

---

# Nichtlineare Systeme und Regelungen

---

Jürgen Adamy

# Nichtlineare Systeme und Regelungen

2., bearbeitete und erweiterte Auflage

Jürgen Adamy  
FG Regelungstheorie und Robotik  
TU Darmstadt Inst. Automatisierungstechnik  
Darmstadt, Deutschland

ISBN 978-3-642-45012-9  
DOI 10.1007/978-3-642-45013-6

ISBN 978-3-642-45013-6 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009, 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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 dürfen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

## Erstbegehung

Manchmal,  
wenn ich unter diesen Wänden sitze,  
die Pfeiler und Risse sehe,  
wächst eine Linie empor.  
Alle Bänder dehnen sich,  
die Kanten zeigen  
hinauf.  
Und ich weiß,  
die ist es und steige ein.

Es ist nicht die Freude,  
der Erste gewesen zu sein;  
es ist die Linie, die  
ich gezeichnet habe.  
So wie der Berg sie verlangt.

Reinhold Messner

---

## Vorwort

Die Regelungstheorie und die Regelungstechnik sind Teilgebiete der Theorie dynamischer Systeme und der Automatisierungstechnik. Sowohl in der Mathematik als auch in den Ingenieurwissenschaften bilden sie einen wichtigen Zweig in Forschung und Lehre. Aber auch in den Naturwissenschaften, insbesondere in der Biologie, Ökologie und Medizin, sowie in der Volkswirtschaftslehre sind ihre Inhalte von Bedeutung. So beschäftigt sich die Mathematik vor allem mit der Theorie von Regelungssystemen, die dann in den Ingenieurwissenschaften die Basis für den Entwurf, d. h. die Synthese von Flugregelungen, Kraftwerksregelungen, Motorregelungen usw. bildet. In den Naturwissenschaften und der Volkswirtschaftslehre stehen dagegen die Beschreibung und Analyse von rückgekoppelten Prozessen, z. B. Populationsdynamiken in der Ökologie und Marktmodelle in der Ökonomie, im Vordergrund.

Schreibt man ein Buch über Regelungssysteme, so muss man es an einer dieser Wissenschaftssparten ausrichten. Ein Mathematiker wird eine systemtheoretische Strukturierung wählen, ein Ingenieur eine anwendungsorientierte. Das vorliegende Buch ist aus Sicht des Ingenieurs geschrieben und betont daher den Anwendungsaspekt der Regelungstheorie, also die Regelungstechnik. Dieser Ausrichtung folgend wurden die Beschreibung von Regelungsverfahren und praktische Aspekte stärker gewichtet als die systemtheoretischen Grundlagen. Kurz gefasst: Im Vordergrund steht der Reglerentwurf. Dementsprechend ist das Buch auch strukturiert. Neben den systemtheoretischen Grundlagen wie Stabilität, Lösung nichtlinearer Differenzialgleichungen usw., werden in drei Kapiteln nichtlineare Regelungsverfahren für lineare und nichtlineare Regelstrecken behandelt. Der Fokus liegt hier bei den zeitkontinuierlichen Regelungssystemen. In relevanten Fällen werden auch zeitdiskrete Systeme betrachtet. Da nichtlineare Regler meistens alle Zustandsgrößen benötigen, diese aber oft nicht messbar sind, bildet ein Kapitel über nichtlineare Beobachter den Schluss des Buches.

Das Buch wendet sich an die fortgeschrittenen Regelungstechnikerinnen und Regelungstechniker. Die Kenntnis der linearen Regelungstechnik, wie sie z. B. in den Lehrbüchern von J. Lunze [190, 191], O. Föllinger [86] sowie

