Alexander Weinmann

Regelungen

Analyse und technischer Entwurf

Band 1:

*Systemtechnik linearer
und linearisierter Regelungen
auf anwendungsnaher Grundlage*

*Dritte, überarbeitete
und erweiterte Auflage*

Springer-Verlag Wien GmbH

Dipl.-Ing. Dr. techn. Alexander Weinmann

Ordentlicher Universitätsprofessor
Vorstand des Instituts für elektrische Regelungstechnik
Technische Universität Wien, Österreich

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

© 1983, 1988 und 1994 Springer-Verlag Wien

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Wien New York 1994

Softcover reprint of the hardcover 3rd edition 1994

Satz: Reproduktionsfertige Vorlage des Autors

Druckerei zu Altenburg GmbH, D-04600 Altenburg

Gedruckt auf säurefreiem, chlorfrei gebleichten Papier – TCF

Mit 192 Abbildungen

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Weinmann, Alexander:

Regelungen : Analyse und technischer Entwurf /

A. Weinmann. – Wien ; New York : Springer.

Bd. 1. Weinmann, Alexander: Systemtechnik

linearer und linearisierter Regelungen auf

anwendungsnaher Grundlage. –

3., überarb. u. erw. Aufl. – 1994

Weinmann, Alexander:

Systemtechnik linearer und linearisierter

Regelungen auf anwendungsnaher Grundlage /

A. Weinmann. – 3., überarb. u. erw. Aufl. –

Wien ; New York : Springer, 1994

(Regelungen / A. Weinmann ; Bd. 1)

ISBN 978-3-7091-7364-0

ISBN 978-3-7091-6628-4 (cBook)

DOI 10.1007/978-3-7091-6628-4

Vorwort

Der allgemeinen Breite regelungstechnischer Verfahren und Theorien widmet sich heute ein bereits umfangreiches Schrifttum. Deshalb war für die Stoffauswahl zum vorliegenden Buch bestimmend, daß der Stoff der Häufigkeit der praktisch-industriellen Anwendung entsprechen soll, der Anwendung beim Regelkreisentwurf, bei der betrieblichen Einstellung, Erweiterung und Verbesserung. Weiters war für die Stoffauswahl maßgebend, welche prinzipiellen Methoden die Regelungstechnik anwendungsnahe kennt.

Das Buch umfaßt Regelungen auf der Basis linearer und linearisierter Verhaltensweise. Mit ihnen kann eine große Fülle von Anwendungsgebieten abgedeckt und der Zugang zu komplexeren Verhaltensweisen erschlossen werden. Dabei werden die Standardverfahren der Systemanalyse im Zeit- und Frequenzbereich, die Grundlagen der Zustandsraumdarstellung und Methoden der Identifikation eingehend dargestellt. Die meisten der gängigen Entwurfsmethoden werden erläutert und gewertet, komplexere Syntheseverfahren (etwa die der Optimierung) an einfacheren Fällen behandelt und damit ihr tieferes Verständnis vorbereitet. Im Band 2 und 3 erweist sich ein solches praxisbezogenes Fundament als sehr tragfähig. Regelungen sind häufig mit Steuerungen oder Fernwirkanlagen kombiniert; deshalb sind auch solche Systeme aufgenommen. Die Grundlagen der Zuverlässigkeitsanalyse und -synthese dienen der Abrundung des industriellen Einsatzbildes von Automatisierungsanlagen. Eine Betonung elektronischer Fachbereiche ist dem gebotenen Stoff nicht abzusprechen.

Die vorliegende dritte Auflage ist gegenüber früheren um folgende Gebiete erweitert worden: Viele Erklärungen sind tiefergehend angelegt, so etwa die sich im Zusammenhang mit Übertragungs-Nullstellen ergebenden Fragestellungen. Der gerätemäßige Hintergrund der Regelstrecken, Stellglieder und Regler ist breiter gefaßt worden, um die zahlreichen Anwendungsgebiete der Regelungstechnik zu erkennen. Durch die Aufnahme etlicher nicht-technischer Regelungen ist dem Trend gefolgt worden, die Einsatzbreite, aber auch die Quellen der Regelungstechnik im kybernetischen Sinn ermessen zu können. Der Digitalisierung durch Einsatz von Mikrorechnern und Signalprozessoren ist mit einfachen Mitteln stärker als früher entsprochen worden. Zahlreiche weitere Gebiete von Regelstrecken, passive Redundanz, Fernwirkanlagen, Einsatz von Personal Computern zur Analyse, Synthese und Identifikation sind eingegliedert worden. Einige neue kapitelübergreifende Beispiele dienen der Förderung der industriellen Anwendungsaspekte.

