



335

Martin Schmid

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

Martin Schmid

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

Herbert Utz Verlag · München 2018

Forschungsberichte IWB
Band 335

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7367-4 Version: 1 vom 06.04.2018
Copyright© Herbert Utz Verlag 2018

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4139-0
Copyright© Herbert Utz Verlag 2018

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.

Martin Schmid

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



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 335

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2018

ISBN 978-3-8316-4139-0

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

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	<i>Technische Zielsetzung der vorliegenden Arbeit</i>	<i>8</i>
1.5.2	<i>Wissenschaftliche Zielsetzung</i>	<i>9</i>
1.5.3	<i>Aufbau der vorliegenden Arbeit</i>	<i>9</i>
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	<i>Anfahrmethoden in der Drucktechnik</i>	<i>23</i>
3.2.2	<i>Steuerungskonzepte für Prozesse ohne Rückführung der Regelgrößen</i>	<i>25</i>
3.3	<i>Berücksichtigung von Einflussgrößen</i>	<i>29</i>
3.3.1	<i>Charakterisierung von Einflussgrößen</i>	<i>29</i>
3.3.2	<i>Auswahl der Einflussgrößen</i>	<i>29</i>
3.3.3	<i>Robuste und adaptive Regelung</i>	<i>31</i>
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 Farbwerkmodelle	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 Adaptionsmöglichkeiten	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

Inhaltsverzeichnis

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

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	Recyclinglerlös
$E_{(\eta, t)}$	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