

# Springer-Lehrbuch

Jan Lunze

# Regelungstechnik 2

Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung

5., neu bearbeitete Auflage

Mit 265 Abbildungen, 55 Beispielen, 94 Übungsaufgaben  
sowie einer Einführung in das Programmsystem MATLAB

Prof. Dr.-Ing. Jan Lunze  
Ruhr-Universität Bochum  
Lehrstuhl für Automatisierungstechnik  
und Prozessinformatik  
44780 Bochum  
Lunze@atp.rub.de

ISBN 978-3-540-78462-3

e-ISBN 978-3-540-78463-0

DOI 10.1007/978-3-540-78463-0

Springer Lehrbuch ISSN 0937-7433

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

© 2008, 2006, 2004, 2002, 1997 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, 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. Text und Abbildungen wurden mit größter Sorgfalt erarbeitet. Verlag und Autor können jedoch für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

*Satz:* Reproduktionsfähige Vorlage des Autors

*Herstellung:* LE-TEX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig

*Einbandgestaltung:* WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.com

# Vorwort

Aufbauend auf den im ersten Band vermittelten Grundlagen linearer Regelungen behandelt der zweite Band die Beschreibung und Analyse von Mehrgrößensystemen, den Entwurf von Mehrgrößenreglern sowie die digitale Regelung.

Mehrgrößensysteme wurden nach der Einführung der Zustandsraumdarstellung Anfang der sechziger Jahre zunächst im Zeitbereich betrachtet. In den siebziger Jahren wurden dann die Frequenzbereichsverfahren von Eingrößen- auf Mehrgrößensysteme erweitert, so dass für beide Vorgehensweisen seit dieser Zeit eine Vielzahl von Analyse- und Entwurfsverfahren zur Verfügung steht. Allerdings haben die theoretischen Grundlagen beider Betrachtungsweisen bisher nur begrenzt Eingang in Lehrbücher für das Ingenieurstudium gefunden. Insbesondere fehlen einführende Darstellungen, in denen die Theorie mit praxisrelevanten Beispielen und Übungsaufgaben verknüpft ist und in denen ein Anschluss an die rechnergestützten Entwurfswerkzeuge wie beispielsweise MATLAB hergestellt wird. Diese Lücke zu schließen ist ein Anliegen des vorliegenden Buches.

Die Stoffauswahl wurde wesentlich durch meine Erfahrungen bei der Behandlung praktischer Mehrgrößenregelungsaufgaben aus den Gebieten der Elektroenergieversorgung, der chemischen Verfahrenstechnik und der Bioverfahrenstechnik bestimmt. Diese Anwendungen legen es nahe, von der Vielzahl der im Laufe der Zeit entwickelten Verfahren diejenigen herauszugreifen, die einerseits von praktisch erfüllbaren Voraussetzungen ausgehen und ein gutes theoretisches Fundament haben, andererseits zu überschaubaren Analyse- und Entwurfsergebnissen führen. Viele **Beispiele** verdeutlichen diesen Charakter der beschriebenen Methoden. Der praktische Hintergrund der Beispiele kann hier zwar nur kurz angesprochen werden. Die betrachteten Regelungsaufgaben sowie die zu ihrer Lösung verwendeten Modelle zeigen jedoch, wo die wichtigsten Schwierigkeiten bei der Lösung von Regelungsaufgaben liegen und wo praktisch akzeptable Vereinfachungen möglich sind.

Die digitale Regelung wird im dritten Teil dieses Buches ausgehend von der Frage behandelt, welche Veränderungen sich für den Regelkreis ergeben, wenn anstelle eines kontinuierlich arbeitenden Reglers ein Abtastregler eingesetzt wird. Der Schwerpunkt liegt in der Behandlung derjenigen Probleme, die sich beim Übergang von der kontinuierlichen zur zeitdiskreten Betrachtungsweise ändern bzw. neu entstehen. Die Gliederung des dritten Teiles ähnelt deshalb der des ersten Teiles, wodurch die Parallelen bei der Behandlung kontinuierlicher und zeitdiskreter Systeme deutlich zum Ausdruck kommen und die neuen Aspekte der Abtastsysteme herausgehoben werden.

In Bezug auf einige Themen geht das Buch wesentlich über den Stoff bisheriger Lehrbücher und Monografien hinaus. So werden u. a. die strukturelle Steuerbarkeit und strukturelle Beobachtbarkeit, das Innere-Modell-Prinzip, Einstellregeln für Mehrgrößensysteme, die robuste Regelung sowie die dezentrale Regelung behandelt. Die zu diesen Themen vorgestellten Methoden entstanden aus Forschungsarbeiten der letzten 25 Jahre, die zu praktikablen Analyse- und Entwurfsverfahren geführt haben bzw. die Regelungstheorie an wichtigen Punkten ergänzen.

Bei der Vermittlung des Stoffes wird Wert auf eine in allen Einzelheiten durchschaubare Darstellung gelegt. Für Mehrgrößensysteme entsteht dabei jedoch das Problem, dass selbst sehr einfache Beispiele nicht mehr von Hand gerechnet werden können und der Lösungsweg nicht immer in allen Einzelheiten aufgeschrieben werden kann. Hier kommt das bereits im ersten Band eingeführte **Programmsystem MATLAB** zum Einsatz, das umfangreiche numerische Rechnungen übernimmt. Die Behandlung der Beispiele kann sich deshalb auf die Herausarbeitung der numerisch zu lösenden Probleme beschränken und mit den von MATLAB gelieferten Ergebnissen weiterarbeiten.