Bei aller Wertschätzung formaler Verfahren der Regelungstheorie werden doch die heuristischen Verfahren und die technisch-kreativen Ansätze betont. Wird doch von ihnen die Innovation getragen. Überdies bestehen zur Erprobung und Realisierung innovativer Gedanken heute hervorragende Möglichkeiten: Für den Regleraufbau schnelle Elektronik, Mikroprozessoren und Prozeßrechner, für die Vorausberechnung und Dimensionierung digitale Großrechenanlagen und Personal Computer.

Bei der Einführung in die mathematischen Verfahren wird die Devise verfolgt: So anschaulich und der physikalischen Basis so nahe wie möglich, Formalismen und theoretische Beziehungen so knapp als unbedingt erforderlich. Muß doch der praktisch tätige Regelungstechniker stets mehrere technische Disziplinen kombinieren und immer wieder auf den physikalischen Ursprung aller Komponenten zurückgreifen. Er hat auch mit allen technisch-betrieblichen Schwierigkeiten fertig zu werden. Aus diesem Grund wurde der anschauliche technisch-physikalische Hintergrund bei allen Darstellungen als wichtig angesehen.

Bedeutender noch als die Vermittlung von Faktenwissen ist die Entwicklung eines tragfähigen Ordnungsskeletts für die verschiedensten Methoden.

Gewisse regelungstechnische Fundamentalmethoden werden auch deshalb erörtert, weil damit der Zugang zu Sondergebieten in der regelungstechnischen Literatur erschlossen wird.

Der zweite Band ist anwendungsnahe regelungstechnischen Methoden der Digitaltechnik, Abtastung, stochastischen Anregung, Systemoptimierung, Robustheit und Adaption gewidmet. Auch Mehrgrößensysteme, fortgeschrittene Synthese (Kontrollbeobachter, Optimierung) und nichtlineare Regelungen sowie fuzzy und neuronale Regler werden dort abgehandelt. Der dritte Band schließlich ist umfangreichen rechnerischen Lösungen zu industriellen Aufgabenstellungen gewidmet.

Auch die dritte Auflage des vorliegenden ersten Bandes setzt Vertrautheit mit elektrotechnischen Grundkenntnissen voraus, wie sie an Technischen Universitäten bei Studien der Elektrotechnik, des Maschinenbaus und der Technischen Physik vermittelt werden. Bei fallweiser Konsultation einschlägiger Lehrbücher (z.B. Rechenverfahren der Elektrotechnik, Laplace-Transformation) ist das Buch auch zum Selbststudium für Informatiker und Verfahrenstechniker, selbst bei länger zurückliegender Studienzeit, gedacht.

Dem Ingenieur der Praxis, der mit Regelungstechnik in zunehmendem Maße konfrontiert wird, sei das Buch zum Auffrischen der Kenntnisse und zur direkten Anwendung bei Entwurf und Überprüfung von Regelanlagen eine Unterstützung.

Nachdem ein hoher Anteil der regelungstechnischen Literatur (z.B. der *International Federation of Automatic Control* oder des *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) in englischer Sprache erscheint, ist das Sachregister zweisprachig (deutsch und englisch) aufgebaut und sehr ausführlich gehalten. Als Symbole sind in der dritten Auflage jene gewählt worden, die in der regelungstechnischen, heute überwiegend in englischer Sprache verfaßten Fachliteratur verwendet werden.

In der Abschlußphase konnte der Autor mit der Hilfe zahlreicher Mitarbeiter des Instituts für elektrische Regelungstechnik der Technischen Universität Wien rechnen. Die Diskussion manchen Abschnittes hat zur didaktischen Verfeinerung beigetragen. So gilt mein Dank den Universitätsassistenten Ass.Prof. Univ.Do. Dr.techn. Robert Noisser, Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Goldynia, Dipl.-Ing. Dr. techn. Wilhelm Haager, Dipl.-Ing. Manfred Bammer, Dipl.-Ing. Thomas Grünberger, Dipl.-Ing. Rudolf Hornischer, Dipl.-Ing. Oliver König, Dipl.-Ing. Leopold Moosbrugger, Dipl.-Ing. Andreas Raschke und Dipl.-Ing. Herbert Swaton.

