

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Strukturmechanik und Grundbegriffe	1
1.1	Schwingungen von Strukturen	1
1.2	Verfahren der Strukturmechanik	1
1.3	Relation zu anderen Arbeitsgebieten	3
1.4	Ursachen für Schwingungen	4
1.5	Charakterisierung schwingungsfähiger Systeme	4
1.6	Klassifizierung von Schwingungssystemen	4
1.7	Periodendauer und Frequenz	7
1.8	Modellbildung	7
1.9	Freiheitsgrade diskreter Schwingungssysteme	11
2	Elemente schwingungsfähiger mechanischer Strukturen	13
2.1	Grundbegriffe	13
2.2	Elastische Elemente und Strukturen	14
2.2.1	Übersicht	14
2.2.2	Elastische Elemente	16
2.2.2.1	Schrauben- oder Längsfeder	16
2.2.2.2	Dehnstab	17
2.2.2.3	Torsionsstab	18
2.2.2.4	Spiralfeder	19
2.2.2.5	Biegebalken	19
2.2.3	Elastische Strukturen	20
2.2.3.1	Zusammenschaltungen von Federn	20
2.2.3.2	Strukturen mit mehreren Koordinaten	21
2.3	Energiedissipierende Elemente und Strukturen	32
2.3.1	Dämpfungsmechanismen	32
2.3.2	Einteilung der Dämpfungsphänomene	33
2.3.3	Diskrete Dämpfungselemente in Strukturen	34
2.3.3.1	Übersicht	34
2.3.3.2	Linearer viskoser Dämpfer	35
2.3.3.3	Trockenreibungsdämpfer	35
2.3.3.4	Bewegungswiderstände in Flüssigkeiten und Gasen	36
2.3.3.5	Wegproportionale Dämpfung	37
2.3.4	Systeme mit viskoser Dämpfung	37
2.3.4.1	Dämpfungsmatrix	37
2.3.4.2	Bequemlichkeitshypothese	39
2.3.5	Dämpfung in festen Werkstoffen	40
2.3.6	Lineare mehrparametrische Modelle	41
2.3.6.1	Modelle	41
2.3.6.2	Zwei-Parameter-Modelle	41
2.3.6.3	Drei-Parameter-Modelle	42
2.3.6.4	Harmonische Spannungs- und Dehnungsfunktion	43

2.3.6.5	Dämpfung mit vorgegebener Frequenzabhängigkeit	44
2.3.7	Nichtlineare Modelle	45
2.3.8	Vom Werkstoff zum homogenen Bauteil	46
2.3.9	Dämpfung von Baugruppen	46
2.3.10	Dämpfung an Fügestellen	47
2.3.11	Verdrängungsdämpfung	47
2.3.11.1	Luftverdrängungsdämpfung	47
2.3.11.2	Gleitlager	47
2.3.11.3	Quetschfilmdämpfer	49
2.3.12	Versuchstechniken	50
2.3.12.1	Experimentelle Ermittlung von Dämpfungswerten	50
2.3.12.2	Fremddämpfung	51
2.3.12.3	Übertragbarkeit von Meßergebnissen	51
2.3.12.4	Apparative Möglichkeiten	51
2.4	Starre, massebehaftete Körper	52
2.4.1	Beschreibung starrer Körper	52
2.4.2	Kinematik eines Punktes auf dem starren Körper	52
2.4.2.1	Kinematische Begriffe	52
2.4.2.2	Kartesisches Inertialsystem	52
2.4.2.3	Natürliche Koordinaten	53
2.4.2.4	Zylinderkoordinaten	54
2.4.2.5	Relativbewegung	55
2.4.3	Kinematik des ausgedehnten Starrkörpers	56
2.4.4	Massengeometrie	58
2.4.4.1	Schwerpunkt	58
2.4.4.2	Definition von Massenträgheitsmomenten	59
2.4.4.3	Satz von HUYGENS und STEINER	60
2.4.4.4	Hauptträgheitsmomente und Hauptachsen	61
2.4.5	Kräfte- und Momentensatz	62
2.4.5.1	Axiome der Kinetik	62
2.4.5.2	Impuls	62
2.4.5.3	Kräftesatz	63
2.4.5.4	Drall des starren Körpers	64
2.4.5.5	Momentensatz	65
2.4.5.6	Ebene Bewegung des starren Körpers	66
2.4.5.7	Räumliche Drehung und EULERSche Gleichungen	66
2.4.5.8	Drehung um eine raumfeste Achse	67
2.4.5.9	Kinetik der Bewegung in einem Relativsystem	69
2.4.5.10	Linearisierter Momentensatz	70
2.4.6	Impuls- und Drallsatz	71
2.4.6.1	Impulssatz	71
2.4.6.2	Drallsatz	71
2.4.6.3	Einfache Stoßvorgänge	72
2.4.7	Kinetische Energie	73

