

Die Frequenzkennlinien

Eine Einführung in die Grundlagen des Frequenzkennlinien-
Verfahrens und dessen Anwendungen in der Regelungstechnik

K. H. Fasol

Mit 188 Abbildungen und 4 Ausschlagtafeln



1968

Springer-Verlag Wien GmbH

Dipl.-Ing. Dr. techn. KARL HEINZ FASOL
Dozent an der Technischen Hochschule Wien

Additional material to this book can be downloaded from <http://extras.springer.com>.

ISBN 978-3-7091-7963-5

ISBN 978-3-7091-7962-8 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-7091-7962-8

Alle Rechte vorbehalten

**Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung
des Springer-Verlages übersetzt oder in irgendeiner Form
vervielfältigt werden**

© 1968 Springer-Verlag Wien

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag/Wien 1968

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1968

Library of Congress Catalog Card Number 68-13 225

Geleitwort

Die Technik der modernen Regelung kann nur von ihrer Theorie her verstanden werden. Das gibt diesem Gebiet einen besonderen Reiz. Aber auch Schwierigkeiten eigener Art entstehen dadurch, denn für den theoretisch weniger Begabten gibt es kaum einen anderen Zugang zu den Kernproblemen der Regelungstechnik.

Alle theoretischen Verfahren, die diesen Zugang erleichtern, haben deshalb große Bedeutung für die Anwendung. Die Frequenzgangdarstellung nimmt unter diesen Verfahren einen bevorzugten Platz ein. Sie ist ohne allzu großen mathematischen Aufwand anwendbar und kann trotzdem bis zu einem vertieften Eindringen in schwierige Probleme ausgebaut werden. Sie zeigt auf einfache Weise einen Weg zur Operator Darstellung, ohne die die Signalfuß- und Blockschaltbilder nicht benutzt werden können, ohne die aber auch eine Modellierung auf dem Analog- oder Digitalrechner nicht möglich wäre. Die bildliche Darstellung der Frequenzgangoperatoren durch ihre Ortskurven verhilft zu einer Einsicht in die regelungstechnischen Zusammenhänge und zeigt, in welcher Hinsicht eine gegebene Regelanlage zu verändern ist, um günstige Regelergebnisse zu erhalten.

Die graphische Behandlung von Ortskurven des Frequenzganges ist jedoch bei vielteiligeren Problemen umständlich und kann auch nur für einen gewissen, meist verhältnismäßig engen Frequenzbereich mit genügender Genauigkeit erfolgen. Das Umzeichnen der Ortskurven in eine rechtwinkelige logarithmische Darstellung beseitigt viele dieser Schwierigkeiten, so daß das „Frequenzkennlinien-Verfahren“ für die Praxis das bevorzugte Darstellungsverfahren geworden ist.

Das vorliegende Buch zeigt in ausführlicher Weise die Behandlung von Regelproblemen nach diesem Verfahren und gibt damit wohl zum ersten Mal eine zusammenfassende Darstellung des Frequenzkennlinien-Verfahrens in Buchform. Die Tragweite dieses Verfahrens wird dabei besonders deutlich, da sowohl die linearen stetigen Systeme als auch die nichtlinearen Systeme und schließlich sogar die Abtastregelungen damit darstellbar sind. Das Buch füllt eine Lücke im heute vorhandenen deutschsprachigen Schrifttum aus und es möge ihm Erfolg auf diesem Weg beschieden sein.

Darmstadt, im Juni 1968

W. Oppelt

Vorwort

Das Frequenzkennlinien-Verfahren zur Untersuchung und zum Entwurf von Regelkreisen wurde vorwiegend im englisch-amerikanischen Sprachraum entwickelt und wird auch weitgehend in der russischen Literatur benützt. Auch im deutschen Sprachraum verdrängt es langsam die früher besser eingeführte Ortskurvenmethode. Die wesentlichen Grundlagen des Verfahrens wurden wohl schon in zahlreichen Aufsätzen und einigen Broschüren erläutert und die Methode wird auch in unzähligen Publikationen immer wieder verwendet. Die hier versuchte zusammenfassende Darstellung, die unter anderem auch das nichtlineare Gebiet berücksichtigt, stand jedoch in Buchform bisher nicht zur Verfügung.

