, denn im realen Betrieb soll das Modell den Feuchtpotiwert liefern, um einen Druckprozess mit hoher Qualität und verringerter Makulatur zu gewährleisten. Zudem umfassten die durchgeführten Versuche nur relativ wenige Beobachtungen, bedingt durch die mit den Versuchen verbundenen hohen Kosten. Somit war klar, dass eine weitergehende Erprobung in einem Feldversuch direkt in einer Druckerei (Messkampagne II) erforderlich ist, um das anvisierte Projektergebnis zu erreichen.

DMH B	DMH A
<b>Feuchtpoti</b> Schmiergrenze / +5%	<b>Feuchtpoti</b> Schmiergrenze / +5% / +10%
<b>Färbung:</b> +15% / -15%	-
<b>4 Druckfarben</b> (Hersteller A und B mit jeweils Black und Magenta)	<b>4 Druckfarben</b> (Hersteller A und B mit jeweils Black und Magenta)
Druck in Trennung, <b>Vario ausgeschaltet</b>	Druck in Trennung, <b>Delta eingeschaltet</b>
-	<b>2 Reihenfolgen</b> der Druckfarben in den Druckwerken
<b>2 Testdruckformen</b> hohe und niedrige Flächendeckung	<b>2 Testdruckformen</b> hohe und niedrige Flächendeckung
<b>2 Druckgeschwindigkeiten</b> 12.000 und 16.000 Bogen pro Stunde	<b>2 Druckgeschwindigkeiten</b> 12.000 und 16.000 Bogen pro Stunde

## **11. Messkampagne II - Druckerei**

In Messkampagne I konnte gezeigt werden, dass ein sicherer Betrieb der Druckmaschinen mit der neu entwickelten Messtraverse möglich ist. In Messkampagne II wurde somit das entwickelte Konzept auf Druckmaschinen im realen Betrieb in Druckereien ausgerollt. Feldversuche zur Validierung der bisher umgesetzten ML-Modelle, der eingesetzten Messsysteme und des sich in Entwicklung befindlichen Demonstrators waren für das 2. Quartal 2023 geplant. Die Messkampagne II soll produktionsbegleitend zunächst bei einer Druckerei über einen Versuchszeitraum von zwei Wochen im Zwei-Schicht-Betrieb stattfinden. Die Messungen sollten also einen realen Betrieb einer Druckerei im Mehrschichtbetrieb abbilden. In diesem Zuge sollen auch Temperatur-Zeit-Konstanten ermittelt werden, welche in einem Druckerei-Betrieb auftreten und das Farb-Wasser-Gleichgewicht beeinflussen können. Im Verlauf des Projektes sollten noch weitere Druckereien angesprochen werden, bei denen die Messkampagne II ebenfalls durchgeführt werden kann. Aufgrund der Nachwirkungen der Corona-Pandemie kam es zu erheblichen Zeitverzögerungen, so dass innerhalb der der Projektlaufzeit nur Messungen bei einer Druckerei möglich waren. Die Durchführung der Messkampagne II bei der Druckerei fand vom 13.05.23 bis 27.05.23 statt.

### **11.1. Vorbereitung Messkampagne II**

Aus synergetischer Sicht war die ausgewählte Druckerei eine gute Wahl, da derselbe Maschinentyp wie bei der Messkampagne I beim DMH B vorlag. Somit konnte die bereits entwickelte Messtraverse aus Messkampagne I ohne weitere Anpassungen verwendet werden. Die Druckversuche erforderten im Vorfeld einen erheblichen Aufwand für vertragliche und versicherungstechnische Regelungen hinsichtlich eines möglichen Schadensfalls.

Zur Vorbereitung der Messkampagne II wurde mit dem Geschäftsführer der Druckerei am 03.03.23 eine Vorortbesichtigung der Räumlichkeiten der Druckerei und der Druckmaschinen durchgeführt. An der ausgewählten Druckmaschine wurde die Befestigungsmöglichkeit der Messtraverse identifiziert, welche kompatibel mit der zuvor mit dem DMH B entwickelten Aufnahme der Messtraverse ist. Zudem wurde eine Vorbesprechung der versuchstechnischen Begleitung der Produktion durchgeführt. Hierzu wurde ein möglicher Aufbauort der Messtechnik und die Verlegung der Datenkabel besprochen. Der Aufbau der Messtechnik fand am 13.05.23 und 14.05.23 statt. Die versuchstechnische Begleitung belief sich auf den Zeitraum vom 15.05.23 bis zum 26.05.23. Der Abbau der Messtechnik und die Rückführung der Versuchsmaschine in den Ausgangszustand wurden am 27.05.23 durchgeführt. Nach Rücksprache mit dem DMH B und dem Geschäftsführer der Druckerei war eine Integration unserer Messtechnik in die Software der Druckmaschine, beispielsweise über eine kabelgebundene Verbindung, nicht möglich, weshalb die im Nachhinein zur Verfügung gestellten Daten der Druckmaschine in Form eines Logbuches wieder manuell synchronisiert und zugeordnet werden mussten. Aus rechtlichen Gründen konnten auch keine Testbogen bei der versuchsbegleitenden Produktion gezogen und archiviert werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Druckerei sich in einer Gutproduktion befindet, da verkaufbare Druckprodukte hergestellt wurden, welche sich innerhalb der Grenzen des Prozessstandard Offsetdruck befinden.

In Abbildung 38 ist die Messtraverse mit Sensorbox, Sensorhalterungen und den entsprechenden Sensoren dargestellt. Als Sensoren kamen drei Gassensoren SGP40 von Sensirion zum Einsatz, die unterschiedliche Messzyklen aufwiesen (20 Sekunden, 4 Sekunden und statisch), ein Kombi-Sensor SHT35 von Sensirion (Temperatur und Luftfeuchte), der Triple-Sensor (statisch arbeitender Gassensor) von UST Umweltsensortechnik, ein PT100 Temperatursensor und ein Infrarot Temperatursensor CSmicro von optris mit Sicht auf die Verreiberwalze, welche oberhalb

der vierten Farbauftragswalze sitzt (vgl. Abbildung 20). Zusätzlich wurde in jedem Druckwerk auch ein PT100 bedienerseitig an den Seitenwänden verortet. Ein weiteren SHT35 wurde in der Nähe des Messstandes installiert, um das Klima der Halle zu dokumentieren.

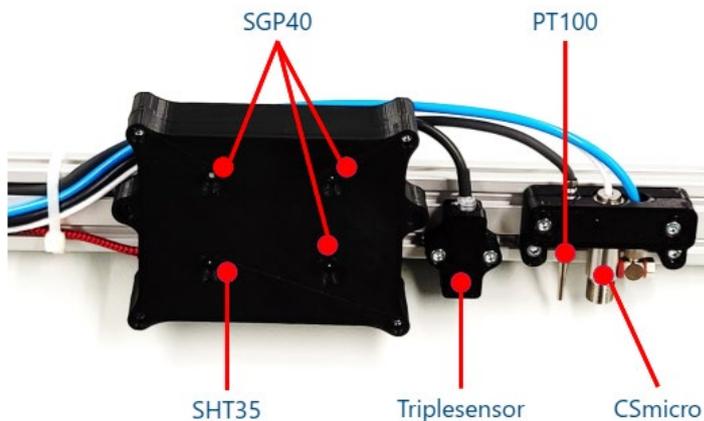


Abbildung 38: Ausschnitt der Messtraverse mit Sensorbox, Sensorhalterungen und entsprechenden Sensoren

In der folgenden Abbildung 39 ist die in der Druckmaschine eingebaute Messtraverse abgebildet. Die Kabel der Sensoren wurden eng entlang der Messtraverse verlegt und mit Kabelbinder befestigt. Der Tausch von Druckplatten ist weiterhin ohne Einschränkungen möglich und die Messtraverse stört die laufende Produktion im Allgemeinen nicht. Dennoch führte der Einbau der Messtraverse zu einer intensiven Diskussion mit der Geschäftsführung der Druckerei, bei der auch haftungs- und versicherungstechnische Aspekte geklärt werden mussten. Denn fällt ein Teil der Messtraverse in die Druckmaschine, können schnell Schäden in der Größenordnung von 100.000 Euro und mehr entstehen. Diese Punkte konnten im Vorfeld zur Zufriedenheit der Druckerei geklärt werden. Es sei auch angemerkt, dass es bei der Produktionsbegleitung weder zu einem Schaden noch zu einer Behinderung des Druckbetriebs kam.



Abbildung 39: In der Druckmaschine eingebaute Messtraverse mit Sensorbox, Sensorhalterungen und entsprechenden Sensoren (vor der versuchsbegleitenden Produktion)

Abbildung 40 zeigt eine der vier Messtraversen der versuchsbegleitenden Produktion. Es ist zu erkennen, dass sich auf der Messtraverse Farbreste abgesetzt haben, die jedoch nach Sichtung der Sensordaten keine offensichtliche Auswirkung oder einen Ausfall der Sensoren innerhalb der zweiwöchigen Messkampagne II hatten. Dies bestätigt auch die Annahme, dass Metalloxid-

Gassensoren robust genug für den längeren Einsatz in einer Druckmaschine sind, auch wenn im Rahmen einer zweiwöchigen Kampagne natürlich nicht abschließend untersucht werden kann.

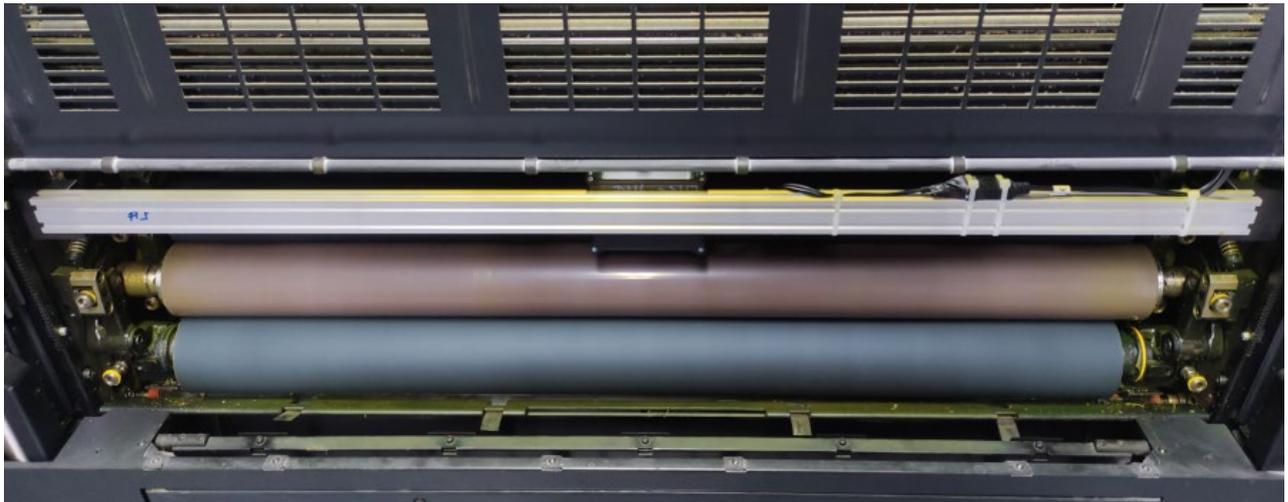


Abbildung 40: In der Druckmaschine eingebaute Messtraverse mit Sensorbox, Sensorhalterungen und entsprechenden Sensoren (nach der versuchsbegleitenden Produktion mit Farbresten)

Die Kabelführung wurde unter der Maschinenabdeckung der einzelnen Druckwerke auf der Bedienerseite vorgenommen und ebenso mit Kabelbindern befestigt. Dies wird in Abbildung 41 ersichtlich. Zusätzlich wurde - wie bereits erwähnt - ein weiterer PT100 Temperatursensor an der Seitenwand der Druckmaschine installiert. Dies ist durch die kreisförmige Vergrößerung dargestellt. Als Kabeldurchführung wurde eine ohnehin schon verwendete Durchgangsbohrung in der Seitenwand genutzt. Am linken Rand des Gehäuses werden die Kabel unter die Maschine geführt, sodass diese hinter den Abdeckungen der Maschine weiter zum Messstand geführt werden können. Auf den Podesten/Tritten wurden keine Kabel verlegt. Damit war ein barrierefreier Zugang zu den einzelnen Druckwerken möglich.

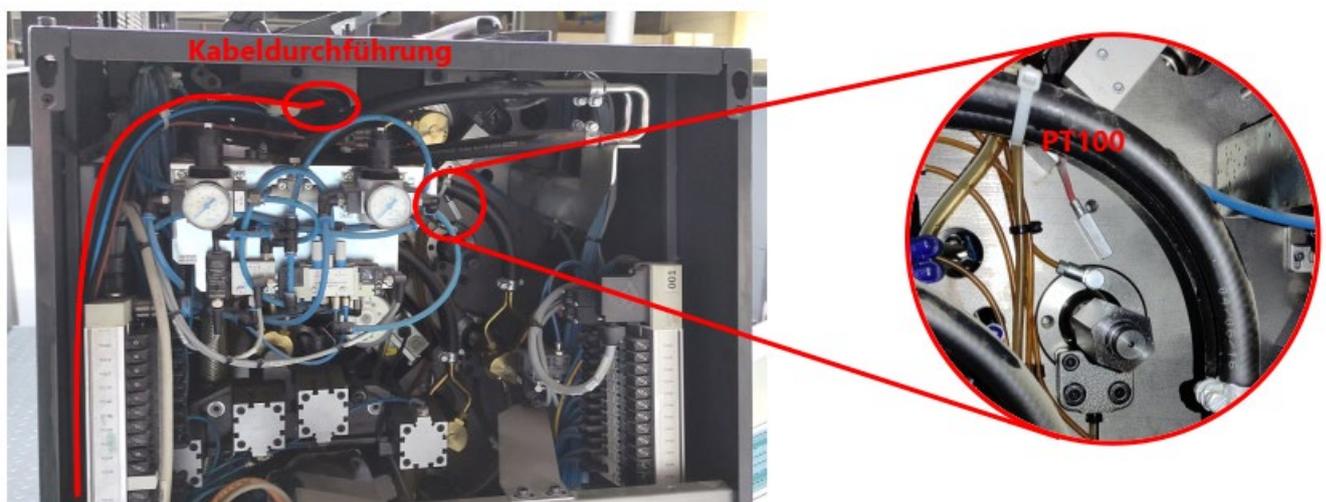


Abbildung 41: Kabelführung innerhalb der Druckmaschine zur Messtraverse und Verortung des PT100

Abbildung 42 zeigt abschließend den Aufbau des Messstandes, welcher sich unmittelbar neben der Druckmaschine befindet. Die Messgeräte fanden temporär auch gestapelten Paletten Platz und die Verlegung der Kabel vom Messstand zur Abdeckung der Druckmaschine wurde großzügig mit Gewebeklebeband am Boden fixiert.