Zahlreiche **Übungsaufgaben** dienen zur Festigung des Stoffes. Die Lösungen der wichtigsten Aufgaben sind im Anhang angegeben.

Die am Ende jedes Kapitels gegebenen **Literaturhinweise** beziehen sich auf Aufsätze und Bücher, die maßgeblich zur Entwicklung der Regelungstheorie beigetragen haben bzw. in denen einzelne Aspekte des beschriebenen Stoffes vertieft dargestellt sind.

Ein großer Teil der für Mehrgrößensysteme entwickelten Ansätze setzt umfangreiche mathematische Kenntnisse voraus. Die Stoffauswahl dieses Buches ist u. a. durch das Ziel bestimmt, die wichtigsten Herangehensweisen und Verfahren so darzustellen, dass von den Lesern lediglich Kenntnisse über die Matrizenrechnung sowie die Fourier- und Laplacetransformation vorausgesetzt werden müssen, die den Ingenieurstudenten in den ersten Semestern vermittelt werden.

Ich verwende dieses Buch für eine weiterführende Regelungstechnikvorlesung für Elektrotechnikstudenten. In dieser einsemestrigen Veranstaltung werden die meisten der hier behandelten Themen angesprochen, allerdings nicht immer in der beschriebenen Tiefe. Das Buch dient als Vorlesungsskript, beschreibt Erweiterungen des behandelten Stoffes und dient als Vorlage für die Rechenübungen. Die im Anhang angegebenen Projektaufgaben sind parallel zur Vorlesung mit dem Programmsystem MATLAB zu lösen. Sie vermitteln erste Erfahrungen bei der Anwendung der behandelten Methoden.

An der mehrjährigen Umarbeitung meiner Vorlesung, aus der dieses Buch entstand, haben meine Mitarbeiter und Studenten großen Anteil. Die Herren Dr.-Ing. *Florian Wenck* und Dipl.-Math. *JÖRG PFAHLER* haben in den beiden letzten Jahren die zu dieser Vorlesung gehörende Übung geleitet und wertvolle Hinweise zur Verbesserung der Übungsaufgaben gegeben. Bedanken möchte ich mich auch für vielfältige Anregungen meiner Fachkollegen, die dieses Buch in ihrer Vorlesung einsetzen.

zen. Für die neue Druckvorlage zeichnete Frau *Andrea Marschall* einige Bilder neu.

Der Text wurde für die fünfte Auflage entsprechend den Erfahrungen bei der Verwendung des Buches in Vorlesungen und Übungen überarbeitet bzw. ergänzt. Die Beschreibung des Programmsystems MATLAB wurde der aktuellen Version 7.5 (Release R2007b) angepasst.

Bochum, im Januar 2008

*J. Lunze*

Auf der Homepage [www.rub.de/atp](http://www.rub.de/atp) → Books des Lehrstuhls für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik der Ruhr-Universität Bochum finden Interessenten weitere Informationen zu den Beispielen, die zur Erzeugung von Bildern verwendeten MATLAB-Programme sowie die Abbildungen dieses Buches für den Gebrauch in Lehrveranstaltungen.

# Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Anwendungsbeispiele .....	XVII
Inhaltsübersicht des ersten Bandes .....	XXI
Hinweise zum Gebrauch des Buches .....	XXIII

## Teil 1: Analyse von Mehrgrößensystemen

<b>1 Einführung in die Mehrgrößenregelung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Regelungsaufgaben mit mehreren Stell- und Regelgrößen .....	1
1.1.1 Charakteristika von Mehrgrößensystemen .....	1
1.1.2 Beispiele für Mehrgrößenregelungsaufgaben .....	4
1.2 Mehrgrößenregelkreis .....	8
1.2.1 Regelungsaufgabe .....	8
1.2.2 Regelkreisstrukturen .....	9
1.3 Probleme und Lösungsmethoden für Mehrgrößenregelungen .....	11
Literaturhinweise .....	13
<b>2 Beschreibung und Verhalten von Mehrgrößensystemen .....</b>	<b>15</b>
2.1 Beschreibung von Mehrgrößensystemen im Zeitbereich .....	15
2.1.1 Differenzialgleichungen .....	15
2.1.2 Zustandsraummodell .....	16
2.1.3 Übergangsfunktionsmatrix und Gewichtsfunktionsmatrix ...	18
2.2 Beschreibung im Frequenzbereich .....	20
2.2.1 E/A-Beschreibung .....	20
2.2.2 Beschreibung des Übertragungsverhaltens mit Hilfe der ROSENBROCK-Systemmatrix .....	23
2.3 Strukturierte Beschreibungsformen .....	24
2.3.1 Reihen-, Parallel- und Rückführschaltungen .....	24
2.3.2 Systeme in P- und V-kanonischer Struktur .....	27
2.3.3 Beliebige verkoppelte Teilsysteme .....	30
2.4 Verhalten von Mehrgrößensystemen .....	37
2.4.1 Zeitverhalten .....	37
2.4.2 Verhalten im Frequenzbereich .....	44

