

Inhaltsverzeichnis

Zum Geleit	XI
Vorwort zur achten Auflage	XIII
Vorwort zur zwölften Auflage	XV
1 Einführung in die Regelungstechnik	1
1.1 Aufgabe der Regelungstechnik	1
1.2 Begriffe und Benennungen	2
1.2.1 Steuerung	2
1.2.2 Regelung	4
1.2.3 Signalflussplan	7
1.3 Bauglieder in Regelkreisen und Steuerketten	10
1.3.1 Fühler	10
1.3.1.1 Fühler für Druck	10
1.3.1.2 Fühler für Durchfluss	12
1.3.1.3 Fühler für Füllstand	15
1.3.1.4 Fühler für Temperatur	16
1.3.1.5 Fühler für Kraft	18
1.3.1.6 Fühler für Drehzahl	19
1.3.2 Messumformer	20
1.3.3 Sollwertesteller	23
1.3.4 Summierglied, Vergleicher	24
1.3.5 Zeitglieder	24
1.3.6 Regler	26
1.3.7 Stellgerät	29

1.4	Steuer- und Regelaufgaben	34
1.4.1	Steuerung	34
1.4.2	Festwertregelung	38
1.4.3	Folgeregelung	40
1.4.3.1	Nachlaufregelung	40
1.4.3.2	Verhältnisregelung	41
1.5	Steuer- und Regelschaltungen	42
1.5.1	Festwertregelschaltungen	42
1.5.1.1	Einfachregelkreis	42
1.5.1.2	Einfachregelkreis mit Aufschaltungen	44
1.5.1.3	Kaskadenregelkreis	46
1.5.2	Folgeregelschaltungen	49
2	Beschreibung des Übertragungsverhaltens	53
2.1	Beschreibung mit Hilfe von Differenzialgleichungen	53
2.1.1	Arten von Differenzialgleichungen zur Beschreibung von Regelkreisgliedern	53
2.1.2	Eigenschaften linearer zeitinvarianter	57
2.1.2.1	Homogenität	57
2.1.2.2	Superposition	57
2.1.2.3	Zeitinvarianz	58
2.1.3	Linearisierung	58
2.1.3.1	Statischer Zusammenhang gemäß einer stetigen Kennlinie	59
2.1.3.2	Dynamischer Zusammenhang gemäß einer nichtlinearen Differenzialgleichung	60
2.1.4	Lösung von gewöhnlichen linearen Differenzialgleichungen mit konstanten Koeffizienten	61
2.1.4.1	Lösung mit Hilfe von Lösungsansätzen	61
2.1.4.2	Lösung mit Hilfe der Laplace-Transformation	67
2.2	Beschreibung mit Hilfe der Übertragungsfunktion	73
2.3	Beschreibung mit Hilfe von Antwortfunktionen	74
2.3.1	Impulsfunktion, Impulsantwort	75
2.3.2	Sprungfunktion, Sprungantwort	76

2.3.3	Anstiegsfunktion, Anstiegsantwort	77
2.3.4	Cosinusfunktion, Schwingungsantwort	77
3	Lineare Übertragungsglieder	81
3.1	Analogien	81
3.1.1	Verallgemeinerte Größen	82
3.1.2	Analoge Bauglieder	83
3.1.2.1	Energiequellen	83
3.1.2.2	Energieverbraucher	84
3.1.2.3	Energiespeicher	88
3.1.3	Entwurf eines mathematischen Modells	89
3.2	Elementare Übertragungsglieder	93
3.2.1	Regelstrecken	98
3.2.1.1	Regelstrecken mit proportionalem Verhalten	98
3.2.1.2	Regelstrecken mit integrierendem Verhalten	106
3.2.2	Regler	106
3.2.2.1	Proportional wirkender Regler	106
3.2.2.2	Integrierend wirkender Regler	110
3.2.2.3	Differenzierend wirkender Regler	112
3.2.2.4	Proportional und integrierend wirkender Regler	114
3.2.2.5	Proportional und differenzierend wirkender Regler	118
3.2.2.6	Proportional, integrierend und differenzierend wirkender Regler	121
4	Simulation des Zeitverhaltens	127
4.1	Simulatoren	127
4.1.1	Analogrechner	127
4.1.2	Digitalrechner	128
4.2	Simulation am Digitalrechner	131
4.2.1	Integrationsverfahren	131
4.2.2	Simulationssoftware	133
5	Grafische Darstellung der Übertragungsfunktion	139
5.1	Pol-Nullstellen-Verteilung	139
5.2	Frequenzgang	146