3	Bewegungsgleichungen von schwingungsfähigen Strukturen	74
3.1	Feder-Masse-Dämpfer-Systeme	74
3.1.1	Anwendung der dynamischen Grundgesetze	74
3.1.2	Anwendung des Arbeitssatzes der Mechanik	80
3.1.3	Anwendung des Leistungssatzes	83
3.1.4	Anwendung des Prinzips von D'ALEMBERT	84
3.1.4.1	Trägheitskräfte und dynamisches Gleichgewicht . . .	84
3.1.4.2	D'ALEMBERT in der LAGRANGESchen Fassung	85
3.1.5	Die Anwendung der LAGRANGESchen Gleichungen	87
3.1.6	Systemmatrizen aus Energie- und Leistungsausdrücken	94
3.2	Ruhelagen eines Systems	99
3.3	Linearisierung von Bewegungsgleichungen	100
3.4	Einfache strömungsmechanische Schwingungen	102
3.4.1	Inkompressible Flüssigkeiten in Rohren	102
3.4.2	Einfache Schwingungen mit kompressiblen Medien	104
3.4.3	Schwingungen schwimmender Körper	107
3.4.3.1	Hubschwingungen	107
3.4.3.2	Kippschwingungen	109
3.5	Schwingungen in elektrischen Schaltungen	110
3.5.1	Elektrische Elemente	110
3.5.2	Elektrische Schaltungen	112
3.5.3	Mechanisch-elektrische Analogie	114
3.6	Schwingungssysteme mit Wandler	115
3.6.1	Elektrodynamische Wandler	115
3.6.2	Piezoelektrischer Wandler	119
3.6.3	Weitere Wandlertypen	119
4	Schwingungs- und Erregersignale	120
4.1	Einteilung von Signalen	120
4.2	Die FOURIER-Transformation	121
4.2.1	Definition des FOURIER-Integrals	121
4.2.2	Wichtige Beziehungen bei der FOURIER-Transformation	121
4.2.3	Normierung der FOURIER-Transformierten	123
4.2.4	Praktische Umsetzung der FOURIER-Transformation	124
4.3	Spezielle deterministische Signale	125
4.3.1	DIRAC-Stoß	125
4.3.2	Harmonische Signale	127
4.3.3	Periodische Signale	131
4.3.4	Überlagerung und Modulation harmonischer Signale	135
4.3.5	Sprung-, Signum- und Rechteckfunktionen	136
4.3.6	Gleitsinus	138
4.3.7	Rauschen	139
4.3.8	Mittelung über mehrere gleichartige Teilversuche	141
4.4	Spektrale Leistungsdichten, Kohärenz und Korrelationsfunktionen . .	142
4.4.1	Autoleistungsdichte	143
4.4.2	Kreuzleistungsdichte	144
4.4.3	Kohärenz	145
4.4.4	Autokorrelationsfunktion	146

