

Teubner Studienbücher

Elektrotechnik

Elsner: **Nachrichtentheorie**

Band 1: Grundlagen. 167 Seiten. DM 18,80

Band 2: Der Übertragungskanal. 175 Seiten. DM 18,80

Heumann: **Grundlagen der Leistungselektronik**

2. Aufl. 239 Seiten. DM 28,80

Klein: **Finite Systemtheorie**

VIII, 186 Seiten. DM 26,80

Lautz: **Elektromagnetische Felder**

2. Aufl. 184 Seiten. DM 25,80

Leonhard: **Regelung in der elektrischen Antriebstechnik**

216 Seiten. DM 25,80

Leonhard: **Regelung in der elektrischen Energieversorgung**

196 Seiten. DM 25,80

Leonhard: **Statistische Analyse linearer Regelsysteme**

266 Seiten. DM 24,80

Michel: **Zweitor-Analyse mit Leistungswellen**

219 Seiten. DM 22,80

Profos: **Einführung in die Systemdynamik**

172 Seiten. DM 26,80

Physik

Becher/Böhm/Joos: **Eichtheorien der starken
und elektroschwachen Wechselwirkung**

395 Seiten. DM 34,—

Bourne/Kendall: **Vektoranalysis**

227 Seiten. DM 20,80

Daniel: **Beschleuniger**

215 Seiten. DM 25,80

Großmann: **Mathematischer Einführungskurs für die Physik**

3. Aufl. 288 Seiten. DM 26,80

Heber/Weber: **Grundlagen der Quantenphysik**

Band 1: Quantenmechanik. VI, 158 Seiten. DM 18,80

Band 2: Quantenfeldtheorie. VI, 178 Seiten. DM 19,80

Kamke/Krämer: **Physikalische Grundlagen der Maßeinheiten**

Mit einem Anhang über Fehlerrechnung. 218 Seiten. DM 19,80

Kneubühl: **Repetitorium der Physik**

XVI, 632 Seiten. DM 30,80

Lautz: **Elektromagnetische Felder**

2. Aufl. 184 Seiten. DM 25,80

Lohrmann: **Hochenergiephysik**

2. Aufl. 248 Seiten. DM 28,80

Fortsetzung auf der 3. Umschlagseite

Einführung in die Systemdynamik

Von Dr.-Ing. Paul Profos
Professor em. der Eidg. Technischen
Hochschule Zürich

Mit 81 Bildern und 18 Tafeln



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Prof. Dr.-Ing. Paul Profos

Geboren 1913. Von 1937 bis 1958 Industriepraxis. 1943 Doktorat, 1946 Habilitation. Von 1958 bis 1978 Ordinarius für Meß- und Regeltechnik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Profos, Paul:

Einführung in die Systemdynamik / von Paul

Profos. – Stuttgart : Teubner, 1982.

(Teubner-Studienbücher : Maschinenbau,
Elektrotechnik)

ISBN 978-3-519-06306-3 ISBN 978-3-663-05851-9 (cBook)

DOI 10.1007.978-3-663-05851-9

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, besonders die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Bildentnahme, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege, der Speicherung und Auswertung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei Verwertung von Teilen des Werkes, dem Verlag vorbehalten.

Bei gewerblichen Zwecken dienender Vervielfältigung ist an den Verlag gemäß § 54 UrhG eine Vergütung zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© Springer Fachmedien Wiesbaden

Ursprünglich erschienen bei B.G. Teubner, Stuttgart 1981

Satz: I. Junge, Düsseldorf

Umschlaggestaltung: W. Koch, Sindelfingen

Vorwort

Dynamische Probleme haben in der Technik schon immer eine Rolle gespielt. So wurde etwa das Schwungrad einer Dampfmaschine bald einmal nach dynamischen Gesichtspunkten ausgelegt. Es zeigt sich auch schon früh bei der Regelung von Kraftmaschinen, daß ohne eine tiefergehende Betrachtung der dynamischen Vorgänge die aufgetretenen Schwierigkeiten nicht zu meistern waren. Auch bei gewissen meßtechnischen Aufgaben, namentlich bei der Schwingungsmessung, waren dynamische Betrachtungen schon lange unerlässlich. Die Beispiele ließen sich vermehren. Trotzdem handelte es sich dabei immer um isolierte Einzelfälle, die jedesmal gesondert bearbeitet wurden ohne den Versuch, Methoden und Ergebnisse in einen weiteren Zusammenhang zu stellen.

