

# Praktische Regeltechnik

Peter F. Orlowski

# Praktische Regeltechnik

Anwendungsorientierte Einführung für  
Maschinenbauer und Elektrotechniker

8. bearbeitete Auflage



Springer

Professor Dipl.-Ing. Peter F. Orlowski  
Fachhochschule Gießen-Friedberg  
Elektrische Antriebe, Regeltechnik,  
Angewandte Elektronik  
Wiesenstr. 14  
35390 Gießen  
Deutschland  
Peter.Orlowski@mf.fh-giessen.de

ISBN 978-3-642-01735-3 e-ISBN 978-3-642-01736-0  
DOI 10.1007/978-3-642-01736-0  
Springer Dordrecht Heidelberg London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1994, 1999, 2007, 2008, 2009

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

*Einbandentwurf:* eStudio Calamar S.L., Figueres/Berlin

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media ([www.springer.com](http://www.springer.com))

wisse Vollendung

getreu den Wurzeln

# Vorwort

Die vorliegende achte Auflage des Buches wurde umfangreich überarbeitet. Es sind moderne regeltechnische Aufgabenstellungen hinzugekommen, welche die praxisorientierte Anwendbarkeit des Werkes für ein Diplom- oder Bachelorstudium weiter unterstreichen.

Insbesondere die Regelung eines Brückenkrans mit Filter-Regler, die Blattwinkelregelung (Pitch-Regelung) einer Windkraftanlage, die Positionsregelung mit Linearmotor sowie eine Durchflußregelung mit Schwebekörper sind neu dazu gekommen.

Außerdem wurde das siebte Kapitel bezüglich der WINDOWS-Anwendungen an den neusten Stand für PC-Software angepaßt.

Im 8. Kapitel finden sich zusätzlich für Studierende einige typische Klausurbeispiele der Regeltechnik zum vertieften Einüben des Stoffes mit Lösungen.

Das im Buch eingesetzte Simulationsprogramm SIMLER-PC liegt in vier Sprachen vor und ist lauffähig unter allen WINDOWS-Versionen. Darin wird der neue FR<sub>I</sub>-Regleralgorithmus (Wurzelrekursion) industriebezogen angewendet und die Optimierungsmöglichkeiten zur Einstellung von Regelkreisen verbessert.

SIMLER-PC ist besonders bei der On-line-Optimierung der Regler-Parameter und der Führungsgröße den Anwendungsmöglichkeiten von beispielsweise MatLab Simulink überlegen.

SIMLER-PC läßt sich in der Vollversion kostenlos aus dem Internet herunterladen unter: [www.mmew.fh-giessen.de/dienstleistungen/Download](http://www.mmew.fh-giessen.de/dienstleistungen/Download).

Zwei Dateien mit den Namen: Simler-PC\*.ZIP und Simler-PC\*.PDF.

Linden, Frühjahr 2009

Peter F. Orlowski

# Inhaltsverzeichnis

1	Grundbegriffe der Regeltechnik .....	1
	1.1 Steuerung .....	1
	1.2 Regelung .....	3
	1.3 Begriffe und Definitionen .....	5
	1.4 Wirkschaltplan, Blockschaltplan .....	7
2	Berechnung von Regelkreisen .....	10
	2.1 Stationäres Verhalten .....	10
	2.1.1 Verstärkungen .....	10
	2.1.2 Störgrößen .....	12
	2.1.3 Statische Kennlinien .....	18
	2.2 Dynamisches Verhalten .....	26
	2.2.1 Differentialgleichungen .....	27
	2.2.2 Sprung-, Rampen- und Fahrkurvenfunktion .....	29
	2.2.3 Komplexe Rechnung .....	36
	2.2.4 Carson-Laplace-Transformation .....	38
	2.2.5 Übertragungsfunktion und Frequenzgang .....	47
3	Regelkreisglieder.....	60
	3.1 Lineare Regelkreisglieder .....	64
	3.1.1 P-Glied .....	64
	3.1.2 I-Glied .....	67
	3.1.3 D-Glied .....	72
	3.1.4 PI-Regler .....	73
	3.1.5 PD-Regler .....	78
	3.1.6 PID-Regler .....	82
	3.1.7 PT <sub>1</sub> -Glied .....	87
	3.1.8 PT <sub>2</sub> -Glied und PT <sub>n</sub> -Glied .....	94
	3.1.9 PTt-Glied .....	105
	3.1.10 PTa-Glied .....	109