Abbildung 42: Aufbau des Messstandes und Verlegung der Kabel zur Abdeckung der Druckmaschine

Einen Tag nach Beendigung der Messkampagne II wurde alle Messtraversen und Messaufbauten wieder abgebaut. Dies fand an einem produktionsfreien Tag statt.

## 11.2. Auswertung und Modellbildung

Insgesamt konnten 229 durchgeführte Druckaufträge mit unterschiedlichen Dauern zur Produktion der Aufträge beobachtet werden. Aus der ersten Sichtung der Logbücher wurde ersichtlich, dass die einzelnen Feuchtpotis vor Beginn eines Druckauftrages eingestellt wurden. Während der gesamten zweiwöchigen Begleitung der Produktion gab es nur 15 Nachstellung der Feuchtpotis bei laufender Produktion.

Im Nachgang der versuchstechnischen Begleitung wurden die maschinenbezogenen Parameter und Einstellung der Druckmaschine für den Zeitraum der Messkampagne II seitens des DMH B in Form eines Logbuches zur Verfügung gestellt und ebenso anhand der integrierten Zeitstempel unseren tabellarischen Messdaten zugeordnet und gefiltert. Die Filterung der Daten beinhaltete das Entfernen von Zeiträumen zu denen nicht gedruckt wurde bzw. die Druckmaschine stillstand. Zudem wurde in die vier einzelnen Druckwerke differenziert, sodass diese auch einzeln betrachtet werden konnten.

Zunächst wurde eine Übersichtsgrafik mit dem Stellwert des Feuchtpotis über die gesamte Zeit der versuchsbegleitenden Produktion für die vier Druckwerke erstellt, welche in Abbildung 43 dargestellt ist. Mit roten Balken sind die Tage gekennzeichnet an denen keine Produktion stattfand. Zum einen waren das der Feiertag Christi Himmelfahrt und zum anderen das darauffolgende Wochenende. Prinzipiell ist zu erkennen, dass sowohl nach dem Feiertag als auch nach dem Wochenende die Stellwerte aller Feuchtpotis einen niedrigeren Wert haben als in den anderen Zeiträumen. Anhand der Messdaten der Temperatursensoren kann gezeigt werden, dass sich die Druckmaschine in der produktionsfreien Zeit weitestgehend abgekühlt hatte und zur Bewahrung des Farb-Wasser-Gleichgewicht angepasst werden musste. In der Grafik ist zusätzlich ein grauer Balken hinterlegt, welcher einen interessanten Bereich aufzeigt: Der Stellwert des Feuchtpotis von Druckwerk 3 wird hier stufenweise von einem Wert von 25 % auf 41 % innerhalb weniger Stunden eingestellt. In Abbildung 44 wird dies im Detail erklärt. Im Allgemeinen bewegen sich die Stellwerte der Feuchtpotis der einzelnen Druckwerke bei einer stabilen Produktion in einem Wertebereich von 33 % +/- 3 %.

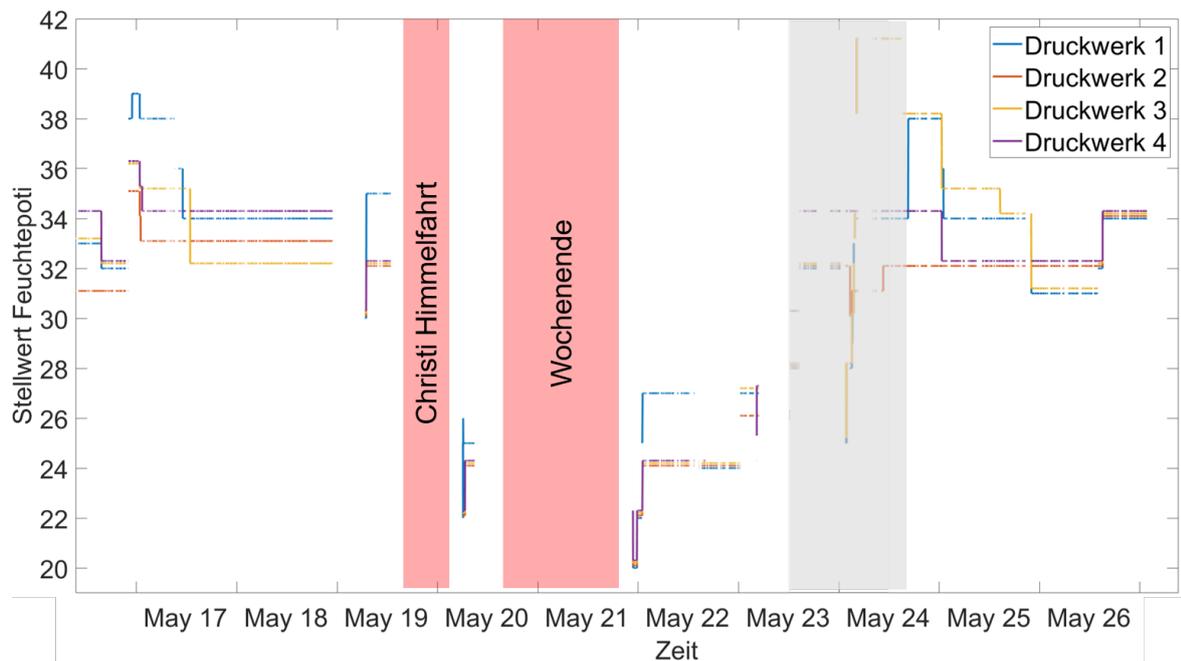


Abbildung 43: Stellwert des Feuchtpotis über die gesamte Zeit der versuchsbegleitenden Produktion für die vier Druckwerke.

Abbildung 44 zeigt die verwendeten Druckfarben im Druckwerk 3 über den gesamten Zeitraum der versuchsbegleitenden Produktion. Überwiegend wurde mit der Skalenfarbe Magenta gedruckt und zwischendurch gab es einen Wechsel auf die Skalenfarbe Yellow. Am 24. Mai wurde auf eine Sonderfarbe, Pantone Red 032 C, gewechselt, was mit einer höheren benötigten Feuchtmittelmenge einherging, um das Farb-Wasser-Gleichgewicht aufrecht zu erhalten.

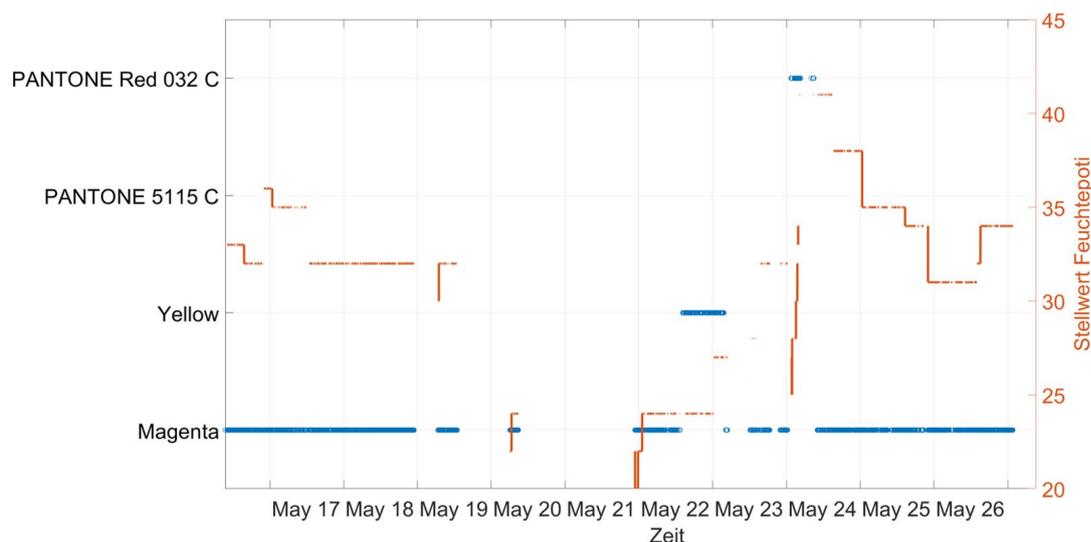


Abbildung 44: Eingesetzte Druckfarben über gesamte Dauer der versuchsbegleitenden Produktion in Druckwerk 3

In Abbildung 45 sind ausgewählte Sensordaten (Temperatur – schwarz; absolute Luftfeuchtigkeit – pink, beide vom SHT35 Sensor) und der eingestellte Wert des Feuchtpotis dargestellt. Zu beachten ist, dass für die Darstellung der absoluten Luftfeuchtigkeit und des Feuchtpotiwertes die rechte Skala verwendet wird, da diese beiden Größen in derselben Größenordnung lagen. Tendenziell kann erkannt werden, dass sich die Temperatur und die absolute Luftfeuchtigkeit im Verlauf sehr ähnlich sind. Ein direkter Bezug zum eingestellten Feuchtpotiwert ist jedoch nicht ersichtlich.

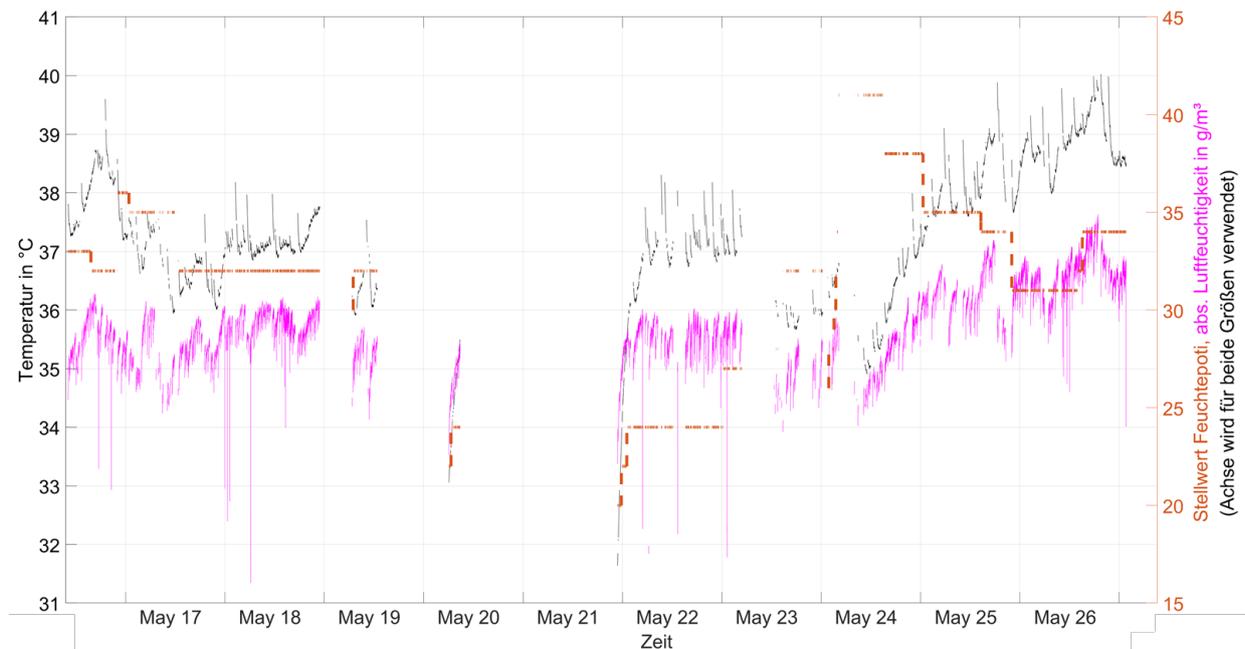


Abbildung 45: Temperatur, absolute Luftfeuchtigkeit und eingestellter Feuchtpotiwert über die gesamte versuchsbegleitende Produktion

In den zwei Wochen der versuchsbegleitenden Produktion haben insgesamt 5 DruckerInnen die Maschine bedient, ein Drucker wurde in beiden Wochen eingesetzt (KW 20 in der Frühschicht und KW 21 in der Nachtschicht), siehe Abbildung 46. Dieser eine Drucker hat auch die Einstellung des Feuchtpotis beim Farbwechsel auf Pantone durchgeführt.

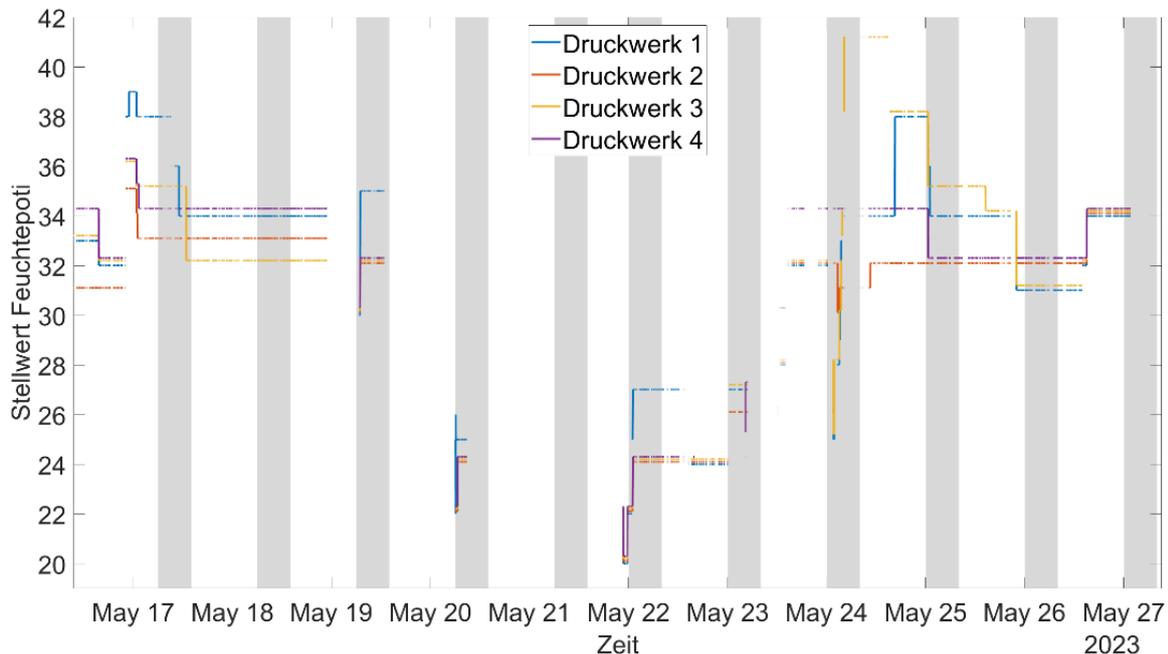


Abbildung 46: Temperatur, absolute Luftfeuchtigkeit und eingestellter Feuchtpotiwert über die gesamte versuchsbegleitende Produktion

Noch deutlicher wird die minimale Korrelation der absoluten Luftfeuchte und die etwas höhere Korrelation zur Temperatur, die sich bereits in den vorherigen Messkampagnen als wesentliche Einflussfaktoren herauskristallisiert haben, wenn man die gemessenen Werte der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur über die Stellwerte des Feuchtpotis plottet, siehe Abbildung 47. Hierbei wurde nach mindestens einer Minute Anlaufzeit je Druckauftrag alle 20 s ein Wert gemessen und

dargestellt. In Rot sind die Werte zum Ende der Druckauftrags dargestellt, um ein mögliches Einlaufen in einen stabilen Zustand identifizieren zu können. Es bleibt jedoch ein sehr diffuses Bild, was auch die geringen absoluten Korrelationswerte wiedergeben.

