

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik
der Technischen Universität München

**Kognitive Prozesssteuerung zur Steigerung der
Ressourceneffizienz in der Druckindustrie**

Dipl.-Ing. (FH)
Martin Schmid

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen
Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann

Die Dissertation wurde am 12.04.2017 bei der Technischen Universität
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am
25.08.2017 angenommen.

Kurzfassung

Ein effizienter Umgang mit allen Produktionsressourcen bildet nicht nur die Grundlage für eine nachhaltige Industriegesellschaft, sondern auch eine Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg von produzierenden Unternehmen. In der Druckindustrie beispielsweise stellen die Kosten für Papier und Farbe etwa 80 % der gesamten Produktionskosten dar. Die kritischste Phase hinsichtlich der Produktqualität erstreckt sich vom Produktionsstart bis zum eingeschwungenen Zustand des Druckprozesses. Die Hauptursache für eine mangelnde Produktqualität ist die visuelle Wirkung der bedruckten Fläche, die sich näherungsweise proportional zur Farbschichtdicke verhält.

Die Regelung der Farbschichtdicke steht beispielhaft für eine Vielzahl von Produktions- und Verarbeitungsprozessen, in denen die qualitätsbestimmenden Ausgangsgrößen nicht stetig gemessen werden können und zusätzlich von diversen Einflussgrößen in unbekannter Weise abhängen. Diese Einschränkungen erschweren die Prozessführung und haben eine ungenügende Produktqualität zur Folge. Um die Ressourceneffizienz zu steigern, stellt die vorliegende Untersuchung ein Konzept vor, mit dem die Prozessführung optimiert und infolgedessen die erforderliche Produktqualität deutlich schneller erreicht wird als bisher.

Aufbauend auf dem gegenwärtigen Stand der Technik werden bewährte Konzepte auf deren Eignung hin geprüft. Die vorhandenen Einschränkungen des realen Produktionsprozesses verhindern einen unmittelbaren Einsatz bestehender Regelungskonzepte oder lassen lediglich geringe Verbesserungen zu.

Aus diesem Grund wird ein Konzept vorgestellt, mit dem ein Prozess in optimaler Weise gesteuert werden kann. Hierbei wird explizit berücksichtigt, dass Einflussgrößen das Prozessverhalten verändern. Das Konzept besitzt einen hybriden Aufbau, bei dem modellbasierte Regelungsmethoden mit maschinellen Lernverfahren kombiniert werden. Die Basis bildet der ursprüngliche Regelkreis mit der teilweise unterbrochenen Rückführung der Ausgangsgrößen zu einem neu konzipierten Regler. Um dem Regler stets die Ausgangsgrößen zur Verfügung zu stellen, wird ein zusätzliches Simulationsmodell vorgeschlagen. Dieses bildet das reale Prozessverhalten totzeitfrei und unmittelbar ab, einschließlich aller Nichtlinearitäten und manuellen Eingriffe. Die Reglerparametrierung erfolgt adaptiv anhand der Parameter des Simulationsmodells, sodass stets ein stabiler Regelkreis sowie ein gutes Führungsverhalten gewährleistet sind.

Das Simulationsmodell muss eine hohe Vorhersagegenauigkeit gegenüber dem realen Produktionsprozess besitzen. Eine Vielzahl an Einflussgrößen bewirkt ein verändertes Prozessverhalten. Daher dient ein Bestandteil des Regelungskonzepts dazu, die Wirkung der Einflussgrößen durch eine Adaption der Parameter des Simulationsmodells zu berücksichtigen. Durch maschinelle Lernverfahren werden die Parameter vor jedem Produktionslauf an die vorhandenen Einflussgrößen ange-

passt. Dafür werden die vergangenen Produktionsläufe analysiert und die optimalen Modellparameter in Kombination mit den vorhandenen Einflussgrößen in einer Wissensbasis gespeichert. Vor jedem Produktionslauf ermittelt das selbstlernende System die optimalen Modellparameter anhand der Einflussgrößen. Neben der Berücksichtigung externer Einflussgrößen wird zusätzlich dargelegt, wie modellinterne, zeitvariante Parameter über eine statistische Analyse des Prozessverhaltens nachgeführt werden können, um die Genauigkeit des Simulationsmodells weiter zu erhöhen. Für die Parameteridentifikation ist es unabdingbar, dass die in der Wissensbasis gespeicherten Daten von hoher Aussagekraft sind. Aus diesem Grund wird ergänzend ein Vorgehen zur Auswahl der Messgrößen sowie deren Plausibilisierung vorgestellt, um den vollautonomen Betrieb des Regelungssystems zu ermöglichen.

Die Validierung des vorgestellten Regelungskonzepts an einer Offsetdruckmaschine in der Produktion zeigt das technische und wirtschaftliche Potenzial der verbesserten Prozessführung auf. Neben deutlichen Einsparungen hinsichtlich der Produktionsressourcen sowie der Produktionszeit werden zusätzlich die Maschinenbediener von einer monotonen Prozessüberwachung entlastet. Die Einsparungen der Produktionsressourcen übertreffen die Aufwände zur Optimierung und Implementierung des Systems in die Maschinensteuerung bei Weitem. Das vorgestellte Konzept bietet eine hochwirtschaftliche Möglichkeit, um selbst bei bestehenden Maschinen die Ressourceneffizienz zu steigern und somit auch die Wettbewerbsfähigkeit der Druckereien zu erhöhen.

Inhaltverzeichnis

1	Herausforderungen für eine nachhaltige Produktion	1
1.1	<i>Ökonomische Rahmenbedingungen im industriellen Wettbewerb.....</i>	<i>1</i>
1.2	<i>Marktumfeld in der Druckindustrie.....</i>	<i>2</i>
1.3	<i>Bewertung der Qualität von Druckprodukten.....</i>	<i>3</i>
1.4	<i>Analyse der Regelung der optischen Dichte.....</i>	<i>7</i>
1.5	<i>Überblick zur vorliegenden Arbeit.....</i>	<i>8</i>
	1.5.1 Technische Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	8
	1.5.2 Wissenschaftliche Zielsetzung	9
	1.5.3 Aufbau der vorliegenden Arbeit.....	9
2	Grundlagen des Offsetdrucks und der Farbregelung.....	11
2.1	<i>Einordnung des Offsetdrucks in der grafischen Industrie</i>	<i>11</i>
2.2	<i>Aufbau einer Rollenoffsetdruckmaschine</i>	<i>12</i>
2.3	<i>Grundlagen des Farbtransports im Druckwerk.....</i>	<i>13</i>
2.4	<i>Charakterisierung der Qualitätsgröße „optische Volltondichte“.....</i>	<i>15</i>
3	Stand der Wissenschaft und Technik.....	19
3.1	<i>Rahmenbedingungen und Anforderungen an die Farbdichteregelung ...</i>	<i>20</i>
3.2	<i>Konzepte zur Steuerung offener Regelkreise.....</i>	<i>23</i>
	3.2.1 Anfahrmethoden in der Drucktechnik.....	23
	3.2.2 Steuerungskonzepte für Prozesse ohne Rückführung der Regelgrößen	25
3.3	<i>Berücksichtigung von Einflussgrößen.....</i>	<i>29</i>
	3.3.1 Charakterisierung von Einflussgrößen	29
	3.3.2 Auswahl der Einflussgrößen	29
	3.3.3 Robuste und adaptive Regelung.....	31
3.4	<i>Modellbasierte Regelung in der Wissenschaft und Anwendung</i>	<i>33</i>

3.4.1	Einordnung der modellbasierten Regelung	33
3.4.2	Beschreibung der modellbasierten, prädiktiven Regelung	34
3.5	<i>Modellierung des Druckprozesses</i>	36
3.5.1	Grundsätzliche Modellierungsalternativen.....	36
3.5.2	Kognitive Verfahren zur Prozessmodellierung.....	37
3.5.3	Bekannte Farbwerksmodelle	38
3.6	<i>Bewertung des Stands der Wissenschaft und Technik</i>	43
4	Konzept zur modellbasierten Steuerung parametervariabler Strecken	45
5	Realisierung der kognitiven Prozesssteuerung in der Druckindustrie ...	53
5.1	<i>Durchführung einer Systemanalyse</i>	54
5.1.1	Aufnahme der realisierungsrelevanten Rahmenbedingungen.....	54
5.1.2	Analyse des Adaptionsbedarfs	55
5.2	<i>Realisierung eines Simulationsmodells</i>	56
5.2.1	Auswahl des Modellierungsansatzes	56
5.2.2	Systemanalytische Abbildung des Farbwerks	56
5.2.3	Umsetzung des Simulationsmodells.....	73
5.3	<i>Aufbau eines Reglers für adaptive Systeme</i>	74
5.3.1	Möglichkeiten zur Realisierung des Reglers	74
5.3.2	Realisierung und Parametrierung des Reglers.....	74
5.3.3	Berücksichtigung mehrerer Stellgrößen	76
5.3.4	Simulative Validierung des Reglers	78
5.4	<i>Beschreibung des Maschinenverhaltens durch geeignete Kenngrößen</i>	80
5.4.1	Beschreibung der Parameteridentifikation.....	80
5.4.2	Methode zur gesteuerten Adaption der Prozessparameter	81
5.4.3	Charakterisierung der Einflussgrößen	83
5.4.4	Auswahl der zu betrachtenden Einflussgrößen	90
5.4.5	Erfassung der Daten	91

5.4.6 Bildung prozessbeschreibender Kenngrößen	93
5.4.7 Bestimmung der optimalen Modellparameter.....	93
5.4.8 Ergebnisse aus der Datenanalyse	94
5.4.9 Übersicht der verschiedenen Adaptionmöglichkeiten	96
5.5 <i>Berücksichtigung diverser Einflussfaktoren auf die Farbergiebigkeit.....</i>	98
5.5.1 Methoden zur Abbildung komplexer Zusammenhänge	98
5.5.2 Aufbau von neuronalen Netzen.....	99
5.5.3 Datenanalyse und Filterung	101
5.5.4 Clusterung der Daten.....	101
5.5.5 Normierung der Daten.....	104
5.5.6 Training des neuronalen Netzes	105
5.5.7 Automatische Wahl der geeignetsten Netztopologie	107
5.5.8 Ergebnisse der Parameteridentifikation	108
5.6 <i>Berücksichtigung maschinenbedingter Einflussfaktoren.....</i>	109
5.6.1 Beschreibung der realen Problemstellung	110
5.6.2 Grundüberlegung zur Ermittlung des ersten Farbübertrags	113
5.6.3 Auswertung der stationären Betriebspunkte	114
5.6.4 Validierung der Kompensation maschinenbedingter Einflüsse.....	116
5.6.5 Interpretation der Ergebnisse.....	117
5.7 <i>Verknüpfungen zwischen den Teilsystemen.....</i>	118
6 Validierung des Konzepts	119
6.1 <i>Validierung unter definierten Versuchsbedingungen</i>	119
6.2 <i>Rahmenbedingungen der Validierung in der Druckerei</i>	120
6.3 <i>Leistungsfähigkeit der Regelung im Produktionsbetrieb.....</i>	122
6.3.1 Analyse des Einsatzfalls „Andruck“	122
6.3.2 Analyse des Einsatzfalls „Fortdruck“	126

7	Technische und wirtschaftliche Bewertung.....	129
7.1	<i>Rahmenbedingungen der Bewertung</i>	129
7.2	<i>Technische Bewertung der kognitiven Farbdichteregelung.....</i>	130
7.3	<i>Wirtschaftliche Bewertung</i>	131
7.3.1	<i>Vorgehensweise zur wirtschaftlichen Bewertung.....</i>	131
7.3.2	<i>Wirtschaftliches Potenzial aus Sicht der Druckerei</i>	131
7.3.3	<i>Wirtschaftliche Bewertung aus Sicht des Systemanbieters</i>	136
7.4	<i>Zusammenfassung der technischen und wirtschaftlichen Bewertung..</i>	140
8	Zusammenfassung und Ausblick	141
8.1	<i>Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse.....</i>	141
8.2	<i>Weitere Einsatzfelder einer kognitiven, modellbasierten Regelung</i>	142
9	Literaturverzeichnis	145
10	Anhang.....	175
10.1	<i>Betreute Studienarbeiten</i>	175
10.2	<i>Veröffentlichungen des Autors</i>	176

Abkürzungs- und Akronymverzeichnis

°C	Grad Celsius
adaptiv	sich anpassend
AfA	Abschreibung für Abnutzung
Black-Box-Modell	Modellierung eines Systems, ohne die zugrundeliegenden Abhängigkeiten abzubilden
BS	Betriebsstunden
d.h.	dass heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DIN-A4	Formatgröße gemäß DIN mit der Spezifikation A4
e.V.	Eingetragener Verein
Ex.	Druckexemplar
IMC	Internal Model Control (Regelung mithilfe eines internen Referenzmodells)
ISO	International Organization for Standardization
K_S	Proportionalkonstante der Strecke
K_R	Proportionalkonstante des Reglers
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse)
Grey-Box-Modell	Mischung zwischen Black-Box- und White-Box-Modell, enthält Elemente beider Richtungen
mm	Millimeter
MLP	Multi-Layer-Perceptron (mehrschichtige, vorwärtsgerichtete Netzstruktur)
MPC	Model Predictive Control (modellprädiktive Regelung)
MRAC	Model Reference Adaptive Control (Regelung mithilfe eines sich anpassenden Referenzmodells)

Abkürzungs- und Akronymverzeichnis

Prozess-FMEA	Failure Mode and Effect Analysis (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse), bezogen auf komplette Prozesse
PI	Beschreibung des dynamischen Verhaltens mittels einem Proportional- und einem Integralanteils
PID	Beschreibung des dynamischen Verhaltens mittels einem Proportional-, Integral- und Differenzialanteils
PT ₁ -Modell	Modellierung eines Systems mit proportionalem Verhalten und einer Verzögerungszeit T ₁
t	Tonne
T _R	Zeitkonstante des Reglers
T _S	Zeitkonstante der Strecke
T _t	Totzeitanteil
s	Sekunde
Singleton- Fuzzy-Set	Möglichkeit zur Abbildung von Fuzzysets mithilfe einzelner Singletons (Peaks)
U _g	Untere Toleranzgrenze
U _o	Obere Toleranzgrenze
vgl.	vergleiche
VK	Verkaufspreis
White-Box-Modell	Modellierung eines Verhaltens bei vollständiger Kenntnis systeminterner Zustände
µm	Mikrometer

Verzeichnis der Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
AfA	€	Kosten aufgrund der Maschinenabschreibung
$A_{(\eta, t)}$	g/s	Aus dem Referenzsystem ausgetragene Farbmasse in Abhängigkeit der Breite η und der Zeit t
AB	-	Adaptionsbedarf
AB _{rel}	-	Relativer Adaptionsbedarf
BS	h	Betriebsstunden
CH	-	Calinski-Harabasz-Index
D _v	-	Optische Dichte
E _{Andruck}	€	Einsparungen in Andruckfall
E _{Fortdruck}	€	Einsparungen in Fortdruckfall
E _{ges}	€	Gesamte Einsparungen
E _{Rec}	€/t	Recyclingerlös
$E_{(\eta, t)}$	g/s	In das Referenzsystem eingetragene Farbmasse in Abhängigkeit der Breite η und der Zeit t
F _{Ydyn}	-	Dynamikfaktor der Stellgrößen
FD	%	Flächendeckung
FE _{eff}	g/m ²	Effektive Farbergiebigkeit
Glanz	GE	Optische Messgröße für den Glanz
G _{Pap}	g/m ²	Durchschnittliche Grammaturn
I _B	Can.	Lichtmenge des nicht bedruckten Papiers
I _V		Lichtmenge des bedruckten Papiers
K		Proportionalitätsfaktor der Verreibung
K _{En}	€/h	Energiekosten je Stunde
K _{Farb}	€/t	Kosten für eine Tonne Druckfarbe
K _{HB}	€/a	Jährliche Kosten für Hilfs- und Betriebsstoffe

Verzeichnis der Formelzeichen

K_{Umlage}	€/a	Umlageposten der Gemeinkosten je Jahr
K_{Pap}	€/t	Kosten je Tonne Papier
K_{Personal}	€/a	Jährliche Personalkosten
K_{Raum}	€/a	Anteilige, jährliche Raumkosten
K_{Wartung}	€/a	Jährliche Kosten für Wartung und Instandhaltung
$m_{(t)}$	kg/s	Farbmassenstrom
MSE	-	Mittlerer quadratischer Fehler
$\text{MSE}_{\text{Training}}$	-	MSE des neuronalen Netzes bei einem vorliegenden Trainingsdatensatz
$\text{MSE}_{\text{Validierung}}$	-	MSE des neuronalen Netzes bei einem vorliegenden Validierungsdatensatz
N	-	Anzahl der Elemente
$Q_{(\eta, t)}$	g/s	In das Referenzsystem durch Verreibung zugeführte oder abgeführte Farbmasse in Abhängigkeit der Breite η und der Zeit t
OD	-	Optische Dichte
R	mm	Radius
R_i	mm	Radius der Walze i
$S_{(t)}$	g	Im Referenzsystem gespeicherte Farbmenge in Abhängigkeit der Zeit t
T_{Einfluss}	s	Zeitkonstante der Einflussgröße
T_{End}	s	Endzeitpunkt
T_{Prozess}	s	Zeitkonstante des zu regelnden Prozesses
T_{Start}	s	Startzeitpunkt
V_{Farb}	g/m ²	Mittlerer spezifischer Farbverbrauch
Y_{vir}	-	Virtuelle Stellgröße
ZOE	%	Zonenöffnung
ZOE_O	%	Zonenöffnung des ersten Farbübertrags (Offset)
ZOE_{eff}	%	Effektive Zonenöffnung
$\text{ZOE}_{\text{mech max}}$	µm	Maximale lichte Öffnungsweite der Zonenschieber

Kleine lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
b	mm	Zonenbreite
d_{\max}	mm	Maximale lichte Öffnungsweite der Farbschieber
e		Regelfehler
f_{ein}	-	Einschnürfaktor am Farbduktor
f_{Farbzu}	-	Proportionalitätsfaktor der Farbzufuhreinrichtung
i	-	Laufender Index
$\dot{m}_{\text{eff axial}}$	g/s	Axial verriebener Farbmassenstrom
\dot{m}_{Papier}	g/s	Der auf das Papier übertragene Farbmassenstrom
$m_{(t)}$	g/s	Farbmassenstrom
n		Potenz zur Gewichtung des Prozesseinflusses
n_{Andruck}	-	Anzahl der Andruckereignisse jährlich
n_{FD}	%	Drehzahl des Farbduktors, bezogen auf die Maximaldrehzahl
$n_{\text{Fortdruck}}$	-	Anzahl der Fortdruckereignisse jährlich
S_D	μm	Schichtdicke der Farbe oder der Emulsion
$S_{D A}$	μm	Schichtdicke der Walze A
$S_{D A1}$	μm	Schichtdicke des Segments A 1
S_{Farb}	m	Wegstrecke der Farbe
$S_{\text{FD FW}}$	μm	Abstand zwischen dem Farbduktor und der Filmwalze
V_{mas}	m/s	Oberflächengeschwindigkeit der Walzen
y_{Netz}	-	Ausgabe des neuronalen Netzes
y_{soll}	-	Vorgegebener, idealer Wert für die Ausgabe des neuronalen Netzes

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	-	Farbspaltungsfaktor
α_{ij}	-	Farbspaltungsfaktor zwischen der Walze i und der Walze j
φ	Grad	Winkel
ΔQS	-	Fehlerquadratsumme
η	mm	Breite des Referenzelements
η	mm	Position des Referenzelements
ρ	kg/m ³	Physikalische Dichte
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit
ω_i	1/s	Winkelgeschwindigkeit der Walze i

1 Herausforderungen für eine nachhaltige Produktion

1.1 Ökonomische Rahmenbedingungen im industriellen Wettbewerb

Die weltweite Vernetzung über das Internet bestärkt den globalen Wettbewerb und die Vergleichbarkeit des Angebots von Waren und Dienstleistungen in bislang unbekanntem Ausmaß (GEISBERGER 2012; EL KELETY 2006). Dienstleister und Onlineportale bieten Möglichkeiten für den gezielten Vergleich von Produkten und Dienstleistungen. Gesetze, Vorschriften und technische Richtlinien schaffen einen gewissen Mindestqualitätsstandard. Insbesondere bei Massenprodukten mit nur wenigen Differenzierungsmöglichkeiten stellen die Beschaffungskosten oftmals das wichtigste Entscheidungskriterium dar. Diese Situation führt zu einem sehr intensiven Preiswettbewerb zwischen den Anbietern (SCHOLLE 2013).

Um Produkte kostengünstig und nachhaltig anbieten zu können, müssen die Selbstkosten der Produktherstellung minimiert werden (WESTKÄMPER 2006). Eine exemplarische Aufteilung der Selbstkosten ist in Abbildung 1 dargestellt (HENSCHHEL & DENNER 2010), wobei insbesondere die Dominanz der Materialkosten augenscheinlich wird. Diese Erkenntnis bestätigen weitere Studien (SCHRÖTER ET AL. 2012, S. 2; JOCHEM ET AL. 2005, S. 1).

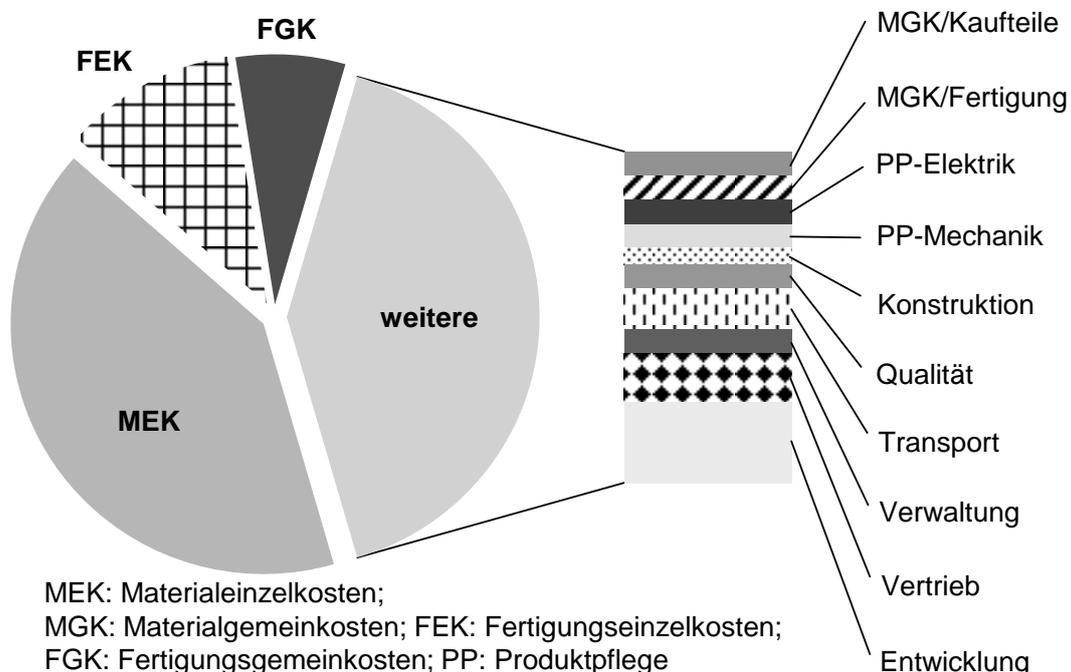


Abbildung 1: Exemplarische Zusammensetzung der Selbstkosten in Anlehnung an HENSCHHEL & DENNER 2010

Die exakte Zusammensetzung der Selbstkosten variiert stark je nach Produkt und erzeugter Stückzahl. Bei der Serien- und Massenfertigung steigt der prozentuale Anteil der Materialeinzelkosten an den gesamten Selbstkosten weiter an, sodass ein effizienter Ressourceneinsatz an Bedeutung gewinnt (DESTATIS 2014; ABELLE & REINHART 2011, S. 40; NEUGEBAUER 2008, S. 8; JOCHEM ET AL. 2005, S. 45).

1.2 Marktumfeld in der Druckindustrie

Die Druckindustrie ist von diesen Rahmenbedingungen besonders gekennzeichnet. Aufgrund der leicht sinkenden Nachfrage nach Druckgütern bei gleichzeitig wachsender Leistungsfähigkeit der Maschinen erhöht sich die verfügbare Produktionskapazität und infolgedessen der Konkurrenzdruck zwischen den Druckereien und ebenso zwischen den Druckmaschinenherstellern (NIEMELA 2013, S. 4 ff.; SCHOLLE 2013; BIALDIGA 2009; STIELER 2009, S. 34; WÜNSCH ET AL. 2009, S. 22). Da die Mindestanforderungen an die Druckqualität gemäß DIN EN ISO 12647 einheitlich vorgegeben sind, ist eine Differenzierung nur bei relativ wenigen Druckprodukten möglich (DISCHINGER 2010; BELZ 2004). Der Wettbewerb wird zum Großteil über die Kosten geführt (SCHMIDT 2013, S. 17; SCHOLLE 2013; STIELER 2009, S. 34). In der gesamten grafischen Industrie verursachen die Rohstoffkosten etwa 40 % der gesamten Produktionsaufwendungen (BVDM 2012). Der Lohnkostenanteil einschließlich der Lohnnebenkosten liegt bei 25,5 %, der Energiekostenanteil bei 1,2 % (BVDM 2012). Bei dieser Betrachtung sind ebenfalls dienstleistungsorientierte Betriebe ohne eigene Produktionsmöglichkeiten enthalten.

Bei produzierenden Betrieben liegt der Anteil der Rohstoffkosten an den Gesamtherstellungskosten noch deutlich höher. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 2 die Lebenszykluskosten einer 48-Seiten-Rollenoffsetdruckmaschine aufgeführt, wobei alle direkten und indirekten Kosten auf eine Produktionseinheit skaliert sind. Diese Referenzmaschine kann je Zylinderumdrehung bis zu 48 DIN-A4-Seiten auf eine durchlaufende Papierbahn drucken, was einem Papierdurchsatz von etwa 7 t je Stunde entspricht. Moderne Offsetdruckmaschinen bedrucken je Zylinderumdrehung bis zu 100 DIN-A4-Seiten, sodass deren Papierdurchsatz dementsprechend bis zu 15 t betragen kann (MANROLAND 2013).

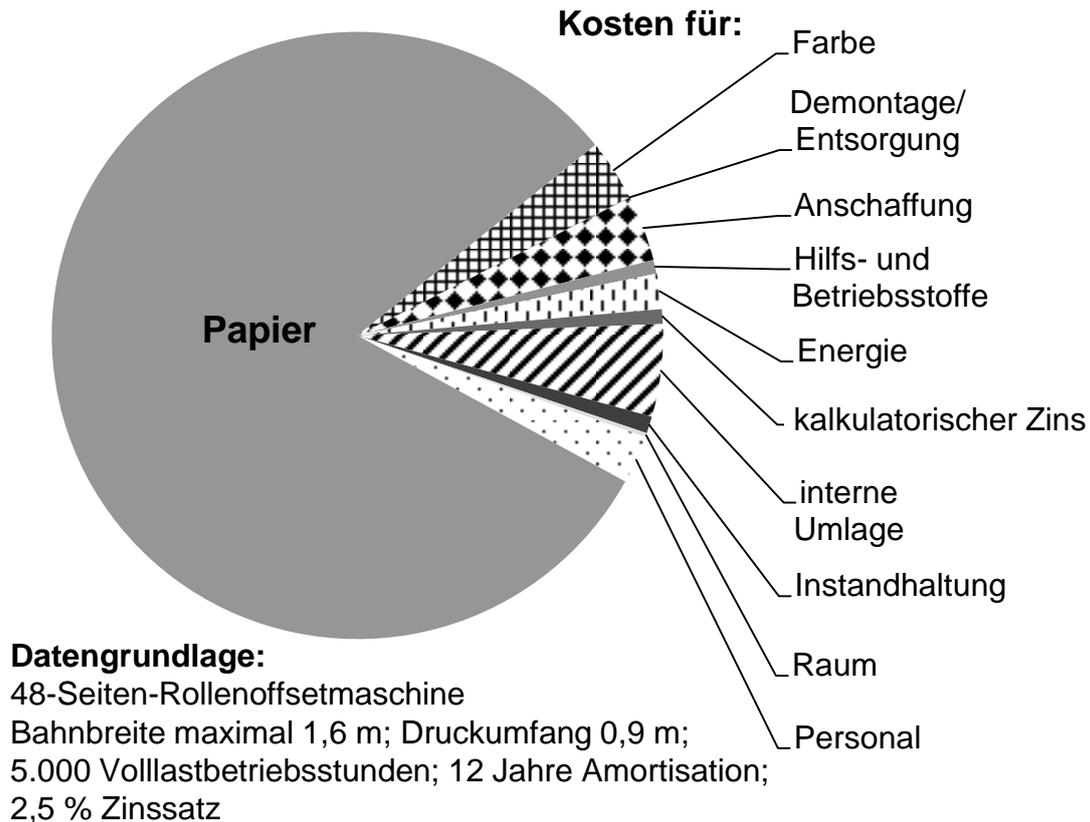


Abbildung 2: Zusammensetzung der Lebenszykluskosten einer Offsetdruckmaschine (SCHMID ET AL. 2014 A)

Rollenoffsetdruckmaschinen sind für Auflagenhöhen von 10.000 bis mehrere Millionen Exemplaren konzipiert. Die Anteile der Papier- und Farbkosten an den gesamten Lebenszykluskosten betragen über 80 %, die anteiligen Kosten der Maschineninvestition liegen bei etwa 5 %, die Energiekosten bei 3 %. Die Gemeinkosten enthalten alle indirekten Unternehmensbereiche, die zum Betrieb der Maschine notwendig sind (SCHMID ET AL. 2014 A). Aufgrund der Dominanz der Rohstoffkosten ist für eine wirtschaftliche Produktion ein möglichst effizienter Umgang mit den Verbrauchsmaterialien notwendig, allen voran mit dem Papier.

1.3 Bewertung der Qualität von Druckprodukten

Um eine hohe Materialeffizienz zu erreichen, muss die Produktqualität den Kundenanforderungen möglichst ab Druckbeginn entsprechen. Zur Bewertung der Qualität von Druckprodukten existieren verschiedene Parameter gemäß Abbildung 3, wobei die erste Untergliederung zwischen geometrischen Zielwerten (Farb- und Schnittregister, Bahn- und Stranglage sowie Falzlage) und dem farboptischen Eindruck der applizierten Farbschichten erfolgt. Die geometrischen Zielwerte beinhalten die zulässigen geometrischen Abweichungen zwischen den unterschiedlichen

Herausforderungen für eine nachhaltige Produktion

Farben (Farbregister), den Schnittkanten längs (Bahnlage) und quer (Schnittregister) zur Transportrichtung sowie die Lage des Falzes. Das Einrichten dieser Größen ist beispielsweise nach einem Formatwechsel oder nach einem Papierriss notwendig. Neuere Entwicklungen ermöglichen einen automatisierten Formatwechsel bei vergleichsweise geringer Makulatur (MANROLAND 2009). Als „Makulatur“ werden in der Druckindustrie diejenigen Exemplare bezeichnet, die aufgrund mangelhafter Qualität nicht verkauft werden können.

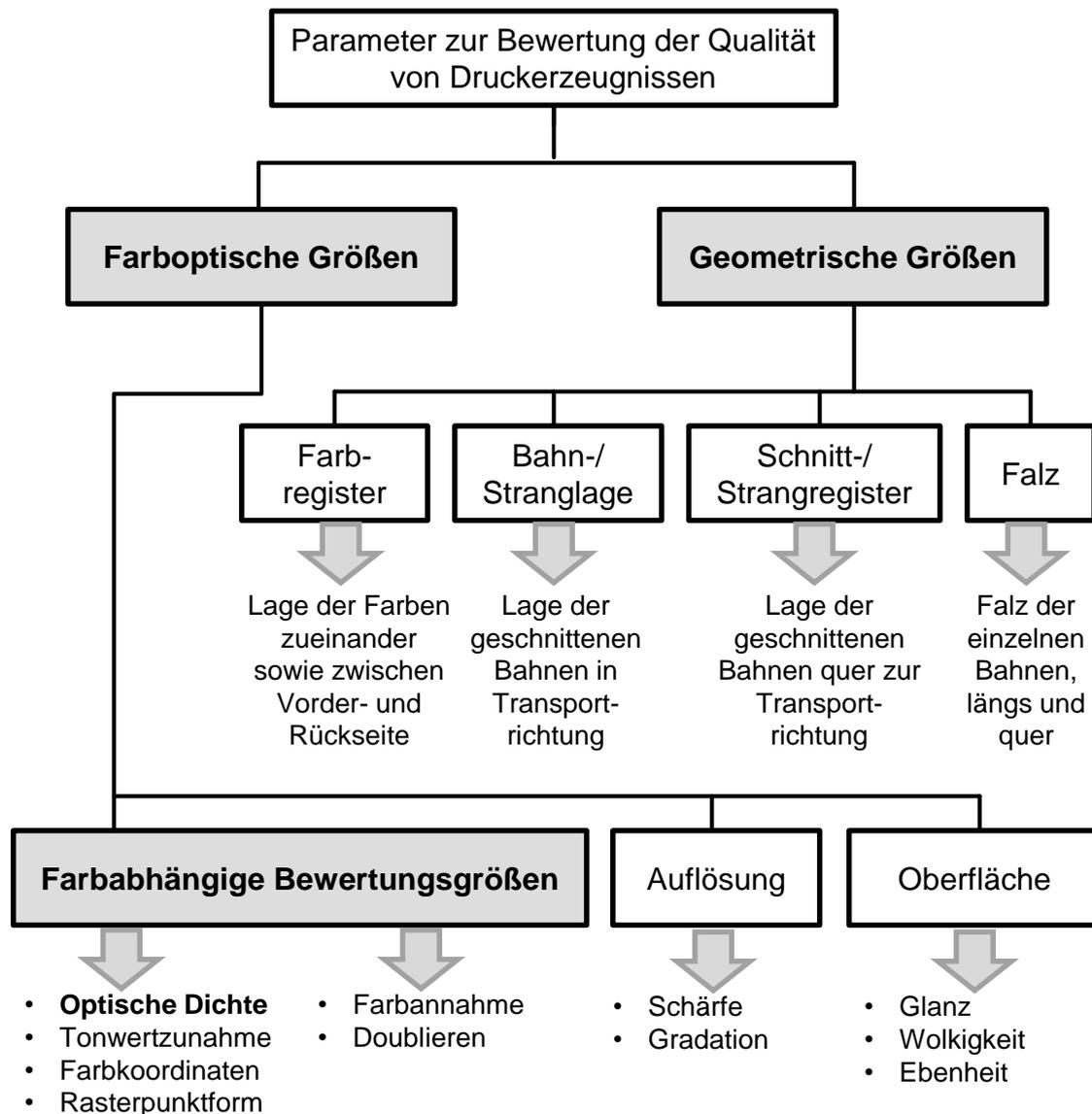


Abbildung 3: Darstellung verschiedener Qualitätskriterien von Druckexemplaren (eigene Darstellung nach KIPPHAN 2000)

Die farboptischen Größen beinhalten diverse Anforderungen bezüglich der Farbwiedergabe und der Gleichmäßigkeit des Farbauftrags sowie des Übergangs zwischen bedruckten und nicht bedruckten Bereichen.

Die Bewertungsgröße „optische Volltondichte“ oder kurz „optische Dichte“ sowie deren Messung werden in Kapitel 2.4 detailliert vorgestellt, da diese als entscheidende Qualitätsgröße für einen Großteil der Farbmakulatur verantwortlich ist. Die optische Dichte beschreibt vereinfacht die Farbmenge auf einer bedruckten Fläche im Vergleich zur unbedruckten Fläche und damit den optischen Eindruck. Auch geringe Schwankungen der optischen Dichte in großflächig bedruckten Bereichen sind vom Betrachter deutlich wahrnehmbar (KIPPHAN 2000). Sie kann bei jedem Produktionslauf aktiv durch verschiedene Stellgrößen verändert werden und wird selbst von einer Vielzahl an Größen beeinflusst. Die optische Dichte muss ebenfalls einen spezifischen Mindestwert erreichen, damit die weiteren maschineninternen Qualitätsregelkreise zuverlässig funktionieren (KIPPHAN 2000).

Im Vergleich dazu sind die anderen druckbedingten Qualitätsgrößen weniger durch die Maschineneinstellungen und mehr von den Eigenschaften der Verbrauchsmaterialien beeinflussbar. Die Tonwertzunahme beschreibt beispielsweise die Veränderung der optischen Dichte einer nicht vollflächig bedruckten Fläche im Vergleich zur voll bedruckten Fläche und hängt in hohem Maß von der Druckform und dem Zusammenspiel mit Farbe und Feuchtmittel ab. Die Druckform wird vor dem Drucken einmalig erstellt und bleibt während der gesamten Druckproduktion gleich. Die Rasterung, die Auflösung sowie die Rasterpunktform sind somit konstant. Die Erläuterungen der weiteren Größen führt KIPPHAN 2000 detailliert auf.

Alle Größen müssen gemäß DIN EN ISO 12647 und DIN EN ISO 2846 innerhalb der zulässigen geometrischen und farboptischen Toleranzen liegen. Moderne Druckmaschinen verfügen ferner über verschiedene Regelkreise, welche die Qualitätsgrößen automatisch erfassen und die Abweichungen zwischen Ist- und Sollwert minimieren. Dafür werden verschiedene sogenannte Druckmarken im Druckkontrollstreifen außerhalb des Druckbilds mitgedruckt. Beim Zuschnitt der Druckexemplare werden diese automatisch abgetrennt (WEICHMANN 2006, S. 2).

Die Anbringung des Druckkontrollstreifens sowie dessen Gestaltung zeigt beispielhaft Abbildung 4, wobei die Realisierung herstellerabhängig erfolgt.

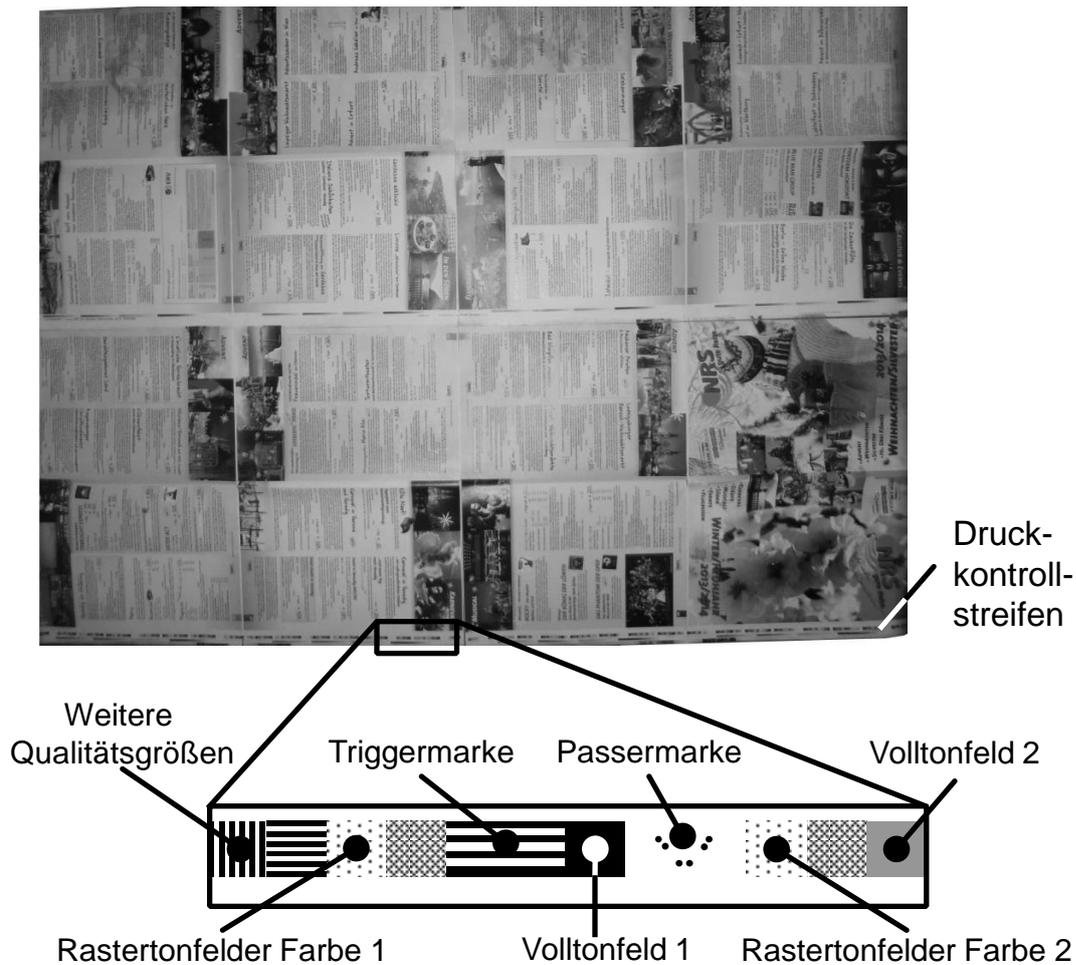


Abbildung 4: Erfassung der Qualitätskriterien von Druckerzeugnissen am Druckkontrollstreifen neben dem Druckbild (eigene Darstellung)

Die Triggermarke befindet sich mittig auf der Papierbahn und erzeugt ein charakteristisches Bitmuster während der sensorischen Abtastung. Sobald das Bitmuster erkannt wird, erfolgt die Messung der verschiedenen Qualitätsgrößen und die Regelungssysteme werden geschlossen.

In den Druckkontrollstreifen sind unterschiedliche Messfelder integriert. Für die Messung der optischen Dichte sind mehrere Volltonfelder für jede Farbe über die Druckbreite verteilt. Diese werden vollflächig bedruckt, um so den Farbmassenstrom zu bestimmen und zu regeln. Als Messgröße für den Farbmassenstrom dient die optische Volltondichte wie in Kapitel 2.4 erläutert. Daneben befinden sich mehrere nicht vollflächig bedruckte Kontrollmarken, die zur Beurteilung der Prozessstabilität oder weiterer Größen dienen. Zusätzliche Passermarken zeigen die Positionierung der einzelnen Druckfarben zueinander, um einen Farbversatz zu vermeiden.

Alle Messungen bedingen zwingend die Detektion der Triggermarke mit deren charakteristischem Bitmuster. Die Erkennung erfordert einen Mindestkontrast zwischen bedruckten und nicht bedruckten Bereichen, was einer optischen Dichte

von etwa 0,6 entspricht. Bei einer geringeren optischen Dichte wird die Position der Triggermarke und damit des Druckkontrollstreifens nicht zuverlässig erkannt. Um die Druckqualität insgesamt innerhalb möglichst kurzer Zeit zu maximieren, muss priorisiert die optische Dichte den Mindestwert für die Triggermarkenerkennung übersteigen, sodass alle weiteren Regelkreise geschlossen werden.

1.4 Analyse der Regelung der optischen Dichte

Für eine prozesssichere Regelung ist es notwendig, dass die Regelgröße stets gemessen werden kann. Abbildung 5 zeigt den Verlauf der optischen Volltondichte bei Druckbeginn. Der Zielwert der optischen Volltondichte beträgt 1,6 mit einer zulässigen Toleranz von $\pm 5\%$. Die Zielwerte liegen im realen Druckbetrieb zwischen 1,3 und 1,7, wobei die Zielwerte während eines Produktionslaufs konstant bleiben.

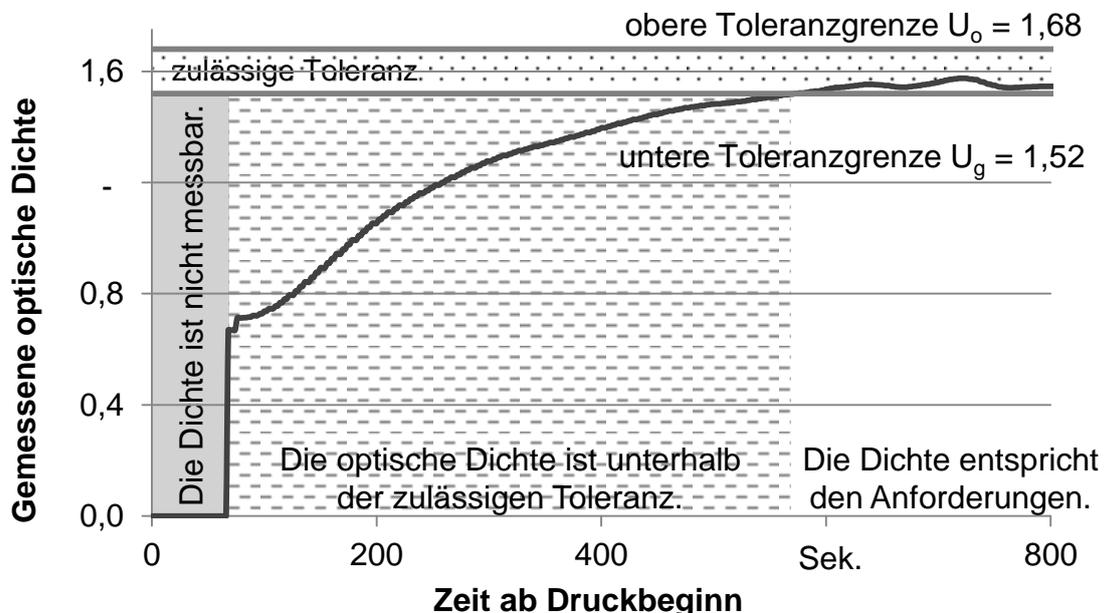


Abbildung 5: Verlauf der optischen Dichte bei Druckbeginn
(eigene Untersuchung)

Die ersten Dichtemesswerte werden etwa 70 Sekunden nach dem Umdruck auf das Papier gemessen, was 250 Exemplaren entspricht. Erst ab diesem Zeitpunkt werden die Triggermarke und der Druckkontrollstreifen prozesssicher erkannt. Mit den ersten Messwerten beginnt die Regelung der optischen Dichte sowie aller weiteren Qualitätsgrößen, die der Druckkontrollstreifen erfasst. Die optische Dichte steigt im weiteren Verlauf stetig an, bis nach etwa 570 Sekunden oder 2.200 Exemplaren die untere Toleranzgrenze U_g erreicht wird. Erst ab diesem Zeitpunkt erfüllt das Produkt die Kundenanforderungen hinsichtlich des Farbeindrucks. Die vorhergehenden Exemplare müssen als Makulatur entsorgt werden. Die Eigendynamik des Druckprozesses hängt stark von der Größe der bedruckten

Fläche ab. Diese Eigenschaft des Druckbilds beschreibt die technische Größe „Flächendeckung“. Das Druckbild des dargestellten Hochlaufs weist eine relativ geringe Flächendeckung von 5 % auf, was eine erhöhte Makulatur zur Folge hat. Bei höheren Flächendeckungen kann die erforderliche optische Dichte schneller erreicht werden, sodass weniger farbbedingte Makulatur anfällt. Reale Druckbilder weisen über die Druckbreite, die in einzelne Zonen mit definierter Breite unterteilt ist, Flächendeckungen zwischen 2 und 30 % für jede Grundfarbe auf. Für ein Gutexemplar müssen alle Zonen innerhalb der Toleranz liegen. Die Zone mit der geringsten Flächendeckung besitzt die größte Einschwingzeit und ist somit hauptverantwortlich für die farbbedingte Makulatur.

Der Farbtransport und der Umdruck auf das Papier werden von verschiedenen Größen beeinflusst, allen voran von der Flächendeckung sowie den verwendeten Verbrauchsmaterialien Papier und Farbe. Der quantitative Einfluss sowie die Wechselwirkungen zueinander sind jedoch unbekannt (KLAPPROTH 1991, S. 117). Zusätzlich ist der Maschinenzustand zu berücksichtigen, da der Optimalzustand der Maschine aufgrund verschiedenster Effekte (Verschmutzung, Verschleiß, Fehleinstellungen) im realen Betrieb nicht immer vorausgesetzt werden kann (JASPERNEITE 2012, S. 24). Wenn sowohl die Einflussgrößen in Bezug auf den Prozess als auch der Maschinenzustand bei der Prozessregelung beachtet werden, sind die Voraussetzungen für eine hohe Qualität und infolgedessen für eine ressourceneffiziente Druckproduktion geschaffen.

1.5 Überblick zur vorliegenden Arbeit

1.5.1 Technische Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Die Kosten der Verbrauchsstoffe bilden den größten Kostenanteil bei der Herstellung von Druckprodukten, weshalb deren effiziente Nutzung Grundlage einer nachhaltigen Produktion ist. Eine unzureichende optische Dichte ist häufig Ursache für eine ungenügende Druckqualität, was deren Verwurf zur Folge hat. Technische Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es deshalb, ein Regelungskonzept zu entwerfen, mit dem bei Druckbeginn die optische Dichte möglichst schnell den zulässigen Toleranzbereich erreicht.

Eine große Herausforderung stellt die Tatsache dar, dass die Regelgröße erst ab etwa 40 % des Sollwerts gemessen werden kann. Das Übertragungsverhalten der Regelstrecke ist nichtlinear, tozeitbehaftet und hängt in unbekannter Weise von verschiedenen Einflussgrößen ab. Das Regelungskonzept ist so zu gestalten, dass es auch bei unterschiedlichen Druckmaschinentypen ohne umfangreiche Neuparametrierung oder separate Versuche eingesetzt werden kann.

1.5.2 Wissenschaftliche Zielsetzung

Das wissenschaftliche Ziel dieser Arbeit ist die Definition eines Regelungskonzepts für Prozesse, in denen die Regelgrößen nicht kontinuierlich bestimmbar und deren Verhalten formal nur ungenau beschreibbar sind. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Streckenverhalten des zu regelnden Prozesses von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst wird, wobei deren Relevanz und Wirkungsweisen nicht ausreichend bekannt sind. Das Regelungskonzept bietet einen Rahmen, wobei je nach verfügbaren Prozesskenntnissen und Fähigkeiten unterschiedliche Lösungsbausteine möglich sind. Das Konzept wird für den Anwendungsfall „Regelung der optischen Volltondichte“ in der Drucktechnik validiert. Abschließend erfolgen eine technische und wirtschaftliche Bewertung des Regelungskonzepts in der Drucktechnik sowie die Prüfung der Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsgebiete.

1.5.3 Aufbau der vorliegenden Arbeit

Der inhaltliche Aufbau der vorliegenden Arbeit ist in Abbildung 6 dargestellt.

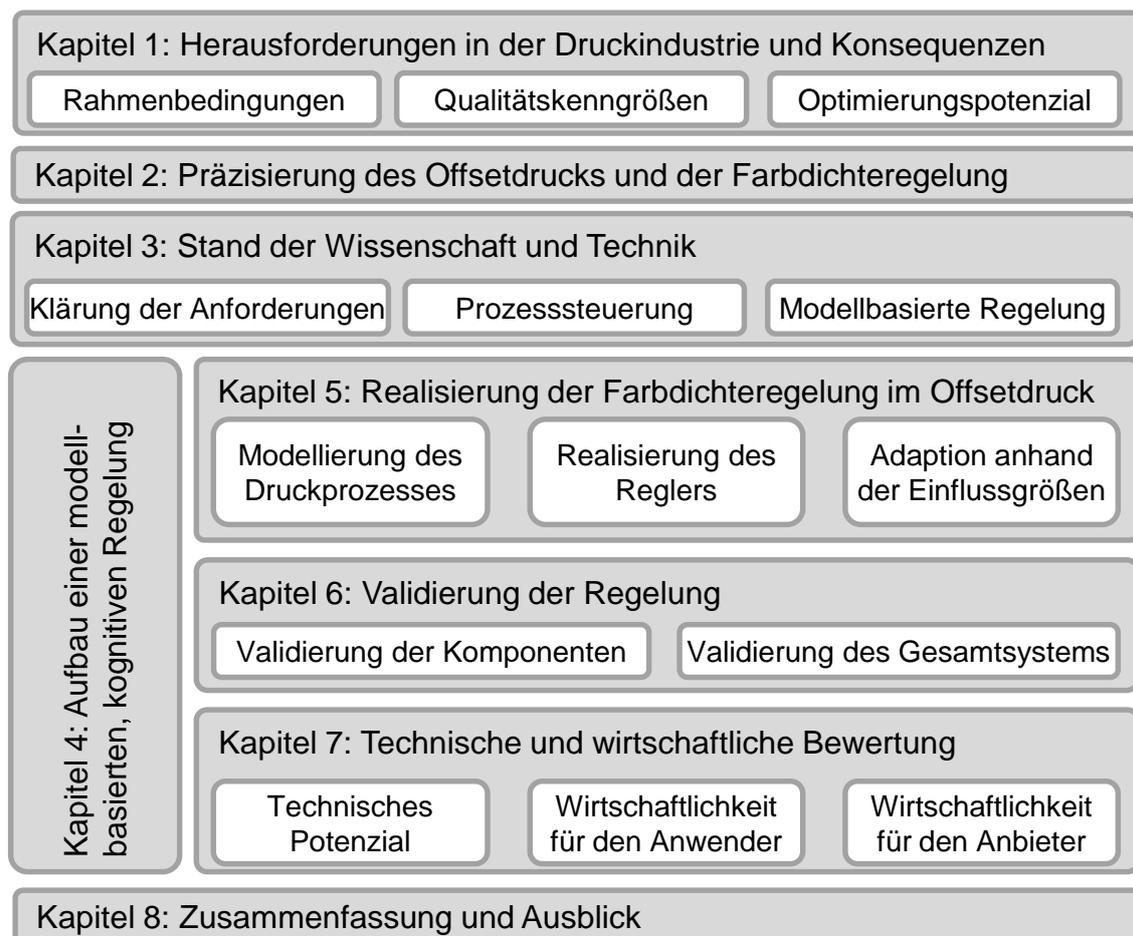


Abbildung 6: Überblick über die behandelten Themen dieser Arbeit

Die Farbdichteregulierung im Offsetdruck bei Produktionsstart bildet das technische Fundament dieser Arbeit. Hiervon leitet sich verallgemeinert die wissenschaftliche Fragestellung ab. Um die Problemstellung nachzuvollziehen, sind die Eigenschaften und die Charakteristik des Offsetdruckprozesses in Kapitel 2 ausführlich erläutert. Ebenfalls werden die Rahmenbedingungen der Farbdichteregulierung dargelegt, um den Stand der Wissenschaft und Technik geeignet abzugrenzen und die die Notwendigkeit der vorgestellten Schritte zu verdeutlichen. Basierend auf einer Analyse der prozessseitigen Anforderungen wird der Stand der Wissenschaft und Technik in Kapitel 3 zusammengefasst. Die ermittelten Regelungsverfahren werden auf deren Eignung für die beschriebene Problemstellung eines offenen Steuerkreises mit teils unbekannter Prozessdynamik bewertet. Ebenfalls wird ein Konzept zur Klassifizierung und Kompensation von Einflussgrößen vorgestellt. Zudem werden im Vorgriff auf Kapitel 5 kognitive Verfahren erläutert, welche mathematisch nicht bekannte Zusammenhänge nachbilden können. Anschließend folgt in Kapitel 4 die Darstellung und Detaillierung des Regelungskonzepts, welches die gestellten Anforderungen erfüllt. In Kapitel 5 schließt sich die Umsetzung des Konzepts für den Offsetdruck an, wobei verschiedene Konzepte insbesondere zur Berücksichtigung der Einflussgrößen eingesetzt werden. Dies ist physikalisch begründet in den unterschiedlichen Wirkungsweisen der Einflussgrößen auf den Druckprozess. In Kapitel 6 erfolgt die Validierung des Regelungskonzepts, sowohl für die einzelnen Bestandteile als auch für das Gesamtsystem. Darauf baut die technische und wirtschaftliche Bewertung in Kapitel 7 auf. Sie beinhaltet sowohl die initialen Entwicklungsaufwände als auch die Zusatzarbeiten, um das Regelungssystem in Druckereien einzusetzen. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden in Kapitel 8 zusammengefasst. Hier erfolgt ebenfalls ein Ausblick auf weitere potenzielle Anwendungsgebiete.

2 Grundlagen des Offsetdrucks und der Farbregelung

2.1 Einordnung des Offsetdrucks in der grafischen Industrie

Der Offsetdruck ist das weltweit verbreitetste Druckverfahren und wird diese herausragende Stellung in der Zukunft weiterhin behaupten, wie Studien (SMYTH 2013; WAITE 2009) und Fachbeiträge belegen (MÜLLER MARTINI 2013, S. 30; KIPPHAN 2000, S. 53) und Abbildung 7 zeigt.

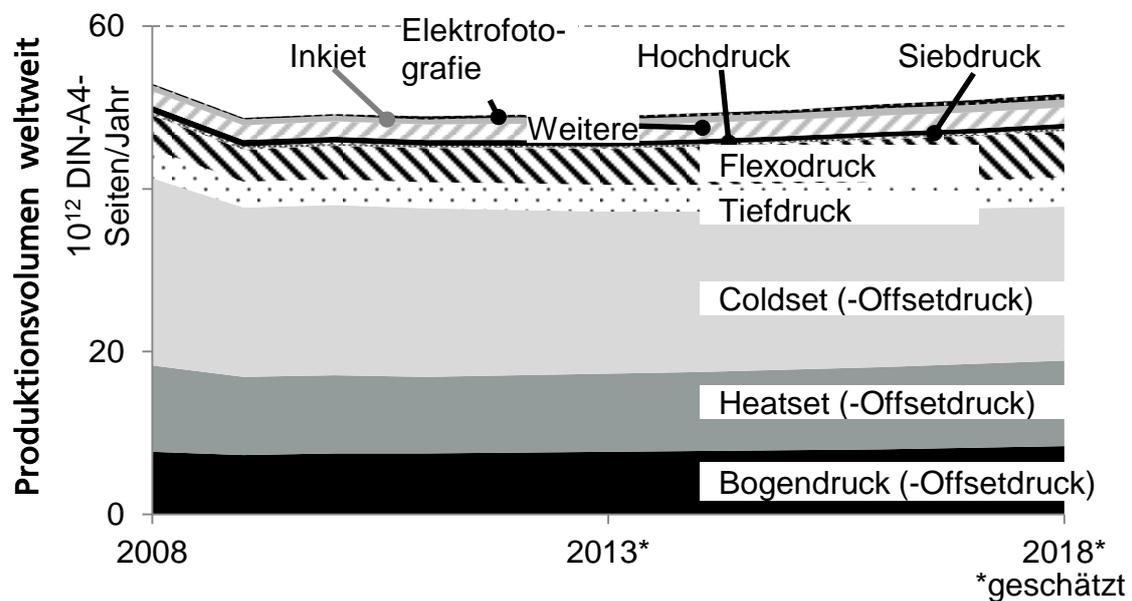


Abbildung 7: Produktionsvolumen der wichtigsten Druckverfahren bis 2020 weltweit (eigene Darstellung nach SMYTH 2013)

Das physikalische Grundprinzip des Offsetdrucks findet in den oben genannten Verfahren Heatset, Coldset und Bogenoffsetdruck Verwendung. Dabei liegen die farbführenden und die farbfreien Bereiche der Druckform in derselben Ebene und unterscheiden sich lediglich durch unterschiedliche Oberflächenenergien voneinander. Während im Heatset das Lösemittel der Farben im Trockner verdunstet und die Farbe auf der Bedruckstoffoberfläche trocknet, nimmt im Coldset das saugfähige Papier das Lösemittel auf. Eine nachfolgende Trocknung ist nicht mehr notwendig. In beiden Fällen geschieht die Bereitstellung der Papierbahn endlos von der Rolle. Im Gegensatz hierzu erfolgt die Papierzufuhr im Bogenoffset über Stapel einzelner Bögen oder Blätter in verschiedenen Formaten. Der Marktanteil der drei Varianten des Offsetdrucks liegt bei über 70 %, wobei für die kommenden Jahre nur geringe Marktverschiebungen zu erwarten sind. Die übrigen Druckverfahren besitzen im Vergleich hierzu bedeutend niedrigere Marktanteile. Insbesondere dem Digitaldruck mit den Ausprägungen Inkjet und Elektrofotografie werden

aufgrund hoher Kosten nur geringe Druckvolumina eingeräumt (SMYTH 2013). Aufgrund dieser Dominanz bieten effizienzsteigernde Maßnahmen im Offsetdruck das höchste Potenzial für Ressourcen- und Kosteneinsparungen.

2.2 Aufbau einer Rollenoffsetdruckmaschine

Der Offsetdruck und die dazugehörigen Druckmaschinen zeichnen sich durch diverse Besonderheiten aus, die für die Untersuchungen im Folgenden relevant sind. Abbildung 8 zeigt daher den Aufbau einer Heatset-Rollenoffsetdruckmaschine sowie die Funktionen der einzelnen Komponenten.

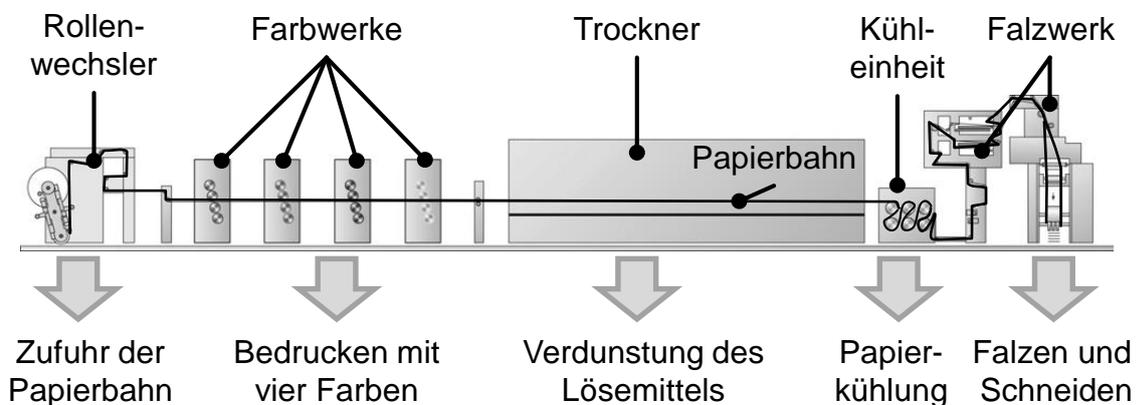


Abbildung 8: Darstellung einer Heatset-Rollenoffsetdruckmaschine (in Anlehnung an MANROLAND WEB 2013)

Die Papierbahn wird im Rollenwechsler von einer Papierrolle abgewickelt und dem Druckprozess zugeführt. Der Rollenwechsler ermöglicht das automatische Wechseln der leeren Papierrolle auf eine neue Rolle bei voller Produktionsgeschwindigkeit. Nach dem Rollenwechsler schließt sich in den vier Farbwerken (Schwarz, Cyan, Magenta und Gelb) der eigentliche Druckvorgang an. Das primäre Ziel des Druckvorgangs ist es, die passende Farbmenge gleichmäßig an den richtigen Stellen auf das Papier zu drucken. Die Unterscheidung zwischen farbführenden und farbfreien Bereichen erfolgt durch unterschiedliche Oberflächenenergien auf den Druckplatten. Damit die farbfreien Stellen keine Farbe aufnehmen, werden diese vorab mit Feuchtmittel benetzt. Eine Anhaftung durch Farbe ist damit nicht mehr möglich. Im Gegensatz hierzu legt sich die Druckfarbe auf den restlichen Flächen ab. In den Druckwerken bildet sich eine Farb-Feuchtmittlemulsion, weshalb beide Komponenten aufeinander und auch auf die Druckplatte abgestimmt sein müssen (KIPPHAN 2010, S. 54). Die Papierbahn wird in der Regel beidseitig bedruckt.

Im Anschluss an den Druckvorgang verdunsten im Trockner das Feuchtmittel sowie die in den Farben enthaltenen Lösemittel. Damit die Nachverarbeitung (Falzen,

Schneiden, Binden) prozesssicher ablaufen kann, folgt nach dem Trockner eine Kühleinheit, in der das Papier und die Farbe gekühlt und rückbefeuchtet werden (KIPPHAN 2000, S. 172). Anschließend erfolgen der Falz, der Zuschnitt und das Vereinzeln der Druckexemplare. Direkt an die Druckmaschine schließt sich die Weiterverarbeitung sowie die Vorbereitung für den Versand an.

Offsetdruckmaschinen sind für den kontinuierlichen Betrieb ausgelegt und erreichen sehr hohe Durchsatzleistungen. Die dabei erreichbare hohe Druckqualität und die niedrigen Prozesskosten begründen die weite Verbreitung des Offsetdrucks bei vielen Anwendungen wie Zeitschriften, Zeitungen oder im Verpackungsdruck (MÜLLER MARTINI 2013, S. 30; SMYTH 2013, S. 22).

2.3 Grundlagen des Farbtransports im Druckwerk

Im Druckwerk werden die Farbe und das Feuchtmittel auf das Papier aufgetragen. Für beide Medien Farbe und Feuchtmittel existieren jeweils eigene Zuführeinrichtungen, wie in Abbildung 9 am mechanischen Aufbau des Druckwerks für die Papieroberseite erkennbar ist. Das Druckwerk der Unterseite ist analog dazu aufgebaut. Die beiden Druckwerke bilden zusammen ein Farbwerk.

Der mechanische Aufbau des Farbwerks kann herstellerabhängig unterschiedlich gestaltet sein. Die Farbzufuhr erfolgt über den Farbkasten, der mit Farbe befüllt und über dem sich langsam drehenden Farbduktor geschlossen ist. Durch einen Spalt zwischen Farbkasten und Farbduktor wird Farbe auf der Oberfläche des Farbduktors aus dem Farbkasten ausgetragen und auf die Filmwalze übertragen. Zwischen beiden Walzen besteht ein Spalt von etwa 50 bis 80 μm , sodass diese unterschiedliche Oberflächengeschwindigkeiten annehmen können. Alle anderen Walzen berühren sich und weisen etwa dieselbe Oberflächengeschwindigkeit auf, welche der Geschwindigkeit der Papierbahn entspricht.

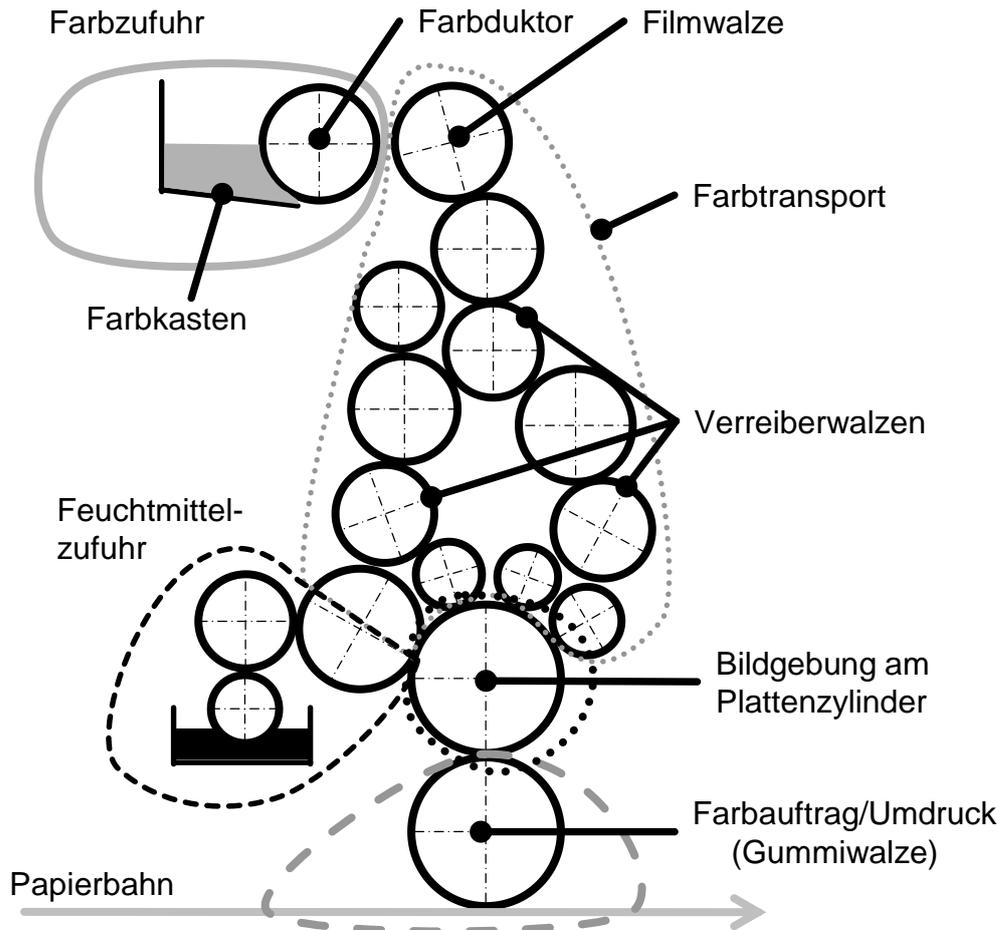


Abbildung 9: Schematischer Aufbau eines konventionellen Offsetdruckwerks

Die auf die Filmwalze übertragene Farbschicht wird im Farbwerk gleichmäßig auf den Walzen verteilt, wobei insbesondere die axial changierenden Verreiberwalzen Schichtdickenunterschiede in Achsrichtung ausgleichen. An den Berührungspunkten der Walzen vermengen sich die Farbschichten beider Walzen und trennen sich anschließend wieder. Dieser Vorgang wird als „Farbspaltung“ bezeichnet. Dadurch verringern sich bei stationärem Farbfluss die Schichtdicken bis zum Plattenzylinder auf 1,5 bis 4 μm . Die Farbschicht auf dem Plattenzylinder soll möglichst gleichmäßig verteilt sein, um einen homogenen Farbeindruck des Druckbilds zu erreichen. Am Plattenzylinder erfolgt die Bildgebung durch die Druckplatte, auf der das farbspezifische Druckbild aufgebracht ist. Um eine Benetzung der farbfreien Stellen mit Druckfarbe zu verhindern, wird vorab das Feuchtmittel auf den Plattenzylinder aufgebracht. Das Feuchtmittel, welches zu über 95 % aus Wasser sowie verschiedenen Additiven besteht, kann dem Plattenzylinder direkt zugeführt werden, da sich Mengenunterschiede nicht druckbildrelevant auswirken. Ein Teil des Feuchtmittels gelangt in das Farbwerk, das restliche Feuchtmittel wird über die Druckplatte auf das Papier umgedruckt. Vom Plattenzylinder erfolgt über den Gummizylinder der Umdruck auf das Papier (KIPPHAN 2000, S. 214 ff.).

