

REGELUNGSTECHNIK IN EINZELDARSTELLUNGEN · BAND 1

EDUARD PESTEL, Prof. Dr.-Ing.

ECKHARD KOLLMANN, Dipl.-Ing.

Grundlagen der Regelungstechnik

Ein Lehrbuch für Studierende und Ingenieure

Mit 396 Abbildungen, 20 Tabellen und 148 Übungsaufgaben



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

ISBN 978-3-663-04075-0 ISBN 978-3-663-05521-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-05521-1

© 1961 by Springer Fachmedien Wiesbaden
Ursprünglich erschienen bei Friedr. Vieweg & Sohn. Verlag, Braunschweig 1961.
Alle Rechte vorbehalten
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1961

Vorwort

Bei der Abfassung des vorliegenden ersten Bandes der Reihe „Regelungstechnik in Einzeldarstellungen“ haben wir uns die Aufgabe gestellt, ein einführendes Lehrbuch der Regelungstechnik für Studenten der Technischen Hochschulen und Ingenieurschulen zu schreiben. Wir wenden uns ferner an die in der Praxis stehenden Ingenieure, die im Selbststudium die Kenntnisse in der Theorie der selbsttätigen Regelung zu erwerben wünschen, die bis vor wenigen Jahren im Rahmen des Studienplans unserer technischen Schulen nicht vermittelt wurden. Dabei konnten wir uns auf mehrjährige Erfahrungen stützen, die in Vorlesungen und Übungen an der Technischen Hochschule Hannover gesammelt wurden.

Der Lehrbuchcharakter kommt auch darin zum Ausdruck, daß Übungsaufgaben am Ende der einzelnen Abschnitte eingefügt wurden. Die im Unterricht gewonnenen Erfahrungen geben uns Veranlassung, den Leser nachdrücklich darauf hinzuweisen, wie wichtig die selbständige Bearbeitung der Übungsaufgaben für die Beherrschung des dargebotenen Stoffes ist. Aufgaben von überdurchschnittlichem Schwierigkeitsgrad sind durch Stern gekennzeichnet.

In der Einleitung und in dem ersten Kapitel werden die regelungstechnischen Begriffe und der Aufbau von Regelkreisen behandelt. Dabei wurde, neben einer knappen Einführung in die gerätetechnischen Möglichkeiten bei verschiedenen Regelungsaufgaben, die Aufstellung der Blockschalt- und Strukturbilder besonders ausführlich erörtert. Denn in diesen findet ja die der Regelungstechnik eigentümliche gedankliche Vorgehensweise ihren anschaulichen Niederschlag. Erst wenn der Studierende die Fähigkeit erworben hat, Regler, Regelstrecken und Regelkreise im Blockschalt- und Strukturbild darzustellen, ist er in der Lage, die regelungstechnischen Zusammenhänge klar zu erkennen und die mathematischen bzw. experimentellen Untersuchungsmethoden sinnvoll anzuwenden. Das zweite Kapitel bietet eine erste Einführung in die mathematische Behandlung von regelungstechnischen Problemen. Es zeigt insbesondere, wie anhand des Strukturbildes die Differentialgleichungen für Regelkreisglieder und Regelkreise abgeleitet werden.

Nach dieser Vorbereitung wendet sich das Buch der eingehenden Erörterung der linearen mathematischen Methoden der Regelungstechnik zu, die eine straffe und allgemeingültige Formulierung der in alle Zweige der Technik hineinreichenden Regelungsprobleme ermöglichen. Hier stellt die Übertragungsfunktion (3. Kapitel) den zentralen mathematischen Begriff dar, von dem aus der Zugang zum Wurzelortverfahren und zur Frequenzgangmethode am einfachsten gelingt. Beide Verfahren werden dann in je einem Kapitel ausführlich beschrieben und auf Beispiele angewendet. Beim Wurzelortverfahren dürfte der Katalog von Wurzelortkurven für die praktische Anwendung der Methode von Nutzen sein. In dem 5. Kapitel über die Frequenzgangmethode, die wohl das wirkungsvollste mathematische Hilfsmittel für die Regelungstechnik darstellt, wurde besonders breiter Raum dem in der anglo-amerikanischen Praxis vorwiegend verwendeten Bode-Diagramm gewidmet. Diese Darstellungsweise konnte durch Einführung der Normzahlen vereinfacht und zu einer halb-

rechnerischen Methode erweitert werden. Die Vorteile der logarithmischen Auftragung zeigen sich bei der Auswertung von Versuchsergebnissen und später bei der Optimierung und Synthese von Regelkreisen, die im 6. Kapitel erörtert werden. Neben der Mitteilung von praktisch bewährten Faustregeln wurde hier das Hauptgewicht darauf gelegt, den Studierenden in der Wahl und Auslegung von optimierenden Standardnetzwerken zu unterweisen. Die Möglichkeit einer solchen leichtfaßlichen Optimierung rechtfertigt allein schon die vorangegangene intensive Beschäftigung mit dem Bode-Diagramm. Im letzten Kapitel befassen wir uns mit der Anwendung des elektronischen Analogrechners für die Untersuchung linearer und nichtlinearer Regelungsprobleme.