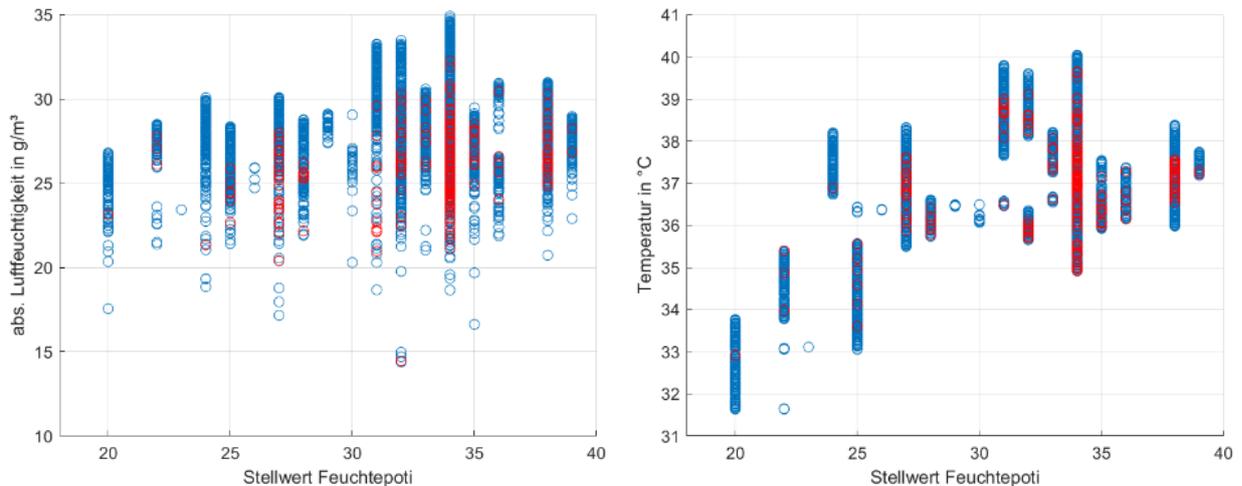


Abbildung 47: Abs. Luftfeuchtigkeit (links) und Temperatur (rechts) über Feuchtpoti-Einstellung

Deutlicher wird das Verhalten, wenn man sich für den am häufigsten eingestellten Feuchtpotiwert von 34 die Histogramme der Daten ansieht, siehe Abbildung 48. Man erkennt, dass die Messwerte für die absolute Feuchtigkeit einer Normalverteilung mit Mittelwert  $29 \text{ g/m}^3$  ähneln, sich aber zum Ende der Druckjobs eine deutliche Verschiebung zeigt mit einem Mittelwert von etwa  $26 \text{ g/m}^3$ . Noch deutlicher ist dieser Effekt für die relative Luftfeuchte, die im Mittel bei  $67,5\%$  liegt, für die Endwerte der Druckjobs jedoch eine sehr schiefe Verteilung verteilt bis hinab zu  $47,5\%$ . Bei der Temperatur ist dieser Drifteffekt über die Druckjobs weniger ausgeprägt, beide Verteilungen sind recht ähnlich, wobei auch hier eine größere Zahl deutlich niedrigerer Werte – abweichend von einer Normalverteilung – zum Ende auffallen.

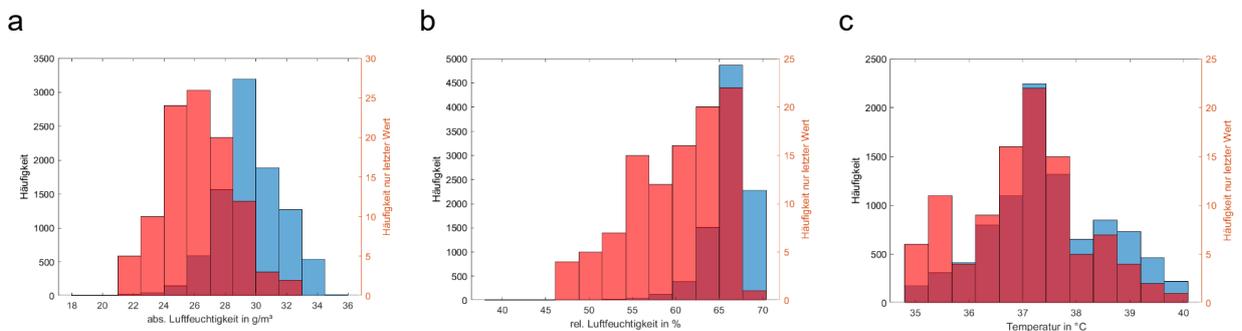


Abbildung 48: Histogramme bei Einstellung des Feuchtpotis auf 34 für a) abs. Luftfeuchtigkeit, b) relative Luftfeuchtigkeit und c) Temperatur. Die roten Balken zeigen die Daten am Ende der Druckjobs

Dass keine starke Korrelation zwischen Temperatur und absoluter Luftfeuchte vorliegt, zeigt auch Abbildung 49. Hier sind dieselben Daten wie in Abbildung 47 gezeigt, aber gegeneinander aufgetragen statt über dem Feuchtpotiwert. Abbildung a zeigt alle Daten, die Punktfarbe zeigt dabei den Feuchtpotiwert an. Für die dunkelblauen Punkte, also niedrige Stellwerte des Feuchtpotis, ist ein Einlaufeffekt zu erkennen, vermutlich bedingt durch das Aufwärmen der Maschine nach einer längeren Ausschaltphase, da dann niedrige Stellwerte genutzt werden. Abbildung 49 b zeigt wieder für den häufigsten Stellwert 34, dass zwar eine nennenswerte Korrelation vorliegt, aber dieser noch starke Schwankungen überlagert sind. Es ist ohne tieferen Einblick in die Regelungssysteme der Druckmaschine kaum möglich, dieses Verhalten genauer aufzuklären.

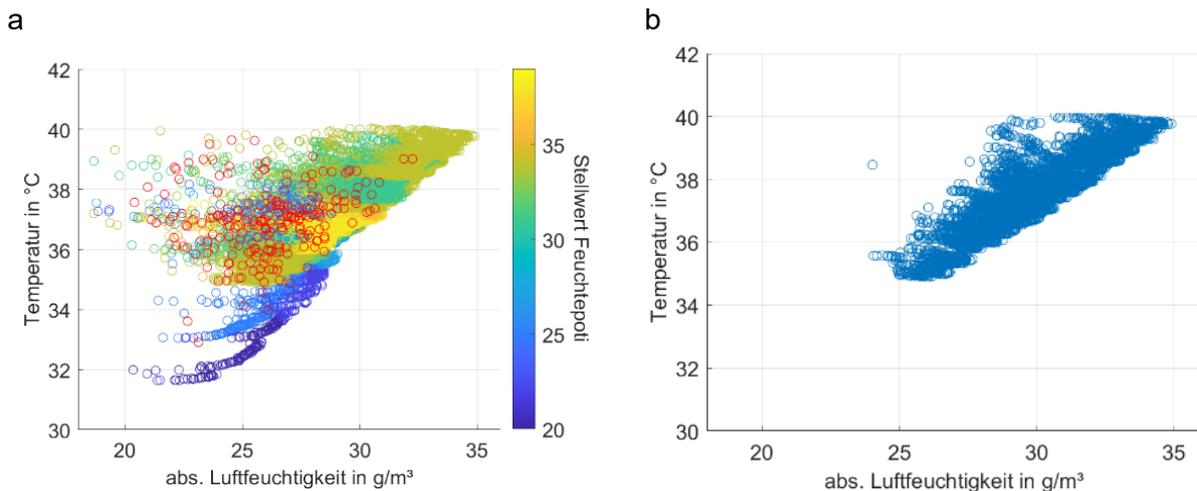


Abbildung 49: Temperatur über abs. Luftfeuchtigkeit über alle Werte (links) und für Feuchtpoti-Stellwert 34 (rechts)

In Abbildung 50 sind die Pearson-Korrelationskoeffizienten der wichtigsten Sensorwerte gegenüber dem Feuchtpotiwert dargestellt. Die höchsten Werte liegen bei nur 0,44, wobei dies jeweils Merkmale von Gassensoren für Druckwerk 1 sind, nämlich vom UST Triple-Sensor Schicht 2 und Schicht 3 (nur in Druckwerk 1 eingesetzt) sowie das maximal korrelierte Merkmal der Schicht 3 des SGP40. Dessen Merkmale sind für Druckwerk 3 deutlich schlechter korreliert (maximal 0,33), aber dennoch höher als die Korrelation zur Temperatur (0,23) und zur absoluten Feuchte (0,15 bzw. 0,17). Insgesamt zeigt sich jedoch, dass ein einzelnes Merkmal nicht ausreichend ist, um den Feuchtpotiwert bestimmen zu können, da eine Korrelation von 0,5 bedeutet, dass dieses Merkmal nur 25 % der Varianz des Zielwertes erklären kann.

Die Ergebnisse bestätigen aber die Schlussfolgerungen der Vorversuche, dass die Gassensordaten eine sinnvolle Ergänzung zur Bewertung des Druckprozesses sein können.

Vergleichsgröße	DW 1	DW 3
Temperatur	0,23	0,23
abs. Luftfeuchtigkeit	0,15	0,17
rel. Luftfeuchtigkeit	0,13	0,09
UST Triple-Sensor Signal 1	0,24	
UST Triple-Sensor Signal 2	0,44	
UST Triple-Sensor Signal 3	0,41	
UST Triple-Sensor: alle Ableitungen	< 0,07	
SGP40_S0 und SGP40_S1 (statisch)	< 0,1	~ 0
SGP40_S2 und SGP40_S3 (statisch)	~ 0,2	~ 0,1
Max. Merkmal SGP40S0 & S1 (20-S.-Zyklus)	~ 0,2	~ 0,2
Maximum Merkmal SGP40_S2 (20-S.-Zyklus)	0,36	0,28
Maximum Merkmal SGP40_S3 (20-S.-Zyklus)	0,45	0,33
Maximum Merkmal SGP40_S3 (4-S.-Zyklus)	0,45	0,33

Abbildung 50: Tabellarische Auflistung der Pearson-Korrelation wesentlicher Sensordaten zum Stellwert des Feuchtpotis für die Druckwerke (DW) 1 und 3.

Eine genauere Analyse der Merkmale der Schicht 3 des SGP40 ist in Abbildung 51 für die Daten des Druckwerks 3 gezeigt. Hier sind für den 20 s Zyklus die Korrelationen der Merkmale in jedem Sekundenabschnitt des Zyklus dargestellt (blau: Mittelwert, rot: Steigung im Abschnitt), hinterlegt ist der Temperaturstellwert (lila) sowie ein typischer Verlauf des Sensorleitwiderstands (gelb). Man erkennt, dass jeweils das zweite Steigungsmerkmal nach einem Sprung auf die hohe Temperatur eine hohe Korrelation aufweist, was durch die in diesem Bereich starke Relaxation durch Oxidation der Oberfläche erklärbar ist (differential surface oxidation, DSO) [Sch20\_2]. Die Mittelwerte des Sensorwiderstandes zeigen über einen großen Teil des Temperaturzyklus eine relativ konstante Korrelation, nämlich für die mittlere Temperatur von 300 °C und die anschließende Hochtemperaturphase, an deren Ende die höchste Korrelation beobachtet wird. Eine analoge Betrachtung des 4 s Zyklus zeigt ähnliche Effekte. Insgesamt ist dies konsistent mit der Sensortheorie bei Vorliegen höherer Konzentrationen reduzierender Gase, wie sie durch die großen Mengen des Feuchtmittels im Druckwerk zu erwarten sind. Damit wird deutlich, dass Gassensoren komplementäre Informationen zur Bewertung des Farb-Wasser-Gleichgewicht liefern können, allerdings ist eine direkte Bestimmung offenbar nicht möglich, wie die geringen Korrelationswerte zeigen.