5.2.1	Ortskurve	149
5.2.1.1	Ortskurven elementarer Übertragungsglieder	149
5.2.1.2	Ortskurven von Übertragungssystemen	152
5.2.2	Frequenzkennlinien	152
5.2.2.1	Frequenzkennlinien elementarer Übertragungsglieder	153
5.2.2.2	Konstruktionshilfsmittel für Frequenzkennlinien . .	161
5.2.2.3	Frequenzkennlinien von Übertragungssystemen . .	163
6	Entwurf von Regelkreisen	167
6.1	Stabilität, Regelgüte und Empfindlichkeit	167
6.1.1	Übertragungsfunktionen des Regelkreises	167
6.1.2	Stabilität	170
6.1.3	Regelgüte	172
6.1.3.1	Regelgüte im Beharrungszustand	174
6.1.3.2	Regelgüte während des Einschwingvorganges . . .	178
6.1.4	Stabilitätskriterien	180
6.1.4.1	Hurwitz-Kriterium	180
6.1.4.2	Nyquist-Kriterium	183
6.1.5	Empfindlichkeit	189
6.2	Entwurf von Regelkreisen im Zeitbereich	191
6.2.1	Auswahl geeigneter Regler	192
6.2.2	Vergleich der Wirkung verschiedener Regler	194
6.2.2.1	Regelkreis mit P-T ₃ -Regelstrecke	194
6.2.2.2	Regelkreis mit I-T ₂ -Regelstrecke	207
6.2.3	Günstige Einstellung der Reglerkennwerte	210
6.2.3.1	Einstellregeln nach Ziegler und Nichols	210
6.2.3.2	Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick . .	214
6.2.3.3	Einstellregeln nach Kessler	217
6.2.3.4	Einstellregeln nach Naslin	221
6.3	Entwurf von Regelkreisen im Frequenzbereich	224
6.3.1	Wurzelortsverfahren	225
6.3.1.1	Definition der Wurzelortskurve	225
6.3.1.2	Phasenbeziehung und Betragsbeziehung	226
6.3.1.3	Konstruktionsregeln für Wurzelortskurven	228

6.3.1.4	Reglerentwurf	233
6.3.2	Frequenzkennlinienverfahren	239
6.3.2.1	Spezifikationen	239
6.3.2.2	Reglerentwurf	247
6.4	Auslegung von Regelschaltungen	256
6.4.1	Einfachregelkreis mit Störgrößenaufschaltung	256
6.4.1.1	Aufschaltung auf den Reglerausgang	256
6.4.1.2	Aufschaltung auf den Reglereingang	258
6.4.2	Einfachregelkreis mit Hilfsgrößenaufschaltung	259
6.4.3	Kaskadenregelkreis	260
7	Abtastsysteme	265
7.1	Beschreibung von Abtastvorgängen	265
7.2	Einführung in die z-Transformation	273
7.2.1	Definition	273
7.2.2	Korrespondenzen	274
7.2.3	Rechenregeln	277
7.2.4	z-Übertragungsfunktion	283
7.3	Digitale Regelungen	286
7.3.1	Aufbau des Regelkreises	286
7.3.2	Stabilität	289
7.3.3	Quasikontinuierlicher Abtastregler	291
7.3.4	Kompensationsregler	295
7.3.5	Regler für endliche Einstellzeit	296
	Literaturverzeichnis	301
	Sachverzeichnis	305

Zum Geleit

Es ist ein oft zu hörendes Vorurteil, die Regelungstechnik sei eine begrifflich besonders schwierige, vornehmlich mathematische Ingenieurwissenschaft, die nur von Spezialisten mit Erfolg ausgeübt werden könne. Gewiss, es gibt beispielsweise in der Kybernetik der Luft- und Raumfahrt Regelaufgaben, die nur mit einem großen Einsatz theoretischer und praktischer Mathematik von einem Team von Spezialisten gelöst worden sind.

