

# Inhaltsverzeichnis

<b>Definitionen und Grundlagen</b> .....	1
1.1 Körperschall .....	1
1.2 Grundlegende Begriffe .....	3
1.2.1 Der Einmassenschwinger .....	3
1.2.2 Die elastische Aufhängung .....	9
1.2.3 Das Problem des „ruhenden Bezugskörpers“ bzw. des „starren Abschlusses“ .....	9
1.2.4 Die Lagrange'schen Gleichungen .....	11
1.2.5 Bewegungen in mehreren Richtungen .....	13
1.2.5.1 Reziprozität bzw. wechselseitige Leistung .....	19
1.2.6 Entwicklungssatz .....	19
1.3 Energiebetrachtungen .....	20
1.3.1 Energieerhaltung und Energiefloss .....	21
1.3.2 Minimierung der mittleren Energie (Hamilton'sches Prinzip) .....	22
1.3.2.1 Der Rayleigh-Quotient .....	24
<b>Literatur</b> .....	27
<b>Übersicht über die verschiedenen Wellenarten</b> .....	29
2.1 Longitudinale Wellen .....	29
2.1.1 Die reine Longitudinalwelle .....	29
2.1.2 Die quasi-longitudinalen Wellen in Stäben und Platten ..	34
2.2 Transversalwellen .....	39
2.2.1 Die ebene Transversalwelle .....	39
2.2.2 Torsionswellen .....	43
2.3 Biegewellen .....	47
2.3.1 Bewegungsgleichung .....	47
2.3.2 Energiebeziehungen .....	55
2.4 Die Wellenbewegungen auf Stäben endlicher Länge .....	58
2.4.1 Longitudinale Eigenschwingungen .....	58

## VIII Inhaltsverzeichnis

2.4.2	Biege-Eigenschwingungen . . . . .	63
2.5	Die allgemeinen Feldgleichungen . . . . .	70
2.6	Das Wellenfeld an einer freien Oberfläche . . . . .	78
2.6.1	Reflexion ebener Wellen . . . . .	78
2.6.1.1	Spurwellengeschwindigkeit und Winkelbeziehungen . . . . .	79
2.6.1.2	Reflexion von L-Wellen . . . . .	82
2.6.1.3	Reflexion von T-Wellen . . . . .	83
2.6.1.4	Diskussion der Reflexionsfaktoren und Reflexionsgrade . . . . .	85
2.6.2	Anregung des elastischen Halbraums . . . . .	87
2.6.3	Die freie Oberflächenwelle (Rayleighwelle) . . . . .	89
2.7	Plattenwellen . . . . .	92
2.7.1	Randbedingungen und Lösungsformen . . . . .	92
2.7.2	Wellen, deren Verschiebungen nur parallel zur Oberfläche sind . . . . .	94
2.7.3	Wellen, deren Verschiebung auch senkrecht zur Oberfläche sind . . . . .	95
2.7.4	Ableitung von Bewegungsgleichungen für dünne Platten aus den allgemeinen Feldgleichungen . . . . .	101
2.7.4.1	Dehnwellen und Schubwellen in ebenen isotropen Platten . . . . .	101
2.7.4.2	Biegewellen in ebenen isotropen Platten . . . . .	105
2.7.4.3	Biegewellen in dünnen, orthotropen Platten . . . . .	109
2.7.4.4	Dünne Platten mit Vorspannung und Bettung . . . . .	111
2.8	Ableitung von Bewegungsgleichungen mit Hilfe des Hamilton'schen Prinzips . . . . .	112
2.8.1	Grundlagen . . . . .	112
2.8.2	Ebene Platten mit Schubsteife (korrigierte Biegewelle) . . . . .	113
2.8.3	Zylinderschalen . . . . .	118
2.8.3.1	Bewegungsgleichungen . . . . .	118
2.8.3.2	Spezialfälle . . . . .	122
2.8.3.3	Phasengeschwindigkeiten . . . . .	124
2.8.3.4	Wellenimpedanzen . . . . .	127
2.8.4	Resonanzfrequenzen . . . . .	128
2.9	Körperschallintensität . . . . .	131
2.9.1	Grundgleichungen . . . . .	131
2.9.2	Leistungstransport in Platten . . . . .	132
2.9.3	Leistungstransport in dünnen Zylinderschalen . . . . .	135
<b>Literatur</b>	.....	137