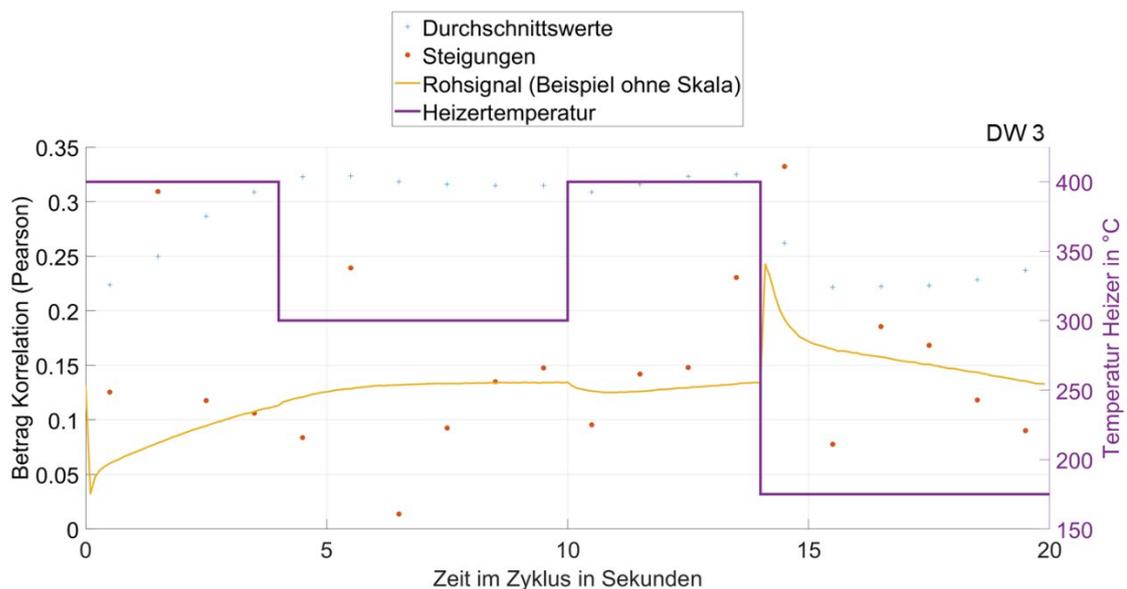


Abbildung 51: Pearson-Korrelaten der 20 Merkmale des 20 s Temperaturzyklus der Schicht 3 des SGP40 für die Daten aus Druckwerk 3.

Erhofft wurde, dass die Zyklenform eine deutlich stärkere Basis bietet, um den Feuchtpotiwert zu reproduzieren, als einzelne Rohdaten des Gassensors. Hierzu wurden für verschiedene typische Stellwerte des Feuchtpotis Abschnitte ausgewählt, in denen das Feuchtpoti lange stabil eingestellt war während gedruckt wurde. Die so identifizierten Zyklen für Feuchtpoti-Stellwerte von 25, 27, 31, 34, 35, 38 und 39 sind in Abbildung 52 gezeigt. Man erkennt hierbei wieder, dass eine schwache Korrelation zwischen Gassensor und Feuchtpoti vorliegt, da bei den niedrigsten Stellwerten von 25 und 27 auch die geringsten Widerstände gemessen werden, allerdings liegt die Kurve für 27 unter der Kurve für 25 und auch die weiteren Werte reihen sich nicht perfekt auf. Man erkennt aber auch, dass es weitere Merkmale in den Sensorkurven gibt, die sich verändern, vor allem die Krümmung der Relaxation in der ersten Hochtemperaturphase: hier ergibt sich für den Stellwert 27 ein fast linearer Anstieg, während beim Stellwert 39 eine starke ausgeprägte Krümmung vorliegt. Die Modellbildung mit der ML-Toolbox versucht, alle diese Merkmale so zu verknüpfen, dass eine Vorhersage des Feuchtpotiwertes ermöglicht wird.

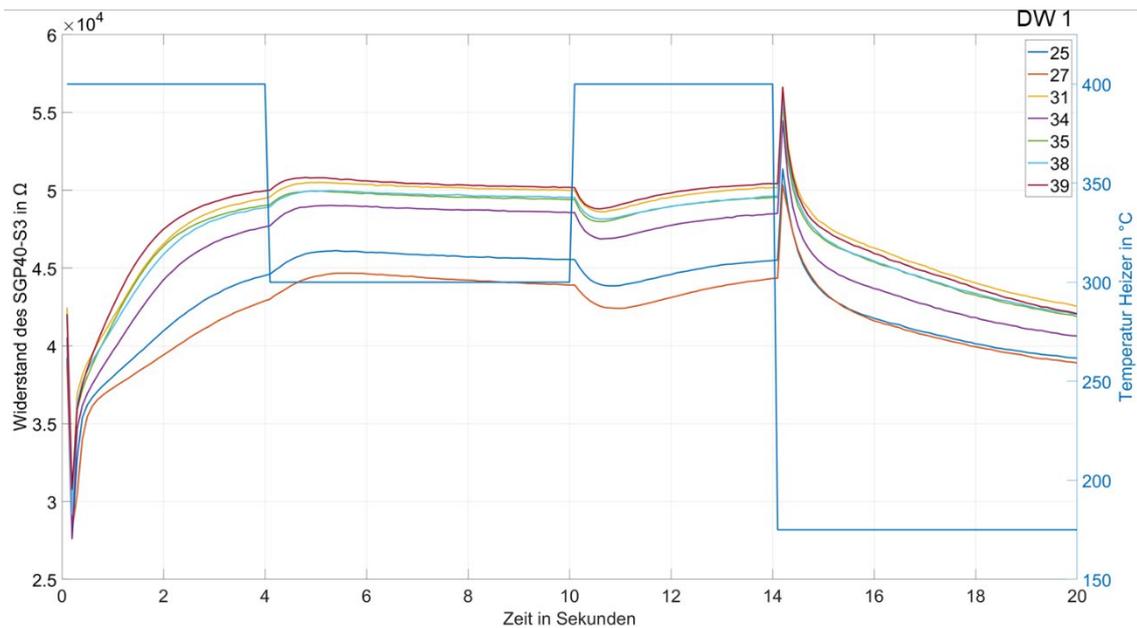


Abbildung 52: Widerstände des SGP40\_S3 über einen 20 s Zyklus für unterschiedliche Feuchtpotiwerte

Abbildung 53 zeigt ergänzend die standardisierten Messwerte der drei Schichten des UST Triplesensors über den gesamten Versuchszeitraum. Man erkennt, dass Schicht 2 und 3 ähnliche Signale liefern, während Schicht 1 ein deutlich anderes Verhalten aufweist. Das Ein- und Ausschalten der Druckmaschine ist hier deutlich weniger dominant als für den SGP40. Diese drei Messwerte könnten grundsätzlich als zusätzliche Merkmale in die Modellbildung einbezogen werden, da aber nur in Druckwerk 1 ein Triplesensor verbaut war, wird in der Folge darauf verzichtet.

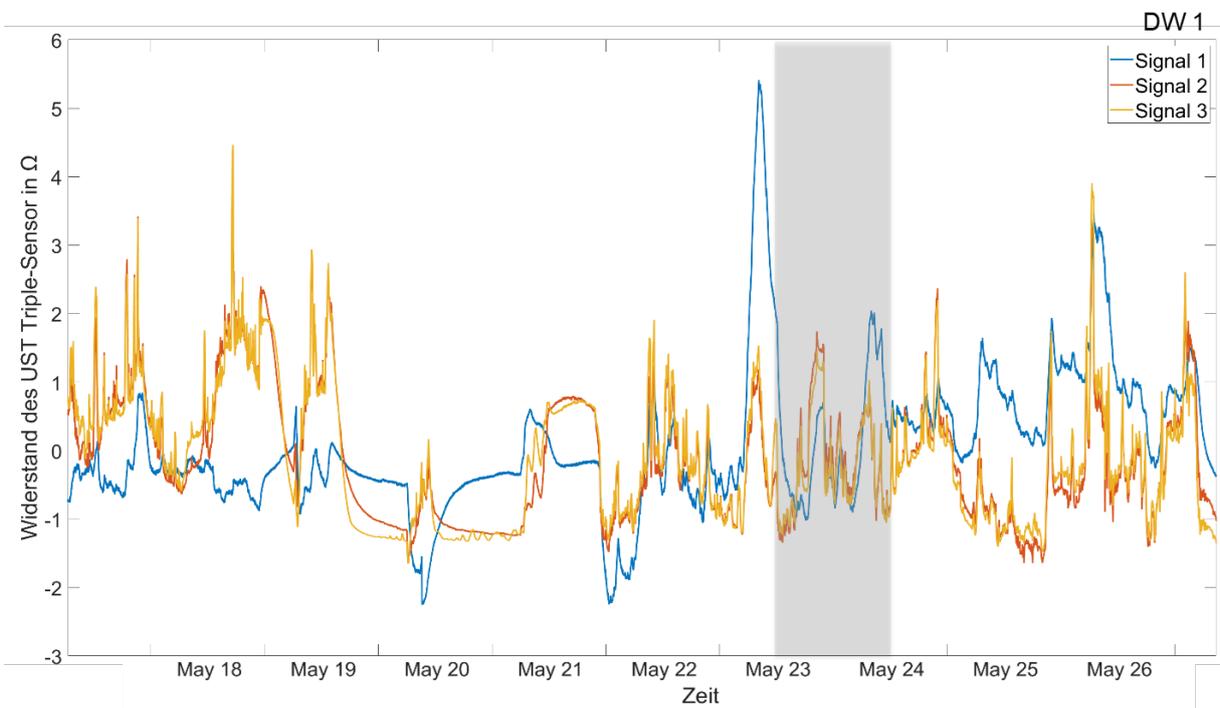


Abbildung 53: Werte des Triplesensors über die gesamte Dauer der versuchsbegleitenden Produktion

In den folgenden Abbildungen werden verschiedene Modelle, die mit der ML-Toolbox berechnet wurden, dargestellt. Die Ergebnisse sind zunächst als Korrelationsdiagramm dargestellt, bei dem

ein perfektes Modell (bei symmetrischen Achsen) eine Winkelhalbierende liefern sollte, d.h. der Stellwert des Feuchtpoti kann als Zielgröße vom Modell exakt vorhergesagt werden. Abbildung 54 zeigt das bestmögliche Ergebnis für Druckwerk 1 unter Verwendung der Daten des SGP40 (20 s Zyklus) sowie des SHT35 und den Prozessdaten aus den Logbüchern, wobei wieder nur Daten während des Druckens und mind. 1 Minute nach Druckstart dargestellt sind. Hierbei werden zur Modellbildung alle Daten als Trainingsdaten verwendet, sodass kein Testdatensatz zur Validierung verbleibt. Es ergibt sich ein absoluter Fehler ( $RMSE_{abs}$ ) in Einheiten des Feuchtpotiwertes von 1,9, was ein ausgezeichnetes Ergebnis wäre.

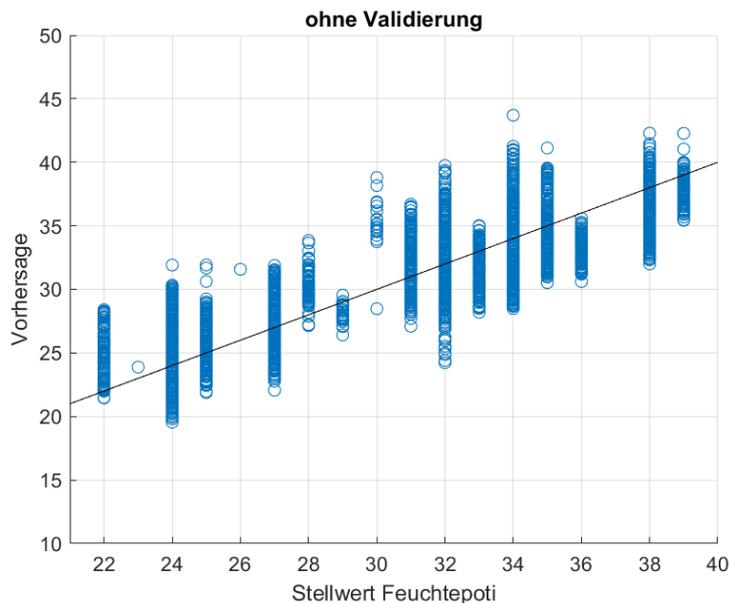


Abbildung 54: ML-Modell zur Reproduktion des Feuchtpotiwertes für DW1 ohne Validierung.

Abbildung 55 zeigt die Vorhersage dieses Modells für den gesamten Versuchszeitraum. Man erkennt hier, trotz des geringen Fehlers, deutliche Abweichungen, die auch systematischen Charakter haben, da in vielen Abschnitten über längere Zeit zu hohe oder zu niedrige Werte ausgegeben werden.

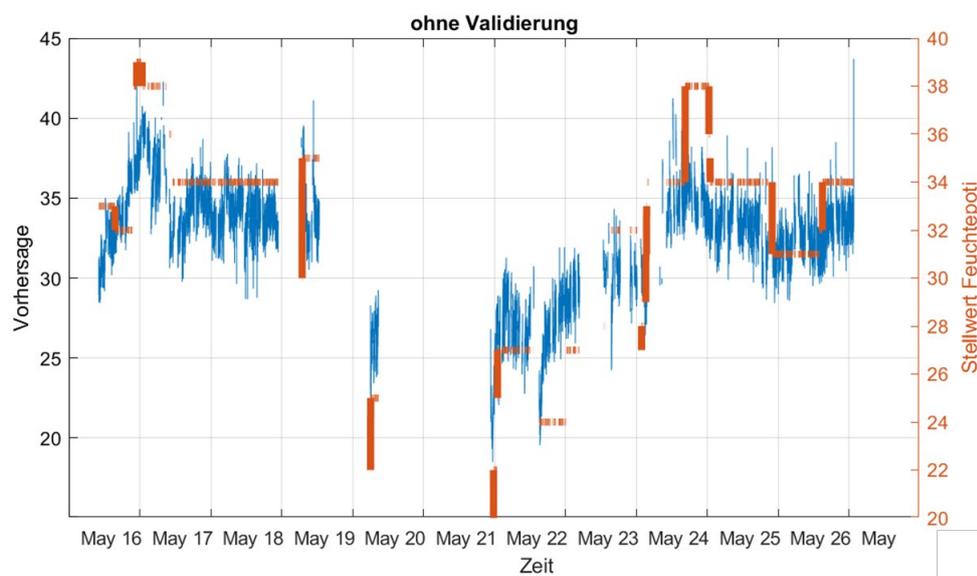


Abbildung 55: Vorhersage zur Einstellung des Feuchtpoti über gesamte versuchsbegleitende Produktion

Abbildung 56 zeigt dieselbe Modellbildung, diesmal allerdings mit 10-facher Kreuzvalidierung.  $RMSE_{abs}$  verdoppelt sich durch die Validierung auf 3,8, was ein Hinweis auf ein Overfitting des Modells ist, obwohl eine sehr große Zahl von Testpunkten vorliegt.