2.4.3	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten	45
2.5	Pole und Nullstellen	48
2.5.1	Pole	48
2.5.2	Übertragungsnullstellen	48
2.5.3	Invariante Nullstellen	52
2.6	Stabilität von Mehrgrößensystemen	57
2.7	MATLAB-Funktionen für die Analyse von Mehrgrößensystemen	59
	Literaturhinweise	62
<b>3</b>	<b>Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit</b>	<b>63</b>
3.1	Steuerbarkeit	63
3.1.1	Problemstellung und Definition der Steuerbarkeit	63
3.1.2	Steuerbarkeitskriterium von KALMAN	65
3.1.3	Steuerbarkeit der kanonischen Normalform	77
3.1.4	Steuerbarkeitskriterium von HAUTUS	81
3.1.5	Nicht vollständig steuerbare Systeme	82
3.1.6	Erweiterungen	90
3.2	Beobachtbarkeit	92
3.2.1	Problemstellung und Definition der Beobachtbarkeit	92
3.2.2	Beobachtbarkeitskriterium von KALMAN	95
3.2.3	Dualität von Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	101
3.2.4	Weitere Beobachtbarkeitskriterien	101
3.2.5	Nicht vollständig beobachtbare Systeme	103
3.3	KALMAN-Zerlegung des Zustandsraummodells	108
3.4	Strukturelle Analyse linearer Systeme	116
3.4.1	Struktur dynamischer Systeme	116
3.4.2	Strukturelle Steuerbarkeit und strukturelle Beobachtbarkeit	119
3.4.3	Strukturell feste Eigenwerte	126
3.5	Realisierbarkeit und Realisierung von Mehrgrößensystemen	132
3.6	MATLAB-Funktionen	138
	Literaturhinweise	139

## Teil 2: Entwurf von Mehrgrößenreglern

<b>4</b>	<b>Struktur und Eigenschaften von Mehrgrößenregelkreisen</b>	<b>141</b>
4.1	Struktur von Mehrgrößenreglern	141
4.1.1	Zustands- und Ausgangsrückführungen	141
4.1.2	Dynamische Mehrgrößenregler	147
4.1.3	Dezentrale Regelung	151
4.2	Grundlegende Eigenschaften von Mehrgrößenregelkreisen	154
4.2.1	Pole und Nullstellen des Führungsverhaltens	154
4.2.2	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit des Regelkreises	158
4.3	Stabilität von Mehrgrößenregelkreisen	160

4.3.1	Stabilitätsanalyse anhand der Pole des Regelkreises . . . . .	160
4.3.2	HSU-CHEN-Theorem . . . . .	162
4.3.3	Nyquistkriterium für Mehrgrößensysteme . . . . .	164
4.3.4	Stabilität bei kleiner Kreisverstärkung . . . . .	167
4.3.5	Robuste Stabilität . . . . .	170
4.4	Stationäres Verhalten von Regelkreisen . . . . .	177
4.4.1	Sollwertfolge und Störunterdrückung . . . . .	177
4.4.2	Entwurf von Vorfiltern zur Sicherung der Sollwertfolge . . . . .	179
4.4.3	Störgrößenaufschaltung . . . . .	181
4.4.4	PI-Mehrgrößenregler . . . . .	182
4.4.5	Verallgemeinerte Folgeregelung . . . . .	184
4.5	Kriterien für die Wahl der Regelkreisstruktur . . . . .	188
4.5.1	Auswahl von Stell- und Regelgrößen anhand der Pole und Nullstellen der Regelstrecke . . . . .	188
4.5.2	Kopplungsanalyse einer dezentralen Regelung . . . . .	189
4.5.3	Auswahl von Stellgrößen . . . . .	192
4.5.4	Beispiele . . . . .	194
	Literaturhinweise . . . . .	202
<b>5</b>	<b>Einstellregeln für PI-Mehrgrößenregler . . . . .</b>	<b>203</b>
5.1	Zielstellung . . . . .	203
5.2	Gegenkopplungsbedingung für I-Mehrgrößenregler . . . . .	205
5.3	Einstellung von I-Reglern . . . . .	212
5.3.1	Idee der Reglereinstellung . . . . .	212
5.3.2	Festlegung der Reglermatrix . . . . .	213
5.3.3	Festlegung des Tuningfaktors . . . . .	216
5.3.4	Erweiterung auf PI-Regler . . . . .	219
5.3.5	Beispiel . . . . .	221
5.4	Robustheit des eingestellten PI-Reglers . . . . .	227
5.5	MATLAB-Programm zur Reglereinstellung . . . . .	231
	Literaturhinweise . . . . .	231
<b>6</b>	<b>Reglerentwurf zur Polzuweisung . . . . .</b>	<b>233</b>
6.1	Zielstellung . . . . .	233
6.2	Polzuweisung durch Zustandsrückführung . . . . .	235
6.2.1	Polzuweisung für Systeme in Regelungsnormalform . . . . .	235
6.2.2	Erweiterung auf beliebige Modellform . . . . .	237
6.2.3	Diskussion der Lösung . . . . .	239
6.2.4	Darstellung der Reglerparameter in Abhängigkeit von den Eigenwerten . . . . .	244
6.3	Erweiterung auf Regelstrecken mit mehreren Stellgrößen . . . . .	246
6.3.1	Dyadische Regelung . . . . .	247
6.3.2	Vollständige Modale Synthese . . . . .	249
6.4	Polzuweisung durch Ausgangsrückführung . . . . .	253