<b>Dämpfung . . . . .</b>	139
3.1 Dämpfungsmechanismen und ihre Darstellungsweise . . . . .	139
3.2 Komplexer Modul und komplexe Wellenzahl . . . . .	142
3.3 Resonanzschwingungen von gedämpften Stäben . . . . .	150
3.3.1 Quasilongitudinal- und Torsionswellen . . . . .	151
3.3.2 Biegewellen . . . . .	157
3.4 Messung des komplexen Moduls . . . . .	162
3.4.1 Messung an kleinen Proben . . . . .	163
3.4.1.1 Bestimmung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms . . . . .	163
3.4.1.2 Bestimmung von Transfergrößen beim „Tonpilz“ . . . . .	165
3.4.1.3 Bestimmung des Ausschwingvorganges . . . . .	167
3.4.1.4 Bestimmung der Resonanzfrequenz und der Halbwertsbreite . . . . .	168
3.4.2 Messung an Stäben . . . . .	170
3.4.2.1 Bestimmung der Halbwertsbreiten . . . . .	171
3.4.2.2 Bestimmung der Abklingzeiten . . . . .	173
3.4.2.3 Bestimmung der Pegelabnahme . . . . .	174
3.4.2.4 Sonstige Messmethoden . . . . .	175
3.4.3 Messungen an nicht stabförmigen Proben . . . . .	175
3.5 Messergebnisse . . . . .	176
3.5.1 Metalle . . . . .	177
3.5.2 Kunststoffe . . . . .	179
3.5.3 Baustoffe . . . . .	182
3.6 Dämpfung von geschichteten Platten . . . . .	182
3.6.1 Platten mit einfachen Belägen, die auf Dehnung beansprucht sind . . . . .	184
3.6.2 Platten mit Mehrschichtbelägen . . . . .	187
3.6.2.1 Biegesteife Grundplatte mit dünner Abdeckplatte . . . . .	189
3.6.2.2 Dicke Platten mit dünner Zwischenschicht . . . . .	191
3.6.3 Bewegungsgleichungen für geschichtete Platten . . . . .	194
3.6.3.1 Platten mit einfachen Entdröhnbälgen (Doppelbalken) . . . . .	194
3.6.3.2 Verbundplatten (Dreischichtbalken) . . . . .	199
3.7 Dämpfung durch Resonatoren . . . . .	202
3.7.1 Dämpfung durch dicke Schichten . . . . .	207
3.8 Dämpfung von Fügestellen . . . . .	209
3.8.1 Fügestellendämpfung durch Relativbewegung in Normalenrichtung . . . . .	210
3.8.2 Fügestellendämpfung durch Relativbewegung in tangentialer Richtung . . . . .	214
<b>Literatur . . . . .</b>	219

<b>Impedanzen</b> .....	221
4.1 Definition von Punktimpedanz, Trennimpedanz und Admittanz	221
4.2 Messung mechanischer Punktimpedanzen .....	223
4.2.1 Bestimmung von Kraft und Schnelle .....	223
4.2.2 Vergleich mit einem bekannten Widerstand .....	226
4.2.3 Sonstige Messmethoden .....	228
4.3 Eingangsimpedanzen von unendlich ausgedehnten Stäben und Platten.....	231
4.3.1 Anregung von Quasilongitudinalwellen in Stäben .....	231
4.3.2 Anregung von Biegewellen auf Balken .....	233
4.3.3 Die Biegewelleneingangsimpedanz der homogenen Platte	238
4.4 Trennimpedanz .....	244
4.4.1 Verfahren zur Berechnung von Trennimpedanzen .....	244
4.4.2 Beispiele .....	245
4.4.3 Zusammenhang zwischen Trennimpedanz und Punktimpedanz .....	247
4.4.3.1 Platte mit Schubsteife .....	249
4.4.3.2 Der unendliche, isotrope Halbraum .....	251
4.4.3.3 Weitere Beispiele (orthotrope Platte, dicke Platte, Plattenstreifen, Rohr) .....	253
4.4.4 Momentenimpedanzen .....	259
4.4.5 Verfahren zur Berechnung von Impulsantworten .....	262
4.5 Leistungübertragung in unbegrenzte, ebene Strukturen .....	263
4.5.1 Verfahren zur Berechnung der Körperschallleistung .....	263
4.5.1.1 Fernfeldmethode .....	263
4.5.1.2 Fouriertransformation .....	266
4.5.2 Zusammenhang mit der Punktadmittanz .....	267
4.5.2.1 Anwendung auf Platten und dgl. ....	267
4.5.2.2 Anwendung auf den elastischen Halbraum .....	269
4.5.3 Deutung der Ergebnisse und Beispiele .....	269
4.6 Zusammenfassung von Impedanz- und Admittanzgleichungen; Näherungsbeziehungen .....	273
4.7 Anregung von endlichen Systemen .....	275
4.7.1 Allgemeine Eigenschaften .....	276
4.7.2 Anwendungsbeispiele .....	280
4.7.3 Leistungsbetrachtungen .....	284
4.8 Spezielle Probleme .....	292
4.8.1 Stoßanregung .....	292
4.8.1.1 Näherungslösung .....	292
4.8.1.2 Exakte Berechnungsmethode .....	296
4.8.2 Körperschallanregung durch plötzliche Entlastung .....	302
4.8.3 Rauе Oberflächen als Körperschallquellen .....	304
4.8.4 Parameteranregung .....	307
4.8.5 Elastische Lagerung .....	311