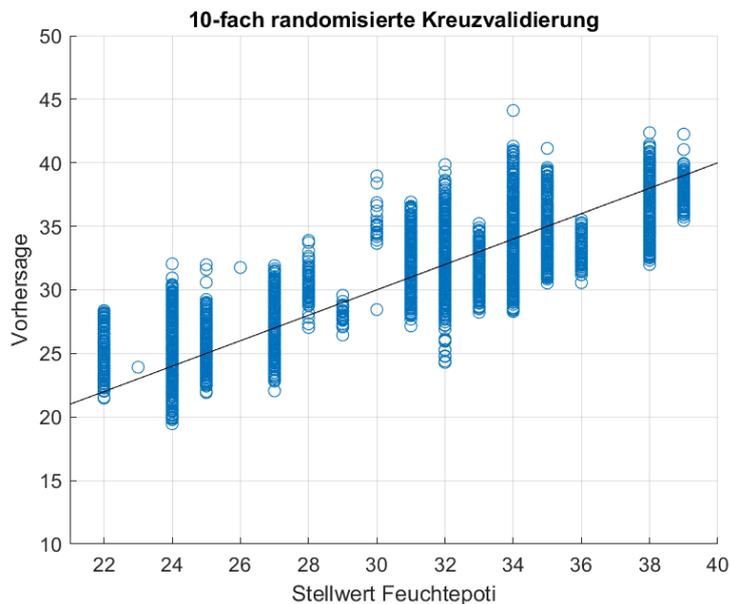


Abbildung 56: ML-Modell zur Reproduktion des Feuchtepotiwertes mit 10-facher Kreuzvalidierung

Um die Robustheit des Vorhersagemodells gegenüber systematischen Einflussgrößen zu prüfen, wurden zwei weitere Validierungsszenarien untersucht: Abbildung 57 zeigt die Modellbildung, wobei hier tageweise validiert wurde, d.h. es wurde jeweils ein kompletter Tag aus den Trainingsdaten entfernt und als Testdaten verwendet. Erfreulicherweise verschlechtert sich der  $RMSE_{abs}$  nur geringfügig auf 4,0. Ein ähnliches Ergebnis zeigt auch Abbildung 58, wobei hier nach den Maschinenbedienern validiert wurde, d.h. es wurden jeweils die Daten eines Bedieners aus den Trainingsdaten entfernt und als Testdaten verwendet; es ergibt sich ein  $RMSE_{abs}$  von nur 3,6. Die Darstellungen zeigen die Ergebnisse allein für die Testdaten, da jeder Versuchspunkt einmal zum Testdatensatz gehört.

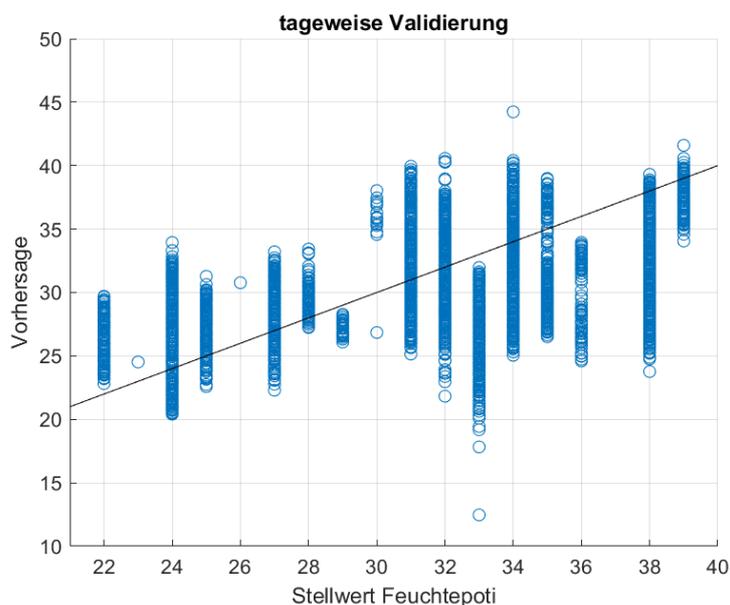


Abbildung 57: ML-Modell zur Reproduktion des Feuchtepotiwertes mit tageweiser Validierung

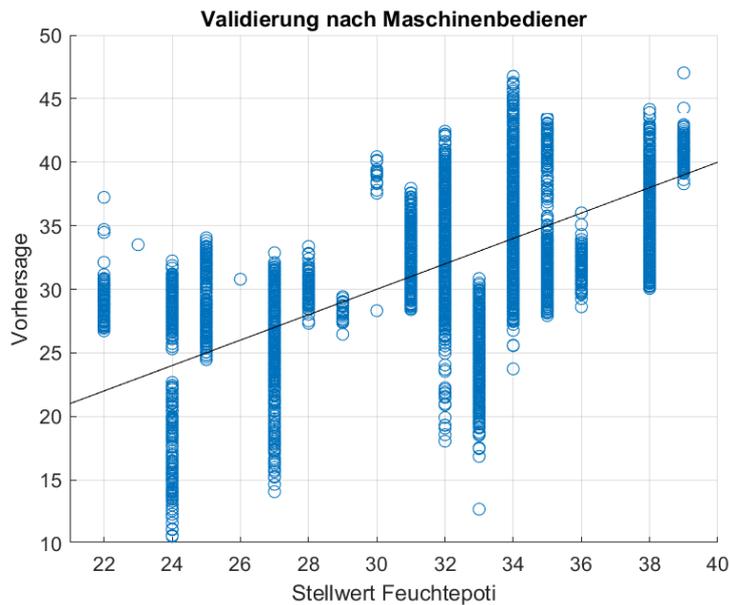


Abbildung 58: ML-Modell zur Reproduktion des Feuchtpotiwertes mit Validierung nach Maschinenbediener

Da in den Korrelationsplots nur die Gesamtweite der Verteilungen für einen Zielwert erkennbar sind, können diese Plots durchaus irreführend sein, weil nicht erkennbar ist, welche Verteilung den Daten für einen Zielwert zugrunde liegt. Insbesondere ist hier interessant, ob es sich um multimodale Verteilungen handelt oder ob die Daten näherungsweise normalverteilt sind. Letzteres würde daraufhin deuten, dass die Abweichungen durch eine Vielzahl weitere Einflussfaktoren bedingt ist, da sich dann gemäß dem zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitstheorie immer näherungsweise eine Normalverteilung ergibt. Abbildung 59 zeigt daher wieder für den häufigsten Feuchtpoti-Stellwert von 34 die Verteilung der Vorhersagewerte als Histogramm. Man erkennt, dass die Modelle tatsächlich einer Normalverteilung mit einer geringen Halbwertsbreite von deutlich kleiner 2 ähneln, vergleichbar dem  $RMSE_{abs}$  des nicht validierten Modells; die deutlich größeren  $RMSE$  der validierten Modelle sind daher auf systematische Abweichungen für andere Versuchspunkte zurückzuführen.

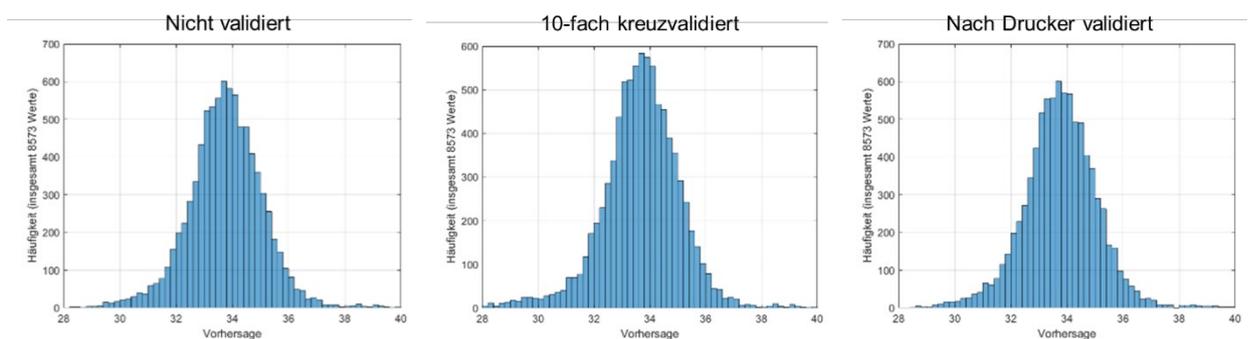


Abbildung 59: Häufigkeit über ML-Modellvorhersage des vorhergesagten Feuchtpotiwertes bei einem tatsächlichen Feuchtpotiwert von 34.

## 12. Auswertung von Langzeitmaschinendaten - Druckerei

Seitens des Druckmaschinenherstellers DMH B wurden zusätzliche Logbücher zur Verfügung gestellt, welche sich auf das Jahr 2023 und die verwendete Druckmaschine aus Messkampagne II beziehen. Hierbei sollte der Sommer-Winter-Effekt auf das eingestellte Feuchtpoti analysiert werden. In Abbildung 60 links sind die Durchschnittswerte des eingestellten Feuchtpoti-Wertes für die einzelnen Monate dargestellt. Für die Monate Januar bis März lagen keine Daten vor. Ein tatsächlicher Sommer-Winter-Effekt, wie er in Gesprächen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss vermutet wurde, konnte damit nicht bestätigt werden.

Monat	Durchschnitt
November	28,7
Dezember	32,2
April	36,7
Mai	31,4
Juni	34,3
Juli	34,6
August	30,2
September	34,5
Oktober	30,6

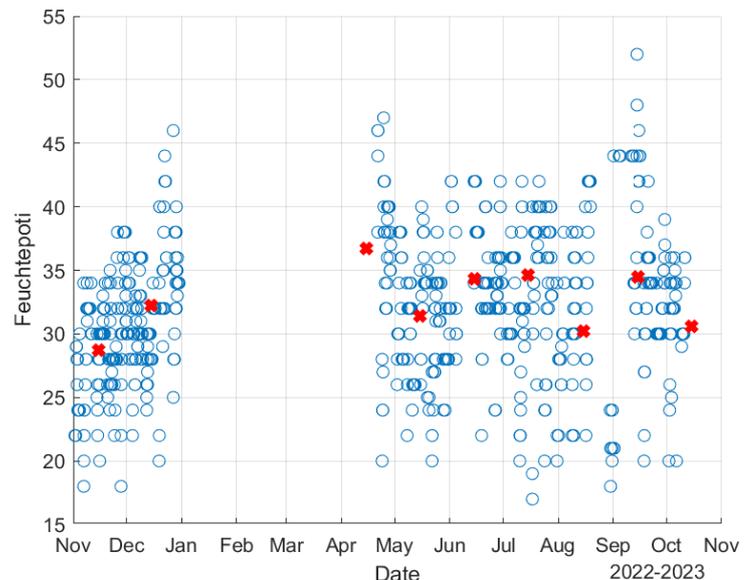


Abbildung 60: links: Tabellarische Durchschnittswerte des eingestellten Feuchtpotis für die Monate im Jahr 2023. Rechts: Darstellung dieser als Plot mit monatlichen Durchschnittswerten (rot) und Tageswerten (blau).

In Abbildung 61 ist der Einfluss der Papierbreite und -fläche dargestellt. Es ist zu sehen, dass keine Korrelation zum Feuchtpoti vorliegt. Der Korrelationskoeffizient beträgt für die Papierbreite 0,07 und für die Papierfläche 0,05.

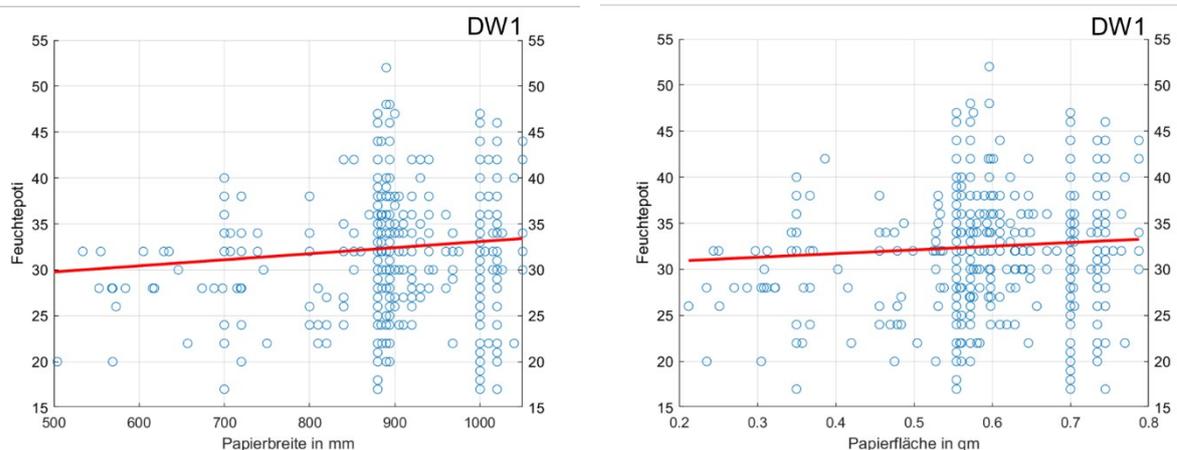


Abbildung 61: Einfluss der Papierbreite (links) und -fläche (rechts) auf das eingestellte Feuchtpoti

In Abbildung 62 ist der Einfluss der Druckgeschwindigkeit (Auswertung nur für Druckgeschwindigkeiten größer 5.000 Bogen/h dargestellt). Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,07 und fällt damit äußerst niedrig aus.

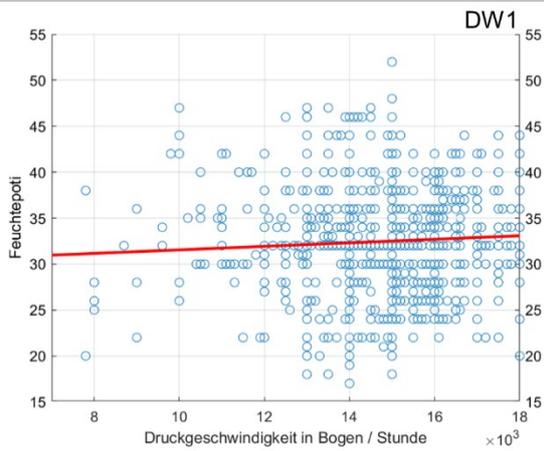


Abbildung 62: Einfluss der Druckgeschwindigkeit auf das eingestellte Feuchtpoti

In Abbildung 63 ist der Einfluss der Papierart auf das Feuchtpoti in Form der Wahrscheinlichkeit bei einem Feuchtpotiwert von 34 dargestellt. Die Mittelwerte für das Feuchtpoti liegen sehr nah zusammen und in Verbindung mit der Standardabweichung, kann kein Einfluss der Papierart auf das Feuchtpoti erkannt werden.

