

Impressum

# **Einsatz hybrider Optimierungsverfahren zur Inbetriebnahme elektromechanischer Systeme**

**Autor:**

Kevin Hipp

**Herausgeber:**

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. mult. Dr. h. c. mult.  
Reimund Neugebauer

Prof. Dr.-Ing.  
Matthias Putz

**Wichtiger Hinweis:**

Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere fürervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 2017

**Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU**

Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz

[www.iwu.fraunhofer.de](http://www.iwu.fraunhofer.de)

**Verlag Wissenschaftliche Scripten**

[www.verlag-wiss-scripten.de](http://www.verlag-wiss-scripten.de)

ISBN: 978-3-95735-060-2

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>Verzeichnis der Abkürzungen</b>	<b>XI</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b>	<b>XIII</b>
<b>Verzeichnis der logischen Bezeichner</b>	<b>XXI</b>
<b>Verzeichnis der Abbildungen</b>	<b>XXIII</b>
<b>Verzeichnis der Tabellen</b>	<b>XXVII</b>
<b>1 Einleitung, Motivation und Zielstellung</b>	<b>31</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>37</b>
2.1 Antriebstechnik . . . . .	38
2.1.1 Einteilung nach der Energieform . . . . .	38
2.1.2 Einteilung nach der Bewegungskomplexität . . . . .	41
2.2 Steuerung/Regelung . . . . .	42
2.2.1 Allgemein . . . . .	42
2.2.2 Einteilung von Maschinensteuerungen . . . . .	46
2.3 Modellerstellung für dynamische Systeme . . . . .	47
2.3.1 Theoretische Modellbildung/Modellierung . . . . .	50
2.3.2 Experimentelle Modellbildung/Identifikation . . . . .	51
2.3.3 Modellbildung von elektromechanischen Achsen (EMA) . . . . .	54
2.4 Reglerparametrierung . . . . .	58
2.4.1 Vorgehen . . . . .	58
2.4.2 Vorstellung ausgewählter Verfahren zum Parametrieren von Reglerstrukturen . . . . .	62
2.4.2.1 Inbetriebnahmemethode nach Ziegler/Nichols . . . . .	62
2.4.2.2 Einstellregel nach Samal . . . . .	63
2.4.2.3 Betragsoptimum . . . . .	64
2.4.2.4 Symmetrisches Optimum . . . . .	65
2.4.2.5 Automatische Reglerparametrierung der Antriebshersteller . . . . .	67

2.4.2.6	Anwendung von Optimierungsverfahren (OV) . . . . .	68
2.4.3	Zusammenfassung . . . . .	71
2.5	Automatisierte Inbetriebnahme . . . . .	72
2.6	Resümee . . . . .	74
<b>3</b>	<b>Operations Research</b>	<b>77</b>
3.1	Einführung . . . . .	77
3.1.1	Phasen des Operations Research (OR) . . . . .	78
3.1.2	Bedeutung von Modellen . . . . .	79
3.1.3	Einteilung nach der Anzahl von Zielfunktionen . . . . .	82
3.1.3.1	Einkriterielle Optimierung . . . . .	82
3.1.3.2	Mehrkriterielle Optimierung . . . . .	82
3.1.4	Teilgebiete des Operations Research (OR) . . . . .	85
3.1.5	Definition heuristischer Optimierungsverfahren . . . . .	87
3.2	Simulationsbasierte Optimierung (SBO) . . . . .	88
3.3	Vorstellung ausgewählter Verfahren . . . . .	92
3.3.1	Partikel-Schwarm-Optimierung (PSO) . . . . .	92
3.3.2	Nelder-Mead Verfahren (NM) . . . . .	97
<b>4</b>	<b>Hybride Optimierung</b>	<b>103</b>
4.1	Kopplung zu hybriden Verfahren . . . . .	103
4.1.1	PSO NM . . . . .	105
4.1.2	PSO NM V2 . . . . .	106
4.2	Vorstellung der entwickelten Optimierungssoftware . . . . .	107
4.2.1	Simulation and Optimization Tool (SOT) . . . . .	109
4.2.2	SOT Starter . . . . .	111
4.3	Zusammenfassung . . . . .	111
<b>5</b>	<b>Module zur Inbetriebnahme elektromechanischer Achsen</b>	<b>113</b>
5.1	Automatische Modellgewinnung . . . . .	115
5.1.1	Ziel/Zweck des Moduls . . . . .	115
5.1.2	Schnittstelle des Moduls . . . . .	116
5.1.3	Vorgehen . . . . .	117
5.1.3.1	Indirekte Regelung mechanischer Systeme . . . . .	119
5.1.3.2	Direkte Regelung mechanischer Systeme . . . . .	121
5.1.3.3	Modellierung Lagereglerkaskade Siemens . . . . .	122