6.4.1	Überlegungen zu den Freiheitsgraden von Ausgangsrückführungen .....	253
6.4.2	Näherung einer Zustandsrückführung durch eine Ausgangsrückführung .....	255
6.4.3	Ersetzen einer Zustandsrückführung durch einen dezentralen Regler .....	263
6.5	Polzuweisung durch dynamische Kompensation .....	272
6.6	MATLAB-Programme für den Entwurf zur Polzuweisung .....	273
	Literaturhinweise .....	277
<b>7</b>	<b>Optimale Regelung</b> .....	<b>279</b>
7.1	Grundgedanke der optimalen Regelung .....	279
7.2	Lösung des LQ-Problems .....	286
7.2.1	Umformung des Gütefunctionals .....	286
7.2.2	Ableitung einer notwendigen Optimalitätsbedingung .....	288
7.2.3	Optimalreglergesetz .....	290
7.2.4	Lösung der Riccatigleichung .....	292
7.3	Eigenschaften des LQ-Regelkreises .....	293
7.3.1	Stabilität des Regelkreises .....	294
7.3.2	Eigenschaft der Rückführdifferenzmatrix .....	294
7.3.3	Stabilitätsrand .....	296
7.3.4	Abhängigkeit der Eigenwerte des Regelkreises von den Wichtungsmatrizen .....	298
7.3.5	Diskussion der angegebenen Eigenschaften .....	299
7.4	Rechnergestützter Entwurf von LQ-Regelungen .....	300
7.4.1	Entwurfsalgorithmus .....	300
7.4.2	Wahl der Wichtungsmatrizen .....	301
7.4.3	Beispiele .....	304
7.5	Erweiterungen .....	309
7.6	Optimale Ausgangsrückführung .....	313
7.7	$H^\infty$ -optimaler Regler .....	317
7.7.1	Erweiterungen der optimalen Regelung .....	317
7.7.2	$H^\infty$ -Optimierungsproblem .....	318
7.7.3	Lösung des $H^\infty$ -Optimierungsproblems .....	322
7.8	Optimalreglerentwurf mit MATLAB .....	326
	Literaturhinweise .....	328
<b>8</b>	<b>Beobachterentwurf</b> .....	<b>331</b>
8.1	Beobachtungsproblem .....	331
8.2	LUENBERGER-Beobachter .....	335
8.2.1	Struktur des Beobachters .....	335
8.2.2	Konvergenz des Beobachters .....	337
8.2.3	Wahl der Rückführmatrix $\mathbf{L}$ .....	337
8.2.4	Berechnung des Beobachters aus der Beobachtungsnormalform .....	338

8.2.5	Störverhalten des Beobachters	339
8.3	Realisierung einer Zustandsrückführung mit Hilfe eines Beobachters	341
8.3.1	Beschreibung des Regelkreises	341
8.3.2	Separationstheorem	342
8.3.3	Entwurfsverfahren	344
8.4	Reduzierter Beobachter	351
8.5	Weitere Anwendungsgebiete von Beobachtern	357
8.6	Beziehungen zwischen LUENBERGER-Beobachter und KALMAN-Filter	359
8.7	Beobachterentwurf mit MATLAB	362
	Literaturhinweise	365
<b>9</b>	<b>Reglerentwurf mit dem Direkten Nyquistverfahren</b>	<b>367</b>
9.1	Grundidee des Direkten Nyquistverfahrens	367
9.2	Stabilitätsanalyse unter Verwendung von Abschätzungen	369
9.2.1	Betrachtungen zum Nyquistkriterium	369
9.2.2	Abschätzung der Eigenwerte der Rückführdifferenzmatrix	370
9.2.3	Stabilitätsbedingung für ein dezentral geregeltes System	373
9.2.4	Integrität des Regelkreises	374
9.3	Entwurf mit dem Direkten Nyquistverfahren	376
9.4	Verbesserung der Analyse des Regelkreises	381
9.4.1	Ableitung einer Stabilitätsbedingung aus Robustheitsbetrachtungen	382
9.4.2	Abschätzung des E/A-Verhaltens des Regelkreises	386
9.5	Entkopplung der Regelkreise	394
9.6	Entwurfsdurchführung mit MATLAB	400
	Literaturhinweise	406

### Teil 3: Digitale Regelung

<b>10</b>	<b>Einführung in die digitale Regelung</b>	<b>409</b>
10.1	Digitaler Regelkreis	409
10.2	Abtaster und Halteglied	411
10.2.1	Abtaster	411
10.2.2	Halteglied	418
10.2.3	Wahl der Abtastzeit	420
10.3	Vergleich von kontinuierlichem und zeitdiskretem Regelkreis	422
	Literaturhinweise	424
<b>11</b>	<b>Beschreibung und Analyse zeitdiskreter Systeme im Zeitbereich</b>	<b>425</b>
11.1	Beschreibung zeitdiskreter Systeme	425
11.1.1	Modellbildungsaufgabe	425

