

B

LHI 38:
Lehr- und Handbücher der Ingenieurwissenschaften
Band 38

Springer Basel AG

Udo Fischer
Wolfgang Stephan
Schwingungen

1981

Springer Basel AG

Library of Congress Cataloging in Publication Data

Fischer, Udo.
Schwingungen.
(Lehr- und Handbücher der Ingenieurwissenschaften ; Bd. 38)
Bibliography: p.
I. Vibration. I. Stephan, Wolfgang, 1933—
II. Title. III. Series.
TA355.F48 620.3 81-4294
ISBN 978-3-0348-5155-8 AACR2

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Fischer, Udo:
Schwingungen / Udo Fischer ; Wolfgang
Stephan. — Basel ;
(Lehr- und Handbücher der Ingenieurwissenschaften ; Bd. 38)
ISBN 978-3-0348-5155-8 ISBN 978-3-0348-5154-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-0348-5154-1
NE: Stephan, Wolfgang.; GT

Die vorliegende Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form — durch Fotokopie, Mikrofilm oder andere Verfahren — reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere Datenverarbeitungsanlagen, verwendbare Sprache übertragen werden.

© Springer Basel AG 1981
Ursprünglich erschienen bei Birkhäuser Verlag Basel, 1981
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1981
ISBN 3-7643-1237-8

Vorwort

Dynamische Probleme, insbesondere Schwingungsprobleme, spielen im Maschinen- und Anlagenbau, im Fahrzeug- und Schiffbau sowie in vielen anderen Bereichen der Technik eine ständig wachsende Rolle. Höhere Leistungen bei gleichzeitiger Senkung des Materialaufwandes und steigende Forderungen an die Gebrauchswerteigenschaften technischer Erzeugnisse erfordern eine immer genauere Analyse der Schwingungserscheinungen. Schwingungen können sowohl unerwünschte oder schädigende Einflüsse auf Menschen, Gebäude und technische Einrichtungen ausüben als auch zur Erzeugung gewünschter Arbeitsbewegungen dienen. Zur Lösung der damit im Zusammenhang stehenden Aufgaben muß der Ingenieur in der Lage sein, Schwingungen vorzuberechnen und die Ursachen von beobachteten Schwingungserscheinungen aufzudecken. Dazu gehören die Aufstellung eines Berechnungsmodells (Modellfindung), die Modellberechnung und die Beurteilung der Ergebnisse anhand von z. T. in Empfehlungen und Standards festgelegten Beurteilungsmaßstäben.

Ohne auf eine genauere Abgrenzung der drei genannten Teilaufgaben einzugehen, kann man sagen, daß sich die Schwingungslehre im wesentlichen mit der Modellberechnung beschäftigt. Jeder in der Praxis tätige Ingenieur, der Schwingungsprobleme zu lösen hat, benötigt deshalb solide Kenntnisse der Schwingungslehre. Aus diesem Grunde werden in vielen Fachrichtungen des Maschineningenieurwesens an Technischen Hochschulen und Universitäten über den Grundkurs der Technischen Mechanik hinaus weiterführende Vorlesungen zur Schwingungslehre und Maschinendynamik gehalten. Dafür wird ein Lehrbuch benötigt, das an die Grundkenntnisse der Technischen Mechanik anschließt und einen Überblick über die wichtigsten in der Technik auftretenden Schwingungserscheinungen und die Methoden zu ihrer Berechnung gibt.

Das vorliegende Lehrbuch soll diesen Zweck erfüllen. Es wendet sich an die Studierenden des Maschineningenieurwesens sowie an die in der Praxis auf diesen Gebieten tätigen Ingenieure. Dementsprechend stehen die Schwingungen mechanischer Systeme im Vordergrund der Betrachtung, was nicht ausschließt, daß viele Darstellungsmittel, Lösungsmethoden und Ergebnisse auch auf nichtmechanische Schwingungen (z. B. Schwingungen in elektrischen Netzen oder elektromechanischen Systemen) angewandt werden können.

Nach der Behandlung der Darstellungsmöglichkeiten von Schwingungen wird auf den Schwinger mit einem Freiheitsgrad eingegangen.