4.4.5	Kreuzkorrelationsfunktion	147
4.4.6	WIENER-KHINTCHINESche und PARSEVALSche Gleichungen	147
4.5	Erregung und Erregersignale	148
5	Eigenschwingungen linearer Systeme mit einem Freiheitsgrad	150
5.1	Bewegungsgleichung und Kenngrößen	150
5.2	Lösungsansatz und Eigenwerte	151
5.3	Freie, ungedämpfte Schwingungen	153
5.4	Freie, schwach gedämpfte Schwingungen	156
5.5	Freie, stark gedämpfte Schwingung	158
5.6	Kriechgrenzfall	159
5.7	Freie, angefachte Bewegung	160
5.8	Phasendiagramm	161
5.9	Energiebetrachtungen	164
5.10	Abschätzung der Eigenfrequenz	166
5.11	Beispiele zu freien Schwingungen	167
6	Erzwungene Schwingungen von Einfreiheitsgradsystemen	176
6.1	Bewegungsgleichung, Erregermechanismen und Normierung	176
6.2	Allgemeine Lösung, Anfangsbedingungen und dynamischer Lastfaktor	178
6.3	Harmonische Erregung	180
6.4	Unterschiedliche Erregermechanismen	186
6.4.1	Übersicht	186
6.4.2	Absoluter Schwingweg bei Feder-Wegerregung	186
6.4.3	Absoluter Schwingweg bei Dämpfer-Wegerregung	189
6.4.4	Absoluter Schwingweg bei Fußpunkt-Wegerregung	191
6.4.5	Relativer Schwingweg bei Fußpunkt-Wegerregung	193
6.4.6	Relative Schwinggeschwindigkeit bei Fußpunkt-Wegerregung	196
6.5	Resonanzverhalten eines ungedämpften Systems	206
6.6	Periodische Erregung	209
6.7	Beliebige deterministische Erregerfunktion	213
6.8	Sprung- und Stoßerregung	219
6.8.1	Sprungantwort	219
6.8.2	Stoßantwort	220
6.8.3	Zusammenhang	220
6.9	DUHAMEL-Integral und Faltung	221
6.10	Analyse im Frequenzbereich	222
6.11	Resonanzdurchfahrt	224
6.11.1	Übersicht	224
6.11.2	Gleichmäßig beschleunigter An- und Auslauf	224
6.11.3	Systeme mit begrenztem Antrieb	230
6.12	Schwingungsberuhigung	234
6.12.1	Übersicht	234
6.12.2	Vermindern der Erregung	234
6.12.3	Verstimmen	234
6.12.4	Dämpfen	235
6.12.5	Schwingungsisolierung	235
6.13	Stochastische Erregung	238

7	Freie Schwingungen von Mehrfreiheitsgradsystemen	241
7.1	Eigenwertproblem und Lösungsverhalten	241
7.1.1	Systembeschreibung	241
7.1.2	Eigenwertproblem	241
7.1.3	Freie Schwingungen	243
7.1.4	Lösungsverhalten	243
7.2	Freie ungedämpfte Schwingungen	244
7.2.1	Eigenfrequenzen	244
7.2.2	Eigenvektoren	246
7.2.3	Freie Schwingungen	247
7.2.4	Orthogonalität der Eigenvektoren	248
7.2.5	Bedeutung der Orthogonalitätseigenschaften	250
7.2.6	Definitheit der Energien	251
7.2.7	Ausnutzen von Symmetrieeigenschaften	251
7.2.8	System mit mehrfachen Eigenwerten	257
7.3	Abschätzung von Eigenfrequenzen	261
7.3.1	Obere Schranke nach RAYLEIGH	261
7.3.2	Untere Schranke nach DUNKERLEY	262
7.3.3	Allgemeine Sätze über die Eigenformen	262
7.4	Freie gedämpfte Schwingungen	263
7.4.1	Schwache beliebige Dämpfung	263
7.4.2	CAUGHEY-Dämpfung	265
7.4.3	Proportionaldämpfung, Bequemlichkeitshypothese	268
7.4.4	Näherung bei allgemeinen Dämpfungsmatrizen	270
7.4.5	Strukturdämpfung	270
7.4.6	Hinweise zur Behandlung der Dämpfung	276
7.5	Stabilität	277
7.5.1	Begriff der Stabilität	277
7.5.2	Wurzelortskurven-Kriterium	277
7.5.3	HURWITZ-Kriterium	278
7.6	Systeme mit gyroroskopischen Termen	284
7.7	Systeme mit zirkulatorischen Kräften	285
7.8	Beschreibung im Zustandsraum	285
8	Erzwungene Schwingungen diskreter Systeme	287
8.1	Bewegungsgleichungen und Übersicht	287
8.2	Direkte Lösung der Bewegungsgleichung	288
8.2.1	Harmonische Erregerkräfte	288
8.2.2	Beliebige FOURIER-transformierbare Erregung	290
8.2.3	Resonanz, Tilgung, Scheinresonanz	291
8.3	Modale Berechnung bei Caughey-Dämpfung	300
8.3.1	Berechnung des vollständigen Systems	300
8.3.2	Näherungen in modaler Darstellung	303
8.3.3	Antwortspektrenverfahren	304
8.3.4	Modale Lösung für Systeme mit Proportionaldämpfung	304
8.4	Vergleich der Verfahren	306
8.5	Tilger und Dämpfer	313
8.5.1	Schwingungstilger	313