Aufgabe des Farbwerks ist es, eine gleichmäßig dünne Farbschicht für den Farbauftrag auf das Papier bereitzustellen, wobei die Schichtdicke s_D auf dem Papier je nach Farbe und Sollfarbeindruck 0,7 bis 1,5 μm beträgt. Um den Sollwert zu erreichen und ein Überfärben zu verhindern, muss die zugeführte Farbmenge der auf das Papier umgedruckten Farbmenge entsprechen.

Je gleichmäßiger die Farbschicht ist, desto höher ist die erzielbare Druckqualität. Da der Farbbedarf je nach Druckbild über die Druckbreite variiert und zu viel Farbe einen fehlerhaften Farbeindruck zur Folge hätte, ist die Farbzufuhr in einzelne Zonen mit einer Breite von etwa 40 mm eingeteilt, die separat angesteuert werden können. Die für die Validierung zur Verfügung stehende Druckmaschine besitzt eine maximale Druckbreite von 1,56 m mit 39 Zonen je Druckwerk. Bei beidseitigem Druck mit vier Grundfarben sind 312 identische Regelkreise für die Farbdichteregulierung vorhanden.

2.4 Charakterisierung der Qualitätsgröße „optische Volltondichte“

Die technische Bewertung des Farbeindrucks erfolgt durch die Größe „optische Volltondichte“, mit welcher der visuelle Eindruck sowie der subjektive Bewertung durch den Betrachter nachgebildet wird (KIPPHAN 2000, S. 68). Der Farbeindruck lässt sich alternativ über den optischen Farbort definieren, welcher auf der Farbmetrik basiert. Im Folgenden dient als Zielwert die optische Volltondichte, wobei beide Größen ineinander umgerechnet werden können. Der messtechnische Aufbau und der Messablauf der Dichtemessung sind in DIN 16536 verbindlich definiert, was Abbildung 10 stark vereinfacht darstellt. Als Basis dient eine Lichtquelle mit definierter Wellenlängenverteilung. Die auf eine Empfangseinheit auftreffende Lichtmenge I wird ermittelt. Durch den Vergleich der reflektierten Lichtmenge des unbedruckten Bereichs mit der des bedruckten Bereichs lässt sich die wellenlängenspezifische Lichtabsorption der Farbschicht bestimmen und daraus die optische Dichte berechnen (PAWLOWSKI 2010). Im realen Aufbau sind weitere optische Filter und Komponenten integriert, um die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit zu erhöhen.

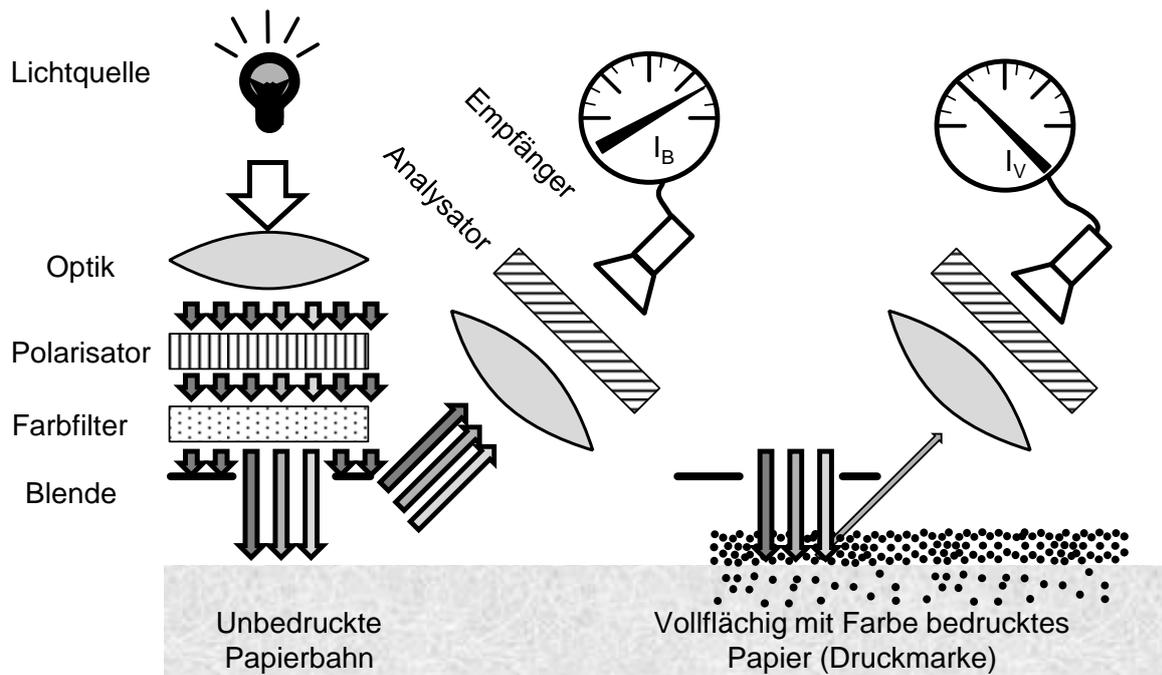


Abbildung 10: Messung der optischen Volltondichte
(eigene Darstellung in Anlehnung an KIPPHAN 2000)

Die optische Volltondichte berechnet sich wellenlängenspezifisch aus dem Verhältnis der reflektierten Lichtmenge I_V im vollständig bedruckten Bereich zur Lichtmenge I_B des nicht bedruckten Bereichs gemäß Gleichung 2-1 (KIPPHAN 2000, S. 103).

$$D_v = \log \left(\frac{I_B}{I_V} \right) \quad 2-1$$

Es ist zu beachten, dass in beiden Fällen die Reflexion des Lichts größtenteils erst auf dem Papier erfolgt, da es sich um lasierende Druckfarben handelt. Das Licht muss deshalb zwei Mal die Farbschicht der Dicke $s_{D \text{ Farb}}$ durchqueren. Die in der Farbe enthaltenen Farbpigmente (etwa 15 % der Gesamtfarbmasse nach FETTER 2009) absorbieren die Lichtstrahlung der korrespondierenden Wellenlängenbereiche. Die optische Dichte der Farbschicht hängt von vielen Faktoren ab, unter anderem von der Schichtdicke, von der Pigmentierung der Farbe (hoch- oder niedrigpigmentiert), von der Oberflächenstruktur und den Bestandteilen des Papiers. Das Verhältnis von Farbschichtdicke zu resultierender optischer Dichte ist idealisiert in Abbildung 11 dargestellt.

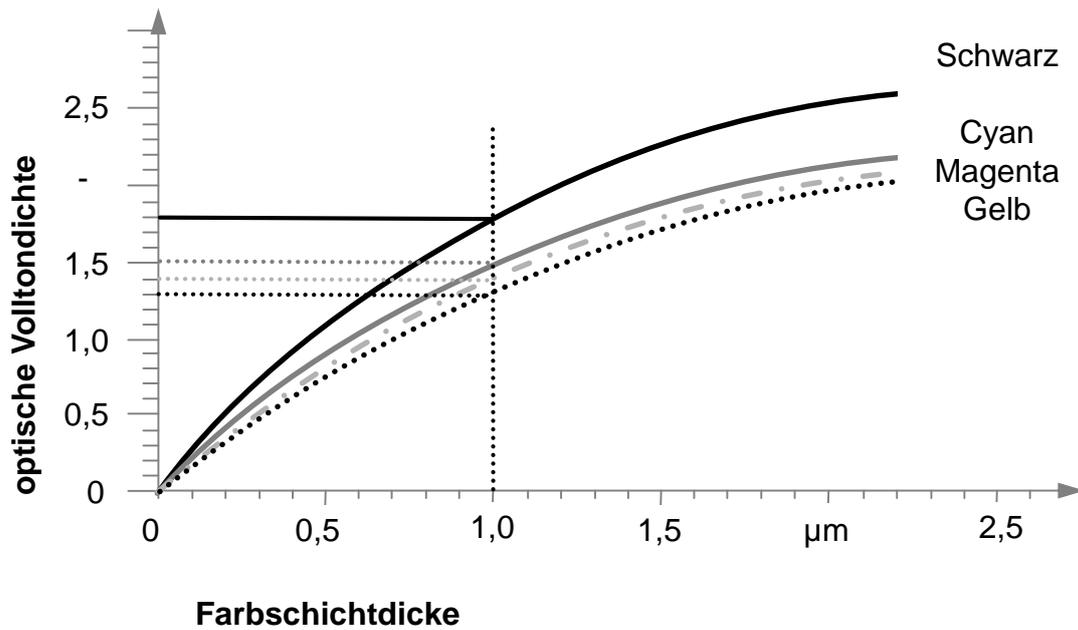


Abbildung 11: Verhältnis der optischer Volltondichte zur Farbschichtdicke (eigene Darstellung nach KIPPHAN 2000, S. 105)

Im praxisrelevanten Bereich der optischen Dichte von 1,2 bis 1,8 kann meist ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Farbschichtdicke und der optischen Volltondichte angenommen werden. Im linearen Bereich bildet die effektive Farbergiebigkeit FE_{eff} das Verhältnis zwischen der optischen Volltondichte D_V und der Farbschichtdicke s_D gemäß Gleichung 2-2 nach.

$$FE_{eff} = \frac{D_V}{s_D} \quad 2-2$$

FE_{eff} beinhaltet alle Einflussfaktoren des Umdrucks und ist implizit in vielen Untersuchungen enthalten. Für definierte Kombinationen von Verbrauchsmaterialien, Druckbedingungen und weiteren Rahmenbedingungen ist die Berechnung anhand von Versuchsergebnissen möglich. Es ist zu beachten, dass die effektive Farbergiebigkeit FE_{eff} erst im eingeschwungenen Zustand einen konstanten Wert aufweist. Chargenschwankungen der Verbrauchsmaterialien beeinflussen die Farbergiebigkeit ebenso wie veränderte Produktionsgeschwindigkeiten oder Maschineneinstellungen (KIPPHAN 2000, S. 106).

Die effektive Farbergiebigkeit ist von vielen Einflussgrößen abhängig und gilt streng genommen nur für eine definierte Kombination der Prozessparameter. Eine Extrapolation auf andere Betriebspunkte ist nicht zulässig (CAI 2010; KIPPHAN 2000, S. 215). Für verschiedene Parameterkombinationen ist in Abbildung 12 das Verhältnis der Schichtdicke zur optischen Dichte beispielhaft gezeigt, welcher die effektive Farbergiebigkeit FE_{eff} darstellt.

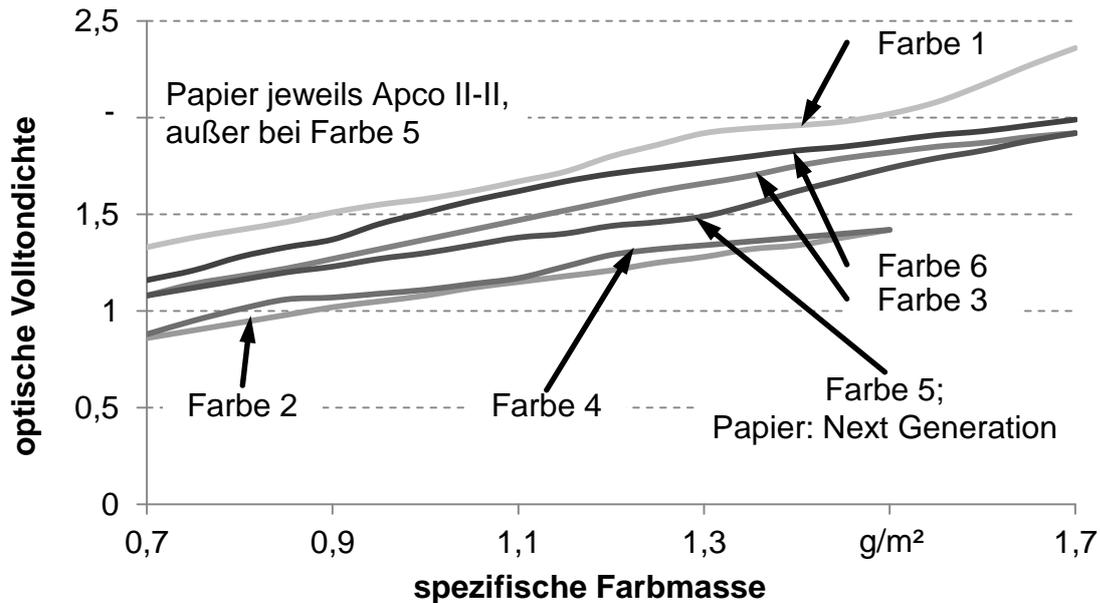


Abbildung 12: Abhängigkeit der optischen Volltondichte von der spezifischen Farbmasse auf dem Papier als Maß für die Schichtdicke (eigene Darstellung nach DISCHINGER 2010)

Je nach Kombination von Papier und Farbe ergeben sich gravierend unterschiedliche Farbergiebigkeiten. Vergleichbare Aussagen werden in SID 2013, S. 22, dargestellt, wobei die Versuchsbedingungen nicht detailliert beschrieben und deshalb die Werte nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Bisher kann aus der Papier-/Farb- und Feuchtmittelkombination keine allgemeingültige Aussage bezüglich des Farbbedarfs abgeleitet werden, was für eine exakte Steuerung der Farbzufuhr notwendig wäre. Um die erforderliche optische Dichte zu gewährleisten, ist die Messung derselben zwingend erforderlich. Aufgrund der hohen Prozessgeschwindigkeiten sowie der hohen Anzahl an Regelkreisen kann dies nur mit einer vollautomatisierten Messung wirtschaftlich erfolgen. Bei Druckbeginn ist die Messung gemäß Kapitel 1.3 nur ungenügend möglich, was als Hauptursache für hohe Makulaturwerte gilt.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Offsetdruck hat eine lange Geschichte, weshalb die Maschinenhersteller über hohes Expertenwissen und ausgereifte Methoden der Prozessführung verfügen. Die Fortschritte in der Steuerungstechnik und Sensorik haben leistungsfähige Konzepte zur Regelung aller Qualitätskriterien ermöglicht, die insbesondere im stationären Betrieb eine gleichbleibend hohe Produktqualität sicherstellen. Aufgrund des Zwangs der Kosteneinsparung sowie der sinkenden durchschnittlichen Auflagenhöhe erhält das Anfahrverhalten eine zunehmende Bedeutung (BETZMEIER 2014, S. 17; LENZ 2014, S. 16; DÖRSAM ET AL. 2010, S. 71; KOMORI 2008 A, S. 2). Für die Anfahrphase existieren verschiedene Vorgehensweisen, um eine hohe Druckqualität bei minimaler Makulatur zu gewährleisten. Deren Darstellung erfolgt in Kapitel 3.2.1. Zuvor werden die wesentlichen Herausforderungen der Farbdichteregelung in Kapitel 3.1 prozessneutral formuliert. Anhand der Rahmenbedingungen werden Regelungsaufgaben abseits der Druckindustrie aufgeführt, bei denen die Regelgrößen ebenfalls nicht gemessen werden können und dementsprechend der Prozess gesteuert werden muss (Kapitel 3.2.2). Die Lösungen für diese Anwendungsfälle bieten Ansätze für eine optimierte Farbdichteregelung.

Der Einsatz von Steuerungen ohne eine Rückführung von Ausgangsgrößen erfordert eine möglichst exakte Kenntnis des Prozessverhaltens. Dazu ist es erforderlich, wesentliche Einflussgrößen zu berücksichtigen. Da speziell für den Druckprozess eine Vielzahl von Einflussgrößen existiert, sind die entscheidenden Größen zu ermitteln und zu berücksichtigen (Kapitel 3.3).

Sind die Regelgrößen nicht messbar, können sie alternativ über ein Modell berechnet werden. Hierzu existieren verschiedene modellbasierte Regelungskonzepte sowie Modellierungsansätze zur Erstellung des Prozessmodells, die in Kapitel 3.4 aufgeführt sind. Anschließend werden bestehende Farbwerksmodelle für den Farbtransport sowie den Farbauftrag auf deren Einsetzbarkeit für die Farbdichteregelung bewertet. Abschließend erfolgen die Zusammenfassung der ermittelten Methoden sowie deren Bewertung bezüglich der Eignung zur Farbdichteregelung.

3.1 Rahmenbedingungen und Anforderungen an die Farbdichteregelung

Die Regelung der optischen Dichte besitzt diverse Besonderheiten, welche sowohl im Druckprozess als auch in der Messung der optischen Dichte begründet liegen. Zur automatischen Messung der Regelgröße muss diese, je nach Messverfahren, einen Mindestwert von etwa 0,6 aufweisen, um die notwendige Triggermarke prozesssicher zu erkennen. Dies entspricht einem Mindestwert von etwa 40 % des Sollwerts für die Farbe „Schwarz“. Unter diesem Wert kann keine automatische Messung erfolgen. Dies hat eine Unstetigkeit sowie eine variable initiale Totzeit der Farbdichtemessung zur Folge, die von der Regelgröße direkt abhängt. Die Zeitkonstanten des Farbwerks und des Farbtransports hängen sowohl von den Maschineneinstellungen als auch vom herzustellenden Produkt ab. Der für die Berechnung notwendige Parameter Farbergiebigkeit ist nicht exakt bekannt. Zudem beeinflussen diverse Größen sowie der Maschinenzustand den Farbtransport. Der Initialzustand des Farbwerks schwankt zwischen einem vollständig geleerten Farbwerk in Andruckfall, wenn dies vorher gewaschen wurde, sowie einem vollständig befülltem Farbwerk im Fortdruckfall, sodass in erster Näherung keine Änderungen der Stellgrößen notwendig sind. Nachfolgend sind die wesentlichen Rahmenbedingungen aufgeführt, welche für die Regelungskonzeption zu berücksichtigen sind:

- Die Regelstrecke ist stark totzeitbehaftet, wobei die Höhe der Totzeit abhängig ist von den Maschineneinstellungen (Produktionsgeschwindigkeit, Position der Sensorik) sowie von der Regelgröße (Mindestwert der optischen Dichte).
- Die Prozessparameter unterliegen Schwankungen aufgrund mehrerer Einflussfaktoren, deren Wirkungsweisen nicht bekannt sind.
- Der Maschinenzustand kann gegenüber dem Optimalzustand abweichen und beeinflusst das Prozessverhalten in hohem Maß.
- Die Regelgröße sowie die internen Systemzustände hängen von der vorhergehenden Produktion ab (Restfarbmenge im Farbwerk).

Die aufgeführten Punkte erschweren eine konventionelle Regelung oder führen zu einem sehr trägen Regelungsverhalten. Allen voran die Unzulänglichkeiten der Dichtemessung verhindern eine effektive Regelung der Volltondichte während des Anfahrvorgangs. Da die Regelgröße nicht rückgeführt werden kann, handelt es sich zu Produktionsbeginn um eine Prozesssteuerung (open loop control). Um eine leistungsfähige Prozesssteuerung zu realisieren, muss der Prozess kausal und reproduzierbar sein (KOFAHL 1988, S. 6). Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass beide Bedingungen erfüllt sind, wenngleich das Farbwerksverhalten aufgrund einer Vielzahl an Einflussgrößen einer begrenzten Schwankungsbreite unterliegt. Aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen und deren vermuteten Wechselwirkungen sind separate Versuche nicht zielführend, zudem verändert sich das Farbwerks-

verhalten quasistatisch aufgrund von Verschmutzungs- und Alterungseffekten bei den Walzenbeschichtungen. Erst nach dem Erreichen der Mindestdichte und der daraus folgenden Messbarkeit sind die Regelung und damit die Kompensation aller Störeinflüsse prozesssicher möglich. Sobald die Regelgröße zurückgeführt werden kann, existieren diverse Regelungskonzepte und Auslegungskriterien für den Regler (LUTZ & WENDT 2010; FÖLLINGER & DÖRRSCHEIDT 2008; SCHULZ 2002). Die wesentlichen Anforderungen an das Farbregelungssystem sind nachfolgend aufgeführt und finden sich in praktisch allen Regelungsaufgaben wieder (ISERMANN 2008, S. 350; SCHULZ 2002):

- Die wichtigste Anforderung stellt die Stabilität unter allen realistischen Bedingungen und Parameterkombinationen dar.
- Ein gutes Führungsverhalten ist erforderlich, um die Makulatur bei Druckstart zu minimieren und die Ressourceneffizienz zu steigern.
- Ein gutes Störungsverhalten bei Prozessschwankungen (Papier- oder Farbwechsel, Temperaturschwankungen, etc.) gewährleistet einen stabilen Betrieb.
- Die Berücksichtigung der zeitvarianten Effekten im Streckenverhalten (Totzeit, Parameterschwankungen), der Sensorik (variierende Totzeit der Messung) sowie der Stellgrößen (Offset, mehrere Stellgrößen) (BAVDEKAR ET AL. 2012; REINHART ET AL. 2012, S. 62; JOHN 2009, S. 16; AL-MUTAWA 1993; KAMMÜLLER 1993, S. 3; KOFAHL 1988, S. 15; TIETZE 1973, S. 18) stellt eine hochwertige Produktqualität sicher.
- Die Beachtung des Initialzustands der Druckmaschine ermöglicht ein angepasstes Maschinenverhalten bei Produktionsbeginn.
- Verschiedene implizite Anforderungen ergeben sich aus der Integration des Systems in der Druckmaschine, wodurch der verfügbare Lösungsraum eingeschränkt ist.

Zusammenfassend existieren vielfältige technische und auch betriebliche Anforderungen an die Farbdichteregelung. In Abbildung 13 sind diese in Anlehnung an MARX 2014 klassifiziert in Basis-, in Leistungs- und in Begeisterungsmerkmale. Die fokussierten Ziele der vorliegenden Arbeit befinden sich im ersten Quadranten, welche aus der Perspektive der Forschung die wesentlichen Herausforderungen darstellen. Die weiteren Punkte sind insbesondere für die Validierung an der realen Maschine in der Druckerei zu berücksichtigen, werden jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht explizit thematisiert, da dies für die wissenschaftliche Bearbeitung nicht relevant ist.

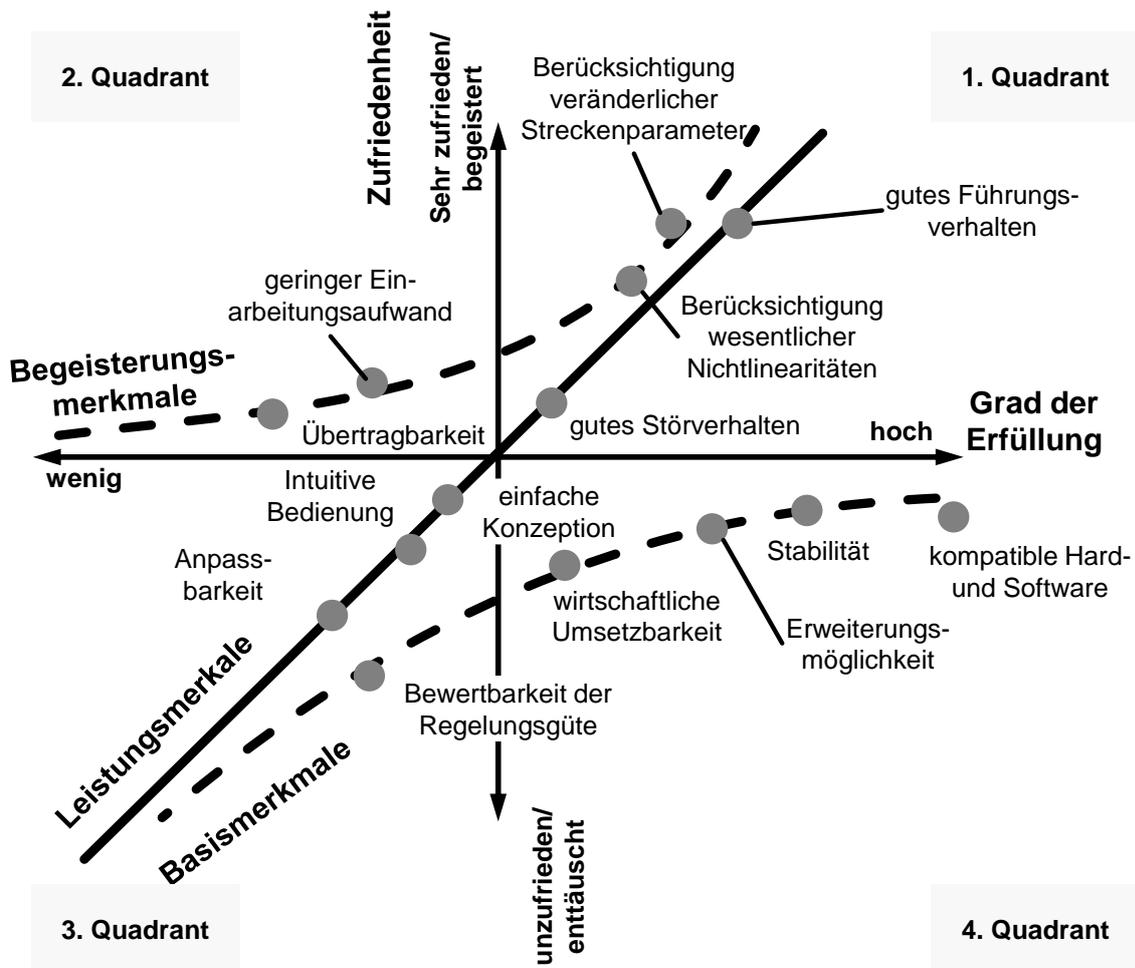


Abbildung 13: Klassifizierung der Anforderungen in Bezug auf die Kundenzufriedenheit (eigene Bewertung der Merkmale)

Die Bewertung der einzelnen Merkmale für die zu konzipierende Farbdichteregelung dient als Basis, um die Anforderungen zu strukturieren und Prioritäten zu setzen. Die in der Zielsetzung in Kapitel 1.5.1 beschriebene Anfahrregelung fokussiert ein gutes Führungsverhalten, um die Einschwingdauer zu minimieren. Die wesentliche Bewertungsgröße ist somit die farbbedingte Makulatur. Aufgrund der Ausführungen bezüglich der Totzeit der Messung ist zu ergänzen, dass ein allgemeingültiger mathematischer Stabilitätsnachweis bei variierenden und unbekanntem Totzeiten nicht möglich ist (KROLL 1993, S. 6). Im Rahmen der Reglerauslegung in Kapitel 5.3 werden verschiedene Konzepte vorgestellt, welche ein stabiles Systemverhalten gewährleisten.

3.2 Konzepte zur Steuerung offener Regelkreise

In den folgenden Kapiteln sind Steuerungsverfahren aufgeführt, die sich in der Drucktechnik (Kapitel 3.2.1) sowie in weiteren Anwendungsgebieten (Kapitel 3.2.2) als geeignet erwiesen haben, um komplexe Prozesse zu steuern. Kapitel 3.4 befasst sich mit modernen Regelungsmethoden, die ein Simulationsmodell beinhalten und dadurch eine Prozessregelung ermöglichen.

3.2.1 Anfahrmethoden in der Drucktechnik

Um trotz fehlender Regelgrößenrückführung die Zieldichte innerhalb kurzer Zeit zu erreichen, werden die Stellgrößen bei Druckbeginn voreingestellt (GATEAUD & MAYER 2003) oder Anfahrsequenzen eingesetzt (HUBER 2008; ZELLER & STUHMILLER 2006; SEYMOUR 2004; STUHMILLER 2002; ISHIDA 1998). Die Voreinstellwerte werden durch festgelegte Abläufe (KOMORI 2008 A; KOMORI 2008 B; EHBETS ET AL. 2005; SEYMOR 2004; ZELLER & STUHL-MILLER 2002; MAYER & PFEIFFER 2000), durch die Analyse des stationären Druckbetriebs (CHIA LIN & SEYMOUR 1996) oder mithilfe von Probedruckbögen ermittelt (LENZ 2013; ELTER & PFEIFER 2008; MAYER & PFEIFER 2003). Je nach Reifegrad der Prozessregelung werden das Druckbild, Papier und Farbe sowie weitere Größen berücksichtigt (GATEAUD & MAYER 2003). Abbildung 14 zeigt eine Auswahl relevanter Veröffentlichungen zur Beschreibung des Druckprozesses.

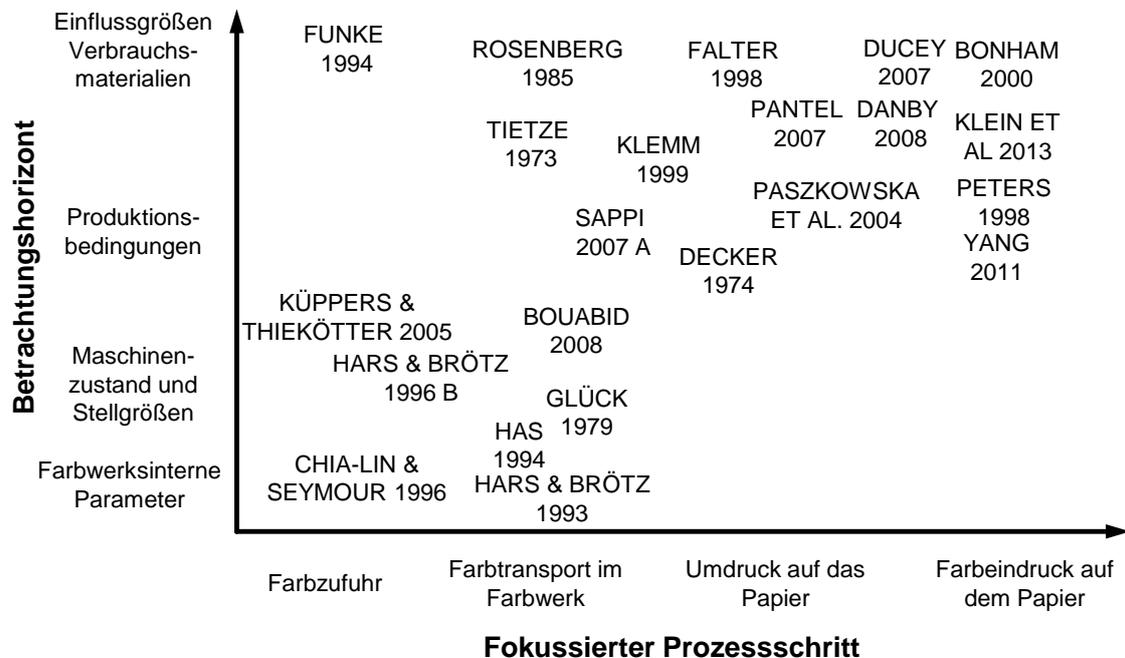


Abbildung 14: Auswahl an Arbeiten zur Detaillierung des Druckprozesses

Da der Druckprozess als gut beherrscht angesehen werden kann, reduzieren sich aktuelle Forschungsarbeiten auf Detaillösungen bezüglich der Prozessoptimierung. Umfassende Forschungsarbeiten werden bei den Maschinenherstellern und Zulieferern für die Qualifizierung neuer Materialien und Funktionsschichten durchgeführt (STAHL 2013). Die wissenschaftlichen Untersuchungen fokussieren sich auf unterschiedliche Prozessschritte des Druckens sowie auf verschiedene Einflussgrößen. So wurden diverse Versuche mit unterschiedlichen Papieren (YANG 2011; DUCEY 2007; PASZKOWSKA ET AL. 2004; PETERS 1998;), Farben (BERTHOLDT 2012; WANG 2012; WERMUTH 2004; PETERS 1998; FUNKE 1994), Feuchtmitteln (JOHN 2009; KAMMÜLLER 1987; ROSENBERG 1985; DECKER 1974; TIETZE 1973), Druckbildern (ZELLER & STUHMILLER 2002) und Maschinenkonfigurationen (BOUABID 2008) durchgeführt, um die Abhängigkeiten des Farbeindrucks von den verschiedenen Einflussgrößen zu bewerten und daraus die optimalen Stellgrößen abzuleiten.

Eine Zusammenführung der Ergebnisse ist jedoch nicht möglich, da die Rahmenbedingungen der Versuche entweder nicht bekannt oder nicht vergleichbar sind und Chargenschwankungen naturgemäß nur wenig berücksichtigt werden. Vollfaktorielle Versuchsreihen stehen aufgrund der hohen Anzahl von Einflussgrößen ebenfalls nicht zur Verfügung (GATEAUD & MAYER 2003, S. 2). Zudem ist die Übertragung der Ergebnisse zwischen unterschiedlichen Maschinen sowie die Konstanz der Verbrauchsstoffe als kritisch zu beurteilen, insbesondere bei einer Betrachtung über längere Zeitintervalle (GATEAUD & MAYER 2003, S. 5; ALMUTAWA 1993, S. 299).

Aufgrund der Vielfalt von Verbrauchsstoffen und Maschinenkonfigurationen werden für die Optimierung der initialen Stellgrößen die bereits durchgeführten Produktionsdrucke als Referenzen verwendet. Die im stationären Druckbetrieb ermittelten Werte der Zonenöffnungen und Duktordrehzahlen werden zusammen mit den dazugehörigen Einflussgrößen als validierte Betriebspunkte hinterlegt. Alle Betriebspunkte bilden Referenzdatensätze für ähnliche Rahmenbedingungen, wobei insbesondere die Flächendeckungen, die Bedruckstoffeigenschaften und die Farbeigenschaften berücksichtigt werden (MANROLAND 2012; KOMORI 2008 A).

Die vorgestellten Ansätze dienen sowohl dem Anfahr- als auch dem Fortdruckprozess und reduzieren die Makulatur in beiden Fällen bereits beträchtlich. Insbesondere bei niedrigen Flächendeckungen ist die farbbedingte Makulatur weiterhin überproportional hoch (STUHMILLER 2002). Vordefinierte dynamische Anstellsequenzen, welche die Maschinengeschwindigkeit als zusätzliche Stellgröße einsetzen, reduzieren die farbbedingte Makulatur ebenfalls. Die Vorgabe der Maschinengeschwindigkeit kann jedoch nachteilige Auswirkungen auf die nachfolgenden Regelungssysteme (Passer oder Falz) aufweisen, sodass die Gesamtmakulatur ansteigt.

Grundsätzlich ist die Durchführung von Referenzdrucken ebenfalls möglich (SCHÄDLICH ET AL. 2009; MAYER & PFEIFFER 2000), was im Bogendruck wirtschaftlich darstellbar ist. Für den Rollenoffsetdruck bieten sich Referenzdrucke nicht an, da der Anfahrprozess dazu vermehrt durchlaufen werden müsste und eine erhöhte Gesamtmakulatur zur Folge hat.

Die aufgeführten Anfahrkonzepte ermöglichen eine deutliche Makulaturreduzierung, jedoch ist bei niedrigen Flächendeckungen noch weiteres Verbesserungspotenzial vorhanden. Zudem wird der initiale Systemzustand nicht ausreichend berücksichtigt, was Potential für weitere Einsparungen bietet.

3.2.2 Steuerungskonzepte für Prozesse ohne Rückführung der Regelgrößen

Sobald die Ausgangsgrößen eines Prozesses nicht gemessen oder berechnet werden können, ist eine konventionelle Regelung nicht möglich. Die regelungstechnische Herausforderung wird umso anspruchsvoller, je weniger über den Prozess bekannt ist (KOFAHL 1988, S. 6).

Die Optimalsteuerung beschäftigt sich aus mathematischer Sicht mit der Vorgabe optimaler Verläufe und Stellgrößen. Hierfür werden das Prozessverhalten sowie die Randbedingungen explizit berücksichtigt. Es wird zwischen direkten und indirekten Lösungsverfahren für Optimalsteuerungsprobleme unterschieden, für welche wiederum eine Vielzahl von Realisierungsalternativen bekannt ist. Eine Übersicht bietet GERDTS 2009. Da diese Verfahren stark mathematisch motiviert sind, ist zu deren Lösung eine formale Beschreibung des Systemverhaltens notwendig (LÖFFLER 2000, S. 43). Für viele Fertigungsprozesse existieren jedoch selten umfängliche Modelle, die insbesondere die Variabilität einzelner Parameter berücksichtigen. Speziell für die Farbdichteregelung existieren keine umfassenden und exakten Modelle, wodurch deren Anwendung deutlich erschwert ist.

Die Steuerung offener Prozessketten ohne die Nutzung von Simulationsmodellen wird in der Wissenschaft selten thematisiert. Eine gezielte Einflussnahme auf den Prozess setzt die Rückführung der Prozessausgangsgröße(n) oder zumindest von Zustandsgrößen des Prozesses voraus, sodass sich zumindest die wirksamen Störungen identifizieren und kompensieren lassen (PFLEGHAAR 2014).

Prozesse, bei denen die Ausgangsgrößen nicht unmittelbar zur Verfügung stehen, werden meist nicht mithilfe von regelungstechnischen Methoden behandelt. Vielmehr erfolgt der Versuch, anhand einer Prozessanalyse und definierter Testreihen die Prozesskenntnis zu erhöhen sowie Einflussgrößen zu identifizieren. Dabei werden die optimalen Parameterkombinationen und Einstellungen ermittelt, die für eine stabile Prozessführung und zur Erreichung der Zielgrößen notwendig sind. Dieses Vorgehen wird als „Prozessoptimierung“ bezeichnet (NEUGEBAUER ET AL. 2008).

Im Kontext von Fertigungsprozessen sind die Zielgrößen die erforderlichen Eigenschaften des zu fertigenden Produkts wie Festigkeit, Oberflächengüte oder Maßhaltigkeit. Die Messung dieser Größen erfolgt oft erst nach Abschluss des Bearbeitungsschritts, entweder noch direkt in der Maschine oder an einem speziellen Messplatz (Labor, Prüfstand, Messraum). Eine prozessintegrierte Messung ist nur in wenigen Fällen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten umsetzbar. Im Prozess werden jedoch in vielen Fällen bereits Zustandsgrößen gemessen, welche Rückschlüsse auf die gewünschten Qualitätsgrößen zulassen. Falls dies nicht möglich ist, werden vordefinierte und erprobte Initialwerte eingesetzt. Beispiele hierfür finden sich in allen Produktionsprozessen nach DIN 8580, wie Abbildung 15 beispielhaft darstellt.

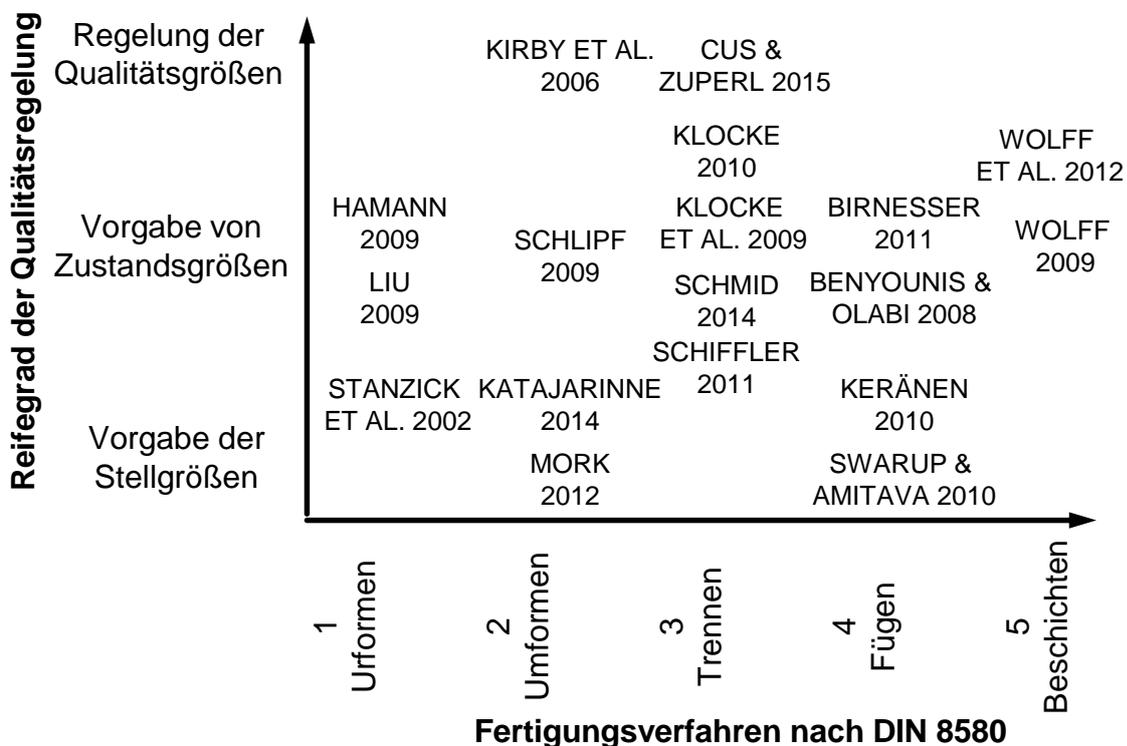


Abbildung 15: Strukturierung der Qualitätsregelung bei verschiedenen Fertigungsverfahren (beispielhafte Aufführung)

Exemplarisch soll das bevorzugte Vorgehen anhand der zerspanenden Fertigung gezeigt werden. Ziel der zerspanenden Fertigung ist die Sicherstellung der Maßhaltigkeit sowie der notwendigen Oberflächengüte aller Geometrielemente wie Bohrungen, Passungen oder Konturen. Diese Größen stellen die Qualitätsgrößen dar. Zustandsgrößen des Prozesses sind die Werkzeugbelastungen, die Emissionen und Schwingungen sowie die absoluten Werkstück- und Werkzeugposition. Um eine definierte Oberflächengüte zu erreichen, werden diverse Stellgrößen gewählt wie beispielsweise Schnittgeschwindigkeit, Vorschub oder Werkzeuggeometrie. Die Bestimmung von Stellgrößen erfolgt konventionell anhand vordefinierter Tabellenwerten, Einstellrichtlinien oder Datensätzen (CUS & ZUPERL 2015).

Die zugrundeliegenden Versuchsreihen oder Simulationen berücksichtigen weitere sekundäre Zielgrößen wie Verschleißminimierung, Maximierung der Wirtschaftlichkeit oder robustes Prozessverhalten gegenüber Störgrößen. Die Erprobungsphase ist im oberen Bereich von Abbildung 16 zu sehen. Die ermittelten Parametersätze werden der Produktion übergeben und dienen als Vorgabewerte. Die Aufgabe des Maschinenbedieners in der Produktion ist es, die realen Rahmenbedingungen des Prozesses möglichst den Idealbedingungen anzupassen. Verbleibende Abweichungen aufgrund von Störungen oder anderweitigen Einschränkungen kompensiert der Maschinenbediener, wie im unteren Bereich von Abbildung 16 (Produktionsphase) dargestellt ist. Der Anwender bewertet die Qualitätsgrößen sowie optional weitere Zustandsgrößen (zum Beispiel Schwingungen) und passt die Stellgrößen an.

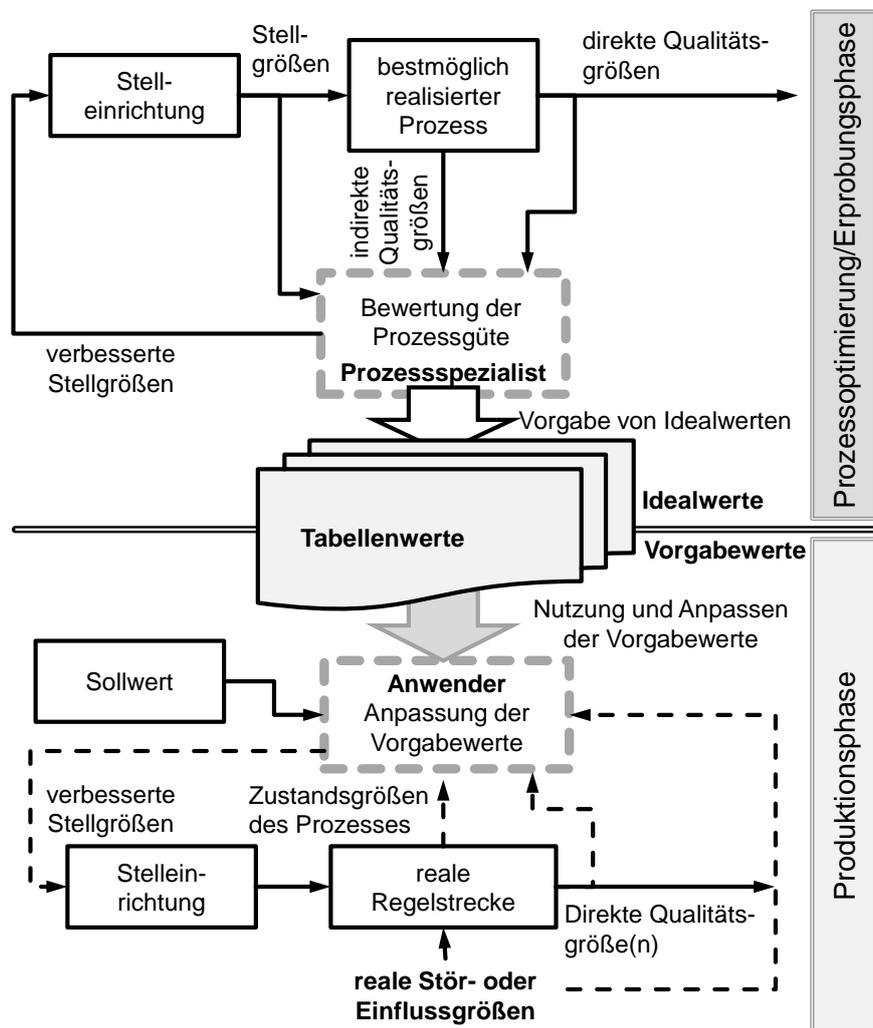


Abbildung 16: Trennung zwischen Erprobungs- und Produktionsphase bei Prozessen ohne direkte Ausgangsgrößenrückführung (eigene Darstellung)

Bei diesem Vorgehen ist zu beachten, dass in der Produktionsphase nicht immer ein geschlossener Regelkreis bezüglich der Qualitätsparameter realisierbar ist, weshalb Abweichungen von der gewünschten Produktqualität vorkommen können. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass ausschließlich messbare Einflussgrößen zu berücksichtigen sind und das Maschinenverhalten während der Erprobung mit der Produktionsphase übereinstimmt, was nicht für alle Prozesse vorausgesetzt werden kann (KLEPPMANN 2001, S. 244). Aktuelle Forschungsarbeiten nutzen modellbasierte Regelungsverfahren, um die Gütekriterien wie die Oberflächengüte anhand von Prozessgrößen zu schätzen und dementsprechend die Maschinenstellgrößen anzupassen (CUS & ZUPERL 2015, KIRBY ET AL 2006).

Aus diesem Grund werden auf dem Gebiet des Qualitätsmanagements unterschiedliche Methoden mit dem Ziel eingesetzt, das Auftreten von Störgrößen und deren Auswirkungen auf die Produktion zu minimieren (6-M-Methode, Prozess-FMEA), um somit die Prozessfähigkeit zu erhöhen (LINß 2011; HANSEN 2000). Verbleibende Störgrößen können teilweise durch die Anpassung von Stellgrößen kompensiert werden. Das Anpassen der Stellgrößen erfordert jedoch hohes Prozesswissen, um andere Qualitätsgrößen nicht negativ zu beeinflussen.

Vordefinierte Initialwerte eignen sich sehr gut für Prozesse, welche wenige dominierende Einflussgrößen aufweisen und die Auswirkungen der weiteren Größen vergleichsweise gering sind in Relation zur zulässigen Toleranz. Sind diese Rahmenbedingungen nicht gegeben, müssten für alle möglichen Parameterkombinationen Vorversuche durchgeführt werden, was sehr zeit- und kostenaufwändig ist (ADAM 2012, S. 6; KLEPPMANN 2001, S. 3). Eine Reduzierung des Testumfangs wird bei der statistischen Versuchsplanung durch die gezielte Wahl der Einflussgrößen, der Parameterkombinationen sowie der Faktorstufen erreicht (KLEPPMANN 2001; SCHEFFLER 1986). Dieses Vorgehen ist jedoch nur möglich, falls sich die Einflussgrößen gezielt verändern lassen. Eine solches Anpassen ist der Regelung der optischen Dichte nicht bei allen Größen möglich, da beispielsweise das Druckbild sowie das Papier durch den Kunden vorgegeben sind und nicht beliebig verändert werden können.

Eine Prozesssteuerung lässt sich bei konstanten und gut reproduzierbaren Prozessen sehr gut einsetzen. Falls jedoch die Prozesse von mehreren Größen beeinflusst werden, erhöht sich der Aufwand zur Steuerung exponentiell und das Risiko einer Qualitätsminderung nimmt stark zu.

3.3 Berücksichtigung von Einflussgrößen

3.3.1 Charakterisierung von Einflussgrößen

Nach Taguchi können alle Einflussgrößen in Steuer- und Rauschgrößen (KLEPPMANN 2001, S. 155) unterteilt werden, wie Abbildung 17 zeigt.

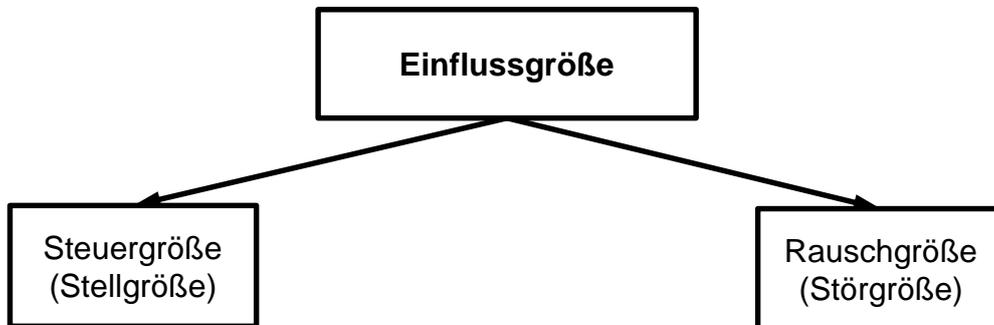


Abbildung 17: Kategorisierung der Einflussgrößen in Steuer- und Rauschgrößen (eigene Darstellung nach KLEPPMANN 2001)

Steuergrößen, die im regelungstechnischen Umfeld als „Stellgrößen“ bezeichnet werden, lassen sich bewusst verändern. Bei Rauschgrößen ist dies nicht der Fall. Rausch- oder Störgrößen können beliebige Verläufe annehmen und sind nicht oder nur ungenügend beeinflussbar. Sie verändern den Prozess und damit die Qualität der Ausgangsprodukte, weshalb ihr Einfluss minimiert werden sollte. Diese Minimierung ist jedoch mit teils hohen Aufwänden verbunden, weshalb vorab deren Relevanz überprüft werden muss.

3.3.2 Auswahl der Einflussgrößen

Die Auswahl und Priorisierung von Einflussgrößen für die Prozessregelung erfolgt in erster Linie aufgrund von Angaben in der Literatur, Expertenwissen oder Erfahrungen (BERGER 2013, S. 2). Im Bereich der Prozessoptimierung stellt KLEPPMANN 2001 ein Bewertungsverfahren für Einflussgrößen vor, welches eine analytische sowie eine simulative Phase beinhaltet. Es ist eine Kombination aus verschiedenen Ansätzen (Abbildung 18).

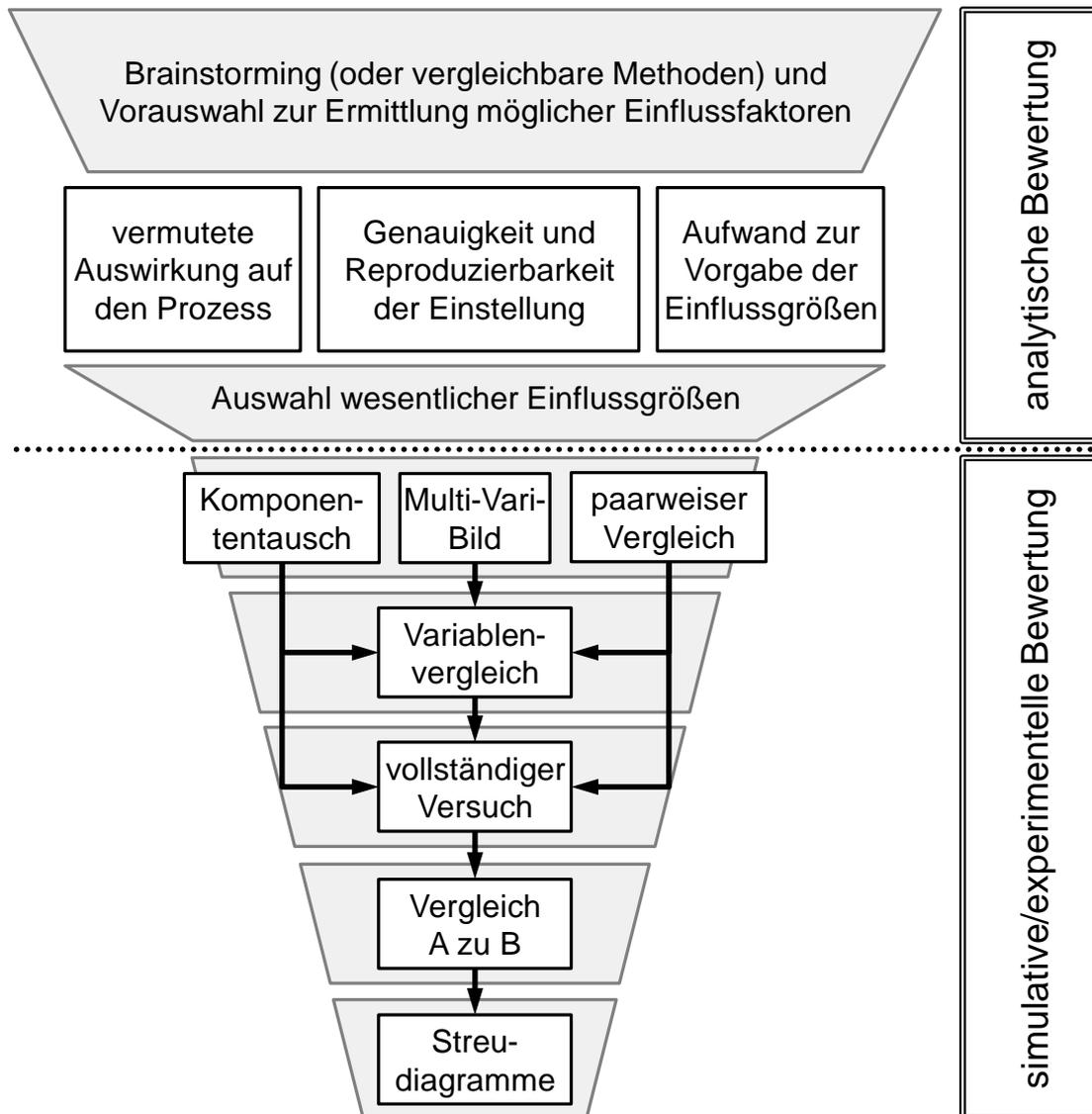


Abbildung 18: Priorisierung von Einflussgrößen durch analytische und experimentelle Bewertungsmethoden nach KLEPPMANN 2001

Basierend auf der Ermittlung möglicher Einflussfaktoren schließt sich eine Vorauswahl sowie die quantitative Bewertung der verbleibenden Größen an. Die Bewertung erfolgt anhand der Kriterien Relevanz der Größe, Genauigkeit und Aufwand zur Vorgabe der Einflussgröße. Diese Kriterien ermöglichen eine objektive Auswahl der Größen, welche in den nächsten Schritten durch simulative oder experimentelle Voruntersuchungen fundiert miteinander verglichen werden sollen. Der Vergleich dient dazu, die Anzahl der Einflussgrößen auf drei bis sechs zu reduzieren. Für die Auswertung der Versuche sollen statistische Methoden eingesetzt werden. BRAUN 2007 nutzt zur Bewertung der Relevanz von Einflussgrößen ebenfalls statistische Methoden, insbesondere die lineare Regression sowie deren erweiterte Analyse.

Größtenteils wird auf eine fundierte Bewertung und Auswahl der Einflussgrößen jedoch verzichtet. Teilweise erfolgt eine Strukturierung hinsichtlich den Störursa-

chen und der Dynamik der Störgrößen. Implizit kann daraus gefolgert werden, dass die Auswahl aufgrund der bisherigen Erfahrungen und der Literaturrecherche erfolgt (BERGER 2013, S. 1).

BERGER 2013 beschreibt ein umfassendes Vorgehen zur Identifikation relevanter Einflussgrößen, um negative Auswirkungen bei beliebigen Prozessen zu minimieren. Eine quantitative Bewertung von Einflussgrößen wird nicht vorgeschlagen, was jedoch für eine fundierte Bewertung und Priorisierung notwendig erscheint.

3.3.3 Robuste und adaptive Regelung

Um eine hochwertige Prozessführung sicherzustellen, sind zumindest die wichtigsten Einflussgrößen zu berücksichtigen. Dies kann explizit durch die Anwendung robuster oder adaptiver Regelungskonzepte erfolgen (CAMACHO & BORDONS 2007, S. 235; FÖLLINGER 1971; YAO 1996).

Robuste Regelungskonzepte tolerieren die Variabilität der Streckenparameter in definierten Grenzen und ermöglichen einen guten Kompromiss zwischen Reglerperformance und Stabilität bei nicht konstantem Systemverhalten. Dabei können sowohl variierende Streckenparameter als auch veränderliche Strukturen der Strecken voneinander unterschieden werden (ODENTHAL 2010; ALBERTOS 2009; MÜLLER 1996; ACKERMANN 1993; FÖLLINGER 1971). Die Regelungsdynamik wird zugunsten eines vergrößerten Stabilitätsraums leicht reduziert.

Im Vergleich zur robusten Reglerauslegung kompensieren adaptive Konzepte diese Schwankungen, indem die Reglerparameter in passender Weise nachgeführt werden. Adaptive Regelungskonzepte erreichen dadurch eine hohe Regelungsqualität und Regelungsdynamik mit einem stabilen Systemverhalten (SCHRÖDER 2014; SCHULZ 2002; FÖLLINGER 1998; FÖLLINGER 1971; ZYPKIN 1966). Notwendigerweise müssen Veränderungen der Regelstrecke erkannt und den Ursachen zugerechnet werden, was direkt über die Messung des Streckenausgangs oder indirekt durch die Messung von Einfluss- oder Zustandsgrößen möglich ist. Eine Übersicht der verschiedenen Identifikationsmöglichkeiten ist in Abbildung 19 nach FÖLLINGER 1971 dargestellt.

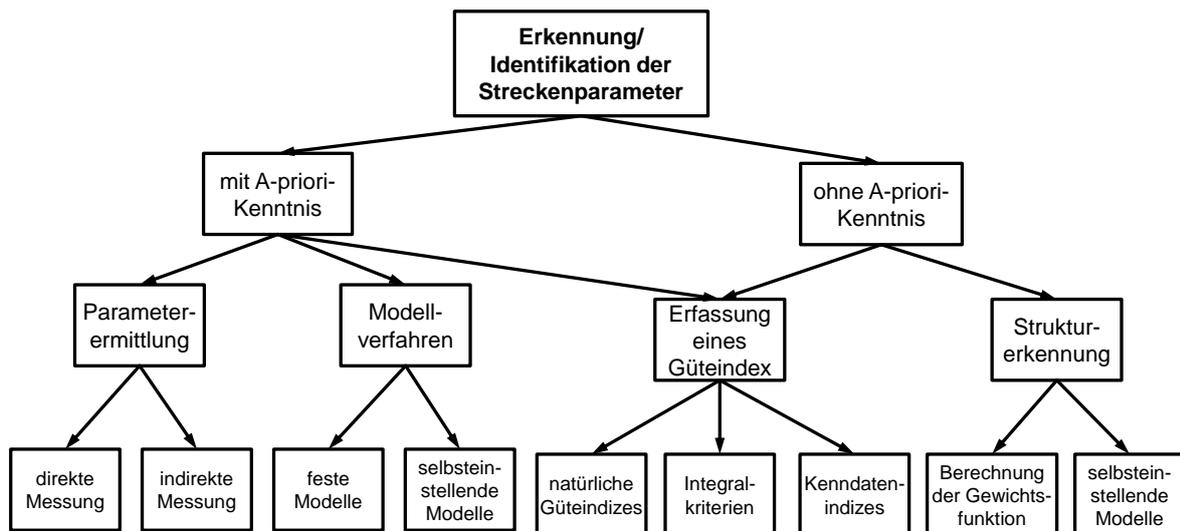


Abbildung 19: Identifikationsmöglichkeiten der Streckenparameter (eigene Darstellung in Anlehnung an FÖLLINGER 1971)

Die identifizierten Streckenparameter werden genutzt, um die Struktur oder die Parameter des Reglers oder eines Referenzmodells nach Kapitel 3.4.1 anzupassen (BLACK 2014; AHMAD 2013; FEILER 2004; FÖLLINGER 1988).

Abbildung 20 a zeigt eine adaptive Regelung ohne ein Vergleichsmodell, welche die Reglerparameter anhand des Streckenverhaltens anpasst („Self Tuning Regulator“). Ein Referenzmodell gemäß Abbildung 20 b kann dazu dienen, um das reale Streckenverhalten zu bewerten oder Vorhersagen über die optimalen Stellgrößen zu treffen. Für beide Konzepte existiert diverse Grundlagenliteratur (LANDAU 2011; FÖLLINGER & WEBER 1971) sowie auch Anwendungsbeispiele (AHMAD 2013; HÖCHT 2013; LI ET AL. 2013; LU ET AL. 2013).

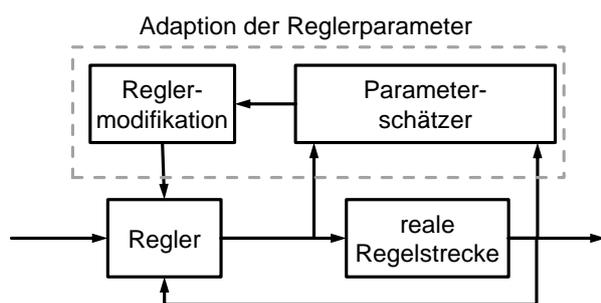


Abbildung 20 a: Adaptiver Regelkreis ohne ein Vergleichsmodell (UNBEHAUEN 1988)

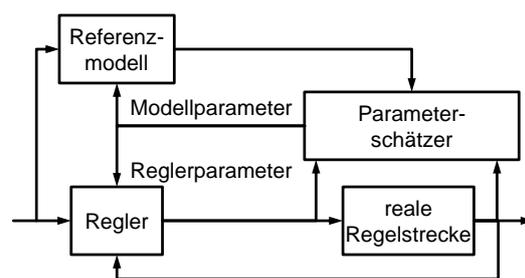


Abbildung 20 b: Modellbasierte Regelung mithilfe eines adaptiven Referenzmodells (MRAC) nach ÅSTRÖM & WITTENMARK 1995

Die Leistungsfähigkeit adaptiver Systeme wurde bei diversen Anwendungen nachgewiesen. Sie eignen sich insbesondere dann, wenn wenige dominierende Einflussgrößen existieren oder die Systemantwort jederzeit gemessen werden kann (CAO 2012; KLOCKE 2010; CONG 2009; YOU 2009; FOLRIN 2006; ANDERSON 2005; MAYOSKY 1999). Für den erfolgreichen Einsatz adaptiver Konzepte ist es notwendig, dass das Streckenverhalten einschließlich möglicher Parameteränderungen möglichst exakt beschrieben werden kann.

Neben realen Parameteränderungen können Störgrößen ebenfalls ein verändertes Systemverhalten bewirken. Bei der Parameterschätzung kann dies als Parameteränderungen fehlinterpretiert werden (FEILER 2004). Deshalb werden adaptive Regler teilweise mit robusten Reglerkonzepten kombiniert (SASTRY 2011; HU 2010; YANG 2001; YAO 1996). Für die Farbdichteregulation sind diese Verfahren nicht unmittelbar einsetzbar, da der Streckenausgang bei Druckbeginn nicht stetig gemessen und das Verhalten des Farbwerks nicht ausreichend exakt modelliert werden kann.

Bei einer gesteuerten Adaption werden die Reglerparameter aufgrund gemessener Einflussgrößen an das veränderte Streckenverhalten angepasst. Der Zusammenhang zwischen den optimalen Reglerparametern und der Einflussgrößen muss jedoch bekannt sein (LANDAU 2011; ENKE 2007, S. 2; MOSANDL 2004), was insbesondere bei vielen Störgrößen aufwändig ist (HAMANN 2003). Im Offsetdruck existieren viele Einflussgrößen mit unbekanntem Wechselwirkungen auf den Druckprozess (DECKER 1974; WIRZ 1963). Für die Umsetzung einer gesteuerten Parameteradaption ist es notwendig, die optimalen Parameter zu bestimmen und deren Zusammenhänge mit den Einflussgrößen nachzubilden, was trotz der zahlreichen erfolgten Versuche bisher nicht möglich ist.

3.4 Modellbasierte Regelung in der Wissenschaft und Anwendung

3.4.1 Einordnung der modellbasierten Regelung

Aus regelungstechnischer Sicht existieren diverse Methoden, um ein gewünschtes Prozessverhalten zu realisieren. Zusätzlich können Rahmenbedingungen wie Nichtlinearitäten oder Stellgrößenbeschränkungen berücksichtigt werden (SCHRÖDER 2010; SCHULZ 2002; FÖLLINGER 1988). Eine zwingende Voraussetzung ist, dass die Regelgrößen zu jedem Zeitpunkt bekannt sind. Die Regelgrößen können gemessen, aus anderen Zustandsgrößen berechnet oder, falls eine Messung wie bei der optischen Dichte nicht möglich ist, mithilfe eines Prozessmodells berechnet werden. Die Regelung mithilfe eines Simulationsmodells wird als „Internal Model Control“ (IMC) bezeichnet (MORK 2013, S. 35; PFEIFER & DITTMAR 2004, S. 48). Einen erweiterten Regelkreis einer modellbasierten Regelung zeigt Abbildung 21.

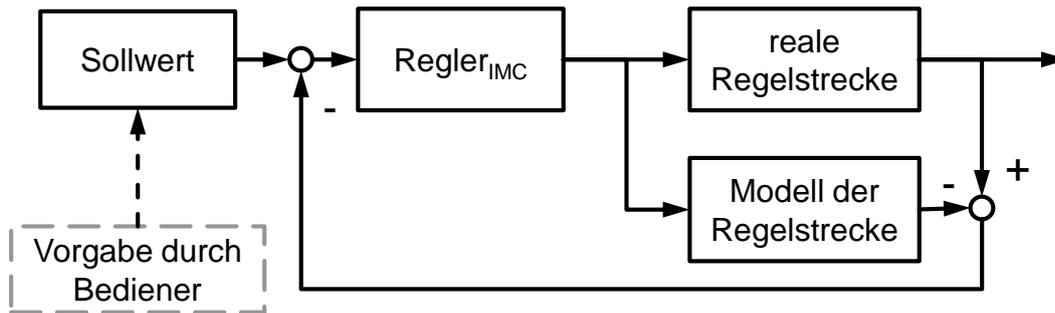


Abbildung 21: Nutzung eines Simulationsmodells zur Berechnung von Regelgrößen (in Anlehnung an DITTMAR & PFEIFER 2004, S. 48)

In der Konfiguration gemäß Abbildung 21 ist das Simulationsmodell direkt in den Regelkreis eingebunden und berechnet für den aktuellen Zeitpunkt die relevanten Zustands- und Regelgrößen (ISERMANN 2008, S. 30). Dabei wird der Modellfehler, als Differenz zwischen der realen Strecke und dem Modell, zurückgeführt, wobei dies im Übertragungsverhalten des Reglers berücksichtigt ist. Falls, wie im fokussierten Fall in der Drucktechnik, der reale Streckenausgang nicht messbar ist, werden die Modellausgangsgrößen zurückgeführt. Das Simulationsmodell ersetzt die realen Regelgrößen, solange diese nicht gemessen werden können. Der Regelkreis ist damit stets geschlossen.

3.4.2 Beschreibung der modellbasierten, prädiktiven Regelung

Die modellprädiktive Regelung (Model Predictive Control, MPC) verwendet ebenfalls ein Simulationsmodell und bewertet das Verhalten der Regelgröße über einen vordefinierten Prädiktionshorizont bei unterschiedlichen Stellgrößentrajektorien (CAMACHO & BORDONS 2007, S. 1). Eingesetzt wird die MPC bei stark totzeitbehafteten Systemen, nichtlinearem Streckenverhalten oder bei nicht direkt messbaren Systemzuständen. Der Regelkreis ist vergleichbar zu Abbildung 22 gestaltet, wobei einzelne Bausteine kombiniert oder auch in mehrere Bestandteile aufgetrennt sein können.

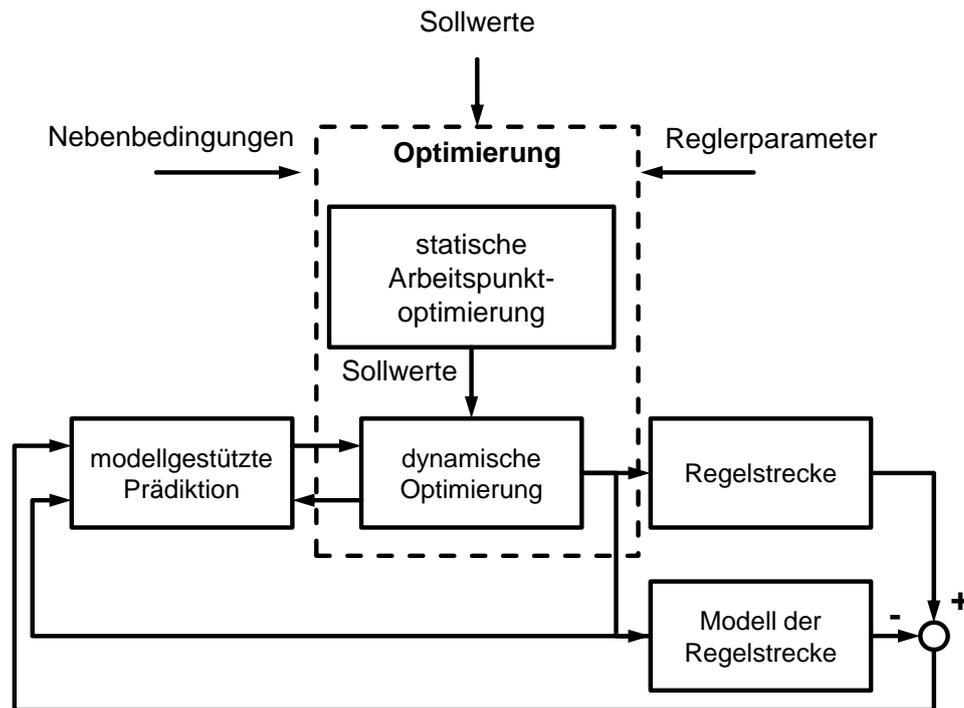


Abbildung 22: Aufbau einer modellbasierten, prädiktiven Regelung
(eigene Darstellung in Anlehnung an DITTMAR & PFEIFER 2004)

Mithilfe des Prozessmodells wird der Verlauf der Zielgrößen bei einem vorgegebenen Stellgrößenverlauf berechnet. Anhand des Verlaufs der Regelgröße wird die Stellgrößentrajektorie angepasst, bis das gewünschte Systemverhalten erreicht ist. Neben dem Verlauf der Regelgröße lassen sich weitere Gütekriterien berücksichtigen wie Stellgrößenbeschränkungen oder Kostenfunktionen verschiedener Stellgrößen. Der Optimierungsbaustein verändert die Stellgrößenverläufe, sodass die Gütefunktion maximiert wird. Die geeignetste Kombination wird anschließend für den realen Prozess verwendet (DEL RE ET AL. 2010; CAMACHO & BORDONS 2007; ADAMY 2009). Aufgrund der gestiegenen Rechenleistungen dehnt sich der Einsatzbereich der modellbasierten prädiktiven Regelung auf viele weitere Anwendungsgebiete aus und gilt als das am weit verbreitetste moderne Regelungsverfahren (SCHAPER ET AL. 2013; DING 2012; TAKÁCS 2012; DITTMAR & PFEIFER 2006; ALLGÖWER ET AL. 2004; DITTMAR & PFEIFER 2004).