Diese Abschnitte sind aus didaktischen Gründen ausführlich gehalten, weil sich viele Erscheinungen und Lösungsmethoden, die auch für Systeme mit mehreren Freiheits-

graden Bedeutung haben, hier verhältnismäßig einfach erklären lassen. Außerdem können viele praktische Aufgaben schon mit einem Modell mit einem Freiheitsgrad beschrieben werden. Bei der Behandlung von Systemen mit mehreren Freiheitsgraden wird durchgängig die Matrizendarstellung angewendet, einerseits wegen der übersichtlichen und einfachen Schreibweise, andererseits im Hinblick auf die leichtere Programmierbarkeit für elektronische Rechenautomaten. Der Abschnitt zu den Kontinuumschwingungen ist nur als kurze Einführung zu verstehen. Einerseits war das aus Platzgründen notwendig, andererseits werden kompliziertere Aufgaben heute fast ausschließlich mit Hilfe von Diskretisierungsmethoden (Finite-Element-Methode) auf Systeme mit endlich vielen Freiheitsgraden zurückgeführt. Auch auf Stabilitätsuntersuchungen konnte nur kurz eingegangen werden. Entsprechend der wachsenden Bedeutung von Schwingungen mit Zufallserregung im Maschinenbau wurde diese in den Abschnitten über erzwungene Schwingungen berücksichtigt.

Zum besseren Verständnis werden in den meisten Abschnitten Beispiele vorgeführt, wobei wir uns bemüht haben, den Zusammenhang zwischen dem realen Schwingungssystem und dem Berechnungsmodell deutlich zu machen. Die am Ende jedes Hauptabschnittes gestellten Aufgaben, deren Lösungen im letzten Abschnitt angegeben sind, sollten vom Studierenden selbständig gelöst werden. Wir glauben, daß durch die Beispiele und Aufgaben der Lehrbuchcharakter des Buches unterstrichen und das Selbststudium gefördert wird. Der Inhalt des Buches wurde mit dem im VEB Fachbuchverlag Leipzig erschienenen Lehrbuch der Maschinendynamik von Holzweißig/Dresig [10] abgestimmt. An dieser Stelle möchten wir Professor Holzweißig, Professor Dresig sowie Professor em. Postl für ihre wertvollen Anregungen und Hinweise herzlich danken. Ferner gilt unser Dank Frau Ingeborg Kersten, die die Zeichnungen anfertigte, und Frau Gisela Ruhstein für das Schreiben des Manuskriptes.

Die Verfasser

Inhaltsverzeichnis

1.	Beschreibung von Schwingungen	11
1.1.	Harmonische Schwingungen	11
1.1.1.	Reelle Darstellung	11
1.1.2.	Komplexe Darstellung	14
1.1.3.	Überlagerung frequenzgleicher harmonischer Schwingungen	16
1.2.	Periodische Schwingungen	17
1.2.1.	Überlagerung harmonischer Schwingungen mit rationalem Frequenzverhältnis	17
1.2.2.	Fourierzerlegung periodischer Funktionen	21
1.2.3.	Darstellung periodischer Funktionen im Frequenzbereich	25
1.2.4.	Simultane Darstellung zweier schwingender Größen	25
1.2.5.	Darstellung periodischer Schwingungen in der Phasenebene	29
1.3.	Nichtperiodische Schwingungen	32
1.3.1.	Überlagerung harmonischer Schwingungen mit irrationalem Frequenzverhältnis	32
1.3.2.	Fourierintegraldarstellung nichtperiodischer Funktionen	34
1.3.3.	Sinusverwandte Schwingungen	38
1.4.	Stochastische Schwingungen	40
1.4.1.	Wahrscheinlichkeitsdichte	41
1.4.2.	Momente von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen	43
1.4.3.	Spektraldichte, ergodische Prozesse	46
1.4.4.	Amplitudendichtespektrum der Realisierungen	50
1.4.5.	Eng- und breitbandige Prozesse	52
1.4.6.	Korrelation mehrerer stochastischer Prozesse.	52
1.4.7.	Niveauüberschreitungen und Verteilung der Extrema	55
1.5.	Aufgaben zum Abschnitt 1.	57
2.	Einteilung der Schwingungssysteme.	59
2.1.	Einteilung nach der Zahl der Freiheitsgrade	59
2.2.	Einteilung nach dem Charakter der Differentialgleichungen	61
2.3.	Einteilung nach der Art der Entstehung der Schwingungen	62
3.	Schwingungen in linearen Systemen mit einem Freiheitsgrad	64
3.1.	Bewegungsgleichungen für Schwingungen um eine Gleichgewichtslage	64
3.2.	Freie ungedämpfte Schwingungen	68
3.2.1.	Bewegungsgleichungen und Lösungen	68
3.2.2.	Zusammenstellung der wichtigsten Beziehungen für freie ungedämpfte Schwingungen in linearen Systemen mit einem Freiheitsgrad	72
3.2.3.	Energiebilanz	72

