

Zustandsregelung verteilt-parametrischer Systeme

Joachim Deutscher

Zustandsregelung verteilt-parametrischer Systeme

 Springer

PD Dr.-Ing. habil. Joachim Deutscher
Lehrstuhl für Regelungstechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Cauerstraße 7
91058 Erlangen
joachim.deutscher@rt.eei.uni-erlangen.de

ISBN 978-3-642-19558-7 e-ISBN 978-3-642-19559-4
DOI 10.1007/978-3-642-19559-4
Springer Heidelberg Dordrecht 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 2012

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.

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Bei vielen technischen Prozessen und dynamischen Systemen ändern sich die beschreibenden Systemgrößen nicht nur mit der Zeit, sondern hängen auch signifikant vom Ort ab. Typische Beispiele hierfür sind räumliche Temperaturverteilungen bei thermischen Prozessen oder elastische Verformungen von Leichtbaustrukturen im Anlagen-, Maschinen- und Fahrzeugbau. Im Gegensatz zu konzentriert-parametrischen Systemen, die durch gewöhnliche Differentialgleichungen beschrieben werden, führt die Modellbildung dieser Systeme auf partielle Differentialgleichungen. Gegenstand dieses Buches ist der Entwurf von Steuerungen und Regelungen für solche sog. verteilt-parametrische Systeme. Um einen einheitlichen Zugang zu dieser Problemstellung zu ermöglichen, wird die Zustandsbeschreibung verteilt-parametrischer Systeme als Ausgangspunkt gewählt. Damit ist es möglich, bewährte Verfahren der Zustandsraummethodik für konzentriert-parametrische Systeme auf den verteilt-parametrischen Fall zu verallgemeinern. Dies hat auch den Vorteil, dass die Betrachtung konzentriert-parametrischer Systeme in den resultierenden Entwurfsverfahren als Spezialfall enthalten ist, was den Einstieg in die anspruchsvolle Thematik für den Leser erleichtert. Ein weiteres besonderes Merkmal des Buches ist die konsequente Verwendung einer Struktur mit zwei oder mehr Freiheitsgraden für die Steuer- und Regeleinrichtung. Diese Struktur schafft die Voraussetzung für einen zielgerichteten Entwurf, indem sie es ermöglicht, das gewünschte Sollverhalten sowie die geforderte Unterdrückung der Störeinflüsse getrennt und unabhängig voneinander einzustellen.

Vorausgesetzt wird vom Leser, dass er mit der Zustandsraummethodik für konzentriert-parametrische Mehrgrößensysteme vertraut ist, wie man sie beispielsweise in [27, 57] findet. Der Hauptteil des Buches ist so angelegt, dass man auch ohne Vorkenntnisse der Funktionalanalysis der Darstellung leicht folgen kann. Für das Verständnis der Beweise im Anhang sind allerdings Grundlagen zur Funktionalanalysis notwendig, die man beispielsweise in [14, 43, 46, 56] findet. Auf die Modellbildung von verteilt-parametrischen

Systemen wird im Buch nicht eingegangen. Eine anschauliche Einführung in diese Thematik bietet [28].

Dieses Buch ist aus meiner Habilitationsschrift „Zwei-Freiheitsgrade-Regelung linearer verteilt-parametrischer Systeme im Zustandsraum“ für das Fachgebiet Regelungstechnik hervorgegangen, die 2010 von der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg angenommen wurde. Die vorliegende Fassung ergab sich aus den Erfahrungen mit einer anschließenden Vorlesungstätigkeit zum Themenfeld der Habilitation sowie einer Überarbeitung und Erweiterung der Habilitationsschrift. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G. Roppenecker bin ich für die Betreuung der Habilitation sowie für den mir in diesem Zusammenhang gewährten Freiraum zu Dank verpflichtet. Mein Dank gilt auch den weiteren Mitgliedern des Fachmentorats Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Albach und Herrn Prof. Dr. J. Jahn, die das Habilitationsvorhaben wissenschaftlich begleitet haben. Externe Gutachten für die Habilitationsschrift wurden von Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Konigorski und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lohmann angefertigt, wofür ich mich ebenfalls herzlich bedanken möchte. Unterstützt bei der Erstellung des Buches wurde ich auch von meinen Doktoranden aus der Forschungsgruppe „Unendlich-dimensionale Systeme“ am Lehrstuhl für Regelungstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg. Herr Dipl.-Ing. Ch. Harkort und Herr Dipl.-Ing. M. Bäuml haben das gesamte Manuskript einer kritischen Prüfung unterzogen und mir durch viele konstruktive Verbesserungsvorschläge bei Erstellung der Endversion geholfen. Teile der Buches wurden auch von Herrn Dipl.-Ing. A. Mohr durchgesehen. All diesen Mitarbeitern sowie den Studenten, die in Projekt-, Studien- und Diplomarbeiten Vorarbeiten zum Buch geleistet haben, möchte ich meinen Dank aussprechen.