Die modellbasierte und die modellprädiktive Regelung nutzen im Betrieb ein Simulationsmodell. Damit unterscheiden sich diese Verfahren von der modellbasierten Reglerauslegung, bei der ein Modell der Strecke ausschließlich während der Entwurfsphase genutzt wird (DITTMAR & PFEIFER 2004, S. 40). Die erzielbare Regelungsperformance hängt von der Modellgüte ab, weshalb die Modellierung des Druckprozesses in Kapitel 5.2 detailliert untersucht wird.

3.5 Modellierung des Druckprozesses

3.5.1 Grundsätzliche Modellierungsalternativen

Für die Modellierung der Regelstrecke eignen sich je nach Prozess unterschiedliche Alternativen. Für analytisch beschreibbare Prozesse ist die Modellierung im Zustandsraum anhand von Differenzialgleichungen sehr gut geeignet, da diese Darstellung eine hohe Genauigkeit ermöglicht und bekannte Auslegungsvorschriften verwendet werden können (SCHULZ 2004). Verschiedene Arten von Nichtlinearitäten können explizit berücksichtigt werden, ohne dass Versuche oder Messdaten erforderlich sind (RAU 2003; BEUSCHEL 2000). Die Modellierung wird als „White-Box-Modell“ bezeichnet, da alle Größen und Zustände vollständig bekannt sind (LOTZ 2012, S. 40; RUSIN 2007, S. 26).

Oft ist keine vollständig analytische Beschreibung der Regelstrecke möglich. Wenn die Prozesse qualitativ mithilfe linguistischer Terme beschreibbar sind und Expertenwissen über das Prozessverhalten vorhanden ist, eignen sich Fuzzy-Verfahren sehr gut (LIU 2013; AMENT 2012; SAJIDMAN 2012; MANN 2011; ADAMY 2007). Dabei werden die Zusammenhänge im Modell mithilfe von Zugehörigkeitsfunktionen zu unscharfen Mengen beschrieben (BIEWER 1997; KRUSE ET AL. 1993). Die für die Fuzzy-Regelung notwendigen linguistischen Terme müssen vordefiniert werden. Dieses Vorgehen ist für eine hohe Anzahl an Stell- und Einflussgrößen jedoch sehr aufwendig, ferner sind komplexe Wechselwirkungen schwierig zu berücksichtigen (AMENT 2012). Deshalb werden Fuzzy-Methoden teils mit maschinellen Lernverfahren kombiniert, welche geeignete Zugehörigkeitsfunktionen und Grenzwerte anhand von Messdaten automatisch ermitteln (NOGROHO 2013; NEHER 2012; SILVA ET AL. 2011b; POP 2007). Zur Modellierung des Farbwerksverhaltens ist bisher keine linguistische Beschreibung bekannt.

Falls weder eine formale noch eine linguistische Beschreibung des Prozesses sinnvoll ist, bieten sich maschinelle Lernverfahren an, welche mithilfe der Ein- und Ausgangsgrößen das Verhalten der Regelstrecke beschreiben. Diese bilden das Prozessverhalten ab, welches implizit in den Ein- und Ausgangsgrößen enthalten ist. Maschinelle Lernverfahren eignen sich insbesondere bei komplexen Prozessen, in denen andere Möglichkeiten zur Modellierung nicht zielführend sind (AMENT 2012). Sie werden in der technischen Literatur oftmals als „kognitive Verfahren“ bezeichnet, wobei dieser Begriff gleichwohl die Sensorik sowie teilweise die Aktorik umfasst.

3.5.2 Kognitive Verfahren zur Prozessmodellierung

Kognitiv bedeutet in diesem Zusammenhang die Fähigkeit eines technischen Systems, seine Umwelt zu erfassen und daraus geeignete Schlussfolgerungen zu ziehen. In Kombination mit vorhandenem Wissen werden diese Informationen bewertet, um geeignete Aktionen auszuwählen und auszuführen (SCHAFFER-NICHT 2011; LANGLEY ET AL. 2008; ZÄH ET AL. 2007, S. 645). Diese Beschreibung trifft auf alle Regelungen im weitesten Sinn zu, insofern ist hierbei einzuschränken, dass bei kognitiven Verfahren die Zusammenhänge nicht explizit vorgegeben sind. Die Zusammenhänge liegen in impliziter Form in Messdaten vor und müssen zuerst aufbereitet werden, um die Regelung zu ermöglichen. Im Kontext einer Prozessregelung beinhaltet diese Aufbereitung die Erfassung des aktuellen Prozesszustands, dessen Bewertung und die Wahl geeigneter Aktionen, um die Güte der Prozessregelung zu maximieren. Damit ist die Datenerfassung und Wissensextraktion ein wesentlicher Teil der Systemarchitektur (SCHAFFER-NICHT 2011, S. 2).

Diverse technische Umsetzungsmöglichkeiten kognitiver Verfahren existieren, welche mithilfe statistischer Verfahren (Baumanalyse, logistische Regression, Support Vector Machines) oder numerischer Abbildungsvorschriften (neuronale Netze, Polynominalmodelle) Zusammenhänge zwischen Datenpunkten oder Datenreihen nachbilden. Eine Vielzahl an Arbeiten beschäftigt sich mit der Nutzung kognitiver Verfahren für die Produktion (LOTZ 2012; IRANMANESH ET AL. 2011; VIHAROS ET AL. 2011; GRAF 2009; KOLEY ET AL. 2007; SHEN-XI 2004; RAMESH ET AL. 2002; VAPNIK 1999; SCHEFFLER 1986). An dieser Stelle sei auf die Standardliteratur zu maschinellen Lernverfahren und deren Überbegriff „Künstliche Intelligenz“ beziehungsweise „Artificial Intelligence“ verwiesen (SUTTON & BARTO 2012; ALPAYDIN ET AL. 2010; KRUSE ET AL. 2011; RUSSELL ET AL. 2010; MARSLAND 2009). Konzepte der künstlichen Intelligenz besitzen jedoch einen größeren Funktionsumfang, da diese diverse unstrukturierte Informationen der Umwelt eigenständig erfassen und interpretieren müssen. Damit ist das Gebiet der künstlichen Intelligenz deutlich komplexer geartet als der eng definierte Arbeitsbereich in der Regelungstechnik.

Da bei der Modellierung anhand der Messdaten die internen Systemzustände nicht bekannt sind, heißen diese Modellierungsansätze „Black-Box-Modelle“ (RUSIN 2007, S. 26). „Grey-Box-Systeme“ sind Kombinationen beider Ansätze, wobei beispielsweise eine analytische Modellierung der Prozessstruktur durch eine maschinelle Identifikation der Streckenparameter ergänzt wird. Aufgrund der Kombination von verschiedenen Varianten sind sehr umfangreiche Modelle realisierbar. Die Wahl der Modellierungsmöglichkeiten erfolgt in Abhängigkeit des Prozesses, nach verfügbaren Daten sowie nach verfügbarem Vorwissen.

Während die Modellierung insbesondere bei White-Box-Modellen meist hohes Prozesswissen des Anwenders verlangt, erfolgt bei Black-Box-Modellen eine au-

tomatische Lern- oder Trainingsphase. Dafür sind geeignete Prozessdaten und ein hoher Realisierungsaufwand erforderlich. Black-Box-Modelle verfügen initial über ein meist zufälliges Verhalten, welches im Rahmen der Trainingsphase auf das gewünschte Verhalten automatisch angepasst wird.

Überwachte Lernverfahren stellen dem Modell die Eingangs- und Ausgangsgrößen für den Anpassvorgang zur Verfügung. Modellinterne Parameter verändern das Verhalten, sodass Abweichungen zwischen den Ausgangsgrößen und den Sollausgangsgrößen minimiert werden. Aufgrund der Vorgabe der gewünschten Ausgangsgrößen wird diese Phase als „überwachtes Training“ bezeichnet.

Im Rahmen der Validierung dient ein künstliches neuronales Netz (KNN) für die Identifikation unbekannter Zusammenhänge, weshalb nachfolgend deren Grundlagen aufgeführt sind. Neuronale Netze sind grundsätzlich der Funktionsweise des menschlichen Gehirns nachempfunden. Ihre Datenverarbeitung und Mustererkennung erfolgt durch eine Vielzahl an Neuronen, die untereinander vernetzt sind und Informationen über elektrische Impulse austauschen (ZELL 1997). Die detaillierte Funktionsweise in der Natur und die Analyse der informationstechnischen Umsetzung kann detailliert anhand verschiedener Quellen nachvollzogen werden, zum Beispiel LÄMMEL & CLEVE 2012. Es existieren verschiedene Formen und Netztopologien, wobei am häufigsten mehrschichtige, vorwärtsgerichtete Netze im Einsatz sind (LOTZ 2012). Diese Netztopologie wird „Multi-Layer-Perceptron“ (MLP) genannt und ist in der Lage, analytisch nicht beschreibbare Funktionen sehr gut zu approximieren (HINTZ 2003; FEILER 2009; CHEN 1991; CYBENKO 1989; HORNIK 1989).

Neuronale Netze erlauben neben der Klassifizierung (OSENDORFER ET AL. 2011; KUO ET AL. 2006) die Berechnung linearer Ausgangsgrößen. Damit eignen sich künstliche neuronale Netze zur Parametrierung des Reglers (HAFNER 2009), zur Parametrierung des Modells (MOU ET AL. 2010; WOLTERS 2003; STURM 2000) oder direkt als Modell (LOTZ 2012; ZÄH ET AL. 2011). Die Anwendungen decken alle Ebenen der Automatisierungspyramide ab: von der Sensorebene, bei der verschiedene Sensorwerte in komprimierte Kenngrößen umgewandelt werden (CHUMAKOW 2008), über die Prozesssteuerung und Regelung (PETRE ET AL. 2011; HAYAKAWA 2005) bis hin zur überlagerten Produktionsplanung (EL-BOURI ET AL 2006). Abseits der Regelungstechnik werden neuronale Netze für Überwachungsaufgaben (LUKOSZ 1999; RAJAGOPALAN 1996; WU 1992) sowie zur Schrift-, Bild- und Spracherkennung (SÖDERGARD & LAUNONEN 1996) eingesetzt.

3.5.3 Bekannte Farbwerkmodelle

Es existieren verschiedene Simulationsmodelle für Druckwerke, welche je nach Zweck unterschiedlich konzipiert sind (WEIß 2008; GAO 2001). Für die Vorhersage der optischen Volltondichte wird die Farbergiebigkeit bestimmt und der Farb-

massenstrom im Farbwerk modelliert. Dazu sind sowohl der Modellaufbau als auch die Modellparameter richtig zu wählen. Zur Identifikation der Modellparameter können teilweise die in Abbildung 14 aufgeführten Untersuchungen herangezogen werden. Je nach Zielrichtung erfolgt die Modellierung in verschiedenen Detaillierungsstufen. Die diskrete Modellierung des Farbtransports wird meist für die Entwicklungsphase der Farbwerke eingesetzt, die analytische Modellierung wird zur Beschreibung der physikalischen Vorgänge im Farbwerk verwendet. Eine Übersicht veröffentlichter Farbwerksmodelle zeigt Abbildung 23. Weitere Farbwerksmodelle geben PATZELT & RUDER 1993 an, welchen jedoch nur eine begrenzte Rechenleistung zur Verfügung stand. Zusätzlich existieren firmeninterne Simulationsprogramme mit unterschiedlichen Zielrichtungen und Detaillierungsgraden, die jedoch nicht veröffentlicht sind.

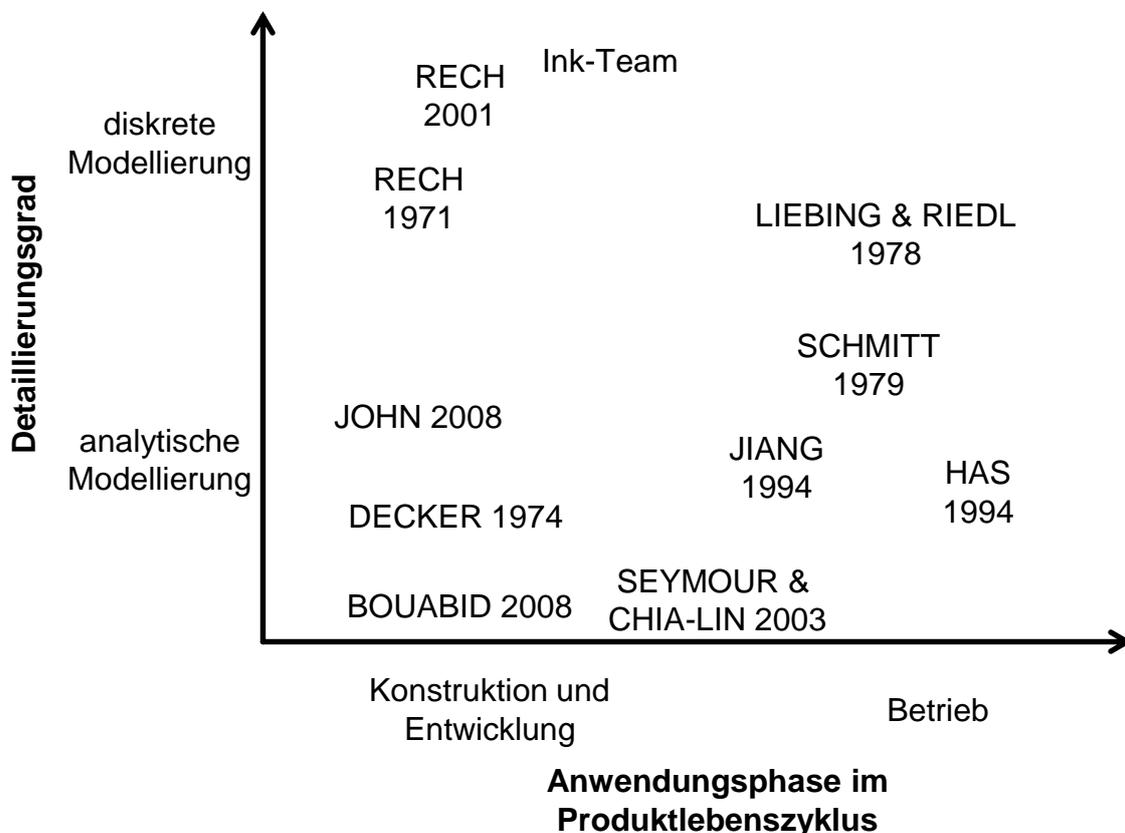


Abbildung 23: Ausgewählte Modellierungen des Farbtransports im Farbwerk

Der Grundaufbau der diskreten Farbwerksmodelle ist nachfolgend beschrieben, da die Farbtransportvorgänge anschaulich nachgebildet sind. Während der Entwicklungsphase ist es notwendig, den Farbwerksaufbau durch eine geschickte Wahl der Walzenanordnung und Durchmesser so zu gestalten, dass auch bei unterschiedlichsten Druckbildern eine hohe Druckqualität gewährleistet ist. Ein diskretes Modell bildet den Farbtransport sowie den Umdruck auf das Papier positionsgenau ab. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine relativ detaillierte Berechnung des Farbflusses bis zum Papier. Alle Farbwerkswalzen werden durch kleine,

räumlich begrenzte Segmentbögen diskretisiert, wobei jedem Segmentbogen eine mittlere Farbschicht zugeordnet ist, wie Abbildung 24 zeigt.

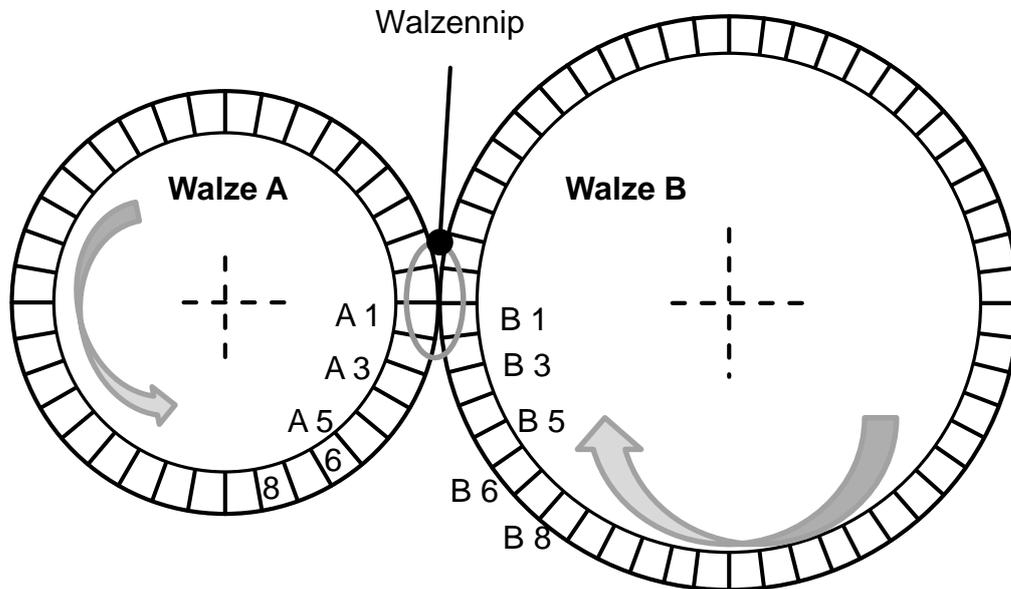


Abbildung 24: Diskrete Unterteilung der Walzenoberflächen zur Simulation des Farbtransports (eigene Darstellung nach RECH 1971, S. 67)

Mit jedem Berechnungsschritt erfolgt der Weitertransport der Farbe um einen Segmentbogen. Der Farbübertrag von einer Walze zur nächsten Walze erfolgt im sogenannten Walzennip, in dem sich die beiden Walzen berühren. Die Farbschichtdicken $s_{D A}$ und $s_{D B}$ beider Walzensegmente summieren sich an der Berührstelle, um im nächsten Berechnungsschritt zwischen den beiden Walzen aufgeteilt zu werden. Die Trennung der beiden Farbschichten wird als „Farbspaltung“ bezeichnet. Das Verhältnis der Farbschichtdicke einer Walze $s_{D i}$ nach dem Spalt zur insgesamt vorhandenen Farbmenge im Nip $s_{D gesamt}$ ist durch den Spaltungsfaktor α mathematisch beschrieben gemäß Gleichung 3-1. In der Regel wird der Spaltungsfaktor α für das in Farbflussrichtung folgende Walzensegment bestimmt. Der Wert wird je nach Quelle sowohl in Prozent als auch als Dezimalzahl angegeben.

$$\alpha = \frac{s_{D A}}{s_{D gesamt}} = \frac{s_{D A}}{s_{D A} + s_{D B}} \quad 3-1$$

Die Definition des Spaltungsfaktors nach 3-1 wird im Offsetdruck synonym für reine Farbe und für die Spaltung der Farbfeuchtemulsion verwendet. Wenn die Farbspaltungsfaktoren bekannt sind, kann das Schichtdickenprofil aller Walzensegmente vollständig berechnet werden (RECH 2003; JIANG 1994, S. 11; TAKAYANAGI 1972; RECH 1971).

Vereinfachend wird meist eine symmetrische Farbspaltung (Spaltungsfaktor $\alpha = 0,5$) für den stationären Zustand angesetzt. Die Schichtdicken auf beiden Wal-

zensegmenten nach der Farbspaltung sind dementsprechend gleich (WIESNER & SCHEUTERER 1983; JIANG 1994, S. 46; HARS & BRÖTZ 1993; RECH 1971). HARS & BRÖTZ 1996 A belegen experimentell eine asymmetrische Farbspaltung im stationären Druckbetrieb. Der Spaltungsfaktor α ist demnach von den einlaufenden Schichtdicken beider Walzen abhängig. Mathematisch ist diese Abhängigkeit in Gleichung 3-2 zusammengefasst, wobei die Koeffizienten A, B und C anhand mehrerer Versuchsreihen ermittelt wurden (HARS & BRÖTZ 1996 A).

$$\alpha = A + B \frac{S_{DA}}{S_{DB}} + C \frac{S_{DA} + S_{DB}}{2} \quad 3-2$$

Während des instationären Betriebs wie dem Maschinenhochlauf oder in Verbindung mit dem Feuchtmittel, was im Offsetdruck prinzipbedingt notwendig ist, wird die mittige Farbspaltung ausdrücklich infrage gestellt (JIANG 1994, S. 47). Es besteht die Vermutung, dass mit steigendem Feuchtmittelgehalt der Farbspaltungsfaktor abnimmt, genaue Berechnungsvorschriften sind speziell für eine Zweiphasenströmung nicht verfügbar (JIANG 1994; SCHEUTER 1985). Die quantitative Berechnung des Spaltungsfaktors ist durch die empirische Formel von WALKER & FETZKO 1955 sowie mithilfe numerischer Simulationen in definierten Größenbereichen möglich (VOSS 2002). In beiden Fällen sind speziell geringe Schichtdicken wie im Offsetdruck nicht ausreichend exakt berechenbar, wie verschiedene Quellen dargelegen (FETTER 2009, S. 10; BOUABID 2008; VOSS 2002). Gleichzeitig erweist sich die Messung der Farbschichtdicke lasierender Emulsionen als sehr herausfordernd aufgrund der inhomogenen Schichteigenschaften sowie der erforderlichen hohen Auflösung (FETTER 2009). Die Farbspaltung ist der zentrale Prozess des Farbtransports durch das Farbwerk sowie für die axiale Verreibung über die Maschinenbreite.

Die Simulationsmodelle für die Entwicklungsphase gemäß Abbildung 23 dienen zur Auslegung von Farbwerken und den Vergleich unterschiedlicher Farbwerkskonfigurationen. Die exakte Kenntnis des Spaltungsfaktors oder der Farbergiebigkeit ist hierbei von untergeordneter Bedeutung (JIANG 1994, S. 47), da als Zielgröße die Gleichmäßigkeit der Farbschicht oder die Zeitkonstante des Farbwerks relativ zu anderen Walzenkonfigurationen bewertet werden. Die absolute Schichtdicke oder optische Dichte ist nicht relevant.

Für die betriebsparallele Simulation des Farbtransports sowie den Umdruck auf den Bedruckstoff müssen die Modellparameter jedoch ausreichend exakt bekannt und in Echtzeit berechenbar sein. Andernfalls ist eine modellbasierte Regelung nicht sinnvoll. Die Berechnung mithilfe einer diskreten Modellierung ist bisher bei modernen Maschinen nicht ausreichend schnell realisierbar.

Die Modellierung mithilfe von Differenzialgleichungen bietet sich dagegen an, da sich diese numerisch besser verarbeiten lassen und zudem optimierte Algorithmen,

insbesondere für die nachfolgende Regelung, existieren. Ein analytisches Farbwerksmodell wurde bereits für die Optimierung der Zonenvoreinstellung bei unterschiedlichen Flächendeckungen entwickelt. Neben dem Farbtransport durch das Farbwerk ist insbesondere der Quertransport aufgrund der Chargierbewegung der Verreiberwalzen berücksichtigt (SCHMITT 1979). Die Basis bildet eine Farbmassenbilanz für jede Zone eines Farbwerks. Der innere Zustand $S_{(\eta, t)}$ einer Farbzone beinhaltet die Farbmenge über alle Walzenoberflächen der Zone, wobei η die Zonenbreite repräsentiert. Der innere Zustand kann mithilfe der zugeführten Farbmenge $E_{(\eta, t)}$ durch den Farbduktor und die über das Papier ausgetragene Farbmenge $A_{(\eta, t)}$ berechnet werden. Der Querfluss aufgrund der Verreibung aus und in die Nachbarzonen bildet $Q_{(\eta, t)}$ ab. Alle weiteren Annahmen sind SCHMITT 1979 zu entnehmen. Die Zusammenhänge zeigt das Ersatzmodell in Abbildung 25, wobei es den vollständigen Farbfluss einer Zone beschreibt, ohne dass eine Unterteilung in einzelne Walzensegmente vorgenommen wird.

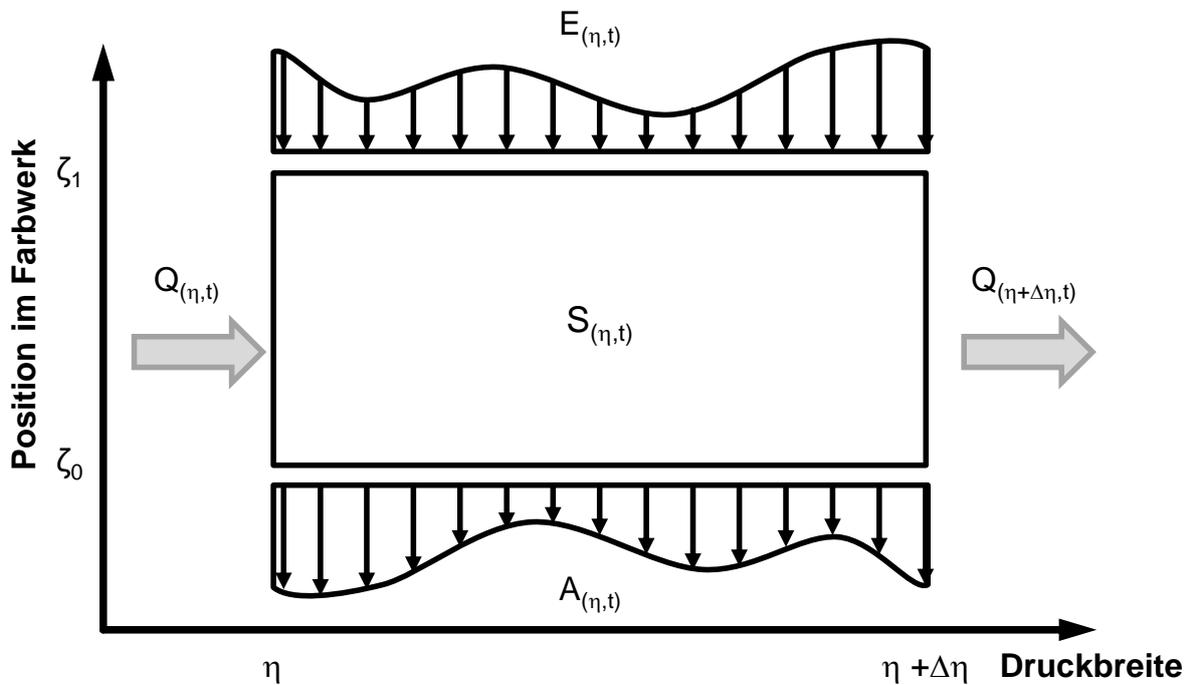


Abbildung 25: Modellansatz für das Farbwerkverhalten nach SCHMITT 1979

Die mathematischen Zusammenhänge sind in Gleichung 3-3 dargestellt, woraus sich der zeitliche Verlauf des Farbmassenstroms berechnen lässt, sofern die zugeführten und abgeführten Massenströme bekannt sind.

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{\eta}^{\eta+\Delta\eta} (E_{(\eta,t)} - A_{(\eta,t)}) d\eta dt = \int_t^{t+\Delta t} (Q_{(\eta+\Delta\eta,t)} - Q_{(\eta,t)}) dt + \int_{\eta}^{\eta+\Delta\eta} (S_{(\eta,t+\Delta t)} - S_{(\eta,t)}) d\eta \quad 3-3$$

Jede Zone wird durch ein PT₁-Modell repräsentiert. Die einzelnen Zonen sind über den verriebenen Farbmassenstrom $Q_{(\eta,t)}$ miteinander verkoppelt. Die Parameter des Modells werden anhand von Referenzdrucken manuell ermittelt. Dieses Vorgehen ist für die grundsätzliche Validierung realisierbar, für eine betriebsparallele Simulation ist es jedoch nicht praktikabel. Die Herstellung eines Referenzdrucks ist sehr zeit- und materialaufwendig und die Modellparameter hängen jeweils von den Flächendeckungen sowie diversen weiteren Einflussgrößen ab.

Der mechanische Aufbau des Farbwerks wird indirekt über die manuell ermittelten Modellparameter berücksichtigt. JIANG 1994 stellt ein grundlegendes Berechnungsmodell eines Farbwerks vor, welches in einzelne Walzensegmente unterteilt ist. Im Vergleich zu RECH 1971 erstrecken sich die Walzensegmente zwischen den Kontaktstellen zu den benachbarten Walzen, wobei für jedes Segment das analytische Übertragungsverhalten durch ein PT₁-Element abgebildet ist. JIANG 1994 gibt keine Auskunft zur Identifikation der Streckenparameter. Die Regelung der optischen Dichte wird nur kurz erwähnt, jedoch nicht weiter ausgeführt.

Die vorgestellten Simulationsansätze und Modelle sind nicht unmittelbar für den Einsatz in der betriebsparallelen Prozessregelung geeignet. Jedoch können die zugrundeliegenden Ansätze in angepasster Form weiter verwendet werden, was in Kapitel 5.2 detailliert aufgeführt ist.

3.6 Bewertung des Stands der Wissenschaft und Technik

Zusammenfassend sei festgehalten, dass kein Konzept zur Regelung der optischen Dichte existiert, mit dem sich die farbbedingte Makulatur noch weiter reduzieren lässt. Die bestehenden Farbsteuerungen erfüllen die Anforderungen an eine hohe Regelungsdynamik nur bedingt. Die Übertragung von Steuerungskonzepten, welche in anderen Prozessen gemäß Kapitel 3.2.2 erfolgreich eingesetzt werden, ist aufgrund der hohen Beeinflussung durch externe Parameter wie der Verbrauchsmaterialien sowie der ungenügenden quantitativen Kenntnisse nur ansatzweise möglich.

Stationäre Startwerte, wie sie in der Drucktechnik aktuell verwendet werden, ermöglichen einen stabilen Betrieb. Jedoch ist speziell bei geringen Flächendeckungen die Einschwingzeit zu hoch, sodass die Makulatur noch relativ hoch ist.

Eine Übertragung robuster oder adaptiver Regelungskonzepte gemäß Kapitel 3.3.3 bedürfen der Kenntnis der Regelgröße, welche bei Produktionsstart nicht gemessen werden kann. Auch eine analytische Berechnung der Regelgröße in Anlehnung an Kapitel 3.5 ist nicht direkt möglich, da hierzu die Modellparameter exakt bekannt sein müssen, um eine hohe Simulationsgüte zu erreichen. Dies ist nach aktuellem Stand der Wissenschaft und Technik nicht der Fall. Dies betrifft den Spaltungsfaktor α sowie die effektive Farbergiebigkeit FE_{eff} . Beide Größen hängen von diversen Einflussgrößen ab, wobei die analytische Berechnung aktuell nicht möglich ist. Kognitive Systeme nach Kapitel 3.5.2 können die stationären Zusammenhänge abbilden, jedoch nicht die Zusammenhänge während der instationären Phase des Anfahrens. Für eine effiziente Prozessregelung sind sowohl eine hohe Regelungsdynamik bei Produktionsstart als auch die stationäre Genauigkeit wichtig.

Abschließend sei festgehalten, dass bestehende Regelungskonzepte und Simulationsmodelle in der bisherigen Form nicht für die Dichteregelung eingesetzt werden können. Aufgrund der Vielzahl an Anwendungsfällen mit ähnlichen technischen Rahmenbedingungen gemäß Kapitel 3.2.2 sind die fundierte Analyse der Problemstellung und die Darstellung eines geeigneten Regelungskonzepts wissenschaftlich gerechtfertigt und aufgrund der ungenügenden Prozessqualität sowie des daraus folgenden Ressourcenverbrauchs aus ökonomischer Sicht dringend erforderlich.

4 Konzept zur modellbasierten Steuerung parametervariabler Strecken

Kapitel 4 gibt einen Überblick über das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Regelungskonzept, welches ein dynamisches und robustes Systemverhalten ermöglicht und verschiedene Einflussgrößen explizit berücksichtigt. Das Konzept kann grundsätzlich für beliebige Prozesse eingesetzt werden. Die folgenden Diagramme beinhalten einen Umformprozess, welcher ebenfalls durch modellbasierte Regelungskonzepte optimiert wurde (MALIK 2007; CAMERON 2000).

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 26 der zugrunde liegende Prozess sowie die entsprechende Prozesssteuerung dargestellt. Die Sollwerte werden in Stellgrößen umgewandelt, aus denen sich die Sollwerte möglichst direkt ergeben. Je größer das Prozesswissen ist, desto besser können die optimalen Stellgrößen vorgegeben werden. Sind relevante Einflussgrößen vorhanden, so sind diese zu berücksichtigen. Dieses Vorgehen ist notwendig, solange der Regelkreis nicht geschlossen ist, was durch den Schalter im Rückwärtszweig symbolisiert ist. Dieser kann zwischen der geöffneten Stellung (offener Regelkreis, entsprechend einer Steuerung) und der geschlossenen Stellung (Regelkreis) wechseln.

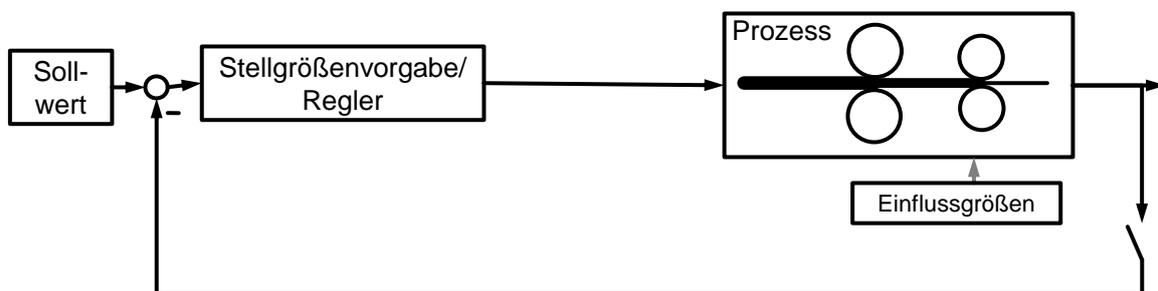


Abbildung 26: Prozesssteuerung und Regelung, je nach Verfügbarkeit der Ausgangsgrößen

Erst wenn die Prozessausgangsgrößen manuell oder automatisch erfasst werden und damit die Rückführung der Ausgangswerte möglich ist, lassen sich verbleibende Abweichungen eliminieren. Bis zu diesem Zeitpunkt erfolgt eine klassische Prozesssteuerung, bei der die Produktqualität direkt von der Prozesskenntnis, der Eigendynamik sowie von den Einflussgrößen abhängt.

Um den Einschwingprozess zu beschleunigen und möglichst ab Druckbeginn die erforderliche Produktqualität sicherzustellen, werden in der vorliegenden Arbeit die Ausgangsgrößen und damit die qualitätsbestimmenden Eigenschaften mithilfe eines analytischen Modells stetig berechnet, sodass der Regelkreis geschlossen ist. Das entsprechende Blockschaltbild ist in Abbildung 27 dargestellt.

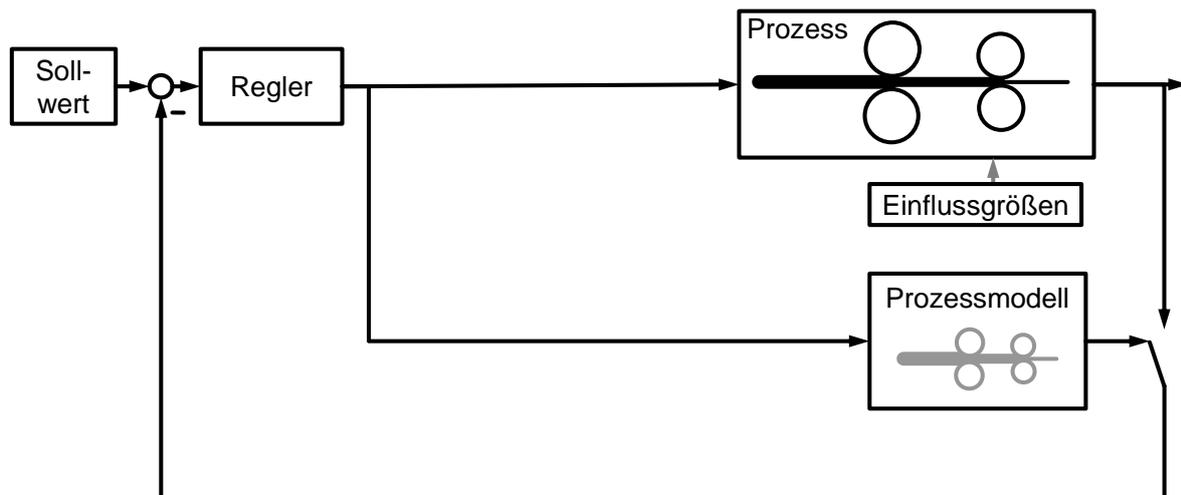


Abbildung 27: Modellbasierte Prozessregelung

Das reale Prozessverhalten wird im Prozessmodell abgebildet, einschließlich der Nichtlinearitäten und Eigendynamik. Vergleichbar zur Stellgrößenvorgabe bei der Prozesssteuerung ist ein detailliertes Wissen über die Zusammenhänge zwischen den Stellmöglichkeiten, den Einflussgrößen sowie den Ausgangsgrößen notwendig. In vielen Fällen ist ein detailliertes Wissen über die Zusammenhänge vorhanden, jedoch müssen diese Zusammenhänge quantifiziert werden. Die Quantifizierung kann über entsprechende Versuche oder anhand einer systemtheoretischen Analyse erfolgen.

Bei Prozessen, die in hohem Maß von unterschiedlichen Größen beeinflusst werden, sind diese Größen explizit in das Prozessmodell zu integrieren. Die zugrundeliegenden Vorgänge im realen Prozess bleiben gleich, es verändern sich jedoch einzelne Parameter. Daher bietet sich die Grundstruktur der Prozessregelung gemäß Abbildung 27 an. Dieses Regelungskonzept wird ergänzt von einer Parameteridentifikation zur Schätzung der realen Prozessparameter. Insgesamt ergibt sich ein adaptiver, modellbasierter Regelkreis nach Abbildung 28.

Der zentrale Baustein des Regelungskonzepts ist ein adaptives Prozessmodell, welches die Prozessausgangsgrößen stetig berechnet. Die berechneten Werte werden anstelle der realen Messwerte an den Regler zurückgeführt, da die Messung aufgrund technischer und wirtschaftlicher Restriktionen nicht möglich ist und nur fehlerbehaftet sowie mit großem Zeitverzug durchgeführt werden kann. Die Regelgrößen werden einem adaptiven Regler zugeführt, was durch den äußeren Rückführungskreis dargestellt ist. Das Übertragungsverhalten des Reglers wird anhand der Charakteristik des Prozessmodells adaptiert, wie die gestrichelte Linie symbolisiert.

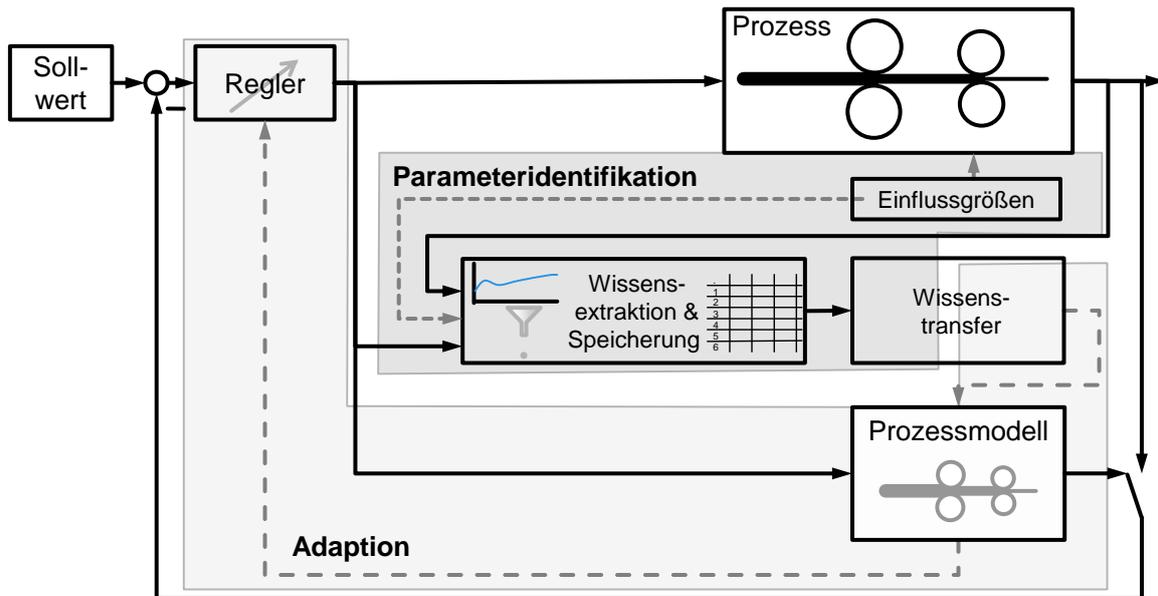


Abbildung 28: Modellbasierter Regelkreis mit gesteuerter Parameteradaption sowie der Identifikation geeigneter Parameter (eigene Darstellung)

Da die Prozessregelung zeitweise ausschließlich anhand der simulierten Werte erfolgt, muss das Prozessmodell möglichst exakt das reale Prozessverhalten nachbilden. Diese Exaktheit wird durch die Parameteradaption gewährleistet, welche das Bindeglied zwischen dem realen Prozess und dem Prozessmodell bildet und die Modellparameter entsprechend der realen Einflussgrößen berechnet. Die Parameteradaption beinhaltet die Teilfunktionen Wissensextraktion aus den vorhandenen Prozessdaten, der Wissensspeicherung und dem Wissenstransfer, welcher die optimalen Parameter bei veränderten Einflussgrößen ermittelt. Für die Parameteridentifikation sind die Stell- und Regelgrößen sowie verschiedene Einflussgrößen zu bewerten, die das Prozessverhalten verändern. Da für eine Vielzahl an Prozessen die Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und den Modellparametern unbekannt sind, werden für die Parameteridentifikation kognitive Verfahren verwendet. Kognitive oder lernfähige Verfahren sind in der Lage, implizit vorgegebene Zusammenhänge selbsttätig nachzubilden ohne deren explizite Formulierung. Andere Verfahren sind je nach Prozess und Prozesskenntnis ebenfalls einsetzbar.

Der Baustein zur Wissensextraktion berechnet aus den vergangenen Produktionsläufen diejenigen Modellparameter, mit denen die Regelgrößen des Prozessmodells und die realen Prozessausgangsgrößen möglichst gut übereinstimmen. Diese „idealen“ Modellparameter werden in Kombination mit den jeweils wirkenden Einflussgrößen als vollständiger Datensatz gespeichert. Jeder Datensatz beinhaltet damit die Einflussgrößen und das reale Prozessverhalten, auch wenn dieses nicht formal beschreibbar oder physikalisch vordefiniert ist. Bei einem reproduzierbaren Prozess können diese Zusammenhänge für die weitere Prozessoptimierung

Konzept zur modellbasierten Steuerung parametervariabler Strecken

eingesetzt werden. Der Baustein zum Wissenstransfer berechnet anhand der aktuellen Einflussgrößen und auf Basis der gespeicherten Datensätze die idealen Modellparameter. Dadurch ist die Anpassung an die realen Betriebsbedingungen und infolge dessen eine hohe Simulationsgüte sichergestellt.

Das Konzept ist angelehnt an das Vorgehen des Maschinenbedieners. Der Maschinenbediener beobachtet den Prozess und analysiert die Zusammenhänge implizit, wie Abbildung 29 veranschaulicht. Der Bediener erfasst die jeweiligen Betriebsbedingungen einschließlich der Einflussgrößen, die gewählten Stellgrößen sowie weitere Zustandsgrößen oder Emissionen des Prozesses mithilfe seiner sensorischen Fähigkeiten und bewertet oder schätzt darauf aufbauend das Prozessverhalten oder die Produktgüte. Daraus folgert er die notwendigen Aktionen der Prozessführung, zum Beispiel die Anpassung des Sollwerts, der Reglerparameter oder das manuelle Übersteuern der Stellgrößen. Das meist implizite Wissen um die Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und dem Maschinenverhalten sowie die geeignetsten Stellaktionen werden als „Erfahrung“ bezeichnet. Ein Teil der Erfahrungen wird in einem (Gedanken-)Modell abgebildet. Je umfangreicher die Erfahrungen sind, desto detaillierter ist das Modell gestaltet und desto mehr Einflussgrößen werden berücksichtigt.

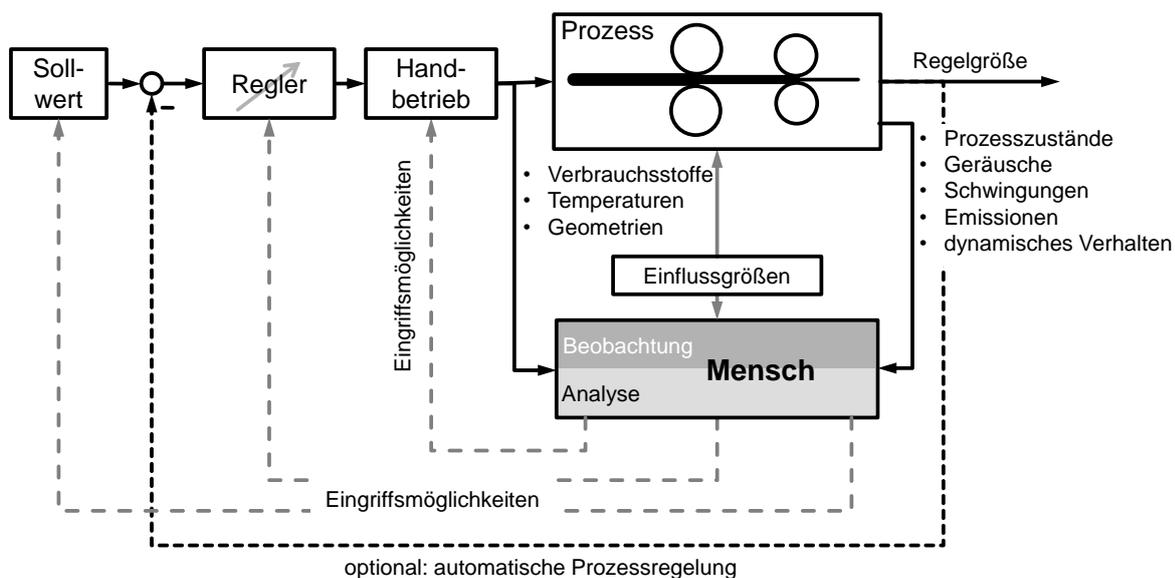


Abbildung 29: Informationswege bei der manuellen Prozesssteuerung und Optimierung (eigene Darstellung)

Aufgrund der hohen Komplexität und der Vielzahl der zu berücksichtigenden Faktoren bei modernen Produktionsanlagen ist es den Maschinenbedienern jedoch immer weniger möglich, diese Erfahrung aufzubauen. Zudem erfordert die hohe Prozessgeschwindigkeit eine schnelle Reaktionsfähigkeit, weshalb sich eine rechnerintegrierte Umsetzung anbietet.

Das Blockschaltbild in Abbildung 28 beinhaltet keine Vorgaben zur Realisierung der unterschiedlichen Bausteine, diese können je nach Prozesswissen und weiteren Rahmenbedingungen gewählt werden.

Zur Auswahl geeigneter Umsetzungsalternativen sind die nachfolgend aufgeführten Fragen zu klären:

- Welche Charakteristik besitzt der reale Prozess?
- Was ist über den Prozess bekannt, welche Detaillierungsstufe ist notwendig?
- Welche technischen Rahmenbedingungen sind darüber hinaus zu berücksichtigen, insbesondere die technischen Ziele (notwendige Toleranzen, erwünschtes Zeitverhalten) sowie die Anforderungen an die Robustheit und Übertragbarkeit auf neue Anwendungsfälle?
- Welchen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen muss die Prozesssteuerung genügen, welche Aufwände sind gerechtfertigt?
- Welche Lösungsalternativen stehen realistisch zur Verfügung? Dies beinhaltet die nachstehend genannten, umsetzungsrelevanten Aspekte:
 - Welches Know-how ist (in der Entwicklungsphase und der Betriebsphase) verfügbar?
 - Welche Werkzeuge und Methoden können eingesetzt werden, welche Neuerungen sind realistisch?
 - Sind Vorgaben der Anwender und Kunden aufgrund rechtlicher oder sicherheitstechnischer Aspekte zu berücksichtigen?

In Abbildung 30 sind die Realisierungsmöglichkeiten der Bausteine exemplarisch angedeutet. In der Regelungstechnik ist die analytische, explizit formale Beschreibung durch lineare Übertragungsfunktionen am weitesten verbreitet. Alternativ bietet eine Beschreibung mithilfe der Fuzzy-Logik die Möglichkeit, qualitatives Vorwissen zu berücksichtigen. Ebenfalls sind maschinelle Lernverfahren einsetzbar, welche ein gewünschtes Verhalten anhand vorgegebener Daten nachbilden können. Der modulare Aufbau des Gesamtkonzepts gestattet den Einsatz der jeweils geeignetsten Ausführung für jeden Baustein.

Konzept zur modellbasierten Steuerung parametervariabler Strecken

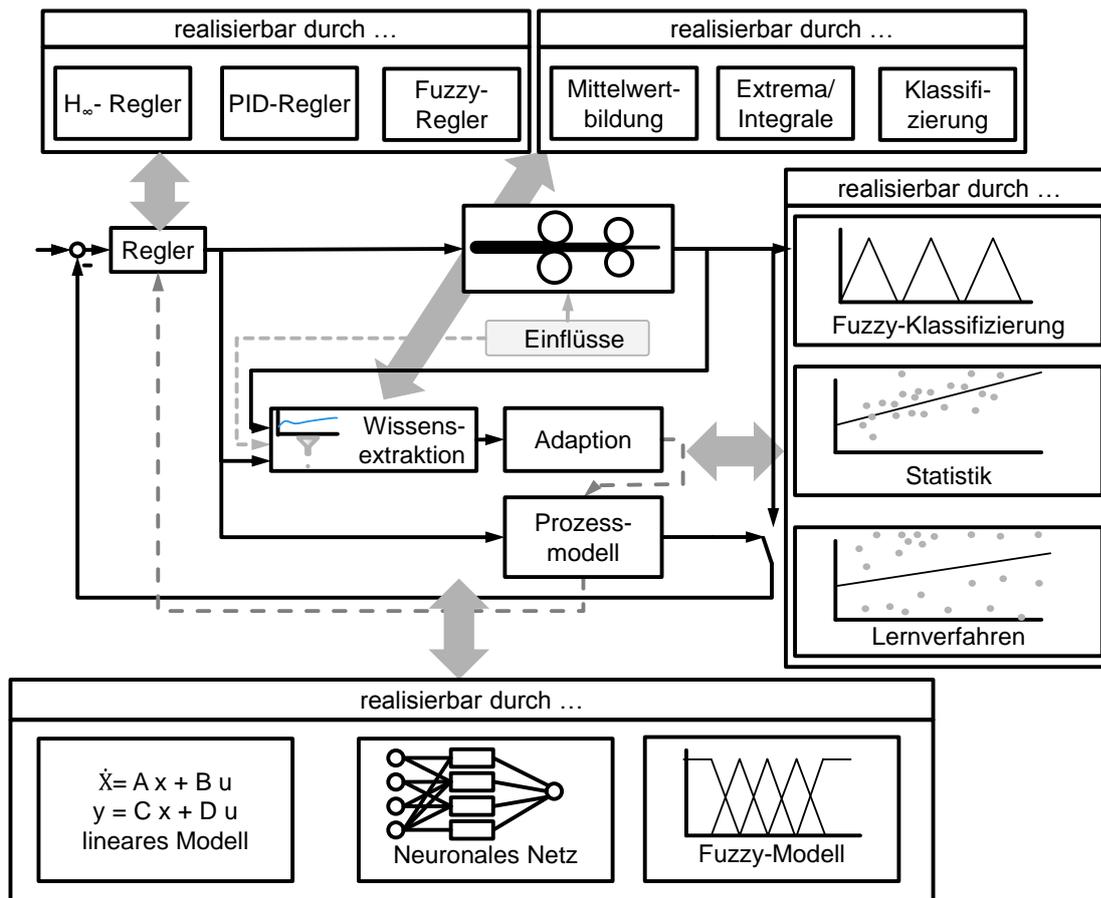


Abbildung 30: Schematische Darstellung der Realisierungsalternativen der einzelnen Bausteine (eigene Darstellung)

Jeder Ansatz weist nach Tabelle 1 mehrere mögliche Ausprägungen auf. Ein analytisches Modell kann beispielsweise als lineares PT_2 -System, als PT_1 - T_1 -System oder als Zustandsraummodell ausgeführt werden.

Tabelle 1: Realisierungsalternativen für unterschiedliche Ansätze

Ansatz Baustein	analytisch	Fuzzy-Mengen	maschinelle Lernverfahren
Regler	PI-Regler	Regler mit 3 Fuzzy-Sets	Support Vector Machines
Modell	PT_1 -Modell	Modell mit Dreieck-Fuzzy-Sets	rekurrentes neuronales Netz
Wissensextraktion	Mittelwerte	Clustering durch Singleton-Fuzzy-Sets	mehrschichtiges neuronales Netz

Konzept zur modellbasierten Steuerung parametervariabler Strecken

Die Wahl der Ausprägung erfolgt anhand von Vorgaben, Empfehlungen oder aufgrund von prozesseitigen Rahmenbedingungen. Damit ergibt sich für die Prozesssteuerung ein mehrdimensionaler Lösungsraum gemäß Abbildung 31.

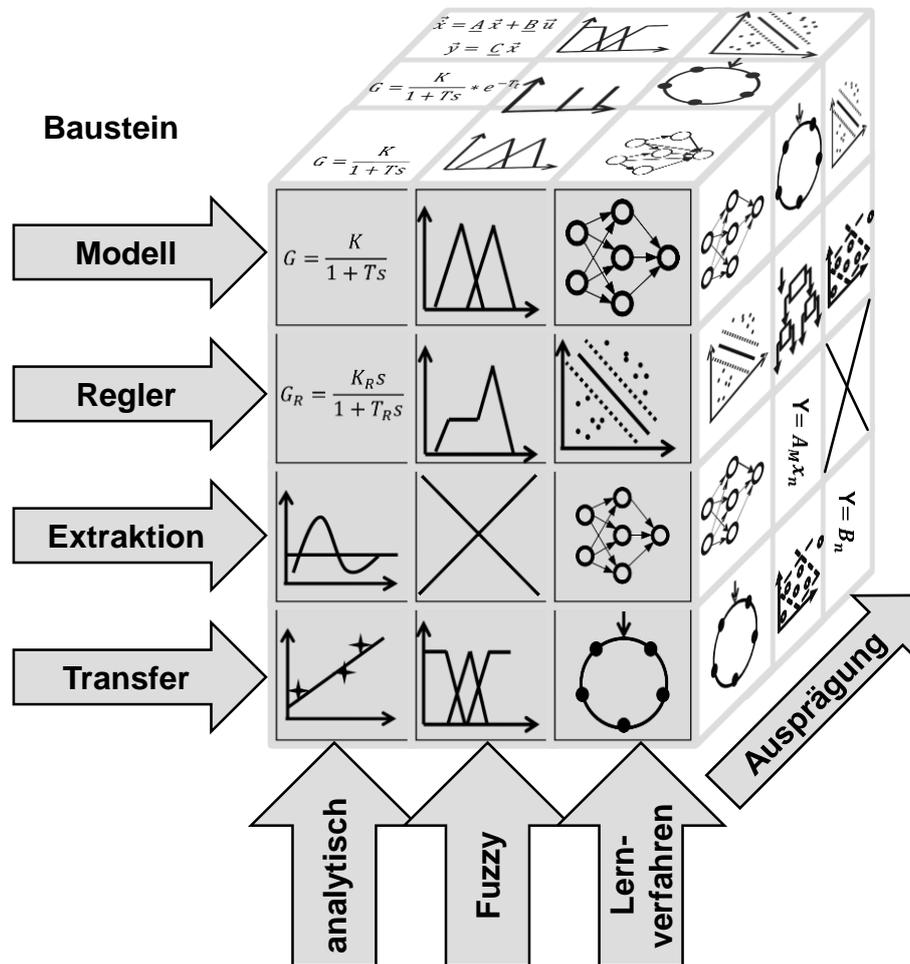


Abbildung 31: „Morphologischer Würfel“ zur Konzipierung des kognitiven Regelungssystems (SCHMID ET AL. 2013 B, S. 10)

Das modellbasierte, kognitive Steuerungskonzept erlaubt durch das adaptive Simulationsmodell eine hohe Modellierungsgüte und infolgedessen auch ein gutes Prozessverhalten, insbesondere wenn verschiedene Einflussgrößen und Nichtlinearitäten zu berücksichtigen sind.

Das in Kapitel 4 dargelegte Konzept zur Prozesssteuerung eignet sich für unterschiedlichste Prozesse und kann mithilfe unterschiedlicher Verfahren realisiert werden. Die exemplarische Umsetzung in der Drucktechnik soll Verständnis für die Funktionen und Zusammenhänge der einzelnen Bausteine schaffen und den Transfer auf andere Produktionsprozesse erleichtern.

5 Realisierung der kognitiven Prozesssteuerung in der Druckindustrie

Im Folgenden wird das prozessneutral beschriebene Konzept für die Regelung der optischen Dichte bei Produktionsbeginn angewandt. Abbildung 32 bietet einen Überblick über das Gesamtkonzept mit den gewählten Realisierungsalternativen, einschließlich der ausführlichen Erläuterungen in den jeweiligen Kapiteln.

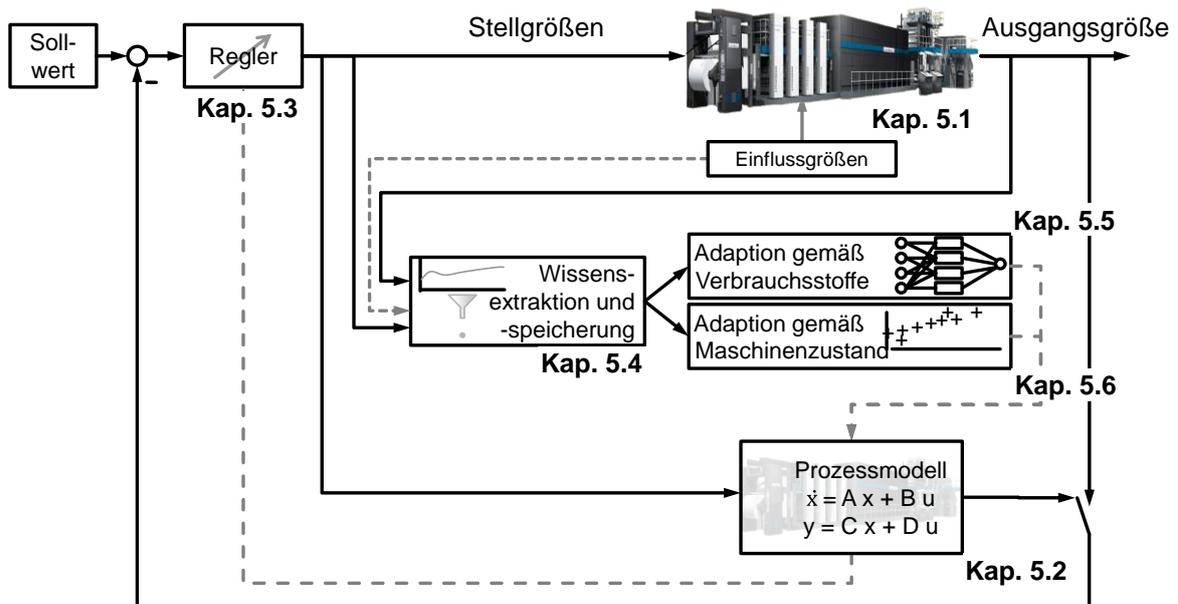


Abbildung 32: Vorgehen zur Umsetzung des modellbasierten Steuerungskonzepts (eigene Darstellung)

Bei der Übertragung der Vorgehensweise für andere Anwendungsgebiete ist zu beachten, dass dieses Vorgehen keine „kanonische Optimalform“ beschreibt und je nach Rahmenbedingungen, Vorwissen und Einflussfaktoren unterschiedliche Anpassungen notwendig sein können (LINDEMANN 2009; DÖRNER 2003).

Das Fundament bildet eine ausführliche Systemanalyse gemäß Kapitel 5.1, bei der neben dem eigentlichen Prozess insbesondere die weiteren technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen untersucht werden. Anschließend erfolgt die Realisierung des Prozessmodells (Kapitel 5.2), des Reglers (Kapitel 5.3), der Wissensextraktion (Kapitel 5.4) sowie des Adaptionmechanismus (Kapitel 5.5 und 5.6). Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Bausteinen, insbesondere hinsichtlich der Echtzeitanforderungen, erläutert Kapitel 5.7. Soweit möglich werden die realisierten Bausteine vor der Integration in die Druckmaschine validiert. Die technische Validierung und die wirtschaftliche Bewertung des Gesamtsystems erfolgen in den Kapiteln 6 und 7.

5.1 Durchführung einer Systemanalyse

Für die Entwicklung einer modellbasierten Steuerung ist zu Beginn eine Systemanalyse durchzuführen. Das Vorgehen kann grundsätzlich analog zu bekannten Projektmanagementkonzepten erfolgen, wie beispielsweise bei LIT-KE & KUNOW 2004. Im vorliegenden Fall hat sich das Vorgehen nach Abbildung 33 als geeignet erwiesen.

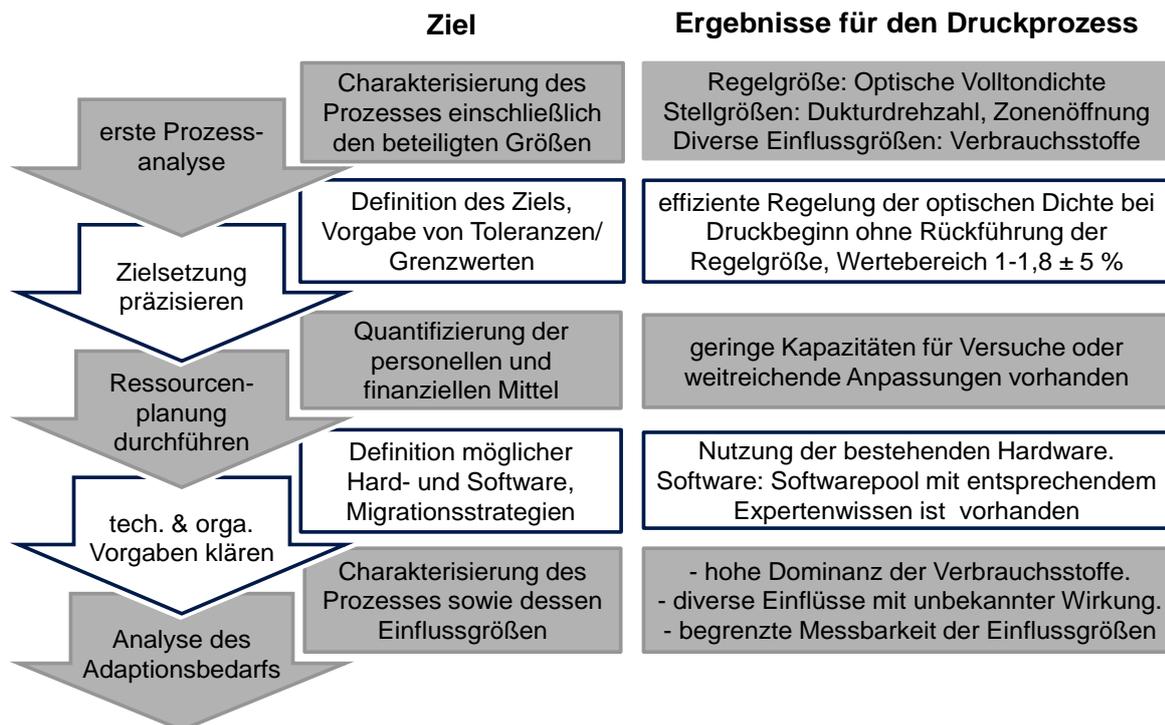


Abbildung 33: Notwendige Schritte für die Durchführung einer Systemanalyse (eigene Darstellung)

Der Ablauf der Systemanalyse gliedert sich in fünf Schritte. Während die Schritte eins bis drei bekannte Bestandteile des Projektmanagements darstellen, werden die Schritte vier (Kapitel 5.1.1) und fünf (Kapitel 5.1.2) nur selten explizit spezifiziert. Nachfolgend sind die Schritte vier und fünf exemplarisch erläutert, da diese für die Realisierung des Regelungssystems einen hohen Stellenwert besitzen.

5.1.1 Aufnahme der realisierungsrelevanten Rahmenbedingungen

Es ist sinnvoll, neben den prozess- und projektspezifischen Rahmenbedingungen weitere technische Anforderungen frühzeitig zu klären, welche direkt mit der Realisierung und der Nutzung des Regelungssystems zusammenhängen.

Dazu ist zu prüfen, welche Soft- und Hardware zulässig und welche Schnittstellen notwendig sind, sowohl zum Anwender als auch zu anderen technischen Systemen. Insbesondere bei Regelungsaufgaben ist die Echtzeitfähigkeit und Anpass-

barkeit auf unterschiedliche Betriebsbedingungen eine Voraussetzung für die wirtschaftliche Umsetzung.

Zusätzlich zu den technischen Voraussetzungen ist zu prüfen, welche Kenntnisse in den verschiedenen Disziplinen (numerische Mathematik, Regelungstechnik, Statistik, physikalisches Prozesswissen, maschinelle Lernverfahren) im Rahmen der Entwicklung sowie während der Betriebsphase nutzbar sind. Ebenfalls ist zu klären, wie die Dichteregelung in die Maschinensteuerung integriert werden kann. Neben der initialen Inbetriebnahme bei neuen Anlagen ist die Abwärtskompatibilität zu bestehenden Anlagen sowie die Anpassung an veränderte Prozess- oder Maschinenkonfigurationen zu evaluieren.

5.1.2 Analyse des Adaptionsbedarfs

In einem geschlossenen Regelkreis wird durch die Rückführung der Regelgröße meist ein gutes Prozessverhalten ermöglicht, da die Wirkungen aller Stell- und Störgrößen in der Regelgröße integriert sind. Wenn eine direkte Rückführung der Regelgröße, wie bei der Farbdichteregelung, nicht möglich ist und das Prozessverhalten starken Schwankungen unterliegt, sind Letztere möglichst zu berücksichtigen (KLOCKE 2010, S. 907). Diese Vorgehensweise ermöglicht eine hohe Genauigkeit der berechneten optischen Dichte. Im Rahmen der Systemanalyse ist zu klären, ob dies notwendig ist und wie dies erfolgen kann.

Die Literaturrecherche zeigt eine Vielzahl an Einflussgrößen auf, welche das dynamische Verhalten des Farbwerks und die erzielbare Druckqualität in hohem Maß beeinflussen. Eine erste Einteilung gemäß Abbildung 34 verdeutlicht, dass unterschiedliche Kategorien an Einflussgrößen existieren und damit für Prozessabweichungen verantwortlich sein können.

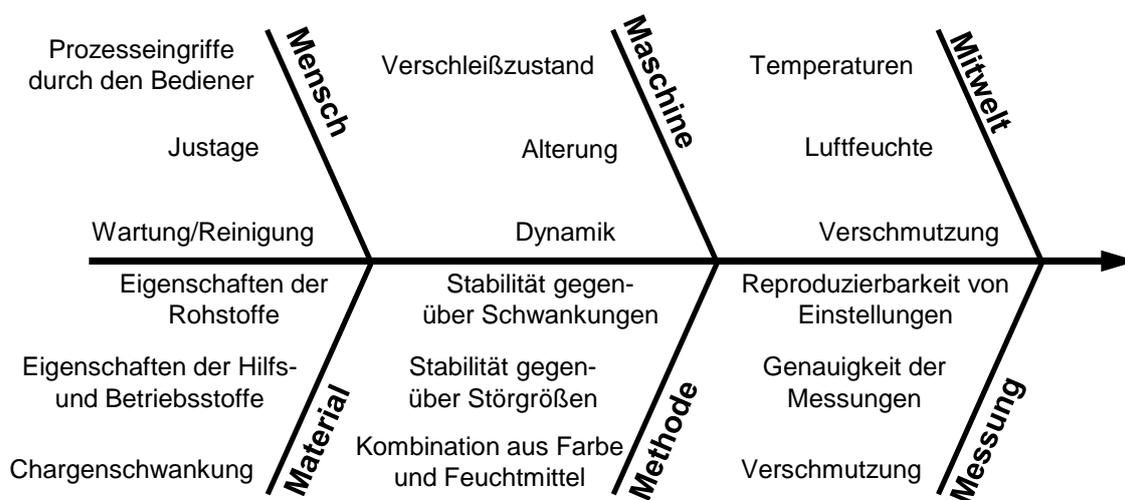


Abbildung 34: Kategorisierung der Einflussgrößen für den Druckprozess

Die Vielzahl an Einflussgrößen verdeutlicht die Notwendigkeit zur Berücksichtigung und Kompensation (BRAUN 2007, S. 1), sofern deren Relevanz den Aufwand rechtfertigen. Wie in Kapitel 1.4 aufgeführt sind die Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und dem Systemverhalten nicht genau bekannt, sodass diese nur bedingt im Rahmen der Modellierung berücksichtigt werden können. Kapitel 5.4 stellt verschiedene Möglichkeiten zur Adaption des Simulationsmodells detailliert vor. Erst durch die Adaption ist sichergestellt, dass die berechnete optische Dichte den realen Verhältnissen entspricht und die Prozessregelung auf realitätsnahen Werten beruht.