Erst in den Vierzigerjahren setzte die Entwicklung der ursprünglich stark fachspezifischen Regeltheorie in Richtung einer quer durch alle technischen Gebiete verlaufenden **allgemeinen Regeltheorie** ein, in Form der **Kybernetik** sogar bezogen auf nichttechnische Bereiche. Es hat aber teilweise noch Jahrzehnte gedauert, bis die im Rahmen der allgemeinen Regeltheorie entwickelten Methoden und Konzepte der **Systemdynamik** auch für die Behandlung analoger Probleme in anderen Gebieten wie z. B. der Meßtechnik, der Schwingungsanalyse usw. herangezogen wurden. Das gilt auch für die Untersuchung nichttechnischer dynamischer Systeme.

Heute kann man im Bereich der Ingenieurwissenschaften (Bauingenieurwesen, Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Chemieingenieurwesen, Elektrotechnik etc.) sowie mancher Disziplinen der Naturwissenschaften (Mikrobiologie, Physiologie, Verhaltenswissenschaften etc.) auf die Methoden der Systemdynamik nicht mehr verzichten. Das hat seinen Grund nicht nur in der Allgemeingültigkeit und Leistungsfähigkeit dieser Methoden, sondern auch darin, daß sich dynamische Probleme immer öfter stellen und auch im Einzelfall zunehmend wichtiger werden. So werden z. B. wegen wachsender Anforderungen bezüglich der Schnelligkeit, der Leistung, des spezifischen Energie- und Materialverbrauchs etc. bei Konzeption und Konstruktion technischer Anlagen immer häufiger dynamische Gesichtspunkte maßgebend.

Systemdynamik ist die Lehre vom Verhalten dynamischer Systeme unter dem Einfluß zeitlich veränderlicher Einwirkungen. Sie dient zunächst der Behandlung spezifisch systemdynamischer Probleme wie etwa der Untersuchung von Schwingungen an Gebäuden, Fahr- und Flugzeugen, Maschinen usw., von Temperaturschwankungen in Bauten, Maschinen und verfahrenstechnischen Apparaten, der Auswirkung von Bedienungseingriffen in Fabrikationsprozesse etc. Sie findet vor allem ausgedehnte Anwendung in der Regelungstechnik und der Meßdynamik, außerdem auch im erweiterten Rahmen der Kybernetik. Das Studium der theoretischen Grundlagen der Systemdynamik vermittelt somit den Zugang zu einer ganzen Reihe von Disziplinen und damit zugleich Verständnis für deren inneren Zusammenhang.

Im vorliegenden Buch werden die fundamentalen Begriffe, Konzepte und Methoden der Systemdynamik dargestellt. Nach einer allgemeinen Einführung in die Problematik im

1. Kapitel werden im 2. Kapitel zunächst die zur Beschreibung von Aktions- bzw. Signalverläufen benutzten mathematischen Hilfsmittel behandelt. Folgerichtig ist das 3. Kapitel dann den verschiedenen Beschreibungsmitteln für das Übertragungsverhalten von dynamischen Systemen gewidmet. Mit den für das grundlegende Verständnis besonders wichtigen Eigenschaften linearer, zeitinvarianter Systeme befaßt sich ausführlich das 4. Kapitel. Gegenstand des letzten Kapitels ist die Lösung der Fundamentalaufgaben der Systemdynamik für den Fall linearer Systeme.

Bei der Darstellung des Stoffes wird vom Grundsatz ausgegangen, daß zuerst einmal die fundamentalen Begriffe, Zusammenhänge und Methoden gründlich verstanden werden sollten, bevor an die Benutzung hochabstrakter mathematischer Hilfsmittel herangegangen wird. „Verstehen“ bedeutet für den Ingenieur nicht nur gedankliches Nachvollziehen einer mathematischen Herleitung, sondern vor allem die Fähigkeit, die entsprechenden Überlegungen auf eine praktische Fragestellung anzuwenden. Es wird daher eine möglichst einfache, anwendungsnahe Darstellung angestrebt, und der Anschaulichkeit und Verankerung in der Physik wird der Vorrang vor formaler Eleganz der mathematischen Behandlung gegeben. Um dem Anfänger den Übergang von der mathematischen Begründung zur praktischen Anwendung zu erleichtern, werden immer wieder absichtlich einfach gewählte Beispiele eingestreut.