Für die vielen Ingenieure, die im Zeichen der Automation mit Aufgaben konfrontiert sind, Festwertregelungen in Industriebetrieben zu planen, zu entwerfen, zu betreiben und zu verbessern, ist es dagegen viel wichtiger, dass sie sich in der grundlegenden Methodik des Steuerns und Regelns wirklich auskennen. Dies bedeutet, dass sie verstehen müssen, die Fundamentalmethoden der Regelungstechnik differenziert einzusetzen, dass sie lernen, Regelsysteme aus Subsystemen aufzubauen sowie Regelungen und Steuerungen derart zu kombinieren, dass die Regelvorgänge optimal ablaufen.

Um die Güte und Stabilität der Regelabläufe zu beurteilen, bedarf es indessen nur eines bescheidenen Aufwandes an Mathematik. Diese Erkenntnisse in anschaulicher Weise zu vermitteln, waren von jeher die Hauptanliegen dieses Buches, von dem in den letzten 22 Jahren nicht weniger als sieben Auflagen erschienen sind. Für die achte Auflage - so schien es mir - ist es an der Zeit, durch eine völlige Neufassung den sprachlichen und sachlichen Fortentwicklungen der Regelungstechnik in den letzten Jahren Rechnung zu tragen.

Da ich selbst bereits im 81. Lebensjahr stehe, schien es mir auch ein Gebot der Stunde, das Überleben dieses erfolgreichen Buches dadurch zu sichern, dass ich dem Verlag vorschlug, die Bearbeitung der 8. Auflage einem ausgezeichneten, an Jahren jüngeren Kollegen zu übertragen. Ich hatte bereits in den Anfängen der 60er Jahre das Glück,

in Herrn H. Jaschek einen Assistenten zu gewinnen, der in dankenswerter Weise bereits an der ersten Auflage dieses Buches mit mir zusammenarbeitete. Er ist es auch, der zusammen mit W. Engel zur Ergänzung meines Buches die "Übungsaufgaben zum Grundkurs der Regelungstechnik" erfunden hat, die ebenfalls als Buch im R. Oldenbourg Verlag erschienen sind.

Ich freue mich deshalb sehr darüber, dass mein alter Freund H. Jaschek, heute o. Professor der Universität des Saarlandes, es auf meinen Vorschlag hin übernommen hat, die Zukunft dieses Buches zu gestalten und zu sichern.

München, im Mai 1985

Ludwig Merz

Vorwort zur achten Auflage

Dieses Buch, dessen erste Auflage vor mehr als zwanzig Jahren erschienen ist, wurde im Laufe der Zeit mehrmals überarbeitet und neu verfasst. Um den heutigen Anforderungen in Ausbildung und Praxis gerecht zu werden, wurde die vorliegende achte Auflage völlig neu gestaltet. Dabei wurde das Ziel des Buches beibehalten, die Grundlagen der Regelungstechnik exakt, praxisnah, anschaulich und verständlich darzustellen. Das Buch soll wie bisher den Studierenden die Mitarbeit in den Vorlesungen erleichtern und den im Beruf stehenden Ingenieuren bei der Lösung praktischer Probleme behilflich sein. In Verbindung mit dem Buch "Übungsaufgaben zum Grundkurs der Regelungstechnik" eignet es sich auch zum Selbststudium.

Das Buch behandelt vorwiegend lineare zeitinvariante kontinuierliche Regelsysteme. Dabei wird bewusst eine ingenieurmäßige Darstellung gewählt und weitgehend auf mathematische Ableitungen und Beweise verzichtet. Durch zahlreiche praktische Beispiele wird der dargebotene Stoff vertieft und damit das Einprägen wichtiger Verfahren und Erkenntnisse erleichtert.