3.2.4.	Genäherte Berücksichtigung der Federmasse	73
3.3.	Freie gedämpfte Schwingungen.	74
3.3.1.	Bewegungsgleichungen und Lösungen	74
3.3.2.	Dämpfungsdekrement.	78
3.3.3.	Arbeitsbetrachtung	79
3.3.4.	Zusammenstellung der wichtigsten Beziehungen für freie gedämpfte Schwingungen in linearen Systemen mit einem Freiheitsgrad	80
3.4.	Erzwungene Schwingungen bei periodischer Erregung	80
3.4.1.	Harmonische Erregung	81
3.4.1.1.	Formen der Erregung am Feder-Masse-Schwinger	81
3.4.1.2.	Lösung der Bewegungsgleichungen	82
3.4.1.3.	Zusammenstellung der wichtigsten Beziehungen für erzwungene Schwingungen des linearen gedämpften Schwingers mit periodischer Erregung	89
3.4.1.4.	Ortskurven	90
3.4.1.5.	Leistungsbetrachtung	93
3.4.2.	Periodische und fastperiodische Erregung	95
3.4.3.	Einschaltvorgänge	98
3.4.3.1.	Einschwingvorgänge	98
3.4.3.2.	Resonanzregter ungedämpfter Schwinger	101
3.5.	Erzwungene Schwingungen bei nichtperiodischer Erregung.	103
3.5.1.	Variation der Konstanten	103
3.5.2.	Lösung mit Hilfe der Stoßfunktion	107
3.5.3.	Lösung mit Hilfe der Sprungfunktion	110
3.5.4.	Laplace-Transformation	114
3.6.	Stochastische Schwingungen	120
3.6.1.	Stationäre erzwungene Schwingungen	120
3.6.2.	Nichtstationäre erzwungene Schwingungen	123
3.7.	Aufgaben zum Abschnitt 3.	124
4.	Schwingungen in nichtlinearen Systemen mit einem Freiheitsgrad	130
4.1.	Bewegungsgleichungen	130
4.2.	Freie Schwingungen in konservativen Systemen	132
4.2.1.	Exakte Lösung.	133
4.2.2.	Methode der Anstückelung	140
4.2.3.	Näherungsverfahren	143
4.2.3.1.	Äquivalente Linearisierung	143
4.2.3.2.	Störungsrechnung	147
4.2.3.3.	Verfahren nach Galerkin	150
4.3.	Freie Schwingungen gedämpfter Systeme	153
4.3.1.	Lösung mit Hilfe der Phasenkurven	153
4.3.1.1.	Gleichung der Phasenkurven	153
4.3.1.2.	Singuläre Punkte	155
4.3.1.3.	Schwinger mit Coulombscher Reibung.	158
4.3.2.	Numerische Lösungsverfahren	159
4.3.3.	Verfahren von Bogoljubov und Mitropolskij	162
4.4.	Selbsterregte Schwingungen	166
4.4.1.	Entstehung und Erscheinungen	166
4.4.2.	Lösungsverfahren	168
4.4.3.	Reibungsschwingungen	171
4.5.	Erzwungene Schwingungen bei periodischer Erregung	173
4.5.1.	Bestimmung periodischer Näherungslösungen	175
4.5.2.	Bestimmung nichtperiodischer Näherungslösungen	182
4.6.	Erzwungene Schwingungen bei nichtperiodischer Erregung.	187
4.7.	Erzwungene Schwingungen bei stochastischer Erregung	190
4.8.	Aufgaben zum Abschnitt 4.	192