M. Horn und N. Dourdoumas [117] vermittelt wird, ist Vorbedingung für das Verständnis. Das Buch ist, obiges Wissen vorausgesetzt, für ein möglichst schnelles und einfaches Verstehen ausgelegt. Dabei bin ich den Ideen von G. Pólya [236, 237] gefolgt und vom klassischen Theorem-Beweis-Schema abgewichen. Vielmehr wird, wenn für das Verständnis erforderlich, die Herleitung eines Themas in ausführlichem Stil aus der Problemstellung entwickelt. Um häufiges Nachschlagen in vorherigen Kapiteln zu vermeiden (was meist mühsam ist), habe ich den einzelnen Passagen Wiederholungen zugebilligt. Dies und die bewusste Verwendung nur der notwendigen mathematischen Symbolik erhöht die Lesbarkeit. So kommt man mit der Ingenieurmathematik der ersten drei bzw. vier Semester eines Hochschulstudiums durch das Buch. All diese didaktischen Maßnahmen folgen den kommunikationspsychologischen Anforderungen von F. Schulz von Thun [260]: Prägnanz, Ordnung, Einfachheit und Motivation. Letzterer dienen auch die vierfarbig dargestellten Praxisbeispiele. Sie sollen den Bezug zur realen Anwendung illustrieren. Die zugehörigen Bilder sind dabei bewusst nicht fotorealistisch ausgeführt, obwohl dies möglich gewesen wäre. So ist eine Abstraktion von der realen Anwendung, wie sie jedes Modell aufweist, sichtbar.

Das Buch hätte nicht ohne die Unterstützung vieler helfender Personen entstehen können. Ihnen gilt mein Dank. So erstellten Teile des Latex-Quellcodes T. Schaal, M. Heil, J. Díaz und A. Popescu. A. Popescu erstellte auch alle zweidimensionalen Grafiken. K. Karova danke ich für die Hilfe bei der Erstellung der Matlab-Bilder. Sie sorgte auch durch unermüdliche Arbeit für die Konsistenz des Layouts. W. Hayat und R. Kempf erstellten die Simulationen der prädiktiven Regelungen und R. Kempf simulierte die Fuzzy-Abstandsregelung. D. Yankulova fertigte die Simulationen der Kranregelungen an. Außerdem lasen und prüften S. Muntermann, R. Kempf und V. Wiltert sowie meine Doktorandinnen und Doktoranden D. Yankulova, K. Karova, T. Gußner, A. Schwung, K. Listmann, H. Lens, D. Weiler, K. Keferpütz, B. Jasniewicz, A. Ortseifen sowie die Studentinnen und Studenten A. Popescu, A. Wahrburg, H. Buschmann und K. Kreuter das Buch bezüglich Inhalt und Verständlichkeit. Ihre offene, ehrliche Kritik und die harmonische und stimulierende Arbeitsatmosphäre trugen wesentlich zum Gelingen dieses Buches bei. Schließlich gilt mein besonderer Dank der Industriedesignerin V. Ansel, die alle farbigen dreidimensionalen Bilder anfertigte. Es war u. a. auch die Ästhetik dieser Bilder, die meine Motivation bei der Erstellung des Buches förderte.

Fragen oder Verbesserungsvorschläge können Sie an meine E-Mail-Adresse [jadamy@rtr.tu-darmstadt.de](mailto:jadamy@rtr.tu-darmstadt.de) senden.

Jürgen Adamy, Technische Universität Darmstadt, 2009

## Vorwort zur zweiten Auflage

Die zweite Auflage von *Nichtlineare Regelungen* ist wesentlich erweitert. Dabei haben die systemtheoretischen Grundlagen breiteren Raum gefunden. Der Titel des Buches trägt dem Rechnung und lautet nun *Nichtlineare Systeme und Regelungen*. Durch die Erweiterungen umfasst das Buch rund 600 Seiten, so dass der mit der nichtlinearen System- und Regelungstheorie noch nicht vertraute Leser entweder vor sehr viel Lese- und Verständnisarbeit steht oder aber eine Auswahl treffen muss. Letzteres wird ihm durch eine Zweiteilung des Buches erleichtert: Grundlegende Abschnitte für den Einsteiger sind durch blaue Abschnittsnummern, z. B. 1.1.8, gekennzeichnet. Schwarze Abschnittsnummern enthalten weiterführende Inhalte.

Das Buch ist insbesondere auch zum Aufbau von Vorlesungen an Hochschulen und Universitäten gedacht. Zu diesem Zweck kann es uneingeschränkt (unter Angabe der Quelle) genutzt werden.