Papierklasse	Mittelwert	Standardabweichung
Uncoated	32,9	5,7
Matt coated	32,3	5,2
Gloss coated	31,7	5,1

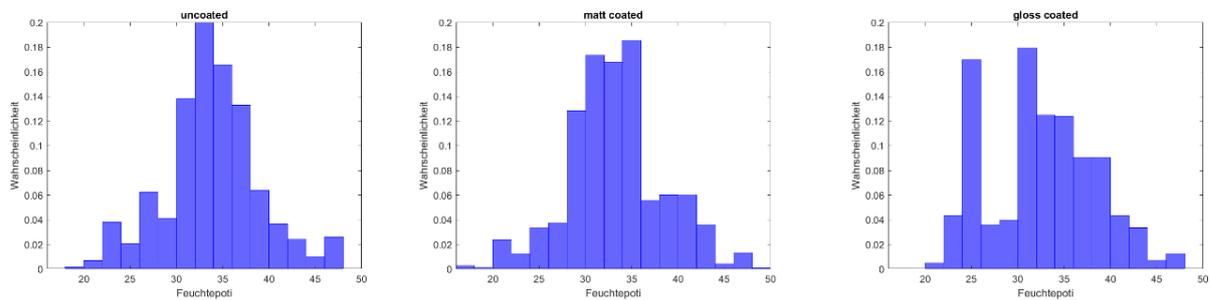


Abbildung 63: Einfluss der Papierart auf das Feuchtpoti

### 13. Vergleich der Ergebnisse aus Messkampagne I und Messkampagne II

Von besonderer Bedeutung sind die ermittelten Korrelationen (betragsmäßige Pearson Korrelation) der Sensordaten zu der eingestellten Feuchtmittelmenge, welche in Abbildung 64 dargestellt sind. Zum einen sind die Korrelationen aus der Messkampagne II mit den Korrelationen aus der Messkampagne I beim Druckmaschinenhersteller DMH B aufgezeigt, von dem auch die Druckmaschine in Messkampagne II stammt. Hierbei beziehen sich die Korrelationen von MK II immer auf das Druckwerk 3. Die Werte wurden innerhalb der 20 Sekunden Zyklen der Gassensoren ermittelt und es wurden nur die Zyklen verwendet, bei denen die Druckmaschine bereits für mindestens eine Minute produziert hat.

Im Allgemeinen wurden bei der MK I deutlich höhere Korrelationen (außer Maximum Merkmal SGP40\_S3 (20-S.-Zyklus)) im Vergleich zur MK II erreicht. Für die MK II zeigen sich durchweg Korrelationen, die unterhalb von 0,5 liegen. Auffällig sind die höheren Korrelationen des Maximum Merkmals SGP40\_S3 für den 20 Sekunden als auch den 4 Sekunden Zyklus im Vergleich zu den anderen Schichten der Gassensoren. Bei allen Korrelationen kann jedoch nicht von Signifikanz gesprochen werden. Der UST Triple-Sensor und der statisch eingesetzte SGP40 tauchen in der Spalte MK I DMH B nicht auf, da der Triple-Sensor bei der Durchführung der MK I beim DMH B nicht vorhanden war und der Gassensor SGP40 noch nicht im statischen Betrieb eingesetzt wurde.

Vergleichsgröße	MK II DW 1	MK I DMH B
Temperatur	0,23	0,67
abs. Luftfeuchtigkeit	0,15	0,55
rel. Luftfeuchtigkeit	0,13	0,27
UST Triple-Sensor Signal 1	0,24	
UST Triple-Sensor Signal 2	0,44	
UST Triple-Sensor Signal 3	0,41	
UST Triple-Sensor: alle Ableitungen	< 0,07	
SGP40_S0 und SGP40_S1 (statisch)	< 0,1	
SGP40_S2 und SGP40_S3 (statisch)	~ 0,2	
Max. Merkmal SGP40S0 & S1 (20-S.-Zyklus)	~ 0,2	0,58 (S1)
Maximum Merkmal SGP40_S2 (20-S.-Zyklus)	0,36	0,49
Maximum Merkmal SGP40_S3 (20-S.-Zyklus)	0,45	0,22
Maximum Merkmal SGP40_S3 (4-S.-Zyklus)	0,45	

Abbildung 64: Betragsmäßige Pearson Korrelationen ausgewählter Parameter zum eingestellten Feuchtpoti mit Vergleich von Messkampagne I (MK I) zu Messkampagne II (MK II)

Obwohl diese Unterschiede sehr groß sind, sollte dennoch untersucht werden, ob aus den Daten der Messkampagne I ein ML-Modell erstellt werden kann, das zur Reproduzierung der Feuchtpotiwerte in der Messkampagne II geeignet ist. Hierfür wurde das Modell gemäß Abbildung 28 d mit einem  $RMSE_{abs}$  von 2,1 auf die Daten der Messkampagne II angewandt. Abbildung 65 zeigt das befürchtet schwache Ergebnis mit einem  $RMSE_{abs}$  von 20,1. Da der Dynamikbereich während der Messkampagne II nur Stellwerte 22 bis 39 umfasst, bedeutet dies, dass ein konstanter Wert in deutlich besseres Ergebnis liefert als das ML-Modell, selbst Raten in dem Dynamikbereich würde noch bessere Ergebnisse liefern, wie man auch an den

Modellvorhersagen erkennt, die mit Werten kleiner Null und größer 100 außerhalb des einstellbaren Bereichs liegen.

Dieses Ergebnis zeigt, dass ein Universalmodell, d.h. ein Modell, dass für jede Druckmaschine eines Herstellers bei unterschiedlichen Druckereien und variierenden Umgebungsbedingungen zumindest aktuell völlig unerreichbar erscheint. Hierfür müssten deutlich mehr Messungen an Druckmaschinen durchgeführt werden, ohne dass absehbar wäre, ob ein solches Modell überhaupt erreicht werden kann.

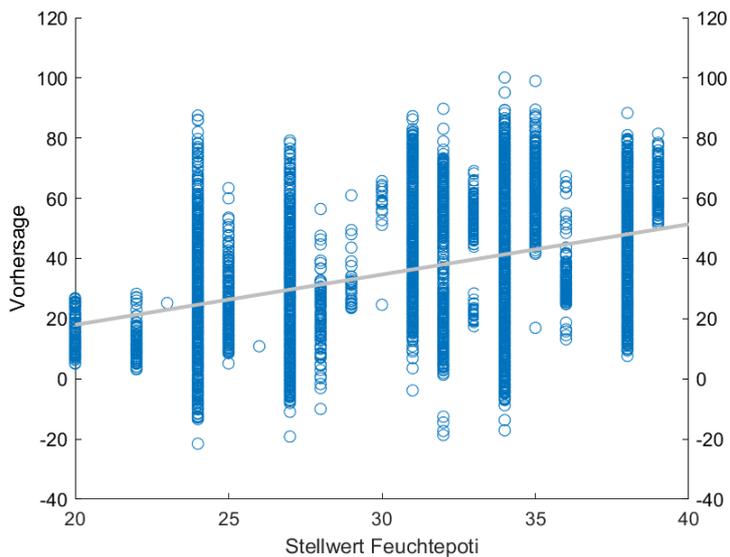


Abbildung 65: Vorhersage des Feuchtepotiwertes für Daten aus Messkampagne II unter Verwendung des besten ML-Modells aus Messkampagne I

## 14. Neuer Modellansatz zur Empfehlung relativer Feuchtpoti-Änderungen

Da die Messdaten der Messkampagne II, wohl primär wegen nicht ausreichender Datenbasis, keine absolute Vorhersage des Feuchtpoti-Wertes ermöglicht, wird vorgeschlagen, ein Modell zu erproben, das dem Druckpersonal lediglich eine relative Änderung des aktuellen Einstellwertes vorschlägt. D.h. dem Druckpersonal wird eine Handlungsempfehlung „Erhöhen“ bzw. „Reduzieren“ gegeben um damit im laufenden Betrieb ein zuverlässiges Verhalten zu erzielen. Für diese Modellbildung eignen sich nur die Daten der Messkampagne I bei DMH A, da dort die Versuche mit jeweils 3 Einstellwerten des Feuchtpotis gefahren wurden (Anfahren der Schmiergrenze, anschließend erhöhen um 5% bzw. 10%). Dieser Datensatz eignet sich für die vorgeschlagene Untersuchung, wenn der Wert bei Schmiergrenze +5% als Sollwert, die beiden anderen als Abweichung nach oben bzw. unten als Zielgrößen verwendet werden. In diesem Fall handelt es sich um ein reines Klassifizierungsproblem, also keine Regression wie bei den vorherigen Untersuchungen.

Zur Analyse wurden die kurzen Gassensorzyklen mit einer Dauer von 4 s verwendet, so dass sich insgesamt etwa 1500 Zyklen ergeben; jeder Zyklus wird je nach Einstellwert (Schmiergrenze = Klasse 1, +5 % = Klasse 2, +10 % = Klasse 3) eingeteilt und ein Modell trainiert, um die Klasse vorherzusagen. Abbildung 56 zeigt die Ergebnisse, einmal mit 10-facher Kreuzvalidierung und einmal mit Versuchspunkt-weiser Validierung, d.h. es wurden jeweils alle Punkte eines Versuchspunkts als Testdaten verwendet, die übrigen als Trainingsdaten. Die Ergebnisse zeigen, dass prinzipiell eine relative Empfehlung möglich sein sollte. Bei der Kreuzvalidierung werden lediglich 6 % der Zyklen falsch klassifiziert, wobei dies in vielen Fällen einzelne Ausreißer sind, d.h. eine Betrachtung über mehrere Zyklen würde bereits eine robustere Empfehlung ergeben (Abbildung 66, oben). Die wesentlich realistischere und für das Modell schwierigere Validierung nach Versuchspunkten zeigt andererseits, dass hierfür wiederum wohl eine größere Trainingsbasis erforderlich ist, da nur 54 % der Daten korrekt klassifiziert werden (reines Raten würde 33 % korrekte Klassifikation ergeben). Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Testdaten Zustände darstellen, die sich deutlich von den Trainingsdaten unterscheiden.

Eine Übertragung dieses Modells auf die Daten der Messkampagne II wurde nicht untersucht, da die Druckerei mit einer Druckmaschine des Herstellers B arbeitet. Bei der Messkampagne I bei Hersteller B wurden aber nur jeweils 2 Punkte (Schmiergrenze und +5 %) angefahren, so dass die relative Empfehlung nicht trainiert werden kann.

Insgesamt erscheint dieser relative Ansatz dennoch vielversprechend und auch realistisch für eine praktische Anwendung angesichts des bekannten Problems von ML-Modellen bei Domain shifts, d.h. beim Versuch, Modelle von einer Trainingsdomäne auf eine andere Domäne zu übertragen [Goo22]. Ein solcher Domain shift entsteht insbesondere, wenn man von einer (Druck-) Maschine auf eine andere übergeht oder wenn eine Maschine an einem anderen Ort wieder in Betrieb genommen wird, bspw. durch sich verändernde Umgebungseinflüsse, die in vielen Fällen einen systematischen Shift der Absolutwerte (Offset der Vorhersage) auslösen. Durch die Möglichkeit, den korrekten Arbeitspunkt an einer neuen Anlage mit wenigen Daten während des laufenden Betriebs, d.h. während des Gutdrucks, aufzunehmen, könnte ein Modell mit relativen Empfehlungen recht schnell auf neue Maschinen und Standorte übertragen werden.

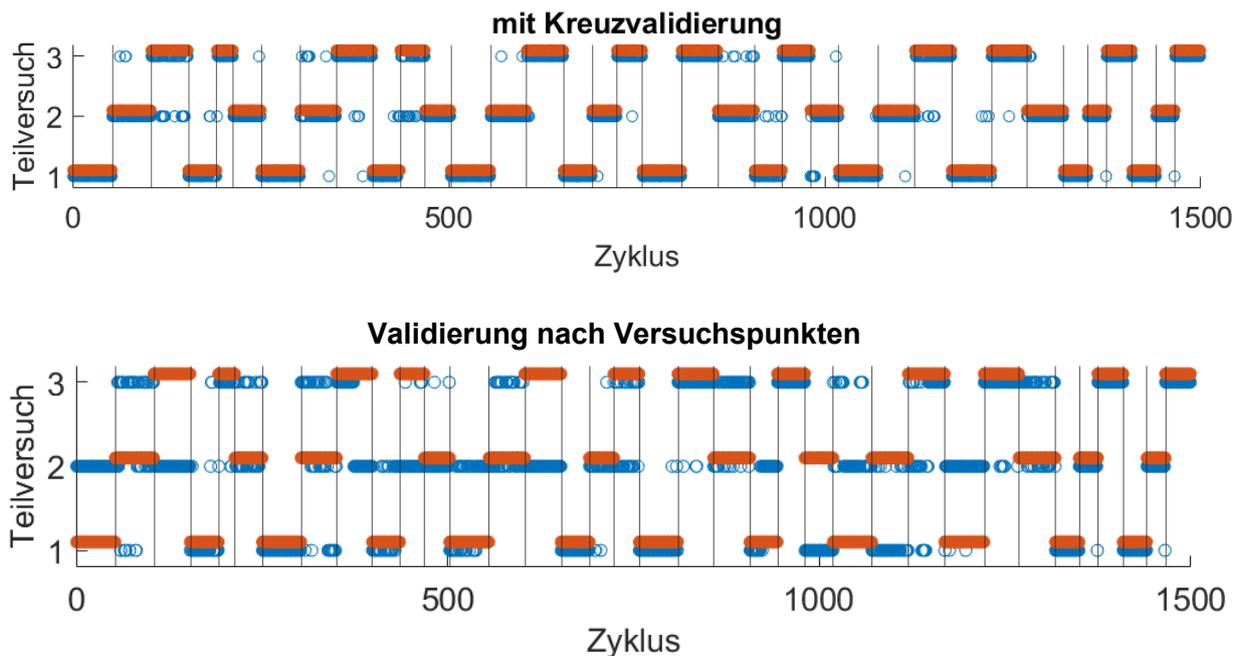


Abbildung 66: Klassifizierung der Daten aus Messkampagne I bei DMH B in drei Klassen (1: Schmiergrenze, 2: +5% Feuchtpoti; 3: +10% Feuchtpoti). Während die randomisierte Kreuzvalidierung sehr gute Ergebnisse zeigt, liefert die Validierung nach Versuchspunkten deutlich schlechtere Ergebnisse.