Dank in hohem Maße ist meiner Sekretärin am Institut, Fr. Johanna Heinrich, für die Reinschrift neuer Text- und Formelteile ausdrücken, sowie Frau Christine Sigle für Ergänzungen und für das Literaturverzeichnis. In dankenswerter Weise leistete auch Herr Wolfgang Fuchs Unterstützung bei mancher Sonderfrage der Daten- und Textverarbeitung. Herr Ing. Franz Babler und Herr Fachoberlehrer Hermann Bruckner halfen beim computerunterstützten Zeichnen und Beschriften neuer Bilder.

Der Springer-Verlag in Wien, besonders die Herren Raimund Petri-Wieder und Frank Christian May, hat größte Unterstützung in allen Belangen geboten. Dafür und für die glänzende Ausstattung sei dem Verlag der Dank ausgesprochen.

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen der Dynamik regelungstechnischer Systeme	9
1.1 Allgemeine Zielsetzung der Regelungstechnik	9
1.2 Regelkreis	9
1.3 Voraussetzungen für Blockorientierung und Regelkreisbildung	11
1.4 Aufgaben der Regelungstechnik	14
1.5 Übertragungsfunktion und Regelungssystemtheorie	15
1.6 Anfangsbedingungen und Nullstellen der Übertragungsfunktion	19
1.7 Ausgangssignal $X_a(s)$ bei $x_a^{(k)}(0^-) = 0$	21
1.8 Nichtverschwindende Vorgeschichte $x_a^{(k)}(0^-) \neq 0$	21
1.9 Analyse im Spektralbereich. Verknüpfung mehrerer Elemente	22
1.10 Regelstrecke und Störgrößen	25
1.11 Einschleifiger Standardregelkreis	25
1.12 Sensitivität	28
1.13 Differentielle Sensitivität für den Standardregelkreis	29
1.14 Linearisierung	30
1.15 Regelkreis im Signalflußdiagramm	33
1.16 Spezielle Elemente regelungstechnischer Systeme	33
1.16.1 Rationale Übertragungselemente	34
1.16.2 Totzeit-Elemente	39
1.16.3 Allpaß-Elemente	39
1.16.4 Laufzeitelemente	40
2 Regelkreisanalyse im Zeitbereich	41
2.1 Regelkreis-Reaktion auf einfache Signale	41
2.2 Mehrfache Polstellen von $X_a(s)$	45
2.3 Näherung für kleine Zeitwerte	48
2.4 Näherung für große Zeitwerte	49
2.5 Faltungsintegral und Näherung durch Faltungssumme	50
2.6 Regelungen mit Totzeitelementen	52
3 Formulierung kontinuierlicher Regelungssysteme im Zustandsraum	53
3.1 Grundlagen	53
3.2 Transitionsmatrix (Fundamentalmatrix)	54
3.3 Potenzreihenentwicklung der Transitionsmatrix	56
3.4 Zustandsregler. Führungs- und Störungsverhalten	57
3.5 Vorfilterbemessung	58

