

Die selbsttätige Regelung

Theoretische Grundlagen mit
praktischen Beispielen

Von

Professor Dr.-Ing. A. Leonhard

Stuttgart

Mit 254 Abbildungen



Springer-Verlag
Berlin/Göttingen/Heidelberg

1949

ISBN 978-3-642-52978-8 ISBN 978-3-642-52977-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-52977-1

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten
Copyright 1949 by Springer-Verlag OHG.,
Berlin/Göttingen/Heidelberg
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1949

Vorwort.

Das im Jahre 1940 im gleichen Verlag erschienene Werk des Verfassers: „Die selbsttätige Regelung in der Elektrotechnik“ war 1942 vergriffen. (1944 in USA nachgedruckt.) Auf Vorschlag des Verfassers entschloß sich der Verlag damals von einer Neuauflage abzusehen und dafür ein Buch über die Regeltechnik ganz allgemein ohne Beschränkung auf die Elektrotechnik herauszubringen. Das Manuskript zu diesem Werk konnte schon anfangs 1944 dem Verlag vorgelegt werden, die Drucklegung verzögerte sich aber mit Rücksicht auf die Kriegs- und Nachkriegsverhältnisse immer wieder. Jetzt nachträglich gesehen, kann dies als Vorteil gewertet werden, dem Verfasser war es so möglich, bei einer Überarbeitung des Manuskriptes in den Jahren 1946 und 1947 die neuesten Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Regelung noch zu berücksichtigen. Da aber damals die ausländische Literatur noch nicht oder schwer zugänglich war, mußte sich diese Ergänzung auf das im deutschen Schrifttum Erschienene beschränken. Wie später festgestellt werden konnte, scheint man aber auch im Auslande keine grundsätzlich anderen Wege gegangen zu sein, wenn auch das eine oder andere Problem anders angefaßt wird als bei uns üblich. So hat man z. B. das Verfahren von NYQUIST zur Kontrolle der Stabilität (Abschnitt 10) weiter entwickelt (BODE-Verfahren) und damit eine bequemere Anwendungsmöglichkeit geschaffen. Trotzdem ist meines Erachtens das im Abschnitt 10 als „mathematisch-graphische Lösung“ des Stabilitätsproblems behandelte Verfahren diesem an Einfachheit noch überlegen.

Während bei den verschiedenen, in den letzten Jahren erschienenen Werken auf dem Gebiet der Regelung die mathematische Seite besonders betont ist, wird bei dem vorliegenden Buch mehr Wert auf die praktische Regeltechnik, also die Anwendung der verschiedenen mathematischen Methoden, gelegt. Bei den einzelnen Verfahren wird zunächst das entsprechende mathematische Rüstzeug kurz behandelt und zwar soweit, daß auch für den mathematisch weniger Geschulten eine Zuhilfenahme anderer Bücher im allgemeinen kaum nötig sein wird. An Hand von zahlreichen praktischen Regelaufgaben, die auch zahlenmäßig durchgerechnet werden, wird dann das entsprechende Verfahren eingehend erläutert. Für die Erlernung einer Methode ist bekanntlich die Durchrechnung von Beispielen mindestens ebenso wichtig wie die Beherrschung der reinen Theorie. Um den Unterschied im Rechenaufwand, der Denkarbeit usw. bei den einzelnen Methoden besonders klar erkennen zu lassen, wurden wiederholt die gleichen Beispiele nach verschiedenen Methoden behandelt. Es zeigt sich ziemlich eindeutig, daß im allgemeinen die Operatoren-

rechnung bei der Lösung von Regelproblemen wesentlich schneller zum Ziel führt als die klassische Methode mit Hilfe der Differentialgleichung. Aus diesem Grunde hat auch die Operatorenrechnung in den letzten Jahren mehr und mehr Eingang in der Regeltechnik gefunden. Trotzdem wird der Ingenieur, der sich nur gelegentlich mit Regelaufgaben beschäftigt, mit der Differentialgleichung, die ihm im allgemeinen von andern Problemen her geläufiger ist, arbeiten. Es erschien daher als zweckmäßig, unabhängig von den neueren Methoden auch diese Behandlungsart nicht zu vernachlässigen.