Es wird also ein Themenkreis behandelt, der immer aktuell sein wird. Trotz des Trends zur computergesteuerten Prozeßführung wird es nämlich auch in den nächsten Jahrzehnten immer noch eine Vielzahl von herkömmlichen Regelkreisen geben, zu deren Entwurf die konventionelle Regelungstheorie unumgänglich ist. Nicht zuletzt deshalb wird der Studierende oder der Betriebsingenieur seine Studien immer mit der konventionellen Theorie beginnen müssen, wenn er sich dem Gebiet der modernen Steuerungs- und Regelungstechnik zuwendet. Dieses Buch soll ihm dann helfen, sich über das Frequenzkennlinien-Verfahren zu informieren. Es lag nicht in meiner Absicht, ein weiteres in die Grundlagen der Regelungstechnik einführendes Lehrbuch zu schreiben. Da und dort mußte jedoch etwas weiter ausgeholt werden, um die jeweils notwendigen Grundlagen und Zusammenhänge zu schaffen. Gewisse Grundkenntnisse des Lesers werden aber vorausgesetzt. Der Lektüre sollte deshalb unbedingt das Studium eines grundlegenden Lehrbuches vorausgehen [z. B. 84, 121, 201, 243, 249, 287].

Das vorliegende Buch ist eine Erweiterung einiger Kapitel meiner regelungstechnischen Vorlesungen und verschiedener Veröffentlichungen, und es verwendet auch manchmal Ergebnisse einiger von mir betreuter Diplomarbeiten. Im ersten Teil habe ich eine Zusammenstellung der Grundlagen des Frequenzkennlinien-Verfahrens und dessen Anwendungsmöglichkeiten bei der Analyse und Synthese linearer Regelkreise versucht. Im zweiten Teil wird auch die Untersuchung von nichtlinearen und nichtstetigen Systemen behandelt. In beiden Teilen habe ich besonderen Wert auf einfache Näherungsmethoden gelegt, die bei guter Genauigkeit die Anwendung der Verfahren oft beträchtlich erleichtern. Einige abstrakt gedachte Übungsbeispiele am Ende einzelner Kapitel sollen dem Leser Gelegenheit zum Einüben der Methoden geben. Im dritten Teil wird dann über die Durchführung und Auswertung von Frequenzgangmessungen gesprochen.

Der thematischen Abgrenzung des Buches entsprechend finden bei der Systemanalyse nur sinusförmige Testsignale Berücksichtigung. Von der Behandlung der Systemanalyse mittels stochastischer Signale habe ich abgesehen, weil es dar-

über ausreichende Literatur gibt, vor allem die ausgezeichneten Werke von H. SCHLITT [281, 379]. Im Literaturverzeichnis finden sich weitere Hinweise [16, 51, 87, 127, 189, 195, 203, 204, 280, 288, 290, 331, 332].

Für meinen Lehrer an der Technischen Hochschule Wien, Herrn o. Professor Dr. F. SCHULZ, empfinde ich große Dankbarkeit, weil er mich vor etlichen Jahren dazu veranlaßt hat, neben meinem bisherigen Fachgebiet des hydraulischen Versuchs- und Meßwesens mich auch in das Gebiet der Regelungstechnik einzuarbeiten. Er übertrug mir nach und nach alle seine regelungstechnischen Vorlesungen an der Fakultät für Maschinenwesen und hat dadurch indirekt, aber doch wohl entscheidend zum Zustandekommen dieses Buches beigetragen. Es ist mir auch eine angenehme Verpflichtung, Herrn PETER VINGRON für die umsichtige Bearbeitung der Abschnitte 7 und 11 herzlich zu danken. Außerdem bin ich Herrn VINGRON für das Lesen von Manuskript und Korrekturbogen sowie für zahlreiche wertvolle Ratschläge großen Dank schuldig. Dem Institut für Numerische Mathematik an der Technischen Hochschule Wien (Vorstand o. Prof. Dr. H. J. STETTER) danke ich für die einige Male notwendige Benützung der Rechenanlage IBM 7040. Herzlicher Dank gebührt schließlich auch Fräulein E. DÖRTL für das sorgfältige Schreiben des Manuskriptes. Dem Springer-Verlag in Wien danke ich bestens für die Herausgabe des Buches in der gewohnt mustergültigen Springer-Ausstattung.