5.2 Realisierung eines Simulationsmodells

Nachdem die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen geklärt sind und eine erste Strukturierung der beteiligten Größen erfolgt ist, findet im zweiten Schritt der Aufbau des Simulationsmodells statt.

5.2.1 Auswahl des Modellierungsansatzes

Das Simulationsmodell soll kontinuierlich und totzeitfrei die optische Volltondichte berechnen, sodass der Regelkreis jederzeit geschlossen ist und bewährte Regelungskonzepte realisierbar sind. Für jede Zone eines Farbwerks ist die optische Volltondichte D_v separat zu berechnen, was eine hohe Anzahl an identischen Regelkreisen zur Folge hat. Aufgrund der hohen Relevanz verschiedener Einflussgrößen ergibt sich die Notwendigkeit, dass das Modell sowohl initial als auch kontinuierlich adaptiert werden kann. In Anlehnung an Kapitel 3.5 erscheint die analytische Modellierung des Farbwerks geeignet (JIANG 1994; SCHMITT 1979). Da die Zustandsgrößen den Emulsionsschichtdicken auf den Walzen entsprechen, kann das Modell punktuell durch eine Schichtdickenmessung verifiziert werden.

5.2.2 Systemanalytische Abbildung des Farbwerks

Ein Farbwerk besteht aus einer Aneinanderreihung von Walzen, welche über die Berührungspunkte miteinander verkoppelt sind, wie Abbildung 9 zeigt. Der Farbtransport vom Farbduktor über das Farbwerk auf den Bedruckstoff erfolgt aufgrund der Schichtdickendifferenz in Richtung abnehmender Schichtdicke. Die Schichtdicke stellt die Potenzialgröße dar und der Farbmassenstrom die Transportgröße. Da sich die Schichtdicke zwischen zwei Berührungspunkten nicht ändert, wird ein Walzensegment als Elementarzelle gewählt. Diese Wahl ermöglicht es, beliebige Farbwerkskonfigurationen simulativ abzubilden, da jedes Farbwerk aus Walzen und damit Walzensegmenten besteht. Obwohl speziell im Offsetdruck Farbe und Feuchtmittel und damit eine Emulsion gedruckt wird, findet nachfolgend der Begriff

„Farbe“ auch für eine Emulsion Verwendung, was in vergleichbarer Literatur ähnlich behandelt wird (KIPPHAN 2000).

Die Untersuchungen behandeln detailliert die Farbzufuhr vom Farbkasten sowie die Abfuhr über das Papier. Anschließend erfolgt eine kritische Betrachtung der Verreibung zwischen benachbarten Zonen, um diesen Effekt ausreichend zu beachten. Die Integration aller Bestandteile zu einem Gesamtmodell ermöglicht die Validierung des Übertragungsverhaltens anhand von Versuchen.

5.2.2.1 Farbfluss einer einzelnen Zone im Farbwerk

Das in Abbildung 9 dargestellte Farbwerk wird in einzelne Walzenssegmente aufgeteilt gemäß Abbildung 35. Die Walzenssegmente sind über die Berührungspunkte miteinander verkoppelt. Sowohl für das Walzenssegment als auch für den Berührungspunkt bildet eine Massenbilanz die Basis der numerischen Analyse.

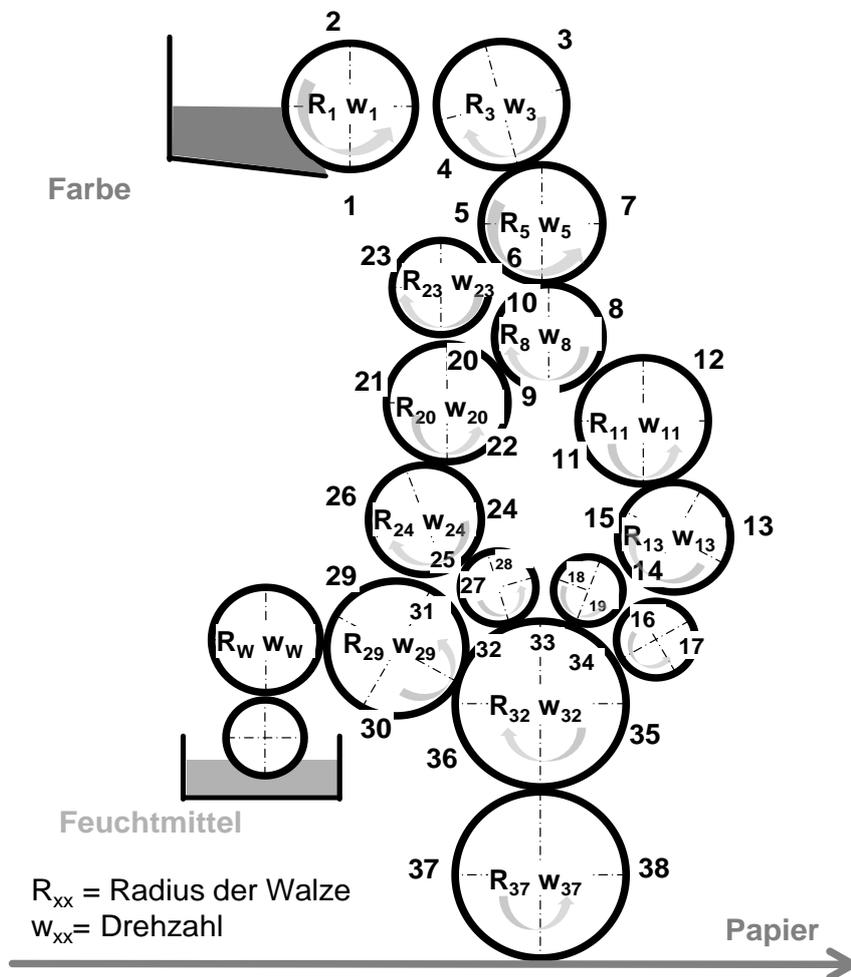


Abbildung 35: Aufteilung des Farbwerks in einzelne Walzenssegmente

Die Nummerierung der Walzenssegmente startet am Farbdüktor und wird fortlaufend in Farbflussrichtung bis zum Umdruck auf das Papier fortgeführt. Die Walzen

der Feuchtmittelzufuhr sind nicht berücksichtigt, da der Farbfluss über den Feuchtmittelduktor im regulären Druckbetrieb vernachlässigt werden kann .

Der Farbmassenstrom aufgrund der Querverreibung $Q_{(\eta,t)}$ wird anfangs gemäß Gleichung 5-1 vernachlässigt, um die Komplexität zu reduzieren. Durch die Vereinfachung kann die Farbwerksmodellierung in einem eindimensionalen Bezugssystem erfolgen, was hinsichtlich der Rechneranforderung vorteilhaft ist.

$$Q_{(\eta,t)} \stackrel{\text{def}}{=} 0$$

5-1

Die Zulässigkeit dieses Schritts wird in Kapitel 5.2.2.5 kritisch geprüft.

5.2.2.2 Massenbilanz an einer Elementarzelle

Jedes Walzensegment besteht aus einem Transport- und einem Spaltungsbereich. Der Transportbereich zeichnet sich durch die Farbschichtdicke als wesentliches Charakteristikum aus. Der Spaltungsbereich bildet den Berührungspunkt zweier Walzen ab, dort erfolgt die Farbspaltung. Die Länge des Spaltungsbereichs ist im Vergleich zum Transportbereich vernachlässigbar gering, welcher sich zwischen den Berührungspunkten zur vor- und nachgelagerten Walze über den Winkel φ erstreckt. In Abbildung 36 sind zwei Walzen A und B mit insgesamt vier Walzensegmenten A_1 , A_2 , B_1 und B_2 dargestellt.

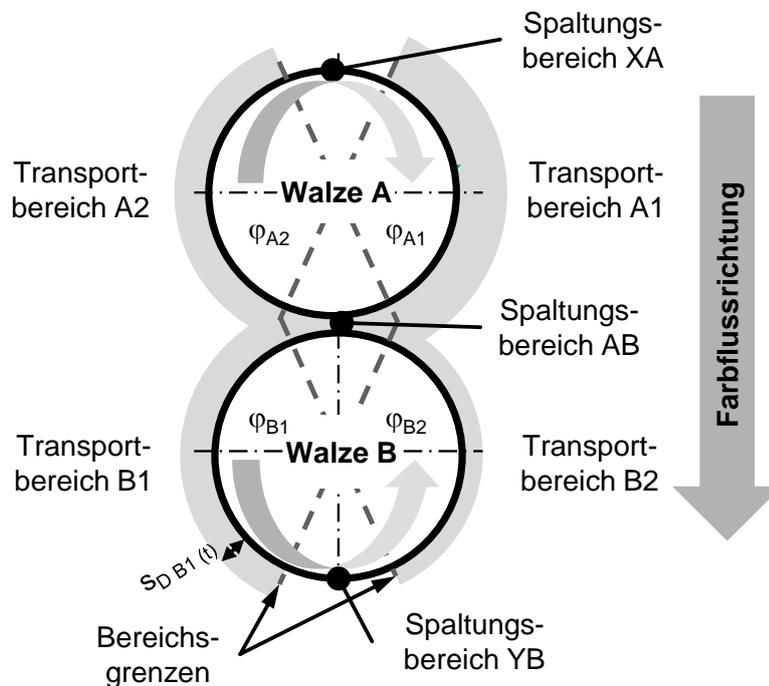


Abbildung 36: Elementarzelle für die Modellierung des dynamischen Verhaltens eines Farbwerks (eigene Darstellung)

Die Bilanzierung der Farbmassenströme eines Walzensegments kann für Gleichung 3-3 in angepasster Form übernommen werden. Unter Berücksichtigung der Annahme von Gleichung 5-1 ergibt sich Gleichung 5-2 für ein Walzensegment in Anlehnung an SCHMITT 1979. Doch während SCHMITT 1979 dies integral für alle Walzensegmente eines Farbwerks durchführt, bezieht sich diese Modellierung auf ein einzelnes Walzensegment.

Die Farbmassenbilanz muss zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein. Ein Ungleichgewicht zwischen zugeführtem Farbmassenstrom $E_{(t)}$ und abgeführtem Farbmassenstrom $A_{(t)}$ wirkt sich unmittelbar auf den inneren Zustand $S_{(t)}$ aus, welcher die gespeicherte Farbmenge und damit die Farbschichtdicke $s_{D(t)}$ darstellt. Farbnebel oder andere unerwünschte Effekte werden in Übereinstimmung mit den bestehenden Farbwerksmodellen nicht berücksichtigt.

$$\int_t^{t+\Delta t} (E_{(t)} - A_{(t)}) dt = \int_t^{t+\Delta t} (S_{(t)}) dt \quad 5-2$$

Die Farbschichtdicke $s_{D(\eta, \varphi, t)}$ kann grundsätzlich von der Ortskoordinate des Winkels φ und der Breite η abhängen. ρ ist die physikalische Dichte der Farbe. Die Farbmasse in einem Walzensegment mit dem Radius R , der Bogenlänge φ und der Breite η berechnet sich allgemein nach Gleichung 5-3.

$$m_{(t)} = \int_0^\varphi \int_0^\eta \rho s_{D(\eta, \varphi, t)} d\eta d\varphi \quad 5-3$$

Im Transportbereich zwischen zwei Berührungspunkten kann davon ausgegangen werden, dass sich die Schichtdicke nicht über den Winkel φ ändert, da keine Farbe im Transportbereich zugeführt oder abgeführt wird. Die Integration des Farbflusses erfolgt über die Zonenbreite, sodass eine mittlere Schichtdicke $s_{D(t)}$ eingesetzt wird. Die im Walzensegment gespeicherte Farbmasse $m_{(t)}$ berechnet sich damit anhand von Gleichung 5-4.

$$m_{(t)} = \rho \eta s_{D(t)} R \varphi \quad 5-4$$

Der zugeführte Farbmassenstrom $E_{(t)}$ berechnet sich entsprechend Gleichung 5-5 mithilfe der Winkelgeschwindigkeit ω der jeweiligen Walze sowie der zugeführten Schichtdicke $s_{D(t) zu}$ am Eingang des Transportbereichs.

$$E_{(t)} = \dot{m}_{(t)} = \frac{\rho \eta \varphi_{(t)} s_{D zu(t)}}{dt} = \rho \eta R \omega s_{D zu(t)} \quad 5-5$$

Analog dazu gilt für den abgeführten Farbmassenstrom $A_{(t)}$ Gleichung 5-6 sowie Gleichung 5-7 für die im Walzensegment gespeicherte Farbmenge $S_{(t)}$.

$$A_{(t)} = \dot{m}_{(t)} = \frac{\rho \eta \varphi_{(t)} S_{D \text{ ab } (t)}}{dt} = \rho \eta R \omega S_{D \text{ ab } (t)} \quad 5-6$$

$$S_{(t)} = \dot{m}_{(t)} = \frac{\rho \eta \varphi_{(t)} S_{D (t)}}{dt} = \rho \eta R \varphi \frac{S_{D(t)}}{dt} \quad 5-7$$

Für den Transportbereich eines Walzensegments lässt sich Gleichung 5-2 zur Differenzialgleichung nach Gleichung 5-8 umformen.

$$\rho \eta R \omega S_{D \text{ zu } (t)} - \rho \eta R \omega S_{D \text{ ab } (t)} = \rho \eta R \varphi \frac{S_{D(t)}}{dt} \quad 5-8$$

Der Spaltungsbereich besteht aus dem Berührungspunkt zweier Walzen und bildet theoretisch eine linienförmige Kontaktstelle ab, sodass die Länge φ_{SB} des Spaltungsbereichs vernachlässigt werden kann. Daher wird auch die gespeicherte Farbmenge irrelevant, entsprechend Gleichung 5-9.

$$\varphi_{SB} \stackrel{\text{def}}{=} 0 \rightarrow S_{SB (t)} = 0 \quad 5-9$$

Diese Vereinfachung trifft genau genommen nicht zu, da sich die Farbe aufgrund der Quetschwirkung beider Walzen vor dem Spalt in geringem Maß zurückstaut. Für die mathematische Abbildung ist diese Abweichung jedoch tolerierbar.

Die Massenbilanz im Spaltungsbereich ergibt sich zu Gleichung 5-10.

$$\int_t^{t+\Delta t} (E_{(t)} - A_{(t)}) dt = 0 \quad 5-10$$

Die dem Spaltungsbereich zugeführte Farbmenge muss der abgeführten Farbmenge entsprechen, da keine Farbe im Spaltungsbereich gespeichert wird.

Die Farbmassenströme sind in Abbildung 37 schematisch dargestellt, wobei die Bezeichnungen in Bezug auf die Transportbereiche gewählt sind, um eine durchgängige Nomenklatur zu erhalten. $\dot{m}_{A1 \text{ ab}}$ ist dementsprechend der aus dem Segment A 1 abfließende Massenstrom. Für eine bessere Nachvollziehbarkeit wird die Nummerierung von Abbildung 37 beibehalten.

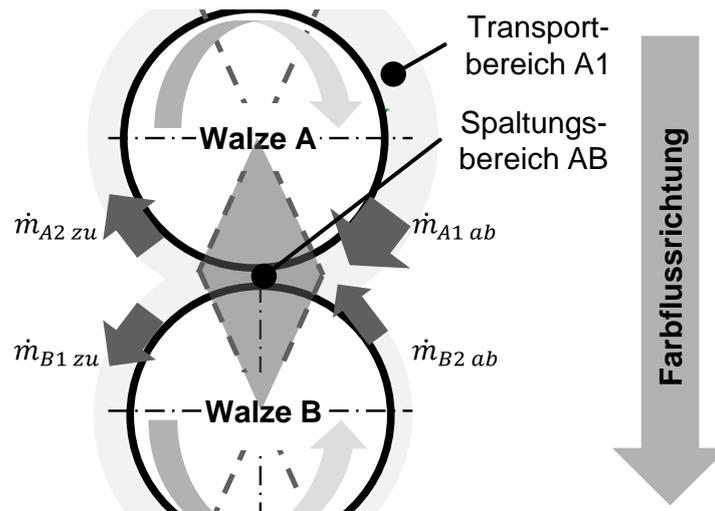


Abbildung 37: Detailierung der Farbspaltung im Spaltungsbereich AB

Der Spaltungsbereich ist zur Veranschaulichung vergrößert dargestellt. Die Massenströme $\dot{m}_{A2 zu}$ und $\dot{m}_{B1 zu}$ sowie $\dot{m}_{A1 ab}$ und $\dot{m}_{B2 ab}$ (5-11) müssen einander entsprechen. Das Verhältnis der beiden Schichtdicken nach dem Spaltungsbereich kann mit dem Spaltungsfaktor α_{AB} gemäß Gleichung 3-1 berechnet werden. Damit ergeben sich die Gleichungen 5-11 bis 5-13. Unbekannt sind jedoch die Schichtdicken sowie die Farbspaltungsfaktoren.

$$\dot{m}_{A2 zu} + \dot{m}_{B1 zu} = \dot{m}_{A1 ab} + \dot{m}_{B2 ab} \quad 5-11$$

$$\dot{m}_{B1 zu} = (\dot{m}_{A1 ab} + \dot{m}_{B2 ab}) * \alpha_{AB} \quad 5-12$$

$$\dot{m}_{A2 zu} = (\dot{m}_{A1 ab} + \dot{m}_{B2 ab}) * (1 - \alpha_{AB}) \quad 5-13$$

Gemäß der Definition der zu- und abfließenden Farbmassenströme (vgl. Gleichungen 5-6 und 5-7) ergibt sich Gleichung 5-12 zu Gleichung 5-14.

$$\begin{aligned} \dot{s}_{D B1 zu(t)} * R_B * \omega_B \\ = \dot{s}_{D A1 ab(t)} * R_A * \omega_A * \alpha_{AB} + \dot{s}_{D B2 ab(t)} * R_B * \omega_B * \alpha_{AB} \end{aligned} \quad 5-14$$

Basierend auf Gleichung 5-2 ergeben sich die Gleichungen 5-15 und 5-16, welche in Zustandsform aufgeführt sind.

$$\rho * \eta * R_B * \varphi_{B1} * \dot{s}_{D B1(t)} = (\dot{s}_{D B1 zu(t)} - \dot{s}_{D B1 ab(t)}) * R_B * \omega_B * \eta * \rho \quad 5-15$$

$$\dot{s}_{D B1(t)} = \frac{\omega_B}{\varphi_{B1}} * (\dot{s}_{D B1 zu(t)} - \dot{s}_{D B1 ab(t)}) \quad 5-16$$

Unter der Annahme eines schlupffreien Farbtransports ergibt sich aus den Gleichungen 5-16 und 5-4 der in Gleichung 5-17 dargestellte Zusammenhang für die Schichtdicke $\dot{s}_{D B1}(t)$ im Transportbereich:

$$\dot{s}_{D B1}(t) = \frac{\omega_B}{\varphi_{B2}} * \left((s_{D A1 ab}(t) * a_{AB} + s_{D B2 ab}(t) * a_{AB}) - s_{D B1 ab}(t) \right) \quad 5-17$$

Das dynamische Verhalten der Schichtdicke entspricht den Ausführungen von SCHMITT 1979 und JIANG 1993, wobei mithilfe von Gleichung 5-16 die Bestimmung der jeweiligen Modellparameter anhand der konstruktiven Gegebenheiten und unter Vorgabe eines mittleren Farbspaltungsfaktors möglich ist. Gleichung 5-18 stellt die Zusammenhänge des Zustands „Farbschichtdicke/ Emulsionsschichtdicke“ in einem Walzensegment in Zustandsform für unterschiedliche Oberflächengeschwindigkeiten dar, beispielsweise am Farbduktor.

$$\begin{aligned} \dot{s}_{D B1}(t) = & s_{D A1 ab}(t) * R_A * \omega_A * \frac{a_{AB}}{R_A \varphi_{B1}} - \\ & s_{D B1 ab}(t) * \omega_B * \frac{1}{\varphi_{B1}} + s_{D B2}(t) * R_B * \omega_B * \frac{a_{AB}}{R_B * \varphi_{B1}} \end{aligned} \quad 5-18$$

Die Verknüpfung der einzelnen Walzensegmente zu einem Farbwerk erfolgt durch die Zuordnung der Farbmassenströme. Die aus einem Walzensegment abgeführte Farbmenge entspricht der zugeführten Farbmenge des in Farbflussrichtung liegenden Walzensegments. Das gesamte Farbwerksverhalten kann in Zustandsform (vgl. Gleichung 5-19) umgeformt werden. Ein Abschwenken von Walzen kann durch die Veränderung des Spaltungsfaktors direkt für das Modell übernommen werden, eine separate Modellierung ist dazu nicht nötig. Die transportbedingten Totzeiten werden als eigenständiger Vorgang modelliert, um eine lineare Zustandsmatrix zu erhalten.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} * \mathbf{x} + \mathbf{B} * \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C} * \mathbf{x} + \mathbf{D} * \mathbf{u} \end{aligned} \quad 5-19$$

Der Zustandsvektor \mathbf{x} repräsentiert die Farbschichtdicken auf den Walzensegmenten. Die durch den Farbduktor zugeführte Farbmenge wird durch den Stellvektor \mathbf{u} beschrieben und in Kapitel 5.2.2.3 quantifiziert. Der Ausgangsgrößenvektor \mathbf{y} beinhaltet die Volltondichte auf dem Papier.

Für das Farbwerk konnte das Übertragungsverhalten im Zustandsraum ermittelt werden. Die Hauptdiagonalelemente der Dynamikmatrix \mathbf{A} sind negativ. Die restlichen Elemente sind positiv, wenn an den Berührungspunkten der Walzensegmente Farbe ausgetauscht wird, andernfalls sind diese 0. Damit sind die Effekte „Papiertransport in das Farbwerk“ sowie „Feuchtmittelrückspaltung in den Farbkasten und Blanklaufen des Farbduktors“ ebenfalls erklärbar, wenngleich diese Effekte für den regulären Druckbetrieb vernachlässigt werden können (DÖRSAM 2010).

Die Eingangsmatrix **B** beschreibt die Farbzufuhr durch den Duktus und ist deshalb nur bei einem Element ungleich 0. Die Ausgangsmatrix **C** repräsentiert die Verknüpfung der Schichtdicke auf dem Plattenzylinder mit der erreichbaren optischen Volltondichte und beinhaltet die effektive Farbergiebigkeit FE_{eff} , wie in Kapitel 5.5 erläutert. Die Durchgriffsmatrix **D** ist vollständig 0.

Für das in Abbildung 35 dargestellte Farbwerk besitzt der Zustandsvektor 38 Zustände, entsprechend der Anzahl der Walzensegmente. Je nach Farbwerkskonfiguration kann ein einzelnes Farbwerk aus bis zu 50 nebeneinander angeordneten Zonen bestehen, wodurch sich 1.900 Zustände je Farbwerk ergeben, die stetig berechnet werden müssen mit einer Zykluszeit unter einer Sekunde. Für die Modellierung bietet sich die vektorielle Darstellung und Berechnung an, da die Berechnungsabläufe in allen Zonen gleich sind.

5.2.2.3 Modellierung der Farbzufuhr

Die beiden Stellgrößen Zonenöffnung und Farbduktordrehzahl bestimmen die zugeführte Farbmenge. Beide Größen können in einem Bereich von 0 bis 100 % verändert werden. Während die Farbduktordrehzahl n_{FD} nur für alle Zonen eines Druckwerks gemeinsam eingestellt werden kann, ist die Zonenöffnung ZOE für jede Zone separat stellbar. Der dem Farbwerk zugeführte Farbmassenstrom u kann durch die Analyse der Vorgänge am Farbduktor berechnet werden. Bei einem Filmfarbwerk erfolgt die Farbzufuhr vom Farbduktor auf die Filmwalze über einen Spalt zwischen beiden Walzen wie Abbildung 38 zeigt.

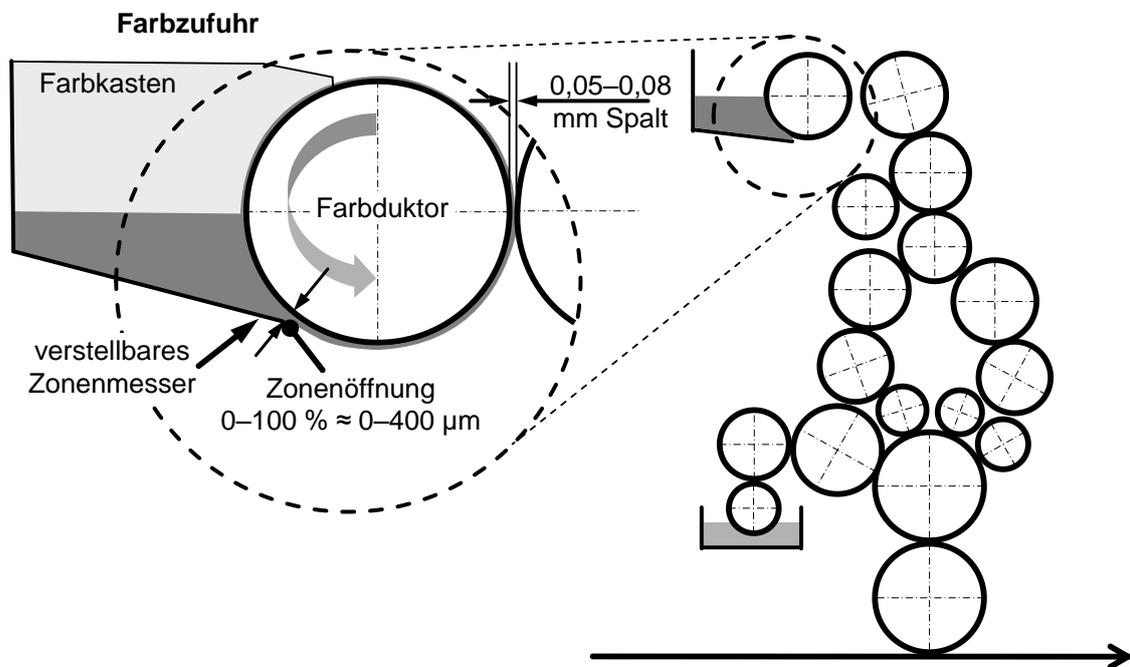


Abbildung 38: Detaillierung der Farbzufuhr bei einem Filmfarbwerk
(in Anlehnung an WALENSKI 1995, S. 159)

Der Farbkasten ist dauerhaft mit Druckfarbe gefüllt. Die Zonenöffnung beschreibt den lichten Abstand zwischen Zonenmesser und Dukturoberfläche und kann bis zum Maximalwert d_{\max} von etwa 400 μm erhöht werden, was der maximalen Zonenöffnung bei 100 % Zonenöffnung entspricht. 0 % Zonenöffnung entsprechen etwa einem Abstand von 0 μm . Die Strömungsverhältnisse am Spalt nach Abbildung 39 zeigen, dass die zulaufende Schichtdicke s_{D1} auf dem Farbduktor geringer ist als der Abstand zwischen den Zonenmessern und dem Farbduktor.

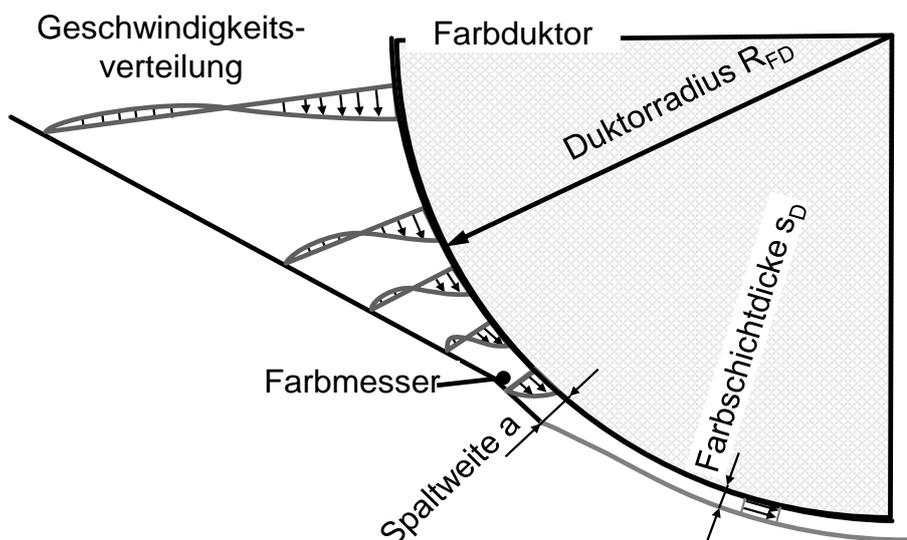


Abbildung 39: Strömungsverhältnisse am Farbduktor (nach FUNKE 1994)

Die einlaufende Schichtdicke auf dem Farbduktor s_{D1} entspricht der mechanischen Zonenöffnung ZOE_{mech} , die um die viskoelastische Einschnürung nach Gleichung 5-20 korrigiert ist. Der Einschnürfaktor f_{Ein} beträgt zwischen 0,75 und 0,9 und hängt unter anderem von der Farbviskosität, den Temperaturen sowie der Walzendrehzahl ab, was anhand eigener Versuche gemäß Abbildung 40 und Abbildung 41 bestätigt werden konnte.

$$s_{D1} = ZOE_{\text{mech}} * f_{\text{Ein}}$$

5-20

Die beiden Walzen besitzen einen Abstand $s_{FD\text{FW}}$ von etwa 80 μm . Damit ist es möglich, die Drehzahl des Farbdukts unabhängig von den restlichen Farbwerkswalzen zu verändern. Der Farbübertragungsprozess vom Farbduktor auf die Filmwalze kann trotz des Spalts näherungsweise als Farbspaltung zwischen zwei Walzen interpretiert werden. Die für die Farbspaltung relevante Schichtdicke auf dem Farbduktor $s_{d1\text{rel}}$ entspricht der zugeführten Farbschichtdicke s_{D1} zu, reduziert um den Abstand der beiden Walzenoberflächen $s_{FD\text{FW}}$ gemäß Gleichung 5-21.

$$s_{D1rel} = s_{D1zu} - s_{FD FW} \vee s_{D1zu} > s_{FD FW}$$

Zur Validierung der vorgestellten Abhängigkeiten erfolgten Schichtdickenmessungen am Farbduktor. Bei unterschiedlichen Zonenöffnungen wurden die Farbschichtdicken vor und nach dem Übertrag zur Filmwalze ermittelt. In mehreren Versuchsreihen wurden diverse Parameter wie Farbtemperatur, Farbduktor- und Filmwalzendrehzahl verändert. Die Ergebnisse sind exemplarisch in Abbildung 40 und Abbildung 41 dargestellt.

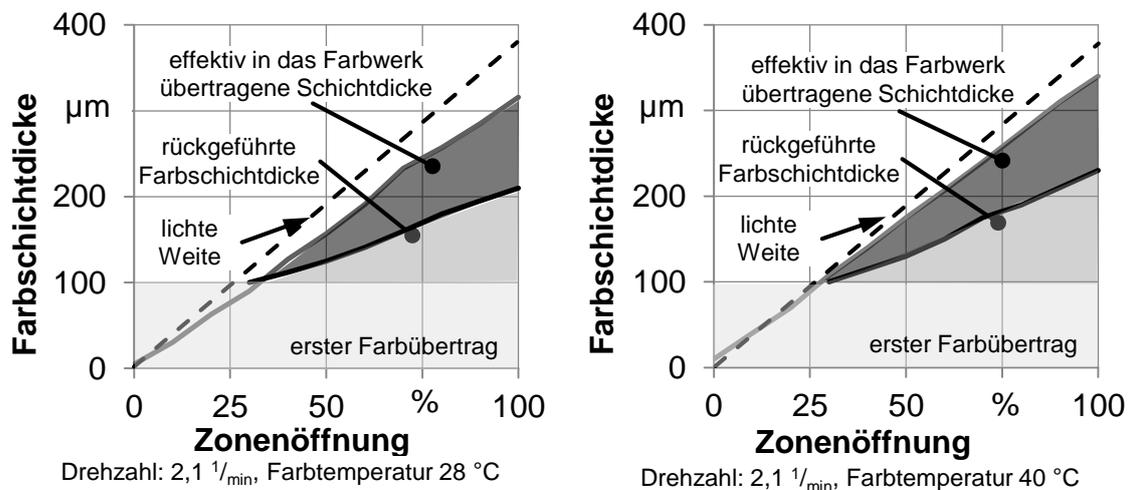


Abbildung 40: Ausbildung der Schichtdicken bei normaler Temperatur Abbildung 41: Ausbildung der Schichtdicken bei erhöhter Temperatur

Die lichte Öffnungsweite zwischen Zonenmesser und Farbduktor hängt direkt linear von der Zonenöffnung ab, wie eigene Messungen bestätigt haben. Die Einschnürung der Farbe reduziert die Schichtdicke um etwa 20 % bei 28 °C Farbtemperatur, der Einschnürfaktor f_{Ein} beträgt dementsprechend 0,8. Bei einer erhöhten Temperatur von 40 °C steigt der Einschnürfaktor auf etwa 0,85 aufgrund der verringerten Viskosität der Farbe. Diese Farbschicht befindet sich gemäß Abbildung 35 auf dem Walzensegment 1 vor dem Übertrag auf die Filmwalze. Solange die Schichtdicke s_{D1} geringer als der Spalt zwischen Farbduktor und Farbschicht auf der Filmwalze ist, wird keine Farbe in das Farbwerk übertragen. Die rücklaufende Farbschicht s_{D2} entspricht der vorlaufenden Schichtdicke s_{D1} .

Sobald die zugeführte Schichtdicke s_{D1} größer ist als der Abstand vom Farbduktor zur Filmwalzenoberfläche $s_{FD FW}$, wird effektiv Farbe auf die Filmwalze übertragen, wobei der Spaltungsfaktor α_{13} im Mittel 32 % beträgt. Der Farbspaltungsfaktor α_{13} zwischen dem Farbduktor und der Filmwalze ist in hohem Maß von der Filmwalzenoberflächenstruktur als auch von der Emulsionsbildung abhängig und kann

theoretisch zwischen 0 (kein Farbeintrag in das Farbwerk, beispielsweise bei überemulgierter Farbe) und 1 (sehr hohe Geschwindigkeitsdifferenz beider Walzenoberflächen, fräsend wirkendes Oberflächenprofil der Filmwalze) schwanken.

Der zugeführte Farbmassenstrom $\dot{m}_{FD\ zu}$ lässt sich nach Gleichung 5-22 berechnen, wobei R_1 der Radius des Farbduktors sowie ω_1 die Winkelgeschwindigkeit des Farbduktors darstellt. Für die Farbspaltung am Farbduktor ist neben der Farbmenge auf dem Farbduktor auch die zugeführte Farbmenge durch die Filmwalze auf dem Walzensegment vier gemäß Abbildung 35 zu berücksichtigen.

$$\dot{m}_{FD\ zu} = ((s_{D\ 1} - s_{FD\ FW}) * R_1 * \omega_1 + R_3 * \omega_3 * s_{D\ 4}) * b * \rho * \alpha_{13} \quad 5-22$$

Gleichung 5-22 stellt damit den Zusammenhang zwischen den beiden Stellgrößen Zonenöffnung und Farbduktordrehzahl und dem zugeführten Farbmassenstrom her. Da beide Stellgrößen multiplikativ miteinander verknüpft sind, eignen sie sich nicht für eine lineare Übertragungsfunktion. Deshalb wird die virtuelle Stellgröße Y_{vir} (vgl. Gleichung 5-23) definiert, welche die effektive Zonenöffnung ZOE_{eff} und Winkelgeschwindigkeit des Farbduktors ω_1 verknüpft und eine lineare Modellierung des Farbwerks zulässt.

$$Y_{vir} = ZOE_{eff} * \omega_1 \quad 5-23$$

Die effektive Zonenöffnung ZOE_{eff} kompensiert den Spalt zwischen Farbduktor und Filmwalze. Die eingestellte Zonenöffnung ZOE , multipliziert mit der maximalen Zonenöffnung, wird dazu um den Abstand beider Walzenoberflächen $s_{FD\ FW}$ verringert gemäß Gleichung 5-24.

$$ZOE_{eff} = (ZOE * d_{max}) - \frac{s_{FD\ FW}}{f_{Ein}} \quad 5-24$$

Mithilfe der zugeführten Farbmenge nach Gleichung 5-22 und der Übertragungsfunktion des Farbwerks nach Gleichung 5-19 kann die Farbverteilung im Farbwerk berechnet werden. Als letzter Schritt der Modellierung ist der Zusammenhang zwischen der gedruckten Farbmenge und der optischen Dichte zu ermitteln.

5.2.2.4 Modellierung des Umdrucks der Farbe auf den Bedruckstoff

Die beim vollflächigen Umdruck stattfindenden Vorgänge sind vergleichbar dem Farbspaltungsprozess zwischen zwei Walzen, wobei das Papier keine Farbe mitführt und ein Teil der Farbe in das Papier eindringt (DÖRSAM 2010, S. 32). Zur Berechnung der optischen Dichte ergibt sich Gleichung 5-25, basierend auf der Definition der effektiven Farbergiebigkeit FE_{eff} (Gleichung 2-2). Der Parameter FD

stellt die mittlere zonale Flächendeckung und R_{37} den Radius des Plattenzylinders dar, unter der Voraussetzung einer schlupffreien Abrollbewegung zwischen Bedruckstoffbahn und Gummizylinder. \dot{m}_{Papier} verkörpert den auf das Papier übertragenen Farbmassenstrom je Zeiteinheit über die Breite b .

$$D_V = \frac{\dot{m}_{\text{Papier}} * FE_{\text{eff}}}{b * \omega_{37} * R_{37} * FD * \rho} \quad 5-25$$

Grundlage für Gleichung 5-25 bildet die Erkenntnis, dass der Zusammenhang zwischen der Farbschichtdicke auf dem Papier und der optischen Dichte näherungsweise linear ist und nur gering von der Flächendeckung abhängt. Mit zunehmender Flächendeckung FD steigt der Farbanteil linear an, der über das Papier aus dem Farbwerk ausgetragen wird. Die Schichtdicke auf einem Walzensegment und damit im gesamten Farbwerk ist näherungsweise unabhängig von der zu druckenden Flächendeckung.

In Abbildung 42 ist dies sehr gut zu erkennen. Dort sind die mit einem Nassfilmrad gemessenen Schichtdicken auf unterschiedlichen Walzen bei 3 und bei 30 % Flächendeckung und optische Dichten von 1,0 und 1,4 aufgetragen. Die Nummerierung der Walzen erfolgt gemäß Abbildung 35. In Farbflussrichtung am nächsten an der Farbzufuhr liegt Walze 8. Die Walzen 24 und 13 realisieren den Farbübertrag auf den Plattenzylinder.

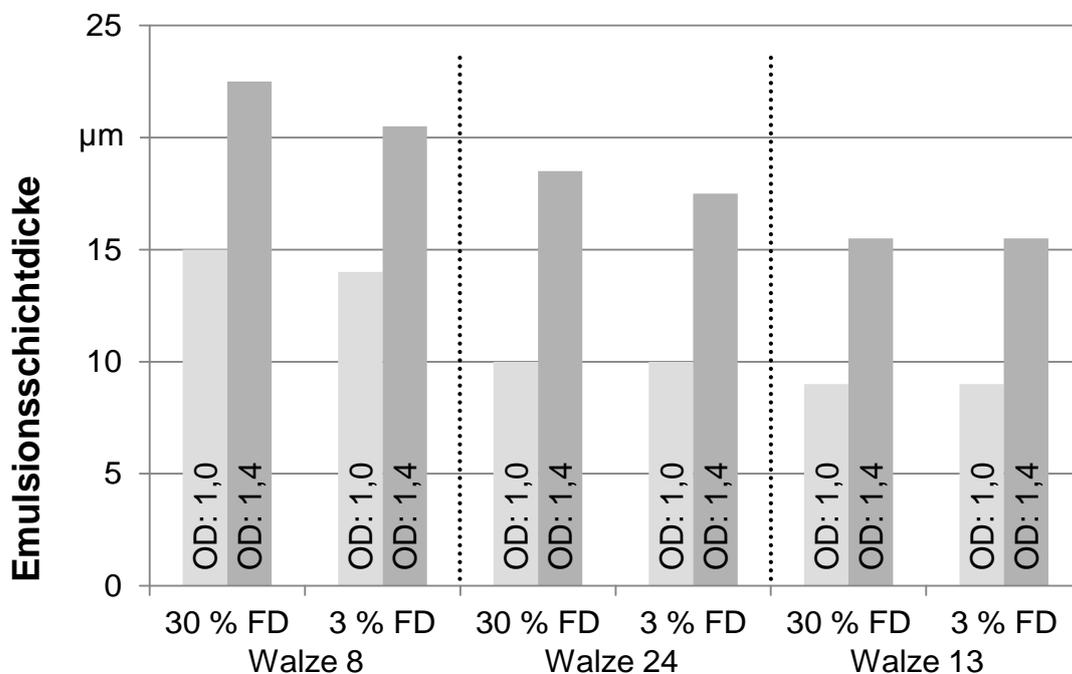


Abbildung 42: Farbschichtdicken im Farbwerk bei unterschiedlichen optischen Dichten und Flächendeckungen (FD = zonale Flächendeckung, OD = optische Dichte)

Sehr gut zu erkennen ist, dass die Schichtdicke auf den verschiedenen Walzen trotz der um den Faktor 10 erhöhten Flächendeckung nur um etwa 10 % ansteigt. Ist die Dichte um 40 % höher, steigen die Schichtdicken annähernd im selben Maße. Dieser Sachverhalt ist für die Modellierung des Farbtransports sowie für die Bewertung der Verreibung wesentlich. Dies entspricht auch den Ergebnissen der Modellierung in Kapitel 5.2.2.2. Eine höhere Flächendeckung hat dementsprechend keine höheren Schichtdicken im Farbwerk zur Folge. In diesem Fall erhöht sich der Farbdurchsatz, während die mittlere Verweilzeit der Farbe im Farbwerk abnimmt.

5.2.2.5 Berücksichtigung der Verreibung

Die bisher vorgestellte Modellierung des Farbwerksverhaltens vernachlässigt die seitliche Verreibung der axial oszillierenden Verreiberwalzen. Diese Walzen vergleichmäßigen den Farbfluss über die Druckbreite und egalisieren Unregelmäßigkeiten der Farbzufuhr, beispielsweise aufgrund von Verschmutzungen im Farbkasten. Der Verreibung liegen dieselben Prinzipien für den Farbtransport zugrunde wie im Farbwerk. Eine detaillierte Betrachtung und Modellierung der Verreibung findet sich in SCHMITT 1979.

Die Verreiberwalzen nehmen durch das Abrollen auf den benachbarten Zonen Farbe auf. Während der Drehbewegung führt die Verreiberwalze gleichzeitig eine Axialbewegung aus, sodass die aufgenommene Farbe an einem axial versetzten Punkt wieder auf die Walze zurückgespalten wird. Somit kann Farbe schrittweise über die komplette Druckbreite transportiert beziehungsweise verrieben werden. Der Farbmassenstrom ist dabei von verschiedenen Größen abhängig (REICHENBERGER 1979):

- Schichtdickendifferenz zwischen den benachbarten Zonen,
- Axialgeschwindigkeit der Verreiberwalze und Axialhub,
- Drehzahl der Verreiberwalze,
- Durchmesser der beteiligten Walzen,
- Spaltungsfaktoren der Verreibung.

Im Rahmen eigener Versuche wurde die Verreibung detailliert untersucht. Abbildung 43 zeigt die stationären Dichteverläufe, die über die Druckbreite aufgetragen sind, sowohl bei inaktiver als auch bei aktiver Axialbewegung der Verreiberwalzen. Dafür wurde in einem konventionellen Offsetdruckwerk im mittleren Bereich zwischen 40 und 84 mm Farbe zugeführt, in den äußeren Bereichen erfolgte keine Farbzufuhr. Die Verteilung der Farbe am Plattenzylinder wurde nach dessen Umdruck auf die Papierbahn durch die Messung der optischen Dichte bestimmt.

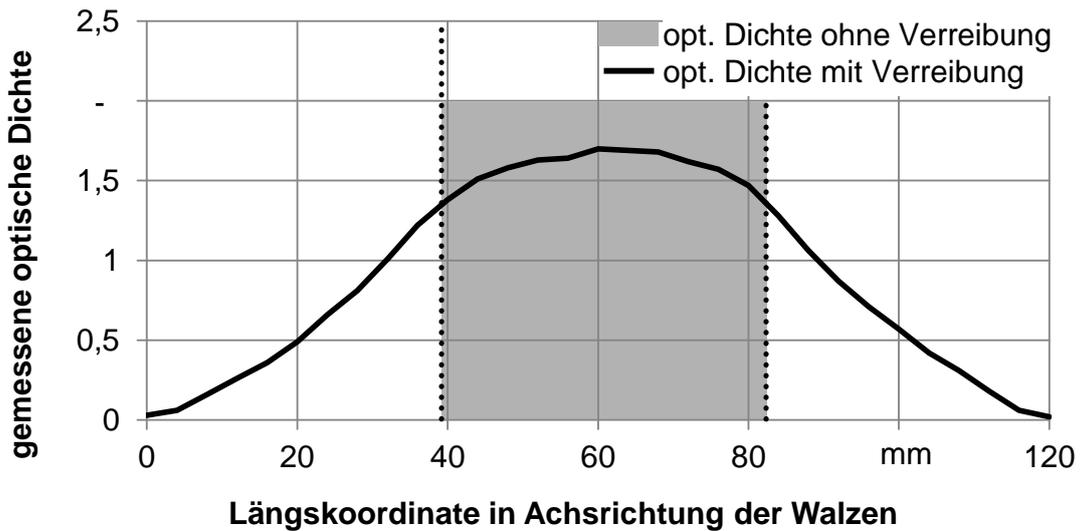


Abbildung 43: Verlauf der optischen Dichte ohne und mit aktiver Verreibung

Ohne aktive Verreibung erfolgt kein Querfluss der Farbe und das zugeführte Farbprofil bildet sich fast unverändert auf dem Papier wieder ab. Die sich ergebende Dichte von 2,0 wird über die Breite zwischen 40 und 84 mm gleichmäßig erreicht.

Wird die Verreibung aktiviert, so verändert sich das Farbprofil stark. Der Übergang zu den Randbereichen erfolgt merklich sanfter, die Farbe wird in der vorliegenden Konfiguration um etwa 40 mm seitlich verrieben. Bei veränderter Maschinenkonfiguration würde sich die Verreibungsbreite verändern. Die verriebene Farbmasse bewirkt gleichzeitig ein Absinken des Nominalwerts von 2,0 auf den Maximalwert von 1,7, da die insgesamt zugeführte Farbmenge konstant bleibt.

In Abbildung 44 sind die axial transportierten Farbmengen über der Differenz der optischen Dichte benachbarter Zonen dargestellt, wobei die Messauflösung in der Breite 4 mm beträgt. Die Farbmasse wird über eine fiktive Farbergiebigkeit sowie die Messung der optischen Dichte bestimmt.

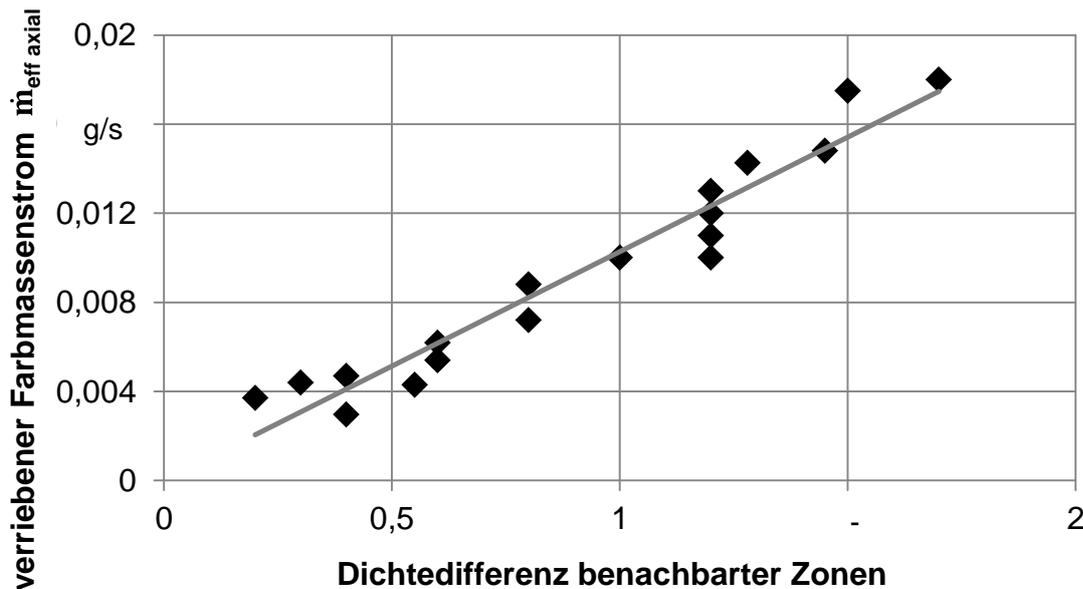


Abbildung 44: Verriebener Farbmassenstrom in Abhängigkeit der Dichtedifferenz zweier benachbarter Zonen

Sehr gut erkennbar ist, dass der in Achsrichtung verriebene Farbmassenstrom $\dot{m}_{eff_axial_{n-m}}$ zwischen benachbarten Zonen annähernd linear von der Dichtedifferenz und damit von der Schichtdickendifferenz $s_{D_n} - s_{D_m}$ der Zonen abhängt. Der Zusammenhang kann mithilfe des Proportionalitätsfaktors K nach Gleichung 5-26 beschrieben werden und deckt sich mit den Annahmen aus SCHMITT 1979, wobei dort kein Beleg für die Hypothese zu finden ist.

$$\dot{m}_{eff_axial_{n-m}} = (s_{D_n} - s_{D_m}) * K \quad 5-26$$

Dementsprechend ist der Verreibungseffekt zu berücksichtigen, wenn Differenzen der Schichtdicken benachbarter Zonen auftreten. Schichtdickendifferenzen wirken sich beim Umdruck in einer unterschiedlichen optischen Dichte (OD) der benachbarten Zonen aus. Unterschiedliche Flächendeckungen benachbarter Zonen besitzen nur sehr geringen Einfluss auf die Schichtdicken und damit auf die Verreibung.

Um eine hohe Qualität der Druckexemplare möglichst schnell zu erreichen, muss sich die optische Dichte über alle Zonen in der zulässigen Toleranz bewegen. Da die Zieldichten über die Druckbreite in der Regel gleich sind, ergeben sich keine Dichtedifferenzen. Der Effekt der Verreibung kann deshalb vernachlässigt werden. Der Berechnungsaufwand verringert sich enorm, da sich die einzelnen Zonen unabhängig voneinander berechnen lassen.

5.2.2.6 Validierung der Modellannahmen

Jedes Walzensegment kann als PT_1 -System dargestellt werden. Die Verkopplung der Walzensegmente führt je nach Anzahl n der Walzensegmente zu einem PT_n -System. Für das betrachtete Farbwerk mit 38 Walzensegmenten ergibt sich ein PT_{38} -System mit einer transportbedingten Totzeit aufgrund des Abstands der Farbzufuhreinrichtung zum Messsystem für jede Zone.

Die Validierung der Modellannahmen wurde durch mehrere Druckversuche durchgeführt. Exemplarisch ist in Abbildung 45 der Verlauf der gemessenen optischen Volltondichte über die ersten gedruckten Exemplare aus dem leeren Farbwerk dargestellt. Dem gemessenen Dichteverlauf sind die Ausgangswerte des Simulationsmodells gegenübergestellt. Der erste Umdruck vom Plattenzylinder auf das Papier erfolgt bei Druckexemplar 0, die zonale Flächendeckung beträgt 5 % über alle Zonen. Die Spaltungsfaktoren des Simulationsmodells liegen im Durchschnitt bei 0,48, auf eine detaillierte Bestimmung der einzelnen Faktoren für die jeweiligen Spaltungsstellen wurde aufgrund der nur ungenügenden Messgenauigkeit bekannter Verfahren sowie der Unzulässigkeit der Berechnung während instationärer Betriebsbedingungen verzichtet, wie in Kapitel 3.5.3 erläutert ist.

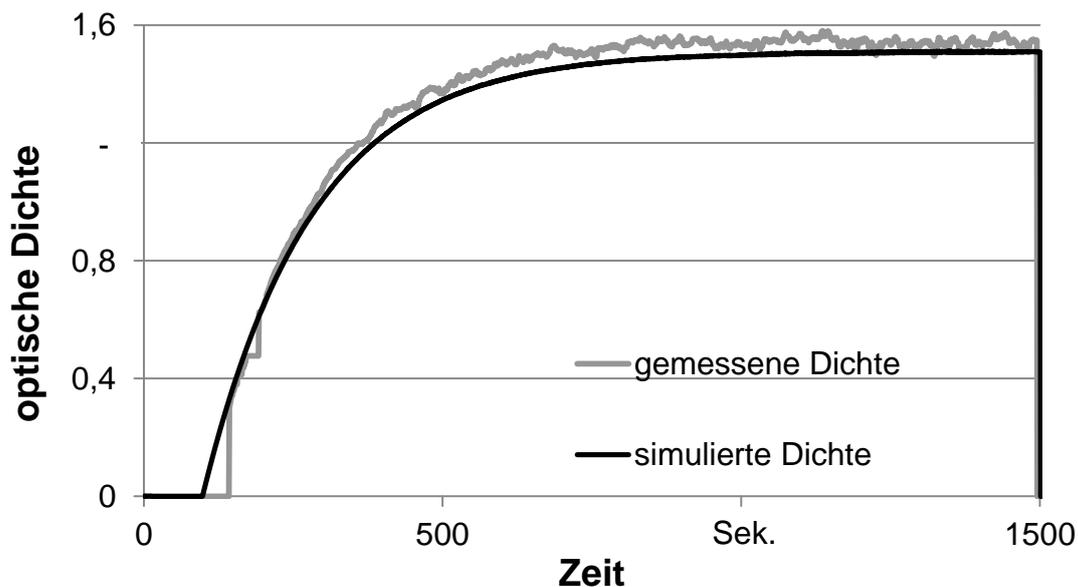


Abbildung 45: Validierung des Simulationsmodells einer Farbzone im Hochlauf

Beide Linien verharren anfangs bei 0 aufgrund der transportbedingten Totzeit. Nach etwa 8 Sek. steigt die simulierte Dichte des Simulationsmodells kontinuierlich an, die reale Sensorik zur Dichtemessung benötigt die höhere Mindestdichte von etwa 0,6, bis erste Messwerte zuverlässig ermittelt werden können. Dies ist ab etwa 52 Sek. der Fall. Anschließend steigt die optische Dichte in der Realität wie auch im Simulationsmodell stetig an, bis der stationäre Wert von 1,5 nach etwa 600 Sek. erreicht ist.

Aufgrund der grundlegenden Übereinstimmung zwischen den Simulationswerten und den Messwerten kann das Modell für den Aufbau einer modellbasierten Regelung dienen, der qualitative Verlauf ist ausreichend genau abgebildet. Eine vollständig exakte Nachbildung des Dichteverlaufs ist aufgrund der Vielzahl von möglichen Einflussgrößen nicht zielführend, eine Abweichung von $\pm 10\%$ wird mit der linearen Modellierung als ausreichend betrachtet.

5.2.2.7 Möglichkeiten der Modellreduktion

Die systemtheoretische Betrachtung des Farbwerks ermöglicht es, die mittlere Farbschichtdicke für jedes Walzensegment in jeder Zone zu berechnen. Bei 38 Walzensegmenten je Zone und bis zu 50 Zonen je Farbwerk ergeben sich 1.900 Zustände in jedem Druckwerk. Die Verreibung wird im Simulationsmodell nicht separat erfasst aufgrund der Zusammenhänge wie in Kapitel 5.2.2.5 erläutert. Die Verwendung des Zustandsraummodells erfordert aufgrund der hohen Anzahl an Zuständen bereits die Reduzierung der Zustände. Dies kann über mathematische Methoden (ALBUNNI 2010) oder physikalisch begründet aufgrund einer vereinfachter Modellierung (TROCH ET AL. 1992) stattfinden.

Für die Farbwerksmodellierung wurden zwei physikalisch begründete Schritte durchgeführt, wobei die Unterteilung des Farbwerks in die einzelnen Zonen beibehalten wurde. Jede Zone kann neben der Zustandsraumdarstellung mithilfe eines PT_1 - T_t -Modells beschrieben werden. Dabei werden die Spaltungsfaktoren α zwischen den Walzensegmenten sowie die Farbergiebigkeit zur effektiven Farbergiebigkeit FE_{eff} zusammengefasst. Das Übertragungsverhalten einer Zone lässt sich dadurch nach Gleichung 5-27 vereinfachen.

$$G_{(s)} = \frac{Y_{(s)}}{U_{(s)}} = \frac{K_S}{1 + s * T_S} * e^{-s T_t} \quad 5-27$$

Die drei Modellparameter Streckenverstärkung K_S , Zeitkonstante T_S und Totzeit T_t können für jede Zone von der systemtheoretischen Analyse abgeleitet werden, wobei insbesondere die stationäre Streckenverstärkung K_S von der zonalen Flächendeckung FD und von der effektiven Farbergiebigkeit FE_{eff} abhängig ist. Da FE_{eff} nicht analytisch berechenbar ist, erfolgt deren Schätzung anhand der vergangenen Produktionen, was in Kapitel 5.5 detailliert ausgeführt ist.

Die Eingangsgröße $U_{(s)}$ beinhaltet den am Farbduktor zugeführten Farbmassenstrom $\dot{m}_{\text{FD zu}}$ gemäß Gleichung 5-22. Dieser kann mithilfe der effektiven Zonenöffnung ZOE_{eff} und der Farbduktordrehzahl n_{FD} berechnet werden, wobei beide Stellgrößen zur virtuellen Stellgröße Y_{vir} nach Gleichung 5-28 zusammengefasst werden.

$$U_{(s)} = (ZOE_{eff} * n_{FD}) * f_{FarbzU} = Y_{vir} * f_{FarbzU} \quad 5-28$$

Die virtuelle Stellgröße Y_{vir} fasst die beiden Stellgrößen Zonenöffnung (spezifisch für eine einzelne Zone) und die Duktordrehzahl n_{FD} (für alle Zonen eines Farbwerks) zusammen. Diese Zusammenfassung ermöglicht die Linearisierung und damit die echtzeitfähige Berechnung des Farbwerksverhaltens. Die Optimierung der beiden realen Stellgrößen in Abhängigkeit der virtuellen Stellgröße Y_{vir} wird detailliert bei der Reglerentwicklung in Kapitel 5.3.3 erläutert.

Mit diesen Schritten ist ein echtzeitfähiges Modell realisierbar, welches das Farbwerksverhalten ausreichend exakt abbildet und mit der bestehenden Maschinensteuerung kompatibel ist.

5.2.2.8 Automatische Synchronisation für höhere Genauigkeit

Eine ausschließliche Regelung des Druckprozesses mithilfe des Simulationsmodells ist für die erforderliche Druckqualität nicht ausreichend. Verschiedene nicht beobachtete Einflussgrößen und unbekannte Teilprozesse können die Volltondichte verändern, was sich negativ auf die Simulationsgenauigkeit auswirken würde. Um eine Drift der Druckqualität zu vermeiden, ist die Nachführung des Simulationsmodells mithilfe der gemessenen Volltondichte sinnvoll, sobald Messwerte zur Verfügung stehen. Die Messwerte dienen dazu, die effektive Farbergiebigkeit FE_{eff} des Simulationsmodells anzupassen. Dafür werden die bekannten Maschineneinstellungen sowie die gemessene Dichte gemäß Gleichung 2-2 verwendet.

Bei ersten Tests hat sich eine kontinuierliche Anpassung als nicht zweckmäßig erwiesen, da durch die transportbedingte Totzeit Instabilitäten auftreten können, was zu einer mangelhaften Regelungsqualität führt (FEILER 2004, S. 26). Die Parameteradaption erfolgt deshalb nur zu definierten Zeitpunkten.

5.2.3 Umsetzung des Simulationsmodells

Das validierte Simulationsmodell erlaubt die Berechnung der optischen Volltondichte zu jedem Zeitpunkt und allen Zonen, sodass eine Ausgangsgrößenrückführung und damit ein geschlossener Regelkreis realisiert werden kann. Die analytische Modellierung garantiert einen stetigen und interpretierbaren Verlauf, wobei sowohl die Prozesseigendynamik als auch die verschiedenen Stellgrößen und Nichtlinearitäten (An- und Abschwenken von Walzen) korrekt berücksichtigt werden. Auf Basis des Simulationsmodells wäre auch eine modellbasierte prädiktive Regelung möglich. Dies wurde jedoch nicht weiter verfolgt, da die vorhandene Maschinensteuerung diese Berechnungen nicht innerhalb der notwendigen Zeit zulässt.

5.3 Aufbau eines Reglers für adaptive Systeme

Durch die stetige Rückführung der Ausgangsgrößen können zu jedem Zeitpunkt die Regelfehler e und somit die Stellgrößen Y_{vir} berechnet werden.

Die Stellgröße Y_{vir} beinhaltet nach Gleichung 5-23 die beiden realen Stellgrößen Farbduktordrehzahl n_{FD} und effektive Zonenöffnung ZOE_{eff} . Dabei ist zu beachten, dass die Stellgrößendynamik der Farbduktordrehzahl n_{FD} wesentlich höher ist als die Dynamik der Zonenöffnung und dass die Duktordrehzahl nur für alle Zonen gemeinsam eingestellt werden kann.

5.3.1 Möglichkeiten zur Realisierung des Reglers

Zur Realisierung des Reglers existieren verschiedene Umsetzungsalternativen in Anlehnung an die Ausführungen in Kapitel 4. Die analytische Realisierung ist dann empfehlenswert, wenn bereits ein mathematisches Modell der Regelstrecke vorliegt und die Zusammenhänge zwischen Regelfehler und Stellgröße näherungsweise linear sind. Für die Farbdichteregelung sind diese Voraussetzungen gegeben.

Je nach gewähltem Verfahren zur Reglerparametrierung können die Modellparameter des Simulationsmodells direkt oder modifiziert verwendet werden. Damit sind bei veränderten Streckenparametern eine hohe Modellgüte, daraus resultierend eine hohe Regelungsgüte und die Stabilität des Regelkreises gewährleistet.

5.3.2 Realisierung und Parametrierung des Reglers

Lineare Reglerstrukturen der klassischen Regelungstechnik (ISERMANN 2008, S. 16) haben sich in unterschiedlichsten Prozessen bewährt. Am gebräuchlichsten sind PI- und PID-Regler, mit denen die Regelgröße stationär genau den Sollwert erreicht (SCHULZ 2004). Da im Signalverlauf der Regelgröße reale Schwankungen auftreten können, bewirkt der D-Anteil tendenziell ein unruhiges Regelverhalten. Aus diesem Grund wird ein PI-Regler für die Dichteregelung favorisiert. Die zugrunde liegende Übertragungsfunktion ist in Gleichung 5-29 aufgeführt.

$$G_R = K_R * \left(1 + \frac{1}{T_R * S}\right) \quad 5-29$$

Die beiden Parameter K_R und T_R lassen sich mithilfe unterschiedlicher Verfahren bestimmen. Auszugsweise sind einige Verfahren aufgeführt, die sich in vielen Anwendungen bewährt haben:

- Frequenzkennlinienverfahren,
- Wurzelortskurvenverfahren,
- Parameteroptimierungsverfahren mittels Integralkriterien,
- Betragsoptimierung oder
- Verwendung von Einstellregeln.

Die Bestimmung der Reglerparameter ergibt sich auf Basis unterschiedlicher Kennwerte des offenen oder geschlossenen Regelkreises oder im Laufe der Analyse des Regelverhaltens. Eine Übersicht geben beispielsweise SCHULZ 2004 und O'DWYER 2000. Für die Dichteregung werden die Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick eingesetzt, da diese explizit Totzeiten berücksichtigen, ein stabiles Regelverhalten aufweisen, einfach nachvollziehbar und auf verschiedene Zielkriterien anpassbar sind (SCHULZ 2004; DUBBEL 2001). Für die Regelung der optischen Dichte erfolgt die Parameteroptimierung der Reglerparameter K_{PR} und T_{NR} nach den Gleichungen 5-30 und 5-31. Die dazu notwendigen Faktoren leiten sich direkt aus den Parametern des Prozessmodells Streckenverstärkung K_S , die Zeitkonstante T_S sowie die Totzeit T_t .

$$K_R = 0,6 * \frac{T_S}{K_S * T_t} \quad 5-30$$

$$T_R = T_t \quad 5-31$$

Von besonderer Bedeutung für die Reglerparametrierung ist die Totzeit T_t , welche sich anhand der Druckgeschwindigkeit und den Transportwegen der Farbe berechnen lässt. Die Trennung des Simulationsmodells in einen linearen Teil ohne Totzeit und dem totzeitbehafteten nichtlinearen Teil ermöglicht es, die Dichte praktisch totzeitfrei zu berechnen. Damit ist eine höhere Regelungsdynamik realisierbar. Sobald reale, totzeitbehaftete Messwerte zur Verfügung stehen, sind die Reglerparameter anzupassen, um weiterhin ein stabiles Verhalten sicherzustellen.

Das Übertragungsverhalten $G_{R(s)}$ des Reglers entspricht Gleichung 5-32, wobei $E_{(s)}$ dem Verlauf des Regelfehlers und $Y_{vir(s)}$ dem Verlauf der virtuellen Stellgröße entspricht.

$$G_{R(s)} = \frac{Y_{vir(s)}}{E_{(s)}} \quad 5-32$$

Damit lässt sich für jede Zone die virtuelle Stellgröße Y_{vir} berechnen, welche dann in die realen Stellgrößen umgerechnet werden muss.

5.3.3 Berücksichtigung mehrerer Stellgrößen

Der Zusammenhang zwischen der virtuellen Stellgröße Y_{vir} und den realen Stellgrößen, der effektiven Zonenöffnung ZOE_{eff} und der Farbduktordrehzahl n_{FD} wiederholt sich in Gleichung 5-33.

$$Y_{vir} = ZOE_{eff} * n_{FD} \quad 5-33$$

Für eine vorgegebene virtuelle Stellgröße Y_{vir} ergibt sich eine Vielzahl möglicher Kombinationen der realen Stellgrößen. Abbildung 46 zeigt diese Vielzahl exemplarisch anhand der Punkte A bis E, die jeweils dieselbe Stellgröße ergeben. Zusätzlich ist ein Offset beschrieben, welcher aufgrund des Spaltes zwischen Farbduktor und Filmwalze existiert. Der Offset ist in Kapitel 5.6 im Zuge der Berücksichtigung maschinenbedingter Einflussfaktoren detailliert erläutert.

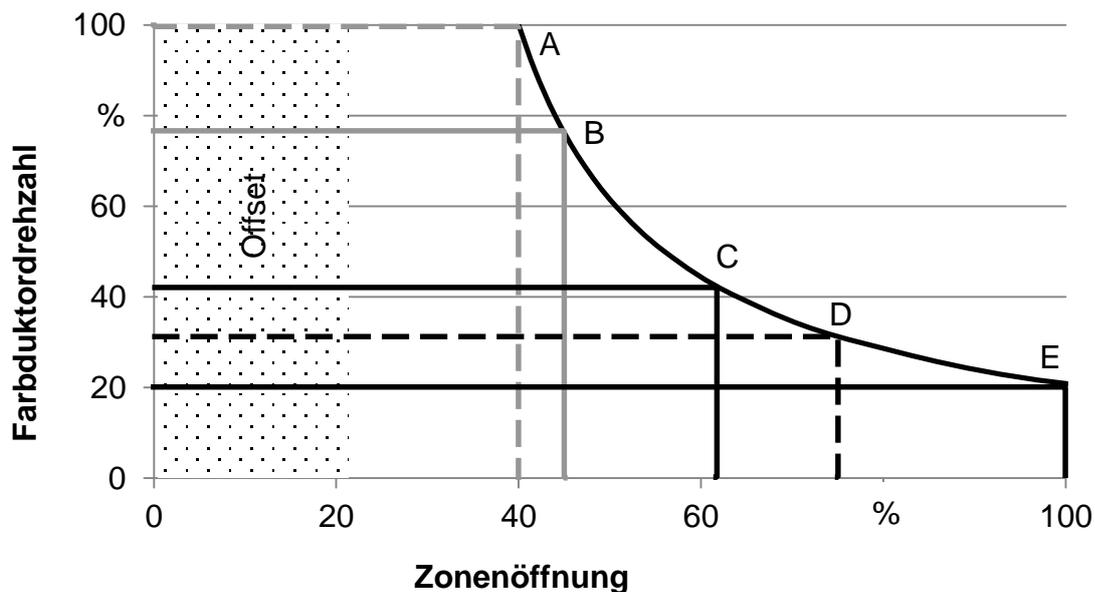


Abbildung 46: Mögliche Kombinationen der realen Stellgrößen für einen Wert der virtuellen Stellgröße Y_{vir} (eigene Darstellung)

Für eine eindeutige Aufteilung auf die beiden realen Stellgrößen kann eine weitere Bedingung angesetzt werden. Als vorteilhaft hat sich erwiesen, wenn beide Stellgrößen gleich groß gewählt werden (Punkt C), sodass sich Abweichungen vom idealen Betriebspunkt nur geringfügig auswirken. Zudem ist zu beachten, dass nur eine Duktordrehzahl für alle Zonen eingestellt werden kann und durch die Zonenöffnung die Feinanpassung erfolgen muss. Eine weitere Optimierung der Stellgrößen erfolgt aufgrund der höheren Dynamik der Duktordrehzahl im Vergleich zur Dynamik der Zonenöffnung. Um bei Druckstart eine hohe Stelldynamik zu gewähr-

leisten, wird die virtuelle Stellgröße Y_{vir} anfangs maßgeblich durch die Duktordrehzahl bestimmt. Die Zonenöffnung wird im Vergleich hierzu relativ langsam angepasst. Dies wird mithilfe des zeitabhängigen Faktors $f_{Y_{dyn}}$ realisiert, der das Verhältnis zwischen der Farbduktordrehzahl und der Zonenöffnung gemäß Gleichung 5-34 darstellt.

$$f_{Y_{dyn}} = \frac{n_{FD}}{ZO_{E_{eff}}} \quad 5-34$$

Je höher der Faktor $f_{Y_{dyn}}$ ist, desto höher wird die Farbduktordrehzahl gewichtet. Mit fortschreitender Druckdauer verliert die Dynamik an Bedeutung. Im stationären Druckbetrieb ist ein Dynamikfaktor von 1 am besten geeignet, weil dadurch die Zonenöffnungen gleichmäßig verteilt sind. Beispielhaft ist der Verlauf des Faktors $f_{Y_{dyn}}$ in Abbildung 47 dargestellt.