Bei der Lösung der Regelaufgaben mit Hilfe der Operatorenrechnung bzw. Laplace-Transformation stützt sich der Verfasser weitgehendst auf die Arbeiten von K. W. WAGNER (35, 36). Wie bei K. W. WAGNER erscheint als Unterfunktion einfach der Frequenzgang, also das Verhältnis von Ausgangsgröße zu Eingangsgröße bei Sinusschwingungen, während sonst vielfach als Unter- bzw. Bildfunktion der Frequenzgang dividiert durch p auftritt, also das Verhältnis von Ausgangsgröße zu Geschwindigkeit der Eingangsgröße. Bei Verwendung von Zusammenstellungen von Ober- und Bildfunktionen ist hierauf zu achten.

Um verwickeltere Schaltungen schnell überblicken und kontrollieren zu können, benutzt man in der Schaltungstechnik außer dem Wirkschaltplan, der vollständigen Darstellung der Schaltung mit allen Leitungen, Apparaten usw. mit Vorteil noch den sogenannten Stromlaufschaltplan, aus dem die Schaltung und ihre Wirkungsweise viel klarer zu übersehen ist. Aus den gleichen Gründen hat der Verfasser zur schnelleren Orientierung über die Wirkungsweise einer Regelung und damit zur wesentlichen Erleichterung der Aufstellung der Regelgleichung das „Schema der Regelung“ eingeführt. Unabhängig vom tatsächlichen Aufbau der Anordnung, die aus mechanischen oder elektrischen Gliedern bestehen kann, zeigt das Schema nur das für die Regelung tatsächlich wichtige, nämlich den Aufbau des Regelkreises aus den Einzelgliedern, die lediglich durch Quadrate mit eingezeichneter Übergangsfunktion dargestellt sind. Nach einem solchen Schema läßt sich, besonders bei einiger Erfahrung, sehr schnell die Regelung überblicken und der Grad der zu erwartenden Schwierigkeiten beurteilen.

Die Kontrolle der Stabilität wird nach dem Verfahren von HURWITZ oder NYQUIST bei verwickelteren Systemen mit Differentialgleichungen höher als 4. Ordnung recht mühsam und zeitraubend. Eine wesentliche Erleichterung dürfte in dieser Frage durch das vom Verfasser angegebene (24) und unabhängig von ihm auch von L. CREMER (47) gefundene neue im Abschnitt 10 ausführlich behandelte Verfahren („mathematisch-graphische Lösung“) geschaffen sein. Daneben hat sich aber auch das im ersten Buch des Verfassers über die Regelung in der Elektrotechnik bereits behandelte und von W. OPPELT (46) weiter entwickelte Verfahren zur Stabilitätsuntersuchung an Hand der Teilfrequenzgänge von Regler und Regelkreis (Abschnitt 10 III c) als fruchtbar erwiesen. Z. B. bei nur experimentell aufgenommenen Frequenzgängen oder bei rechnerisch geschlossen schwer erfaßbaren Vorgängen wie z. B. bei Vorhandensein von trockener Reibung führt praktisch nur dieses Verfahren zum Ziel.

Während man sich bisher bei Stabilitätsuntersuchungen lediglich darauf beschränkte, festzustellen, ob ein System überhaupt als stabil gelten kann, ob also die charakteristische Gleichung nur Wurzeln mit negativem Realteil aufweist, gestattet die in Abschnitt 10 IV behandelte (44), durch Weiterentwicklung des mathematisch-graphischen Verfahrens entstandene Methode des Verfassers bei verhältnismäßig geringem Rechenaufwand eine Beurteilung der Stabilitätsgüte, d. h. die Feststellung der Mindestdämpfung aller auftretenden Schwingungen. Während durch die Kontrolle der Stabilität allein nur sehr roh vollkommen unbrauchbare Regelungen ausgeschaltet werden, gestattet die Kontrolle der Stabilitätsgüte eine viel feinere Beurteilung der Brauchbarkeit der Anordnung. Aus dieser Methode ist auch das im Anhang behandelte Verfahren zur Lösung von Gleichungen höheren Grades entstanden, das sehr häufig verhältnismäßig schnell zur Auffindung eines komplexen Wurzelpaares führt.