11.1.2	Beschreibung zeitdiskreter Systeme durch Differenzgleichungen . . . . .	426
11.1.3	Zustandsraummodell . . . . .	430
11.1.4	Ableitung des Zustandsraummodells aus der Differenzgleichung . . . . .	432
11.1.5	Zeitdiskrete Systeme mit Totzeit . . . . .	435
11.1.6	Ableitung des Zustandsraummodells eines Abtastsystems aus dem Modell des kontinuierlichen Systems . . . . .	437
11.1.7	Kanonische Normalform . . . . .	443
11.2	Verhalten zeitdiskreter Systeme . . . . .	444
11.2.1	Lösung der Zustandsgleichung . . . . .	444
11.2.2	Bewegungsgleichung in kanonischer Darstellung . . . . .	446
11.2.3	Übergangsfolge und Gewichtsfolge . . . . .	449
11.2.4	Darstellung des E/A-Verhaltens durch eine Faltungssumme . . . . .	455
11.2.5	Übergangsverhalten und stationäres Verhalten . . . . .	456
11.3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit zeitdiskreter Systeme . . . . .	459
11.3.1	Definitionen und Kriterien . . . . .	459
11.3.2	Steuerbarkeitsanalyse . . . . .	460
11.3.3	Beobachtbarkeitsanalyse . . . . .	469
11.3.4	Weitere Ergebnisse zur Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit . . . . .	473
11.4	Pole und Nullstellen . . . . .	473
11.5	Stabilität . . . . .	475
11.5.1	Zustandsstabilität . . . . .	475
11.5.2	E/A-Stabilität . . . . .	479
11.6	MATLAB-Funktionen für die Analyse des Zeitverhaltens zeitdiskreter Systeme . . . . .	481
	Literaturhinweise . . . . .	483
<b>12</b>	<b>Beschreibung und Analyse zeitdiskreter Systeme im Frequenzbereich</b>	<b>485</b>
12.1	$\mathcal{Z}$ -Transformation . . . . .	485
12.1.1	Definition . . . . .	485
12.1.2	Eigenschaften . . . . .	490
12.2	$\mathcal{Z}$ -Übertragungsfunktion . . . . .	493
12.2.1	Definition . . . . .	493
12.2.2	Berechnung . . . . .	494
12.2.3	Eigenschaften und grafische Darstellung . . . . .	497
12.2.4	Pole und Nullstellen . . . . .	500
12.2.5	Übertragungsfunktion zusammengesetzter Übertragungsglieder . . . . .	504
12.3	MATLAB-Funktionen für die Analyse zeitdiskreter Systeme im Frequenzbereich . . . . .	504
	Literaturhinweise . . . . .	505

<b>13 Digitaler Regelkreis</b> .....	507
13.1 Regelkreisstrukturen .....	507
13.2 Stabilitätsprüfung digitaler Regelkreise .....	509
13.2.1 Stabilitätsprüfung anhand der Pole des geschlossenen Kreises	509
13.2.2 Nyquistkriterium .....	510
13.3 Stationäres Verhalten digitaler Regelkreise .....	514
<b>14 Entwurf von Abtastreglern</b> .....	517
14.1 Entwurfsvorgehen .....	517
14.2 Zeitdiskrete Realisierung kontinuierlicher Regler .....	518
14.2.1 Approximation kontinuierlicher Regler durch Verwendung von Methoden der numerischen Integration .....	518
14.2.2 Approximation des PN-Bildes .....	525
14.2.3 Anwendungsgebiet .....	527
14.3 Reglerentwurf anhand des zeitdiskreten Streckenmodells .....	527
14.3.1 Entwurf einschleifiger Regelungen anhand des PN-Bildes des geschlossenen Kreises .....	527
14.3.2 Entwurf von Mehrgrößenreglern durch Polzuweisung .....	529
14.3.3 Zeitdiskrete optimale Regelung .....	530
14.3.4 Beobachter für zeitdiskrete Systeme .....	530
14.4 Regler mit endlicher Einstellzeit .....	532
14.5 MATLAB-Funktionen für den Entwurf digitaler Regler .....	540
Literaturhinweise .....	541
<b>15 Ausblick auf weiterführende Regelungskonzepte</b> .....	543
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	545

## Anhänge

<b>Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben</b> .....	551
<b>Anhang 2: Matrizenrechnung</b> .....	621
A2.1 Bezeichnungen und einfache Rechenregeln .....	621
A2.2 Eigenwerte und Eigenvektoren .....	623
A2.3 Singulärwertzerlegung .....	626
A2.4 Determinantensätze .....	628
A2.5 Normen von Vektoren und Matrizen .....	629
A2.6 Definitheit .....	630
A2.7 Lösung linearer Gleichungssysteme .....	631
A2.8 Nichtnegative Matrizen und M-Matrizen .....	631
Literaturhinweise .....	636

---

<b>Anhang 3: MATLAB-Programme</b> .....	637
A3.1 Funktionen für den Umgang mit Matrizen und Vektoren .....	637
A3.2 MATLAB-Funktionen für die Systemanalyse .....	638
A3.3 Funktionen für den Reglerentwurf .....	641
A3.4 Zusammenstellung der Programme .....	641
<b>Anhang 4: Aufgaben zur Prüfungsvorbereitung</b> .....	643
<b>Anhang 5: Projektaufgaben</b> .....	647
<b>Anhang 6: Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen</b> .....	655
<b>Anhang 7: Korrespondenztabelle der Funktionaltransformationen</b> .....	659
<b>Anhang 8: Fachwörter deutsch – englisch</b> .....	661
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	665

# Verzeichnis der Anwendungsbeispiele

## Regelung von Elektroenergieversorgungssystemen

### • Frequenz-Übergabeleistungsregelung (FÜ-Regelung)

Kalmanzerlegung eines Elektroenergieversorgungsnetzes (Aufgabe 3.10) . . . .	115
Netzkennlinienverfahren für die FÜ-Regelung von Elektroenergienetzen (Aufgabe 5.1 mit Lösung) . . . . .	210, 567
Dezentrale FÜ-Regelung (Beispiel 6.4) . . . . .	264
Entwurf einer FÜ-Regelung als Optimalregler (Aufgabe 7.5 mit Lösung) . . . .	328, 585
Entwurf einer FÜ-Regelung mit dem Direkten Nyquistverfahren (Aufgabe 9.5 mit Lösung) . . . . .	406, 598
Entwurf einer dezentralen FÜ-Regelung (Projektaufgabe A5.6 mit Lösung) . .	650, 614