Wien, im Frühjahr 1968

Karl Heinz Fasol

Inhaltsverzeichnis

A. Lineare Systeme

	Seite
1. Beschreibung des dynamischen Verhaltens von regelungstechnischen Übertragungsgliedern	1
1.1 Übertragungsfunktion, Frequenzgang, Ortskurve	2
1.2 Reguläre und nichtreguläre Übertragungsfunktionen	6
1.3 Die Grundformen der Übertragungsglieder.	8
1.3.1 Reguläre Glieder	8
1.3.1.1 P-Glied	8
1.3.1.2 D-Glied und I-Glied	8
1.3.1.3 PD1-Glied und PT1-Glied.	9
1.3.1.4 PD2-Glied und PT2-Glied.	11
1.3.2 Nichtreguläre Glieder	13
1.3.2.1 Nichtreguläre Glieder erster und zweiter Ordnung	13
1.3.2.2 Allpaß-Glieder	14
1.3.2.3 Totzeit-Glied	16
2. Beschreibung des Übertragungsverhaltens durch Frequenzkennlinien	16
2.1 Die Frequenzkennlinien (Bode-Diagramm).	16
2.2 Die Grundformen der Frequenzkennlinien	19
2.2.1 P-Glied	19
2.2.2 D-Glied und I-Glied	19
2.2.3 PD1-Glied und PT1-Glied	20
2.2.3.1 Annäherung der Phasenkennlinien durch Gerade	23
2.2.3.2 Annäherung der Phasenkennlinien durch Hyperbeln	25
2.2.4 PD2-Glied und PT2-Glied	26
2.2.4.1 Annäherung der Phasenkennlinien durch Gerade	33
2.2.4.2 Annäherung der Phasenkennlinien durch Hyperbeln	34
2.2.5 Nichtreguläre Glieder; Totzeit	35
2.2.6 Zusammenfassung.	36
2.3 Übungsaufgaben	38
3. Zusammenhang zwischen Amplituden- und Phasenkennlinie bei regulären Systemen	40
3.1 Das Gesetz von BODE.	40
3.2 Vereinfachte Bestimmung der Phasenkennlinie	44
3.2.1 Graphische Näherungsmethode	44
3.2.2 Rechnerische Näherungsmethode	44
4. Frequenzkennlinien von geschlossenen Systemen und Parallelschaltungen	46
4.1 Frequenzkennlinien einschleifiger Systeme.	46
4.1.1 Das Nichols-Diagramm	48
4.1.2 Abschätzung des Verlaufes der Frequenzkennlinien	51

	Seite
4.2 Frequenzkennlinien von Parallelschaltungen	52
4.2.1 Verwendung des Nichols-Diagrammes	53
4.2.2 Abschätzung des Verlaufes der Frequenzkennlinien	54
4.3 Frequenzkennlinien mehrschleifiger Systeme	54
4.4 Übungsaufgaben	58
5. Stabilitätsanalyse	59
5.1 Das vereinfachte Nyquist-Kriterium	61
5.1.1 Näherungsverfahren zur Stabilitätsprüfung	64
5.1.2 Zwei-Ortskurven-Methode	65
5.2 Allgemeine Fassung des Nyquist-Kriteriums	67
5.2.1 Zwei-Ortskurven-Methode	73
5.3 Übungsaufgaben	74
6. Analyse der Stabilitätsgüte	77
6.1 Absolute Stabilitätsgüte	78
6.1.1 Grundformen der Güte-Kennlinien	79
6.1.2 Diskussion des Verfahrens	82
6.2 Relative Stabilitätsgüte	83
6.2.1 Grundformen der Güte-Kennlinien	83
6.2.2 Zusammenhang zwischen Amplituden- und Phasenkennlinie; Verallgemeinerung des Gesetzes von BODE	85
6.2.2.1 Vereinfachtes Kriterium für relative Stabilitätsgüte	86
6.2.3 Zwei-Ortskurven-Methode	90
6.3 Übungsaufgaben	91
7. Synthese des Regelkreises	92
7.1 Die anzustrebende Amplitudenkennlinie des offenen Systems	94
7.1.1 Die mittelfrequente Asymptote	96
7.1.2 Übergang von der mittelfrequenten zur niederfrequenten Asymptote	98
7.1.3 Die niederfrequente und die hochfrequente Asymptote	100
7.1.4 Nomogramme zur Bestimmung der Kenngrößen des geschlossenen Systems	101
7.2 Korrigierende Netzwerke	111
7.2.1 Mechanische, hydraulische und pneumatische Netzwerke	112
7.2.2 Passive Gleichstrom-Netzwerke	115
7.3 Das Einfügen der korrigierenden Netzwerke	124
7.3.1 Serienkorrektur	124
7.3.2 Parallelkorrektur	124
7.3.2.1 Korrektur durch Gegenkopplung (Rückführung)	124
7.4 Optimale Reglereinstellung	126
7.5 Übungsaufgaben	128