Da es bei Messkampagne II so gut wie keine Feuchtpoti-Einstellungen während des Druckens durchgeführt wurden und fast nur vor Beginn eines Druckauftrags stattfanden, wäre eine Art Expertensystem denkbar. Im Besonderen könnte dies bei außerordentlichen Systemänderungen angewandt werden. Hierzu gehören beispielsweise die Änderung der Druckfarbe in einzelnen Druckwerken und die damit einhergehende starke Änderung des Feuchtpotis. Auch bei Stillstandzeiten der Druckmaschine (Probleme im Druckbetrieb, Wochenenden, Betriebsferien und Feiertage) könnte ein Expertensystem hilfreich sein. Gerade bei unerfahrenem Druckpersonal kommt es vor, dass bei diesen genannten außerordentlichen Situationen ein Anpassen des Feuchtpotis schlicht weg vergessen werden kann. Eine Integration in die Mensch-Maschine-Schnittstelle (Leitstand) der Druckmaschine in Form einer kurzen Hinweisanzeige oder eines akustischen Signals zur Erinnerung an die Überprüfung des Feuchtpotis wäre vorstellbar. Durch die Implementierung eines einfachen Temperatursensors im Druckwerk könnten Stillstandzeiten besser wahrgenommen werden. Der Wechsel von Druckfarben, welcher bereits als Maschinenparameter im Druckauftrag hinterlegt ist, müsste um technische Erfahrungswerte für das Feuchtpoti ergänzt und diese beim Wechsel mit dem angesprochenen Hinweis am Display angezeigt werden. Erst nach Bestätigung des Hinweises durch das Druckpersonal dürfte dann ein Fortdruck stattfinden.

## 15. Zusammenfassung und Ausblick

Beim Offsetdruck sorgt das Verhältnis zwischen der Farb- und der Feuchtmittel-Schichtdicke, dem sogenannten Farb-Wasser-Gleichgewicht, welches eine Emulsion von Druckfarbe und Feuchtmittel beschreibt, für einen qualitativ hochwertigen Druck. Wegen der erforderlichen händischen Eingriffe wird dies in der Druckbranche als das seit Jahrzehnten ungelöstes Problem des Offsetdrucks angesehen. Bisherige Ansätze zur Messung einzelner, konkreter Größen und die darauf aufbauende robuste Beherrschung des Farb-Wasser-Gleichgewichts sind nicht zufriedenstellend. Vielmehr wird vermutet, dass bedingt durch die hohe Komplexität des Druckprozesses und der Vielzahl der auf die Emulsion wirkenden Einflussgrößen die gesuchte Information verteilt in Signalen verschiedener Sensoren und Maschinenparametern vorhanden ist. Ein möglicher Lösungsansatz ist die Nutzung einer Sensorfusion verbunden mit dem Einsatz von Methoden des Maschinellen Lernens (ML). Ziel ist es, das von vielen Einflussgrößen abhängige und sich im Prozess dynamisch verändernde Farb-Wasser-Gleichgewicht in einem konstanten Prozessfenster zu halten. Zuvor ist zu Beginn eines Druckauftrags das Farb-Wasser-Gleichgewicht durch erfahrenes Druckpersonal richtig einzustellen.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird ein Ansatz zur Kontrolle des Farb-Wasser-Gleichgewicht auf Basis von Sensorfusion und Methoden des Maschinellen Lernens untersucht. In dieser Untersuchung werden keine Laborversuche durchgeführt. D. h. alle Druckversuche finden auf realen, handelsüblichen Bogen-Offsetdruckmaschinen im Format 3B (ca. 70 cm x 100 cm) statt. Aus dem Projektbegleitenden Ausschuss stellen zwei Druckmaschinenhersteller für erste Voruntersuchungen und die Messkampagne I jeweils eine Druckmaschine zur Verfügung. Dazu werden auch zusätzliche Sensoren in den Druckmaschinen erprobt und integriert. Die Messkampagne II wird in einer Druckerei an einer industriellen Druckmaschine mit zusätzlichen Gas-, Temperatur- und Feuchtesensoren durchgeführt, indem eine Druckproduktion begleitet wird. Die Daten werden dann mit der am LMT der Universität des Saarlandes bereits verfügbaren open source Toolbox zum automatisierten ML ausgewertet und in datengetriebene Modelle überführt. Die ursprünglich in der Beantragung vorgesehenen Druckversuche in einem Klimazelt und die Entwicklung eines physischen Demonstrators konnten aufgrund von Corona-Pandemie-Beschränkungen und deren Nachwirkungen nicht durchgeführt werden. Aus diesen Gründen konnte für die Messkampagnen durch die Druckmaschinenhersteller auch keine Schnittstelle zur Übernahme von Live-Betriebsdaten (Druckgeschwindigkeit, ...) zur Verfügung gestellt werden. Die Prozessdaten in Form von Logbüchern konnten von den Druckmaschinenherstellern lediglich im Nachhinein bereitgestellt und dann einer Auswertung zugeführt werden.

Die Vorgehensweise kann durch die Abschnitte Vorüberlegungen, Vorversuche, Messkampagne I und Messkampagne II beschrieben werden.

In den Vorüberlegungen wurden die dominanten und relevanten Parameter identifiziert. Dabei wurden weitere Gas-, Temperatur- und Feuchtesensoren und Mikrofone erprobt. Für die Vorauswahl von Gassensoren wurde durch Laboruntersuchungen beim IDD deren Sensitivität bei Emulsionen mit unterschiedlichem IPA-Gehalt untersucht. Die Messungen mit den Mikrofonen erbrachte keine brauchbaren Ergebnisse, so dass dessen Einsatz verworfen wurde. Die Entwicklung und Umsetzung eines Konzepts zur Integration der Sensorik in den sehr begrenzten Bauraum eines Farb- und Feuchtwerks von zwei unterschiedlichen Offsetdruckmaschinen war wegen der Sicherheitsbedenken (die Messtechnik könnte sich lösen, in die Druckmaschine fallen und große Schäden verursachen) aufwändiger als gedacht. Mit einer entwickelten Messtraverse wurde die Sensorik schließlich nach dem Farbwerk auf Höhe der letzten Auftragswalze angeordnet. Die Untersuchungen zeigten, dass die Unterschiede in der Breite der Druckmaschine

nur gering sind und so nicht mehrere Sensoren über die Druckbreite verwendet werden müssen. Die Aufnahme und Speicherung der Daten erfolgt mit dem Datenerfassungssystem cRIO von National Instruments, wobei sehr lange Kabellängen für die Sensoren zu berücksichtigen waren. Mit den aufgenommenen Daten wurden ein Workflow für die open source Toolbox entwickelt und erste Daten ausgewertet.

Durch Vorversuche an Druckmaschinen bei zwei Druckmaschinenherstellern wurde das Messkonzept und die Auswertemethoden entwickelt und erprobt. Einen relativ großen Aufwand stellte das Ausräumen der Sicherheitsbedenken dar. Konstruktiv wurde dies durch eine Messtraverse mit einer Sensorbox und speziellen Sensorhalterungen gelöst. Gemeinsam mit den Druckmaschinenherstellern konnte eine betriebssichere Installation der Messtraverse mit Sensorbox gefunden werden, die den laufenden Druckbetrieb nicht beeinträchtigt. Die Daten wurden mit dem Datenerfassungssystem cRIO von National Instruments aufgezeichnet. Mit den Temperatur- und Feuchtesensoren konnten die Umgebungsbedingungen der Druckmaschine gut aufgezeichnet werden. Die eingesetzten Gassensoren messen die Gaskonzentration des im Feuchtmittel enthaltenen Isopropanols (IPA) in der Umgebungsluft eines Druckwerkes und lassen damit Rückschlüsse auf das Farb-Wasser-Gleichgewicht zu. Der erstmalige Einsatz von Gassensoren und die Nutzung der Sensorfusion zur Kontrolle des Farb-Wasser-Gleichgewicht hat sich damit bewährt und zeigt ein hohes Innovationspotenzial auf.

Die Messkampagne I wurde bei zwei Druckmaschinenherstellern durchgeführt. Pandemiebedingt war der zur Verfügung stehende Zeitraum äußerst begrenzt und die verfügbare Papiermenge sehr knapp. Die in den Vorversuchen entwickelte Messtraverse wurde eingesetzt und die Daten mit dem Datenerfassungssystem cRIO von National Instruments aufgezeichnet. Hierbei nehmen die Sensoren kontinuierlich Daten auf, die dann im Anschluss mit den Logbüchern (welche wichtige Maschinen- und Prozessparameter enthalten) zusammengeführt, gefiltert, sortiert und synchronisiert werden. Auf Basis dieser Datensätze wurde eine Modellierung und Auswertung anhand der ML-Toolbox der Universität des Saarlandes durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Gassensor-, Temperatur- und Feuchtwerte für die ML- Modellbildung wichtig sind und die Ergebnisse deutlich verbessern. Es konnte damit erstmalig ein Modell erstellt werden, welches eine sehr gute Korrelation zwischen den fusionierten Sensordaten und dem Farb-Wasser-Gleichgewicht aufweist. Eine Vorhersage des Feuchtpotiwertes wäre damit möglich.

In Messkampagne II wird eine Druckproduktion in einer Druckerei begleitet, welche sich über zwei Wochen erstreckte. Im Vorfeld der Druckversuche war ein erheblicher Aufwand für vertragliche und versicherungstechnische Regelungen hinsichtlich eines möglichen Schadensfalls notwendig. Auf einer Bogen-Offsetdruckmaschine im Format 3B wurden die von der Druckerei eingeplanten Druckaufträge abgearbeitet. Parallel wurden mit dem entwickelten Messkonzept Daten aufgenommen und das Druckpersonal beobachtet und befragt. D. h. es werden keine relevanten Maschinenzustände gezielt angefahren, sondern nur als ein Beobachter agiert. Mit den generierten Datensätze erfolgte dann eine Modellbildung und Auswertung mit der ML-Toolbox der Universität des Saarlandes. Die Korrelation zwischen den fusionierten Sensordaten und dem Farb-Wasser-Gleichgewicht waren nur „noch“ gut und damit deutlich schlechter als bei der Messkampagne I. Eine verlässliche Vorhersage zur Einstellung des Feuchtpoti scheint damit nicht möglich zu sein. Grund dafür ist, dass Aufgrund der Auftragslage, der Umgebungsbedingungen und der vermutlich sehr guten Qualifikation des Druckpersonals in der Druckerei zu wenig Abweichungen des Farb-Wasser-Gleichgewichts aufgetreten sind. D.h. die vorgefundenen Abweichungen des Farb-Wasser-Gleichgewichts während der Druckversuche waren zu gering. Unvorhergesehenerweise war damit insgesamt die Datenbasis für das ML zu

gering. Für die Messkampagne II wäre es daher für die Datenerfassung günstiger gewesen, in eine „schlechte“ Druckerei zu gehen.

Auf Basis der Ergebnisse wurde ein Vorschlag für eine relative Einstellung des Feuchtpotis vorgestellt. Hierin sehen wir einen interessanten Ansatz für die Branche. Für die Validierung sind allerdings ein größerer Trainingsdatensatz und damit erneute Druckversuche notwendig.

Als wesentliches Ergebnis kann festgehalten werden, dass der Einsatz von Gas-, Temperatur- und Feuchtesensoren verbunden mit einer Sensorfusion und dem Einsatz des Maschinellen Lernens wesentlich zu einer Wissenserweiterung des Farb-Wasser-Gleichgewichts im Offsetdruck beigetragen haben. Hinweise zu den Anforderungen für die Auswahl der Sensoren sowie zu einer Positionierung in der Druckmaschine werden gegeben und das Messkonzept beschrieben. Die open source Toolbox des LMT der Universität Saarbrücken steht für weitere Projekte zur Verfügung. Die Durchführung der Messkampagnen an industriellen Druckmaschinen wurde von allen Beteiligten im Nachhinein als richtig beurteilt. Zur Erhöhung der Güte von Trainingsdaten sollten jedoch auch gezielt Druckversuche mit „nicht idealen“ Druckparametern durchgeführt werden. D.h. es sollten unübliche Maschinenzustände gezielt angefahren werden. Bei weiterführenden wissenschaftlichen Untersuchungen sollte auch überlegt werden, ob für eine automatisierte Regelung des Farb-Wasser-Gleichgewichts die Einstellung des Feuchtpotis wirklich die richtige Zielgröße ist. Möglicherweise wäre die Druckqualität, welche mit einer Inline-Kamera aufgenommen wird, besser geeignet. Allerdings wird dadurch die Komplexität noch einmal erhöht.

Abschließend soll noch von einigen Beobachtungen berichtet werden:

- Der Wertebereich des Feuchtpoti liegt tendenziell bei Messkampagne I niedriger als bei Messkampagne II. Dies könnte mit einer geringeren Erwärmung über die Druckzeit der Druckmaschine zusammenhängen. Die bei der Messkampagne I genutzten Druckmaschinen wurden nicht zur Produktion genutzt und die Druckzeiten waren vergleichsweise kurz.
- In vielen Druckversuchen wurden die Feuchtpoti von Druckwerk zu Druckwerk höher eingestellt. D.h. das letzte Druckwerk hatte die höchste Einstellung.
- Der Hersteller der Druckfarbe hat ebenso wie die Farbserie vermutlich einen relevanten Einfluss.
- Das Druckbild (inhomogene und homogene Flächendeckung) und die Färbung sind offenbar relevant für die Einstellung des Feuchtpotis.
- Die Analyse von Log-Dateien eines Druckmaschinenherstellers für das gesamte Jahr 2023 zeigt für eine Druckmaschine keinen typischen Sommer-Winter-Effekt für die Einstellung des Feuchtpoti. Dies wird jedoch in der Praxis vermutet.
- Für das Anpassungslernen von einer Druckmaschine auf eine bauartgleiche andere Druckmaschine liegen derzeit nicht genügend Trainingsdaten vor.