Die besonderen Voraussetzungen hinsichtlich der mathematischen Vorkenntnisse des Lesers entsprechen dem üblichen Kenntnisstand von Hochschulabsolventen der anvisierten Fachrichtungen. Sie gehen über Kenntnisse der Behandlung linearer Differentialgleichungen sowie einiger Kapitel aus dem Gebiet der komplexen Analysis (insbesondere Fourier- und Laplace-Transformation) nicht hinaus.

Das Buch wendet sich primär an Maschinen-, Verfahrens- und Chemieingenieure, an Bauingenieure sowie an Elektroingenieure insbesondere der Richtung Energietechnik, mithin an „prozeßorientierte“ Ingenieure, die sich in der Praxis mit Entwicklung, Bau oder Betrieb von technischen Anlagen wie Kraftwerken, verfahrens- oder fertigungstechnischen Produktionsanlagen, verkehrs- oder transporttechnischen Einrichtungen usw. befassen. Weiterhin sind auch Naturwissenschaftler, namentlich Mikrobiologen, Physiologen und Verhaltenswissenschaftler anvisiert. Dabei ist zunächst an die Studierenden dieser Fachgebiete gedacht, wobei das Buch die im Rahmen ihrer Ausbildung angebotenen einschlägigen Kurse ergänzen soll. Daneben wendet sich das Buch aber auch an die große Zahl der in der Praxis Tätigen, welche sich mit Problemen der Systemdynamik auseinandersetzen müssen, ohne daß ihnen im Rahmen ihrer Grundausbildung die entsprechenden Basiskenntnisse vermittelt worden wären.

Das Buch ist zunächst mit dem Ziel geschrieben, dem Leser zu einem grundlegenden Verständnis dynamischer Vorgänge in komplexen Systemen zu verhelfen. Darüber hinaus soll es ihn befähigen, mit Hilfe der vermittelten Kenntnisse eine große Vielfalt von einschlägigen praktischen Problemen zu lösen. Schließlich soll der dargebotene Stoff ein solides Fundament vermitteln für eine weitere Vertiefung in verwandten Gebieten, insbesondere Meßdynamik.

mik und Regeltheorie. Die Erfahrung hat immer wieder bestätigt, daß von solchen sicheren Grundlagen aus der Schritt auch zu hochabstrakten Theorien dann verhältnismäßig leicht getan wird und keine Gefahr besteht, daß dabei die Praxis aus den Augen verloren wird.

Ich möchte nicht unterlassen, Herrn Dipl.-Ing. H. Domeisen für die sorgfältige Durchsicht des Manuskript bestens zu danken. Auch dem Verlag sei für die verständnisvolle Zusammenarbeit der gebührende Dank abgestattet.

Winterthur, im März 1981

P. Profos

Inhalt

1 Einführung, Fundamentalbegriffe, Fundamentalaufgaben

1.1 Einführung	11
1.2 Fundamentalbegriffe	13
1.3 Fundamentalaufgaben	17

2 Signale und deren mathematische Beschreibung – Signalmodelle

2.1 Allgemeine Eigenschaften von Signalen	19
2.2 Signalarten, Einteilung von Signalen	20
2.3 Mittel zur mathematischen Beschreibung determinierter Signale	23
2.3.1 Beschreibungsmittel im Zeitbereich	23
2.3.1.1 Analytische Beschreibung. 2.3.1.2 Beschreibung durch Impulsreihen	
2.3.2 Beschreibungsmittel im Frequenzbereich	25
2.3.2.1 Beschreibung harmonischer Signale. 2.3.2.2 Beschreibung periodischer Signale durch Fourier-Reihen. 2.3.2.3 Beschreibung von Signalen mit Hilfe der Fourier-Transformation. 2.3.2.4 Be- schreibung von Signalen mit Hilfe der Laplace-Transformation	
2.4 Mittel zur mathematischen Beschreibung stochastischer Signale	39
2.4.1 Kenngrößen und Kennfunktionen im Amplitudenbereich	40
2.4.1.1 Kenngrößen im Amplitudenbereich. 2.4.1.2 Kennfunktio- nen im Amplitudenbereich	
2.4.2 Kennfunktionen im Zeitbereich	44
2.4.2.1 Autokorrelationsfunktion, Autokovarianzfunktion.	
2.4.2.2 Eigenschaften der Kennfunktionen, Beispiele.	
2.4.2.3 Praktische Berechnung der Kennfunktionen	
2.4.3 Kennfunktionen im Frequenzbereich	48
2.4.3.1 Spektrale Leistungsdichte. 2.4.3.2 Eigenschaften der Lei- stungsdichtefunktion, Beispiele. 2.4.3.3 Praktische Gewinnung von Leistungsspektren	
2.5 Anwendung der Signalbeschreibungsmittel auf reale Signale	51
2.5.1 Reale Signale	51
2.5.2 Anwendung der Beschreibungsmittel	53