4	Analyseverfahren im Frequenzbereich	59
4.1	Frequenzgang	59
4.2	Ortskurven des Frequenzgangs	61
4.3	Ortskurven von typischen stabilen Regelkreis-Elementen	62
4.4	Ortskurven instabiler Regelkreiselemente	68
4.5	Frequenzgangs Ortskurve des Regelkreises	68
4.6	Ermittlung von Zeitbereichssignalen aus dem Frequenzbereich	70
4.7	Ermittlung des Frequenzganges aus der gemessenen Systemantwort	71
4.8	Bode-Diagramm	73
4.9	Phasenminimum-Beziehungen	77
4.10	Knickstellen der Regelschleife und des Regelkreises	78
4.11	H_∞ -Norm einer Übertragungsfunktion	79
5	Regelstrecken im Regelkreis	81
5.1	Antriebe. Allgemeines	81
5.2	Stromrichtergespeiste Gleichstromantriebe	82
5.3	Stromleitverfahren	83
5.4	Begrenzungsregelung	84
5.5	Kupplungselastizität	85
5.6	Umrichtergespeiste Asynchronmaschine	85
5.7	Thermische Regelstrecken	87
5.7.1	Durchlauferhitzer, Wärmetauscher	87
5.7.2	Kessel und Turbine	87
5.8	Hydraulische Regelstrecken	89
5.9	Pneumatische Regelstrecke	90
5.10	Mechanische Positionsregelstrecken	90
5.10.1	Einfache Fahrzeuglenkung	90
5.10.2	Balancierung	91
5.10.3	Passagierflugzeug	91
5.10.4	Raketenantrieb	91
5.11	Verfahrenstechnische Regelstrecken	91
5.12	Elektronische und nachrichtentechnische Regelstrecken	93
5.12.1	Verstärkungsausgleich	94
5.12.2	Scharfabstimmung	94
5.12.3	Zeilensynchronisierung	94
5.12.4	Rauschunterdrückung	94
5.13	Phase-Locked Loops (PLL)	95
5.13.1	Phase-Locked Loop in analoger Ersatzrechnung	96
5.13.2	Regelungen an einem CD-Player	97
5.14	Schaltzeichen (Sinnbilder) für technische Regelstrecken	99
5.15	Volkswirtschaftliche Regelungen	99
5.16	Physiologische und psychische Regelkreise	100
5.17	Soziologische Regelungen	102
6	Stellglieder und Verstärker	103
6.1	Stromrichterstellglieder	103
6.2	Umrichter für Drehfeldmaschinen	104
6.3	Stellmotoren für mechanische Positionierung	105
6.4	Stellglieder für Flüssigkeits-, Gasströme u. körnige Stoffe	105

6.5	Schaltzeichen für Stellglieder und Verstärker	106
7	Regelungstechnischer Einsatz von Sensoren und Meßumformern	107
7.1	Anforderungen	107
7.2	Meßrauschen	110
7.3	Leistung eines Rauschsignales	113
8	Identifikationsverfahren	115
8.1	Auswertung der Sprungantwort von PDT_1 -Elementen	116
8.2	Auswertung der Sprungantwort von PT_2 -Elementen	116
8.3	Wendetangentenmethode bei PT_2 -Elementen	117
8.4	Auswertung der Sprungantwort von IT_1 -Elementen	117
8.5	Momentenmethode an der Gewichtsfunktion	118
8.6	Identifikation mit Hilfsregler	119
8.7	Identifikation mit fiktivem Serienelement	119
8.8	Regressionsanalyse. Quadratische Ausgleichsrechnung	120
9	Regler. Ausführung und Dimensionierung	123
9.1	Operationsverstärker	123
9.2	Elektronische Analogregler mit Operationsverstärkern	124
9.2.1	Betrachtung mittels Blockelementen	124
9.2.2	Betrachtung mittels Leitwertmatrizen und Beschaltungsimpedanzen	124
9.3	Analogregler-Schaltungsbeispiele	125
9.4	Sollwerteinsteller. Parameteranpassung	129
9.5	Digitale Integralregler mit zählenden Bausteinen	130
9.6	Regler mit Mikrorechnern	131
9.7	Digitale Universalregler	133
9.8	Kompaktregler und weitere Rechner-Kommunikationselemente	135
9.9	Leitrechner	135
9.10	Pneumatische Regler	136
9.11	Hydraulische Regler	136
9.12	Mechanische und elektromechanische Regler	139
9.13	Konstruktionsformen elektrischer Regler. Ergonomie	139
10	Stabilität. Stabilitätsgüte. Stabilisierung	141
10.1	Stabilitätskriterium nach Routh	142
10.2	Stabilitätsbeurteilung mit Beiwertbedingungen	144
10.2.1	Beiwertbedingungen für Labilität	144
10.2.2	Beiwertbedingungen für Stabilitätsgüte	147
10.3	Stabilitätskriterium nach Nyquist	149
10.3.1	Satz vom logarithmischen Residuum	150
10.3.2	Anwendung auf die Stabilitätsuntersuchung	152
10.3.3	Anwendungsfälle	154
10.3.4	Vereinfachte Formulierungen für stabile Regler und Strecken	156
10.3.5	Abklingbedingungen aus den Nyquist-Diagrammen	159
10.4	Stabilisierung	160