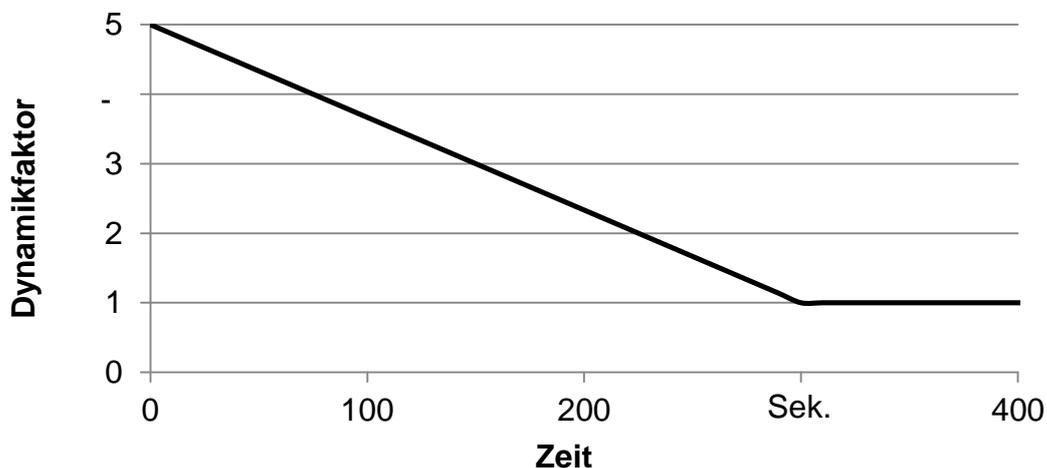


Abbildung 47: Beispielhafter Verlauf des Dynamikfaktors $f_{Y_{dyn}}$
(eigene Darstellung)

Durch den zeitabhängigen Verlauf des Dynamikfaktors verändert sich das Verhältnis zwischen den beiden Stellgrößen, der Betriebspunkt verschiebt sich entlang der Kennlinie in Abbildung 48 bei der konstanten virtuellen Stellgröße Y_{vir} .

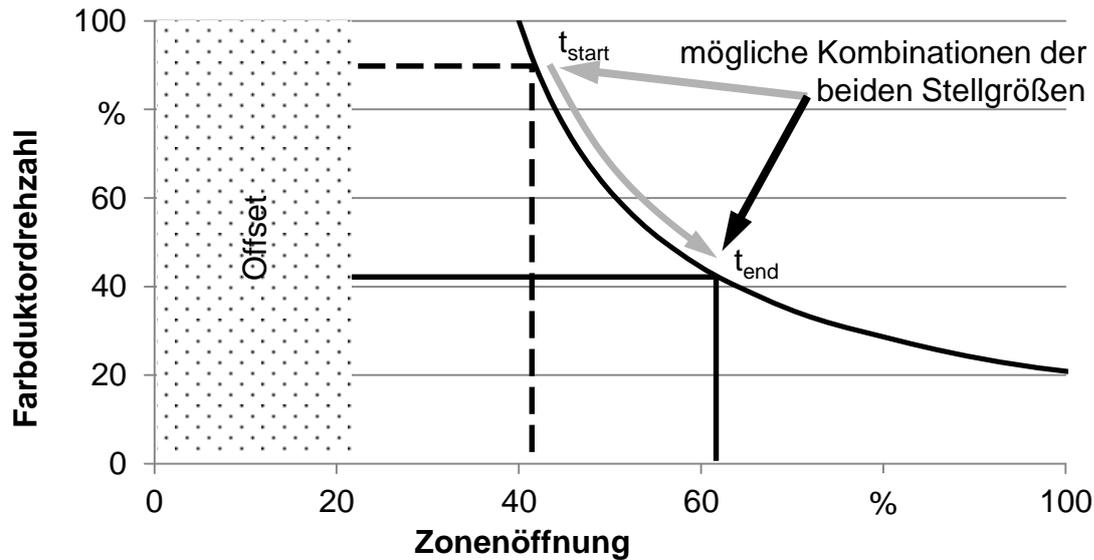


Abbildung 48: Mögliche Kombinationen der beiden Stellgrößen anhand der virtuellen Stellgröße Y_{vir}

Die Farbduktordrehzahl n_{FD} lässt sich anhand der durchschnittlichen Stellgröße \bar{Y}_{vir} nach Gleichung 5-35 berechnen.

$$n_{FD} = \sqrt{\bar{Y}_{vir} * f_{Ydyn}} \quad 5-35$$

Mithilfe der Farbduktordrehzahl n_{FD} aus Gleichung 5-35 lassen sich die effektiven Zonenöffnungen $ZOE_{eff\ i}$ aller Zonen anhand der korrespondierenden Stellgrößen $Y_{vir\ i}$ berechnen.

Der Regler verknüpft damit die beiden Stellgrößen und berücksichtigt deren Dynamik explizit. Dabei ist das Verhalten des Reglers streng deterministisch, was insbesondere für die Nachvollziehbarkeit und für weitere Optimierungsmaßnahmen sowie die Akzeptanz der Bediener positiv zu bewerten ist (KOFAHL 1988, S. 165).

5.3.4 Simulative Validierung des Reglers

Das Reglerverhalten einschließlich Simulationsmodell wird vor der Implementierung in die reale Maschinensteuerung mithilfe einer Simulation validiert und optimiert. Dazu werden alle Maschinensignale im regulären Druckbetrieb aufgezeichnet und als Eingangsgrößen in der Simulation verwendet.

Bei der aktuellen Farbdichteregelung ist der Regelkreis bei Druckstart nicht geschlossen, da keine Dichtemessung möglich ist. Die bei Druckbeginn statisch vorgegebenen Stellwerte führen zu einem PT_1 - T_t - Verhalten der Regelgröße wie es vergleichbar Abbildung 5 zeigt.

Abbildung 49 stellt den simulierten und geregelten Dichteverlauf während des Andruckvorgangs aus dem gewaschenen Farbwerk sowie den ursprünglichen Dichteverlauf als Referenz dar. Zusätzlich sind die simulierten Verläufe der Stellgrößen Farbduktordrehzahl und Zonenöffnung aufgeführt. Die Flächendeckung beträgt 1 % über alle Zonen.

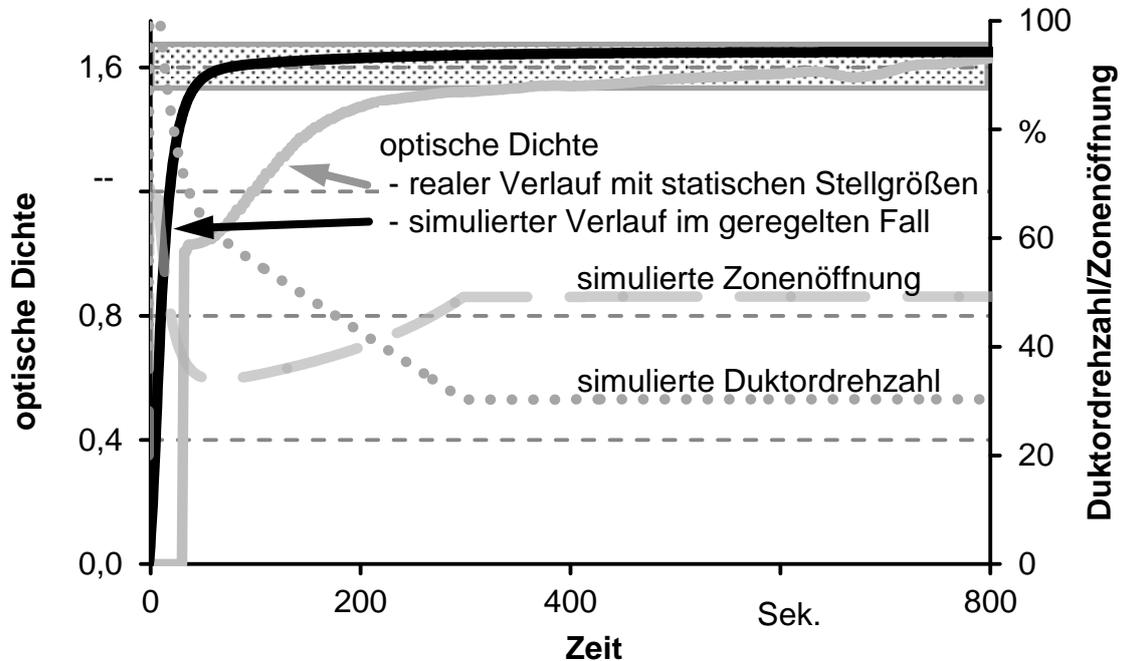


Abbildung 49: Simulative Validierung des Reglerverhaltens
(eigene Untersuchungen)

Bei der modellbasierten Regelung werden stets die Werte des Simulationsmodells an den Regler zurückgeführt, sodass der Regelkreis jederzeit geschlossen ist. Die Stellgrößen weisen anfangs sehr hohe Amplituden auf und verändern sich während des Anfahrens dynamisch bis auf einen stationären Endwert.

Der anfängliche Peak der Duktordrehzahl ist deutlich höher als bei der Zonenöffnung, was im Dynamikfaktor $f_{Y_{dyn}}$ begründet liegt. Die variable Aufteilung der virtuellen Stellgröße Y_{vir} in die beiden Stellgrößen ZOE und n_{FD} ist insbesondere in der Zeitspanne zwischen 50 und 300 Sek. gut zu erkennen, wenn die virtuelle Stellgröße Y_{vir} annähernd konstant ist und die Drehzahl zugunsten der Zonenöffnung weiter absinkt.

Die zulässige Dichtetoleranz wird in der Produktion 232 Sek. nach Druckstart erreicht, die simulierte Dichte bewegt sich bereits nach etwa 40 Sek. innerhalb der Toleranz. Dieses Verhalten ist annähernd unabhängig von der Flächendeckung und konnte anhand von mehreren Simulationen gezeigt werden. Um die sehr guten Ergebnisse der Simulation in der Produktion zu erreichen, muss das Simulationsmodell stets ausreichend genau dem realen Farbwerksverhalten entsprechen. Im Druckbetrieb wird das Simulationsmodell an die Prozessbedingungen angepasst.

5.4 Beschreibung des Maschinenverhaltens durch geeignete Kenngrößen

Um eine hohe Simulationsgüte insbesondere bei einem nicht konstanten Streckenverhalten sicherzustellen, wird die modellbasierte Regelung um eine kognitive Adaption ergänzt. Die Adaption der Regelstrecke und/oder des Reglers hat sich in vielen Anwendungsfällen als geeignet erwiesen (CAO ET AL. 2012; LANDAU 2011; WIRTZ ET AL. 2010; FEILER 2004; MACIEJOWSKI 2002; FÖLLINGER 1971). Zur Regelung der Farbzufuhr ist insbesondere die stationäre effektive Farbergiebigkeit elementar, um ein Unter- oder Überfärben zu vermeiden. Nachfolgend werden die durchzuführenden Schritte beschrieben, um automatisiert ein möglichst umfassendes Prozessabbild zu erhalten, welches für die kognitive Adaption genutzt werden kann.

5.4.1 Beschreibung der Parameteridentifikation

Zur Adaption eines Reglers oder des Simulationsmodells sind verschiedene Konzepte bekannt. Da die Reglerparameter direkt von den Modellparametern abhängen, ist es ausreichend, die Parameter des Simulationsmodells anzupassen. In Abhängigkeit der A-priori-Kenntnisse sowie der Verfügbarkeit des Streckenausgangs oder einzelner Zustandsgrößen lassen sich verschiedene Adaptionmöglichkeiten einsetzen. Die meisten Adaptionkonzepte beruhen auf der stetigen Messbarkeit der Regelgröße. Da die stetige Messbarkeit bei der Dichteregelung zu Druckbeginn nicht gegeben ist, muss die Adaption anhand der gemessenen Einflussgrößen erfolgen, was als „gesteuerte Adaption“ bezeichnet wird (FÖLLINGER 1971). Dafür müssen die Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und den optimalen Modellparametern bekannt sein.

Als Basis für die Ermittlung der optimalen Modellparameter dienen Datensätze, die für jede Zone alle relevanten Daten einer Produktion beinhalten. Zu diesen Daten gehören beispielsweise die Flächendeckungen, die physikalischen Einflussgrößen auf den Prozess und die Eigenschaften der Verbrauchsstoffe und der Maschinenzustand. Alle diese Größen beeinflussen den Farbfluss und damit das dynamische Verhalten des Farbtransports sowie des Farbeindrucks auf dem Papier. Aus systemtheoretischer Sicht verändern diese Größen die Parameter des Farbwerks. Diese Veränderungen müssen im Simulationsmodell in gleichem Maße nachvollzogen werden. Deshalb ist es sinnvoll, zu jeder Produktion neben den Einflussgrößen zusätzlich jene Modellparameter zu ermitteln, mit denen das reale Prozessverhalten unter den jeweiligen Einflussgrößen am genauesten wiedergegeben wird.

Als Ergebnis stehen zu jeder Produktion Datensätze zur Verfügung, welche sowohl die Einflussgrößen als auch die optimalen Modellparameter beinhalten. Um für die nächste Produktion eine hohe Simulationsgüte zu erreichen, werden diejenigen Modellparameter ermittelt, welche bei den bisherigen Produktionen unter

ähnlichen Bedingungen das reale Verhalten am besten abbildeten. Je nach Dynamik des Prozesses sowie der Einflussgrößen kann eine initiale Adaption ausreichend oder eine stetige Adaption erforderlich sein.

Sobald die optische Dichte gemessen wird, lassen sich die Modellparameter mithilfe der Regelgröße direkt anpassen. Anfangs werden die Streckenparameter indirekt bestimmt. Stehen reale Ausgangswerte zur Verfügung, erfolgt die Parameteridentifikation als selbsteinstellendes Modell.

5.4.2 Methode zur gesteuerten Adaption der Prozessparameter

Im Idealfall steht eine umfangreiche Datenbasis zur Verfügung, in der alle in der Realität auftretenden Kombinationen von Einflussgrößen gespeichert sind und alle Einflussgrößen werden bei jeder Produktion stetig gemessen. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Einflussgrößen, der Verbrauchsstoffe sowie der zeitinvarianten Farbwerksverhaltens über große Zeitspannen ist es weder technisch noch wirtschaftlich sinnvoll, diese Datenbasis in separaten Versuchen vollständig zu ermitteln (NICOLA 2004; ANDERSON 1997). Deshalb werden alle Produktionsläufe automatisch ausgewertet und konzentriert als Kenngrößen in einer Datenbank gespeichert. Somit wächst der Umfang der Datenbasis mit jeder Druckproduktion. Dieses Vorgehen berücksichtigt automatisch die Besonderheiten jeder Maschine und ihr Produktionsumfeld. Für die Realisierung der gesteuerten Parameteradaption wird das Vorgehen gemäß Abbildung 50 vorgeschlagen, das grundsätzlich prozessunabhängig ist und sich für die Vorgabe der Modellparameter der Farbdichteregelung bewährt hat. Auch andere Arbeiten realisieren dieses Vorgehen, wenngleich es nur selten explizit aufgeführt ist (MORK 2013; DITTMAR & PFEIFER 2004). Im Rahmen dieser Arbeit stehen insbesondere die Auswahl der wichtigsten Einflussgrößen (Selektion) sowie deren Verdichtung zu Kenngrößen, vergleichbar mit SCHAFFERNICHT 2011, S. 22, im Fokus.

Realisierung der kognitiven Prozesssteuerung in der Druckindustrie

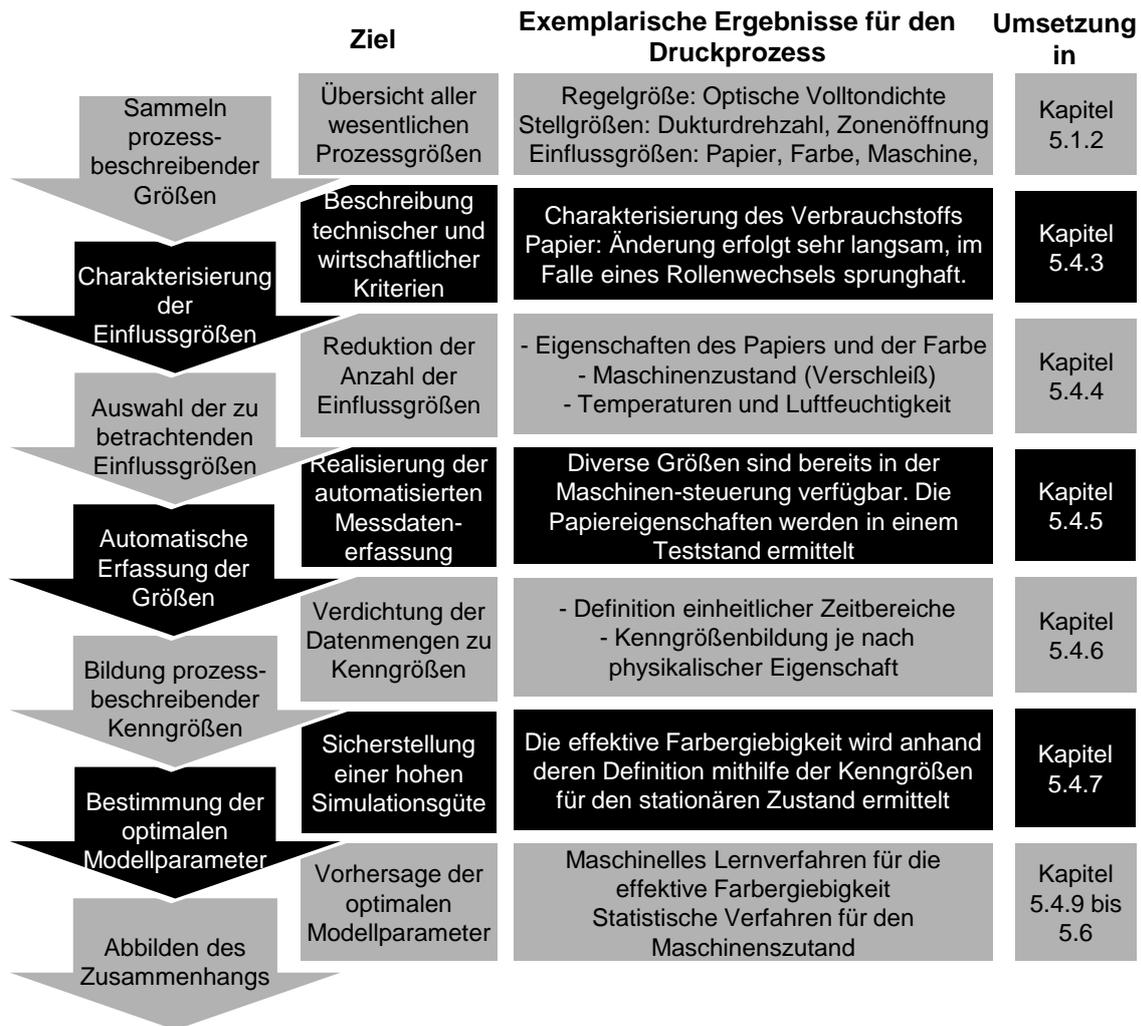


Abbildung 50: Vorgehen zur Realisierung einer gesteuerten Parameteradaption

Die Detaillierung der einzelnen Schritte erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln. Eine erste Übersicht bekannter Einflussgrößen gibt Kapitel 5.1.2. Deren detaillierte Charakterisierung und Priorisierung sowie die Auswahl der zu berücksichtigenden Größen folgen in Kapitel 5.4.3 und 5.4.4. Darin ist festzulegen, welche Größen in die Adaption der Modellparameter einfließen müssen, um eine hohe Simulationsgenauigkeit sicherzustellen bei gleichzeitig wirtschaftlich sinnvollem Aufwand. Kapitel 5.4.5 stellt beispielhaft einen Aufbau vor, der es erlaubt, die Eigenschaften des Papiers prozessparallel zu ermitteln. Anschließend erfolgt die Verdichtung der Messwerte zu prozessbeschreibenden Kenngrößen, welche eine enorme Reduzierung der Datenmenge sowie die Konzentration auf die wesentlichen Zusammenhänge erst ermöglicht. Für die Einflussgrößen des Druckprozesses ist dieses Vorgehen in Kapitel 5.4.6 und für Modellparameter in Kapitel 5.4.7 durchgeführt. Die Auswertung der ermittelten Kenngrößen kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen, wie Kapitel 5.4.9 darlegt.

5.4.3 Charakterisierung der Einflussgrößen

Die Vielzahl der Einflussgrößen erfordert ein strukturiertes Vorgehen, um deren Wirkungen angemessen und wirtschaftlich günstig zu berücksichtigen. Dazu sind die verschiedenen Einflussgrößen aufzunehmen, wozu sich die 6-M-Methode (BRAUN 2007, S. 1) sehr gut eignet und bereits in Abbildung 34 dargestellt ist. Darauf aufbauend sind die systemrelevanten Größen exakter zu spezifizieren. Neben den Einflussgrößen umfasst dies auch die Zustandsgrößen, Stellgrößen und Regelgrößen.

Als Regelgröße wurde die optische Dichte sowie deren Messung bereits ausführlich in Kapitel 2.4 beschrieben, ebenso die Stellgrößen Zonenöffnung und Duktordrehzahl für die Farbzufuhr. Weitere Stellgrößen im Farbwerk sind die An- und Abschwinkbewegungen der verschiedenen Walzen sowie die Feuchtduktordrehzahl. Obwohl die Feuchtduktordrehzahl in erster Linie für die Feuchtmittelführung verändert (ALTTHALER ET AL. 2012, S. 2; LIEBING & RIEDL 1978), unterliegt die optische Dichte ebenfalls einer Beeinflussung, wie eigene Versuche bestätigen. Die Schichtdicken auf den Walzensegmenten werden als wesentliche systeminterne Zustandsgrößen behandelt, welche sich jedoch nicht wirtschaftlich erfassen lassen.

Anhand der Charakterisierung der verschiedenen Einflussgrößen zeigt sich, dass viele physikalische Größen existieren, welche den optischen Eindruck beziehungsweise die optische Volltondichte mittelbar beeinflussen. Jedoch ist meist kein direkter linearer Zusammenhang bekannt.

Tabelle 2 zeigt die verschiedenen Einflussgrößen. Für alle Größen werden die Auswirkungen auf den Prozess insgesamt dokumentiert. Soweit bekannt, sind auch die Wechselwirkungen mit anderen Einfluss- und Stellgrößen zu dokumentieren sowie die dazugehörigen Literaturquellen.

Tabelle 2: Charakterisierung der Einflussgrößen anhand verschiedener Kriterien (ausschnittsweise dargestellt)

Kategorie	Technische o. physikalische Größe / Kurzzeichen / Einheit	Beschreibung der Messgröße	Qualitative Beschreibung der Auswirkung auf die Zielgröße(n)	Wechselwirkungen auf andere Größen	Quellen, Berichte, Experten	
Zielgrößen/ Regelgröße	Optische Volltondichte / OD / -	OD= log (I _B /I _V)	Veränderung des optischen Eindrucks	Farbort, Tonwertzunahme	KIPPAN 2000, S. 69 ff.	
Stellgrößen	Duktordrehzahl / n _{FD} / %	Drehzahl des Farbdukts	Veränderung der Farbzufuhr aller Zonen	Wirkt auf alle Zonen eines Farbwerks	KIPPAN 2000, S. 226	
	Zonenöffnung / ZOE / %	Lichte Spaltweite zwischen Duktort und Farbkasten	Höhere Schichtdicke auf dem Farbduktor		KIPPAN 2000, S. 226	
	An-/ Abschwenken der Filmwalze / - / °/ t ₁	an- / abgeschwenkt	Unterbrechung des Farbflusses	Bewirkt ein Angleichen der Schichtdicken im Farbwerk	Farbwerksaufbau	
	An-/ Abschwenken der Auftragswalzen / - / °/ t ₁	an- / abgeschwenkt	Unterbrechung des Farbflusses	Bewirkt ein Angleichen der Schichtdicken im Farbwerk	Farbwerksaufbau	
	Feuchtduktordrehzahl / n _{FE, D} / %	Drehzahl des Feuchtduktors	Veränderung der Emulsionsbildung und -eigenschaften	Veränderte Farbspaltung und Freihalten der Platte		
Zustandsgrößen	Emulsionsschichtdicke / s _D / μm	Schichtdicke auf den Walzen	OD ist linear abhängig von der Schichtdicke auf dem Papier	Beeinflussung aufgrund der Emulsionsbildung		
Einflussgrößen	Papier	Rauheit nach Bendtsen / - / m ² /min	Entweichendes Luftvolumen zwischen der Oberfläche und einer Referenzfläche	Erhöhter Farbverbrauch aufgrund der rauen Oberfläche	Erhöhter Feuchtmittelbedarf, höhere Saugfähigkeit	
		Porosität nach Gurley / - / m ³ /min	Durchströmender Luftvolumenstrom bei definiertem Differenzdruck	Eindringen der Farbe in die tieferen Papierschichten	Erhöhter Feuchtmittelbedarf, höhere Saugfähigkeit	
		Glanz / - / Glanzeinheit GE	Anteil der gerichteten Lichtreflektion	"Glattere" Oberfläche mit besseren Reflektionseigenschaften	Gute Bedruckbarkeit bei hohem Glanz	
	Farbe	Dyn. Viskosität / μ / cSt	Zähflüssigkeit der Farbe	Verändertes Farbspaltungsverhalten	Vermuteter Effekt auf die Emulsionsbildung	
		Zügigkeit / - / Tack	Inneres Haftvermögen eines Fluids	Stärkeres Rupfen der Papierbahn Einfluss auf Emulsionsbildung		
		Farbergiebigkeit / FE / °D/(g/m ²)	Erreichbare optische Dichte je Farbmenge	Veränderter Farbeindruck bei gleichen Einstellungen	unbekannt	
	Feuchtmittel	Emulgierverhalten	Zusammenspiel zwischen Feuchtmittel und Farbe	Änderung der Emulsionsbildung, verändertes Prozessfenster	Relevant für Feuchtmittelführung, Tonen	Pylotis 1978
		Oberflächenenergie / σ / N/m	Tangentiale Kraft an der Grenzfläche zweier Fluide	Einfluss auf Emulsionsbildung		
		Temperatur / T / °C	Temperatur des Feuchtmittel im Vorratsbehälter	Veränderte Farbwerkstemperatur (Viskosität, Emulgierverhalten, ...)	Auf Viskosität, Emulsionsbildung, ...	Pylotis 1978

Die Übersicht, welche nur einen Ausschnitt der systemrelevanten Größen darstellt, verdeutlicht die Komplexität des Druckprozesses und die Schwierigkeit der exakten Modellierung des Prozessverhaltens.

Grundsätzlich kann jede Einflussgröße so bedeutsam sein, dass diese im Rahmen der Modellbildung oder der Adaption explizit berücksichtigt werden müsste. Die Vielzahl möglicher Größen stellt jedoch einen unverhältnismäßig hohen Aufwand dar, wollte man sie alle berücksichtigen. Darüber hinaus würde die Berücksichtigung aller infrage kommenden Einflussgrößen zwar theoretisch eine bessere Prozessregelung ermöglichen. Aufgrund verbleibender Messungenauigkeiten und zusätzlicher Fehlerquellen würde dann allerdings die Robustheit der Prozessrege-

lung sinken (SCHAFFERNICHT 2011). Aus diesen Gründen ist es notwendig, den Adaptionbedarf in Anlehnung an KLEPPMANN 2011 vorab fundiert zu bewerten.

Es existieren verschiedene Alternativen, um die negativen Auswirkungen der Einflussgrößen zu minimieren (BERGER 2013). Die explizite Berücksichtigung im Rahmen der Reglerparametrierung ist nur eine Option. Alternativ kann beispielsweise sichergestellt werden, dass sich die Temperaturen nur in definierten Bereichen ändern, die für die Prozessführung unkritisch sind. Da sich diese auch im Aufwand zur Realisierung voneinander unterscheiden, ist für jede Einflussgröße separat zu prüfen, ob und welche Alternative wirtschaftlich umsetzbar ist.

Die Bewertung des Adaptionbedarfs AB erfolgt gemäß Tabelle 3 für ausgewählte Einflussgrößen.

Tabelle 3: Bewertung der Einflussgrößen

		Technische/ Physikalische Größe	Dynamik	Schwankungs- häufigkeit	Realer Schwankungs- bereich	maximale Auswirkungen im Prozess	
Kategorie			A	B		C	
			1-5	1-3		1-5	
Einflussgrößen	Material	Papier	Rauheit (Bendtsen)	3	3	0-100 ml/min	2
			Porosität (Gurley)	3	3	0-50 ml/min	2
			Glanz	3	3	0-100 GE (75°)	1
		Farbe	Zügigkeit	2	1	Tack	1
			Nominelle Farbergiebigkeit	2	1	OD/ (g/m²)	2
			Feucht- mittel	Konzentration	1	1	0-5 %
		Oberflächenenergie		1	1		3
		Temperatur		2	1,5	5-10 °C	3
		Druck- platte	Wasseraufnahme- vermögen	1	2		1
	Oberflächenenergie		1	2		2	
	Rasterung		1,5	1	Diverse möglich	2	
	Maschine	Verschleiß/ Alterung	Gummituchalterung	1	1	0 bis 1.000 h	1
			Lagerspiel Duktork	1	1	0 bis wenige µm	1
			Verschleiß Zonenmesser	1	1	0 bis wenige µm	3
		Ver- schmutzung	Gummituch	1	1		2
			Zonenmesser	2	1	0-30 %	3
		Einstel- lungen	am Duktorspalts	1	1	+/- 10 µm	2
	Walzenpressung		1	1	Abdruckbreite	2	
	Auftrags- bedingt	Zonale Flächendeckung	2	3	0-50 %	5	
		Mittlere Flächendeckung	2	5	0-50 %	2	
	Milieu	Tempera- turen	Farbwerk	2	2	20-40 °C	3
			Lufttemperatur	2	2	20-40 °C	1,5
			Plattenzylinder	2	2	20-70 °C	3
		Luft- feuchte	im Drucksaal	2,5	2	30-100 % r. F.	2
			am Farbwerk	2,5	2	30-100 % r. F.	2
			am Plattenzylinder	2,5	2	30-100 % r. F.	2
	Management/ Mensch	Papier- lagerung	Lagerdauer verpackt	1	2	Tage bis Wochen	2
			Lagerdauer entpackt	2	2	Wenige Stunden	1
		Vorgaben	Zieldichte	2	1	1,1-1,8	3
			Druckgeschwindigkeit	3	3	30.000- 65.000 1/h	2

Der Adaptionsbedarf einer Einflussgröße hängt sowohl von deren Schwankungsbreite als auch von den Auswirkungen auf die Zielgröße(n) ab (KLEPPMANN 2001, S. 16). Um den Adaptionsbedarf möglichst objektiv zu bewerten, wird jede Größe im Hinblick auf die Kriterien Zeitverhalten, Schwankungshäufigkeit und Auswirkung auf die Zielgrößen bewertet. Dabei ist zu beachten, dass sich die Bewertung eines Merkmals auf die real auftretende Schwankungsbreite der jeweiligen Einflussgröße und auf die zulässige Toleranz der Regelgröße bezieht. Die Einstufung erfolgt in Anlehnung an Tabelle 4.

Tabelle 4: Bewertungskriterien der Einflussgrößen

Stufe	Dynamik A	Schwankungshäufigkeit B	maximale Auswirkungen im Prozess C
1	stationär/ quasistationär	selten	< 10 % der zulässigen Toleranz
2	$T_{\text{Einfluss}} > 1.000 \times T_{\text{Prozess}}$	häufig	< 50 % der zulässigen Toleranz
3	$T_{\text{Einfluss}} > 10 \times T_{\text{Prozess}}$	dauernd	≈ der zulässigen Toleranz
4	$T_{\text{Einfluss}} \approx T_{\text{Prozess}}$		< 300 % der zulässigen Toleranz
5	$T_{\text{Einfluss}} < 0,1 \times T_{\text{Prozess}}$		> 300 % der zulässigen Toleranz

T_{Prozess} = Zeitkonstante des Prozesses

T_{Einfluss} = Zeitkonstante der Einflussgröße

Die Dynamik sowie die Schwankungshäufigkeit einer Einflussgröße lässt sich in den meisten Fällen gut abgeschätzt. Speziell bei komplexen Prozessen und mehreren Einfluss- und Zielgrößen ist es schwierig, den singulären Einfluss einer Größe quantitativ zu beurteilen. Werden mehrere Zielgrößen beeinflusst, entspricht die Referenzgröße dem geometrischen Mittel der Änderungen der einzelnen Zielgrößen. Neben der mathematischen Analyse sowie der Literaturrecherche können ebenfalls separate Versuche notwendig werden, um den Adaptionsbedarf fundiert zu bewerten.

Sowohl in Expertengesprächen oder in der Fachliteratur muss jeweils kritisch hinterfragt werden, auf welchen Bedingungen und Annahmen die Aussagen und die Ergebnisse beruhen. Missinterpretationen bergen die Gefahr einer ungerechtfertigten Vernachlässigung oder einer überproportionalen Gewichtung einzelner Größen.

Realisierung der kognitiven Prozesssteuerung in der Druckindustrie

Der Adaptionbedarf AB lässt sich gemäß Gleichung 5-36 bestimmen, wobei die Potenz n des Faktors C frei gewählt werden kann, jedoch größer 1 sein muss. n bewertet die Auswirkungen im Prozess. Je höher n gewählt wird, desto dominanter werden die Auswirkungen zur Bewertung der Einflussgrößen gewichtet. In Tabelle 3 wurde $n = 1$ gewählt.

$$AB = A * B * C^n \quad 5-36$$

Anhand von Gleichung 5-37 lässt sich der relative Adaptionbedarf $AB_{rel\ i}$ jeder Einflussgröße i berechnen, wobei der Wertebereich von 0 bis 1 reicht und \widehat{AB} den maximalen Adaptionbedarf darstellt.

$$AB_{rel\ i} = \frac{AB_i}{\widehat{AB}} \quad 5-37$$

Mithilfe des relativen Adaptionbedarfs AB_{rel} kann die Relevanz einer Einflussgröße sowie die Notwendigkeit von deren Berücksichtigung fundiert abgeschätzt werden.

Neben dem Adaptionbedarf ist zudem zu betrachten, was über die jeweilige Einflussgröße bekannt ist und ob diese verändert werden kann. Dafür sind acht Stufen des Bekanntheitsgrads BG gemäß Tabelle 5 definiert.

Tabelle 5: Definition des Grads der Bekanntheit einer Einflussgröße

Grad	Erläuterung
0	Messgröße nicht bekannt, Ursache nicht bekannt
1	Nicht wirtschaftlich messbar/bestimmbar (weder direkt noch indirekt)
2	An separatem Messplatz messbar, Wirkungsweise im Prozess unbekannt
3	An separatem Messplatz messbar, Wirkungsweise im Prozess bekannt
4	Inline messbar mit geringer Dynamik, Wirkungsweise im Prozess unbekannt
5	Inline messbar mit geringer Dynamik, Wirkungsweise im Prozess bekannt
6	Inline messbar mit ausreichender Dynamik, Wirkungsweise im Prozess bekannt
7	Größe liegt innerhalb der Toleranz (mess- und regelbar mit geringer Dynamik)
8	Größe liegt innerhalb der Toleranz (mess- und regelbar mit ausreichender Dynamik)

Die vorgestellten und für den Druckprozess exemplarisch durchgeführten Schritte ermöglichen es, die Einflussgrößen miteinander zu vergleichen. Ferner kann anhand dieser Schritte bewertet werden, ob eine Berücksichtigung sinnvoll ist.

Um die Auswirkungen von Einflussgrößen auf den Produktionsprozess zu begrenzen, bestehen die folgenden Möglichkeiten:

- Ignorieren der Einflussgröße, da der Adaptionbedarf gering und der Aufwand zur Adaption im Verhältnis dazu hoch ist.
- Erhöhen der Robustheit des Prozesses, wenn die Einflussgröße nicht oder nur sehr aufwendig gemessen werden kann.
- Regelung der Einflussgröße, sodass die Schwankungsbreite und damit die Varianz der Streckenparameter definiert gering bleibt.
- Stetige Messung und direkte Adaption der Regler- oder Modellparameter, wozu die Einflussgrößen stets gemessen werden und deren Auswirkungen auf den Prozess explizit bekannt sein müssen.
- Anpassen der Prozessregelung entsprechend der Einflussgrößen. Dies kann beispielsweise durch kognitive Verfahren und die stetige oder initiale Adaption des Reglers oder des Simulationsmodells geschehen.

Der relative Adaptionbedarf AB_{rel} sowie der Grad der Bekanntheit BG ermöglichen die Abschätzung, welche Maßnahmen zur Adaption geeignet sind. Abbildung 51 zeigt die Zuordnung der einzelnen Einflussgrößen zu den verschiedenen Maßnahmen als Erweiterung der Erkenntnisse von BERGER 2013.

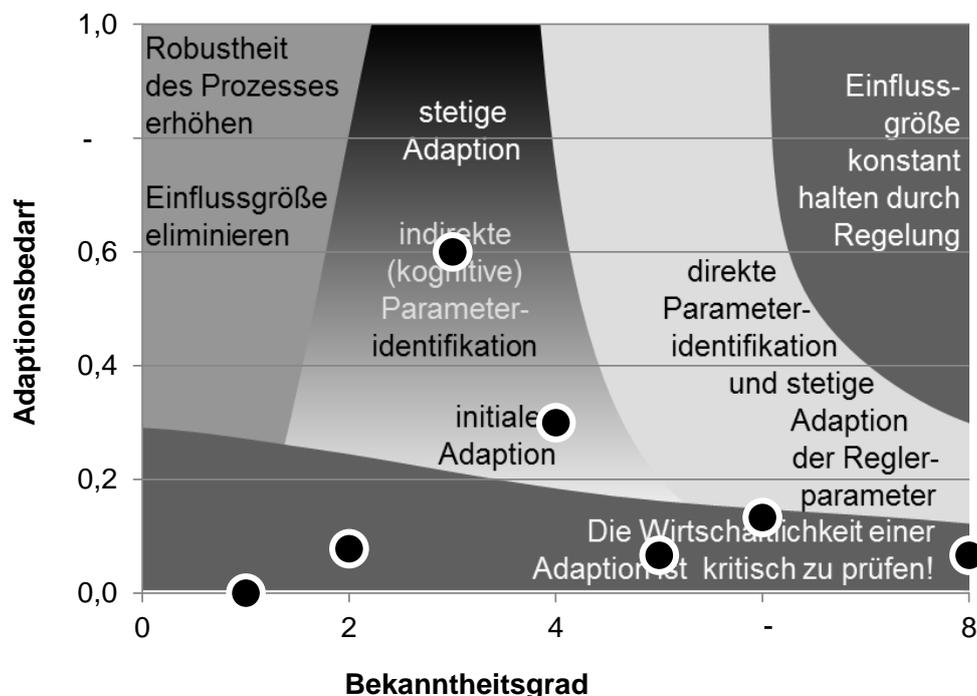


Abbildung 51: Zuordnung von Kompensationsmaßnahmen zu den Einflussgrößen (eigene Darstellung)

Die Einflussgrößen sind in der Übersicht nicht explizit aufgeführt, ergeben sich jedoch aus der Bewertung gemäß Tabelle 3. Die in Abbildung 51 vorgeschlagenen Maßnahmen sind einer Plausibilitätsprüfung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu unterziehen, um die entstehenden Kosten den möglichen Einsparungen gegenüberzustellen. Es ist auch möglich, dass eine Berücksichtigung von Einflussgrößen nicht sinnvoll ist, falls die Aufwände nicht durch entsprechende Einsparungen gedeckt sind.

5.4.4 Auswahl der zu betrachtenden Einflussgrößen

Anhand der Charakterisierung können 26 Größen identifiziert werden, welche für das Systemverhalten relevant sind und eine Adaption der Modellparameter sinnvoll erscheinen lässt. Bei einigen Größen, beispielsweise die Farbviskosität oder das Emulsionsbildungsverhalten, ist der Aufwand für die betriebsparallele Messung nicht gerechtfertigt oder im kontinuierlichen Betrieb nicht realisierbar.

In Tabelle 6 sind die verschiedenen Größen zusammengefasst.

Tabelle 6: Übersicht über die berücksichtigten Einflussgrößen für die kognitive Bestimmung der Farbergiebigkeit

Material	Papier	Rauheit	Milieu	auftrags- bedingt	zonale Flächendeckung
		Porosität			mittlere Flächendeckung
		Glanz			Zieldichte
		Grammatur			
		Papierklasse		Temperaturen	Temperatur des DrucksaaIs
		Bahnbreite			Farbwerktemperatur
		Papiertemperatur			Temperatur des Farbduktors
		Rand/Kernzone			Lufttemperatur im Farbwerk
	Farbe	Zügigkeit	Luft- feuchtigkeit	Farbtemperatur	
		nominelle Farbergiebigkeit		Plattenzylinder	
		Farbklasse		im Drucksaal	
	Feuchtmittel	Leitwert		im Farbwerk	
		Temperatur		am Plattenzylinder	
		Zustand			

Diese Größen werden für jede Zone und alle Farbwerke produktionsparallel erfasst. Einige Größen wie die Luftfeuchtigkeit im Drucksaal gelten global für alle Zonen und alle Farbwerke; sie müssen nur ein Mal erfasst werden.

Für die vier Farbwerke einer Offsetdruckmaschine ergeben sich inklusive der Stellgrößen und der Regelgrößen zu jedem Abtastzeitpunkt über 1.000 Messwerte, die nach Abschluss einer Produktion automatisch ausgewertet werden.

5.4.5 Erfassung der Einflussgrößen

Die priorisierten Einflussgrößen werden mithilfe verschiedener Sensoren gemessen oder aus bereits vorhandenen Maschinendaten berechnet. Ein Großteil der Daten lässt sich bereits heute automatisch aufzeichnen, vor allem die maschinen-eigenen Größen wie Drehzahlen, Positionen oder Stellungen sind verfügbar. Zur prozessparallelen Bestimmung der Papiereigenschaften existieren spezielle Labormessgeräte, die jedoch nicht für den Einsatz in einer Druckerei konzipiert sind.

Deshalb wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Papierteststand entwickelt, welcher parallel die Porosität, die Rauheit sowie den Papierglanz erfasst. Eine Messung der Papierformation war ebenfalls vorgesehen, sie wurde jedoch aus Kapazitätsgründen nicht umgesetzt. Diese Größen sind maßgeblich für die Bedruckbarkeit von Papier verantwortlich (KROLLE 2007, S. 1011). Die Messungen erfolgten in Anlehnung an spezifizierte Messverfahren, welche zur Qualitätssicherung bei der Papierherstellung dienen. Die Porosität wird nach Gurley bestimmt (ISO 5636/5; ASTM D-726-58), die Oberflächenrauheit nach Bendtsen gemäß DIN 8791-2 und der Papierglanz gemäß DIN EN ISO 54502 unter 75°. Der Messaufbau ist in Abbildung 52 dargestellt.

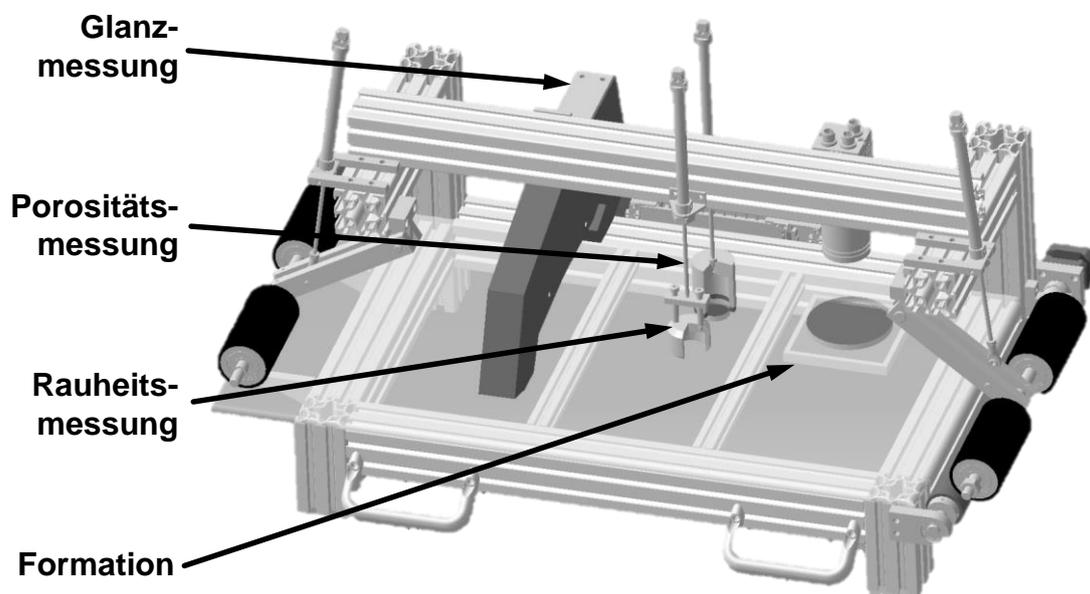


Abbildung 52: Messaufbau zur produktionsparallelen Charakterisierung des Papiers

Da der Messaufbau an die Belange der Produktion angepasst und direkt an der Druckmaschine aufgebaut wurde, wird die Genauigkeit von Labormessgeräten nicht erreicht. Da die Messung bei jedem Produktionslauf erfolgte, waren eine einfache Bedienung und eine minimale Probenvorbereitung essenziell. Für die Messung war ein Abschnitt der Papierbahn einzulegen, anschließend wurden die Messungen automatisch an drei Positionen durchgeführt und an die Druckmaschinensteuerung übertragen.

In Abbildung 53 sind die Messergebnisse bei unterschiedlichen Papieren dargestellt. Für jedes Papier wurden zwei Messungen im Abstand von zwölf Monaten durchgeführt, um die Konstanz der Messwerte zu validieren.

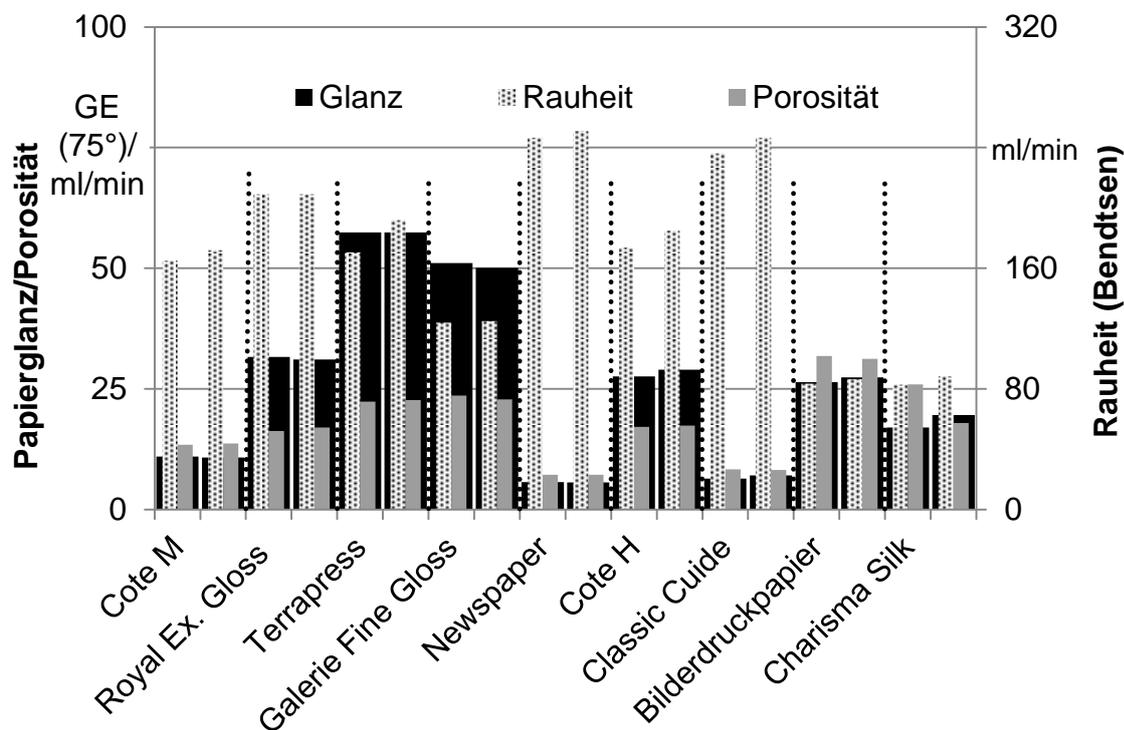


Abbildung 53: Messung verschiedener Papiersorten unter Produktionsbedingungen (eigene Untersuchungen)

Die Porosität liegt über alle Papiere hinweg zwischen 10 und 30 ml/min nach Gurley, der Glanz zwischen 8 und 55 Glanzeinheiten (75°) und die Rauheit zwischen 75 und 250 ml/min nach Bendtsen. Die Abweichungen der Messwerte zwischen den beiden Zeitpunkten liegen unter 10 %, bezogen auf die Ursprungswerte. Lediglich die Porosität eines Papiers weicht zwischen beiden Zeitpunkten geringfügig höher ab. Da die anderen Messungen jedoch sehr konstant sind, könnte dies auch in Ungleichmäßigkeiten der Papieroberfläche begründet sein. Damit kann die Messmethode für diesen Anwendungsfall als ausreichend reproduzierbar angesehen werden.

5.4.6 Bildung prozessbeschreibender Kenngrößen

Für eine effiziente Speicherung und Weiterverarbeitung ist eine Reduzierung der Daten auf Kenngrößen notwendig, welche die ursprünglich enthaltenen Informationen möglichst vollständig wiedergeben (SCHAFFERNICHT 2011, S. 3). Dazu wird jeder Produktionslauf in definierte Zeitbereiche eingeteilt, wodurch der Vergleich der Kenngrößen erst ermöglicht wird. Ein regulärer Maschinenauflauf wird durch die Zustände „Druckstart“, „Einrichten stationär“ und „Drucken“ charakterisiert. Die Stationaritätsbedingung gilt als erfüllt, wenn die Standardabweichung σ definierter Größen während einer festgelegten Zeitspanne unter 5 % des Mittelwerts liegt. Es werden nur Produktionsläufe gespeichert, die gültige stationäre Betriebspunkte aufweisen.

Für jeden Zeitbereich erfolgt die Berechnung der Kenngrößen, wobei die Berechnungsvorschrift von der jeweiligen Messgröße abhängt. Bei vielen Einflussgrößen des Druckprozesses ist der Mittelwert der Messgröße über eine vordefinierte Zeitdauer ausreichend. Für andere Kenngrößen müssen die Messgrößenverläufe verschiedener Größen miteinander kombiniert werden, da diese nur in Kombination aussagekräftig sind. Grundsätzlich sind differenzielle Werte, Integrale oder andere Berechnungsvorschriften zur Bildung der Kenngrößen geeignet. Die Wahl hängt von den jeweiligen physikalischen Größen und Prozessen ab (SCHAFFERNICHT 2011).

Abschließend werden die Kenngrößen auf Konsistenz und Gültigkeit hin geprüft, bevor diese in der Datenbank gespeichert werden. Zudem wird während der Kenngrößenberechnung stetig geprüft, ob nicht plausible Werte auftreten. Im Zuge der eigenen Forschungsarbeiten konnten Kenngrößen des Offsetdruckprozesses über 15 Monate lang im Produktionsbetrieb aufgenommen werden.

5.4.7 Bestimmung der optimalen Modellparameter

Mithilfe der systemtheoretischen Betrachtungen sind die Zusammenhänge zwischen den Stellgrößen, den Einflussgrößen und der Ausgangsgröße hergestellt. Um eine hohe Simulationsgenauigkeit zu ermöglichen, ist es nötig, die effektive Farbergiebigkeit FE_{eff} zu bestimmen, da die Auswirkungen aller Einflussgrößen darin zusammengefasst sind. Die Berechnungsvorschrift der effektiven Farbergiebigkeit FE_{eff} ergibt sich anhand des stationären Betriebs, in welchem die zugeführte Farbmenge der abgeführten Farbmenge entspricht. Vereinfacht kann dies anhand Gleichung 5-38 berechnet werden. Der zonenabhängige Faktor f_{ZuPap} beinhaltet alle weiteren Faktoren, die den Zusammenhang zwischen der Farbzufuhr und dem Umdruck auf das Papier beschreiben. F_{ZuPap} ist zeitinvariant, hängt jedoch von der Farbwerkskonfiguration und sowie den Farbspaltungsfaktoren ab.

$$FE_{eff} = \frac{D_v * FD}{ZOE * n_{FD} * f_{ZuPap}}$$

5-38

Die Kenngröße FE_{eff} kann für jede Zone in jedem Farbwerk für die beiden Zustände „Einrichten stationär“ und „Produktion stationär“ ermittelt werden. Da FE_{eff} der Definition anhand des Übertragungsverhaltens des Simulationsmodells entspricht, ist während der definierten Betriebsphasen immer die höchstmögliche Übereinstimmung zwischen den Simulationswerten und den realen Messwerten sichergestellt. Dieses Vorgehen ermöglicht es, die optimalen Simulationsparameter mit den realen Einflussgrößen zu verknüpfen. Eine explizite Speicherung der besten Stellgrößen ist nicht notwendig, da sich diese anhand der Modellgleichungen, der effektiven Farbergiebigkeit und der Sollwerte berechnen lassen.

5.4.8 Ergebnisse aus der Datenanalyse

Theoretisch ist die effektive Farbergiebigkeit bei einer Produktion in allen Zonen gleich. Abbildung 54 zeigt die Farbergiebigkeit über die Druckbreite, charakterisiert durch die laufende Zonennummer. Die zugrundeliegende Produktion wurde mit reduzierter Bahnbreite durchgeführt, weshalb für die Randzonen eins bis sechs und 34 bis 39 keine Daten vorliegen.

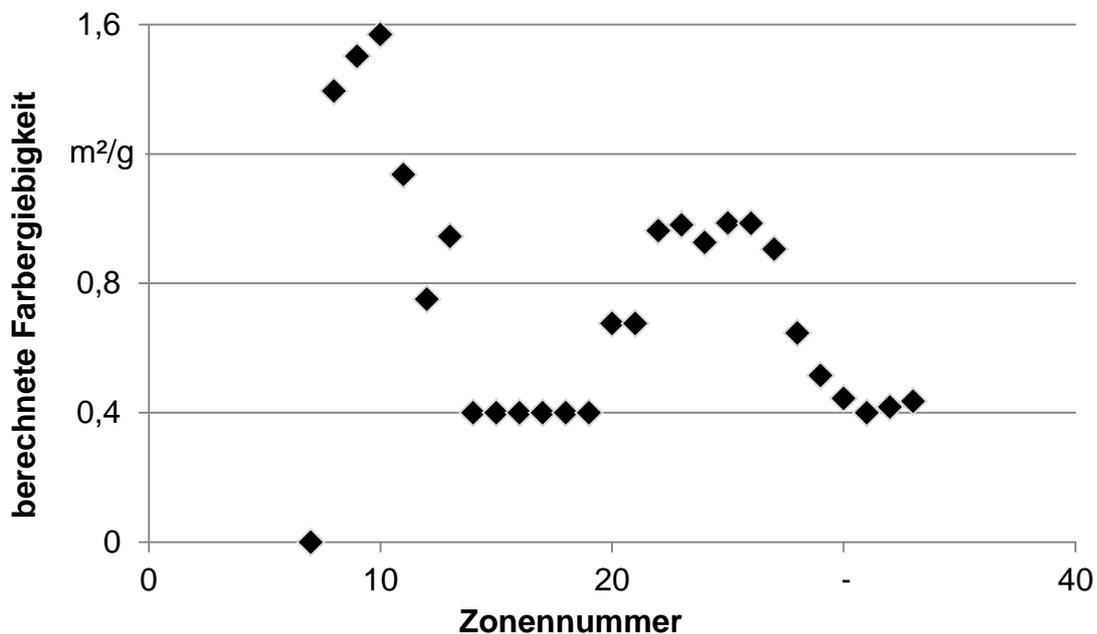


Abbildung 54: Varianz der Farbergiebigkeit bei einer Druckproduktion über die Druckbreite

Die effektive Farbergiebigkeit schwankt bei dieser Produktion unregelmäßig über die Druckbreite, ausgehend von einem Mittelwert von 0,74 und einer Standardabweichung von 0,36. Der Mittelwert ist vergleichbar zu vielen anderen Druckproduktionen. Die Schwankungen sind jedoch nicht gerichtet und nur bereichsweise konstant. Damit ergeben sich unterschiedliche Stellgrößen trotz des identischen Sollwerts. Ebenfalls sind Randeffekte anhand der effektiven Farbergiebigkeit in Zone sieben von null erkennbar.

In vergleichbarer Weise schwanken die Mittelwerte der effektiven Farbergiebigkeit zwischen den einzelnen Produktionen wie Abbildung 55 verdeutlicht.

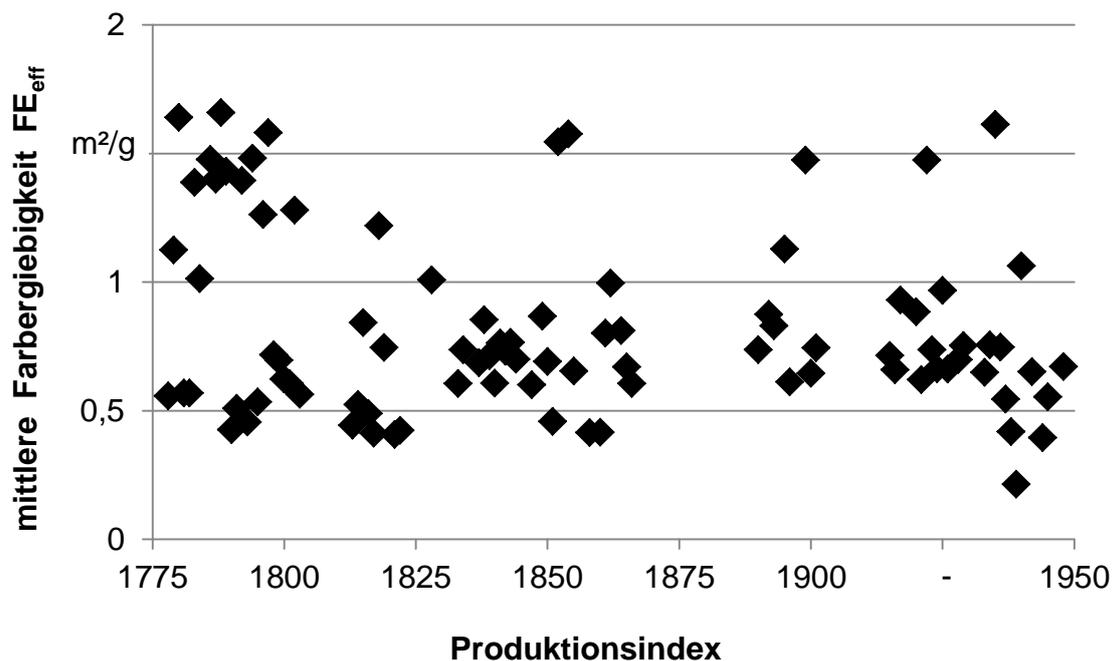


Abbildung 55: Varianz der Farbergiebigkeit über mehrere Druckproduktionen

Die mittleren Farbergiebigkeiten je Produktion liegen zwischen 0,25 und 1,85 und ermöglichen ebenfalls keine manuelle Interpretation. Der Mittelwert über alle Produktionsaufträge und Zonen beträgt 0,97 und die Standardabweichung σ beträgt 0,53. Die Standardabweichung erreicht über 50 % des Mittelwerts, was gegen eine Normalverteilung spricht. Die Bildung eines Mittelwerts wäre nicht ausreichend.

Die Annahme einer konstanten Farbergiebigkeit würde in einer ungenügenden Simulationsgüte in den meisten Zonen resultieren. Neben konstruktiv bedingten Unterschieden (Durchhängen der Walzen oder des Farbkastens, Fertigungsungenauigkeiten) beeinflussen Ablagerungen, Verschmutzungen, Verschleiß und das Mischungsverhältnis zwischen Farbe und Feuchtmittel das Übertragungsverhalten auch bei benachbarten Zonen. Eine rein theoretische Modellbildung ist für eine hohe Simulationsgüte unter realen Produktionsbedingungen nicht ausreichend.

Da der Einfluss des Papiers als sehr dominant eingeschätzt wird (DÖRSAM 2010), ist in Abbildung 56 die Farbergiebigkeit für unterschiedliche Papierrauheiten dargestellt.

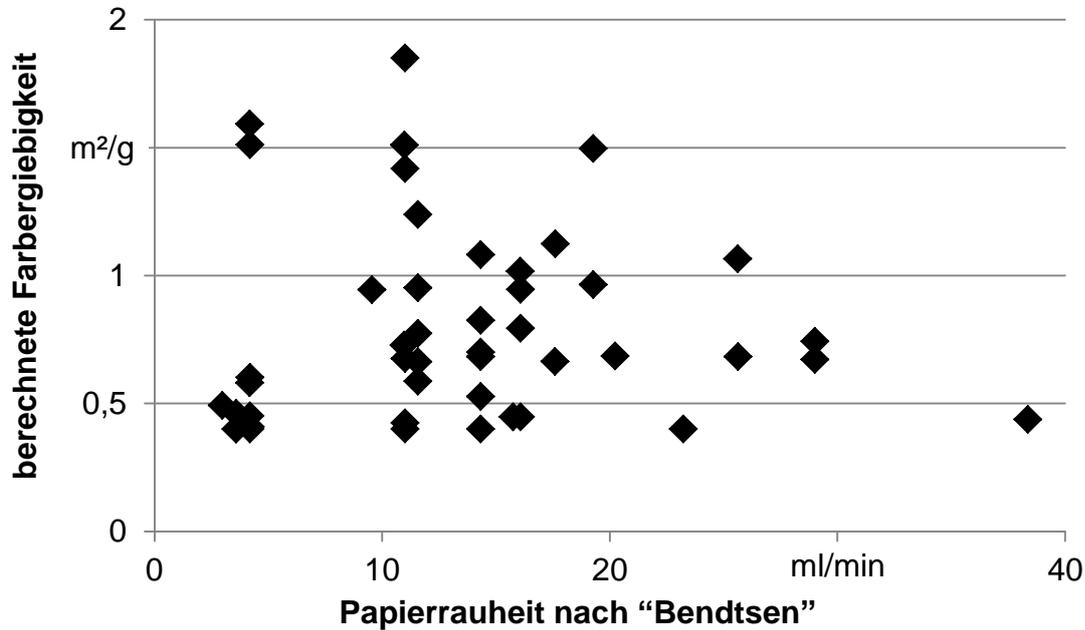


Abbildung 56: Exemplarischer Zusammenhang zwischen der Rauheit des Papiers und der effektiven Farbergiebigkeit FE_{eff}

Tendenziell ist ein näherungsweise Zusammenhang zwischen der Papierrauheit und der Farbergiebigkeit erkennbar, wobei aufgrund der hohen Schwankungsbreite der Farbergiebigkeit keine fundierte Berechnung sinnvoll ist.

Die Auswertung der weiteren Einflussfaktoren führt zu ähnlichen Resultaten. Aufgrund der hohen Schwankungsbreite und den in der Literatur dokumentierten Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen wird eine nichtlineare Parameterschätzung als notwendig erachtet, um genaue Modellparameter und damit eine hohe Simulationsgenauigkeit sicherzustellen.

Der Parameter FE_{eff} wird für die Berechnung der stationären Streckenverstärkung K_S sowie der Zeitkonstanten T_S benötigt, sodass das gesamte Übertragungsverhalten von FE_{eff} abhängt. Lediglich die transportzeitbedingte Totzeit T_t ist unabhängig von der effektiven Farbergiebigkeit.

5.4.9 Übersicht der verschiedenen Adaptionmöglichkeiten

Um die drei Modellparameter T_t , K_S und T_S gemäß Formel 5-27 optimal vorher zu bestimmen, wurden mehrere unterschiedliche Realisierungsalternativen der gesteuerten Adaption eingesetzt. Dies liegt in den unterschiedlichen Wirkungsweisen der Einflussgrößen begründet.

- Die Adaption anhand der Prozessbedingungen und der Verbrauchsmaterialien (prozess- und verbrauchsstoffbedingte Einflüsse) wird in Kapitel 5.5 detailliert beschrieben.
- Die Adaption des ersten Farbübergabepunkts am Farbduktor (maschinenzustandsbedingte Einflüsse) erfolgt gemäß Kapitel 5.6 mithilfe statistischer Verfahren.
- Die Adaption der Streckendynamik erfolgt anhand des Aufbaus des Farbwerks sowie der Flächendeckung (maschinen- und auftragsbedingte Einflüsse).

Die Adaption der Streckenzeitkonstante T_S erfolgt direkt anhand der systemanalytischen Modellierung des Farbwerks und des Umdrucks auf das Papier. Die zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten sind in Kapitel 5.2.2.3 zur Farbwerksmodellierung genannt, die Berechnung der Zeitkonstanten erfolgt anhand der Anzahl und Durchmesser der Walzen, deren geometrischer Anordnung sowie des konstruktiven Aufbaus der Farbzufuhr. Da diese Größen bekannt sind und bereits direkt in die Modellierung einfließen, erfolgt deren Adaption automatisch. Gleichzeitig vereinfacht dies die Übertragbarkeit auf andere Maschinenkonfigurationen, da die zugrunde liegenden Daten bekannt sind. Bei der Ermittlung des Farbbedarfs nach Gleichung 5-25 fließt die zonale Flächendeckung unmittelbar in die Berechnung ein. Die Flächendeckung steht der Maschinensteuerung jederzeit zur Verfügung, sodass sich eine indirekte Adaption gemäß Abbildung 19 anbietet. Gleiches gilt für die Totzeit T_t , welche sich für reale Werte anhand der Wegstrecke s_{Farb} zwischen der Farbzufuhr und dem Farbdichtemesssystem sowie der Druckgeschwindigkeit $v_{mas}(t)$ nach 5-39 ergibt.

$$T_t(t) = \frac{s_{Farb}}{v_{mas}(t)} \quad 5-39$$

5-39 gilt nur, wenn reale Messwerte der Sensorik verwendet werden. Die Totzeit $T_t(t)$ ist kürzer, wenn das Simulationsmodell die Dichtewerte berechnet. Die Berechnung und Rückführung erfolgt innerhalb eines Berechnungszyklus und ist damit deutlich unter 100 ms.

5.5 Berücksichtigung diverser Einflussfaktoren auf die Farbergiebigkeit

5.5.1 Methoden zur Abbildung komplexer Zusammenhänge

Die Schwankungsbreite der effektiven Farbergiebigkeit FE_{eff} gemäß Abbildung 55 veranschaulicht die Notwendigkeit, explizit die Verbrauchsmaterialien und Produktionsbedingungen bei der Parameterschätzung des Simulationsmodells zu berücksichtigen. Da die Zusammenhänge formal nicht bekannt sind, werden die vergangenen Produktionsläufe als Basis für die Parameterschätzung herangezogen.

Um unbekannte Zusammenhänge aus einer Vielzahl an Daten zu extrahieren, sind verschiedene Möglichkeiten bekannt, die unter den Begriffen „Data-Mining“ oder „maschinelle Lernverfahren“ zusammengefasst werden (HAAS 2009, S. 16; DEESKOW ET AL. 2008; EBERHARD 2006). Verhältnismäßig einfache Zusammenhänge können alternativ mithilfe einer manuellen Analyse, vergleichbar zu Kapitel 5.4.8, ermittelt werden.

Bei komplexen Zusammenhängen haben sich statistische Verfahren oder maschinelle Lernverfahren zur Datenanalyse bewährt (KRIESEL 2012; TAN & MAYROVOUNIOTIS 1995). Diese wurden in Kapitel 3.4.1 zum Stand der Technik bereits vorgestellt, da sie ebenfalls zur Repräsentation unbekannter Regelstrecken eingesetzt werden können. Die Fähigkeit, Prozesse als Black-Box-Modelle zu beschreiben, kann auch dazu dienen, um die Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und den optimalen Modellparametern nachzubilden, ohne die exakten Wirkungspfade zu kennen.

Dabei ist einzuschränken, dass maschinelle Lernverfahren die Zusammenhänge nicht explizit beschreiben, sondern implizit in deren Übertragungsverhalten abbilden. Lernverfahren nehmen somit die Gesetzmäßigkeiten an, welche in den vorgegebenen Datensätzen enthalten sind.

Die Algorithmen können aufgrund deren Struktur und Parametrierung beliebige Funktionen annehmen, die Anpassung auf den jeweiligen Anwendungsfall erfolgt während der Initialisierungsphase, auch „Trainingsphase“ genannt. Anhand der hierfür notwendigen Daten und Informationen werden die maschinellen Lernverfahren in drei Kategorien eingeteilt (KRIESEL 2012; MARSLAND 2009; MACKAY 2003; MITCHELL 1997):

- **Überwachtes Lernen:** Das Training erfolgt mit vollständigen Datensätzen. Die Datensätze beinhalten die Eingangs- und die korrespondierenden Ausgangsdaten. Eine Aussage über die Qualität der Abbildungsgüte des Lernverfahrens kann direkt formuliert werden. Diese Verfahren erreichen eine sehr gute Reproduzierbarkeit und werden deshalb sehr häufig eingesetzt.

- Bestärkendes Lernen oder Reinforcement Learning: Das System erhält während des Trainings die Eingangsdaten und trifft von ihnen abhängig Entscheidungen. Der Wahrheitsgehalt der Entscheidung wird durch Bestrafung oder Belohnung bewertet, der Zielwert wird jedoch nicht zurückgemeldet. Bestärkende Lernverfahren sind geeignet, wenn eine qualitative Rückmeldung einer Bewertungsinstanz vorhanden ist.
- Unüberwachtes Lernen: Es stehen Eingangsdatensätze zur Verfügung, jedoch erfolgt keine Rückmeldung bezüglich der „richtigen“ Ausgabe. Unüberwachte Lernverfahren werden eingesetzt, um vollständig unbekannte Zusammenhänge nachzubilden oder Muster oder Klassenbildungen in großen Datensätzen zu erkennen. Aufgrund der fehlenden Rückmeldung ist das Training rechen- und zeitaufwendig.