8.5.2	Tilger mit Dämpfung	319
8.5.3	Dämpfer ohne Federkopplung	322
8.5.4	Technische Ausführungen von Tilgern und Dämpfern	323
9	Einfache freie Kontinuumsschwingungen	326
9.1	Einleitung	326
9.2	Eindimensionale Wellengleichung	327
9.2.1	Grundlagen	327
9.2.2	Querschwingungen von Saiten	328
9.2.3	Längsschwingungen von Stäben	329
9.2.4	Torsionsschwingungen von Wellen	330
9.2.5	Scherwellen in Gebäuden und Schubträger	331
9.2.6	Druckschwingungen in Gassäulen	333
9.3	Die Wellengleichung und ihre Lösungen	334
9.3.1	Übersicht, allgemeine Zusammenhänge	334
9.3.2	Die D'ALEMBERTSche Lösung	335
9.3.3	Die BERNOULLISChe Lösung	337
9.4	Biegeschwingungen von Balken	345
9.4.1	Voraussetzungen	345
9.4.2	Bewegungsgleichung des EULER-BERNOULLI-Balkens	345
9.4.3	Sonderfälle	347
9.4.4	Freie Biegeschwingungen des homogenen Balkens	348
9.4.5	Orthogonalität der Eigenformen	354
9.4.6	Überlagerungsprinzip	354
9.4.7	Schlußbemerkungen	355
9.5	Schwingungen von Platten und Membranen	355
9.5.1	Membran	355
9.5.2	Platte	355
9.6	Schrankenverfahren	356
9.6.1	Obere Schranke nach RAYLEIGH	356
9.6.2	Untere Schranke nach DUNKERLEY	357
9.6.3	Systeme zweiter Ordnung im Ort	357
10	Erzwungene Schwingungen kontinuierlicher Systeme	359
10.1	Einführung	359
10.2	Längsschwingungen eines Stabes bei verteilter Erregerlast	359
10.3	Längsschwingungen bei Erregung über die Randbedingung	363
10.4	Biegeschwingungen bei verteilter Erregung	366
10.5	Biegeschwingungen bei Erregung an den Rändern	368
11	Beschreibung kontinuierlicher Systeme mit diskreten Modellen	371
11.1	Übersicht	371
11.2	Prinzip der virtuellen Verrückungen	371
11.3	Ritz-Verfahren	373
11.4	GALERKIN-Verfahren	378

12 Starrer Rotor, Auswuchten	382
12.1 Begriffe, Grundlagen	382
12.2 Erforderliche Auswuchtgüte	387
12.3 Auswuchten auf Auswuchtmaschinen	388
12.4 Auswuchten im Betrieb	393
13 Flexible Rotoren	395
13.1 Starr gelagerter, dämpfungsfreier Laval-Rotor	395
13.1.1 Der Laval-Rotor als einfachstes Modell	395
13.1.2 Bewegungsgleichungen in festen Koordinaten	396
13.1.2.1 Beliebiger Drehzahlverlauf	396
13.1.3 Der stationäre Drehzustand	397
13.1.4 Komplexe Koordinaten	398
13.1.5 Bewegungsgleichungen im mitrotierenden Koordinatensystem	399
13.1.6 Freie Schwingungen	401
13.1.7 Unwuchterzwungene Schwingungen	403
13.1.8 Gewichtseinfluß	405
13.2 Mehrscheibenrotoren	405
13.2.1 Bewegungsgleichungen	405
13.2.2 Freie Biegeschwingungen	408
13.2.3 Unwuchterzwungene Biegeschwingungen	410
13.3 Kontinuierliche Rotoren	412
13.3.1 Bewegungsgleichung	412
13.3.2 Freie Biegeschwingungen	414
13.3.3 Unwuchterzwungene Biegeschwingungen	416
14 Nomenklatur und Literatur	418
14.1 Wichtige Formelzeichen	418
14.1.1 Lateinische Buchstaben	418
14.1.2 Griechische Buchstaben	423
14.1.3 Indizes und Exponenten	425
14.2 Literatur	426
15 Tafeln und Tabellen	428
15.1 Schwerpunkte	428
15.2 Flächenträgheitsmomente	430
15.3 Werkstoffwerte	431
15.4 Haftbeiwerte und Reibkoeffizienten	431
15.5 Biegelinien	432
15.6 Koppeltafel	433
15.7 Torsionsflächenträgheitsmomente	435
15.8 Krafteinflußzahlen aus Einheitsverschiebung	437
15.9 Nachgiebigkeiten aus Einheitsbelastungen	439
15.10 Massenträgheitsmomente	440
15.11 Fourier-Koeffizienten spezieller Funktionen	441
15.12 Fourier-Spektren spezieller Funktionen	444
16 Stichwortverzeichnis	446