Auch in der zweiten Auflage, die zusammen mit der ersten Auflage ca. 12.000 Arbeitsstunden erforderte, haben viele Personen mitgewirkt. Mein ganz besonderer Dank gilt hier A. Röthig und K. Olhofer-Karova. Sie setzten meine handschriftliche Aufzeichnungen in unermüdlicher Arbeit mit stets freundlichem Verständnis in lesbaren L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-Code um. Für die Erstellung der Grafiken danke ich wieder V. Ansel. Schließlich lasen meine Doktorandinnen und Doktoranden S. Bernhard, F. Damerow, S. Gering, J. Grieser, K. Groß, T. Guthier, D. Haumann, K. Kefferpütz, S. Khodaverdian, S. Klingelschmitt, L. Klodt, K. Listmann, D. Madeira, A. Ortseifen, A. Röthig, A. Schnell, M. Schneider, M. Schreier, M. Schneider und A. Wahrburg sowie Dr. D. Lens, Dr. V. Willert und K. Olhofer-Karova das Buch Korrektur. Die Studenten T. Buchholz, W. Krippner und M. Martins testeten es auf seine Verständlichkeit. M. Zeitz danke ich für die fruchtbare Diskussion über die Minimalphasigkeit und der Firma Demag für die Parameter des Kranmodells. Mein Dank gilt auch der Lektorin des Springer Verlages, Fr. E. Hestermann-Beyerle, für ihr stetes Interesse und ihre vielen Ratschläge.

Jürgen Adamy, Technische Universität Darmstadt, 2014

---

# Inhaltsverzeichnis

Blau nummerierte Abschnitte enthalten Grundlagen, die einen **Basiskurs** über nichtlineare Systeme und Regelungen bilden. Schwarz nummerierte enthalten weitergehende Informationen, die über den Basiskurs hinausgehen.

<b>1</b>	<b>Grundlagen nichtlinearer Systeme</b>	<b>1</b>
1.1	Systembeschreibung und Systemverhalten	1
1.1.1	Lineare und nichtlineare Systeme	1
1.1.2	Systembeschreibung und Regelkreiskategorien	2
1.1.3	Ruhelagen nichtlinearer Systeme	4
1.1.4	Beispiel Satellit	6
1.1.5	Ruhelagen linearer Systeme	9
1.1.6	Stabilität von Ruhelagen	10
1.1.7	Stabilität bei variablem Eingangssignal	15
1.1.8	Grenzyklen	18
1.1.9	Gleitzustände	20
1.1.10	Chaos	22
1.1.11	Zeitdiskrete Systeme	25
1.2	Lösung nichtlinearer Differenzialgleichungen	27
1.2.1	Grundlegendes und das Verfahren von Euler-Cauchy	27
1.2.2	Genauigkeit der numerischen Lösung	29
1.2.3	Das verbesserte Euler-Cauchy-Verfahren	30
1.2.4	Die Verfahren von Heun und Simpson	31
1.2.5	Die Runge-Kutta-Verfahren	33
1.2.6	Adaption der Schrittweite	35
1.2.7	Mehrschrittverfahren von Adams-Bashforth	36
1.2.8	Prädiktor-Korrektor-Verfahren von Adams-Moulton	37
1.2.9	Stabilität von Integrationsverfahren	38
1.2.10	Stife Systeme und ihre Lösung	41
<b>2</b>	<b>Grenzyklen und Stabilitätskriterien</b>	<b>45</b>
2.1	Verfahren der harmonischen Balance	45
2.1.1	Idee des Verfahrens	45