---

3.2	Nichtlineare Regelkreisglieder .....	120
3.2.1	Linearisierung .....	120
3.2.2	Beschreibungsfunktion .....	123
3.3	Umformen von Blockschaltplänen .....	135
3.3.1	Regeln für lineare Regelkreisglieder .....	135
3.3.2	Regeln für nichtlineare Regelkreisglieder .....	136
4	Komponenten der Automatisierung .....	141
4.1	Regler .....	141
4.1.1	Aufbau Wirkungsweise .....	142
4.1.2	Praktische Reglereinstellung .....	147
4.2	Sollwertgeber .....	154
4.3	Stellgeräte .....	159
4.3.1	Stromrichter .....	159
4.3.2	Ventile .....	164
4.3.3	Stellmotoren und Linearantriebe .....	167
4.4	Meßeinrichtungen .....	172
5	Stabilitätskriterien und Optimierung .....	177
5.1	Stabilitätsbegriff .....	177
5.2	Bode-Diagramm .....	181
5.3	Nyquist-Kriterium .....	196
5.4	Zwei-Ortskurven-Verfahren (Z.O.V.) .....	211
5.5	Regelkreisoptimierung .....	224
5.5.1	Integralkriterien .....	224
5.5.2	Symmetrisches Optimum .....	233
5.5.3	Aufhebungskompensation .....	240
5.5.4	Störgrößenaufschaltung .....	245
5.5.5	Kaskadenregelung .....	248
5.5.6	Adaptive Regelung .....	253
5.5.7	Abtastregelung .....	257

6	Ausgewählte Beispiele der Regeltechnik .....	265
6.1	Kontinuierliche Regelungen .....	265
6.1.1	Temperaturregelungen .....	265
6.1.2	Stoffgemischregelungen .....	273
6.1.3	Zwei- und Dreipunktregelungen .....	281
6.1.4	Geschwindigkeitsregelung für Schachtförderer	291
6.1.5	Drehzahlregelung von Asynchronmaschine .....	298
6.1.6	Regelung von Wickelantrieben für Stoffbahnen	305
6.1.7	Banddickenregelung .....	321
6.1.8	Regelung einer Streckrichteinheit .....	328
6.2	Zeitdiskrete Regelungen .....	332
6.2.1	Piezoelektrische Regelung einer Meßtischachse	332
6.2.2	Regelung von Roboterantrieben mit Rechner....	336
6.2.3	Pitch-Regelung einer Windkraftanlage .....	341
6.2.4	Digitale Regelung von Fräsmaschinen mit CNC	346
6.2.5	Positionsregelung mit Linearmotor .....	349
6.2.6	pH-Wert-Regelung zur Abwasser-Neutralisation	351
7	Rechner-Simulation und -Optimierung.....	354
7.1	Das Programmpaket SIMLER-PC .....	354
7.1.1	Hardware und Schnittstellen .....	355
7.1.2	Menü-Führung und Programm-Handhabung .....	356
7.1.3	Identifikation und Regler-Optimierung .....	359
7.1.4	Stabilitätsaussage .....	362
7.2	Anwendungen .....	363
7.2.1	Das Bode-Diagramm .....	363
	PID-Regler und $PT_1$ - $PT_2$ - $PT_t$ -I-Strecke .....	363
	PID-Regler mit und ohne Begrenzung .....	364
7.2.2	Das Nyquist-Diagramm .....	366
	PID-Regler und Strecke 4. Ordnung .....	367



	7.2.3 Das Übergangsverhalten .....	369
	Sprungantwort P-, PI- und PID-Regler .....	374
	Fahrkurvenantwort nicht optimaler PID-Regler .....	374
	Störsprung nach PT <sub>3</sub> -Strecke .....	377
	Fahrkurvenantwort + Störung bei t=T <sub>st</sub> .....	377
	Optimierung Allpaß-Strecke mit F <sub>RA</sub> -Regler ....	380
	Optimale Brückenkranregelung mit F <sub>RA</sub> -Regler .....	382
	Optimierung einer Kaskadenregelung .....	384
	Einstellwerte PID-Regler im Vergleich .....	390
	F <sub>RT</sub> -Regelalgorithmus (Wurzelrekursion) .....	393
	Durchfluß-Regelung mit Schwebekörper .....	396
8	Lösungen zu Aufgaben und Klausuren .....	400
	8.1 Aufgaben .....	400
	8.2 Klausuren .....	456
9	Schaltzeichen für Übersichtsschaltpläne .....	473
10	Literaturverzeichnis .....	476
	10.1 Mathematische und Elektrotechnische Grundlagen .....	476
	10.2 Bücher zu den Grundlagen der Regeltechnik .....	477
	10.3 Vertiefende Bücher zur Regeltechnik .....	478
	10.4 Aufsätze und Datenblätter .....	479
	10.5 Zum Rechnergestützten Regelkreisentwurf .....	481
	10.6 Kleine Wegbegleitung .....	482
11	Sachverzeichnis .....	483