Bei der Darstellung der mathematischen Verfahren haben wir uns bemüht zu zeigen, daß diese nicht nur der Analyse dienen, sondern vielmehr einen Weg zur optimalen Synthese von Regelkreisen unter Berücksichtigung der technischen Gegebenheiten eröffnen. Die nichtlineare Regelungstheorie mußte dabei, mit Ausnahme kurzer Hinweise im 7. Kapitel, übergangen werden, da bereits ihr gegenwärtiger Stand eine gesonderte Darstellung erfordert. Der erfahrene Leser wird manche ihm vertraute Methode vermissen, doch wird er — so glauben wir — hinreichend dadurch entschädigt, daß die Beschränkung auf die uns am nützlichsten erscheinenden Verfahren ihre gründliche, mit zahlreichen Beispielen versehene Behandlung ermöglichte. Es sei noch darauf hingewiesen, daß wir von genormten Bezeichnungen nur da abgewichen sind, wo die Möglichkeit zu Verwirrung bestand, so wurde z. B. für Sekunde die Abkürzung *sec* anstelle von *s* verwendet.

Im Interesse der Leser, welche sich nur eine Auswahl des dargebotenen Stoffes aneignen wollen, haben wir eine Lesetabelle vorbereitet. Sie befindet sich im Anhang und gibt Auskunft über diejenigen Teile des Buches, welche zum Verständnis eines ausgewählten Abschnittes beitragen.

Für viele Anregungen und Verbesserungsvorschläge danken wir unseren früheren Mitarbeitern, Herrn Dr.-Ing. *D. Döwener* und Herrn Dr.-Ing. *A. Hupe*. An der Ausarbeitung der Übungsaufgaben war Herr Dipl.-Ing. *B. Dirr* maßgebend beteiligt, dem im Hinblick auf die Bedeutung der Übungen für die erfolgreiche Durcharbeitung des Buches unser besonderer Dank gilt.

Dem Verlag Friedr. Vieweg & Sohn sei an dieser Stelle nochmals für seine große Geduld ebenso wie für die Erfüllung zahlreicher Sonderwünsche gedankt.

Hannover, im März 1961

E. Pestel

E. Kollmann

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|---|-------|
| Einleitung | 1 |
| 1. Der Aufbau von Regelkreisen | |
| 1.1 Luftdruckregelung | 8 |
| 1.2 Raumtemperaturregelung | 21 |
| 1.3 Elektrische Folgeregelung | 30 |
| 1.4 Flüssigkeitsstandregelung | 37 |
| 2. Einführung in die mathematische Beschreibung | |
| 2.1 Drehzahlregelung einer Dampfturbine als Beispiel | 46 |
| 2.2 Blockschalt- und Strukturbild | 48 |
| Übungsbeispiele | 51 |
| Übungsaufgaben | 59 |
| 2.3 Differentialgleichungen für Regelkreisglieder und Regelkreis | 64 |
| Übungsaufgaben | 67 |
| 3. Die Übertragungsfunktion | |
| 3.1 Die Übergangsfunktion; Klassifikation von Regelstrecken und Reglern | 69 |
| 3.2 Ermittlung der Übergangsfunktion mit Hilfe der Übertragungsfunktion | 73 |
| 3.3 Anwendungsbeispiele | 79 |
| Übungsaufgaben | 84 |
| 3.4 Anwendung der Übertragungsfunktion auf die Standard-Eingangssignale | 85 |
| Übungsaufgaben | 90 |
| 3.5 Schaltungsregeln für die Reduktion von Struktur- und Blockschaltbildern | 91 |
| Übungsaufgaben | 95 |
| 3.6 Bestimmung des Beharrungsverhaltens von Regelkreisen mit Hilfe der Übertragungsfunktion | 98 |
| Übungsaufgaben | 101 |
| 4. Das Wurzelortverfahren | |
| 4.1 Mathematische Grundlagen des Wurzelortverfahrens | 104 |
| 4.2 Regeln für die Konstruktion von Wurzelortkurven | 109 |
| 4.3 Berechnung der Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises | 123 |
| 4.4 Katalog von Wurzelortkurven | 127 |
| Übungsaufgaben | 138 |
| 4.5 Anwendung des Wurzelortverfahrens bei beliebigen Parametern | 140 |
| Übungsaufgaben | 143 |
| 4.6 Wurzelortverfahren bei vermaschten Regelkreisen | 144 |
| Übungsaufgaben | 146 |