11 Wurzelortsverfahren	161
11.1 Wurzelortskurven nach der Verstärkung	161
11.2 Konstruktionshilfen für Wurzelorte	163
11.3 Wurzelortskurven nach einer veränderlichen Polstelle	166
11.4 Wurzelortskurve nach einer veränderlichen Zeitkonstanten	168
11.5 Folgerungen aus den Wurzelortsverfahren	168
12 Verfahren zum Entwurf von Regelkreisen	171
12.1 Entwurfsziele	172
12.2 Gliederung der Methoden	173
12.3 Stationäre und quasistationäre Beziehungen	173
12.4 Dominierendes Schwingungsglied	173
12.5 Ansatz mit dominierendem Polpaar und weiterem Mehrfachpol	175
12.6 Einfache Zusammenhänge zwischen Regelschleife und Regelkreis	175
12.7 Zusammenhang Tiefpaßgrenzfrequenz zu Anstiegszeit	178
12.8 Entwurf im Bode-Diagramm	179
12.9 Gleichgewichtstheorem	181
12.10 D- und I-Kompensation, D- und I-Stabilisierung	182
12.11 Systemempfindlichkeit im Bode-Diagramm	183
12.12 Symmetrisches Optimum	186
12.12.1 IT_1 -Regelstrecke und PI-Regler	187
12.12.2 PT_3 -Regelstrecke und $PIDT_1$ -Regler	188
12.13 Stellgrößenbegrenzung	188
12.13.1 Ersatzvorfilter	188
12.13.2 Abschätzung der maximalen Stellamplitude mittels $\mathcal{F}^{-1}$	191
12.14 Robuste Regelung im Bode-Diagramm	191
12.15 Robustheit an Nyquist-Ortskurven	193
12.16 Normpolynome	195
12.17 Doppelverhältnisse	197
12.18 Polvorgabe für Zustandsregler bei Eingrößenregelungen	197
12.19 Verfahren reeller Schleifenpole und -nullstellen	198
12.20 Aufhebungskompensation	198
12.21 Betragsoptimum	199
12.22 Polvorgabe über Gütekriterium	199
12.23 Regelkreispolprodukt, Mindeststabilität und Stellgrößenbeschränkung	201
12.24 Polvorgabe, Systemempfindlichkeit und Regelschleifennullstellen	202
12.25 Nullstellenvorgabe	203
12.26 Reglerbemessung mit Wurzelortskurven	206
12.27 H_∞ -Norm der Sensitivitätsfunktion, L_2 -Norm der Regelabweichung und Stabilitätsradius	206
12.28 Vorkehrungen und Bewältigung des Meßrauschens	207
12.29 Bemessung eines dynamischen Vorfilters	207
12.30 Störgrößenaufschaltung (Compoundierung)	207
12.31 Sollwertaufschaltung (Vorwärtssteuerung)	208
12.32 Anordnung von weiteren Regelschleifen	209
12.33 Prädiktoren für Totzeitsysteme	210
12.34 Experimentelle PI-Regler-Einstellung	211
12.35 Kostenbewußtsein beim Entwurf	214
12.36 Spezielle Geräteaspekte bei Funktionsredundanz	214

12.37 Entwurf mit Unterstützung durch Rechner-Simulation	214
13 Diskrete Regelungen und Steuerungen	217
13.1 Zeitdiskrete Systeme und Regelungen	217
13.2 Amplitudendiskrete Systeme	219
13.3 Schalt-, Übersichts- und Logikpläne	219
13.4 Karnaugh-Veitch-Diagramm	220
13.5 Übergangsmatrix, Zustandsgraph	222
13.6 Speicherprogrammierbare Steuerungen	223
13.7 Anwendungen von Steuerungen	224
13.8 Petri-Netze	225
13.9 Fernwirkssysteme	226
14 Zuverlässigkeit und Redundanz von Automatisierungssystemen	227
14.1 Redundanz durch Mehrfachinstrumentierung	227
14.2 Partielle Redundanz bei Mehrfachinstrumentierung	230
14.3 Redundanz durch zyklische Verfahren	232
14.4 Zeitabhängige Funktionswahrscheinlichkeit	233
14.5 Passive Redundanz	234
A Verzeichnis häufig verwendeter Formelzeichen	235
A.1 Allgemeine Hinweise	235
A.2 Verknüpfungssymbole	235
A.3 Hochgestellte Symbole u. dgl.	236
A.4 Indizes	236
A.5 Operationszeichen	236
A.6 Symbole spezieller Art	236
A.7 Verzeichnis regelungstechnischer Fachzeitschriften	240
B Literaturverzeichnis	241
C Sachverzeichnis	247