3 Dynamische Systeme und deren mathematische Beschreibung – Prozeßmodelle

3.1 Modellbegriff, Modellarten	55
3.1.1 Definition des Prozeßmodells	55
3.1.2 Einteilung von Prozeßmodellen	55

	Inhalt	7
3.2 Anforderungen an Prozeßmodelle		56
3.2.1 Genauigkeit von Prozeßmodellen		56
3.2.2 Aufwand für Modellbildung und Modellanwendung		57
3.3 Mittel zur mathematischen Beschreibung von Systemen		58
3.3.1 Beschreibungsmittel im Zeitbereich		58
3.3.1.1 Differentialgleichungen. 3.3.1.2 Antwortfunktionen		
3.3.2 Beschreibungsmittel im Frequenzbereich		60
3.3.2.1 Frequenzgang. 3.3.2.2 Übertragungsfunktion.		
3.3.2.3 Beschreibungsfunktion		
3.4 Methoden der Modellbildung		64
3.4.1 Deduktive Modellbildung		64
3.4.2 Experimentelle Modellbildung, Systemidentifikation		69
3.4.3 Merkmale theoretischer bzw. empirischer Modelle		70
4 Lineare Systeme		
4.1 Linearisierung		
4.1.1 Methode der kleinen Schwankungen		72
4.1.2 Harmonische Linearisierung		74
4.2 Mathematische Beschreibung linearer Systeme		74
4.2.1 Beschreibung im Zeitbereich		75
4.2.1.1 Differentialgleichungen. 4.2.1.2 Antwortfunktionen		
4.2.2 Beschreibung im Frequenzbereich		78
4.2.2.1 Übertragungsfunktion, Frequenzgang. 4.2.2.2 Pol-Nullstellen-Verteilung		
4.2.3 Übergang von einer Beschreibungsform auf eine andere		81
4.3 Bestimmung des Übertragungsverhaltens eines Systems aus demjenigen seiner Komponenten		82
4.3.1 Elemente und Fundamentalschaltungen linearer Systeme		83
4.3.2 Berechnung des Übertragungsverhaltens der Fundamentalschaltungen aus demjenigen seiner Komponenten		84
4.3.2.1 Beschreibungsart: Differentialgleichungen. 4.3.2.2 Beschreibungsart: Übertragungsfunktion bzw. Frequenzgang.		
4.3.2.3 Beschreibungsart: Antwortfunktionen. 4.3.2.4 Beschreibungsart: Pol-Nullstellen-Verteilung		
4.4 Allgemeine Eigenschaften linearer Systeme		89
4.4.1 Das Superpositionsprinzip		89
4.4.2 Das Frequenzerhaltungsprinzip		90
4.4.3 Struktureigenschaften, Strukturumwandlungsregeln		90
4.5 Dynamische Eigenschaften linearer Systeme		92
4.5.1 Beharrungseigenschaften		92
4.5.2 Eigenverhalten		94

8 Inhalt

4.5.3	Stabilität	97
4.5.4	Einschwingverhalten und stationäres erzwungenes Schwingen . . .	100
4.5.5	Spektrale Eigenschaften	102
4.6	Typische lineare Systembausteine	104
4.6.1	Lineare Elementarbausteine	104
4.6.2	Typische lineare Systembausteine	107
	4.6.2.1 Verzögerungsglied 1. Ordnung. 4.6.2.2 Verzögerungsbild 2. Ordnung. 4.6.2.3 Verzögerungsglieder höherer Ordnung. 4.6.2.4 Totzeitglied. 4.6.2.5 Vorhaltglieder. 4.6.2.6 Allpaßglieder	
4.7	Beeinflussung des Übertragungsverhaltens linearer Systeme	123
4.7.1	Beeinflussung des Übertragungsverhaltens durch Parameterände- rung	124
4.7.2	Beeinflussung des Übertragungsverhaltens durch Strukturände- rung	125
4.7.3	Beeinflussung des Übertragungsverhaltens durch Strukturergän- zung	128