Anhand der Datenauswertung der Druckproduktionen gemäß Kapitel 5.4.3 stehen vollständige Datensätze zur Verfügung, welche die Ein- und Ausgangsgrößen beinhalten. Somit können überwachte Lernverfahren eingesetzt werden.

Neuronale Netze erfüllen die Anforderungen zur Berechnung der effektiven Farbergiebigkeit anhand der Einflussgrößen sehr gut. Deren Leistungsfähigkeit sowie deren universelle Einsetzbarkeit wurden in diversen Untersuchungen nachgewiesen (ANAND 2012; BORGES ET AL. 2011; SUZUKI 2011; XU ET AL. 2004). Für die Realisierung spricht zudem, dass eine umfangreiche Grundlagenliteratur sowie leistungsfähige Software verfügbar sind.

5.5.2 Aufbau von neuronalen Netzen

Da die Schätzung der effektiven Farbergiebigkeit FE_{eff} des Simulationsmodells nichtlinear ist, wird ein MLP-Netz (Multi Layer Perceptron) eingesetzt. Dieser Typ des neuronalen Netzes ist in der Lage, nichtlineare Zusammenhänge abzubilden (LOTZ 2012, S. 94). Die Netzstruktur ist gekennzeichnet durch eine Eingabeschicht, eine oder mehrere verdeckte Zwischenschichten und eine Ausgabeschicht, wie beispielhaft in Abbildung 57 dargestellt ist.

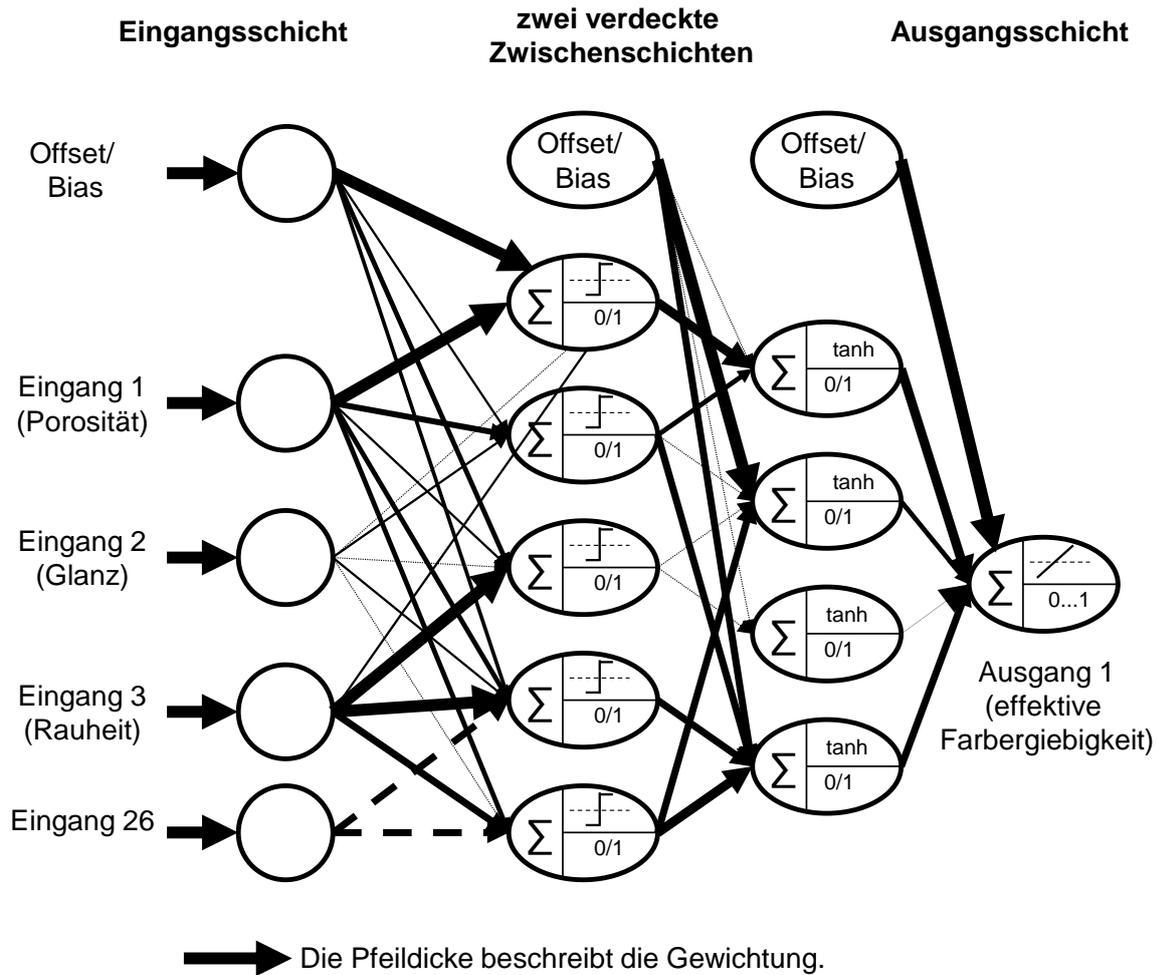


Abbildung 57: Beispielhafte Struktur eines MLP-Netzes (eigene Darstellung)

Das zur Berechnung der effektiven Farbergiebigkeit FE_{eff} eingesetzte MLP-Netz besitzt eine frei wählbare Anzahl an Neuronen in den verdeckten Schichten. Die Anzahl der Eingangsneuronen entspricht der Anzahl der Eingangsgrößen. Die Ausgangsschicht enthält ein Ausgangsneuron, welches die normierte Farbergiebigkeit berechnet.

Jedes Neuron ist über Kanten mit allen Neuronen der vorhergehenden und der nachfolgenden Schicht verbunden. Jede Kante besitzt ein Gewicht. Je höher die Gewichtung einer Kante, desto stärker beeinflusst der Ausgang des Neurons den Eingang des folgenden Neurons. Ziel der Trainingsphase ist es, die Gewichte so anzupassen, dass die gewünschten Ausgangswerte ebenfalls berechnet werden (LÄMMEL & CLEVE 2012). Grundsätzlich ließen sich darüber hinaus die Übertragungsfunktionen der einzelnen Neuronen oder die Netzstruktur anpassen. Für die Anpassung der Gewichte während der Trainingsphase wurden sehr leistungsfähige Optimierungsverfahren entwickelt, weshalb diese Vorgehensweise meistens angewendet wird.

5.5.3 Datenanalyse und Filterung

Das künstliche neuronale Netz lernt anhand der in der Datenbank gespeicherten Kenngrößen, ohne dass diese manuell verifiziert oder überprüft werden. Während der eigentliche Trainingsablauf standardisiert erfolgt, sind im Vorfeld die Daten geeignet aufzubereiten, wozu sowohl Kenntnisse bezüglich der Lernverfahren als auch die physikalische Interpretation der Daten notwendig sind. Für die Datenaufbereitung sind mehrere Aspekte zu betrachten (HAAS 2009, S. 14). Neben der Validierung während der Kenngrößenberechnung erfolgt im Rahmen der Datenvorverarbeitung eine zusätzliche Verifizierung mithilfe der weiteren Datensätze derselben Kategorie sowie desselben Produktionslaufs, sodass Ausreißer oder inkonsistente Daten auffallen. Inkonsistente Datensätze sind physikalisch nicht sinnvoll und oft nur in Kombination mit anderen Datensätzen zu erkennen. Die Trainingsdaten können ebenfalls uneindeutig sein. Bei ihnen handelt es sich um Datensätze, welche die gleichen Eingangsdaten enthalten, sich die Sollausgangswerte jedoch voneinander unterscheiden. Diese Konstellation führt zu Schwierigkeiten während der Trainingsphase, da der Trainingsalgorithmus beide Datensätze als gleichwertig betrachtet und versucht, beide Zielwerte zu erreichen. Die Ursache für uneindeutige Datensätze kann physikalisch begründet sein durch bisher nicht berücksichtigte Einflussgrößen, unbekannte Teilprozesse oder auch Messfehler. Vollständig uneindeutige Datensätze, welche sich lediglich in der Ausgangsgröße unterscheiden, lassen sich leicht erkennen und zu einem mittleren Datensatz kombinieren. Datensätze, bei denen sich die Eingangsgrößen sehr stark ähneln und die Ausgangswerte deutlich differieren, sind wesentlich schwieriger zu erkennen und begrenzen die Performance des Trainingsalgorithmus.

5.5.4 Clusterung der Daten

Gleichzeitig ist zu beachten, dass die Daten im regulären Produktionsbetrieb aufgenommen worden sind. Die dort vorhandenen Besonderheiten im Produktionsumfeld, im Auftragsmix und bei den Bedienern sind in den Datensätzen enthalten und unterscheiden sich im Detail sogar bei baugleichen Maschinen. Darüber hinaus sind die Betriebspunkte und damit die Einflussgrößen nicht gleichmäßig über deren möglichen Wertebereich verteilt, sondern bilden bei den üblichen Betriebsbedingungen Punktecluster. Zwischen diesen Clustern gibt es Bereiche, die nur selten oder niemals im Betrieb auftreten.

Für zwei Einflussgrößen ist dies in Abbildung 58 visualisiert, wobei die Parameter P1 und P2 für beliebige Größen stehen können. Der Anwendungsfall in der Drucktechnik umfasst 26 Dimensionen, in denen die Betriebspunkte ungleichmäßig verteilt sind.

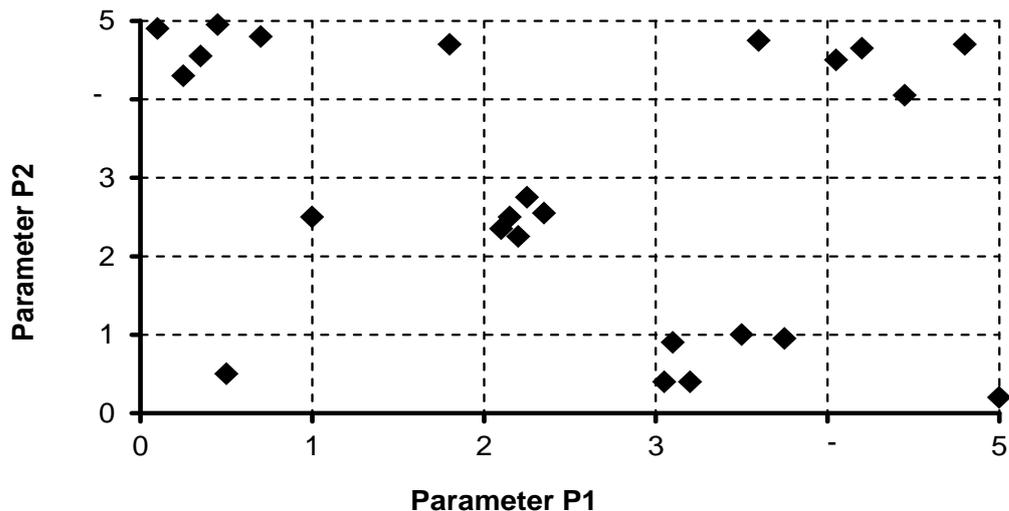


Abbildung 58: Visualisierung eines ungleichmäßig verteilten Parameterraums (eigene Darstellung)

Der erste Punktecluster weist eine Wertekombination von 0,5/4,5 für P1 und P2 auf, was einen bevorzugten Betriebspunkt auszeichnen könnte. Es sind noch weitere Cluster dargestellt, während dazwischen nur vereinzelte Punkte liegen. Um Zusammenhänge zu erkennen (Generalisierungsfähigkeit), sollte der Parameterraum jedoch gleichmäßig abgedeckt sein. Mithilfe einer Clusteranalyse lassen sich ähnliche Datensätze zusammenfassen. Die gebräuchlichsten Verfahren sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Tabelle 7: Verfahren zur Agglomeration von Punkten (BROSIUS 2008)

Verfahren	Beschreibung
Single-Linkage	Zusammenfassung der Objekten mit der geringsten Distanz
Complete-Linkage	Zusammenfassung der Objekte mit der größten Distanz
Average-Linkage	Bestimmt den Mittelwert aller Distanzen und fasst die Cluster mit dem geringsten Mittelwert zusammen
Average-Group-Linkage	Vergleichbar zu Average-Linkage: Es werden zusätzlich die Distanzen innerhalb eines Clusters betrachtet.
Zentroid-Distanz	Zusammenfassung der Cluster, die den geringsten Abstand der Clustermittelpunkte besitzen
Ward-Verfahren	Iterative Zusammenfassung derjenigen Cluster, welche die geringste Zunahme der Varianz des neuen Clusters bewirken

Für die Clusterung der Produktionsdaten wurde das Ward-Verfahren ausgewählt. Da es sich um ein agglomeratives Verfahren handelt, stellt jeder Datenpunkt zu Beginn einen eigenen Cluster dar. Mit jedem Iterationsschritt werden die beiden Cluster zusammengefasst, bei denen die resultierende Fehlerquadratsumme ΔQS_{Fehler} nach 5-40 nach der Clusterbildung am geringsten ist.

$$\Delta QS_{Fehler} = \frac{N_r * N_s}{N_r + N_s} * \|\bar{x}_r - \bar{x}_s\|^2 \quad 5-40$$

Die Indizes r und s beschreiben die Cluster r und s, N ist die Elementanzahl und \bar{x} sind die Mittelwertsvektoren der jeweiligen Cluster.

In Abbildung 59 ist der Ausgangszustand dargestellt, wobei jeder der 24 Punkte als separater Cluster betrachtet wird. Die Punkte und die Clustermittelpunkte liegen direkt übereinander.

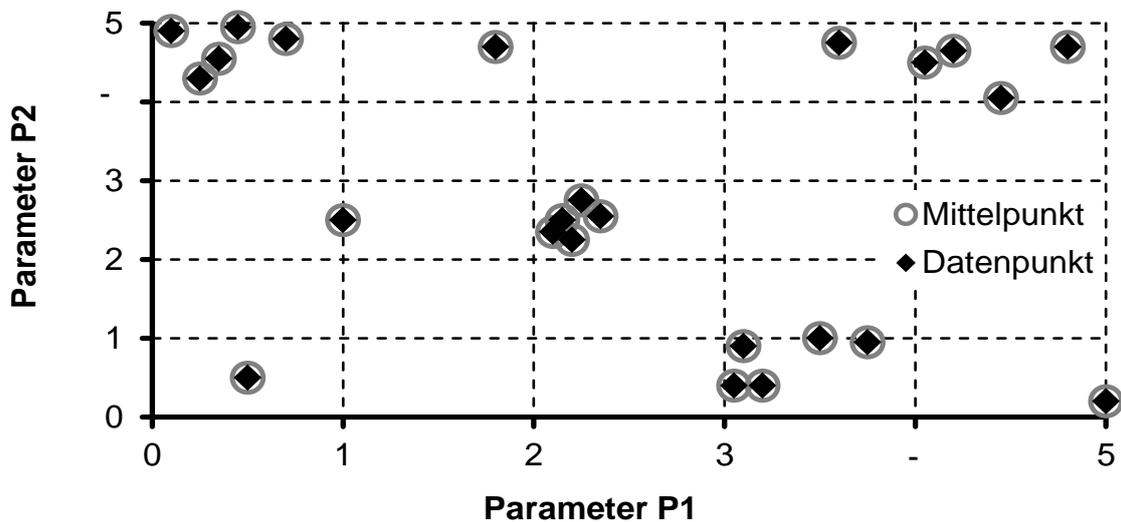


Abbildung 59: Ausgangssituation bei Anwendung des Ward-Verfahrens

Bei jeder Iteration werden die Cluster so zusammengefasst, dass sich die geringste Zunahme der Fehlerquadratsumme bildet. Nahe Cluster werden somit zu einem Cluster vereinigt. Bei der 17. Iteration nach Abbildung 60 werden die Cluster drei und vier zu einem neuen Cluster zusammengefasst, da die Zunahme der Fehlerquadratsumme im Vergleich zu den anderen Kombinationen am geringsten ist. Der neue Cluster ist als gestrichelte Linie dargestellt.

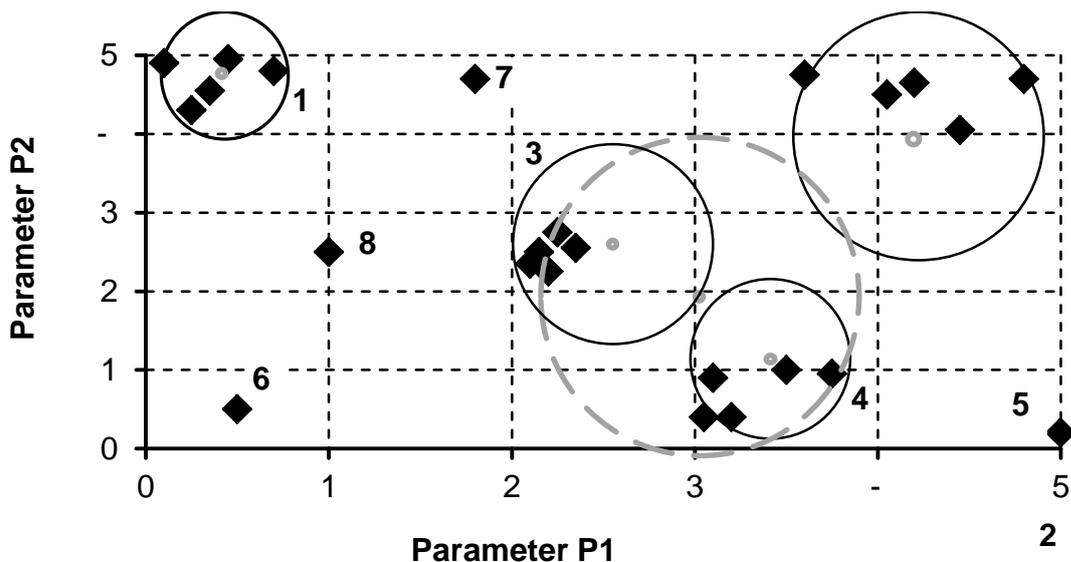


Abbildung 60: Allomeration zweier größerer Cluster (Nummer 3 und 4)

Alle Clusterverfahren benötigen ein Abbruchkriterium, anhand dessen eine optimale Anzahl an verbleibenden Clustern bestimmt wird. Für die Parameterermittlung wurde der Calinski-Harabasz-Index $CH_{(K)}$ nach Gleichung 5-41 eingesetzt. Das Maximum des CH-Index über die Clusteranzahl K ergibt die optimale Anzahl an Clustern. Die Bedeutung der Parameter in Gleichung 5-41 erläutert HANDL 2002 detailliert.

$$CH_{(K)} = \frac{tr(\mathbf{B})}{tr(\mathbf{W})} * \frac{n - K}{K - 1} \tag{5-41}$$

Für die vorliegenden Daten wird der maximale CH-Index bereits bei einer hohen Anzahl von Clustern erreicht. Dies deutet auf eine fehlende Klassenstruktur der Datensätze hin. Eine weitere Reduzierung der Elemente ist somit nicht sinnvoll.

Mithilfe verschiedener Verfahren kann die Qualität der verfügbaren Prozessdaten deutlich gesteigert werden, was zu einer verbesserten Generalisierungsfähigkeit und höheren Vorhersagegenauigkeit sowie einer effektiveren Trainingsphase führt.

5.5.5 Normierung der Daten

Maschinelle Lernverfahren und somit auch künstliche neuronale Netze sind jedoch für normierte Ein- und Ausgangsdaten im Intervall zwischen 0 und +1 (alternativ -1 bis +1) konzipiert, was für die mathematische Optimierung vorteilhaft ist. Die Normierung erfolgt linear über den zulässigen Wertebereichen. Alternativ wurde die Normierung auf Normalverteilung geprüft, was jedoch keine sichtbare Verbesserung zeigte.

Die lineare Normierung ist nur bei quantitativen Größen wie den unterschiedlichen Temperaturen oder auch der Ausgangsgröße „effektive Farbergiebigkeit“ möglich. Die Farb- und Papierklassen stellen kategoriale Größen als Eingangsgrößen des neuronalen Netzes dar. Für kategoriale Größen werden für jede Kategorie separate Eingangsneuronen eingefügt. Diese können nur die Werte 0 oder 1 besitzen („Key-Coding“).

Die Datenaufbereitung beinhaltet die Analyse und Filterung, die Clusterung sowie die Normierung der Daten, bevor diese für das Training verwendet werden. Damit sind eine schnellere Konvergenz während des Trainings und eine höhere Vorhersagegüte des neuronalen Netzes möglich.

5.5.6 Training des neuronalen Netzes

Während des Trainings werden die Verbindungsgewichte zwischen den Neuronen so angepasst, dass die ausgegebenen Werte des neuronalen Netzes $y_{\text{Netzausgabe}}$ den vorgegebenen Sollwerten der Trainingsdaten y_{soll} möglichst gut entsprechen. Andere Parameter des Netzes könnten ebenfalls verändert werden, jedoch hat sich die Optimierung mithilfe der Gewichte am besten bewährt (LÄMMEL & CLEVE 2012).

Zur Beurteilung der Vorhersagegenauigkeit maschineller Lernverfahren hat sich der mittlere quadratische Fehler „MSE“ (Mean Squared Error) etabliert, der gemäß Gleichung 5-42 auf Basis aller n Trainingsdatensätze berechnet. Große Abweichungen wirken sich dementsprechend gravierender aus als geringe Abweichungen (LÄMMEL & CLEVE 2012).

$$MSE = \frac{1}{2 * n} \cdot \sum_1^n (y_{\text{soll}} - y_{\text{Netzausgabe}})^2 \quad 5-42$$

Je niedriger der MSE, desto höher ist die Übereinstimmung der geschätzten Werte mit den Sollwerten und damit die Qualität der Netzvorhersage. Um eine Überanpassung zu vermeiden, werden die zur Verfügung stehenden Datensätze üblicherweise in einen Trainingsdatensatz (60 % aller Datensätze), einen Validierungsdatensatz (20 % der Datensätze) und einen Testdatensatz (restliche 20 % aller Datensätze) aufgeteilt. Die Aufteilung erfolgt zufällig, die angegebenen Prozentwerte dienen als Richtwert.

Das Training erfolgt mithilfe des Trainingsdatensatzes, parallel wird der $MSE_{\text{Validierung}}$ des Validierungsdatensatzes berechnet. Durch das Training wird die Netzausgabe stetig den Sollwerten angenähert, was sich in einem sinkenden MSE_{Training} ausdrückt. Da die Validierungsdaten dieselben Gesetzmäßigkeiten beinhalten sollten, sinkt auch der $MSE_{\text{Validierung}}$ in vergleichbarem Maß. Sobald der $MSE_{\text{Validierung}}$ wieder steigt, der MSE_{Training} aber weiter sinkt, verringert sich die Generalisie-

rungsfähigkeit und das Netz lernt strikt anhand der Trainingsdaten, ohne die zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten zu fokussieren. Die in diesem Punkt ermittelte Gewichtung beschreibt das Optimum zwischen Vorhersagegenauigkeit und Generalisierungsfähigkeit. Die Zusammenhänge sind grafisch in Abbildung 61 dargestellt (JENSEN & ABONYI 2006).

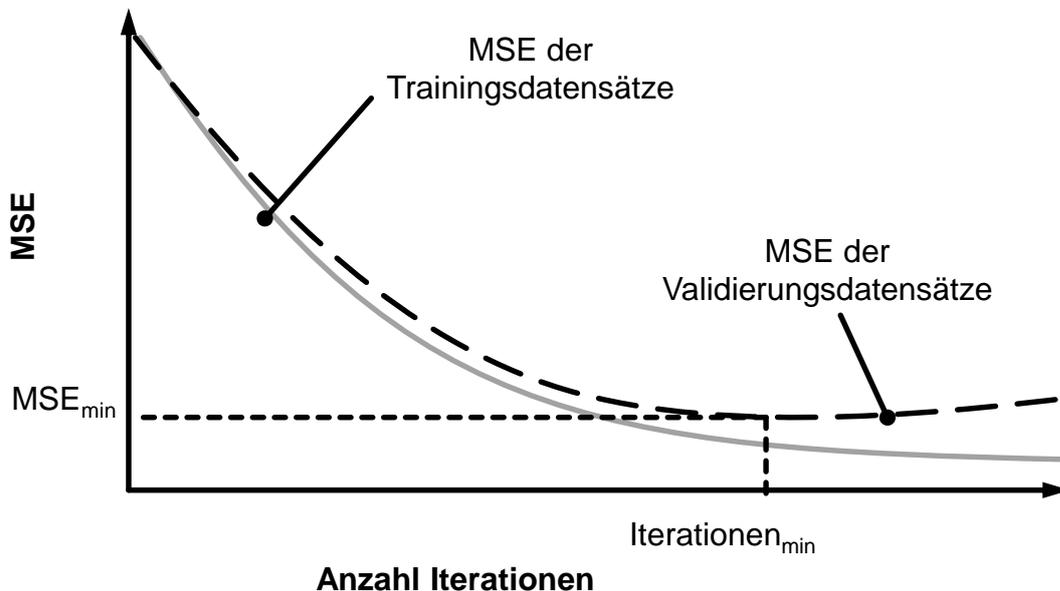


Abbildung 61: Ermittlung der optimalen Netzkonfiguration durch die Bewertung des MSE der Trainings- und Validierungsdaten (angepasste Darstellung gemäß JENSEN & ABONYI 2006)

Für die Anpassung der Gewichte sind verschiedene Verfahren bekannt, welche auf der Delta-Regel basieren (LÄMMEL & CLEVE 2012). Die Delta-Regel verstärkt die Gewichte der Neuronen, welche die Netzausgabe in der passenden Art beeinflussen. Verschiedene Weiterentwicklungen realisieren eine höhere Konvergenz in kürzerer Zeit. In Abbildung 62 ist der $MSE_{Validierung}$ bei denselben Trainings- und Validierungsdaten und bei verschiedenen Trainingsalgorithmen für den Anwendungsfall gegenübergestellt.

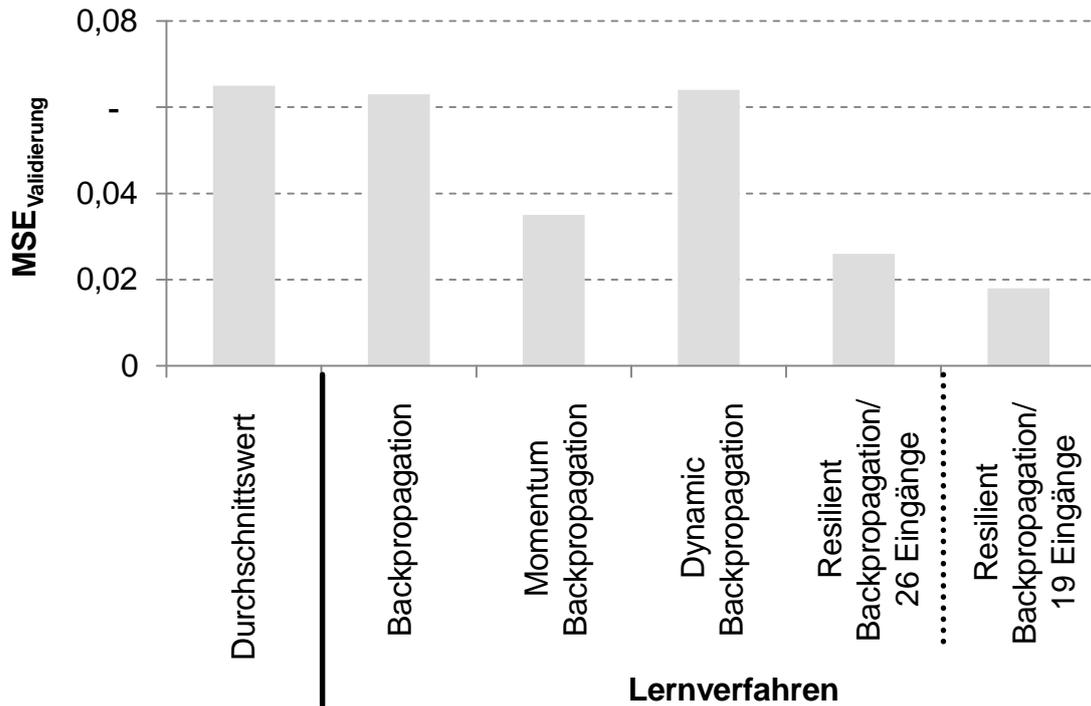


Abbildung 62: Vergleich der Parameterschätzung bei unterschiedlichen Lernverfahren im Vergleich zum arithmetische Mittelwert (eigene Untersuchungen)

Der $MSE_{\text{Validierung}}$ des arithmetischen Mittelwerts beträgt etwa 0,065, vergleichbar den neuronalen Netzen, welche mit den Algorithmen Backpropagation oder Dynamic Backpropagation trainiert wurden. Deutlich besser sind in diesem Fall das Momentum Backpropagation sowie das Resilient Backpropagation-Verfahren mit einem $MSE_{\text{Validierung}}$ von 0,027. Dieses Netz bildet die Zusammenhänge der Einflussgrößen und der effektiven Farbergiebigkeit am besten ab.

Auf dieser Netzkonfiguration aufbauend kann eine fundierte Bewertung der Relevanz der verschiedenen Einflussgrößen erfolgen. Die Einflussgrößen mit eher geringem Einfluss auf den Netzausgang werden nicht weiter als Eingangsgröße verwendet (Datenselektion).

Die Anzahl der Eingangsgrößen reduziert sich durch die Datenselektion auf 19. Mit dem Resilient Backpropagation- Algorithmus konnte der $MSE_{\text{Validierung}}$ bei 19 Eingangsdaten auf 0,018 verringert werden. Dieser Wert dient als Basis für weitere Optimierungen.

5.5.7 Automatische Wahl der geeignetsten Netztopologie

Es ist bisher nicht möglich, anhand der Problemstellung oder der Trainingsdaten eine optimale Netztopologie vorherzubestimmen (LOTZ 2012, S. 97). Deshalb werden während des Trainings automatisch verschiedene Netztopologien mitei-

einander verglichen, wobei sich die Anzahl der verdeckten Schichten und die Anzahl der Neuronen je Schicht verändern. In vergleichbaren Untersuchungen wurden neben der Netztopologie zusätzlich weitere Größen wie die Aktivierungsfunktionen oder die Lernalgorithmen variiert, um ein optimales Netz zu erhalten (TAGSCHERER 2000). Um den numerischen Aufwand gering zu halten, wurde dies nicht durchgeführt.

Als Minimalbesetzung wurden vier Neuronen und maximal zehn Neuronen je verdeckte Schicht gewählt, um ein Overfitting zu vermeiden und gleichmäßig gut konditionierte Netze sicherzustellen. Als Bewertungskriterium dient der MSE_{Test} , der mithilfe des Testdatensatzes ermittelt wird. Die Netztopologie mit dem geringsten MSE_{Test} dient zur Schätzung der Farbergiebigkeit.

Das vorgestellte Vorgehen ermöglicht ein zyklisches Training des neuronalen Netzes, wobei der Zeitbedarf für ein vollständiges Training mehrere Stunden umfasst. Das Training erfolgt zeitgesteuert und unabhängig vom aktuellen Zustand der Druckmaschine. Sobald ein validiertes, neues Netz vorhanden ist, wird das alte Netz archiviert und das neue Netz verwendet.

5.5.8 Ergebnisse der Parameteridentifikation

Zur Verifizierung der Vorhersagequalität sind die Ausgangswerte des neuronalen Netzes den Sollwerten der effektiven Farbergiebigkeit beispielhaft in Abbildung 63 gegenübergestellt. Die Auswahl der Datensätze erfolgt zufällig. Jeder Datensatz entspricht den Kenngrößen eines realen Produktionslaufs, die unterschiedlichen Farbergiebigkeiten sind in variierenden Produktionsbedingungen begründet. Sie können im Einzelfall nur ungenügend überprüft werden, da es sich um die Druckproduktionen aus einem Zeitraum über 15 Monate handelt.

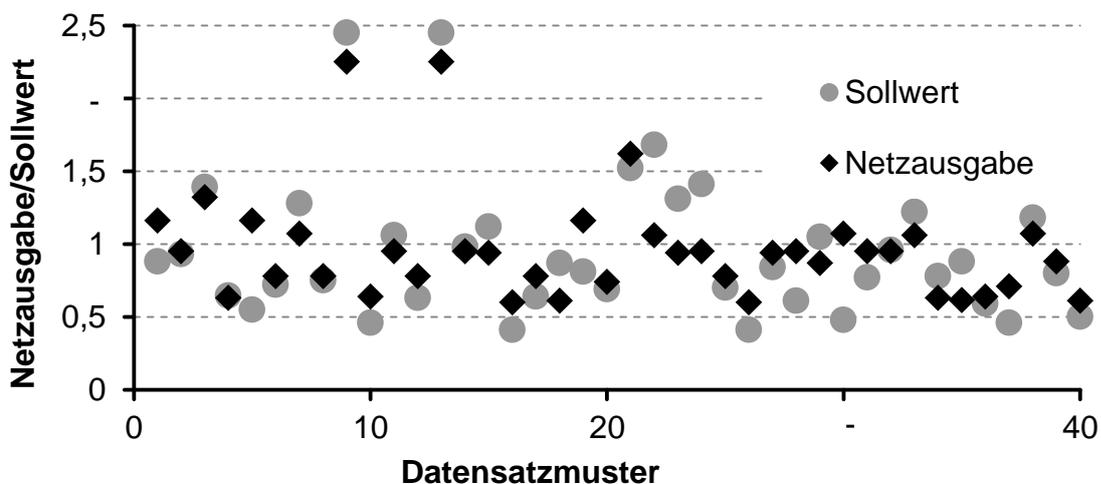


Abbildung 63: Vergleich der Netzausgabe des optimalen Netzes mit den Sollwerten

Die Netzausgabe entspricht in guter Näherung den Sollwerten. Insbesondere vermeintliche Ausreißer wie die Datensätze 9 und 13 mit einer sehr hohen Farbergiebigkeit werden vergleichbar nachgebildet. Bei diesen beiden Produktionsläufen handelt es sich um normale Druckaufträge, bei denen sich vermutlich aufgrund besonderer Einflussgrößenkombinationen die hohe Farbergiebigkeit von 2,5 ergibt.

Mithilfe des neuronalen Netzes ist es somit möglich, den Parameter „effektive Farbergiebigkeit FE_{eff} “ anhand der wirkenden Einflussgrößen hinreichend exakt zu schätzen. Mit der passenden effektiven Farbergiebigkeit können stets die optimalen Modellparameter und von ihnen abgeleitet die Reglerparameter berechnet werden. Die Differenz zwischen der simulierten optischen Dichte und den realen Messwerten wird minimiert, insbesondere bei Parameterkombinationen, die ein stark verändertes Prozessverhalten und in der Folge eine veränderte optische Dichte bewirken.

5.6 Berücksichtigung maschinenbedingter Einflussfaktoren

Neben den verbrauchsstoff- und prozessbedingten Einflussgrößen werden im Simulationsmodell die zustandsbedingten Parameter der Druckmaschine explizit berücksichtigt. Beispiele hierfür sind Verschleiß, Verschmutzung, zunehmendes Spiel oder Alterungseffekte.

Der Zustand von Anlagen kann in Anlehnung an DIN 31051-2003 vergleichbar zu Abbildung 64 beschrieben werden.

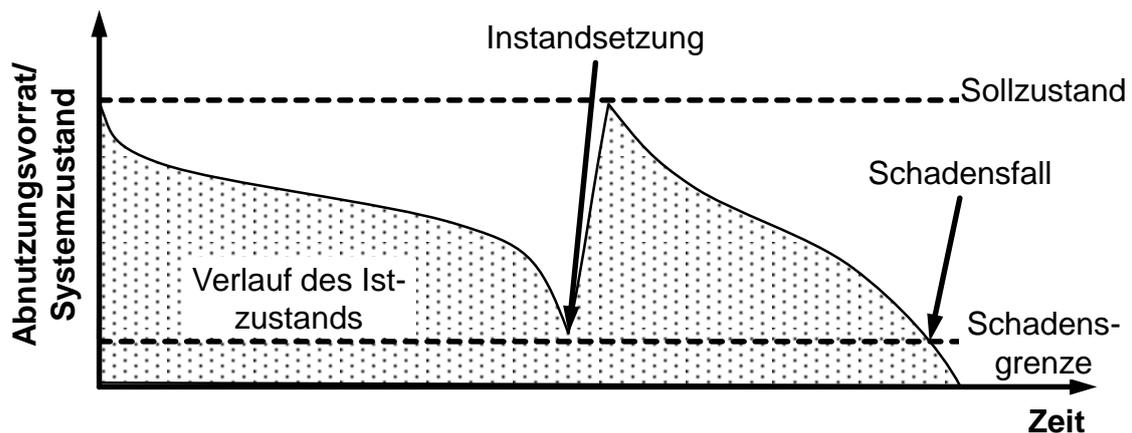


Abbildung 64: Veränderung des Maschinenzustands über die Betriebsdauer (eigene Darstellung nach DIN 31051-2003)

Ausgehend von einem Sollzustand verändert sich der Systemzustand stetig mit zunehmender Betriebsdauer. In vielen Fällen ist die Abnutzung insbesondere bei Beginn der Betriebsdauer relativ hoch. Anschließend verändert sich der Systemzustand nur noch geringfügig. Je nach Schadensmechanismus ist der Verlauf des Abnutzungsvorrats bis zur Schadensgrenze stark unterschiedlich. Die Instandsetzungsmaßnahmen werden je nach Instandhaltungsstrategie und Schadensmechanismus unterschiedlich ausgeführt, in allen Fällen wird versucht, den Sollzustand möglichst wirtschaftlich zu erreichen. Das Übertragungsverhalten der Regelstrecke verändert sich damit über die Betriebsdauer, wobei speziell bei komplexen Prozessen eine Superposition verschiedener Abnutzungsmechanismen stattfindet. Ferner kann ein stetig abnehmender Abnutzungsvorrat zu einer proportionalen oder einer sprunghaften Verhaltensänderung führen.

Zustandsbedingte Einflussgrößen hängen direkt oder indirekt vom Abnutzungsvorrat beziehungsweise Maschinenzustand ab und verändern das Übertragungsverhalten des Prozesses. Im Allgemeinen wirken sich zustandsbedingte Größen während der Betriebszeit nur quasistatisch aus, insbesondere im Verhältnis zur Prozessdynamik (BOOG 2010). Sprunghafte Änderungen ergeben sich aufgrund von Instandsetzungsarbeiten wie einer Reinigung, einer Erneuerung von Verschleißteilen oder bei einem Funktionsausfall.

Neben der rein funktionstechnischen Betrachtung eines Bauteils ist für die Prozesssicherheit der Pflege- und Wartungszustand zu berücksichtigen. Verschmutzungen beispielsweise können direkt den Prozess beeinflussen, werden jedoch nicht direkt dem Abnutzungsvorrat zugeordnet. Trotzdem können insbesondere in der Druckindustrie Verschmutzungen die Ursache für Prozessstörungen sein, da sich Ablagerungen von Papierstaub oder getrockneter Farbe im Farbwerk auf die Gleichmäßigkeit der Farbschicht und damit auf die Druckqualität auswirken. Weitere Beispiele für zustandsbedingte Einflussgrößen sind in Abbildung 34 aufgeführt.

Bezüglich der Regelung der optischen Dichte besitzen Verschleiß und Verschmutzungen im Bereich der Zonenöffnungen große Auswirkungen auf das Verhalten der Farbzufuhr. Bei niedrigen Flächendeckungen und damit hohen Zeitkonstanten des Prozesses tritt dieser Effekt stärker auf, weshalb eine fundierte Analyse für ein verbessertes Simulationsergebnis sinnvoll ist. Im Folgenden wird darüber hinaus eine Möglichkeit gezeigt, wie mithilfe statistischer Methoden eine Adaption des Simulationsmodells realisierbar ist.

5.6.1 Beschreibung der realen Problemstellung

Bei niedrigen Flächendeckungen ist der Farbdurchsatz im Farbwerk relativ gering. Abweichungen vom idealen Systemzustand wirken sich prozentual höher aus als bei hohen Flächendeckungen. Abbildung 65 zeigt den mechanischen Aufbau der Farbzufuhr, insbesondere ist der mechanische Abstand zwischen dem Zonenmes-

ser und dem Farbduktor ZOE_{mech} sowie der Abstand zwischen dem Farbduktor und der Filmwalze s_{FD_FW} dargestellt.

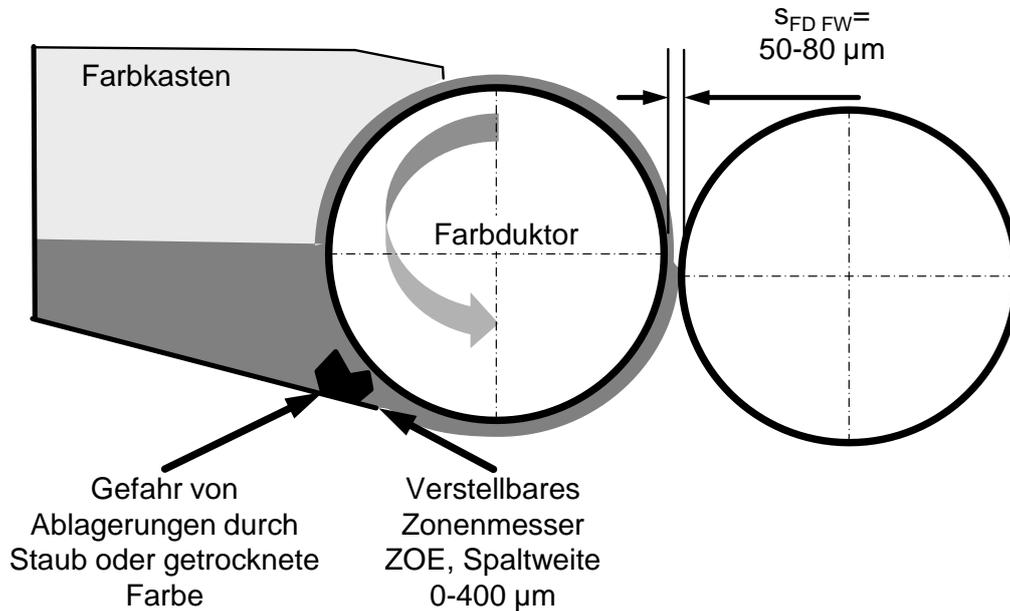


Abbildung 65: Relevanz von Ablagerungen an der Farbzufuhr

Im Idealfall kann mithilfe des Abstands beider Walzenoberflächen s_{FD_FW} und dem Einschnürfaktor f_{Ein} diejenige Zonenöffnung ZOE_0 berechnet werden, bei der zum ersten Mal Farbe vom Farbduktor auf die Filmwalze und damit in das Farbwerk übertragen wird. Da die Stellgröße Zonenöffnung prozentual auf deren Maximalwert $ZOE_{mech\ max}$ bezogen ist, kann Gleichung 5-43 für die Berechnung des ersten Farbübertrags ZOE_0 genutzt werden.

$$ZOE_0 = \frac{s_{FD_FW}}{f_{Ein} * ZOE_{mech\ max}} * 100 \% \quad 5-43$$

Die Mindestzonenöffnung ZOE_0 muss mindestens eingestellt werden, um Farbe auf die Filmwalze zu übertragen, geringere Werten bewirken keinen Farbfluss. Damit stellt sich die Mindestzonenöffnung ZOE_0 als Offset dar. Anhand von Gleichung 5-44 ist der Zusammenhang zwischen der effektiven Zonenöffnung ZOE_{eff} und der Stellgröße Zonenöffnung ZOE dargestellt.

$$ZOE = ZOE_0 + ZOE_{eff} \quad 5-44$$

Unter idealen Bedingungen ergibt sich ein theoretischer Offset von 24 % für alle Zonen. Ein Verschleiß der Zonenmesser bewirkt eine Verringerung des Offsets, Ablagerungen blockieren hingegen teilweise den freien mechanischen Durchgang zwischen Farbduktor und Zonenmesser und erhöhen damit den Offset.

Untersuchungen am Farbwerk einer Offsetdruckmaschine zeigen eine hohe Schwankungsbreite des Offsets zwischen den Zonen in den unterschiedlichen Farbwerken. In Abbildung 66 sind die manuell gemessenen Werte des Zonenoffsets über die fortlaufende Zonennummer eingetragen für die Ober- und Unterseite des schwarzen Farbwerks.

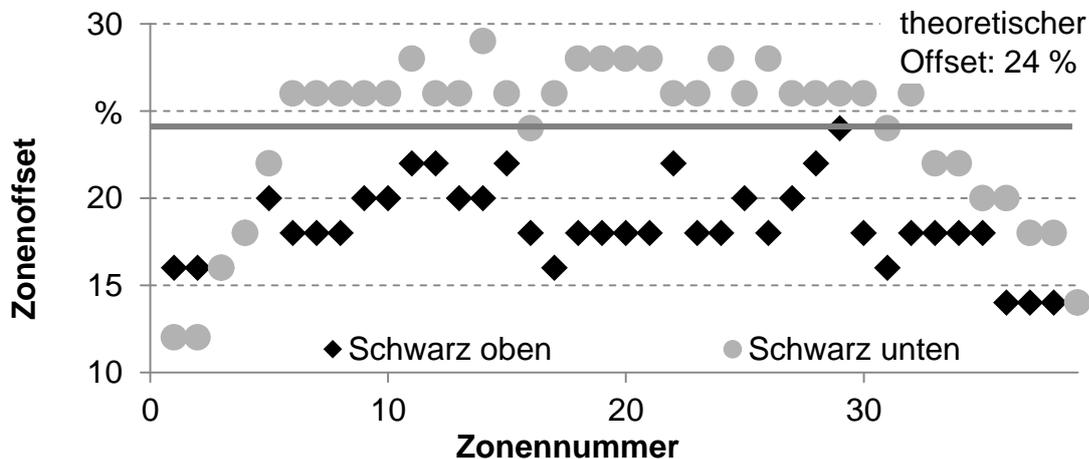


Abbildung 66: Schwankungen des ersten Farbübertrags über die Druckbreite

Der Nominalwert von 24 % wird in mehreren Zonen beider Farbwerke erreicht. Der Minimalwert liegt mit etwa 12 % in Zone 3 deutlich niedriger, der Maximalwert beträgt etwa 29 %. Die ermittelten Werte schwanken stark, eine Gesetzmäßigkeit kann nicht abgeleitet werden.

Farbspezifisch lassen sich keine Abhängigkeiten oder Besonderheiten ermitteln. Eine Analogie zwischen beiden Druckwerken ist nicht erkennbar. Da sich der erste Farbübertrag direkt auf die übertragene Farbmenge im Farbwerk auswirkt, reduzieren zu hohe Offsetwerte die effektive Zonenöffnung. Dementsprechend ergibt sich eine geringere Farbmenge im Farbwerk und folglich ist die berechnete optische Dichte geringer als die real vorhandene Dichte. Ein falsch gewählter Offsetwert wirkt sich darüber hinaus auf die effektive Farbergiebigkeit FE_{eff} aus. Um diesen Einfluss zu reduzieren, ist es notwendig, stets die realen Offsetwerte im Simulationsmodell zu verwenden.

Die manuelle Messung ist jedoch sehr zeitaufwendig und unter Produktionsbedingungen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht durchführbar. Um dennoch eine hohe Simulationsgüte, insbesondere bei niedrigen Flächendeckungen, zu erhalten, müssen die Offsetwerte automatisch ermittelt und im Simulationsmodell berücksichtigt werden.

5.6.2 Grundüberlegung zur Ermittlung des ersten Farbübertrags

Der Offsetwert ist diejenige Zonenöffnung, bei der Farbe erstmalig in das Farbwerk und dann im stationären Betrieb wiederum auf das Papier übertragen wird. Je geringer die effektive Zonenöffnung ist, desto geringer ist die optische Dichte. Es sind drei Verfahren möglich, um den Offsetwert automatisch zu bestimmen:

1. Verringerung der Zonenöffnung, bis die optische Dichte erstmalig null beträgt.
2. Anfahren verschiedener Kombinationen von Duktordrehzahl und Zonenöffnung bei konstanter Dichte sowie die Berechnung der initialen Zonenöffnung in Anlehnung an Abbildung 46.
3. Ermittlung der stationären Zonenöffnung für Zonen mit einer Flächendeckung von 0 %.

Alle drei Varianten sind in der Produktionsphase schwierig zu realisieren, da spezielle Druckformen notwendig sind, eine sehr niedrige optische Dichte nicht gemessen oder der Vorgang nicht produktionsparallel durchgeführt werden kann.

Das Prinzip von Variante drei kann jedoch in abgewandelter Form mithilfe der stationären Betriebspunkte durchgeführt werden, ohne die Produktion zu beeinträchtigen. Dafür werden zweierlei Abhängigkeiten miteinander verknüpft. Einerseits sinkt mit abnehmender Flächendeckung die abgeführte Farbmenge linear. Bei einer Flächendeckung von 0 % wird keine Farbe auf das Papier übertragen. Andererseits fällt bei konstanter Duktordrehzahl mit der effektiven Zonenöffnung ZOE_{eff} die zugeführte Farbmenge ebenfalls linear (WALENSKI 1995). Im stationären Betrieb entsprechen beide Farbmengen einander in Analogie zu Gleichung 5-11. Die Zonenöffnung, welche für eine Flächendeckung von 0 % benötigt wird, entspricht dem Zonenoffset. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 67 die stationären Zonenöffnungen ZOE über die zonalen Flächendeckungen FD aufgetragen.

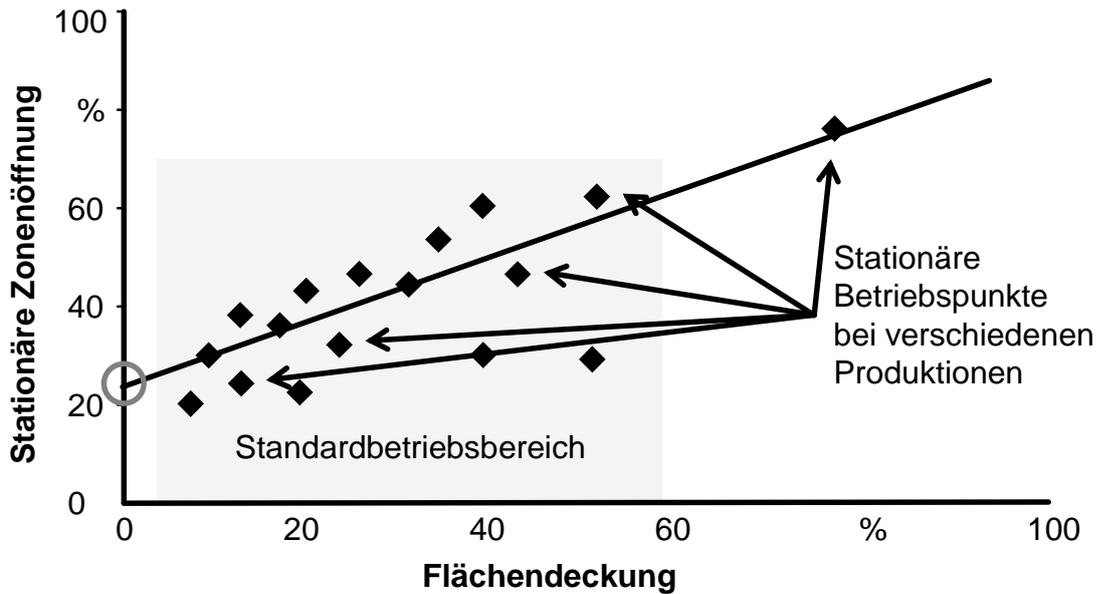


Abbildung 67: Prinzipielles Vorgehen zur Ermittlung des ersten Farbübertrags (qualitative Darstellung)

Die stationären Zonenöffnungen können mithilfe einer Ausgleichsgeraden näherungsweise verbunden werden. Der Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der y-Achse entspricht der Zonenöffnung bei 0 % Flächendeckung und somit der maximalen Zonenöffnung, bei der theoretisch keine Farbe in das Farbwerk eingetragen wird. Dies entspricht dem gesuchten Offsetwert der Zonenöffnung.

5.6.3 Auswertung der stationären Betriebspunkte

Die stationären Werte der Zonenöffnungen sind in Abbildung 68 für eine Zone eines Farbwerks bei unterschiedlichen Flächendeckungen eingetragen. Andere Zonen zeigen eine vergleichbare Charakteristik, die konkreten Messwerte unterscheiden sich jedoch aufgrund der aufgeführten maschinenbedingten Einflussgrößen sowie der initialen Montage.

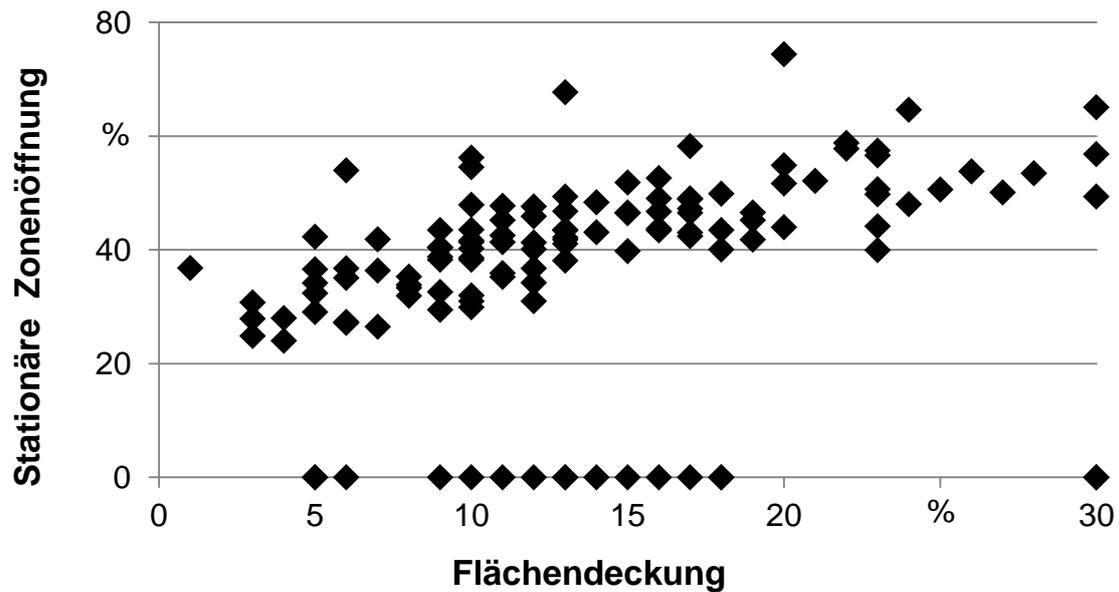


Abbildung 68: Aufgenommene Rohdaten der stationären Zonenöffnungen bei verschiedenen Flächendeckungen in einer Zone

Entgegen der theoretischen Annahme ist eine hohe Streuung der einzelnen Punkte zu erkennen, insbesondere bei höheren Flächendeckungen. Zusätzlich sind stationäre Zonenöffnungen von 0 %, teilweise auch bei sehr hohen Flächendeckungen, aufgenommen, welche physikalisch nicht möglich sind. Weitere Punkte liegen vereinzelt abseits der „idealen“ Anordnung. Mögliche Ursachen sind nachfolgend aufgeführt:

- kurzzeitige Benutzereingriffe,
- Randzoneneffekte,
- ungeeignete Feuchtmittelführung,
- Unregelmäßigkeiten während des Hochlaufs.

Um den Einfluss von Fehlern und Ausreißern zu minimieren, wurden verschiedene Plausibilitätsabfragen und Grenzwerte integriert. Datensätze wurden nicht berücksichtigt, wenn eine der folgenden Prüfungen positiv ist:

- Weist der Hochlaufprozess Unterbrechungen auf?
- Ist die Flächendeckung geringer als 5 % oder größer als 40 %?
- Liegt die stationäre Zonenöffnung unterhalb von 8 % oder oberhalb von 80 %?
- Handelt es sich um eine Randzone?
- Ist einer der anderen Qualitätsparameter außerhalb der Spezifikation?

Um darüber hinaus weitere Ausreißer zu erkennen, erfolgt eine zweistufige Auswertung. Im ersten Schritt wird aus den gefilterten Daten ein Vertrauenskorridor berechnet. Dafür wird die Ausgleichsgerade der gefilterten Daten ermittelt. Um die Ausgleichsgerade wird ein Korridor gebildet, welcher 95 % aller Messwerte beinhaltet. Die Punkte innerhalb dieses Korridors werden weiter verwendet, um im zweiten Schritt die lineare Abhängigkeit der statischen Zonenöffnung und der Flächendeckung mithilfe einer Ausgleichsgerade zu bestimmen. Abbildung 69 zeigt die ursprünglichen Punkte, die verbleibenden Punkte im Vertrauenskorridor sowie die sich ergebende Ausgleichsgerade (gestrichelt).

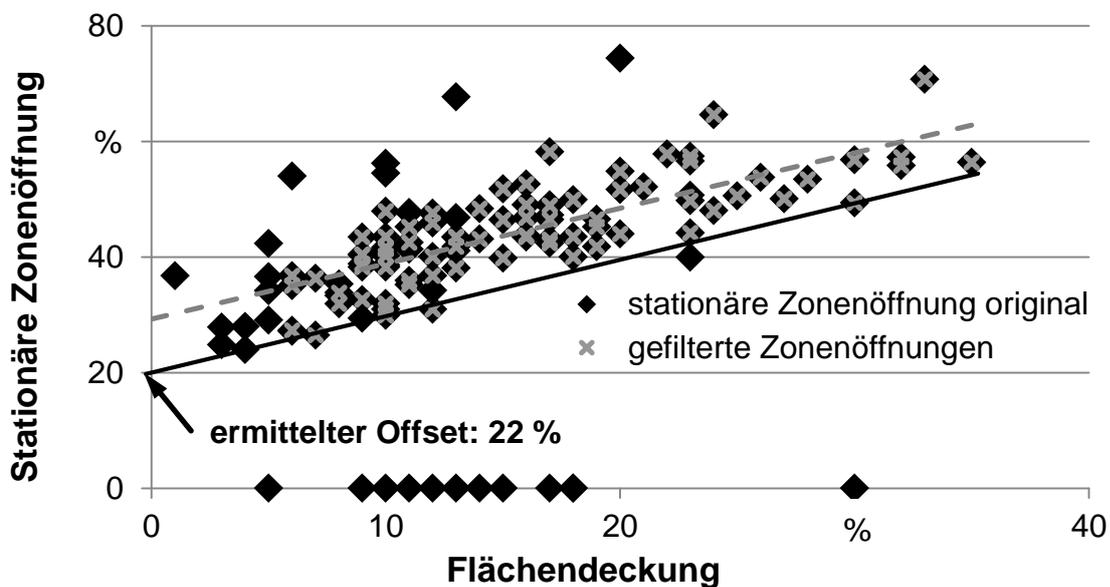


Abbildung 69: Filterung der stationären Betriebspunkte

Da die Ausgleichsgerade mittig zwischen allen Betriebspunkten liegt, wird diese so verschoben, dass wiederum 95 % der verbleibenden Punkte oberhalb der Gerade liegen. Der Schnittpunkt der verschobenen Gerade (in Abbildung 69 durchgehend gezeichnet) mit der Ordinate kennzeichnet den Offsetwert der Zone. Für die dargestellten Produktionsdaten berechnet sich ein Offsetwert von 22 %.

5.6.4 Validierung der Kompensation maschinenbedingter Einflüsse

Zur Validierung des beschriebenen Vorgehens wurden an der Druckmaschine manuell die Zonenstellungen ermittelt, bei denen erstmalig Farbe auf die Filmwalze übertragen wird. Die Messergebnisse sind den mathematisch ermittelten Punkten in Abbildung 70 gegenübergestellt. Die Daten sind für ein Farbwerk gültig, die Ergebnisse in den anderen Farbwerken sind vergleichbar.

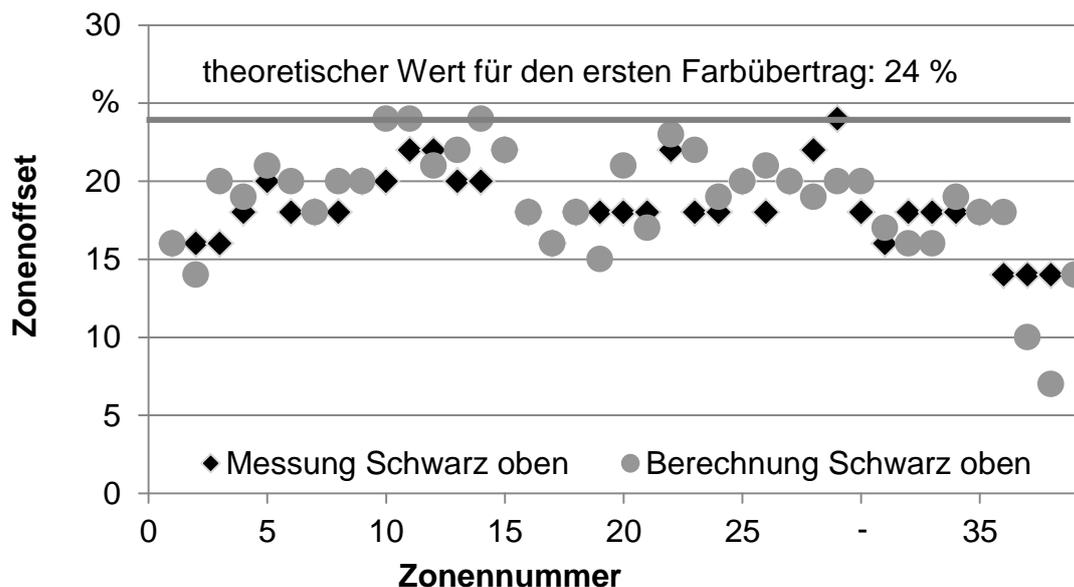


Abbildung 70: Validierung durch den Vergleich mit manuell ermittelten Werten

Die gemessenen und die berechneten Werte korrelieren gut, lediglich in den Randzonen weichen die Daten stärker voneinander ab. Insgesamt kann jedoch eine hohe Übereinstimmung der Werte bestätigt werden. Im Vergleich zum theoretisch ermittelten Wert von 24 % für alle Zonen entsprechen die ermittelten Punkte der Realität wesentlich besser. Dieses Vorgehen setzt theoretisch dieselbe Farbduktordrehzahl bei allen Produktionen voraus. Die Auswertung der Daten hat gezeigt, dass die Schwankungsbreite der Duktordrehzahl über alle Produktionen hinweg relativ gering ist, sodass diese nicht separat berücksichtigt werden muss.

5.6.5 Interpretation der Ergebnisse

Die Schätzung des ersten Farbübertrags verbessert die Simulationsgüte insbesondere bei geringem Farbdurchsatz, was bei Druckbeginn und niedrigen Flächendeckungen sehr wichtig ist. Aufgrund der Schätzung kann die Simulationsgenauigkeit ohne aufwendige Messungen gesteigert werden.

Dieses Vorgehen bedingt, dass das Verhalten des Farbwerks in den stationären Einstellungen implizit abgebildet ist. Eine Änderung des Farbwerks, wie der Austausch des Farbduktors oder die Veränderung des Spalts zwischen Filmwalze und Farbduktor, verändert das Übertragungsverhalten. Damit ändert sich der Maschinenzustand sprunghaft und die gespeicherten Kenngrößen bilden nicht mehr das reale Farbwerksverhalten ab. Wesentliche Änderungen am Farbwerk, welche dessen Charakteristik verändern, müssen deshalb mit erfasst werden. Der Zeitbereich, dem die auszuwertenden Daten entnommen sind, ist dementsprechend dynamisch anzupassen. Kleinere Reinigungs- und Wartungsarbeiten, die nur einen kurzzeitigen Einfluss auf den Farbübertrag ausüben, können nach den bisherigen Erfahrungen vernachlässigt werden.

5.7 Verknüpfungen zwischen den Teilsystemen

Das Konzept der modellbasierten Farbdichteregulation umfasst neben dem Simulationsmodell und dem Regler eine kognitive Parameteranpassung, welche die optimalen Modellparameter mithilfe maschineller Lernverfahren und einer statistischen Analyse bei Produktionsstart automatisch ermittelt. Die Messung der optischen Volltondichte muss somit nicht stetig erfolgen, da der Regelkreis über das Simulationsmodell geschlossen ist. Stehen reale Messwerte zur Verfügung, können diese jederzeit in das Simulationsmodell integriert werden. Gleichzeitig werden die Modellparameter adaptiert, was zu einer verbesserten Genauigkeit und Dynamik führt.

Das Regelungssystem umfasst mehrere Bausteine, welche grundsätzlich voneinander unabhängig realisiert sind. Diese Unabhängigkeit vereinfacht die Entwicklung sowie die Validierung der verschiedenen Funktionen, erfordert jedoch eindeutig definierte Schnittstellen, die gegenüber Manipulationen geschützt sein müssen.

Die Datenerfassung, das Prozessmodell und der Regler müssen in Echtzeit berechnet werden, um jederzeit die richtigen Stellgrößen vorzugeben. Die Bildung der prozessbeschreibenden Kenngrößen erfolgt im Anschluss an eine Druckproduktion und somit nicht unter Echtzeitbedingungen. Dies trifft im Speziellen auch auf die Adaption der Modellparameter zu, wobei insbesondere der Trainingsalgorithmus des neuronalen Netzes relativ viel Zeit in Anspruch nimmt. Die Kopplung an die Echtzeitebene erfolgt mithilfe von Events, welche in Abhängigkeit des Maschinenzustands ausgelöst werden.

6 Validierung des Konzepts

6.1 Validierung unter definierten Versuchsbedingungen

Um die Leistungsfähigkeit der modellbasierten Regelung zu bewerten, wurden unter vordefinierten Bedingungen Druckversuche durchgeführt. In Vorversuchen wurden die optimalen Modellparameter identifiziert, sodass die berechneten Daten des Simulationsmodells möglichst den realen Parametern entsprachen, um eine hohe Genauigkeit des Simulationsmodells zu erhalten. Die Parameteranpassung durch das neuronale Netz sowie die Ermittlung des ersten Farbübertrags sind in diesen Versuchen nicht aktiv.

Die getesteten Druckbilder weisen eine homogene Farbverteilung über den Umfang und über die Breite auf. Exemplarisch ist der Verlauf der optischen Dichte für eine Flächendeckung von 3 % in Abbildung 71 dargestellt. Hierbei wurden die Verläufe der optischen Dichte bei der bestehenden Farbdichteregulierung und der modellbasierten Anfahrregelung gegenübergestellt. Die Messwerte wurden von der maschinenintegrierten Sensorik aufgenommen, weshalb Dichtewerte unter 0,6 nicht ermittelt sind. Bei beiden Verläufen geschieht der erste Umdruck auf das Papier bei Exemplar null.

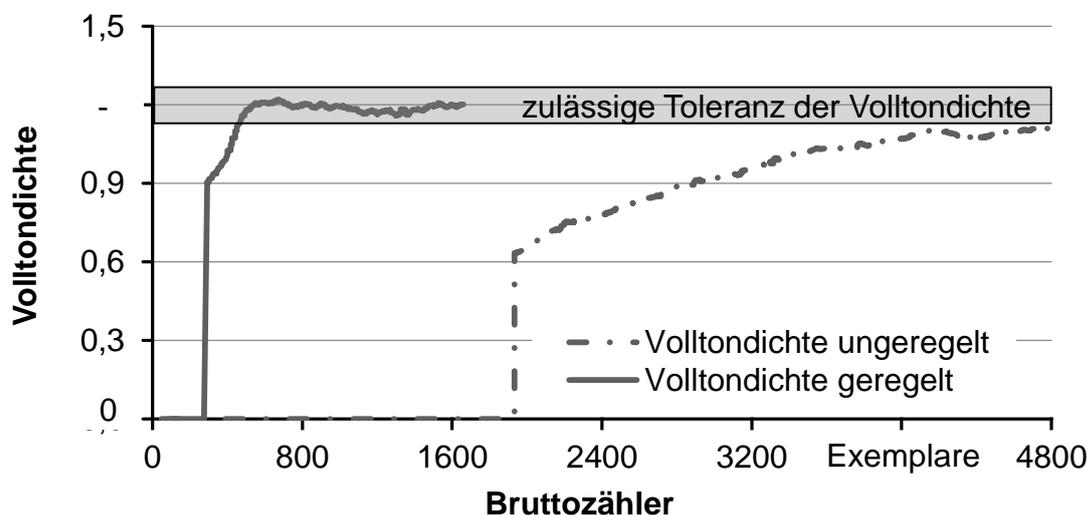


Abbildung 71: Exemplarischer Vergleich der optischen Dichte der modellbasierten Dichteregulierung zur statischen Vorgabe der Stellgrößen bei 3 % Flächendeckung

Der Verlauf der optischen Dichte der bestehenden Farbdichteregelung zeigt das systemtypische PT_1 -Verhalten, da die Stellgrößen statisch vorgegeben werden. Die dem Farbwerk konstant zugeführte Farbmenge verteilt sich im Farbwerk und wird teilweise auf das Papier gedruckt. Mit fortschreitender Dauer werden die Schichtdicken auf den Walzen und damit die optische Dichte auf dem Papier bis zum stationären Endwert stetig größer. Die stationären Schichtdicken im Farbwerk hängen theoretisch lediglich von der Solldichte ab, die anfangs zuzuführende Farbmenge ist dementsprechend annähernd unabhängig von der Flächendeckung, wie in Kapitel 5.2.2.4 ausgeführt ist.

Bei der modellbasierten Farbdichteregelung ist aufgrund der Rückgabe der simulierten Dichtewerte der Regelkreis stets geschlossen, der Regler kann wesentlich dynamischer ausgelegt werden. Dementsprechend wird bei Druckbeginn überproportional viel Farbe zugeführt, damit sich die Farbschichten auf den Walzen schneller bilden. Der Wert der optischen Dichte, die im Simulationsmodell berechnet wird, steigt ebenfalls stetig an. Dieser Anstieg hat eine Verringerung der Stellgrößen und damit der zugeführten Farbmenge zur Folge, bis die Zieldichte erreicht wird. Im Idealfall erfolgt dieser Vorgang mit einem Überschwingen von 10 bis 20 %, um ein ausreichend dynamisches Verhalten sicherzustellen.