Das erste Kapitel führt in die Regelungstechnik ein. Es erklärt Grundbegriffe, beschreibt Bauglieder in Regelkreisen und erläutert Steuer- und Regeleinrichtungen zur Lösung von Regelaufgaben. Im zweiten Kapitel wird gezeigt, wie das Verhalten technischer Systeme analytisch durch Differenzialgleichungen und Übertragungsfunktionen sowie experimentell durch Antwortfunktionen ermittelt werden kann. Das dritte Kapitel arbeitet zunächst die Analogien bei den physikalischen Größen und Baugliedern von Systemen der verschiedenen technischen Gebiete heraus und beschreibt dann allgemein das Verhalten von Regelstrecken und Reglern. Die grafische Darstellung der Übertragungsfunktion als Pol-Nullstellen-Verteilung und als Frequenzgang wird im vierten Kapitel erläutert. Damit sind alle Voraussetzungen gegeben, um im fünf-

ten Kapitel aufzuzeigen, wie Regelkreise entworfen werden können. Nach Darlegung von Stabilität, Regelgüte und Empfindlichkeit wird der Entwurf von stetigen Reglern im Zeitbereich an Hand von Einstellregeln sowie im Frequenzbereich an Hand des Wurzelorts- und des Frequenzkennlinienverfahrens behandelt. Es folgt der Entwurf von Regelkreisen mit schaltenden Reglern und die Auslegung von Regelschaltungen ein- und mehrschleifiger Regelkreise. Den Abschluss des Buches bildet im sechsten Kapitel eine Einführung in die Prozesslenkung mit Digitalrechnern.

Mein herzlicher Dank gilt vor allem meinem Lehrer und Freund, Herrn em. o. Professor Dr.-Ing. L. Merz, für das Vertrauen, das mir durch die Übergabe seines so erfolgreichen Buches zuteil wird. Meinen Mitarbeitern, insbesondere meinem früheren Mitarbeiter, Herrn Dipl.-Ing. M. Seiermann, danke ich für anregende Diskussionen und zahlreiche Verbesserungsvorschläge. Nicht zuletzt gebührt dem Verlag R. Oldenbourg mein Dank für das gezeigte Interesse und die wohlwollende Unterstützung bei der Neugestaltung des Buches.

Ich hoffe, dass auch diese Auflage des Buches Interessierten den Zugang zur Regelungstechnik erleichtern und Studierenden wie Berufstätigen eine wertvolle Hilfe sein wird.

Saarbrücken, im Mai 1985

H. Jaschek

Vorwort zur zwölften Auflage

Es obliegt mir die traurige Pflicht, den Lesern dieses Buches den Tod meines verehrten Lehrers und Mitautors, Herrn em. o. Professor Dr.-Ing. L. Merz, bekanntzugeben. Herr Merz ist nach einem arbeitsreichen und erfüllten Leben im gesegneten Alter von 87 Jahren verstorben.

Die vorliegende zwölfte Auflage ist eine vollständig überarbeitete und mit einer Reihe von Erweiterungen versehene Neuauflage, wobei die bisherige Zielsetzung des Buches unverändert geblieben ist. Im neu eingefügten vierten Kapitel werden zur Ermittlung des Zeitverhaltens von Systemen die Verfahren der analogen und digitalen Simulation erläutert. Im neu gestalteten siebenten Kapitel werden nach einer Beschreibung von Abtastvorgängen die z-Transformation, digitale Regelungen und Prozessleitsysteme behandelt.

Um das Verständnis des Stoffes zu fördern, enthält auch diese Auflage zahlreiche Beispiele, die durch einen anderen Schrifttyp kenntlich gemacht sind.

Für die mir insbesondere aus dem Kreise meiner Hörer zugegangenen Hinweise und Verbesserungsvorschläge danke ich bestens. Ferner danke ich Frau R. Barbie und Herrn cand. ing. R. Wartenberg für die sorgfältige Reinschrift des druckfertigen Originals und den Herren W. Schröder und E. Leinweber für das bewährte Reinzeichnen der zahlreichen Abbildungen. Nicht zuletzt gilt mein Dank Herrn M. John vom R. Oldenbourg Verlag für die stets freundliche und verständnisvolle Zusammenarbeit.

Saarbrücken, im Oktober 1992

H. Jaschek