

Inhaltsverzeichnis

Definitionen und Grundlagen	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 „starrten 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 Energiefluss	21
1.3.2 Minimierung der mittleren Energie (Hamilton'sches Prinzip)	22
1.3.2.1 Der Rayleigh-Quotient	24
Literatur	27
Übersicht über die verschiedenen Wellenarten	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

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
Literatur		137

Dämpfung	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 Entdröhnbelägen (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
Literatur	219

Impedanzen	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 Leistungsübertragung 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 Raue Oberflächen als Körperschallquellen	304
4.8.4 Parameteranregung	307
4.8.5 Elastische Lagerung	311

Literatur	315
Dämmung von Körperschall	317
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 Biegekettenteiler	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 (Spanten, 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
Abstrahlung von Körperschall		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 halbbunendlichen 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
Literatur		519
Messung und messbare Erzeugung von Körperschall		521
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 ..	555
7.3	Zusammengesetzte Messgrößen	557
7.3.1	Rückwirkung des Messgeräts auf die Bewegung des Messobjekts	560
Literatur		569
Index		571