<b>Literatur .....</b>	<b>315</b>
<b>Dämmung von Körperschall .....</b>	<b>317</b>
5.1 Material- und Querschnitt-Wechsel .....	317
5.1.1 Dämmung von Longitudinalwellen .....	318
5.1.2 Dämmung von Biegewellen .....	321
5.2 Rechtwinklige Ecken und Verzweigungen .....	324
5.2.1 Biegewellenanregung einer Ecke .....	324
5.2.2 Longitudinalwellenanregung einer Ecke .....	328
5.2.3 Rechtwinklige Verzweigungen mit Biege- und Longitudinalwellenanregung .....	329
5.3 Körperschalldämmung durch elastische Zwischenlagen .....	334
5.3.1 Longitudinalwellendämmung durch elastische Zwischenlagen .....	335
5.3.2 Biegewellendämmung durch elastische Zwischenlagen ..	338
5.4 Körperschalldämmung durch Sperrmassen .....	342
5.4.1 Longitudinalwellendämmung durch Sperrmassen ..	342
5.4.2 Biegewellendämmung durch symmetrische Sperrmassen	343
5.4.3 Exzentrische Sperrmasse (Kopplung von Longitudinal- und Biegewellen) .....	347
5.5 Kettenleiter .....	350
5.5.1 Masse-Feder Ketten .....	351
5.5.2 Kettenleiter für Longitudinalwellen .....	354
5.5.3 Biegekettenleiter .....	359
5.6 Anwendung des Hamilton'schen Prinzips auf Körperschallübertragungsprobleme .....	364
5.6.1 Vorgehensweise .....	364
5.6.2 Einfaches Anwendungsbeispiel .....	367
5.6.3 Biegewellen und Longitudinalwellen bei einer unsymmetrischen Sperrmasse .....	370
5.7 Probleme des schrägen Einfalls .....	374
5.7.1 Allgemeine Betrachtungen zur Bewertung schrägen Einfalls .....	374
5.7.2 Allgemeine Folgerungen aus den Randbedingungen ..	379
5.7.2.1 Wellenzahlen bzw. Winkel .....	379
5.7.2.2 Amplituden .....	381
5.7.3 Beispiele .....	383
5.7.3.1 Biegewellenübertragung über Ecken und Verzweigungen .....	383
5.7.3.2 Anregung von „in-plane Wellen“ an Ecken etc ..	386
5.7.3.3 Übertragung über Versteifungen (Spannen, Rippen und dgl.) .....	389
5.7.4 Anmerkungen zur Verwendung des Hamilton'schen Prinzips .....	393
5.8 Dämmung zwischen parallelen Platten .....	394