## 16. Literaturverzeichnis

- [Bas18] M. Bastuck, T. Baur, A. Schütze, "DAV3E – a MATLAB toolbox for multivariate sensor data evaluation", *J. Sensors Sens. Syst.*, vol. 7, no. 2, pp. 489–506, Sep. 2018
- [Bat09] W. Batchelor, A. Sudarno, C. Gujjari and P. Banham. Fundamental studies of linting in offset printing of newsprint. In: *Advances in Pulp and Paper Research*, Oxford 2009, Trans. of the XIVth Fund. Res. Symp. Oxford, 2009, (S.J. l'Anson, ed.), pp 1325–1350, FRC, Manchester, 2018. DOI: 10.15376/frc.2009.2.1325.
- [Bau15] T. Baur, A. Schütze, T. Sauerwald: "Optimierung des temperaturzyklischen Betriebs von Halbleitersensoren", *tm – Technisches Messen*, 82 (4), 187-195, 2015
- [Big 14] M. Bigianti, A. Lanter, "Digital Printing Leads to Print Finishing Opportunities", [www.postpressmag.com](http://www.postpressmag.com), 2014, Online verfügbar: <https://postpressmag.com/articles/2014/digital-printing-leads-to-print-finishing-opportunities/>, zuletzt aufgerufen am 12.04.2021
- [Bla16] O. Blagodir, K. Zolotukhina, B. Kushlyk, O. Velychko, "Regularities of ink water balance stability in offset printing". *EUREKA: Physics and Engineering*, (3), 31-37, 2016, <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2016.00078>
- [Bou08] A. Bouabid, „Numerische und experimentelle Untersuchungen zum mechanisch-drucktechnischen Verhalten von Offsetdrucktüchern unter besonderer Berücksichtigung ihrer hyper- und schaumelastischen Eigenschaften“. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2008, <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/1006/>
- [Bvd20] Bundesverband Druck und Medien e.V. (bvdm.) "Die deutsche Druckindustrie 2019/2020 Ein Überblick in Bildern und Zahlen", Online verfügbar: [https://www.bvdm-online.de/fileadmin/Druckindustrie/Die\\_deutsche\\_Druckindustrie\\_Ein\\_Ueberblick\\_in\\_Bildern\\_und\\_Zahlen.pdf](https://www.bvdm-online.de/fileadmin/Druckindustrie/Die_deutsche_Druckindustrie_Ein_Ueberblick_in_Bildern_und_Zahlen.pdf), zuletzt aufgerufen am 12.04.2021
- [Che86] Q. Chen, "Emulsification rate of sheet-fed offset ink and its effect on printed quality". Thesis, Rochester Institute of Technology, <https://repository.rit.edu/theses/857>
- [Des11] S. Deshpande, "Fountain Solution in Lithographic Offset Printing", *Journal of Engineering Research and Studies*, vol. 2, no. 2, pp. 82–88, Apr.-Jun. 2011, E-ISSN0976-7916
- [Els18] E. Dörsam, K. Hofmann, H. M. Sauer, C. Bodenstein, K. Hirmer, „ELSE – 3D-Tiefdruckverfahren für Elektronik (funktionale Schichten in einem indirekten 3D-Druck Verfahren“, Abschlussbericht, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2018
- [Fri87] B. Fritz, „Einflussgrößen auf die Feuchtmittelaufnahme von Offsetfarben“, *Farbe + Lack*, Frankfurt, 1987
- [Goo22] P. Goodarzi, A. Schütze, T. Schneider, "Comparison of different ML methods concerning prediction quality, domain adaptation and robustness", *tm - Technisches Messen*, vol. 89(4), 224-239, 2022, doi: 10.1515/teme-2021-0129

- [Ham21] T. Hambrock, Persönliche Mitteilung, Hanns Eggen GmbH & Co. KG, Februar 2021
- [Han93] K. Hanke, "Wechselwirkungen zwischen Druckfarbe und Feuchtmittel sowie deren Auswirkungen", Vortrag beim FOGRA-Symposium «Offsetdruck nass und trocken», München, 1993
- [Hei09] Heidelberger Druckmaschinen AG, "Profi Tipp - Feuchtmittel im Offsetdruck", Heidelberg, 2009, Online verfügbar: [https://www.hpv-ev.org/upload/profi\\_tipp\\_1\\_feuchtmittel.pdf](https://www.hpv-ev.org/upload/profi_tipp_1_feuchtmittel.pdf), zuletzt aufgerufen am 12.04.2021
- [Hei09\_2] Heidelberger Druckmaschinen AG "Profi Tipp - Problemfälle im Drucksaal", Heidelberg, 2009, Online verfügbar: [https://www.hpv-ev.org/upload/profi\\_tipp\\_1\\_feuchtmittel.pdf](https://www.hpv-ev.org/upload/profi_tipp_1_feuchtmittel.pdf), zuletzt aufgerufen am 12.04.2021
- [Hel15\_1] N. Helwig, E. Pignanelli, A. Schütze, "Condition monitoring of a complex hydraulic system using multivariate statistics", 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, pp. 210–215, 2015
- [Hel15\_2] N. Helwig, E. Pignanelli, A. Schütze, "D8.1 - Detecting and Compensating Sensor Faults in a Hydraulic Condition Monitoring System", Proceedings SENSOR, pp. 641–646, 2015
- [Hol23] E. Holle, F. Knödl, M. Mayer, T. Schneider, D. Spiehl, A. Blaeser, E. Dörsam, A. Schütze, "Control of ink-water balance in offset lithography by machine learning". In: Advances in Printing and Media Technology Vol. 49, S. 8-16, Darmstadt, Iarigai, 49th International Research Conference of Iarigai, Wuppertal, 18.09. - 20.09.2023, DOI: 10.14622/Advances\_49\_2023\_16
- [Ihk19] Industrie- und Handelskammer, "Technologietransfer", [www.heilbronn.ihk.de](http://www.heilbronn.ihk.de), Heilbronn-Franken, 2019, Online verfügbar: <https://heilbronn.ihk.de/produktmarken/branchen/industrie-und-innovation/technologietransfer2-4831146>, zuletzt aufgerufen am 17.04.2021
- [Kip01] H. Kipphan, "Handbuch der Printmedien: Technologien und Produktionsverfahren", Springer, Berlin Heidelberg, 2001, ISBN 3-540-67326-1
- [Kle19] S. Klein, T. Schneider, A. Schütze, "Automatisierte Zustandsbewertung industrieller Anlagen mittels maschinellem Lernen", Jahresmagazin Mess- und Sensortechnik 2019/2020, Institut für wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV), S. 72-78, 2019
- [Knö22] F. Knödl, E. Holle, S. Klein, A. Schütze, E. Dörsam, „Offsetdruck - Das Farb-Feuchtmittel-Gleichgewicht mit maschinellem Lernen in den Griff bekommen!“ P3 Paper Print Packaging, Heft 1-2, 2022, [https://www.researchgate.net/publication/370608467\\_Offsetdruck\\_-\\_Das\\_Farb-Feuchtmittel-Gleichgewicht\\_mit\\_maschinellm\\_Lernen\\_in\\_den\\_Griff\\_bekommen](https://www.researchgate.net/publication/370608467_Offsetdruck_-_Das_Farb-Feuchtmittel-Gleichgewicht_mit_maschinellm_Lernen_in_den_Griff_bekommen)
- [Knö23] F. Knödl, H. M. Sauer, J. Feldmann, D. Spiehl, A. Blaeser, E. Dörsam, "Investigation on an alternative printing plate for offset lithography". In: Advances in Printing and Media Technology Vol. 49, S. 99-110, Darmstadt, Iarigai, 49th International Research Conference of Iarigai, Wuppertal, 18.09. - 20.09.2023, DOI: 10.14622/Advances\_49\_2023\_15

- [Kub20] N. Kubasiak, "Regelung des Antriebsstrangs von Bogenoffsetdruckmaschinen", Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2020, <https://doi.org/10.25534/tuprints-00014039>
- [Lee20] I. Lee, Y. J. Shin, "Machine learning for enterprises: Applications, algorithm selection, and challenges", *Bus. Horiz.*, vol. 63, no. 2, pp. 157–170, 2020
- [Len13] E. Lenz, "Eine Methodik zur stochastischen adaptiven Qualitätsregelung", Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2013, ISBN 978-3-8442-6706-8
- [Lue16] K. L. Lueth, C. Patsioura, Z. D. Williams, Z. Z. Kermani, "The current state of data analytics usage in industrial companies", *Industrial Analytics 2016/2017*, 2016. Online verfügbar: <https://digital-analytics-association.de/wp-content/uploads/2016/03/Industrial-Analytics-Report-2016-2017-vp-singlepage.pdf>, zuletzt aufgerufen am 17.04.2021
- [Mas17] J. Masajew, H. Gute, A. Al Aboud, E. Dörsam, "Grenzen der Überdruckbarkeit", Schlussbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 18327 N der AiF, Technische Universität Darmstadt, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, Darmstadt, 2017, <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/6095/>
- [Mic20] L. P. Michel, C. Thiel, P. Ziegler, "Working Paper Forschungsförderung: Branchenanalyse Druckmaschinenindustrie: Branchen- und Strukturwandel, Zukunftsszenarien und Herausforderungen der Digitalisierung", Hans Böckler Stiftung, no. 189, Jul. 2020, ISSN 2509-2359
- [Paw12] K. Pawlowski, "Untersuchungen zur Bestimmung der Farbdichte druckfrischer Offsetfarben mit einem Druckinspektionssystem", Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2012, <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2761/>
- [Rie23] M. E. Rieckmann, P. Brumm, H. M. Sauer, E. Dörsam, F. Kummer; „Pressure and shear flow singularities: Fluid splitting and printing nip hydrodynamics“. In: *Physics of Fluids*, 35 (3), AIP Publishing, ISSN 1070-6631, DOI: 10.1063/5.0139000
- [Rie89] R. Riedl, D. Neumann; „Technologie des Offsetdrucks“, Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1989
- [Roi23] I. V. Roisman, M. Abboud, P. Brockmann, F. Berner, R. Berger, P. Rothmann-Brumm, H. M. Sauer, E. Dörsam, J. Hussong, „Forced flows in liquid bridges“. In: *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 67, Elsevier, ISSN 1359-0294, DOI: 10.1016/j.cocis.2023.101738
- [Ros06] A. Rosenberg, U. Bertholdt, H. Pertler, "Emulsionsbildung im Hochgeschwindigkeits-Rollenoffsetdruck - Notwendigkeit oder unvermeidbares Übel", *fogra-Forschungsbericht Nr. 52.027*, München, 2006
- [Sar15] R. Sarau "Offsetfeuchtwerk", Abschlussbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 17768/BG/1, Darmstadt, 2015
- [Sch17] A. Schütze, T. Baur, M. Leidinger, W. Reimringer, R. Jung, T. Conrad, T. Sauerwald, "Highly Sensitive and Selective VOC Sensor Systems Based on Semiconductor Gas Sensors: How to?", *Environments*, 4, 20, DOI: 10.3390/environments4010020, 2017

- [Sch18\_1] T. Schneider, N. Helwig, A. Schütze, "Industrial condition monitoring with smart sensors using automated feature extraction and selection", *IOP Meas. Sci. Technol.* (2018) 29 094002, 2018
- [Sch18\_2] A. Schütze, N. Helwig, T. Schneider, "Sensors 4.0 - smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0", *J. Sens. Sens. Syst.* 7, pp. 359-371, 2018
- [Sch19] T. Schneider, S. Klein, A. Schütze, "Machine learning in industrial measurement technology for detection of known and unknown faults of equipment and sensors", *tm - Technisches Messen*, 86 (11), pp. 706–718, doi: 10.1515/teme-2019-0086, 2019
- [Sch20\_1] A. Schütze, T. Sauerwald: „Dynamic operation of semiconductor sensors,“ in: R. Jaaniso, O. K. Tan (eds.): *Semiconductor Gas Sensors*, Woodhead Publishing, 2nd Edition, 385-412, ISBN: 9789176850039, doi: 10.1016/B978-0-08-102559-8.00012-4, 2020.
- [Sch20\_2] C. Schultealbert, T. Baur, T. Sauerwald, A. Schütze, „Erkennung und Kompensation von Vergiftung durch Siloxane auf Halbleitersensoren im temperaturzyklischen Betrieb“, *tm - Technisches Messen*, 87(S1), S120–S125, 2020, doi: 10.1515/teme-2020-0041
- [Spi18] C. Spiessberger, P. Mayr, "Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur kombinierten Schichtdicken- und Feuchtmittelmessung an einer Offset-Druckmaschine", Abschlussbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 18829 N, Universität Ulm, Institut für Lasertechnologie in der Medizin und Messtechnik, Ulm, 2018
- [Tan18] C. Tan, F. Sun, T. Kong, W. Zhang, C. Yang, C. Liu, "A Survey on Deep Transfer Learning", *ICANN 2018 Artificial Neural Networks and Machine Learning*, pp. 270–279, 2018
- [Tes10] H. Teschner, "Druck- und Medientechnik: Informationen gestalten, produzieren", Christiani, 13. Auflage, pp. 1028, Konstanz, 2010, ISBN: 978-3865226297
- [Tsu17] F. Tsung, K. Zhang, L. Cheng, Z. Song, "Statistical transfer learning: A review and some extensions to statistical process control", *Quality Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 115–128, 2017, doi: 10.1080/08982112.2017.1373810
- [Vdm15] VDMA, *Am Puls der Maschine: Condition Monitoring*, VDMA Verlag, 2015, Online verfügbar: [http://www.vdma-verlag.com/home/artikel\\_49.html](http://www.vdma-verlag.com/home/artikel_49.html), zuletzt aufgerufen am 17.04.2021
- [Vol07] J. Voltaire, W. Batchelor, A. Fogden, A. Sudarno, P. Banham, "New technique for monitoring ink-water balance on an offset press", *Appita Journal* 60(2), pp. 120–128, 2007, Online verfügbar: [https://www.researchgate.net/publication/268001270\\_New\\_technique\\_for\\_monitoring\\_ink-water\\_balance\\_on\\_an\\_offset\\_press](https://www.researchgate.net/publication/268001270_New_technique_for_monitoring_ink-water_balance_on_an_offset_press)
- [Wal87] W. Walenski, "Die Offsetfeuchtung unter die Lupe genommen", Bericht über ein Fogra Symposium, pp. 18–24, 1987

- [Web21] T. E. Weber, S. Klein, E. Dörsam, A. Schütze, "Vorstudie zur Kontrolle des Farb-Wasser-Gleichgewichts und der Schichtdicken im Offsetdruck durch Einsatz von maschinellem Lernen", Abschlussbericht, Technische Universität Darmstadt, 2021.
- [Wue16] T. Wuest, D. Weimer, C. Irgens & K. Thoben, "Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications", Production & Manufacturing Research, vol. 4, pp. 23-45, 2016, doi: 10.1080/21693277.2016.1192517
- [Zem21] Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, <https://zema.de/projekt/easy-ml/>, Aufruf am 17.04.2021