5.1.3.4	Berücksichtigung von Nichtlinearitäten (NL) . . . . .	126
5.1.4	Fazit und Handlungsempfehlungen . . . . .	127
5.2	Identifikation von Leistungs-/Bewertungskriterien und Nebenbedingungen	128
5.2.1	Ziel/Zweck . . . . .	128
5.2.2	Schnittstelle . . . . .	129
5.2.3	Vorgehen . . . . .	130
5.2.3.1	Optimierungskriterien und Nebenbedingungen im Zeitbereich . . . . .	132
5.2.3.2	Optimierungskriterien und Nebenbedingungen im Frequenzbereich . . . . .	135
5.2.3.3	Optimierungskriterien und Nebenbedingungen als Kombination von Zeit- und Frequenzkriterien . . . . .	140
5.2.4	Fazit und Handlungsempfehlungen . . . . .	144
5.3	Leistungsbewertung der untersuchten Optimierungsverfahren . . . . .	146
5.3.1	Ziel/Zweck . . . . .	146
5.3.2	Schnittstelle . . . . .	147
5.3.3	Vorgehen . . . . .	147
5.3.3.1	Testfunktionen . . . . .	149
5.3.3.2	Auswertung . . . . .	151
5.3.4	Fazit und Handlungsempfehlungen . . . . .	159
<b>6</b>	<b>Implementierung und Auswertung</b>	<b>161</b>
6.1	Streckenmodelle . . . . .	164
6.1.1	Zweimassensystem (ZMS) . . . . .	164
6.1.1.1	Modellierung . . . . .	165
6.1.1.2	Regler- und Kaskadenparametrierung . . . . .	166
6.1.2	Dreimassensystem (DMS) . . . . .	170
6.1.2.1	Modellierung . . . . .	170
6.1.2.2	Regler- und Kaskadenparametrierung . . . . .	170
6.2	Versuchsstand „SALTUS“ . . . . .	175
6.2.1	Modellierung . . . . .	175
6.2.2	Parametrierung des Drehzahlregelkreises . . . . .	178
6.2.2.1	Indirekt . . . . .	178
6.2.2.2	Direkt . . . . .	183
6.2.2.3	Indirekt, mit Advanced Position Control (APC) . . . . .	185
6.3	Servospindelpresse (SSP) . . . . .	186

---

6.3.1	Modellierung . . . . .	188
6.3.2	Parametrierung des Lage- und Drehzahlregelkreises . . . . .	190
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>195</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>213</b>
A.1	Parameter Optimierer . . . . .	213
A.2	Simulation and Optimization Tool (SOT) . . . . .	216
A.3	Modellgewinnung . . . . .	217
A.3.1	Algorithmus . . . . .	217
A.3.2	Ermittelte Modellparameter . . . . .	220
A.3.2.1	„SALTUS“ . . . . .	220
A.3.2.2	Servospindel­presse (SSP) . . . . .	220
A.4	Leistungsuntersuchung . . . . .	221
A.4.1	Parametrierung PSO . . . . .	221
A.4.2	Parametrierung PSO NM . . . . .	222
A.4.3	Parametrierung PSO NM V2 . . . . .	223
A.5	Maschinendaten . . . . .	225
A.6	Zusatzparametrierung Versuchsstand „SALTUS“ . . . . .	226
A.7	Reglerparametrierung bei freier Vorgabe der erwünschten Systemdämpfung . . . . .	228
<b>B</b>	<b>Lebenslauf</b>	<b>229</b>