Bei der Behandlung von Regelproblemen hat man sich lange Zeit damit begnügt, den Regelvorgang bei gegebenen oder nach allgemeinen Gesichtspunkten angenommenen Konstanten zu ermitteln oder auch lediglich die Stabilität zu kontrollieren. Neuerdings ist man aber bestrebt Methoden zu finden, nach denen die frei wählbaren Konstanten so festgelegt werden können, daß der Regelverlauf einen gewünschten, als zweckmäßig erscheinenden, optimalen Verlauf nimmt. Im Abschnitt 12 wird diese Frage ausführlich behandelt, wobei auf Arbeiten Bezug genommen werden konnte, die im Institut des Verfassers entstanden sind (40). Den in Abschnitt 13 zusammengestellten Tafeln können im übrigen für wichtige häufig vorkommende Fälle, bei bestimmter Anforderung an die Regelung, ohne Rechnung die freien Konstanten unmittelbar und gleichzeitig auch schon die Wurzeln der charakteristischen Gleichung entnommen werden.

Das Werk ist zunächst als Einführung in die Regeltechnik für Neulinge gedacht, setzt also keine Vorkenntnisse auf diesem Gebiet voraus. Entsprechend sind auch in den ersten Abschnitten die Grundlagen recht ausführlich behandelt. Vor allem wird bei den vielen durchgerechneten Beispielen gezeigt, wie bei einer gegebenen elektrischen oder mechanischen Regelordnung durch entsprechende Unterteilung des Gesamtregelkreises in Einzelglieder zunächst das Regelschema gewonnen und wie dann, meist unter gewissen Vernachlässigungen bzw. bei Beschränkung auf nur kleine Abweichungen, die Gleichungen der Einzelglieder und schließlich die Gesamtgleichung des Regelkreises gefunden werden können. Mit Vorteil wird man dabei die Tabellen I und II am Schluß des Buches, in denen für häufiger vorkommende Regelglieder alle wichtigen Unterlagen, wie Frequenzgang, Übergangsfunktion usw. zusammengestellt sind, verwenden. Das Buch will aber auch dem erfahrenen Regeltechniker etwas bieten und deshalb finden in den späteren Abschnitten die neuesten Methoden und Entwicklungen weitgehendst Berücksichtigung.

Die Bilder und Gleichungen sind in jedem mit arabischer Ziffer bezeichneten Abschnitt durchnummeriert. Wird auf eine Abbildung oder

eine Gleichung des gleichen Abschnittes hingewiesen, so erscheint einfach die entsprechende Zahl, bei Hinweis auf Abbildungen oder Gleichungen anderer Abschnitte vor dieser Zahl noch die Abschnittsnummer, also z. B. Abb. 3/6, was bedeutet Abbildung 6 in Abschnitt 3. Die kursiv in Klammern angegebenen Zahlen (*31*) beziehen sich auf das Literaturverzeichnis am Schluß des Buches.

Für wertvolle Anregungen bei der Abfassung des Buches bin ich Herrn Professor Dr.-Ing. W. BADER und Herrn Dr.-Ing. E. GÖRK zu Dank verpflichtet. Außerdem danke ich Herrn Dr.-Ing. FU-SIU TSCHEG, der mich durch seine wertvolle Mitarbeit bei der Durchrechnung der vielen Beispiele außerordentlich unterstützt hat. Ein Bedürfnis ist es mir auch, dem Verlag, der es trotz der vielen Schwierigkeiten der letzten Jahre nun doch noch möglich gemacht hat, das Werk herauszubringen und zwar in der vorliegenden guten Ausstattung, meinen Dank auszusprechen.