### • Knotenspannungsregelung

Spannungs-Blindleistungsverhalten eines Elektroenergienetzes (Aufgabe 2.4)	35
Entwurf einer dezentralen Knotenspannungsregelung (Beispiel 9.1) . . . . .	377
Verbesserte Abschätzung für das Verhalten der dezentralen Knotenspannungsregelung (Beispiel 9.2) . . . . .	389
Knotenspannungsregelung eines Elektroenergienetzes mit zwei Teilnetzen (Projektaufgabe A5.5) . . . . .	650

### • Dampferzeugerregelung

Verhalten eines Dampferzeugers (Beispiel 2.2) . . . . .	41
Kalmanzerlegung eines Dampferzeugers (Aufgabe 3.11) . . . . .	115
Minimale Realisierung eines Dampferzeugers (Aufgabe 3.18 mit Lösung) . . . .	138, 565
Optimalreglerentwurf für einen Dampferzeuger (Aufgabe 7.4 mit Lösung) . . .	327, 581
Regelung eines Dampferzeugers (Projektaufgabe A5.2) . . . . .	648

## Prozessregelung

Regelungsaufgabe für einen Wärmetauscher (Beispiel 1.1) . . . . .	4
Regelung einer Destillationskolonne (Beispiel 1.2) . . . . .	5

<b>• Regelung einer Anlage zur Herstellung von Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung</b>	
Einstellung der PI-Regelung für die AHL-Anlage (Beispiel 5.1) .....	221
Zeitdiskrete Realisierung des PI-Reglers (Aufgabe 14.2) .....	525
Analyse und Regelung der AHL-Anlage (Projektaufgabe A5.3) .....	649
<b>• Analyse und Regelung von Rührkesselreaktoren</b>	
Beschreibung eines Rührkesselreaktors in V-kanonischer Struktur (Beispiel 2.1) .....	29
Steuerbarkeit gekoppelter Rührkesselreaktoren (Beispiel 3.1) .....	68
Steuerbarkeit gekoppelter Rührkesselreaktoren mit zeitdiskreter Eingangsgröße (Beispiel 11.5) .....	462
Beobachtbarkeit gekoppelter Rührkesselreaktoren (Beispiel 3.7) .....	98
Beobachtbarkeit der Füllstände eines Behältersystems (Aufgabe 3.9) .....	108
Reduzierter Beobachter für zwei gekoppelte Rührkesselreaktoren (Aufgabe 8.4) .....	356
Konzentrationsregelung gekoppelter Rührkesselreaktoren durch Zustandsrückführung (Beispiel 6.1) .....	242
Stabilitätsanalyse der Konzentrationsregelung (Beispiel 4.1) .....	166
Konzentrationsregelung gekoppelter Rührkesselreaktoren durch Ausgangsrückführung (Beispiel 6.3) .....	260
Zustandsraummodell eines Mischprozesses (Aufgabe 2.1) .....	18
Regelung eines Mischprozesses (Projektaufgabe A5.8) .....	653
<b>• Regelung eines Biogasreaktors</b>	
Regelungsaufgaben für einen Biogasreaktor (Beispiel 1.4) .....	6
Kopplungseigenschaften eines Biogasreaktors (Beispiel 4.5) .....	199
Existenz von PI-Reglern für einen Biogasreaktor (Beispiel 5.2) .....	230
Zeitdiskrete Messung der Betriebsgrößen (Aufgabe 10.1) .....	421
<b>• Regelung einer Klärschlammverbrennungsanlage</b>	
Auswahl der Stellgrößen für die Regelung einer Klärschlammverbrennungsanlage (Beispiel 4.4) .....	194
Einstellung der PI-Regelung für die Klärschlammverbrennungsanlage (Aufgabe 5.2) .....	226
Zeitdiskretes Modell der Klärschlammverbrennungsanlage (Aufgabe 11.5) ...	443
Analyse und Regelung einer Klärschlammverbrennungsanlage (Projektaufgabe A5.4) .....	649

## Regelung von Fahrzeugen und Flugkörpern

Beobachtbarkeit der Satellitenbewegung (Aufgabe 3.8 mit Lösung) .....	107, 557
Flugüberwachung als zeitdiskreter Vorgang (Aufgabe 10.1) .....	421
<b>• Flugregelung</b>	
Autopilot für ein Flugzeug (Beispiel 1.3) .....	6
Optimalregler für die Rollbewegung eines Flugzeuges (Beispiel 7.2) .....	304
Entwurf eines Reglers mit endlicher Einstellzeit für die Rollbewegung eines Flugzeuges (Aufgabe 14.4) .....	539
<b>• Regelung einer Magnetschwebbahn</b>	
Stabilitätsprüfung der geregelten Magnetschwebbahn (Beispiel 4.2) .....	167
Stabilisierung der Magnetschwebbahn durch Zustandsrückführung (Aufgabe 6.5 mit Lösung) .....	274, 576
Beobachter für die Magnetschwebbahn (Aufgabe 8.6 mit Lösung) .....	364, 588

## Regelung mechanischer Systeme

Strukturelle Steuerbarkeit eines elektrischen Rotationsantriebs (Aufgabe 3.14 mit Lösung) .....	129, 560
<b>• Analyse und Regelung einer Verladebrücke</b>	
Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit einer Verladebrücke (Aufgabe 3.15 mit Lösung) .....	130, 561
Steuerbarkeit einer Verladebrücke mit zeitdiskreter Eingangsgröße (Beispiel 11.7) .....	468
Regelung einer Verladebrücke mit Zustandsrückführung (Aufgabe 6.2 mit Lösung) .....	244, 573
Regelung einer Verladebrücke mit Ausgangsrückführung (Aufgabe 6.3 mit Lösung) .....	255, 576
Positionsregelung für eine Verladebrücke (Projektaufgabe A5.1) .....	648
<b>• Stabilisierung eines invertierten Pendels</b>	
Kalmanzerlegung des Zustandsraummodells des invertierten Pendels (Beispiel 3.9) .....	110
Stabilisierung des invertierten Pendels durch Zustandsrückführung (Aufgabe 6.4) .....	273
LQ-Problem für das invertierte Pendel (Beispiel 7.1) .....	284
Stabilisierung des invertierten Pendels durch einen Optimalregler (Beispiel 7.3) .....	305
Beobachter für das invertierte Pendel (Beispiel 8.1) .....	346
Reduzierter Beobachter (Beispiel 8.2) .....	355

