

Uwe Zimmermann
Harald Ortwig

Regelungstechnik II

für Ingenieure und Praktiker

Regelungstechnik II

Prof. Dr.-Ing. Harald Ortwig
Prof. Dr.-Ing. Uwe J. Zimmermann, B.E.

Trierer Systemtechnik

Uwe Zimmermann, Harald Ortwig

Regelungstechnik II

für Ingenieure und Praktiker

Shaker Verlag
Düren 2021

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.

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7886-2

ISSN 2190-6076

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Das vorliegende Buch „Regelungstechnik II“ baut auf dem Band „Regelungstechnik I“ auf und ergänzt die dort vermittelten Grundlagen um die für die anspruchsvolleren Ingenieuraufgaben in diesem essentiellen Fachgebiet erforderlichen Fachkenntnisse. Es behandelt in kompakter Form zunächst die technische Realisierung von Regeleinrichtungen sowie vermaschte Wirkungswege und geht sodann auf die Operationen für kontinuierliche Systeme und digitale Regler ein. Nach der Behandlung zeitdiskreter Systeme wird der Zustandsraum eingeführt und die Regelungen in diesem eingehend erläutert. Zur Übung und Vertiefung der Inhalte wird jedes Kapitel durch Aufgabenstellungen ergänzt, die das selbständige Wiederholen des Stoffes sowie die Prüfungsvorbereitung ermöglichen.

Während „Regelungstechnik I“ sich primär an Ingenieurstudenten im Bachelorstudium richtet, bildet „Regelungstechnik II“ die Inhalte ab, die im Masterstudium des Fachbereiches Maschinenbau der Hochschule Trier behandelt werden. Aus der Weiterentwicklung und Diversifizierung der Studiengänge resultierte der Wunsch, den Studenten über das gewohnte Skriptmaterial hinaus eine neu strukturierte, professionelle und gut verständliche Arbeitsunterlage zur Verfügung zu stellen. Beide Bücher eignen sich auch gut zur Wiederholung bzw. zum Selbststudium und richten sich daher ganz allgemein an Hochschulstudenten der Natur- und Ingenieurwissenschaften sowie verwandter Fächer, aber auch an Praktiker im Berufsleben. Das Kompendium schafft das grundlegende Verständnis sowie das Fachwissen, welches der praktisch tätige Ingenieur zur Bewältigung seiner täglich anfallenden Aufgaben im Bereich der Regelungstechnik benötigt.

Trier, im Januar 2021

Prof. Dr.-Ing. Uwe Zimmermann, B.E.

Studium des Maschinenbau an der RWTH Aachen und in den USA, Promotion am Institut für Regelungstechnik. Industrietätigkeit im Bereich Regelung schnelllaufender Grossdieselmotoren. Seit 1995 Professor für Mess- und Regelungstechnik an der Hochschule Trier.

Prof. Dr.-Ing. Harald Ortwig

Studium des Maschinenbau an der RWTH Aachen, Promotion am Institut für hydraulische und pneumatische Antriebe und Steuerungen. Industrietätigkeit im Bereich Mobilhydraulik. Seit 1993 Professor für Fluidtechnik (Hydraulik und Pneumatik) an der Hochschule Trier.

Inhaltsverzeichnis

8 Technische Realisierung von Regeleinrichtungen	1
8.1 Allgemeines	1
8.2 Regler mit elektrischer Hilfsenergie	2
8.2.1 Elektronischer Verstärker - Operationsverstärker (operational amplifier)	2
8.2.2 Elektronischer P-Regler	4
8.2.3 Elektronischer PI-Regler	7
8.2.4 Elektronischer PD-Regler	10
8.2.5 Elektronischer PID-Regler	11
8.2.6 Zusammenfassung	12
8.3 Verstärker mit hydraulischer Hilfsenergie	14
8.4 Übungsaufgaben	17
9 Vermaschte Wirkungswege	21
9.1 Allgemeines	21
9.2 Vorregelung von Störgrößen	22
9.3 Regelung mit Störgrößenaufschaltung (disturbance feedforward control)	23
9.4 Kaskadenregelung	28
9.4.1 Drehzahlregelung eines Gleichstrommotors mit unterlagelter Ankerstromregelung	35
9.4.2 Lageregelung mit unterlagertem Drehzahlwirkungsweg	35
9.4.3 Hauptwirkungsweg mit unterlagertem Stellungswirkungsweg	36
9.5 Regelung mit Vorsteuerung	38
9.6 Übungsaufgaben	42
10 Operationen für kontinuierliche Systeme	51
10.1 Laplace-Transformation	51
10.2 Übertragungsfunktion	57
10.3 Übergangsfunktion und Gewichtsfunktion	58
10.4 Grenzwertsatz	60
10.5 Das Faltungsintegral	60
10.6 Übungsaufgaben	64

11 Digitale Regelung	67
11.1 Allgemeines	67
11.2 Digitale Signale	68
11.3 Quasikontinuierliche digitale Regelung	70
11.3.1 Kontinuierliches Modell eines Abtastsystems	70
11.3.2 Digitaler PID-Regler	75
11.3.3 Simulationsbeispiele	78
11.4 Übungsaufgaben	82
12 Zeitdiskrete Systeme	85
12.1 Z-Transformation	85
12.1.1 Definition der Z-Transformation	85
12.1.2 Algorithmus des digitalen PID-Reglers	91
12.1.3 Korrespondenztafeln	91
12.2 Grenzwertsätze	95
12.3 Diskrete Faltung	96
12.4 Lineare zeitdiskrete Übertragungssysteme	99
12.5 Verknüpfungen von digitalen Übertragungsgliedern	101
12.6 Der Abtast-Halte-Prozess	103
12.7 Aliasing (Rückfaltung)	109
12.8 Zusammenhang zwischen s-Ebene und z-Ebene	111
12.9 Zeitdiskrete Modelle kontinuierlicher Systeme	121
12.10 Wurzelortskurven	123
12.11 Übungsaufgaben	130
13 Zustandsraum	141
13.1 Allgemeines	141
13.2 Darstellung von Systemen im Zustandsraum	145
13.2.1 Regelungsnormalform	145
13.2.2 Beobachtungsnormalform	149
13.2.3 Jordansche Normalform	151
13.3 Zusammenhang zwischen der Zustandsraumdarstellung und der Übertragungsfunktion	153
13.4 Zeitverhalten und Transitionsmatrix	158
13.5 Approximation von Totzeitsystemen	163
13.6 Übungsaufgaben	172

14 Regelung im Zustandsraum	177
14.1 Allgemeines	177
14.2 Vollständige Zustandsrückführung	177
14.3 Ackermann-Formel	180
14.4 Zustandsbeobachter und Zustandsrückführung	182
14.4.1 Allgemeines	182
14.4.2 Beobachtbarkeit	183
14.4.3 Steuerbarkeit	184
14.4.4 Beobachter	189
14.4.5 Regelung mit Zustandsrückführung (state-feedback control) und Beobachter	191
14.4.6 Zustandsregelung mit Führungsgrößen	193
14.5 Zustandsregler ohne bleibende Regeldifferenz	195
14.6 Beispiel: Füllstandsregelung	197
14.7 Übungsaufgaben	204