5 Lösung der Fundamentalaufgaben

5.1	Systemanalyse	130
5.1.1	Aufgabenstellung, Vorbereitungen	130
5.1.2	Lösungsverfahren	132
	5.1.2.1 Determinierte Signale. 5.1.2.2 Stochastische Signale.	
5.2	Systemsynthese	140
5.2.1	Aufgabenstellung	140
5.2.2	Problemlösung, Vorbereitungen	141
	5.2.2.1 Direkte Systemsynthese. 5.2.2.2 Indirekte Systemsynthese.	
5.3	Systemidentifikation	148
5.3.1	Übersicht über die Methoden der Systemidentifikation	148
5.3.2	Allgemeines Vorgehen	150
5.3.3	Wahl des Testsignals	152
5.3.4	Auswertung	154
	5.3.4.1 Direkte Verfahren der Systemidentifikation. 5.3.4.2 Adap- tive Verfahren der Systemidentifikation.	

6 Anhang

6.1	Operationsregeln und kleines Lexikon der Fourier-Transformation . . .	161
6.2	Operationsregeln und kleines Lexikon der Laplace-Transformation . . .	163

Literaturverzeichnis	167
--------------------------------	-----

Sachverzeichnis	169
---------------------------	-----

Symbolverzeichnis

a	Koeffizient	m	Masse, Richtungsgröße
A	Fläche, Integrationskonstante, Realteil einer komplexen Größe, Querschnitt, Übertragungsmatrix	M	Massenstrom
b	Koeffizient	n	Ordnungszahl
B	Bandbreite, Koeffizient des Imaginärteils einer komplexen Größe, Übertragungsmatrix	N	Zahl der Nullstellen
B(x)	Beschreibungsfunktion	p	Nullstelle
c	Koeffizient	P	Parameter
C	Übertragungsmatrix	q	Pol
D	Dämpfungsgrad	r	Eigenwert
e	Fehler, Koeffizient	R	Betrag des Frequenzgangs, Radiusvektor
E	Zahl der Extremalstellen	Re	Realteil
E(x)	Fehlerfunktional	s	komplexe Bildvariable, Laplace-Operator
f	Frequenz	S(x)	Summenhäufigkeitsfunktion
f _g	Grenzfrequenz	S(ω)	spektrale Leistungsdichtefunktion
f _s	Tastfrequenz	t	laufende Zeit
F(iω)	Komplexer Frequenzgang	T	Beobachtungszeit, Zeitkonstante
F(s)	Übertragungsfunktion	T ₀	Periode, Periodendauer
$\mathcal{F}\{ \}$	Operationssymbol der Fourier-Transformation	T _s	Tastperiode
g	Erdbeschleunigung	T _φ	Zeitverschiebung eines periodischen Signals
g(t)	Einheitsimpulsantwort, Gewichtsfunktion	u	Eingangsgröße
h	Hub	v	Ausgangsgröße
h(t)	Einheitssprungantwort, Übergangsfunktion	w	Führungsgröße
h(x)	Häufigkeitsdichtefunktion	x	Variable allgemein, Systemvariable
H	Hurwitz-Determinante, Höhe, Pegelstand	x(iω)	Fourier-Transformierte von x
i	Einheit der imaginären Zahlen, Ordnungszahl	x(s)	Laplace-Transformierte von x
j	Ordnungszahl	y	Variable allgemein
Im	Imaginärteil	z	Störgröße, Ordnungszahl
k	Ordnungszahl, Verstärkung	α	Ausflußzahl, Ordnungszahl, Winkel
l	Ordnungszahl	β	Ordnungszahl, Verhältnis
L	Länge, Transportweg	δ	absolute Dämpfung, Konstante
$\mathcal{L}\{ \}$	Operationssymbol der Laplace-Transformation	δ(t)	Dirac-Funktion, Einheits-Nadelfunktion
		Δ	Differenz, Intervall
		ε(t)	Heavyside-Funktion, Einheits-Sprungfunktion
		ν	Ordnungszahl

10 Symbolverzeichnis

π	Ludolf'sche Zahl	ϕ	Phasenwinkel (Signalmodelle)
ρ	spezifische Dichte	$\phi(\tau)$	Korrelationsfunktion
σ	Standardabweichung	ψ	Winkel
τ	Zeitverschiebung	ω	Kreisfrequenz
φ	Phasenwinkel (Frequenzgang)	ω_g	Grenzkreisfrequenz
		ω_E	Eckkreisfrequenz