2.1.2	Illustrationsbeispiel . . . . .	49
2.1.3	Kennlinien und ihre Beschreibungsfunktionen . . . . .	51
2.1.4	Stabilitätsanalyse von Grenzzyklen . . . . .	57
2.1.5	Beispiel Servolenksystem . . . . .	60
2.2	Absolute Stabilität . . . . .	64
2.2.1	Der Begriff der absoluten Stabilität . . . . .	64
2.2.2	Das Popov-Kriterium und seine Anwendung . . . . .	65
2.2.3	Aisermans Vermutung . . . . .	71
2.2.4	Beispiel Schiffsregelung . . . . .	72
2.2.5	Das Kreiskriterium . . . . .	76
2.2.6	Das Zypkin-Kriterium für zeitdiskrete Systeme . . . . .	80
2.3	Die Stabilitätstheorie von Ljapunov . . . . .	83
2.3.1	Die Idee und die direkte Methode . . . . .	83
2.3.2	Illustrationsbeispiel . . . . .	88
2.3.3	Quadratische Ljapunov-Funktionen . . . . .	90
2.3.4	Die direkte Methode für zeitdiskrete Systeme . . . . .	92
2.3.5	Die indirekte Methode . . . . .	92
2.3.6	Einzugsgebiete . . . . .	94
2.3.7	Beispiel Mutualismus . . . . .	97
2.3.8	Das Invarianzprinzip von LaSalle . . . . .	101
2.3.9	Instabilitätskriterium . . . . .	104
2.4	Passivität und Stabilität . . . . .	106
2.4.1	Passive Systeme . . . . .	106
2.4.2	Stabilität passiver Systeme . . . . .	108
2.4.3	Passivität verbundener Systeme . . . . .	111
2.4.4	Passivität linearer Systeme . . . . .	113
2.4.5	Beispiel Transportsystem für Materialbahnen . . . . .	118
2.4.6	Positiv reelle Übertragungsfunktionen . . . . .	120
2.4.7	Äquivalenz von positiver Reellheit und Passivität . . . . .	125
2.4.8	Verlustfreie Hamilton-Systeme . . . . .	130
2.4.9	Beispiel Selbstbalancierendes Fahrzeug . . . . .	137
2.4.10	Dissipative Hamilton-Systeme . . . . .	141
2.4.11	Beispiel Fremderregte Gleichstrommaschine . . . . .	143
2.4.12	Lineare Hamilton-Systeme . . . . .	146
<b>3</b>	<b>Steuerbarkeit und Flachheit . . . . .</b>	<b>155</b>
3.1	Steuerbarkeit . . . . .	155
3.1.1	Definition der Steuerbarkeit . . . . .	155
3.1.2	Globale und lokale Steuerbarkeit . . . . .	162
3.1.3	Nachweis der Steuerbarkeit . . . . .	164
3.1.4	Beispiel Industrieroboter . . . . .	168
3.1.5	Proxime Steuerbarkeit driftfreier Systeme . . . . .	172
3.1.6	Beispiel Kraftfahrzeug mit Anhänger . . . . .	179
3.1.7	Omnidirektionale Steuerbarkeit . . . . .	181
3.1.8	Beispiel Dampferzeuger . . . . .	184

---

3.2	Flachheit	187
3.2.1	Grundidee und Definition der Flachheit	187
3.2.2	Die Lie-Bäcklund-Transformation	192
3.2.3	Beispiel VTOL-Flugzeug	194
3.2.4	Flachheit und Steuerbarkeit	198
3.2.5	Flache Ausgänge linearer Systeme	199
3.2.6	Nachweis der Flachheit	203
3.3	Nichtlineare Zustandstransformationen	207
3.3.1	Transformation und transformierte Systemgleichung	207
3.3.2	Illustrationsbeispiel	210
3.3.3	Beispiel Park-Transformation	212
3.3.4	Bestimmung der Transformationsvorschrift	219
3.3.5	Veranschaulichung anhand linearer Systeme	220
<b>4</b>	<b>Regelungen für lineare Regelstrecken</b>	<b>223</b>
4.1	Regler mit Antiwindup	223
4.1.1	Der Windup-Effekt	223
4.1.2	PID-Regler mit Antiwindup	225
4.1.3	Beispiel Gleichstrommotor	226
4.1.4	Antiwindup für allgemeine Reglerstrukturen	229
4.1.5	Dimensionierung des allgemeinen Antiwindup-Reglers	234
4.1.6	Stabilität	236
4.2	Zeitoptimale Regelung und Steuerung	236
4.2.1	Grundlagen und der Satz von Feldbaum	236
4.2.2	Berechnung zeitoptimaler Steuerfolgen	239
4.2.3	Beispiel $1/s^2$	240
4.2.4	Zeitoptimale Regler für Systeme niedriger Ordnung	244
4.2.5	Beispiel U-Boot	247
4.2.6	Zeitoptimale Vorsteuerung	250
4.3	Strukturvariable Regelungen ohne Gleitzustand	251
4.3.1	Grundlagen strukturvariabler Regelungen	251
4.3.2	Regler mit abschnittweise linearer Struktur	255
4.3.3	Beispiel Containerkran	259
4.4	Sättigungsregler	264
4.4.1	Funktionsweise und Stabilität	264
4.4.2	Entwurf in mehreren Schritten	268
4.4.3	Beispiel Helikopter	270
<b>5</b>	<b>Regelungen für nichtlineare Regelstrecken</b>	<b>273</b>
5.1	Gain-scheduling-Regler	273
5.1.1	Funktionsweise und Entwurf	273
5.1.2	Illustrationsbeispiel	279
5.1.3	Beispiel Solarkraftwerk mit Parabolrinnenkollektor	281
5.2	Reglerentwurf mittels exakter Linearisierung	287
5.2.1	Grundidee und nichtlineare Regelungsnormalform	287