| 5. Die Frequenzgangmethode | Seite |
|--|-------|
| 5.1 Einführungsbeispiel | 148 |
| 5.2 Der komplexe Frequenzgang und seine Ortskurve | 149 |
| Übungsaufgaben | 154 |
| 5.3 Ableitung des Stabilitätskriteriums von Nyquist | 156 |
| 5.4 Beispiele zur Stabilitätsuntersuchung im Ortskurvendiagramm | 168 |
| Übungsaufgaben..... | 176 |
| 5.5 Der Frequenzgang im Bode-Diagramm | 178 |
| Übungsaufgaben..... | 191 |
| 5.6 Inversion, Multiplikation und Division von Frequenzgängen..... | 192 |
| Übungsaufgaben..... | 196 |
| 5.7 Anwendung des vereinfachten Nyquist-Kriteriums im Bode-Diagramm | 198 |
| Übungsaufgaben..... | 201 |
| 5.8 Nichtreguläre Systeme | 202 |
| 5.8.1 Positive Pole in der Übertragungsfunktion $F_o(s)$ des offenen Kreises | 202 |
| 5.8.2 Positive Nullstellen in der Übertragungsfunktion $F_o(s)$ des offenen Kreises | 207 |
| 5.8.3 Regelkreis mit Totzeit | 211 |
| Übungsaufgaben..... | 215 |
| 5.9 Auswertung gemessener Frequenzgänge..... | 216 |
| Übungsaufgaben..... | 221 |
| 5.10 Frequenzgangverhalten des geschlossenen Regelkreises, Nichols-Diagramm . | 223 |
| Übungsaufgaben..... | 234 |
| 5.11 Näherungsverfahren für das Frequenzgangverhalten des geschlossenen Regelkreises | 236 |
| Übungsaufgaben..... | 237 |
| 5.12 Beziehung zwischen Frequenz- und Zeitverhalten | 239 |
| 5.12.1 Anwendung des Fourierintegrals | 239 |
| 5.12.2 Anwendung der Übertragungsfunktion..... | 244 |
| Übungsaufgaben..... | 246 |
| | |
| 6. Optimierung und Regelkreissynthese | |
| 6.1 Formulierung der Optimierungskriterien | 247 |
| 6.1.1 im Zeitbereich | 247 |
| 6.1.2 in der Wurzelortebene | 251 |
| 6.1.3 für den Frequenzgang | 252 |
| 6.2 Faustformeln für die optimale Einstellung von Reglern bei vorgegebener Strecke | 254 |
| 6.2.1 auf der Übergangsfunktion basierend | 254 |
| 6.2.2 auf der kritischen Verstärkung basierend..... | 255 |
| 6.2.3 auf dem Betragsoptimum basierend | 255 |
| Übungsaufgaben..... | 257 |
| 6.3 Einfügen von Netzwerken | 258 |
| 6.3.1 Reihenschaltung | 258 |
| 6.3.2 Parallelschaltung | 259 |
| 6.3.3 Gegenschaltung (Rückführung) | 262 |
| Übungsaufgaben..... | 265 |

| | Seite |
|--|-------|
| 6.4 Optimierung im Bode-Diagramm | 267 |
| 6.4.1 Amplitudenabsenkendes Netzwerk | 268 |
| 6.4.2 Phasenanstiebiges Netzwerk | 270 |
| Übungsaufgaben..... | 275 |
| 6.5 Regelkreissynthese | 276 |
| 6.5.1 Bestimmung des Reglerfrequenzganges | 276 |
| 6.5.2 Bestimmung des Frequenzganges des Führungsblockes (Sollwertglättung) | 279 |
| Übungsaufgaben..... | 281 |
| 7. Anwendung des Analogrechners in der Regelungstechnik | |
| 7.1 Die Technik des elektronischen Analogrechners | 284 |
| 7.2 Aufstellen eines Schaltplanes | 287 |
| Übungsaufgaben..... | 300 |
| 7.3 Maßstabsbestimmung | 302 |
| 7.3.1 Schwingung eines Feder-Masse-Systems mit trockener Reibung | 304 |
| 7.3.2 Fadenpendel mit Anschlag | 307 |
| Übungsaufgaben..... | 312 |
| 7.4 Anwendungsbeispiele der Regelungstechnik | 314 |
| 7.4.1 Lineares Beispiel..... | 314 |
| 7.4.2 Regelkreis mit Relaisregler | 315 |
| Literatur | 320 |
| Sachverzeichnis | 321 |