## Regelung eines Gleichstrommotors

Beobachtbarkeit eines Gleichstrommotors (Aufgabe 3.12 mit Lösung) . . . . .	125, 558
Störverhalten eines digital geregelten Gleichstrommotors (Beispiel 10.2) . . . . .	416
Zeitdiskrete Realisierung einer Drehzahlregelung (Beispiel 14.1) . . . . .	523
Regler mit endlicher Einstellzeit für einen Gleichstrommotor (Beispiel 14.3) . . . . .	536

## Weitere Anwendungen

Raumtemperaturregelung mit fester Einstellzeit (Aufgabe 14.3) . . . . .	539
Regelung einer Züchtungsanlage für GaAs-Einkristalle (Aufgabe 9.4 mit Lösung) . . . . .	403, 594
Analyse und Regelung der Einkristallzüchtungsanlage (Projektaufgabe A5.7) . . . . .	652
Zeitdiskrete Zustandsraumbeschreibung einer Rinderzucht (Aufgabe 11.1 mit Lösung) . . . . .	434, 603
Preisdynamik in der Landwirtschaft (Aufgabe 11.14 mit Lösung) . . . . .	481, 609
Zeitdiskrete Zustandsraumbeschreibung der Lagerhaltung (Aufgabe 11.2) . . . . .	434
Zustandsraummodell eines Filters (Beispiel 11.4) . . . . .	452
Zustandsraummodell der Fußball-Bundesliga (Aufgabe 11.3) . . . . .	435
Beobachtbarkeit eines Oszillators (Aufgabe 11.11 mit Lösung) . . . . .	472, 607
Stabilitätsanalyse eines Bankkontos (Aufgabe 11.13) . . . . .	480

# Inhaltsübersicht des ersten Bandes

## **Zielstellung der Regelungstechnik**

## **Beispiele für technische und nichttechnische Regelungsaufgaben**

## **Strukturelle Beschreibung dynamischer Systeme**

Blockschaltbild, Signalflussgraf

## **Systembeschreibung im Zeitbereich**

Beschreibung durch Differenzialgleichungen, Zustandsraummodell

## **Verhalten linearer Systeme**

Lösung der Zustandsgleichung

Kennfunktionen des dynamischen Übertragungsverhaltens

Modellvereinfachung, Kennwertermittlung

## **Beschreibung linearer Systeme im Frequenzbereich**

Frequenzgang, Übertragungsfunktion

Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Frequenzbereich

## **Regelkreis**

Modell des Standardregelkreises

## **Stabilität rückgekoppelter Systeme**

Nyquistkriterium; robuste Stabilität

## **Entwurf einschleifiger Regelkreise**

Übersicht über die Entwurfsverfahren

Einstellregeln für PID-Regler

## **Reglerentwurf anhand des PN-Bildes des geschlossenen Kreises**

Konstruktionsvorschriften für Wurzelortskurven

Reglerentwurf mittels Wurzelortskurve

## **Reglerentwurf anhand der Frequenzkennlinie der offenen Kette**

Frequenzkennlinie und Regelgüte

Reglerentwurf auf Führungs- und auf Störverhalten

## **Weitere Entwurfsverfahren**

## **Erweiterung der Regelungsstruktur**

6. Auflage 2007

mit 390 Abbildungen, 67 Beispielen und 166 Übungsaufgaben

# Hinweise zum Gebrauch des Buches

**Formelzeichen.** Die Wahl der Formelzeichen hält sich an folgende Konventionen: Kleine kursive Buchstaben bezeichnen Skalare, z. B.  $x$ ,  $a$ ,  $t$ . Vektoren sind durch kleine halbfette Buchstaben, z. B.  $\boldsymbol{x}$ ,  $\boldsymbol{a}$ , und Matrizen durch halbfette Großbuchstaben, z. B.  $\boldsymbol{X}$ ,  $\boldsymbol{A}$ , dargestellt. Entsprechend dieser Festlegung werden die Elemente der Matrizen und Vektoren durch kursive Kleinbuchstaben (mit Indizes) symbolisiert, beispielsweise mit  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_i$  für Elemente des Vektors  $\boldsymbol{x}$  und  $a_{12}$ ,  $a_{ij}$  für Elemente der Matrix  $\boldsymbol{A}$ . Werden Größen, die im allgemeinen Fall als Vektor oder Matrix geschrieben werden, in einem einfachen Beispiel durch Skalare ersetzt, so wird dies durch den Übergang zu kleinen kursiven Buchstaben verdeutlicht, beispielsweise durch Verwendung von  $x$ ,  $a$  anstelle von  $\boldsymbol{x}$  bzw.  $\boldsymbol{A}$ . Dann gelten die vorher mit Vektoren und Matrizen geschriebenen Gleichungen mit den skalaren Größen gleichen Namens.