5.2.2	Nichtlinearer Regler und linearer Regelkreis . . . . .	291
5.2.3	Beispiel Magnetlager . . . . .	294
5.2.4	Regelstrecken mit interner Dynamik . . . . .	298
5.2.5	Entwurfsverfahren . . . . .	303
5.2.6	Beispiel Mondlandefähre . . . . .	305
5.2.7	Exakte Linearisierung allgemeiner Systeme . . . . .	310
5.2.8	Relativer Grad und interne Dynamik linearer Systeme . . . . .	314
5.2.9	Regelgesetz im linearen Fall . . . . .	320
5.2.10	Stabilität von interner Dynamik und Nulldynamik . . . . .	323
5.2.11	Exakte Linearisierung von MIMO-Systemen . . . . .	325
5.2.12	Der MIMO-Regelkreis in Zustandsraumdarstellung . . . . .	329
5.2.13	Beispiel Verbrennungsmotor . . . . .	334
5.3	Exakte Zustandslinearisierung . . . . .	337
5.3.1	Exakte Zustandslinearisierung von SISO-Systemen . . . . .	337
5.3.2	Beispiel Bohrturm . . . . .	343
5.3.3	Exakte Zustandslinearisierung von MIMO-Systemen . . . . .	349
5.3.4	Flachheit exakt zustandslinearisierbarer Systeme . . . . .	353
5.3.5	Beispiel Rakete . . . . .	354
5.4	Steuerung und Regelung flacher Systeme . . . . .	358
5.4.1	Grundlagen . . . . .	358
5.4.2	Steuerung von Systemen mit fiktivem flachen Ausgang . . . . .	360
5.4.3	Flachheitsbasierte Steuerung linearer Systeme . . . . .	364
5.4.4	Beispiel Triebwerkbasierte Flugzeugsteuerung . . . . .	366
5.4.5	Flachheitsbasierte Regelung nichtlinearer Systeme . . . . .	371
5.4.6	Beispiel Pneumatikmotor . . . . .	376
5.4.7	Flache Eingänge und ihre Konstruktion . . . . .	380
5.4.8	Flache Eingänge linearer Systeme . . . . .	385
5.4.9	Beispiel Ökonomisches Marktmodell . . . . .	385
5.5	Control-Ljapunov-Funktionen . . . . .	388
5.5.1	Grundlagen . . . . .	388
5.5.2	Control-Ljapunov-Funktion für lineare Systeme . . . . .	390
5.5.3	Regler für eingangslinere Systeme . . . . .	391
5.5.4	Illustrationsbeispiel . . . . .	393
5.5.5	Beispiel Kraftwerk mit Netzeinspeisung . . . . .	394
5.6	Das Backstepping-Verfahren . . . . .	400
5.6.1	Idee des Verfahrens . . . . .	400
5.6.2	Rekursives Schema für den Reglerentwurf . . . . .	405
5.6.3	Illustrationsbeispiele . . . . .	407
5.6.4	Beispiel Fluidsystem mit chaotischem Verhalten . . . . .	411
<b>6</b>	<b>Regelungen für lineare und nichtlineare Regelstrecken . . . . .</b>	<b>417</b>
6.1	Modellbasierte prädiktive Regelung . . . . .	417
6.1.1	Grundlagen und Funktionsweise . . . . .	417
6.1.2	Lineare modellbasierte prädiktive Regelung . . . . .	420
6.1.3	LMPR mit Beschränkungen . . . . .	425