Dieses Verhalten ist unabhängig von der Flächendeckung. Bei sehr hohen oder sehr geringen Flächendeckungen wird die Zieldichte innerhalb derselben Zeit erreicht, was eine enorme Verbesserung zum aktuellen Stand der Technik bedeutet!

Um die Zieldichte zuverlässig zu erreichen, ist es notwendig, dass das Simulationsmodell den realen Druckprozess ausreichend exakt wiedergibt. Die gezeigten Verläufe basieren auf konstanten Rahmenbedingungen, welche im realen Produktionsbetrieb in den Druckereien nicht vorhanden sind.

6.2 Rahmenbedingungen der Validierung in der Druckerei

Um die Einsparungen der modellbasierten Farbdichteregelung fundiert zu quantifizieren, wurde das kognitive Regelungskonzept in einer 40-Seiten-Rollenoffsetdruckmaschine in einer Druckerei eingesetzt.

Die modellbasierte Farbdichteregelung mit kognitiver Parameteranpassung ist in einem Farbwerk auf der Widerdruckseite, welche der unteren Papierseite entspricht, integriert. Als Referenz hierzu dient die aktuelle Farbdichteregelung (ZELLER & STUHMILLER 2002; ZELLER 2002) auf der Papieroberseite, der sogenannten Schöndruckseite. Durch die direkte Gegenüberstellung ist sichergestellt, dass auch bei unterschiedlichen Papiereigenschaften oder Druckbedingungen die Vergleichbarkeit zwischen beiden Regelungskonzepten gewährleistet ist. Für die Auswertung ist jeweils der Zeitraum vom Druckstart bis zum Erreichen der Dichte-

toleranz relevant, da dieser für die farbbedingte Anfahrmakulatur entscheidend ist. Bei den Versuchen wird zwischen dem Andruck- und dem Fortdruckprozess unterschieden, da sich diese durch den Initialzustand des Farbwerks unterscheiden (LENZ 2013).

Der Anwendungsfall „Andruck“ beginnt mit einem leeren Farbwerk, das heißt, es befindet sich keine Farbe im Farbwerk. Dies ist in der Regel dann der Fall, wenn ein neuer Druckauftrag gestartet, ein anderes Papier oder Papierformat benötigt oder das Farbwerk gereinigt wird. Neben der optischen Volltondichte müssen die Farbberegister sowie Schnitt und Falz neu eingestellt werden. Dies entspricht dem initialen Produktionsstart und zeichnet sich durch reproduzierbare Ausgangsbedingungen aus. Aufgrund der Vielzahl der zu regelnden Qualitätsgrößen ist die Anfahrmakulatur in der Regel höher als im Fortdruck. Im Referenzzeitraum von Juli 2012 bis Juni 2013 wurden etwa 800 Andrucke durchgeführt.

Im Fortdruck wird das Farbwerk nicht gewaschen, sondern die im Farbwerk befindliche Farbe des vorhergehenden Druckauftrags wird für den Druckstart des folgenden Auftrags weiter verwendet. Das Farbwerk weist daher unterschiedlich dicke Farbschichten auf den Walzen auf, je nach Druckbild und Zieldichte des vorhergehenden Druckbilds. Um ein Überfärben zu vermeiden, ist diese Farbmenge zu berücksichtigen. Im Fortdruck sind die meisten qualitätsbeschreibenden Größen wie Schnitt- und Farbberegister bereits eingeregelt. Die Volltondichte ist in diesem Fall die begrenzende Qualitätsgröße und damit primäre Ursache der Makulatur. Insgesamt hat die Fortdruckmakulatur in der Regel einen geringeren Umfang als die Andruckmakulatur. Der Fortdruckfall im Referenzzeitraum trat etwa 3.200 Mal auf.

Die modellbasierte Farbdichteregulierung wurde nicht bei allen Produktionen eingesetzt. Deren Einsatz erfolgte produktionsparallel an verschiedenen Tagen unter Expertenaufsicht. Die Druckproduktionen entsprachen Kundenaufträgen mit praxisüblichen Druckbildern, welche regulär gedruckt wurden. Jeder Validierungslauf wurde mit einem neuen Druckbild durchgeführt, die Papiersorten erfüllten die Kundenvorgaben. Bei allen Versuchen erfolgten weder eine Kalibrierung noch sonstige manuelle Eingriffe.

Bei den nachfolgenden Auswertungen wird sowohl der Einsatzfall „Andruck“ als auch der „Fortdruck“ bewertet.

6.3 Leistungsfähigkeit der Regelung im Produktionsbetrieb

6.3.1 Analyse des Einsatzfalls „Andruck“

Im Andruckfall wird reproduzierbar aus dem leeren Farbwerk angedruckt. Um die notwendige Farbschichtdicke auf dem Papier zu erreichen, muss sich das Schichtdickenprofil in Farbflussrichtung ausbilden. Die dafür notwendige Farbmenge hängt direkt von der Zielvolltondichte ab und ist praktisch unabhängig von der zonalen Flächendeckung. Sobald diese Farbmenge vollständig dem Farbwerk zugeführt ist, muss der stationäre Farbabfluss über das Papier ausgeglichen werden. Der Farbabfluss ist direkt von der Flächendeckung und der optischen Dichte abhängig.

Exemplarisch ist in Abbildung 72 ein Andruckprozess mit einer konventionellen Regelung dargestellt. Jede Linie entspricht der Volltondichte einer Zone. Die Ziel-dichte beträgt $1,6 \pm 5\%$. Die Flächendeckungen sind für die bedruckten Zonen ebenfalls dargestellt. Die äußeren Zonen eins bis vier und 36 bis 39 werden aufgrund einer teilbreiten Papierbahn nicht bedruckt. Die Randzonen fünf und 35 sind gestrichelt gezeichnet, da sich deren Verhalten von den inneren Zonen aufgrund der unterschiedlichen Verreibungsbedingungen unterscheidet.

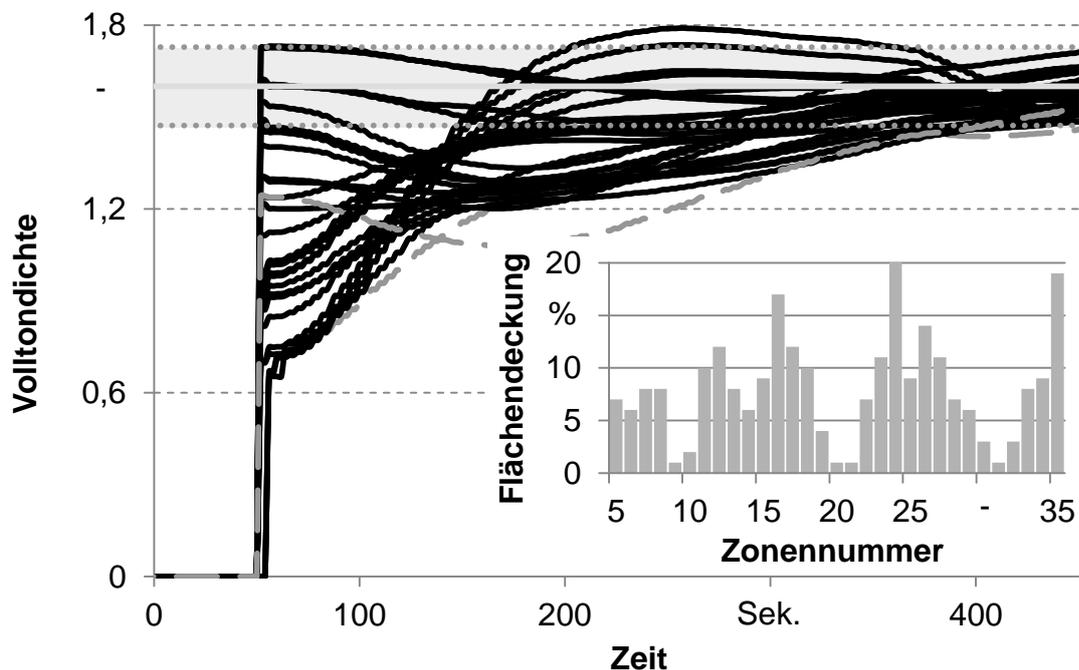


Abbildung 72: Verlauf der optischen Dichte bei Druckbeginn aus dem gewaschenen Farbwerk mit der konventionellen Dichteregulierung

Das Anschwenken der Andruckwalzen auf die Papierbahn geschieht bei $t = 0$ Sekunden. Die ersten Messwerte werden nach 55 Sekunden ermittelt, was durch das Messprinzip gemäß Kapitel 1.3 begründet ist. Die ersten realen Messwerte liegen im Bereich von 0,65 bis 1,75. Die hohe Schwankungsbreite ist in erster Linie auf die unterschiedlichen zonalen Flächendeckungen sowie die Varianz des ersten Farbübertrags zurückzuführen. Mithilfe der ersten Messwerte erfolgt die Berechnung der zonalen Regelfehler e , welche an den Regler übergeben werden. Damit ist der Regelkreis geschlossen. Die Toleranz wird etwa 380 Sekunden nach Druckstart in allen Zonen erreicht. Das relativ träge Verhalten des Regelkreises ist auf die Eigendynamik des Farbwerks sowie auf die Parametrierung des Reglers zurückzuführen. Die Reglerparametrierung ist so gewählt, dass trotz der im Regelkreis vorhandenen Totzeit ein stabiles Regelungsverhalten erzielbar wird. Diese Reglerparametrierung reduziert jedoch die erreichbare Regelungsdynamik, es entstehen in dieser Produktion etwa 2.400 Exemplare Makulatur.

Im Vergleich dazu sind die Dichteverläufe der modellbasierten Regelung mit kognitiver Parameteranpassung in Abbildung 73 dargestellt. Die Dichteverläufe wurden parallel zur Messung gemäß Abbildung 72 aufgenommen und sind somit gut vergleichbar. Die Randzonen sind ebenfalls gestrichelt gezeichnet.

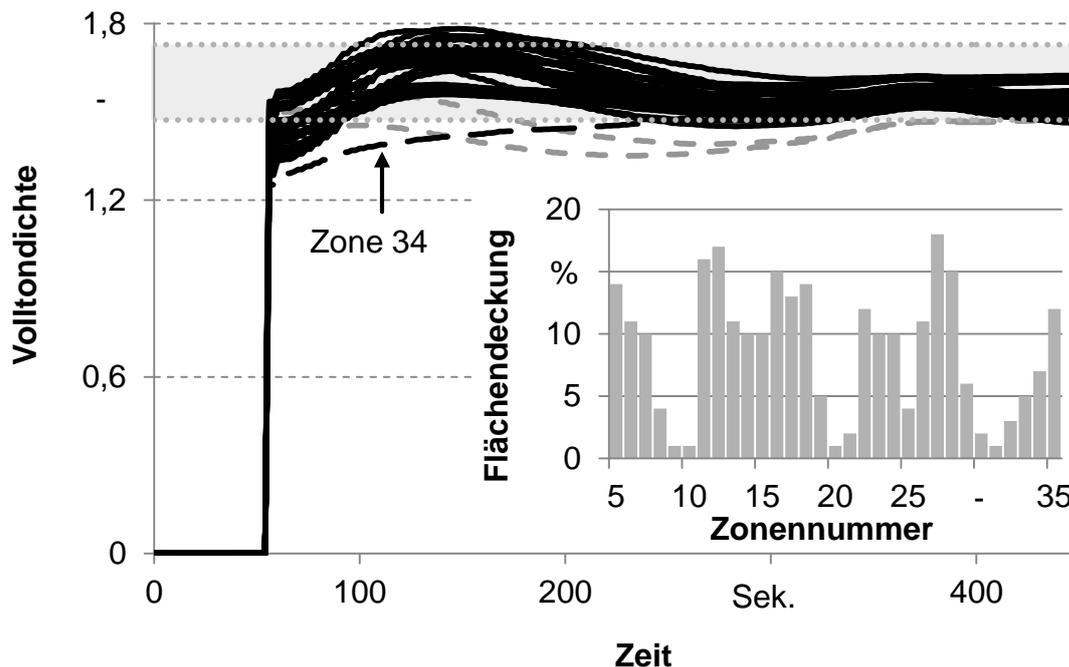


Abbildung 73: Verlauf der optischen Dichte bei Druckbeginn aus dem gewaschenem Farbwerk mit der modellbasierten Dichteregulung

Analog zur konventionellen Farbdichteregulung liegen die ersten Messwerte der modellbasierten Regelung erst 55 Sekunden nach Druckstart vor, da beide Messungen gleichzeitig beginnen. Der Schwankungsbereich ist von 1,25 bis 1,53 jedoch entscheidend geringer als im Standardbetrieb, die Dichtewerte aller Zonen

steigen anfangs in Richtung des Sollwerts 1,6 an. Nach einem Überschwingen von maximal 11 % des Sollwerts gelangen alle Zonen in die Toleranz und bleiben dort. Das Einschwingen ist bei 220 Sekunden vollständig abgeschlossen. Zone 34, als Nachbarzone der Randzone 35, weist das langsamste Einschwingverhalten auf. Würde diese nicht betrachtet, so würde die Toleranz merkbar schneller erreicht. Selbst bei Berücksichtigung von Zone 34 beträgt die Einschwingdauer nur etwa 50 % der konventionellen Regelung. Die verbesserte Dichteregelung drückt sich entsprechend auch in der Makulatur aus. Im Vergleich zur konventionellen Anfahrregelung, welche eine Makulatur von 2.370 Exemplaren aufweist, liegt die modellbasierte Regelung bei etwa 1.265 Exemplaren. Die Makulatur reduziert sich in diesem Fall auf etwa 53 % des ursprünglichen Werts.

Um die Vorgänge während der Andruckphase zu erläutern, sind die verschiedenen Größen einer Zone detailliert in Abbildung 74 dargestellt. Ferner sind die Stellgrößen „Farbduktordrehzahl“ und „Zonenöffnung“ sowie die simulierte Dichte und die gemessene Dichte aufgeführt.

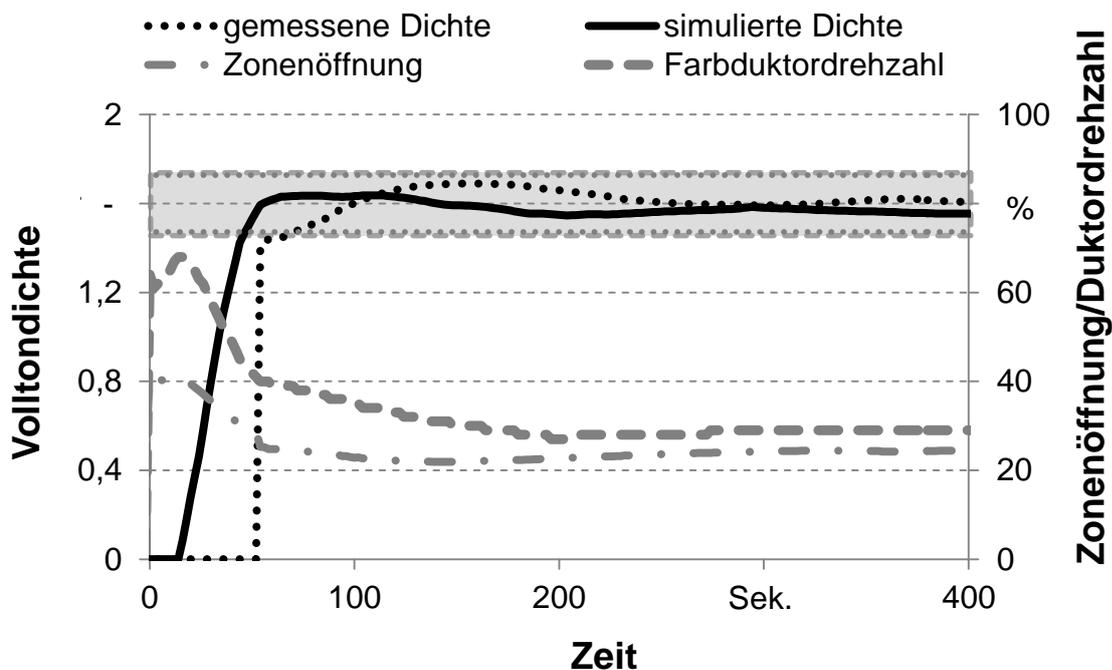


Abbildung 74: Detaillierte Darstellung der Stell- und Regelgrößen während des Andrucks aus einem gewaschenen Farbwerk

Mit dem ersten Umdruck auf das Papier startet der Regler, wobei zu Beginn eine simulierte Dichte von null zurückgegeben wird, da das Farbwerk leer ist. Dementsprechend ist der Regelfehler maximal, sodass beide Stellgrößen theoretisch einen Sprung aufweisen. Der integrierende Regleranteil bewirkt anfänglich ein weiteres Ansteigen der Stellgrößen. Die Vorgabe der hohen Stellgrößen führt zu einem Anstieg der simulierten optischen Dichte. Etwa 50 Sekunden nach Druckbeginn hat die simulierte Dichte den Sollwert von 1,6 erreicht. Die beiden Stellgrößen sin-

ken während dieser Zeit aufgrund des abnehmenden Regelfehlers, wobei die Farbduktordrehzahl überproportional stärker sinkt als die Zonenöffnung aufgrund der in Kapitel 5.3.3 beschriebenen Zeitabhängigkeit der virtuellen Stellgröße Y_{vir} .

Der erste Messwert, welcher totzeitbehaftet ist, liegt mit etwa 1,45 knapp unterhalb der zulässigen Toleranz. Dem Regler wurden dementsprechend während des Anfahrens sehr realistische Messwerte zugeführt. Sobald reale Messwerte vorliegen, werden diese verwendet. Damit ist der Regelkreis über die Sensorik geschlossen. Das Simulationsmodell berechnet weiterhin die optische Dichte, welche jedoch um die Stell- und Totzeit versetzt etwas schneller ist als die realen Messwerte. Die Regelgröße bewegt sich ab etwa 60 Sekunden innerhalb der zulässigen Toleranz.

Die Abläufe sind in den anderen Zonen vergleichbar, die realen Messwerte sowie die Simulationsergebnisse variieren in Abhängigkeit von der gewählten Farbergiebigkeit, von der Flächendeckung und vom Zonenoffset. Die qualitativen Vorgänge sind über alle Zonen gleich, eine besondere Berücksichtigung der Randzoneneffekte ist bisher nicht implementiert.

Die realisierbaren Einsparungen, welche aus mehreren Produktionsläufen gemittelt wurden, zeigt Abbildung 75.

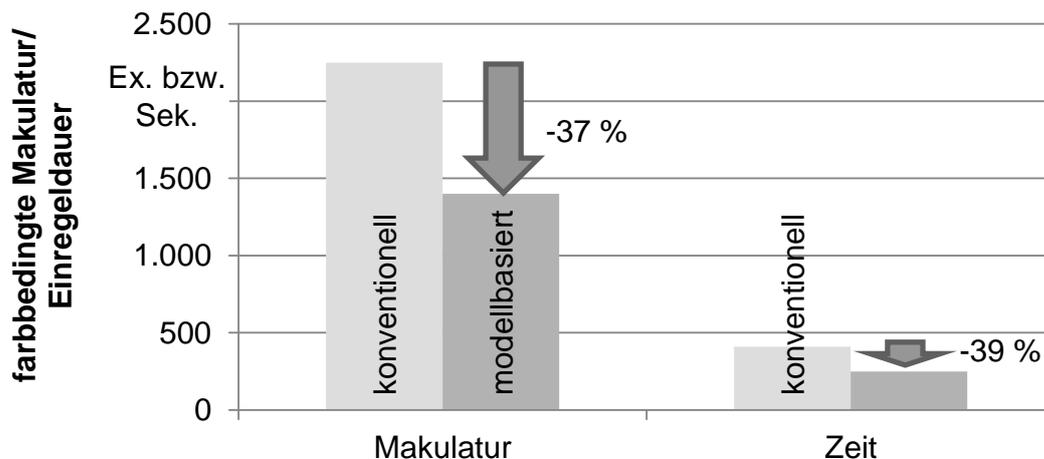


Abbildung 75: Potenziale der modellbasierten Farbdichteregulung im Anfahrprozess (eigene Ergebnisse)

Das Potenzial der modellbasierten Dichteregulung ist im Ausdruck relativ hoch, da bei der konventionellen Regelung zuerst das Farbwerk vorbefüllt werden muss. Die modellbasierte Dichteregulung ermöglicht eine Reduzierung von etwa 40 % der farbbedingten Makulatur. Die wirtschaftliche Bewertung der Einsparungen erfolgt in Kapitel 7.3.2.

6.3.2 Analyse des Einsatzfalls „Fortdruck“

Die Abfolge während des Andruckvorgangs findet in vergleichbarer Weise auch im Fortdruck statt, seitens der Regelung sind keine Anpassungen nötig. Die simulierte Farbmenge im Farbwerk muss dementsprechend gespeichert werden, ein Löschen erfolgt durch das Signal „Farbwerk waschen“. Lediglich die simulierte Dichte ist beim ersten Umdruck auf das Papier größer null, da sich bereits die Farbe von der vorherigen Produktion im Farbwerk befindet. Zusätzlich sind manuelle Eingriffe wie das Farbwerk- oder Gummituchwaschen im Simulationsmodell berücksichtigt.

Im Fortdruck befindet sich, aufgrund des stationären Produktionsbetriebs zonal die passende Farbmenge im Farbwerk, sodass der Druckvorgang bei gleicher optischer Dichte theoretisch direkt fortfahren könnte. Während des Verzögerens der Walzen wird der Umdruck auf das Papier unterbrochen, sodass keine Farbe aus dem Farbwerk ausgetragen wird. Da sich die Walzen weiterdrehen, gleichen sich die Schichtdicken der verschiedenen Walzen und Zonen an. Bei längerem Betrieb in diesem Zustand streben alle Schichtdicken auf allen sich berührenden Walzen einen gemeinsamen Ausgleichswert an. Dieser Vorgang ist schematisch in Abbildung 76 dargestellt. Die Nummerierung der Walzensegmente entspricht der Walzennummerierung in Abbildung 35. Die stationären Schichtdicken während der Produktion entsprechen den Säulenhöhen. Der stationäre Ausgleichswert der mittleren Walzensegmente von etwa $14\ \mu\text{m}$ ist grau hinterlegt. Die Segmente 1 und 2 kennzeichnen die Schichtdicken auf dem Farbduktor, welche nicht in Kontakt mit den restlichen Walzen sind. Die Schichtdicken auf dem Plattenzylinder und auf dem Gummizylinder (Walzensegmente 33 bis 38) werden abgereinigt, sodass diese gegen null streben.

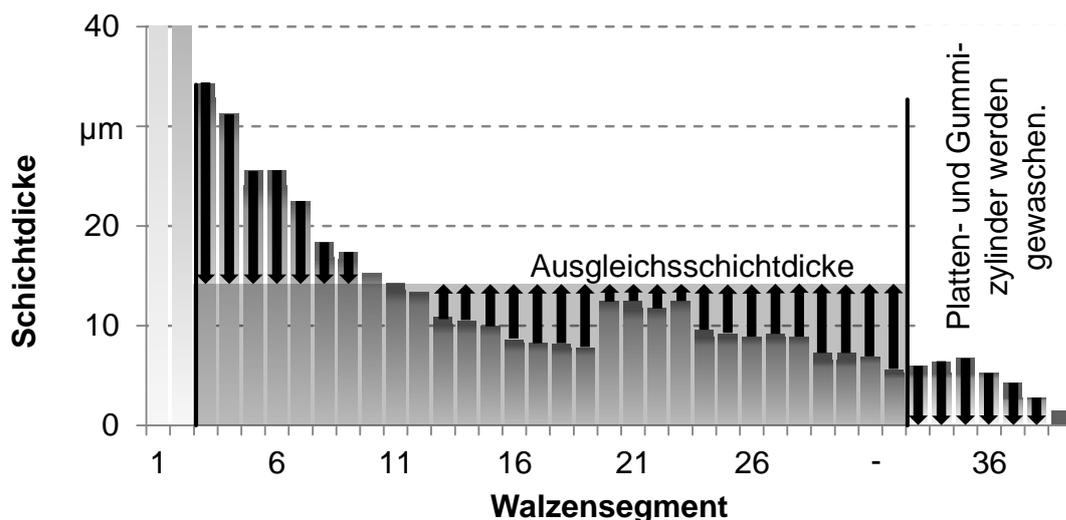


Abbildung 76: Angleichen der Schichtdicken bei drehendem Farbwerk aufgrund des fehlenden Farbflusses im Farbwerk (eigene Ergebnisse)

Durch die Vergleichmäßigung fällt die Farbschichtdicke auf den Walzen aus Richtung der Farbzufuhr und steigt ausgehend von den Auftragswalzen an. Beim nachfolgenden Andruck nimmt die optische Dichte anfangs kurz zu. Anschließend fällt die optische Dichte unter die Solldichte ab, da die Schichtdicken auf den ersten Walzensegmenten verringert sind. Durch die kontinuierliche Farbzufuhr baut sich das ursprüngliche Schichtdickenprofil wieder auf. Im Druckbetrieb stellt sich ein Dichteverlauf gemäß Abbildung 77 ein. Jede Linie entspricht einer Zone, wobei bei $t = 0$ Sekunden der Umdruck auf das Papier beginnt.

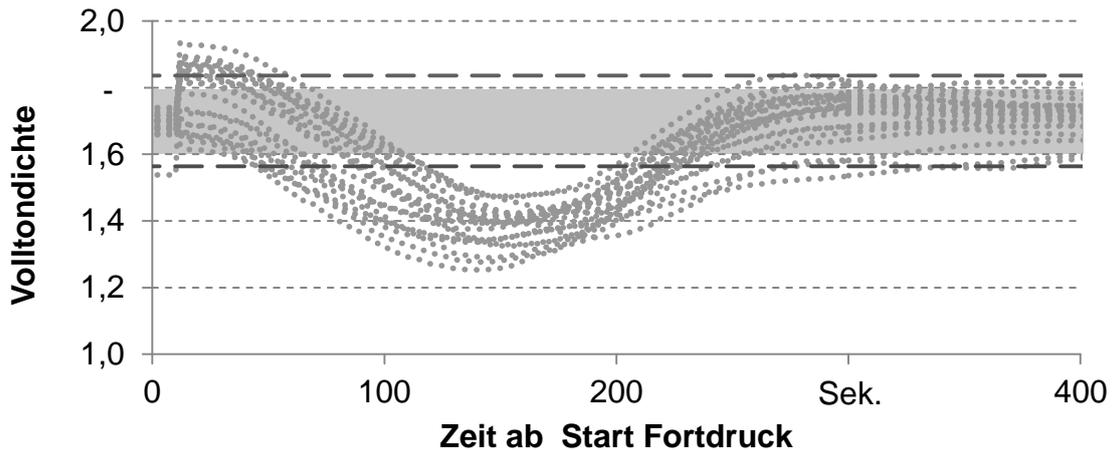


Abbildung 77: Darstellung des Dichteverlaufs im Fortdruckfall aufgrund der Vergleichmäßigung der Schichtdicken (eigene Ergebnisse)

Da die farbwerksinternen Prozesse im Simulationsmodell abgebildet werden, kann im Fortdruck die modellbasierte Regelung direkt übernommen werden. Beispielfhaft sind in Abbildung 78 die Dichteverläufe während eines Fortdruckfalls dargestellt, die konventionelle Farbdichteregelung ist gestrichelt gezeichnet.

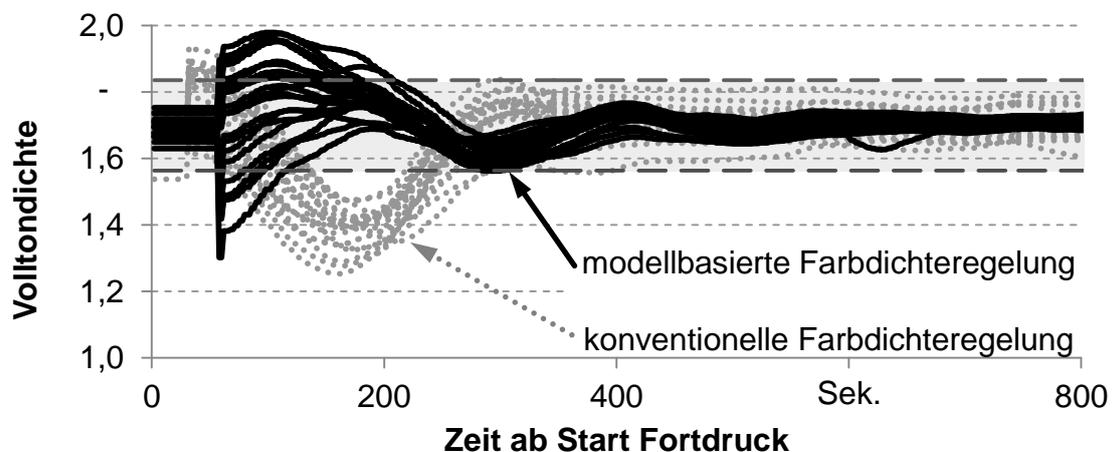


Abbildung 78: Vergleich der konventionellen und der modellbasierten Farbdichteregelung für den Fortdruckprozess (eigene Ergebnisse)

Validierung des Konzepts

Die modellbasierte Farbdichteregulierung erreicht nach einem Überschwinger nach etwa 190 Sekunden die Toleranz, während bei der konventionellen Farbdichteregulierung die Toleranz nach etwa 270 Sekunden in allen Zonen erreicht wird. Die absoluten Einsparungen sind geringer, da die bestehende Dichteregulierung relativ wenig Makulatur verursacht.

Die modellbasierte Voreinfärbesteuerung erweist sich damit sowohl im Andruck- als auch im Fortdruckfall als geeignet, um die Makulatur merklich zu reduzieren. Die Parameteradaption ermöglicht den Einsatz bei unterschiedlichen Produktionsbedingungen. Mit jeder Produktion vergrößert sich die verfügbare Datenbasis, was die Modellgenauigkeit bei zunehmender Betriebsdauer steigert. Die sich im Fortdruckfall ergebenden Einsparungen sind in Abbildung 79 dargestellt.

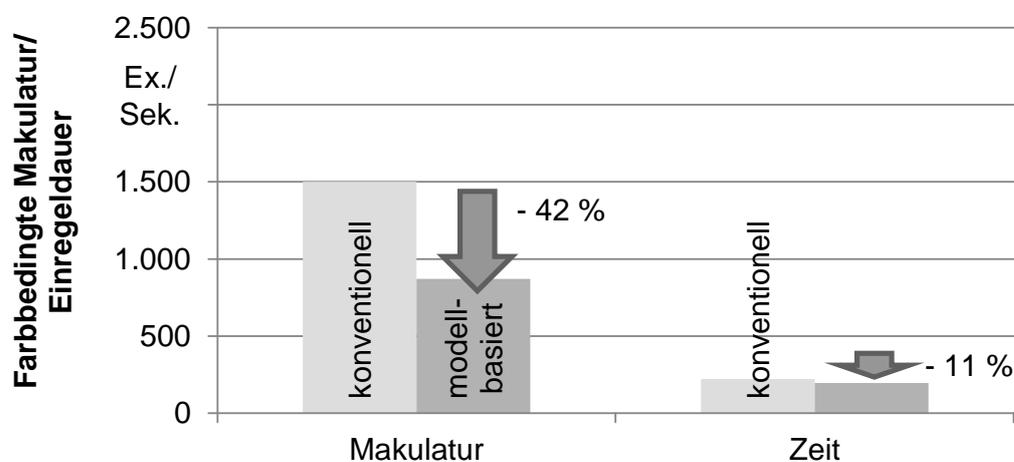


Abbildung 79: Potenziale der modellbasierten Dichteregulierung im Fortdruckfall

Es konnte eine durchschnittliche Makulaturreduzierung im Fortdruckfall von 630 Exemplaren sowie eine um 25 Sekunden verringerte Einregeldauer im praktischen Einsatz ermittelt werden. Dies entspricht einer Makulatureinsparung von etwa 42 % und einer reduzierten Einregelzeit um 11 % gegenüber der konventionellen Farbdichteregulierung. Da der Fortdruck deutlich öfter stattfindet, ergeben sich durch diese Verbesserungen sehr hohe Einsparpotenziale.

7 Technische und wirtschaftliche Bewertung

7.1 Rahmenbedingungen der Bewertung

Eine neue Technologie wie die vorgestellte Farbdichteregulung findet nur dann Einzug in die Unternehmen, wenn sie Vorteile hinsichtlich der Kriterien Qualität, Zeit, Kosten oder Flexibilität bietet (ZAH ET AL. 2010; HIELSCHER 2008). Die Auswirkungen der kognitiven Farbdichteregulung auf die Qualität der Druckexemplare sowie die Anfahrzeit sind in Kapitel 6.3 eingehend beschrieben. Ergänzend muss durch eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung dargelegt werden, wie die Aufwände durch erzielbare Mehrerlöse oder Einsparungen kompensiert werden können.

Die Gegenüberstellung des Aufwands zum erzielbaren Nutzen muss aus Sicht des Anwenders und aus Sicht des Anbieters der Technologie gleichermaßen erfolgen. Aus diesem Grund wird nachfolgend das technische und wirtschaftliche Potenzial der modellbasierten, kognitiven Farbdichteregulung ermittelt. Die Basis dafür bilden die Produktionsdaten einer mittelständischen Druckerei, in der das kognitive Regelungssystem an einer Rollenoffsetdruckmaschine eingesetzt wurde. Für die Hochrechnung dienen alle Druckaufträge der betreffenden Maschine von September 2012 bis August 2013. Bei dem betrachteten Maschinentyp handelt es sich um eine mittelgroße Rollenoffsetdruckmaschine, welche bei maximaler Papierbahnbreite 20 DIN-A4-Seiten je Zylinderumrollung beidseitig bedrucken kann, dementsprechend insgesamt 40 Seiten. Die Druckbreite beträgt maximal 1,56 m, der Plattenzylinderumfang beträgt 0,98 m.

Die modellbasierte, kognitive Farbdichteregulung kam nur bei einigen Produktionsläufen zum Einsatz, da dieses System noch nicht für den autonomen Betrieb freigegeben ist. Zur fundierten technischen Beurteilung erfolgt eine Hochrechnung anhand der durchgeführten Validierungsläufe. Die Auslastung und das hergestellte Produktspektrum stellen einen branchenüblichen Durchschnitt dar, um eine realistische Entscheidungsgrundlage zu ermitteln.

Darüber hinaus sind leistungsfähigere Maschinen mit 48 DIN A4-Seiten je Zylinderumrollung verfügbar. Bewusst wurde für die Bewertung die kleinere Maschinenbauart gewählt, da diese weiter verbreitet ist und somit eine repräsentative Bewertung ermöglicht. Bei der größeren Maschine können höhere Einsparungen realisiert werden, was anhand der höheren Maschinenkosten und der höheren Papiermengen begründet werden kann. Die verwendeten Papiertypen und Papierbahnbreiten sowie die Losgrößen entsprechen realen Produktionsdaten.

7.2 Technische Bewertung der kognitiven Farbdichteregulung

Die kognitive Farbdichteregulung kann die Anfahrmakulatur deutlich reduzieren. Der überwiegende Anteil der Einsparungen ergibt sich durch den verringerten Verbrauch an Papier. Zusätzlich steht die Druckmaschine aufgrund der verkürzten Einregeldauer länger für den produktiven Einsatz zur Verfügung, sodass weitere Aufträge angenommen werden können. Als Bewertungsgröße der Druckqualität dient einzig die optische Dichte gemäß der Ausführungen in Kapitel 1.3.

Sobald die optische Dichte das Toleranzfenster bleibend erreicht hat, wird von einer ausreichenden Druckqualität ausgegangen. Als Basis dienen die in Kapitel 6.2 genannten Rahmenbedingungen. Die dabei exemplarisch gezeigten Dichteverläufe stellen einen Ausschnitt der durchgeführten Produktionsdrucke mit der kognitiven Dichteregulung dar. Die Auswertung erfolgt auf der Basis von etwa 800 Andrucken sowie etwa 3.200 Fortdrucken jährlich.

Die mittlere Anfahrmakulatur je Andruck mit konventioneller Regulung beträgt etwa 3.800 Exemplare. Ursächlich für die Makulatur sind die verschiedenen Qualitätskriterien, wobei die optische Dichte einen dominanten Einfluss besitzt. Die dichtebedingte Makulatur beträgt etwa 2.250 Exemplare. Im Mittel konnte mit der kognitiven Farbdichteregulung bei jedem Andruck aus dem gewaschenen Farbwerk eine Verringerung der dichtebedingten Makulatur auf 1.400 Exemplare sowie eine Verkürzung der Einregelzeit von 410 Sekunden auf 250 Sekunden nachgewiesen werden. Insgesamt ergeben sich damit jährliche Einsparungen von etwa 55 t Papier sowie 35 Betriebsstunden, die nicht mehr für den Anfahrprozess notwendig sind.

Der Fortdruck findet deutlich öfter statt, da viele Druckaufträge mehrere Plattenwechsel beinhalten, bei denen die Farbwerke nicht gewaschen werden müssen. Die Makulatur kann von durchschnittlich 1.500 auf 870 Exemplaren und somit um 42 % reduziert werden, gleichzeitig ist die notwendige Einregelzeit um 25 Sekunden geringer. Die absoluten Einsparungen im Fortdruck sind niedriger, da das Farbwerk bereits vorbefüllt ist und die konventionelle Dichteregulung schneller die Toleranz erreicht als im Andruckfall. Es ergeben sich jährliche Einsparungen von etwa 133 t Papier sowie 22 Betriebsstunden im Fortdruck.

Die Gesamteinsparungen unter Produktionsbedingungen liegen jährlich bei etwa 188 t Papier sowie 57 Betriebsstunden Produktionszeit für die beschriebene Rollenoffsetdruckmaschine. Darin enthalten sind auch unterschiedliche Papierqualitäten und Bahnbreiten, die sich aus der praxisüblichen Fahrweise ergeben.

7.3 Wirtschaftliche Bewertung

7.3.1 Vorgehensweise zur wirtschaftlichen Bewertung

Basierend auf den realisierbaren Einsparungen wird die Wirtschaftlichkeit der modellbasierten Farbdichteregulation bewertet. Hierfür sind verschiedene statische und dynamische Verfahren bekannt, welche sowohl unter vollständig bekannten Rahmenbedingungen als auch bei Unsicherheiten eine fundierte Bewertung erlauben (LAU 2010; NIEMANN 2007, S. 45; WARNECKE 2003). Dynamische Verfahren berücksichtigen insbesondere den zeitlichen Verlauf der Aufwendungen und des Nutzens auf Basis einer prognostizierten Zins- und Wertentwicklung. Für eine hohe Aussagekraft ist es notwendig, belastbare Annahmen bezüglich der Wertentwicklung zu treffen, die insbesondere bei risikobehafteten Investitionsentscheidungen in einem dynamischen Marktumfeld selten vorhanden sind. Im industriellen Umfeld ist die statische Amortisationsrechnung gebräuchlicher, weil diese einfach durchführbar und sehr gut interpretierbar ist (STRASSER 2012, S. 175).

Da die Aufwendungen und die möglichen Erlöse für die vorliegende Wirtschaftlichkeitsbewertung nur unsicher geschätzt werden können, liegt ihr die statische Amortisationsrechnung zugrunde.

Hierfür sind die erzielbaren Einsparungen den notwendigen Aufwänden gegenüberzustellen. Zu beachten ist, dass der Systemanbieter, meist der Maschinenhersteller, die Aufwände zu tragen hat, den Nutzen erzielen die Anwender. Als Bindeglied dient der Verkaufserlös beziehungsweise der Marktpreis des Regelungssystems. In der Druckindustrie ist es insbesondere bei größeren Anlagen möglich, die komplette Steuerungstechnik zu modernisieren oder auch einzelne Regelungssysteme nachzurüsten. In einer Grenzkostenbetrachtung wird die statische Amortisationszeit für den Anwender berechnet und zusätzlich die Anzahl der notwendigen Installationen, um die Entwicklungskosten seitens des Anbieters decken zu können.

7.3.2 Wirtschaftliches Potenzial aus Sicht der Druckerei

Die kognitive Farbdichteregulation wird von Druckereien nur dann nachgefragt, wenn die Systemkosten durch die laufenden Einsparungen refinanziert werden können. Die Investitionssumme entspricht einem angenommenen Marktpreis von 50.000 € beziehungsweise 65.000 € im Fall einer Nachrüstung wie in Kapitel 7.3.3 ausgeführt. Der Investitionssumme stehen Einsparungen gegenüber, die aus einem geringeren Materialverbrauch sowie einer kürzeren Anfahrdauer resultieren.

Technische und wirtschaftliche Bewertung

Die jährlichen Gesamteinsparungen E_{ges} setzen sich zusammen aus den Einsparungen $E_{Andruck}$ im Andruckfall und den Einsparungen im Fortdruckfall $E_{Fortdruck}$ gemäß Gleichung 7-1.

$$E_{ges} = E_{Andruck} + E_{Fortdruck} \quad 7-1$$

In beiden Fällen, im Andruck und im Fortdruck, können Einsparungen erfolgen, welche auf der verringerten Makulatur sowie auf einer reduzierten Einregeldauer basieren.

Die makulaturbezogene Einsparung berechnet sich jeweils aus den Einsparungen an Makulatur n_{Ex} für den Andruck- und Fortdruckfall, in Verbindung mit den jeweiligen Kosten je Makulaturexemplar K_{Ex} und der Anzahl an Andruck- respektive Fortdruckereignissen $n_{Andruck}$ und $n_{Fortdruck}$.

Zudem ermöglicht die reduzierte Anfahrzeit eine Verringerung der Maschinenlaufzeit. Deren Bewertung erfolgt anhand der tatsächlichen Kosten. Vorteilhaft ist es selbstverständlich, wenn die Zeit produktiv verwertet werden kann. Voraussetzung dafür ist jedoch eine ausreichende Anzahl von Aufträgen, welche nicht immer vorhanden sind. Aus diesem Grund erfolgt nur die Bewertung der zeitbezogenen Einsparungen gemäß Gleichung 7-3 in Analogie zu Gleichung 7-2, wobei K_{Zeit} die zeitbezogenen Einsparungen und t_{red} die reduzierte Dauer berücksichtigt.

$$E_{Andruck} = n_{Andrucke} * (n_{Ex\ Andruck} * K_{Ex} + t_{red\ Andruck} * K_{Zeit}) \quad 7-2$$

$$E_{Fortdruck} = n_{Fortdrucke} * (n_{Ex\ Fortdruck} * K_{Ex} + t_{red\ Fortdruck} * K_{Zeit}) \quad 7-3$$

Die Kosten je Makulaturexemplar sowie die zeitbezogenen Kosten setzen sich aus verschiedenen Einzelpositionen zusammen, die den Gleichungen 7-4 und 7-5 zugrunde liegt. In Tabelle 8 sind alle relevanten Faktoren erläutert und quantifiziert.

$$K_{Ex} = (K_{Pap} - E_{Rec}) * G_{Pap} + K_{Farb} * V_{Farb} \quad 7-4$$

$$K_{Zeit} = \frac{AfA + K_{Umlage} + K_{Personal} + K_{Wartung} + K_{HB} + K_{Raum}}{BS} + K_{En} \quad 7-5$$

Die Berechnung der Einsparungen basieren auf den realen Daten einer Druckerei. Um einen Rückschluss auf deren Kostenstrukturen zu verhindern, sind die Daten um $\pm 20\%$ modifiziert, wobei die Aussagekraft insgesamt gewährleistet bleibt. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt zudem die Auswirkungen von veränderten Rahmenbedingungen.

Tabelle 8: Kalkulationsgrundlage zur Wirtschaftlichkeitsbewertung

Kalkulationsbasis für eine 40-Seiten-Rollenoffsetdruckmaschine					
max. Druckgeschwindigkeit [1/h]	n_{\max}	65.000	AfA, Wagnisse, Zins [€/a]	AfA	1.100.000
max. Druckbreite [m]	b	1,56	Gemeinkosten [€/a]	K_{Umlage}	900.000
mittlere Papierbahnbreite [m]	\bar{b}	1,35	Personalkosten [€/a]	K_{Personal}	750.000
Betriebsstunden [h/a]	BS	6.300	Instandhaltung/Wartung [€/a]	K_{Wartung}	200.000
Volllaststunden [h/a]	BS_{nenn}	5.000	Hilfs- und Betriebsstoffe [€/a]	K_{HB}	180.000
Anzahl Andrucke [a^{-1}]	n_{Andrucke}	800	Raumkosten [€/a]	K_{Raum}	40.000
Anzahl Fortdrucke [a^{-1}]	$n_{\text{Fortdrucke}}$	3.200	mittlere Papierkosten [€/t]	K_{Pap}	680
mittlere Grammaturn [g/m ²]	G_{pap}	55	mittlere Farbkosten [€/t]	K_{Farb}	2.500
Mittlerer Farbverbrauch [g/Exemplar]	V_{Farb}	1	Erlös Recyclingpapier weiß [€/t]	E_{Rec_w}	100
			Erlös Recyclingpapier bedruckt [€/t]	E_{Rec_f}	50

Auf Basis dieser Kalkulationsdaten lassen sich die Makulaturkosten der konventionellen Farbdichteregulierung sowie des vorgestellten modellbasierten Regelungsansatzes ermitteln. Anhand der technischen Bewertung in Kapitel 7.2 können jährlich etwa 188 t Papier sowie 57 Betriebsstunden bei der 40-Seiten-Rollenoffsetdruckmaschine eingespart werden.

Die finanzielle Bewertung der verschiedenen Kostenpositionen ist in Abbildung 80 zusammengefasst, wobei zwischen den beiden Fällen „Andruck“ und „Fortdruck“ unterschieden wird.

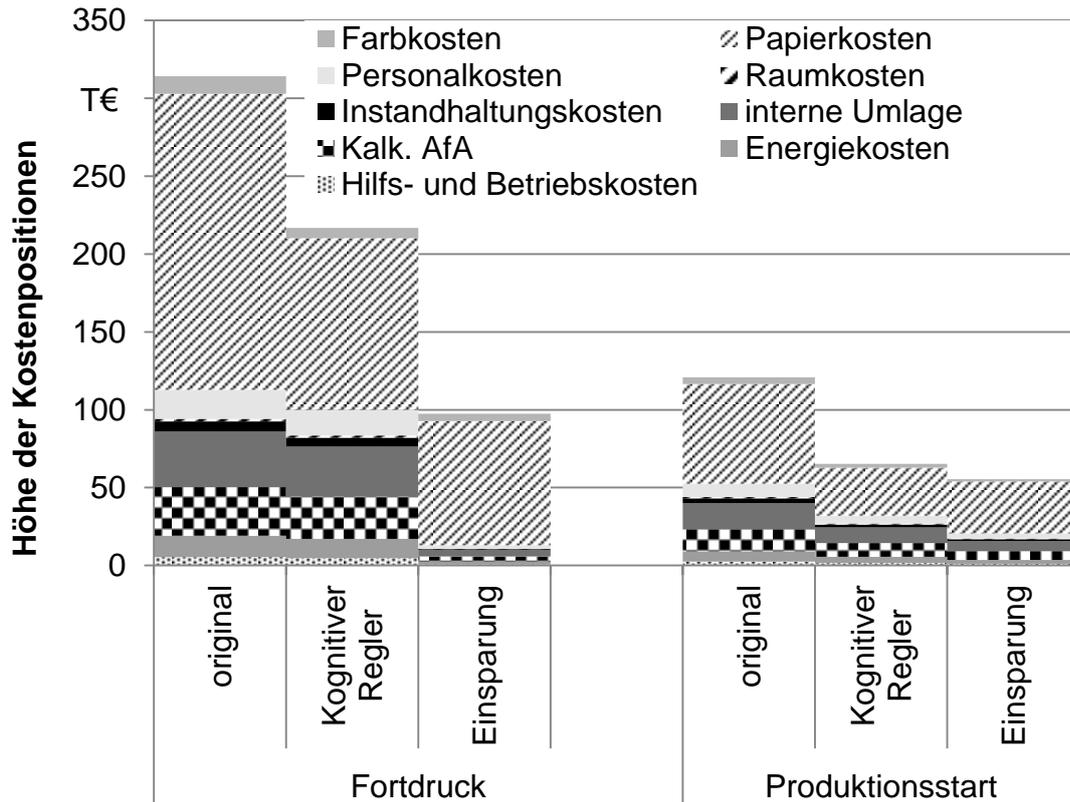


Abbildung 80: Zusammensetzung der Einsparungen durch die modellbasierte Regelung während des Andrucks und des Fortdrucks

Der Maschinenstundensatz beträgt etwa 670 €, die Papier- und Farbkosten etwa 400 € je 10.000 Zylinderumdrehungen, wobei die Papierkosten und damit die Papiergrammatur den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit besitzen. Die realisierbaren Einsparungen entsprechen beim Andruck etwa 55.000 € pro Jahr, beim Fortdruck etwa 97.000 € pro Jahr. Mit etwa 75 % dominieren die Papierkosten die gesamten Einsparungen. Die unterschiedliche Aufteilung der einzelnen Kostenpositionen zwischen Andruck und Fortdruck liegt in den unterschiedlichen Drehzahlprofilen begründet. Im Andruckprozess wird in der Regel mit geringerer Geschwindigkeit gestartet, bis alle Qualitätskriterien eingeregelt sind. Im Fortdruck wird mit höherer Geschwindigkeit gestartet, die farbbedingte Makulatur ist aus diesem Grund relativ hoch trotz deutlich geringerer Hochlaufdauer.

Die farbbedingte Makulatur kann im Durchschnitt um etwa 40 % verringert werden, was etwa 152.000 € an jährlichen Einsparungen entspricht. Die exakten Einsparungen hängen in hohem Maß von verschiedenen Faktoren ab, was die in Abbildung 81 dargestellte Sensitivitätsanalyse belegt.

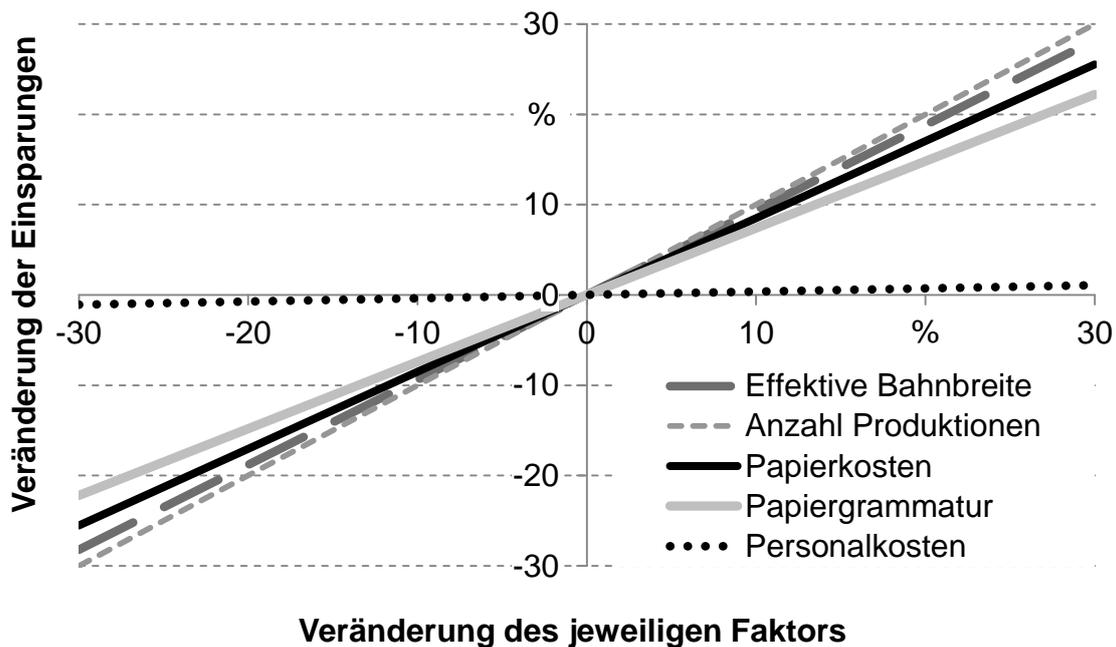


Abbildung 81: Abhängigkeit der möglichen Einsparungen von verschiedenen Kostenpositionen in der Wirtschaftlichkeitsberechnung (eigene Darstellung)

Die erzielbaren Einsparungen hängen in hohem Maß von der effektiven Bahnbreite ab, da mit zunehmender Breite der Papierverbrauch ansteigt. Die effektive Bahnbreite beschreibt die Breite der bedruckten Papierbahn und kann maximal die Druckbreite der Maschine annehmen. Einen etwas größeren Einfluss besitzt die jährliche Anzahl der Produktionsläufe, da die Einsparungen der modellbasierten Regelung mit jedem Andruck oder Fortdruck steigen. Die Dominanz der Papierkosten in Hinblick auf die Kosteneinsparungen zeigt sich ferner bei der Variation der Papiergrammatur oder bei den Papierkosten. Unterschiedliche Personalkosten wirken sich im Gegensatz zu den Papierkosten nur minimal aus.

Den Einsparungen stehen die angenommene Investitionssumme von 50.000 € für eine Neuinstallation und die Aufwände für die Schulung der Mitarbeiter gegenüber. Bei Gesamtkosten von etwa 60.000 € je Installation beträgt die statische Amortisationszeit 5,5 Monate und stellt damit eine hochwirtschaftliche Investition aus Sicht der Druckerei dar.

7.3.3 Wirtschaftliche Bewertung aus Sicht des Systemanbieters

Die kognitive Farbdichteregelung wurde im Rahmen der Forschungsarbeit an einer Rollenoffsetdruckmaschine realisiert und kann grundsätzlich auf weitere Maschinen übertragen werden. Der Aufbau sowie die eingesetzten Werkzeuge entsprechen den unternehmensspezifischen Anforderungen und lassen eine direkte Übernahme des realisierten Regelungssystems zu.

Für einen reibungslosen Betrieb der Farbdichteregelung sind initial weitere technische Optimierungsmaßnahmen in Anlehnung an Tabelle 9 durchzuführen, um ein marktfähiges Produkt anbieten zu können. Die vom Verfasser geschätzten Aufwände sind ebenfalls aufgeführt.

Tabelle 9: Abschätzung der initialen Aufwände

Initiale Aufwände	
Optimierung des Systems	€
Allgemeine Optimierung, Erweiterbarkeit für andere Maschinenkonfiguration	30.000
Erhöhung der Systemrobustheit (Sensorausfälle, etc.)	50.000
Erweiterung der Software für einen plattformunabhängigen Betrieb	20.000
Optimierung der Initialisierung sowie Absicherung der rechtlichen Vorgaben (Maschinenrichtlinie, etc.)	20.000
Integration in die bestehende Maschinensteuerung	
Einbindung der Farbregelung in die Maschinensteuerung, inklusive Benutzerschnittstelle	50.000
Einbinden in die übergeordnete Softwareinfrastruktur, inklusive Fernwartung	30.000
Dokumentation/Marketing	
Erstellen der Dokumentation	50.000
Erstellen der Schulungsunterlagen	30.000
Marketing/Vertrieb	30.000
Gesamtaufwand	310.000

Da das vorgestellte kognitive Regelungssystem bereits prototypisch für eine Rollenoffsetdruckmaschine realisiert wurde, ist die Funktionalität bereits nachgewiesen. Für den Einsatz in einer Druckerei sollte berücksichtigt werden, dass die Bedienung des Systems durch die Bediener erfolgt, welche nicht tiefgehend mit der Regelungstechnik vertraut sind. Da sie während des Anfahrens verschiedene andere Tätigkeiten an der Druckmaschine ausführen, muss das Regelungssystem autonom und zuverlässig funktionieren, insbesondere bei unterschiedlichen Betriebszuständen.

Die dahingehende Optimierung repräsentiert etwa 40 % der weiteren Entwicklungsaufwände. Die restlichen Kosten resultieren aus der Einbindung in die bestehende Maschinensteuerung. Neben der technischen Realisierung und Optimierung entstehen weitere Aufwände für die Dokumentationen, für interne und externe Schulungen sowie die Akquisition neuer Aufträge. Insgesamt ergeben sich geschätzte initiale Realisierungsaufwände von insgesamt 310.000 €.

Neben den initialen Aufwänden sind zusätzlich die kontinuierlichen Aufwände zu berücksichtigen, welche bei jeder Installation anfallen. Die Aufwände gemäß Tabelle 10 sind aufgeteilt für den Fall einer Neuinstallation sowie einer Nachrüstung. Eine Nachrüstung wird mit Gesamtkosten von etwa 35.000 € veranschlagt, bei einer Neumaschine liegen die geschätzten Kosten in einer Höhe von etwa 20.000 € wesentlich niedriger. Die Differenz liegt darin begründet, dass bei einer Nachrüstung viele Arbeiten direkt in der Druckerei vor Ort durchzuführen sind und, je nach Baujahr der Maschine, eventuell weitere Systemvoraussetzungen geschaffen werden müssen. Bei einer Neuinstallation ist ein einheitlicher Softwarestand gegeben und alle notwendigen Zusatzarbeiten, beispielsweise für die Sensorik, können bei der Montage oder bei der Erstinbetriebnahme durchgeführt werden.

Tabelle 10: Abschätzung der installationsspezifischen Aufwände

Abschätzung der spezifischen Aufwände je Installation	
Aufwände für die Hardware	€
Controller für die modellbasierte Regelung	4.000
Industrie-PC für die Kenngrößenbildung und Adaption	4.000
Erweiterung des vorhandenen Messdatenerfassungssystems	1.000
Einbau und Verkabelung bei einer Neuinstallation	3.000
Einbau und Verkabelung bei einer Nachrüstung	15.000
Aufwände für die Sensorik	
Sensorik zur Charakterisierung des Papiers	3.000
Sensorik für weitere Größen (Temperaturen, Luftfeuchte, etc.)	1.000
Montage/Inbetriebnahme	
Montage der Controller und der Sensoren	2.000
Inbetriebnahme des Systems bei einer Neuinstallation	2.000
Inbetriebnahme des Systems bei einer Nachrüstung	5.000
€ 20.000 bei einer Neuinstallation, € 35.000 bei einer Nachrüstung	

Als Verkaufspreis der Farbdichteregelung werden 50.000 € bei einer Neumaschine angesetzt, bei einer Nachrüstung im Rahmen eines Retrofits entsprechend etwa 65.000 €. Eine Unterscheidung zwischen diversen Maschinengrößen ist nicht notwendig, da die Kosten annähernd unabhängig von der Maschinengröße sind. Notwendig ist jedoch, dass eine automatische Messung der optischen Dichte sowie der Datenaustausch mit den verschiedenen Aggregaten erfolgt, was bei Maschinen ab Baujahr 2005 vorausgesetzt werden kann.

In Abbildung 82 sind die Kosten und Erlöse der Anzahl der Installationen gegenübergestellt. Aus Sicht des Systemanbieters ist unter diesen Annahmen die kognitive Dichteregelung ab etwa zehn Installationen wirtschaftlich realisierbar.

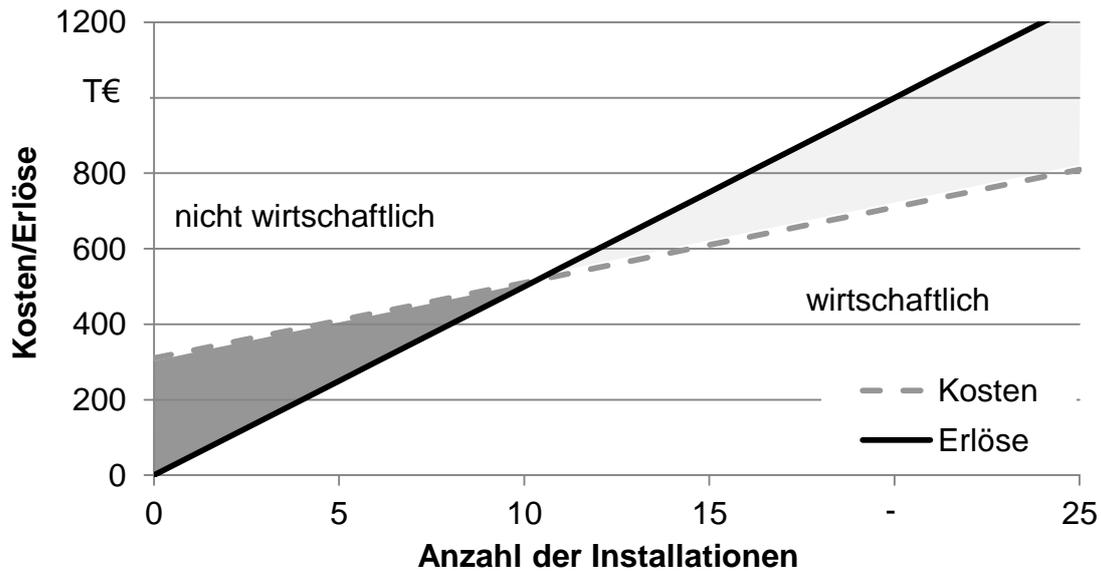


Abbildung 82: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den Systemanbieter

Um innerhalb von zwei Jahren die Entwicklungskosten wie vorgestellt zu refinanzieren, muss die kognitive Dichteregulung bei jeder zweiten Neumaschine oder entsprechend bei den Nachrüstungen eingesetzt werden, was aufgrund der geringen Amortisationszeit unter sechs Monaten für die Druckerei als realistisch angesehen wird.

Die Hochrechnungen basieren auf einem Verkaufspreis der Dichteregulung von 50.000 € je Neumaschine. Durch dessen Variation lassen sich die Amortisationszeiträume zwischen beiden Partnern, Systemanbieter und Druckerei, beliebig verändern, wie aus Abbildung 83 hervorgeht.

Dargestellt sind drei Linien, die sich im Hinblick auf die Initialkosten des Systemanbieters voneinander unterscheiden. Die Initialkosten entsprechen allen Entwicklungskosten seitens des Systemanbieters gemäß Tabelle 9. Neben den bisher kalkulierten 310.000 € Initialkosten ist eine Überschreitung um 50 % und um 100 % dargestellt. Eingezeichnet ist ein Verkaufspreis (VK) in Höhe von 50.000 €. Somit ergibt sich eine Amortisationszeit für den Systemanbieter von zwölf Monaten und für die Druckerei von fünf Monaten. Steigen die Entwicklungskosten um 100 % auf 620.000 €, so verdoppelt sich die Amortisationszeit des Systemanbieters auf 24 Monate. Aus Sicht des Systemanbieters ist ein höherer Verkaufspreis ebenfalls möglich.

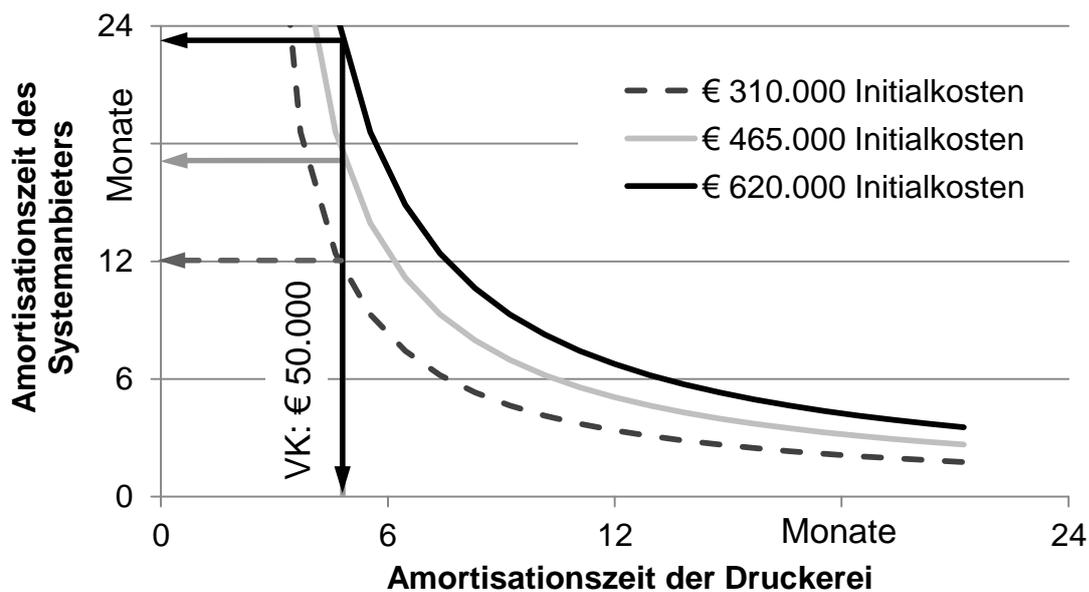


Abbildung 83: Veränderung der Amortisationszeiten bei variierenden Entwicklungsaufwänden und Kaufpreisen (VK = Verkaufspreis)

Bei einem höheren Systempreis steigt die Amortisationszeit für die Druckerei, im Gegenzug sinkt die Anzahl der notwendigen Installationen zur Refinanzierung der Entwicklungskosten für den Systemanbieter. Dabei wird davon ausgegangen, dass die kognitive Farbdichteregulierung bei zehn Maschinen jährlich installiert wird. Die restlichen Werte entsprechen den bisherigen Daten.

7.4 Zusammenfassung der technischen und wirtschaftlichen Bewertung

Die kognitive Farbdichteregulierung ermöglicht durch die gezielte dynamische Steuerung der Farbzufuhr die Erhöhung der Ressourceneffizienz, die wesentliche Senkung der Makulatur und die Steigerung der Produktivität insbesondere bei schwankenden Produktionsbedingungen. Die notwendigen Entwicklungsleistungen können unter den gegebenen Voraussetzungen innerhalb von einem Jahr refinanziert werden. Damit sind die Voraussetzungen für die wirtschaftliche Realisierung sowohl seitens des Anbieters als auch des Anwenders gegeben.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse

Ausgehend von einer Kostenanalyse in unterschiedlichen Produktionsbereichen und im Speziellen in der Druckindustrie wurde die Notwendigkeit verdeutlicht, die vorhandenen Rohstoffe effizient zu nutzen. In der Druckindustrie verursachen die Rohstoffkosten bei einer Maschine über 80 % der gesamten Lebenszykluskosten. Die Prozessanalyse des Offsetdrucks zeigt, dass insbesondere die optische Volltondichte das prägendste Einzelkriterium des Überbegriffs „Druckqualität“ darstellt. Gleichzeitig ist eine ungenügende optische Volltondichte maßgeblich für die An-druckmakulatur verantwortlich, welche die Ressourceneffizienz und die Wirtschaftlichkeit merklich vermindert. Bei Druckbeginn kann die optische Volltondichte nicht prozesssicher gemessen werden, weshalb eine reguläre Volltondichteregelung nicht möglich ist. Zudem beeinflussen diverse Faktoren den Druckprozess, deren Relevanz und Auswirkungen auf den Druckprozess nicht unbekannt sind. Donaudampfschiffahrtskapitän

Die Steuerung offener Prozessketten ist bei vielen technischen Verfahren und Anlagen anzutreffen, in denen eine direkte Messung der Produktqualität nicht inline im Produktionsprozess erfolgen kann. Daher wird die Qualitätsregelung erheblich erschwert, was zu einer Nacharbeit oder zum Ausschuss führt. Um beides zu vermeiden wurde ein Regelungskonzept vorgestellt, welches ohne eine direkte Messung der Regelgröße ein gutes Prozessverhalten ermöglicht. Das Regelungssystem ist gegenüber Einflussgrößen robust konzipiert, da diese explizit berücksichtigt werden. Kernelement des Regelungskonzepts ist es, die Regelgröße - im Offsetdruck die optische Volltondichte - mithilfe eines Simulationsmodells prozessparallel zu berechnen. Die systemtheoretische Analyse der Farbzufuhr, des Farbtransports sowie des Umdrucks auf das Papier erlaubt die Modellierung der relevanten Vorgänge im Farbwerk und die Berechnung der Farbverteilung. Nichtlinearitäten und Unstetigkeiten wie beispielsweise der erste Farbübertrag am Farbduktor oder auch manuelle Eingriffe werden automatisch erfasst und im Simulationsmodell berücksichtigt. Es berechnet totzeitfrei die Regelgröße, welche dem Regler als Ersatz realer Messwerte übergeben wird. Im Regler erfolgt die Umrechnung und Optimierung der realen Stellgrößen. Dieses Vorgehen erfordert eine möglichst exakte Kenntnis der Modellparameter, um eine gutes Regelungsverhalten sicherzustellen.

Da nicht alle Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und den Modellparametern analytisch berechenbar sind, wurden diese Parameter mithilfe maschineller Lernverfahren geschätzt. Für die technische Umsetzung wurde eine Metho-

de zur Bewertung der verschiedenen Einflussgrößen auf der Basis künstlicher neuronaler Netze vorgestellt.

Die Grundlage dieses kognitiven Systems bilden Kenngrößendatensätze der vergangenen Produktionen, in denen die Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen und den optimalen Modellparametern implizit enthalten sind. Die Modellparameter werden mithilfe eines MLP-Netzes geschätzt. Während des Trainings werden unterschiedliche Netztopologien miteinander verglichen, um eine hohe Genauigkeit und Generalisierungsfähigkeit zu gewährleisten. Die Datenvorverarbeitung vor dem Training des neuronalen Netzes stellt sicher, dass die Datensätze das Farbwerksverhalten eindeutig wiedergeben.

Neben den verbrauchsstoffbedingten Einflussgrößen werden mithilfe einer statistischen Auswertung maschinenbedingte Einflussgrößen berücksichtigt. So kann eine hohe Simulationsgenauigkeit ohne aufwendige Messungen sichergestellt werden.

Die Umsetzung und die Integration an einer Rollenoffsetdruckmaschine belegen die Funktionalität des Regelungskonzepts sowie das Potenzial der kognitiven, modellbasierten Farbdichteregelung. Die realisierten Einsparungen betragen im Mittel über 40 %, bezogen auf die entsprechende Einrichtmakulatur bei konventionellen Farbdichteregelungen.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass sich die modellbasierte Farbdichteregelung durch die Makulaturreduzierung innerhalb von sechs Monaten für die Druckerei amortisiert. Die Weiterentwicklung und Optimierung des Systems ist bereits nach zehn Installationen refinanziert.

8.2 Weitere Einsatzfelder einer kognitiven, modellbasierten Regelung

Das kognitive, modellbasierte Regelungskonzept ist grundsätzlich unabhängig vom konkreten Maschinenaufbau oder Produktionsprozess. Selbst die einzelnen Bausteine wie das Simulationsmodell, der Regler oder die kognitive Parameteranpassung können mithilfe unterschiedlicher Methoden umgesetzt werden, je nach verfügbaren Kenntnissen, Technologien und Entwicklungskapazitäten. Insofern eignet sich das Konzept für eine Vielzahl an realen Prozessen in der Produktion.