5.8.1	Kontinuierliche Kopplung durch elastische Zwischenschicht (Schwimmender Estrich) . . . . .	394
5.8.2	Punktweise Schallbrücken . . . . .	400
5.9	Statistische Energieanalyse (SEA) . . . . .	403
5.9.1	Analogien zur statistischen Raumakustik . . . . .	403
5.9.2	Energiefluss in gekoppelten Oszillatoren . . . . .	407
5.9.3	Schätzung von Kopplungsverlustfaktoren . . . . .	410
5.9.3.1	Eindimensionale Anordnungen . . . . .	411
5.9.3.2	Mehrdimensionale Anordnungen . . . . .	415
5.9.4	Anwendungsbeispiele . . . . .	416
Literatur . . . . .		421
<b>Abstrahlung von Körperschall . . . . .</b> 423		
6.1	Messung der abgestrahlten Leistung . . . . .	423
6.2	Definition und Messung des Abstrahlgrades . . . . .	427
6.3	Der Strahlungsverlustfaktor . . . . .	430
6.4	Elementarstrahler . . . . .	432
6.4.1	Ungerichteter Kugelstrahler (Monopol) . . . . .	432
6.4.2	Dipolstrahler, Abstrahlung von Wechselkräften . . . . .	434
6.4.3	Die unendliche Platte . . . . .	438
6.4.4	Zylinderstrahler . . . . .	441
6.4.5	Impulsschallquellen . . . . .	447
6.5	Der ebene Strahler in der schallharten Wand . . . . .	451
6.5.1	Der ebene Strahler als Summe von Punktquellen . . . . .	451
6.5.1.1	Kolbenmembran . . . . .	454
6.5.1.2	Gitterförmige gegenphasige Einzelstrahler . . . . .	456
6.5.1.3	Membranschwingungen . . . . .	457
6.5.2	Der ebene Strahler als Wellensumme . . . . .	461
6.6	Abstrahlung von Biegewellen . . . . .	465
6.6.1	Abstrahlung von einer halbunendlichen Platte . . . . .	465
6.6.2	Die Grenzfrequenz . . . . .	468
6.6.3	Abstrahlung von Eigenformen . . . . .	472
6.6.4	Abstrahlung von Biegewellen bei gegebener äußerer Anregung . . . . .	475
6.6.4.1	Grundgleichungen . . . . .	475
6.6.4.2	Beispiele . . . . .	477
6.6.5	Vergleich mit Messungen . . . . .	481
6.7	Weitere Anmerkungen zur Abstrahlung von Körperschall . . . . .	485
6.7.1	Zylinderstrahler mit vorgegebener äußerer Anregung . . . . .	485
6.7.2	Ebene Platten mit Versteifungen . . . . .	486
6.7.3	Abstrahlung von beliebig geformten Körpern mit vorgegebener Schnelleverteilung . . . . .	488
6.8	Anregung von Platten durch Schallwellen (Luftschalldämmung) . . . . .	492
6.8.1	Dämmung von Platten und Einfachwänden . . . . .	492

6.8.2 Doppelwände mit Schallbrücken .....	496
6.9 Zusammenhang zwischen Abstrahlung und Anregung .....	499
6.9.1 Das Reziprozitätsprinzip .....	499
6.9.2 Anregung und Abstrahlung in einem Hallraum .....	500
6.9.3 Richtcharakteristiken von Anregung und Abstrahlung ..	503
6.9.4 Schalldämmung oberhalb der Grenzfrequenz .....	505
6.9.5 Schalldämmung in der Nähe der Grenzfrequenz .....	509
6.10 Anwendung der statischen Energieanalyse SEA auf Schalldämmprobleme .....	509
6.10.1 Nebenwegübertragung .....	510
6.10.2 Doppelwände .....	512
6.10.3 Mehrfachwände mit vielen starren Verbindungen ..	515
<b>Literatur .....</b>	<b>519</b>
<b>Messung und messbare Erzeugung von Körperschall .....</b>	<b>521</b>
7.1 Körperschall-Aufnehmer .....	521
7.1.1 Steuernde elektrische Aufnehmer .....	522
7.1.2 Optische Verfahren .....	527
7.2 Elektrodynamische Wandler für die Erzeugung und Messung von Körperschall .....	529
7.2.1 Elektrodynamische Wandler .....	529
7.2.1.1 Impedanzen und Übertragungsfaktoren bei unbeweglichen Magneten .....	531
7.2.1.2 Energiebilanz .....	534
7.2.1.3 Impedanzen und Übertragungsfaktoren bei beweglichen Magneten .....	535
7.2.2 Piezoelektrische Wandler .....	539
7.2.3 Elektrostatische Wandler .....	546
7.2.4 Elektromagnetische Wandler .....	551
7.2.5 Magnetostriktive Wandler .....	552
7.2.6 Ergänzende Anmerkungen zu den reziproken Wandlern ..	553
7.2.6.1 M-Wandler und N-Wandler .....	553
7.2.6.2 Anwendung von Luftschallwandlern für Körperschalluntersuchungen .....	555
7.2.6.3 Kalibrierung mit Hilfe des Reziprozitätsprinzips	556
7.3 Zusammengesetzte Messgrößen .....	557
7.3.1 Rückwirkung des Messgeräts auf die Bewegung des Messobjekts .....	560
<b>Literatur .....</b>	<b>569</b>
<b>Index .....</b>	<b>571</b>