Mengen sind durch kalligrafische Buchstaben dargestellt, z. B.  $\mathcal{Q}$ ,  $\mathcal{P}$ .

Funktionen der Zeit und deren Fourier-, Laplace- und  $\mathcal{Z}$ -Transformierte haben denselben Namen, unterscheiden sich aber in der Größe. Den Funktionen  $f(t)$  bzw.  $f(k)$  im Zeitbereich sind die Funktionen  $F(j\omega)$ ,  $F(s)$  bzw.  $F(z)$  im Frequenzbereich zugeordnet.

Bei den Indizes wird zwischen Abkürzungen und Laufindizes unterschieden. Bei  $k_s$  ist der Index „s“ die Abkürzung für „statisch“ und deshalb steil gesetzt, während bei  $x_p$  das  $p$  einen Parameter darstellt, der beliebige Werte annehmen kann und deshalb kursiv gesetzt ist.

Die verwendeten Bezeichnungen orientieren sich an den international üblichen und weichen deshalb auch in wichtigen Fällen von der DIN 19299 ab. Beispielsweise werden für die Regelgröße und die Stellgröße die Buchstaben  $y$  und  $u$  verwendet.  $x$  bzw.  $\boldsymbol{x}$  ist das international gebräuchliche Formelzeichen für eine Zustandsvariable bzw. den Zustandsvektor.

Eine Zusammenstellung der wichtigsten Formelzeichen enthält Anhang 6.

Wenn bei einer Gleichung hervorgehoben werden soll, dass es sich um eine Forderung handelt, die durch eine geeignete Wahl von bestimmten Parametern erfüllt werden soll, wird über das Gleichheitszeichen ein Ausrufezeichen gesetzt ( $\stackrel{!}{=}$ ).

Bei Verweisen auf Textstellen des ersten Bandes (6. Auflage 2007) ist den Kapitel-, Aufgaben-, Beispiel- und Gleichungsnummern eine römische Eins vorangestellt, z. B. Abschn. I-3.2, Gl. (I-4.98).

Bei den Beispielen wird mit Zahlengleichungen gearbeitet, in die die physikalischen Größen in einer zuvor festgelegten Maßeinheit einzusetzen sind. Bei den Ergebnissen werden die Maßeinheiten wieder an die Größen geschrieben. Dabei wird zur Vereinfachung der Darstellung in den Gleichungen nicht zwischen den physikalischen Größen und ihren auf eine vorgegebene Maßeinheit bezogenen Größen unterschieden (vgl. Abschn. I-4.4.4).

**Übungsaufgaben.** Die angegebenen Übungsaufgaben sind ihrem Schwierigkeitsgrad entsprechend folgendermaßen gegliedert:

- Aufgaben ohne Markierung dienen der Wiederholung und Festigung des unmittelbar zuvor vermittelten Stoffes. Sie können in direkter Analogie zu den behandelten Beispielen gelöst werden.
- Aufgaben, die mit einem Stern markiert sind, befassen sich mit der Anwendung des Lehrstoffes auf ein praxisnahes Beispiel. Für ihre Lösung werden vielfach außer dem unmittelbar zuvor erläuterten Stoff auch Ergebnisse und Methoden vorhergehender Kapitel genutzt. Die Leser sollen bei der Bearbeitung dieser Aufgaben zunächst den prinzipiellen Lösungsweg festlegen und erst danach die Lösungsschritte nacheinander ausführen. Die Lösungen dieser Aufgaben sind im Anhang 1 angegeben.
- Aufgaben, die mit zwei Sternen markiert sind, sollen zum weiteren Durchdenken des Stoffes bzw. zu Erweiterungen der angegebenen Methoden anregen.

**MATLAB.** Eine kurze Einführung in das Programmpaket MATLAB wird im Anhang I-2 des ersten Bandes gegeben. Die wichtigsten Funktionen der *Control System Toolbox* für die in diesem Band behandelten Methoden werden am Ende der entsprechenden Kapitel erläutert. Sie sind im Anhang 3 zusammengestellt. Dabei wird nur auf die unbedingt notwendigen Befehle und deren einfachste Form eingegangen, denn im Vordergrund steht die Demonstration des prinzipiellen Funktionsumfangs heutiger rechnergestützter Analyse- und Entwurfssysteme am Beispiel von MATLAB und die Nutzung dieses Werkzeugs für die Lösung einfacher Regelungsaufgaben. Von diesen Erläuterungen ausgehend können die Leser mit Hilfe des MATLAB-Handbuchs den wesentlich größeren Funktionsumfang des Programmsystems leicht erschließen. Programmzeilen sind im Text in Schreibmaschinenschrift angegeben.

Die Behandlung von MATLAB zur Demonstration der rechnergestützten Arbeitsweise des Ingenieurs bringt die Schwierigkeit mit sich, dass das Buch mit jeder neuen MATLAB-Version veraltet, weil wichtige Befehle von Version zu Version umgestellt werden. Es sei deshalb darauf hingewiesen, dass derartige Umstellungen zwar die fehlerfreie Nutzung des Programmsystems erschweren, nicht jedoch

die methodischen Grundlagen der Regelungstechnik verändern, die im Mittelpunkt dieses Buches stehen.

Die MATLAB-Programme, mit denen die in diesem Buch gezeigten Abbildungen hergestellt wurden und die deshalb als Muster für die Lösung ähnlicher Analyse- und Entwurfsprobleme dienen können, stehen über die Homepage des Lehrstuhls für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik der Ruhr-Universität Bochum

<http://www.rub.de/atp>

jedem Interessenten zur Verfügung.