Moderne Regelungsverfahren sowie deren Kombination mit maschinellen Lernverfahren ermöglichen es, komplexe Prozesse besser als bisher zu regeln, insbesondere dann, wenn die Regelgröße nicht stetig gemessen werden kann. Der Entwicklungsaufwand einer derart gestalteten Prozessregelung ist höher als bei konventionellen Prozessregelungen. Ein Einsatz kognitiv-adaptiver Regelsysteme ist bei der kosten- und ressourcenintensiven Massenproduktion sinnvoll, da der Ent-

wicklungsaufwand auf eine hohe Anzahl hergestellter Produkte umgelegt werden kann. Die modellbasierte Prozessregelung ist insbesondere bei der großtechnischen Herstellung und Weiterverarbeitung von Rohstoffen in der Metall-, Holz-, Papier- oder Chemieindustrie wirtschaftlich vorteilhaft und wird dort bereits teilweise in einer ähnlichen Form erfolgreich eingesetzt. Für den vorliegenden Fall wurde die Adaptionfähigkeit mit dem deterministischen Verhalten analytischer Modelle kombiniert.

Die Ergänzung um eine kognitive Parameteranpassung ist dann geboten, wenn Einflussfaktoren das Prozessverhalten in relevantem Umfang verändern, jedoch die Auswirkungen auf die Modellparameter unbekannt sind. Dies ist in aller Regel bei Naturprodukten oder bei Stoffmischungen der Fall. Bei hohen Qualitätsanforderungen und engen Prozessfenstern ist es ebenfalls notwendig, die Einflussfaktoren explizit zu berücksichtigen. Aufgrund des hohen Kostendrucks sowie der hohen Stückzahl sind insbesondere in der Fahrzeugindustrie weitere Anwendungsfelder vorhanden, beispielsweise der Umformprozess, der Lackierprozess oder die Herstellung von Gussteilen. Hierfür wurden entsprechende Konzepte ausgearbeitet, welche als Basis jeweils ein Echtzeitmodell beinhalten, das an unterschiedliche Rahmenbedingungen angepasst werden kann.

Mit der vorliegenden Arbeit konnte das enorme Potenzial intelligenter Prozessregelungen für den Offsetdruck aufgezeigt werden. Die Struktur sowie die vorgestellten Umsetzungsalternativen erlauben eine Übertragung auf unterschiedlichste Maschinenkonzepte und Produktionsprozesse.

9 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser-Verlag 2011.
ISBN: 978-3-446-42595-8.

ACKERMANN 1993

Ackermann, J.: Robuste Regelung. Analyse und Entwurf von linearen Regelungssystemen mit unsicheren physikalischen Parametern. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e. V. Berlin: Springer 1993.
ISBN: 3-540-57244-9.

ADAM 2012

Adam, M.: Statistische Versuchsplanung und Auswertung. Skript zur Vorlesung. Fachhochschule Düsseldorf (2012).
http://zies.hs-duesseldorf.de/Lehre/Lehrveranstaltungen/Versuchsplanung_und_Auswertung/Documents/1_Skript_aktuell.pdf – 20.11.2016

ADAMY 2007

Adamy, J.: Fuzzy Logik, Neuronale Netze und evolutionäre Algorithmen. 2. Aufl. Aachen: Shaker 2007. ISBN: 978-3-832-26556-4.

ADAMY 2009

Adamy, J.: Nichtlineare Regelungen. TU Darmstadt. Berlin/Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3-642-00793-4.

AHMAD 2013

Ahmad, H. A.: Dynamic Braking Control for Accurate Train Braking Distance Estimation under Different Operating Conditions.
Diss. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, USA (2013).

ALBERTOS & GARCÍA 2009

Albertos, P.; García, P.: Robust Control Design for Long Time-delay Systems. Journal of Process Control 19 (2009) 10, S. 1.640–1.648.

ALBUNNI 2010

Albunni, M.: Model Order Reduction of Moving Nonlinear Electromagnetic Devices. Diss. Technische Universität München (2010).

ALLGÖWER ET AL. 2004

Allgöwer, F.; Findeisen, R.; Nagy, Z.: Nonlinear Model Predictive Control: From Theory to Application. Chin. Inst. Chem. Engrs 34 (2004) 3, S. 299–315.

ALPAYDIN 2010

Alpaydin, E.: Introduction to Machine Learning. 2nd ed. Cambridge, Mass: MIT Press 2010. ISBN: 978-0-262-01243-0.

ALTTHALER ET AL. 2012

Schutzrecht Deutschland DE 2418 083 A1 (15.02.2012). manroland AG Pr.: 29.07.2011. Althaler, K.; Knauer, P.; Wasserbäch, S.: Einrichtung zur Regelung des Feuchtmittelauftrags und Farbauftrags in einer Druckmaschine.

AL-MUTAWA & MOON 1993

Al-Mutawa, S.; Moon, Y. B.: Process Drift Control in Lithographic Printing-issues and a Connectionist Expert System Approach. Computers in Industry; NL 21 (1993) 3, S. 295–306.

AMENT 2012

Ament, C.: Fuzzy Control. Skript zur Vorlesung Fuzzy-Control.

Technische Universität Ilmenau (2012).

https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/media/systemanalyse/Lehre/FNC/Skript-Fuzzy-Control_V27.pdf - 18.11.2016

AMEUR & ASSAS 2012

Ameur, T.; Assas, M.: Modified PSO Algorithm for Multi-objective Optimization of the Cutting Parameters. Production Engineering 6 (2012) 6, S. 569–576.

ANAND 2012

Anand, G.: Application of Artificial Neural Networks in Electrical Machines: An Overview. Engineering and Technology 66 (2012), S. 409–410.

ANDERSON 1997

Design Of Experiments. The Industrial Physicist (1997), S. 24–26.

ANDERSON 2005

Anderson, B. D.: Failures of Adaptive Control Theory and their Resolution. Communication in Information and Systems 5 (2005) 1, S. 1–20.

ÅSTRÖM & WITTENMARK 1995

Åström, K. J.; Wittenmark, B.: Adaptive control. 2. ed. Reading, Mass: Addison-Wesley 1995. ISBN: 978-0-201-55866-1.

BANSAL ET AL. 2013

Bansal, R.: Analysis and Feedback Control of the Scanning Laser Epitaxy Process applied to Nickel-base Superalloys.

Diss. George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia (2013).

BENYOUNIS & OLABI 2008

Benyounis, K. Y.; Olabi, A. G.: Optimization of different Welding Processes using Statistical and Numerical Approaches – A Reference Guide. *Advances in Engineering Software* 39 (2008) 6, S. 483–496.

BELZ 2004

Belz, H.: Effizient und sicher produzieren mit dem Prozess Standard Offsetdruck. Veröffentlichung des Bundesverbands Druck und Medien e.V. Wiesbaden. 2004.

BEUSCHEL 2000

Beuschel, M.: Neuronale Netze zur Diagnose und Tilgung von Drehmoment-schwingungen am Verbrennungsmotor. Diss. Technische Universität München, 2000.

BETZMEIER 2014

Betzmeier, D.: Exakt auf den Markt zugeschnittene Angebote. *Print und Produktion* 27 (2014) 3.

BEHRENDT 2014

Behrendt, S.: Prozessoptimierung aus Sicht eines Verarbeiters. In: VDI (Hrsg.): *Extrusionstechnik 2014 Rigid Packaging*. Köln (2014).

BEITZ & GROTE 2001

Beitz, W.; Grote, K.-H.: *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. 20. Aufl. Berlin: Springer 2001. ISBN: 3-54-0-67777-1.

BERGER 2013:

Berger, S.: Prioritisation of Influence Variables for a Flexible and Efficient Production. In: Zaeh, M. F. (Hrsg.): *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*. Munich: Springer 2013. ISBN: 978-3-319-02054-9.

BERTHOLDT 2012

Bertholdt, U.: Normgerechete Zügigkeit von Offsetdruckfarben mit emulgiertem Feuchtmittel. Forschungsbericht 50.033. Forschungsgesellschaft Druck München (2012).

BIALDIGA 2009

Bialdiga, K.: Druckindustrie vor Radikalkur. In *Financial Times Deutschland* 2009, 14.10.2009.

BIANCHI 2006

Bianchi, M. A.: Adaptive Modellbasierte Prädiktive Regelung einer Kleinwärmepumpenanlage. Diss. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (2006).

BIEWER 1997

Biewer, B.: *Fuzzy Methoden. Praxisrelevante Rechenmodelle und Fuzzy-programmiersprachen*. Berlin/New York: Springer 1997. ISBN: 3-540-61943-7.

BIRNESSER 2011

Birnesser, A. J.: Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen. Forschungsberichte des IFSW. Universität Stuttgart. München: Utz-Verlag 2011. ISBN: 978-3-8316-4133-8.

BLACK 2014

Black, W.; Haghi P.; Ariyur K.: Adaptive Systems: History, Techniques, Problems and Perspectives. Systems (2014), S. 601–660.

BONHAM 2000

Bonham, J.: Random Walk Simulation of the Reflectance and Transmittance of Paper. Appita Journal 53 (2000) 3, S. 200–205.

BOOG 2010

Boog, M.: Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslasterfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten.

Diss. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe (2010).

BORGES ET AL. 2011

Borges, R. V.; d'Avila Garcez, A.; Lamb, L. C.: Learning and Representing Temporal Knowledge in Recurrent Networks. IEEE Transactions on Neural Networks 22 (2011) 12, S. 2.409–2.421.

BOUABID 2008:

Bouabid, A.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zum mechanischdrucktechnischen Verhalten von Offsetdrucktüchern unter besonderer Berücksichtigung ihrer hyper- und schaumelastischen Eigenschaften. Diss. Technische Hochschule Darmstadt (2008).

BRAND 2002

Brand, C.: Neuronale Identifikation von Totzeiten.

Diss. Technische Universität München (2002).

BRAUN 2007

Braun, L. Dr.: Das RED-Verfahren zur Auswahl der wesentlichen Einflussgrößen. Partner Info Qualität 13 (2007) 37, S. 36–38.

BROSIUS 2008

Brosius, F.: SPSS 16. Das mitp-Standardwerk. 1. Aufl. Heidelberg: mitp 2008. ISBN: 978-3-8266-5910-2.

BVDM 2012

Bundesverband Druck und Medien e. V.: Jahresbericht 2011/2012. Berlin (2012).

B+M GMBH 2010

Schutzrecht Deutschland DE10 2010 021209 A1 (21.05.2010). B+M Surface

Systems GmbH: Lackaufbringungs-vorrichtung sowie Verfahren zum Betrieb einer Lackaufbringungs-vorrichtung.

CAI ET AL. 2010

Cai, L.-G.; Hong, T.; Chu, H.-y.; Zhang, J.-s.; Huang, G.-l.: Color to Ink Conversion in Color Quality Control. *Journal of Beijing University of Technology, China* 36 (2010), S. 8.

CAMACHO & BORDONS 2007

Camacho, E. F.; Bordons, C.: *Model Predictive Control*. 2. Aufl. London/New York: Springer 2007. ISBN: 978-1-85233-694-3.

CAMERON 2000

Cameron, M. T.: *Modellbildung, Simulation und Regelung der Banddicke und des Bandzuges in Kaltwalzwerken*. Diss. Technische Universität Darmstadt. Berlin (2000). ISBN: 3-89825-023-7.

CAO ET AL. 2012

Cao, C.; Ma, L.; Xu, Y.: *Adaptive Control Theory and Applications*. *Journal of Control Science and Engineering* (2012), S. 1–2.

CHIA-LIN & SEYMOUR 1997

Chia-Lin, C.; Seymour, J. C.: *Model-based Ink Key Presetting for Offset Presses*. *Proceeding Technical Association of the Graphic Arts*. Quebec (1997).

CHEN ET AL. 2009

Chen, B.; Liu, X.; Liu, K.; Lin, C.: *Direct Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Strict-Feedback Systems*. *Automatica* 45 (2009) 6, S. 1530–1535.

CHUMAKOV 2008

Chumakov, R.: *An Artificial Neural Network for Fault Detection in the Assembly of Thread-forming Screws*. *Journal of Intelligent Manufacturing* 19 (2008) 3.

CONG 2009

Cong, S.: *Frontiers in Adaptive Control*. Rijek, Croatia: InTech 2009. ISBN: 978-953-7619-43-5.

CUS & ZUPERL 2015

Cus, F.; Zuperl, U.: *Surface Roughness Control Simulation of Turning Processes*. *Journal of Mechanical Engineering* 61 (2015) 4.

DENKENA & HOLLMANN 2013

Denkena, B.; Hollmann, F.: *Process Machine Interactions. Prediction and Manipulation of Interactions between Manufacturing Processes and Machine Tool Structures*. Berlin, New York: Springer 2013. ISBN: 978-3-642-32448-2.

DANBY 2003

Danby, R.: SC Print Quality influenced by Fiber Length, Fabric Structures and Machine Drainage Characteristics. Tappi Journal 2002.

DECKER 1974

Decker, P.: Beitrag zur Analyse des Offsetprozesses.
Diss. Technische Universität München (1974).

DEL RE ET AL. 2010

Del Re, L.; Allwöwer, F.; Glielmo, G.; Guardiola, C.; Kolmanovski, I.: Automotive Model Predictive Control. Models, Methods and Applications. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-1-84996-070-0.

DEESKOW ET AL. 2008

Deeskow, P.; Steinmetz, U.; Hay, M.: Datamining und statistische Prozesskontrolle zur zustandsorientierten Instandhaltung. VGB Power Tech (2008) 10.

DIN 2813

DIN 2813: Beschichtungsstoffe - Bestimmung des Glanzwertes unter 20°, 60° und 85°. Berlin: Beuth-Verlag 2015.

DIN 16536

DIN 16536: Prüfung von Drucken und Druckfarben der Drucktechnik. Berlin: Beuth-Verlag 1997.

DIN 31051

DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung. Berlin: Beuth-Verlag 2012.

DIN EN ISO 8254-2

DIN 8254-2: Papier und Pappe - Bestimmung des Glanzes - Teil 2: Messung mit einem Parallelen Strahl bei 75°. Berlin: Beuth-Verlag 2003.

DING ET AL. 2012

Ding, B.; Cychowski, M. T.; Xi, Y.; Cai, W.; Huang, B.: Model Predictive Control. Journal of Control Science and Engineering 2012 (2012), S. 1–2.

DISCHINGER 2010

Dischinger, M.: ISO 12647 als Basis für eine globale Druckqualität.
Institut für Drucktechnik. TU Darmstadt. Darmstadt (2010).

DITTMAR & PFEIFFER 2004

Dittmar, R.; Pfeiffer, B.-M.: Modellbasierte prädiktive Regelung. Eine Einführung für Ingenieure. 1. Aufl. München: Oldenbourg 2004. ISBN: 3-486-27523-2.

DITTMAR & PFEIFFER 2006

Dittmar, R.; Pfeiffer, B.-M.: Modellbasierte prädiktive Regelung in der industriellen Praxis. Automatisierungstechnik 54 (2006) 12, S. 590–601.

DÖRNER 2008

Dörner, D.: Die Logik des Misslingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen. Rowohlt-Taschenbuch-Verlag 2008. ISBN: 349-9-61578-9.

DÖRSAM 2010

Dörsam, E.: Grundlagen und Theorie der Farbspaltung/Filmspaltung. In: Konstruktionsprinzipien im Druckmaschinenbau. Technische Universität Darmstadt (2010).

<[http://www.idd.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_idd/studium_und_lehre/vorlesun-](http://www.idd.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_idd/studium_und_lehre/vorlesungen_4/konstruktionsprinzipien_im_druckmaschinenbau/ws_2011_1/KiD_WS111_2_4Verfahrenssystematik_Filmspaltung_V3_S.pdf)

[gen_4/konstruktionsprinzipien_im_druckmaschinenbau/ws_2011_1/KiD_WS111_2_4Verfahrenssystematik_Filmspaltung_V3_S.pdf](http://www.idd.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_idd/studium_und_lehre/vorlesungen_4/konstruktionsprinzipien_im_druckmaschinenbau/ws_2011_1/KiD_WS111_2_4Verfahrenssystematik_Filmspaltung_V3_S.pdf)> – 27.11.2016.

DÖRSAM ET AL. 2010

Dörsam, E.; Fuchs, B.; Seisser, R.; Holderried, S.; Messer, M.; Weidenmüller, J.; Starke, R.; Mohn, K.-H.; Bremer, H.; Bäsel, W.; Stur, M.: Von den Anfängen bis zum Bologna Prozess. VDD Jahrbuch 2010. Verein deutscher Druckingenieure 2010.

DUCEY 2007

Ducey, M.: Paperwatch. Graphic arts monthly 5 (2007), S. 48.

EBERHARD 2006

Eberhard, M.: Optimisation of Filtration by Application of Data Mining Methods. Diss. Technische Hochschule Weihenstephan (2006).

EBBETS ET AL. 2005

Schutzrecht Deutschland DE10 2004 021599 (01.12.2005). Gretag-Macbeth AG; Heidelberger Druckmaschinen AG Pr.: 03.05.2004. Ebbets, P.; Kohlbrenner, A.; Geißler, W.: Verfahren zur Ermittlung von Farb- und/oder Dichtewerten und für das Verfahren ausgebildete Druckeinrichtungen.

EL KELETY 2006:

El Kelety, I.: Towards a Conceptual Framework for Strategic Cost Management. Diss. Technische Universität Chemnitz (2006).

ELTER & PFEIFER 2008

Schutzrecht Deutschland DE 10 2008 013 744 (12.03.2008), Heidelberger Druckmaschinen AG Pr. 09.10.2008. Elter, P.; Pfeifer, N.: Verbessertes Kennlinienlernen in Druckmaschinen.

EL-BOURI & SHAH 2006

El-Bouri, A.; Shah, P.: A Neural Network for Dispatching Rule Selection in a Job Shop. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 31 (2006) 3-4, S. 342–349.

ENKE 2007

Schutzrecht Deutschland DE 10 2005 049 896 (19.04.2007). MAN Roland Pr.:

Literaturverzeichnis

17.10.2005. Enke, G.: Verfahren zur Überwachung und Analyse des Druckprozesses einer Druckmaschine.

FALTER 1998

Falter, K.-A.: Klima, Papier und Druck. Forschungsbericht FOGRA-PR/DE 98/7. München (1998).

FEILER 2004

Feiler, M.: Adaptive Control in the Presence of Disturbances. Diss. Technische Universität München (2004).

<<http://tumb1.biblio.tu-muenchen.de/publ/diss/ei/2004/feiler.pdf>> - 10.10.2013

FETTER 2009

Fetter, J.: Verfahren zur Messung von Farbschichtdicken in Druckwerken mittels ferromagnetischer Resonanz.

Diss. Technische Universität Darmstadt (2009). ISBN: 978-3-86844-148-2.

FOLRIN ET AL. 2006

Folrin, M.; Murgas, J.; Sekay, I.: A new Adaptive PID Control Approach Based on Closed-Loop Response Recognition. (Hrsg.): Proceedings of the 7th WSEAS. Cavtat, Croatia (2006).

FÖLLINGER 1988

Föllinger, O.: Optimierung dynamischer Systeme. Eine Einführung für Ingenieure. 2. Aufl. München, Wien: Oldenbourg 1988. ISBN: 3-486-20703-2.

FÖLLINGER & WEBER 1971

Föllinger, O.; Weber, W.: Adaptive Regelsysteme I Allgemeine Struktur und Erkennungsmethoden. 1. Aufl. München: R. Oldenbourg; Oldenbourg 1971. ISBN: 3-486-38641-7.

FÖLLINGER & DÖRRSCHEIDT 2008

Föllinger, O.; Dörrscheidt, F.: Regelungstechnik. Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. Heidelberg: VDE-Verlag 2008. ISBN: 978-377-852970-6.

FUNKE 1994

Funke, M.: Untersuchung des hydrodynamischen Einflusses der Druckfarbe auf das Dosierverhalten von Farbkasten und Dukt in Offsetdruckmaschinen. Diss. Technische Universität Chemnitz (1994).

GABLER 2012

Gabler Wirtschaftslexikon, Das Wissen der Experten maschinelles Lernen <<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/77372/maschinelles-lernen-v5.html>> - 09.12.2012

GAO 2001

Gao, X.: Schwingungen von Offsetmaschinen. Diss. Technische Universität Chemnitz (2001).

GATEAUD & MAYER 2003

Schutzrecht DE 103 58 172 A1 (2003). Heidelberger Druckmaschinen. Gateaud, C.; Mayer, M.: Verfahren zur Voreinstellung eines Farbwerks und Farbwerk.

GEISBERGER & BROY 2012

Geisberger, E.; Broy, M.: Agenda CPS. Integrierte Forschungsagenda cyber-physical systems. Acatech. Springer 2012. ISBN: 978-3-642-29099-2.

GERDTS 2009

Gerdts, M.: Optimale Steuerung. Vorlesungsskript. Universität Würzburg (2009). <https://www.unibw.de/lrt1/gerdts/lehre/optimale_steuerung.pdf> - 27.11.2016.

GLÜCK 1979

Glück, M.: Untersuchungen über das Verhalten von Druckfarbe im Spalt zweier Farbwerkswalzen (Institutsbericht 2/1979). Technische Hochschule Darmstadt (1979).

GRAF 2009

Graf, R.: Objektklassifizierung mit Support Vector Machines. Masterarbeit. Universität Salzburg (2009). <<http://www.unigis.at/index.php/club-unigis/abschlussarbeiten/article/1436-objektklassifizierung-mit-support-vector-machines>> - 27.11.2016

GOLDMANN 2002

Goldmann, G.: Das Druckerbuch. Technik und Technologien der Océ-Drucksysteme. 7. Aufl. Poing: 2002. ISBN: 300-001019-x.

HAAS 2009

Haas, M. A.: Method of Continuous Quality Tracing and Improvement (MCQTI). Dissertation. Technische Universität Ilmenau (2009).

HAFNER 2009

Hafner, R.: Dateneffiziente selbstlernende neuronale Regler. Diss. Universität Osnabrück Osnabrück (2009).

HAMANN 2003

Hamann, S.: Prozessnahes Qualitätsmanagement beim Spritzgießen. Diss. Technische Universität Chemnitz (2003).

HANDL 2002

Handl, A.: Multivariate Verfahren. Theorie und Praxis unter besonderer Berücksichtigung von S-PLUS. Berlin: Springer 2002. ISBN: 978-354-043386-6.

HANSEN 2000

Hansen, W.: Qualitätsmanagement im Unternehmen. Grundlagen, Methoden und Werkzeuge, Praxisbeispiele. Heidelberg: Springer 2000. ISBN: 978-354-041015-7.

Literaturverzeichnis

HARS & BRÖTZ 1993

Hars, C.; Brötz, H.: Farbspaltungszahl im Naß-Offset-Farbwerk unter Ein-schluss des Feuchtmittels (Insitutsbericht 3/1993).
Technische Universität Darmstadt (1993).

HARS & BRÖTZ 1996 A

Hars, C.; Brötz, H.: Farbspaltungszahl III (Abschlussbericht FGD 1996). Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Universität Darmstadt (1996).

HARS & BRÖTZ 1996 B

Hars, C.; Brötz, H.: Stabilisierung des Farbtransports im Naß-Offset-Farbwerk unter Berücksichtigung von seitlicher Verreibung, Druckgeschwindigkeit und Temperatureinfluss. Institutsbericht 1/1996.
Technische Hochschule Darmstadt (1996).

HAS 1994

Has, M.: Regelungstechnische Charakterisierung der Farbwerke von Bogenoff-setmaschinen. FOGRA-Forschungsbericht 3.279 München (1994).

HAYAKAWA ET AL. 2005

Hayakawa, T.; Haddad, W.; Hovakimyan, N.; Chellaboina, V.: Neural Network Adaptive Control for Nonlinear Nonnegative Dynamical Systems. IEEE Transactions on Neural Networks 16 (2005) 2, S. 399–413.

HELBIG 1971

Helbig, T.: Untersuchungen über die Vorgänge der Farbübertragung bei Film-farbwerken von Hoch- und Flachdruckmaschinen.
Diss. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt 1971.

HENTSCHEL & DENNER 2010

Hentschel, R.; Denner, T.: Analyse von Kostenstrukturen und -Ursachen in komplexen Fertigungssystemen. Stuttgarter Produktionsakademie (2010).

HIELSCHER 2008

Hielscher, T.: Qualitätsmanagement in fertigungstechnischen Prozessketten. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern (2008).

HOFMANN 2008

Hofmann, S.: Identifikation von nichtlinearen mechatronischen Systemen auf der Basis von Volterra-Reihen. Diss. Technische Hochschule München (2008).

HOPMANN ET AL. 2004

Hopmann, C.; Gruber, J.; Michaeli, W.: Process Control in Injection Moulding. Kunststoffe (2004) 1, S. 20–25.

HÖCHT 2013

Höcht, L.: Advances in Stability Analysis for Model Reference Adaptive Control

Systems and Application to Unmanned Aerial Systems.
Diss. Technische Universität München (2013).

HU ET AL. 2010

Hu, C.; Yao, B.; Wang, Q.: Integrated Direct/Indirect Adaptive Robust Contouring Control of a Biaxial Gantry with Accurate Parameter Estimations. *Automatica* 46 (2010) 4, S. 701-707.

HUBER ET AL. 2008

Schutzrecht Deutschland DE10 2008045661 A1 (02.04.2009). Heidelberger Druckmaschinen 03.09.2008 Huber, W.; Pfeiffer, N.; Muth, F.; Schneider, M.: Farbregelung mit einheitlicher Regelgröße.

IRANMANESH ET AL. 2011

Iranmanesh, H.; Abdollahzade, M.; Miranian, A.: Forecasting Natural Gas Consumption Using Pso Optimized Least Squares Support Vector Machines. *International Journal of Artificial Intelligence & Applications* 2 (2011) 4, S. 49–62.

ISERMANN 2008

Isermann, Rolf: *Mechatronische Systeme. Grundlagen.* 2. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-32336-5.

ISHIDA ET AL. 1998

Schutzrecht Deutschland DE6998 23 631 (6.5.2004). Komori AG Pr.: 24.12.1998. Ishida, M.; Okuda, T.; Suglyama, H.: Verfahren und Vorrichtung zur Farbfilmauftragssteuerung.

ISO 2846

ISO 2846: *Graphic Technology - Colour and Transparency of Ink Sets for Four-Colour-Printing.* Geneva.

ISO 12647-2

ISO 12647-2, (2004): *Graphic Technology - Process Control for the Production of Half-tone Colour Separations, Proof and Production Prints.*
Part 2: Offset lithographic processes.

JASPERNEITE 2012

Jasperneite, J. D.-I.: Was hinter Begriffen wie Industrie 4.0 steckt. *Computer & Automation* (2012) 12, S. 24–28.

JENSEN & ABONYI 2006

Jensen, B.; Abonyi, J.: *Neural Networks for Process Modelling. Process Control and Optimization*, 2 (2006), S. 252–264.

JIANG 1994

Jiang, Y.: Beiträge zur Optimierung von Walzenfarbwerken von Offsetdruckmaschinen unter besonderer Berücksichtigung der Verdunstung des Feuchtmittels.

Diss. Technische Universität Berlin: Verl. für Wiss. und Forschung 1994. ISBN: 3-930324-06-7.

JOCHEM ET AL. 2005

Jochem, E.; Bradke, H.; Dreher, C. Ott, V.; Baron, R.; Alberti, K.; Gerber, J.: Studie zur Konzeption eines Programms für die Steigerung der Materialeffizienz in mittelständischen Unternehmen. Abschlussbericht Fraunhofer ISI. Wiesbaden 2005.

KAMMÜLLER 1987

Kammüller, R.: Messung und Bewertung der Wechselwirkung von Druckfarbe und Feuchtmittel im Offsetprozess. *Der Polygraph* (1987) 3, S. 140–145.

KARAKAŞ 2003

Karakaş, E.: The Control of Highway Tunnel Ventilation using Fuzzy Logic. Special Issue on Applications of Artificial Intelligence in Process Systems Engineering 16 (2003) 7–8, S. 717-721.

KATAJARINNE 2014

Katajarinne, T.: On the Behaviour of the Process and Material in Incremental Sheet Forming. Diss. Aalto University Helsinki 2014.

KERÄNEN 2010

Keränen, M.: Effect of Welding Parameters of Plasma Transferred Arc Welding Method on Abrasive Wear Resistance of 12C Tool Steel Deposit. Diss. Aalto University Helsinki 2010.

KIRBY ET AL 2006

Kirby, D.; Chen, J.; Zhang, J.: Development of a fuzzy-nets-based in-process surface roughness adaptive control system in turning operations. *Expert Systems with Applications* 30 (2006) 4, S. 592–604.

KIPPHAN 2000

Kipphan, H.: *Handbook of Print Media. Technologies and Production Methods*. Berlin: Springer 2000. ISBN: 978-354-066941-8.

KLAPPROTH ET AL. 1991

Klapproth, U.; Perner, P.; Böhme, B.: Einsatz eines Expertensystems zur Diagnose von Druckfehlern im Offsetdruck. *MSR, Ger* 34 (1991) 3, S. 116–120.

KLEIN ET AL 2013

Klein, R.; Meder, G.; Höhne, O.; Tomaszewski, J.: The Impact of Paper on Tone Value Increase. *Advances in Printing and Media Technology* 40 (2013), S. 205–217.

KLEMM 1999

Klemm, K.-W.: Penetrationsverhalten von Druckfarben bei LWC- und SC-Papieren. *Wochenblatt für Papierfabrikation* 6 (1999), S. 397-400.

KLEPPMANN 2001

Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren. 2. Aufl. München/Wien: Hanser 2001.
ISBN: 344-621615-4.

KLOCKE ET AL. 2009

Klocke, F.; Wirtz, G.; Veselovac, D.: Einfluss des Regelstreckenmodells auf die erzielbare Güte einer Axialkraftregelung für das Tiefbohren.
ZWF (2009) 10, S. 853–857.

KLOCKE ET AL. 2010

Klocke, F.; Wirtz, G.; Auerbach, T.; Veselovac, D.: Modellbasierte und adaptive Regelung von Fertigungsprozessen. wt Werkstatttechnik online 100 (2010) 11/12.

KNOHL 2001

Knohl, T.: Anwendung künstlicher neuronaler Netze zur nichtlinearen adaptiven Regelung. VDI. Düsseldorf: VDI-Verl. 2001. ISBN: 3-18-388508-5.

KOFAHL 1988

Kofahl, R.: Robuste parameteradaptive Regelungen. TH Darmstadt. Berlin, New York: Springer 1988. ISBN: 3-540-19463-0.

KOLEY ET AL. 2007

Koley, C.; Purkait, P.; Chakravorti, S.: SVM Classifier for Impulse Fault Identification in Transformers using Fractal Features. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 14 (2007) 6, S. 1538–1548.

KOMORI 2008 A

Komori: Automatisierte Druckmaschinen auch mit Selbstlernfunktion.
Deutscher Drucker (2008) 13, S. 14–17.

KOMORI 2008 B

Komori: KHS-AI: Optimierung der gesamten Produktion. Das neue selbstlernende KHS-AI optimiert mit mehr zeit- und materialsparenden Kontrollfunktionen den gesamten Produktionsprozess. Pressemitteilung Komori. Düsseldorf (2008).

KROLL 1993

Kroll, A.: Verfahren für eine adaptive Regelung mit Fuzzy-Logik. Forschungsbericht. Gerhard-Mercator-Universität Duisburg (1993).

KROLLE 2007

Krolle, A.: Die Entwicklung der Papieroberfläche – Verbesserungspotenziale nutzen. Wochenblatt für Papierfabrikation (2007) 18, S. 1011.

KRUSE ET AL. 1993

Kruse, R.; Gebhardt, J.; Klawonn, F.: Fuzzy-Systeme. Stuttgart: Teubner 1993. ISBN: 351-902130-7.

KRUSE ET AL. 2011

Kruse R.; Borgelt, C.; Klawonn, F.; Moewes, C.; Ruß, G.; Steinbrecher, M.: Computational Intelligence: Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze. 1. Aufl. Vieweg+Teubner-Verlag, Wiesbaden, 2011. ISBN: 978-3-8348-1275-9.

KUGLER ET AL. 2014

Kugler, C.; Hochrein, T.; Bastian, M.; Heidemayer, P.: Softsensoren schaffen harte Fakten. Extrusionstechnik 2014: Rigid Packaging Köln (2014), S. 1–7.

KUO ET AL. 2006

Kuo, R.; Su, Y.; Chiu, C.; Chen, K.-Y.; Tien, F.: Part Family Formation through Fuzzy ART2 Neural Network. Decision Support Systems 42 (2006) 1, S. 89–103.

KRIESEL 2012

Kriesel, D.: Ein kleiner Überblick über neuronale Netze. Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (2012).

< http://www.dkriesel.com/science/neural_networks > - 27.11.2016

KÜPPERS & THIEKÖTTER 2005

Küppers, A.; Thiekötter, D.: Modell der Farbzufuhr insbesondere ins Farbwerk. Forschungsbericht Bergische Universität Wuppertal (2005).

LANDAU 2011

Landau, I. D.: Adaptive control. Algorithms, Analysis and Applications. 2. Aufl. London: Springer 2011. ISBN: 978-0-85729-663-4.

LANGLEY ET AL. 2008

Langley, P.; Laird, J. E.; Rogers, S.: Cognitive Architectures: Research issues and challenges. Cognitive Systems Research (2008).

LÄMMEL & CLEVE 2012

Lämmel, U.; Cleve, J.: Künstliche Intelligenz: Lehr- und Übungsbuch. 3. Aufl. Fachbuchverlag Leipzig, Carl Hanser Verlag 2008. ISBN: 978-3-446-41398-6.

LENZ 2013

Lenz, E.: Eine Methodik zur stochastischen adaptiven Qualitätsregelung. Diss. Technische Universität Darmstadt (2013).

LI ET AL. 2013

Li, Y.; Tong, S.; Li, T.; Jing, X.: Adaptive Fuzzy Control of Uncertain Stochastic Nonlinear Systems with Unknown Dead Zone using Small-Gain Approach. Fuzzy Sets and Systems (2013).

LIEBING & RIEDL 1978

Liebing, H.; Riedl, R.: Zur vorbestimmten Feuchtung im Offsetdruck. Leipzig. Papier und Druck 27 (1978) 2, S. 101–105.

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 364-201422-4.

LINß 2011

Linß, G.: Qualitätsmanagement für Ingenieure. 3. aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser 2011. ISBN: 978-344-641784-7.

LITKE & KUNOW 2004

Litke, H.-D.; Kunow, I.: Projektmanagement. 4. Aufl. Planegg/München: Haufe 2004. ISBN: 978-344-80612-2.

LIU 2009

Liu, J.: Erhöhung der Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses durch verbesserte Plastifizierkonzepte. Diss. Technische Universität München (2009).

LIU & KONG 2013

Liu, X.; Kong, X.: Nonlinear Fuzzy Model Predictive Iterative Learning Control for Drum-Type Boiler–turbine System. Journal of Process Control 23 (2013) 8, S. 1023-1040.

LÖFFLER 2000

Löffler, J.: Optimierungsverfahren zur adaptiven Steuerung von Fahrzeugantrieben. Diss. Universität Stuttgart (2000).

LOTTER & WIENDAHL 2006

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis ; mit 16 Tabellen. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-354-021413-7.

LOTZ 2012

Lotz, M.: Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reibschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren. Diss. Technische Universität München (2012).

LU ET AL. 2013

Lu, S.; Zheng, S.; Tang, X.; Song, B.: Adaptive Speed Control Based on just-in-time Learning Technique for Permanent Magnet Synchronous Linear Motor. Journal of Process Control 23 (2013) 10, S. 1455–1464.

LUKOSZ 1999

Schutzrecht Europa EP 0936514 A2 (18.08.1999). Heidolph-Elektro GmbH &

Literaturverzeichnis

Co KG Pr.: 12.01.1999. Lukosz, H.: Verfahren und Vorrichtung zum Regeln eines Antriebssystems einer Maschine und/oder einer Anlage.

LUTZ & WENDT 2010

Lutz, H.; Wendt, W.: Taschenbuch der Regelungstechnik. Mit MATLAB und Simulink. 8. Aufl. Frankfurt 2010. ISBN: 978-381-711859-5.

MACIEJOWSKI 2002

Maciejowski, J.: Predictive Control with Constraints. Essex: Prentice Hall 2002. ISBN: 0-201-39823-0.

MACKAY 2003

MacKay, D: Information Theory, Inference and Learning Algorithms. Cambridge, UK, New York: Cambridge University Press 2003. ISBN: 978-052-164298-9.

MALIK 2007

Malik, A. S.: Rolling Mill Optimization using an Accurate and Rapid new Model for Mill Deflection and Strip Thickness Profile.
Diss. Wright State University (2007).

MANN ET AL. 2011

Mann, K.; Roy, K.; Hawlader, C.: Adaptive Fuzzy Model Based Predictive Control for a Multi-Variable Heating System. Control and Intelligent Systems 39 (2011).

MANROLAND 2009:

CutCon plus für Makulaturreduzierung. Bücherdrucker Ebner & Spiegel setzt auf manroland-Schnittregister. Pressemitteilung der Manroland AG, Augsburg (2009).

MANROLAND 2012

Web-fed Offset.

<<http://www.manroland.ca/products/WebfedOffset/Commercial/Lithoman.htm>> - 09.07.2012.

MANROLAND 2013

manroland web systems GmbH: Weltneuheit: 160- Seiten LITHOMAN.
Print und Produktion 26 (2013) 11-12, S. 10.

MANROLAND WEB 2013:

Pressemitteilung: Messenger 6. Mai 2013, manroland web systems GmbH. Augsburg (2013).

MARSLAND 2009

Marsland, S.: Machine Learning. An Algorithmic Perspective. Boca Raton: CRC Press 2009. ISBN: 978-142-006718-7.

MARX 2014

Marx, D.: Das Kano-Modell der Kundenzufriedenheit: Ein Modell zur Analyse von Kundenwünschen in der Praxis: Igel Verlag RWS 2014.
ISBN: 978-395-485124-9.

MAYER & PFEIFFER 2000

Schutzrecht Deutschland DE00 0010152470 A1 (29.05.2002). Heidelberger Druckmaschinen AG Pr.: 24.10.2000. Mayer, M.; Pfeiffer, N.: Verfahren zur Farbvoreinstellung bei Mehrfarbendruck.

MAYER & PFEIFFER 2002

Schutzrecht Deutschland DE10 312 998 (24.03.2002). Heidelberger Druckmaschinen AG Pr.: 23.10.2003. Mayer, M.; Pfeiffer, N.: Lernende Farbführung.

MAYOSKY & CANCELO 1999

Mayosky, M.; Cancelo, I.: Direct Adaptive Control of Wind Energy Conversion Systems using Gaussian Networks.
IEEE Transactions on Neural Networks 10 (1999) 4, S. 898-906.

MICHALSKI & KODRATOFF 1990

Michalski, R. S.; Kodratoff, Y.: Research in Machine Learning: Recent Progress, Classification of Methods and Future Directions. Diss. San Francisco: Morgan Kaufmann (1990). ISBN: 0-934-613-09-5.

MITCHELL 1997

Mitchell, T. M.: Machine Learning. New York: McGraw-Hill 1997.
ISBN: 978-007-115467-3.

MORK 2011

Mork, R.: Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis neuronaler Netze. Diss. Technische Universität München (17.01.2011).

MOSANDL 2004

Mosandl, T.: Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme.
Diss. Technische Universität München. Utz- Verlag 2004. ISBN: 3-8316-0471-1.

MOU CHEN ET AL. 2010

Mou Chen; Shuzhi Sam Ge; How, B.: Robust Adaptive Neural Network Control for a Class of Uncertain MIMO Nonlinear Systems with Input Nonlinearities.
IEEE Transactions on Neural Networks 21 (2010) 5, S. 796-812.

MUKHERJEE ET AL. 1997

Mukherjee, S.; Osuna, E.; Girosi, F.: Nonlinear Prediction of Chaotic Time Series Using Support Vector Machines. VII Proceedings of the 1997 IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing (1997), S. 511-520.

MÜLLER 1996

Müller, K.: Entwurf robuster Regelung. Stuttgart: Teubner 1996.
ISBN: 3-519-06173-2.

MÜLLER MARTINI 2013

Müller Martini: Offset-Technologie gewinnt im Verpackungsdruck an Bedeutung. Der Verpackungsdruck (2013) 7, S. 30.

NEHER 2012

Neher, J.: Neuro-Fuzzy-Modellierung zur umfassenden Prozessüberwachung am Beispiel des Ultraschallschweißens von Kunststoffteilen. Diss. Universität Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2012. ISBN: 978-3-8396-0424-3.

NEUGEBAUER ET AL. 2011

Neugebauer, R.; Hipp, K.; Hofmann, S.; Schlegel, H.: Einsatz von Verfahren der simulationsbasierten Optimierung zur Reglerparametrierung unter Berücksichtigung von definierbaren Nebenbedingungen. Fachtagung Mechatronik. Chemnitz (2011), S. 247-264.

NICOLA ET AL. 2004

Nicola, G. de; Di Tommaso, P.; Esposito, R.; Flammini, F.; Orazio, A.: A Hybrid Testing Methodology for Railway Control Systems. In: Heisel, M. (Hrsg.): SA-FECOMP. Berlin: Springer 2004, S. 116–129. ISBN: 978-3-540-23176-9.

NIEMANN 2007

Niemann, J.: Eine Methodik zum dynamischen Life Cycle Controlling von Produktionssystemen. Diss. Universität Stuttgart (2007).

NIEMELA & REINHARDT 2013

Niemela, B.; Reinhardt, M.: Zukunfts-Check der Druckbranche: Ergebnisse der print.de-Umfrage. Deutscher Drucker Verlagsgesellschaft (2013).

NUGROHO ET AL. 2013

Nugroho, P. W.; Du Haping; Li, W.; Alici, G.: Implementation of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System Controller on Magneto Rheological Damper Suspension. International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Wollongong, Australien 2013, S. 1399–1404.

O'DWYER 2000

O'Dwyer, A.: PI and PID Controller Tuning Rules für Time Delay Processes: A Summary. Dublin Institute of Technology (2000).

ODENTHAL 2001

Odenthal, D.: Kippvermeidung, aktive Lenkung, Fahrdynamik, robuste Regelung. In: TÜV Akademie GmbH (Hrsg.): Proc. Fahrwerk-Tech 2001. München (2001).

OSENDORFER ET AL. 2011

Osendorfer, C.; Schlüter, J.; Schmidhuber, J.; van der Smagt, P.: Unsupervised Learning of low-level Audio Features for Music Similarity Estimation. The 28th International Conference on Machine Learning. Bellevue, USA (2011).

PANTEL 2007

Pantel, G.: Hoher Farbverbrauch auf Zeitungsdruckpapieren. Druck & Medien (2007) 7.

PASZKOWSKA ET AL. 2004

Paszowska, K.; Podsiadlo, H.; Ambroziewicz, E. L.; Ambroziewicz, A.: The Influence of Paper Sizing on the Amount of Printing Ink Consumed in Offset Printing. Paper Technology, UK 45 (2004) 10, S. 19–30.

PATZELT & RUDER 1993

Patzelt, B.; Ruder, P.: Farbabfall in Druckrichtung. Abschlussbericht. Institut für Polygraphische Technik. Technische Hochschule Chemnitz (1993).

PAWLOWSKI 2010

Pawlowski, K.: Untersuchungen zur Bestimmung der Farbdichte druckfrischer Offsetfarben mit einem Druckinspektionssystem. Diss. Technische Universität Darmstadt (2010).

PERASSI 2007

Perassi, H. D.: Feldorientierte Regelung der permanenterregten Synchronmaschine ohne Lagegeber für den gesamten Drehzahlbereich bis zum Stillstand. Diss. Technische Universität Ilmenau (2007).

PETERS 1998

Peters, K.: Papier, Farbe, Farbverbrauch - Zusammenhänge und Auswirkungen. Fogra-Symposium Druckfarbe im Offset. München (1998).

PETRE ET AL. 2011

Petre, E.; Şendrescu, D.; Selişteanu, D.: Neural Networks Based Model Predictive Control for a Lactic Acid Production Bioprocess. In: Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems (2011), Bd. 6884. Berlin Heidelberg: Springer, S. 388–398.

PFEIFER ET AL. 2002

Pfeiffer, B.-M; Jäkel, J.; Kroll, A.; Kuhn, C.; Kuntze, H.; Lehmann, U.: Successful Applications of Fuzzy Logic and Fuzzy Control. In: at - Automatisierungstechnik 50 (2002), S. 461. DOI: 10.1524/auto.2002.50.10.461.

PFLEGHAAR 2014

Pfleghaar, J.: Energieeffiziente Aktive Dämpfung von Torsionsschwingungen im KFZ-Antriebsstang. Diss. Technische Universität München (2014).

PLENZ 2014

Plenz, S.: Im Trend sind UV-Druck und Automatisierung.
Print und Produktion 27 (2014) 3, S. 16.

POP ET AL. 2007

Pop, R.; Liewald, M.; Wagner, S.; Garcia, C.; Saenz Argandona, E. de:
Mit Prozesskontrolle zum Erfolg. Werkstattstechnik online 97 (2007),
S. 798–804.

PROBST 2008

Probst, P.: Neupapierproduktion vor dem Hintergrund sich verändernder Rohstoffmärkte.
<http://www.bde-berlin.org/wp-content/uploads/2008/06/06_probst.pdf> -
10.09.2012

PROTZEL ET AL. 1998

Protzel, P.; Kindermann, L.; Tagscherer, M.; Lewandowski, A.: Adaptive Systemidentifikation mit neuronalen Netzen zur Profilsteuerung in Walzwerken.
In: VDI (Hrsg.): Computational Intelligence: Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy Control im industriellen Einsatz. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998, S. 347-359. ISBN: 3-18-091381-9.

PUTZER & HEIDRICH 2013

Putzer, A.; Heidrich, G.: Strategie zur Prozessüberwachung und Produktionsregelung in den Presswerken der AUDI AG. In: Bayern Innovativ GmbH (Hrsg.): Produktionskongress 2013. München (2013), S. 68–75.

PYLIOTIS 1978

Pyliotis, D.: Wechselwirkung zwischen Druckfarbe und Feuchtmittel beim Offsetverfahren. Fogra-Forschungsbericht 5.205/2. München (1978).

RAMESH ET AL. 2002

Ramesh, R.; Mannan, M. A.; Poo, A. N.: Support Vector Machines Model for Classification of Thermal Error in Machine Tools. Advanced Manufacturing Technology 20 (2002), S. 114-120.

RAU 2003

Rau, M.: Nichtlineare modellbasierte Prädiktive Regelung auf Basis lernfähiger Zustandsraummodelle. Diss. Technische Universität München (2003).

RECH 1971

Rech, H.: Beiträge zur experimentellen und rechnerischen Untersuchung des Farbtransportes in Walzenfarbwerken von Druckmaschinen. Diss. Technische Universität Darmstadt (1971).

RECH 2002

Rech, H.: Untersuchung des dynamischen Verhaltens ausgesuchter Konfigura-

tionen eines Modellfarbwerkes. Forschungsbericht. Hochschule der Künste Berlin (2002).

RECH 2003

Rech, H.: Dynamik im Modellfarbwerk. Druck & Medien (2003) 6, S. 30–34.

REICHE 2008

Reiche, M.: Referenzmodellierung technologischer Hauptprozesse der graphischen Industrie. Diss. Technische Universität Chemnitz (2008).

REICHENBERGER 1979

Reichenberger, R.: Beitrag zur theoretischen und experimentellen Analyse des Farbspaltungsvorganges unter besonderer Berücksichtigung der seitlichen Verreibung in Bogen-Offsetdruckmaschinen.
Diss. Technische Universität Dresden (1979).

REINHART ET AL. 1996

Reinhart, G.; Lindemann, U.; Heinzl, J.: Qualitätsmanagement. Ein Kurs für Studium und Praxis. Berlin Heidelberg: Springer 1996.
ISBN: 978-354-061078-6.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Schmid, M.; Berger, S.: Kognitive modellbasierte Maschinensteuerung für effiziente Produktionsmaschinen.
Productivity Management (2012), S. 62–65.

ROSENBERG 1985

Rosenberg, A.: Feuchtmittelaufnahme und Offsetverhalten. Fogra-Symposium – Druckfarbe in Forschung und Praxis. München (1985).

RUSSELL ET AL 2003

Russell, S. J.; Norvig, P.: Artificial intelligence. A Modern Approach. 2. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall/Pearson Education 2003.
ISBN: 013-790-395-2.

RUSSELL ET AL. 2010

Russell, S. J.; Norvig, P.; Davis, E.: Artificial intelligence. A Modern Approach. 3. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall 2010. ISBN: 978-0-13-604259-4.

SAHHARY 2008

Sahhary, B.: Elektrische Antriebe mit dauermagneterregten Maschinen im dynamischen sensorlosen Betrieb.
Diss. Helmut-Schmidt-Universität Hamburg (2008).

SAJIDMAN 2012

Sajidman, M.; Kuntze, H.-B.: Fuzzy-Regelung stark gestörter, verfahrenstechnischer Prozesse mit großer Meßtotzeit.
5. Workshop "Fuzzy Control" (2012). S. 118–133.

SAPPI 2004

SAPPI: Climate and Paper. 2004.

<<https://www.sappietc.com/sites/default/files/Climate%20and%20Paper.pdf>>-
20.10.2015

SAPPI 2007 A

SAPPI: Papier, Farbe und Druckchemie. 2007

<[http://www.sappi.com/regions/sa/_layouts/download.aspx?SourceUrl=/regions/sa/SupportAndSponsorships/Knowledge bank/Technical brochures/Paper, Ink and Press Chemistry/PaperInkandPressChemistryGER.pdf](http://www.sappi.com/regions/sa/_layouts/download.aspx?SourceUrl=/regions/sa/SupportAndSponsorships/Knowledge%20bank/Technical%20brochures/Paper,%20Ink%20and%20Press%20Chemistry/PaperInkandPressChemistryGER.pdf)> - 20.10.2015.

SAPPI 2007 B

SAPPI AG: Papier. Normen und Maßeinheiten. 2007.

<[http://www.sappi.com/regions/sa/SupportAndSponsorships/Knowledge bank/Technical brochures/Paper - Standards and Measurements/20070709PaperStandardsMeasurementsfinalversionGER.pdf](http://www.sappi.com/regions/sa/SupportAndSponsorships/Knowledge%20bank/Technical%20brochures/Paper%20-%20Standards%20and%20Measurements/20070709PaperStandardsMeasurementsfinalversionGER.pdf)> - 20.10.2015.

SASTRY 2011

Sastry, S.; Bodson, M.: Adaptive Control - Stability, Convergence and Robustness. Dover Publications Mineola, N.Y. (2011).

SCHÄDLICH ET AL. 2009

Schutzrecht Europa EP 2 147 789 A2 (27.01.2010). manroland AG. Pr.: 23.07.2009. Schädlich, R.; Töpfer, K.; Wunderlich, T.: Verfahren zum Betreiben einer Rollendruckmaschine.

SCHAFFERNICHT 2011

Schaffernicht, E.: Lernbeiträge im Rahmen einer kognitiven Architektur für die intelligente Prozessführung. Diss. Technische Universität Ilmenau (2011).

SCHAPER ET AL. 2013

Schaper, U.; Arnold, E.; Sawodny, O.; Schneider, K.: Constrained real-time Model-predictive Reference Trajectory Planning for Rotary Cranes. In: International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Wollongong, Australien (2013), S. 680–685.

SCHEFFLER 1986

Scheffler, E.: Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung. 2. Aufl. Deutscher Verlag für die Grundstoffindustrie Leipzig 1986.
ISBN: 3-342-00099-6.

SCHIFFLER 2011

Schiffler, A.: Steuerungsintegrierte Prozessüberwachung bei der Zerspanung mit Motorspindeln. Diss. Technische Universität Darmstadt.
Aachen: Shaker-Verlag 2011.

SCHLEGEL 2008

Schlegel, G.: Experimentelle Untersuchungen zu Farbfilmbildungsprozessen in Sprühfarbwerken von Offsetdruckmaschinen.
Diss. Technische Universität Chemnitz (2008).

SCHLIPF 2009

Schlipf, M.: Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile.
Diss. Universität Karlsruhe (2009).

SCHMID ET AL. 2013 A

Schmid, M.; Berger, S.; Reinhart, G.: Cognitive Parameter Adaption in Regular Control Structures. In: Proceedings of the 10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Reykjavik (2013), S.131–138. ISBN: 978-989-8565-70-9.

SCHMID ET AL. 2013 B

Schmid, M.; Berger, S.; Reinhart, G.: Konzept zur Regelung temporär variabler Strecken. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme. Paderborn (2013).

SCHMID ET AL. 2014 A

Schmid, M.; Berger, S.; Reinhart, G.: Cognitive Parameter Adaption for Model Based Control Systems. In: CIRP (Hrsg.): ICME 2014. Neapel, (2014).

SCHMID ET AL. 2014 B

Schutzrecht Deutschland DE10 2013 100916 A1 (31.07.2014). manroland web systems GmbH. Pr. 30.01.2013. Schmid, M.; Berger, S.; Albrecht, S.; Rothenberger, N.: Verfahren zur Regelung eines Parameters eines Farbwerks.

SCHMID 2014

Schmid, M.: Beispiele intelligenter Zerspanwerkzeuge sowie deren Realisierungsmöglichkeiten.
Science Day Augsburg "Digitalisierung in Organisation und Fertigung" (2014).

SCHMIDT 2013

Schmidt, K.: Verpackungsdruck bleibt stark nachgefragt.
Print und Produktion 27 (2013) 3, S. 16–17.

SCHMITT 1979

Schmitt, H. J.: Steuerung der Farbdosierung bei Offsetdruckwerken durch rechnergestützte Modellvorhersagen. PDV-Bericht Karlsruhe (1979).

SCHOLLE 2013:

Scholle S.: Die deutschen Druckmaschinenhersteller im Spannungsfeld von Digitalisierung, strategischer Anpassungsnotwendigkeit und organisatorischer Pfadabhängigkeit. Diss. Freie Universität Berlin (2013).

SCHÖNHERR 2012

Schönherr, R.: Regelkreisüberwachung mechatronischer Antriebssysteme. Diss. Technische Universität Chemnitz. Verlag Wiss. Skripten Auerbach 2012.

SCHRÖDER 2010

Schröder, D.: Intelligente Verfahren: Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-364-211397-0.

SCHRÖDER 2014

Schröder, D.: Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen. 4. Aufl. Berlin: Springer 2014. ISBN: 978-364-230095-0.

SCHRÖTER ET AL. 2012

Schröter, M.; Lerch, C.; Jäger, A.: Goldgrube Materialeffizienz? Mitteilung aus der ISI-Ergebnis. Karlsruhe (2012).

SCHULZ 2002

Schulz, G.: Regelungstechnik 2. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag 2002. ISBN: 3-486-25858-3.

SCHULZ 2004

Schulz, G.: Regelungstechnik 1. 2. Aufl. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag 2004. ISBN: 3-486-27378-7.

SEYMOUR & CHIA-LIN 2003

Schutzrecht Deutschland DE 69810385 T2 (2.1.2003). Quad/Tech, Inc. Pr.: 20.02.1998. Seymour, J. C.; Chia-Lin, C.: Steuerungssystem von Farbführungselementen in einer Druckmaschine.

SEYMOUR 2004

Schutzrecht Europa EP14 57335 B1 (15.09.2004). Quad/Tech Pr.: 10.03.2003. Seymour, J.: Control system for a printing Press.

SHENG-XI WU ET AL. 2004

Sheng-Xi Wu; Xia Zhao; Hui-He Shao; De-Xiang Ren: Cold Rolling Process Data Analysis based on SVM. In: Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics (Hrsg.). Shanghai (2004), S. 792–795.

SID 2013

Sächsisches Institut für die Druckindustrie: Ähnliches Papier, höherer Farbverbrauch. Druck & Medien (2013) 2, S. 22.
<http://www.sidleipzig.de/sites/default/files/presse/fachpresse/pdf/dm_praxisfall-0213.pdf> - 20.11.2016.

SILVA & ALSAKARNEH 2011

Silva, P. C.; AlSakarneh, A.: Optimum Fuzzy Model for Single Input Single Output Data Systems. Control and Intelligent Systems 39 (2011) 1.

STAHL 2013

Stahl S.: Einfluss der Druckform und der Fluidviskosität auf die Schichtdicke von im Tiefdruck hergestellten Funktionsschichten und deren Charakterisierung. Diss. Technische Universität Darmstadt (2013).

STIELER 2009

Stieler, S.: Strukturwandel in der Zeitungswirtschaft
Hans-Böckler-Stiftung. Stuttgart 2009. ISBN: 978-3-934859-30-2.

STUHMILLER 2002

Schutzrecht Europa EP1232862B1 (21.08.2002): manroland AG Pr.: 05.02.2002. Stuhlmiller, H.: Verfahren zum Anfahren einer Offsetrotationsdruckmaschine.

STURM 2000

Sturm, M.: Neuronale Netze zur Modellbildung in der Regelungstechnik.
Diss. Technische Universität München (2000).

SMYTH 2013

Smyth, S.: The Future of Global Printing to 2018.
Marktanalyse der Smithers Group (2013).

SOMMER 2006

Sommer, S.: Algorithmen zur Steigerung der Qualitätsleistung und Verfügbarkeit automatisierter Montage- und Prüfsysteme.
Diss. Technische Universität Ilmenau (2006).

SÖDERGARD & LAUNONEN 1996

Södergard, C.; Launonen, R.: Inspection of Colour Printing Quality. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence (1996) 10, S. 118–128.

STANZICK ET AL. 2002

Stanzick, H.; Wichmann, M.; Weise, J.; Helfen, L.; Baumbach, T.; Banhart, J.: Process Control in Aluminium Foam Production using real-time x-ray Radioscopy. Advanced Engineering Materials 10 (2002) 4, S. 814–823.

STUHMILLER 2001

Schutzrecht Europa EP1232862 B1 (21.08.2002). manroland AG Pr.: 15.02.2001. Stuhlmiller, H.: Verfahren zum Anfahren einer Offsetrotationsdruckmaschine.

SUTTON & BARTO 2012

Reinforcement Learning: An Introduction. Bradford Book MIT Press Cambridge (2012).

SUZUKI 2011

Suzuki, K.: Artificial Neural Networks - Industrial and Control Engineering Applications: InTech 2011. ISBN: 978-953-307-220-3.

SWARUP & AMITAVA 2010

Swarup, B.; Amitava, D.: Computational Modelling of Conduction Mode Laser Welding Process: INTECH Open Access Publisher 2010.
ISBN: 978-953-307-129-9.

TAGSCHERER 2000

Tagscherer, M.: Dynamische neuronale Netzarchitektur für Kontinuierliches Lernen. Diss. Universität Chemnitz (2000).

TAN & MAYROVOUNIOTIS 1995

Tan, S.; Mayrovouniotis, M. L.: Reducing Data Dimensionality through Optimizing Neural Network Inputs. AIChE Journal 41 (1995) 6, S. 1.471–1.480.

TAKÁCS & ROHAL'-ILKIV 2012

Takács, G.; Rohal'-Ilkiv, B.: Model Predictive Vibration Control. Efficient Constrained MPC Vibration Control for lightly Damped Mechanical Structures. London, New York: Springer 2012. ISBN: 978-1-4471-2332-3.

TAKAYANAGI 1972

Takayanagi: Theoretical Analysis of Ink Transfer in Printing Presses. Mitsubishi Juko Giho 1 (1972) 9, S. 112.

TIETZE 1973

Tietze, W.: Probleme des Farbe-Feuchtmittel-Verhältnisses im Offsetdruck. Druck und Papier 22 (1973) 2, S. 17-21.

TONG & LI 2009

Tong, S.; Li, Y.: Observer-Based Fuzzy Adaptive Control for Strict-Feedback Nonlinear Systems. Fuzzy Sets and Systems (2009) 160, S. 1749–1764.

TRAGL (2012)

Ökoeffizienz ist Kosteneffizienz. Nachhaltigkeit im Sinne der Umwelt und der industriellen Wertschöpfung. In Der Konstrukteur, Sonderheft (2012), S. 6.

TROCH ET AL. 1992

Troch, I.; Müller, P. C.; Fasol, K.-H.: Modellreduktion für Simulation und Reglerentwurf/Model Reduction for Simulation and Controller Design. at Automatisierungstechnik 40 (1992) 4, S. 132–141.

TWIEG 2010

Twieg, S.: Selbstlernende akustische Mustererkennung zur Erfassung von Bauteilfehlern im Automobil. Diss. Universität Rostock (2010).

UNBEHAUEN 2011

Unbehauen, H.: Regelungstechnik. 7. Aufl. Vieweg + Teubner-Verlag Wiesbaden (2011). ISBN: 978-383-481419-7.

WALTER & FETZKO 1955

Walter, W. G.; Fetzko, J. M.: A Concept of Ink Transfer in Printing.
American Ink Maker 33 (1955).

WANG ET AL. 2012

Wang, Q.; Zhang, Y.; Tian, D.; Eschbach, R.; Marcu, G. G.; Rizzi, A.: Deducing Ink Thickness Variations of Fluorescent Print by a Spectral Prediction Model. SPIE-IS&T (2012), S. 829.217–829.217.

WARNECKE 1996

Warnecke, H.-J.: Kostenrechnung für Ingenieure. 5. Aufl. Hanser-Verlag München, Wien (1996). ISBN: 3-446-18695-6.

WARNECKE 2003

Warnecke, H.-J.: Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. 3. Aufl.: Hanser-Verlag München (2003). ISBN: 978-344-618493-7.

WEICHMANN 2006

Schutzrecht 1671 789 (21.06.2006). manroland Pr.: 14.12.2005. Weichmann, A.: Verfahren zur Regelung der Farbgebung in einer Offsetdruckmaschine.

WEIß 2008

Weiß, J.: Modellbildung und Simulation radial gekoppelter Rotoren.
Diss. Technische Universität Chemnitz (2008).

WERMUTH 2004

Wermuth, G.: Erst lernen, dann voraussagen. Farbe & Lack 110 (2004), S. 30–37.

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Strategien der Produktion. Berlin Heidelberg: Springer 2006.

WIESNER & SCHEUTER 1983

Wiesner, R.; Scheuter, K. R.: Ermittlung von Farbspaltungsfaktoren in Walzenfarbwerken. Institutsbericht 1/1983.
Technische Hochschule Darmstadt (1983).

WINDE 2009

Winde, M.: Systematische Bewertung und Ertüchtigung von industriellen Regelkreisen in verfahrenstechnischen Komplexen.
Diss. Ruhr-Universität Bochum (2009).

WIRZ 1963

Wirz, B.: Beiträge zum Problem der Auslegung von Farbwerken an Rotationsmaschinen des Hoch- und Flachdruckes.
Diss. Technische Universität München (1963).

WOLFF 2009

Wolff, A.: Modellbildung und Regelung von industriellen Mehrwalzen-Lackbeschichtungsanlagen mit traversierenden Dickenprofilmesssystemen. Düsseldorf: Verlag Stahl und Eisen 2009. ISBN: 978-3-514-00764-2.

WOLFF ET AL. 2003

Wolff, A.; Jelali, M.; Müller, U.; Henkes, M.; Krauthäuser, H.; Stallknecht, G.: Automatische Regelung von Lackbeschichtungsanlagen. Stahl und Eisen (2003) 8.

WOLTERS 2003

Wolters, T.: Verbesserte Webmaschineneinstellungen mittels Simulationsrechnungen. Diss. RWTH Aachen (2003).

WÜNSCH ET AL. 2009

Wünsch, M.; Häusler, A.; Seefeldt, F.: Ressourcen- Energie- und Umwelteffizienz in der Papier- und Druckindustrie. Studie der Prognos AG. Berlin (2009).

XU ET AL. 2004

Xu, B.; Wu, Z.; Chen, G.; Yokoyama, K.: Direct Identification of Structural Parameters from Dynamic Responses with Neural Networks. Special Issue on Applications of Artificial Intelligence in Process Systems Engineering 17 (2004) 8, S. 931-943.

YANG & TATEISHI 2001

Yang, Z.-J.; Tateishi, M.: Adaptive Robust Nonlinear Control of a Magnetic Levitation System. Automatica 37 (2001) 7, S. 1125–1131.

YANG & LIU 2011

Yang, Y. G.; Liu, F. P.: Effects of Paper Properties and Printing Conditions on the Ink Penetration into Offset Paper. Advanced Materials Research 236-238 (2011), S. 1139–1142.

YAO 1996

Yao, B.: Adaptive Robust Control of Nonlinear Systems with Application to Control of Mechanical Systems. Diss. University of California, Berkeley (1996).

YOU 2009

You, K.: Adaptive Control: InTech 2009. ISBN: 978-953-7619-47-3.

ZÄH ET AL. 2007

Zäh, M.; Wiesbeck, M.; Engstler, F.; Friesdorf, F.; Schubö, A.; Stork, S.; Bannat, A.; Wallhoff, F.: Kognitive Assistenzsysteme in der manuellen Montage. Werkstatttechnik online 97 (2007) 9, S. 644–650.

ZÄH ET AL. 2011

Zäh, M. F.; Hoffmann, H.; Putzer, A.; Faass, I.; Mork, R.; Boettcher, O.: Model Based Optimal Control of Drawing Processes. Forming Technology Forum Zurich (2011).

ZELL 1997

Zell, A.: Simulation neuronaler Netze. 2. Aufl. München: Oldenbourg 1997. ISBN: 978-348-624350-5.

ZELLER & STUHMILLER 2002

Schutzrecht EP 1 232 862 B1 (21.08.2001). manroland Pr.: 05.02.2002. Zeller, R.; Stuhlmiller, H.: Verfahren zum Anfahren einer Offsetdruckmaschine.

ZELLER & STUHMILLER 2006

Schutzrecht DE 102005 013 634 (28.09.2006). MAN Roland Pr.: 24.03.2005. Zeller, R.; Stuhlmiller, H.; John, T.: Verfahren zum Betrieb einer Druckmaschine.

ZELLER 2002

Schutzrecht EP 1 232 862 A 1 (21.08.2002). MAN Roland Pr.: 15.2.2002. Zeller, R.; Stuhlmiller, H.: Verfahren zum Anfahren einer Offsetrotationsdruckmaschine.

ZYPKIN 1966

Zypkin, J. S.: Adaption und Lernen in automatischen Systemen. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag 1966. ISBN: 348-637-6012.

10 Anhang

10.1 Betreute Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) in den Jahren von 2010 bis 2014 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. In diesen wurden diverse Fragestellungen zur Modellbildung, zu Einflussgrößen sowie der Integration und Optimierung maschineller Lernverfahren untersucht. Zudem wurden im Rahmen mehrerer Praktika wertvolle Ergebnisse erarbeitet, die teilweise ebenfalls in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Studierende/r	Titel der Studienarbeit
Nuss, W.	Konzeption und Implementierung einer Steuerung für eine Labordruckmaschine
Koppermann, M.	Klassifikation künstlicher intelligenter Systeme
Kaya, M.	Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Feuchtmittel und Druckfarbe sowie deren Auswirkung auf drucktechnische Qualitätskriterien
Berger, C.	Modellbasierte Regleradaption in kognitiven Systemen
Letzel, B.	Kognitive Parameteranpassung durch neuronale Netze
Krüger, U.	Quantifizierung des Einflusses der seitlichen Verreibung auf den zonalen Farbfluss in einem Offsetfarbwerk
Steinmetz, H.	Entwicklung eines Inline-Farbmesssystems auf Basis optischer Größen im Farbwerk von Illustrationsdruckmaschinen
Leister, S.	Systemintegration und Optimierung eines adaptiven Prozessmodells am Beispiel einer Druckmaschine
Sedlmayr, K.	Implementierung eines künstlichen neuronalen Netzes in eine Maschinensteuerung in Java
Puchinger, A.	Optimierung einer intelligenten Maschinensteuerung für den ressourceneffizienten Betrieb einer Produktionsmaschine

10.2 Veröffentlichungen des Autors

Um die Forschungsergebnisse einem breiten Publikum zugänglich zu machen, wurden Teilergebnisse im Rahmen verschiedener Kongresse und Tagungen veröffentlicht. Für die fokussierte Recherche sind diese nachfolgend aufgeführt.

Schmid, M.; Trappendreher, T.; Reinhart, G.: Materialeffizienz durch intelligente Steuerungssysteme. In: Cluster Mechatronik & Automation (Hrsg.): Internationales Forum Mechatronik 2011. Cham, 21.-22.09.2011. Cham: Chilipaper GmbH 2011, S. 341-353. ISBN: 978-300-035785-5.

Reinhart, G.; Schmid, M.; Berger, S.: Kognitive modellbasierte Maschinensteuerung für effiziente Produktionsmaschinen. Productivity Management 2012 (2012) 05/2012, S. 62-65.

Reinhart, G.; Schmid, M.; Berger, S.: Modellbasierte Zustandsüberwachung einer Druckmaschine: Automatische Fehlererkennung und Fehlerkompensation. In: Frey, G. et al. (Hrsg.): sps ipc drives 2012. Berlin: VDE VERLAG 2012, S. 289-297. ISBN: 978-3-8007-3464-1.

Reinhart, G.; Schmid, M.; Berger, S.: Automatische Parameteranpassung: Voraussetzung für eine effiziente Produktion. In: Standortagentur Tirol (Hrsg.): Tagungsband / Internationales Forum Mechatronik. Innsbruck 2012, S. 261-274. ISBN: ISBN 978-3-200-02777-0.

Schmid, M.; Berger, S.; Reinhart, G.: Konzept zur Regelung temporär variabler Strecken. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme. Paderborn 2013.

Schmid, M.; Berger, S.; Reinhart, G.: Cognitive Parameter Adaption in Regular Control Structures. In: Ferrier, J.-L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Reykjavik, 29.08.2013-31.08.2013. S.I: Scitepress 2013, S. 131-138. ISBN: 978-989-8565-70-9.

Schmid, M.; Berger, S.: Intelligente Prozessregelung macht es möglich. iw-Newsletter 21 (2013) 4, S. 1-2.

Berger, S.; Schmid, M.: Prioritisation of Influence Variables for a Flexible and Efficient Production. 5th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (2013). München.

Schmid, M.; Berger, S.; Reinhart, G.: Cognitive Parameter Adaption for Model Based Control Systems. In: Teti, R. (Hrsg.): 9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering – CIRP ICME 14. Neapel, 16.07.2014. Red Hook, NY: Curran 2015. ISBN: 978-151-080782-2.