Stuttgart, Juni 1949

Der Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
A. Grundlagen	1
1. Allgemeines über Regelung	1
I. Verschiedene Arten von Regelung, Zweck der Regelung . . .	1
II. Grundbegriffe, Aufbau eines Regelkreises	2
III. Das Regelproblem	10
2. Verhalten von Meßwerken	14
I. Verschiedene Darstellungsarten	14
II. Statisches Meßwerk	14
a) Grundsätzliches Verhalten	14
b) Berechnung	16
α) Ideales statisches Meßwerk	16
β) Massebehaftetes Meßwerk	18
γ) Massebehaftetes Meßwerk mit Dämpfung	26
c) Meßwerke mit ähnlichem Verhalten	29
III. Astatisches Meßwerk	30
a) Grundsätzliches Verhalten	30
b) Berechnung	32
c) Meßwerke mit ähnlichem Verhalten	34
IV. Astatisches Meßwerk mit vorübergehender Statik	35
a) Grundsätzliches Verhalten	35
b) Berechnung	36
c) Meßsysteme mit ähnlichem Verhalten	41
V. Zusammenstellung der Gleichungen und Kurven für Meßwerke	43
3. Verhalten von Einzelgliedern des Verstellsystems	43
I. Einteilung der verschiedenen Verstellglieder	43
II. Verstellglieder mit Beeinflussung nur durch die Stellgröße selbst	43
a) Allgemeiner Fall (Schwingung)	43
b) Weg-Geschwindigkeitssteuerung	52
c) Reine Geschwindigkeitssteuerung	54
d) Reine Wegsteuerung	57
e) Beschleunigungs-Geschwindigkeitssteuerung	57
f) Reine Beschleunigungssteuerung	59
III. Verstellglieder mit Beeinflussung durch die Stellgröße selbst und durch ihre Änderung	60
a) Drehstromgenerator	61
b) Kraftmaschine für Fahrzeugantrieb mit elektrischer Übertra- gung	63
c) Verstellwerk eines indirekten Reglers mit nachgiebiger Rück- führung	66
IV. Verstellglieder mit Beeinflussung nur durch die zeitliche Ände- rung der Stellgröße	69
a) Allgemeines	69
b) Kraftmaschine mit Synchrongenerator, der auf ein starres Netz arbeitet	69
c) Die Steuerung des Momentes von Motoren	72
V. Zusammenstellung der Gleichungen und Kurven für Verstell- glieder	74
4. Versuchstechnische Feststellung des Verhal- tens von Einzelgliedern des Regelkreises	74