5.	Parametererregte Schwingungen	197
5.1.	Entstehung und Erscheinungen	197
5.2.	Lineare Differentialgleichungen mit periodischen Koeffizienten	198
5.3.	Stabilitätsverhalten der Schwingungen mit harmonischer Parametererregung	199
5.4.	Aufgaben zum Abschnitt 5.	201
6.	Schwingungen in linearen Systemen mit mehreren Freiheitsgraden	202
6.1.	Aufstellung von Bewegungsgleichungen	202
6.1.1.	Lagrangesche Bewegungsgleichungen 2. Art	203
6.1.2.	Kraftgrößenmethode	210
6.1.3.	Deformationsmethode	215
6.2.	Freie Schwingungen	218
6.2.1.	Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen	218
6.2.1.1.	Spezielle Eigenwertprobleme mit regulärer symmetrischer Matrix	221
6.2.1.2.	Allgemeine Eigenwertprobleme	224
6.2.1.3.	Numerische Lösung von Eigenwertproblemen	224
6.2.1.3.1.	Verfahren von Jacobi	225
6.2.1.3.2.	Vektoriteration nach v. Mises	226
6.2.1.4.	Abschätzung von Eigenfrequenzen	232
6.2.1.5.	Freie Schwingungen von Systemen mit Dämpfungs-, Anfachungs- und gyroskopischen Gliedern	234
6.2.2.	Anfangswertprobleme	238
6.2.2.1.	Entwicklung nach Eigenschwingungsformen	239
6.2.2.1.1.	Ungedämpfte Systeme	239
6.2.2.1.2.	Gedämpfte Systeme	240
6.2.2.2.	Numerische Lösung	242
6.3.	Erzwungene Schwingungen	243
6.3.1.	Erzwungene Schwingungen mit periodischer Erregung	243
6.3.1.1.	Direkte Methode	243
6.3.1.2.	Entwicklung nach Eigenschwingungsformen	247
6.3.1.3.	Gesamtlösung	251
6.3.2.	Nichtperiodische Erregung	252
6.3.3.	Stochastische Erregung	254
6.4.	Aufgaben zum Abschnitt 6.	255
7.	Schwingungen in nichtlinearen Systemen mit mehreren Freiheitsgraden	257
7.1.	Differentialgleichungen der nichtlinearen Schwingungen	257
7.2.	Periodische Bewegungen schwach nichtlinearer autonomer Systeme	261
7.2.1.	Äquivalente Linearisierung	262
7.2.2.	Störungsrechnung	265
7.2.3.	Verfahren von Galerkin	267
7.3.	Nichtperiodische Bewegungen schwach nichtlinearer autonomer Systeme	268
7.4.	Erzwungene Schwingungen schwach nichtlinearer Systeme bei periodischer Erregung	269
7.4.1.	Periodische erzwungene Schwingungen	270
7.4.1.1.	Äquivalente Linearisierung	270
7.4.1.2.	Störungsrechnung	275
7.4.1.3.	Verfahren von Galerkin	278
7.4.2.	Nichtperiodische erzwungene Schwingungen	278
7.4.3.	Sub- und ultraharmonische Schwingungen, Kombinationsfrequenzen	280
8.	Parametererregte Schwingungen in Systemen mit mehreren Freiheitsgraden	282
8.1.	Lineare Systeme mit periodischen Koeffizienten	282

9.	Schwingungen von Kontinua.	288
9.1.	Differentialgleichung 2. Ordnung — Schwingungen von Saiten und Stäben	288
9.1.1.	Differentialgleichung der freien Schwingungen	288
9.1.2.	Randbedingungen	290
9.1.3.	Anfangsbedingungen	291
9.1.4.	D'Alembertsche Lösung	291
9.1.5.	Bernoullische Lösung	293
9.1.6.	Erzwungene Schwingungen	296
9.2.	Balkenschwingungen	298
9.2.1.	Differentialgleichung der freien Schwingungen	298
9.2.2.	Anfangswertprobleme, erzwungene Schwingungen	300
9.2.3.	Einfaches Näherungsverfahren zur Berechnung der Eigenfrequenzen	300
9.3.	Plattenschwingungen	302
9.3.1.	Differentialgleichung und Randbedingungen	302
9.3.2.	Rechteckplatten	304
9.3.3.	Kreisplatten	306
9.4.	Aufgaben zum Abschnitt 9.	307
10.	Stabilität einer Schwingungsbewegung	309
10.1.	Begriff der Stabilität	309
10.2.	Differentialgleichungen der Störungen	311
10.3.	Aufgaben zum Abschnitt 10.	313
11.	Lösungen zu den Aufgaben	315
	Literatur- und Quellenverzeichnis.	325
	Sachwortverzeichnis	329

Anmerkung zu Seite 11:

TGL 0-1311 wird ab 1. 1. 1982 durch TGL RGW 1926 „Mechanische Schwingungen. Begriffe“ ersetzt.