B. Nichtlineare und nichtstetige Systeme

8. Die Beschreibungsfunktion zur Analyse nichtlinearer Systeme	130
8.1 Grundlagen	130
8.2 Kennlinien und Beschreibungsfunktionen	134
8.2.1 Betrags- und Argumenten-Diagramme	137

	Seite
8.3 Stabilitätsanalyse	140
8.3.1 Zwei-Ortskurven-Methode	140
8.3.1.1 Anwendung im Frequenzkennlinien-Verfahren	142
8.3.2 Stabilitätsdiagramme	143
8.4 Übungsaufgaben	145
9. Die Relais-Charakteristiken zur Analyse von Relaisystemen	146
9.1 Die Methode von ZYPKIN zur Analyse der Eigenschwingungen eines Relais- systems	147
9.1.1 Symmetrisches Schalten eines Relaisystems ohne Totzone	147
9.1.2 Symmetrisches Schalten eines Relaisystems mit Totzone	153
9.1.2.1 Näherung mit Hilfe der „vereinfachten Relais-Charakteristiken“	154
9.2 Erweiterungen der Methode von ZYPKIN	158
9.2.1 Knicke oder Unstetigkeiten der Ausgangsgröße $x(t)$	158
9.2.2 Unsymmetrisches Schalten	160
9.2.2.1 Unsymmetrisches Schalten eines Relaisystems ohne Totzone. Linearteil ohne Integration	162
9.2.2.2 Unsymmetrisches Schalten eines Relaisystems ohne Totzone. Linearteil mit Integration	165
9.3 Übungsaufgaben	167
10. Näherungsweise Stabilitätsanalyse linearer Abtastsysteme	168
10.1 Beschreibungsfunktion für Abtaster und Formierungsglied	170
10.1.1 Näherungsformeln für die negativ inversen Beschreibungsfunktionen .	174
10.1.2 Anwendung im Frequenzkennlinien-Verfahren	176
C. Experimentelle Analyse und Identifikation	
11. Durchführung und Auswertung von Frequenzgangmessungen	179
11.1 Erzeugung von Sinusschwingungen	182
11.1.1 Funktionsgeneratoren	182
11.1.1.1 Elektrische Sinusgeneratoren	182
11.1.1.2 Pneumatische und hydraulische Sinusgeneratoren	183
11.1.1.3 Mechanische Sinusgeneratoren	187
11.1.2 Wahl der Amplitude	188
11.1.3 Wahl des Frequenzbereichs.	189
11.1.3.1 Kontinuierlich veränderte Frequenz	190
11.2 Registrierung der Signale.	194
11.3 Kommerzielle Frequenzgang-Meßeinrichtungen	197
11.4 Kennwertermittlung	202
11.5 Beispiel für durchgeführte Versuche: Frequenzgangmessungen in Wasserkraft- anlagen	206
Lösungen der Übungsaufgaben	214
Literaturverzeichnis	247
Namen- und Sachverzeichnis.	261
Tafeln	nach 264