	Seite
B. Ermittlung des Regelvorganges	79
5. Klassisches Verfahren zur Ermittlung des Regelvorganges mit Hilfe der Differentialgleichung. . .	79
I. Allgemeines über das Verfahren	79
II. Beispiele	82
a) Einfache Spannungsregelung mit Spannungsteiler (unmittelbare Regelung)	82
b) Drehzahlregelung eines Dieselmotors (mittelbare Regelung 1. Ordnung)	88
c) Drehzahlregelung einer Kraftmaschine mit indirektem Regler (mittelbare Regelung 2. Ordnung)	94
d) Druckregelung	106
e) Beschleunigungsregelung bei elektrischen Fahrzeugen	114
f) Temperaturregelung bei einer Dampf-Warmwasserheizung	119
6. Ermittlung des Regelvorganges mit Hilfe der Operatorenrechnung nach dem Verfahren der selbsterregten Schwingungen.	125
I. Allgemeines über das Verfahren	125
II. Beispiele	129
a) Drehzahlregelung einer Kraftmaschine mit indirektem Regler	129
b) Spannungsregelung eines Drehstromgenerators mit Erregermaschine durch einen Röhrenregler mit Stromtor-Endstufe	131
c) Spannungsregelung eines Drehstromgenerators mit Erregermaschine durch einen elektromagnetischen Spannungsregler	136
7. Ermittlung des Regelvorganges mit Hilfe der Operatorenrechnung nach dem Verfahren der fremderregten Schwingungen	138
I. Allgemeines über das Verfahren	138
II. Näherungsverfahren	143
III. Mehrfachregelung	145
IV. Beispiele	148
a) Drehzahlregelung einer Kraftmaschine mit indirektem Regler	148
b) Spannungsregelung eines Drehstromgenerators mit Erregermaschine durch einen elektromagnetischen Spannungsregler	152
c) Spannungsregelung mit Angriff der Störgröße über ein fremdes, außerhalb des Regelkreises liegendes Glied	154
d) Drehzahlregelung eines Dieselmotors mit Gleichstromgenerator mit Angriff über ein fremdes, außerhalb des Regelkreises liegendes Glied	155
e) Näherungsverfahren bei einer Temperaturregelung	157
f) Näherungsverfahren bei einer Drehzahlregelung	159
g) Näherungsverfahren bei einer Temperaturregelung mit fester Verzögerungszeit (Laufzeit) im Regelkreis	161
h) Drehzahlregelung eines Dieselmotors mit zunächst linear ansteigender und dann konstant bleibender Belastung	166
i) Netzregelung als Beispiel einer Zweifachregelung	168
8. Ermittlung des Regelvorganges mit Hilfe der LAPLACE-Transformation	173
I. Lösung der Differentialgleichung des Regelvorganges durch LAPLACE-Transformation	173
II. Methode der Integralgleichungen	175
9. Graphische Methoden	177
I. Allgemeines über die Zweckmäßigkeit rechnerischer und graphischer Methoden	177
II. Indirekter Regler mit konstanter Verstellgeschwindigkeit	177
III. Regelung bei fester Verzögerungszeit (Laufzeit) im Regelkreis	183

	Seite
C. Die Stabilität der Regelung	185
10. Stabilitätsuntersuchung	185
I. Allgemeines	185
II. Methode der kleinen Schwingungen	186
a) Bedingung für Stabilität	186
b) Rein mathematische Lösung mit Beispiel	186
c) Mathematisch-graphische Lösung mit Beispiel	188
III. Methode der selbsterregten Schwingungen	192
a) Bedingung für Stabilität	192
b) Ermittlung der Stabilität aus dem Frequenzgang des Regelkreises mit Beispiel	192
c) Ermittlung der Stabilität aus dem Frequenzgang des Verstellsystems und dem des Meßwerkes	194
IV. Kontrolle der Dämpfung bei stabiler Regelung	198
a) Allgemeines	198
b) Verfahren	199
c) Hilfsmittel für die praktische Anwendung des Verfahrens	201
d) Näherungsweise Ermittlung eines Wurzelpaares	202
e) Grenzkurven für bestimmte Dämpfung	204
f) Beispiele	205
11. Verbesserung der Stabilität	209
I. Allgemeine Maßnahmen	209
II. Besondere Maßnahmen	209
III. Einfluß des 1. u. 2. Differentialquotienten auf die Stabilität der Regelung	215
IV. Beispiele	218
a) Der freischwebende Körper	218
b) Winkelgetreue Gleichaufschaltung	220
c) Stabilisierung der Querlage eines Flugzeuges	225
D. Festlegung frei wählbarer Regelkonstanten	232
12. Verschiedene Methoden für die zweckmäßige Wahl der Regelkonstanten	232
I. Anforderungen an die Regelung	232
II. Angleichung der Abklingzeitkonstanten der verschiedenen Teilvorgänge	234
III. Die Regelfläche	239
a) Allgemeines	239
b) Berechnung der Regelfläche	239
c) Minimum der Regelfläche bei vorgeschriebener relativer Dämpfung	241
d) Minimum der Regelfläche bei gleichzeitiger Angleichung der Abklingzeitkonstanten verschiedener Teilvorgänge	245
13. Kurvenblätter für die zweckmäßige Bestimmung frei wählbarer Regelkonstanten	247
I. Der Zweck solcher Kurven	247
II. Kurvenblätter mit Erläuterungen	247
Arhang	260
Tabellen I u. II	266
Literaturverzeichnis	280
Sachverzeichnis	282