Fragen und konstruktive Kritik sowie Verbesserungsvorschläge, die von mir dankbar entgegengenommen werden, können an meine E-Mail-Adresse joachim.deutscher@rt.eei.uni-erlangen.de gesendet werden.

Erlangen, im September 2011

Joachim Deutscher

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Übersicht	1
1.1	Einführung	1
1.2	Übersicht	4
2	Zustandsbeschreibung linearer verteilt-parametrischer Systeme	9
2.1	Einführendes Beispiel	10
2.2	Riesz-Spektralsysteme	17
2.2.1	Systembeschreibung durch Zustandsgleichungen	17
2.2.2	Lösung der Zustandsgleichungen	34
2.2.3	Exponentielle Stabilität	46
2.2.4	Beschreibung des Ein-/Ausgangsverhaltens im Frequenzbereich	48
2.3	Verteilt-parametrische Systeme mit Randeingriff	57
3	Regelung mit mehreren Freiheitsgraden	67
3.1	Regelungsstruktur mit einem Freiheitsgrad	67
3.2	Regelungsstruktur mit zwei Freiheitsgraden	68
3.2.1	Vorsteuerung des Führungsverhaltens	69
3.2.2	Regelung des Störverhaltens	71
3.3	Regelung mit mehr als zwei Freiheitsgraden	72
3.4	Verteilt-parametrische Regelung mit mehreren Freiheitsgraden	73
4	Entwurf von Vorsteuerungen	75
4.1	Stabilisierung durch Zustandsrückführung	76
4.1.1	Entwurf durch Eigenwertvorgabe	77
4.1.2	Parametrische Lösung des Eigenwertvorgabeproblems	83
4.2	Führungs- und Störgrößenaufschaltung	95
4.2.1	Problemstellung	96
4.2.2	Entwurf der Führungs- und Störgrößenaufschaltung	99
4.2.3	Entwurf des Zustandsfolgereglers	106

4.2.4	Vorsteuerung des Führungs- und Störverhaltens mittels „late-lumping“	113
4.3	Ein-/Ausgangsentkopplung des Führungsverhaltens	119
4.3.1	Einführendes Beispiel	120
4.3.2	Problemstellung	123
4.3.3	Bestimmung des Rückführoperators	129
4.3.4	Bestimmung des Vorfilters	132
4.3.5	Vorsteuerung des Führungsverhaltens mittels „late-lumping“	140
4.4	Vorsteuerungsentwurf mittels „early-lumping“	142
4.4.1	Führungs- und Störgrößenaufschaltung	143
4.4.2	Ein-/Ausgangsentkopplung	155
4.5	Entwurf der Vorsteuerung zum Arbeitspunktwechsel	164
4.5.1	Problemstellung	164
4.5.2	Flachheit endlich-dimensionaler linearer Systeme	166
4.5.3	Flachheitsbasierter Steuerungsentwurf	173
5	Entwurf von Ausgangsfolgereglern	183
5.1	Beobachterbasierte Ausgangsrückführung	184
5.1.1	Entwurf von Ausgangsbeobachtern	185
5.1.2	Separationsprinzip	194
5.1.3	Parametrischer Entwurf	199
5.2	Stabilisierung der Folgefehlerdynamik	212
5.3	Robuste asymptotische Störkompensation	225
6	Abschließende Betrachtungen	243
A	Mathematische Grundlagen	245
A.1	C_0 -Halbgruppen	245
A.2	Adjungierte Operatoren	249
A.3	Sturm-Liouville-Operatoren	253
B	Ergänzungen zu den Beispielsystemen	257
B.1	Wärmeleiter mit Dirichletschen Randbedingungen	257
B.2	Beidseitig drehbar gelagerter Euler-Bernoulli-Balken	262
C	Beweise und Herleitungen	271
C.1	Beweis des Eigenwertkriteriums	271
C.2	Beweis von Satz 2.1	272
C.3	Beweis von Satz 4.2	275
C.4	Beweis von Satz 4.4	276
C.5	Beweis von Satz 4.5	277
C.6	Beweis von Satz 4.6	280
C.7	Beweis von Satz 4.7	281
C.8	Beweis von Satz 4.9	283
C.9	Modale Approximation des Verlaufs der Ausgangsgröße y_s	286

C.10 Beweis von Satz 4.12	286
C.11 Beweis von Satz 4.13	287
C.12 Herleitung der Zustandsbeschreibung (4.324)–(4.326)	288
C.13 Bestimmung der Übertragungsmatrix $F_d^-(s)$	289
C.14 Nachweis der Regularität der Matrix T	291
C.15 Beweis von Satz 5.3	292
C.16 Beweis von Satz 5.4	293
C.17 Beweis von Satz 5.6	294
C.18 Beweis von Satz 5.7	294
C.19 Beweis von Satz 5.8	300
C.20 Beweis von Satz 5.9	303
C.21 Beweis von Satz 5.10	304
C.22 Beweis von Satz 5.11	305
Literaturverzeichnis	307
Sachverzeichnis	311