6.1.4	Beispiel Entwässerungssystem . . . . .	427
6.1.5	Nichtlineare modellbasierte prädiktive Regelung . . . . .	431
6.1.6	Beispiel Eindampfanlage . . . . .	437
6.2	Strukturvariable Regelungen mit Gleitzustand . . . . .	440
6.2.1	Funktionsweise und Eigenschaften . . . . .	440
6.2.2	Entwurf für lineare Regelstrecken . . . . .	443
6.2.3	Dynamik im Gleitzustand . . . . .	445
6.2.4	Nachweis der Robustheit . . . . .	446
6.2.5	Beispiel DC-DC-Wandler . . . . .	447
6.2.6	Entwurf für nichtlineare Regelstrecken . . . . .	452
6.2.7	Beispiel Optischer Schalter . . . . .	453
6.3	Passivitätsbasierte Regelung . . . . .	457
6.3.1	Regelung passiver Systeme mittels Kennfeldern . . . . .	457
6.3.2	Beispiel Dämpfung seismischer Gebäudeschwingungen . . . . .	459
6.3.3	Passivierung nichtpassiver linearer Systeme . . . . .	467
6.3.4	Passivierung nichtpassiver eingangslinärer Systeme . . . . .	473
6.3.5	Passivitätsbasierte Regelung mit IDA . . . . .	474
6.3.6	Beispiel Papiermaschine . . . . .	479
6.4	Fuzzy-Control . . . . .	483
6.4.1	Einführung . . . . .	483
6.4.2	Fuzzifizierung . . . . .	484
6.4.3	Inferenz . . . . .	487
6.4.4	Defuzzifizierung . . . . .	493
6.4.5	Fuzzy-Systeme und Fuzzy-Regler . . . . .	494
6.4.6	Beispiel Abstandsregelung für Automobile . . . . .	497
<b>7</b>	<b>Beobachter für nichtlineare Systeme . . . . .</b>	<b>503</b>
7.1	Beobachtbarkeit nichtlinearer Systeme . . . . .	503
7.1.1	Definition der Beobachtbarkeit . . . . .	503
7.1.2	Beobachtbarkeit autonomer Systeme . . . . .	506
7.1.3	Beispiel Synchrongenerator . . . . .	509
7.1.4	Beobachtbarkeit allgemeiner nichtlinearer Systeme . . . . .	511
7.1.5	Nichtlineare Beobachtbarkeitsnormalform . . . . .	513
7.1.6	Beobachtbarkeit eingangslinärer Systeme . . . . .	516
7.2	Luenberger-Beobachter für nichtlineare Regelkreise . . . . .	519
7.3	Beobachterentwurf mittels Linearisierung . . . . .	521
7.3.1	Funktionsweise und Entwurf . . . . .	521
7.3.2	Regelkreis mit Beobachter . . . . .	524
7.3.3	Beispiel Bioreaktor . . . . .	526
7.4	Das erweiterte Kalman-Filter . . . . .	530
7.4.1	Kalman-Filter für lineare Systeme . . . . .	530
7.4.2	Das EKF für nichtlineare Systeme . . . . .	531
7.4.3	Beispiel Flugzeugtriebwerk . . . . .	534
7.5	High-gain-Beobachter . . . . .	537
7.5.1	Einführung und Funktionsweise . . . . .	537

---

7.5.2	High-gain-Beobachter in allgemeiner Form . . . . .	542
7.5.3	Beispiel Chemischer Reaktor . . . . .	544
7.5.4	Der Fall einganglinearer Systeme . . . . .	548
<b>8</b>	<b>Wörterbuch</b> . . . . .	<b>553</b>
8.1	Deutsch → Englisch . . . . .	553
8.2	Englisch → Deutsch . . . . .	566
<b>Anhang</b>	. . . . .	<b>581</b>
<b>A</b>	<b>Daten zum Beispiel Containerkran</b> . . . . .	<b>581</b>
<b>B</b>	<b>Mathematische Zeichen und Funktionen</b> . . . . .	<b>583</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	. . . . .	<b>587</b>
<b>Sachverzeichnis</b>	. . . . .	<b>603</b>