

Lothar Cremer • Manfred Heckl

Körperschall

Physikalische Grundlagen und
technische Anwendungen

Zweite, völlig neu bearbeitete Auflage

Mit 200 Abbildungen



Springer

Inhalt

1	Definition, Messung und meßbare Erzeugung von Körperschall	1
1.1	Definition	1
1.2	Mechanische Meßmethoden und Betrachtungsweisen	3
1.2.1	Messung der Bewegung (Zeigerschreibweise)	3
1.2.2	Vergleich mit einer bekannten Beschleunigung (Impedanz und Admittanz)	6
1.2.3	Mechanische Körperschallaufnehmer als gedämpfte Einmassenschwinger	10
1.2.4	Rückwirkung des Meßgeräts auf die Bewegung des Meßobjekts	13
1.2.5	Das Problem des „ruhenden Bezugskörpers“ bzw. des „starrten Abschlusses“	20
1.2.5.1	Die Lagrangeschen Gleichungen	23
1.2.5.2	Bewegungen in mehreren Richtungen	24
1.2.5.3	Reziprozität bzw. wechselseitige Leistung	30
1.2.5.4	Entwicklungssatz	32
1.2.6	Energiebetrachtungen	32
1.2.6.1	Energieerhaltung, Energiefluß	32
1.2.6.2	Minimierung der mittleren Energiedifferenz (Hamiltonsches Prinzip)	33
1.2.6.3	Der Rayleigh-Quotient	35
1.3	Steuernde Körperschall-Aufnehmer	37
1.3.1	Steuernde elektrische Aufnehmer	37
1.3.2	Optische Verfahren	42
1.4	Elektromechanische Wandler für die Erzeugung und Messung von Körperschall	44
1.4.1	Elektrodynamische Wandler	44
1.4.1.1	Impedanzen und Übertragungsfaktoren bei unbeweglichen Magneten	46
1.4.1.2	Energiebilanz	49
1.4.1.3	Impedanzen und Übertragungsfaktoren bei beweglichen Magneten	50
1.4.2	Piezoelektrische Wandler	54
1.4.3	Elektrostatische Wandler	60
1.4.4	Elektromagnetische Wandler	65
1.4.5	Magnetostriktive Wandler	67

1.4.6	Ergänzende Anmerkungen zu den reziproken Wandlern	68
1.4.6.1	M-Wandler und N-Wandler	68
1.4.6.2	Anwendung von Luftschallwandlern für Körperschalluntersuchungen	69
1.4.6.3	Kalibrierung mit Hilfe des Reziprozitätsprinzips	70
1.5	Zusammengesetzte Meßgrößen	72
1.6	Literatur	74
2	Übersicht über die verschiedenen Wellenarten	77
2.1	Longitudinale Wellen	77
2.1.1	Die reine Longitudinalwelle	77
2.1.2	Die quasi-longitudinalen Wellen in Stäben und Platten	82
2.2	Transversalwellen	87
2.2.1	Die ebene Transversalwelle	87
2.2.2	Torsionswellen	90
2.3	Biegewellen	95
2.3.1	Bewegungsgleichung	95
2.3.2	Energiebeziehungen	102
2.4	Die Wellenbewegungen auf Stäben endlicher Länge	104
2.4.1	Longitudinale Eigenschwingungen	105
2.4.2	Biege-Eigenschwingungen	110
2.5	Die allgemeinen Feldgleichungen	115
2.6	Das Wellenfeld an einer freien Oberfläche	124
2.6.1	Reflexion ebener Wellen	124
2.6.1.1	Spurwellengeschwindigkeit und Winkelbeziehungen	125
2.6.1.2	Reflexion von L-Wellen	127
2.6.1.3	Reflexion von T-Wellen	129
2.6.1.4	Diskussion der Reflexionsfaktoren und Reflexionsgrade	131
2.6.2	Anregung des elastischen Halbraums	132
2.6.3	Die freie Oberflächenwelle (Rayleighwelle)	135
2.7	Plattenwellen	137
2.7.1	Randbedingungen und Lösungsformen	137
2.7.2	Wellen, deren Verschiebungen nur parallel zur Oberfläche sind	139
2.7.3	Wellen, deren Verschiebung auch senkrecht zur Oberfläche sind	141
2.7.4	Ableitung von Bewegungsgleichungen für dünne Platten aus den allgemeinen Feldgleichungen	147
2.7.4.1	Quasilongitudinal- und Schubwellen in ebenen, isotropen Platten	147
2.7.4.2	Biegewellen in ebenen isotropen Platten	151
2.7.4.3	Biegewellen in ebenen, orthotropen Platten	154
2.7.4.4	Dünne Platten mit Vorspannung und Bettung	156
2.8	Ableitung von Bewegungsgleichungen mit Hilfe des Hamiltonschen Prinzips	157
2.8.1	Grundlagen	157

2.8.2	Ebene Platten mit Schubsteife (korrigierte Biegewelle)	158
2.8.3	Zylinderschalen	162
2.8.3.1	Grundgleichungen	162
2.8.3.2	Spezialfälle	167
2.8.3.3	Phasengeschwindigkeiten	168
2.8.3.4	Wellenimpedanzen	171
2.8.3.5	Resonanzfrequenzen	172
2.9	Körperschallintensität	175
2.9.1	Grundgleichungen	175
2.9.2	Leistungstransport in dünnen Platten	175
2.9.3	Leistungstransport in dünnen Zylinderschalen	179
2.10	Literatur	181
3	Dämpfung	183
3.1	Dämpfungsmechanismen und ihre Darstellungsweise	183
3.2	Komplexer Modul und komplexe Wellenzahl	186
3.3	Resonanzschwingungen von gedämpften Stäben	193
3.3.1	Quasilongitudinal- und Torsionswellen	194
3.3.2	Biegewellen	200
3.4	Messung des komplexen Moduls	205
3.4.1	Messung an kleinen Proben.	206
3.4.1.1	Bestimmung des Spannungs-Dehnungsdiagramms	206
3.4.1.2	Bestimmung von Transfergrößen beim „Tonpilz“	208
3.4.1.3	Bestimmung des Ausschwingvorganges	209
3.4.1.4	Bestimmung der Resonanzfrequenz und der Halbwertsbreite	211
3.4.2	Messung an Stäben	213
3.4.2.1	Bestimmung der Halbwertsbreiten	213
3.4.2.2	Bestimmung der Abklingzeiten	215
3.4.2.3	Bestimmung der Pegelabnahme	217
3.4.2.4	Sonstige Meßmethoden	218
3.4.3	Messungen an nicht stabförmigen Proben	219
3.5	Meßergebnisse	220
3.5.1	Metalle	220
3.5.2	Kunststoffe	223
3.5.3	Baustoffe	225
3.6	Dämpfung von geschichteten Platten	227
3.6.1	Platten mit einfachen Belägen, die auf Dehnung beansprucht sind	227
3.6.2	Platten mit Mehrschichtbelägen	231
3.6.2.1	Biegesteife Grundplatte mit dünner Abdeckplatte	232
3.6.2.2	Dicke Platten mit dünner Zwischenschicht	235
3.6.3	Bewegungsgleichungen für geschichtete Platten	237
3.6.3.1	Platten mit einfachen Entdröhnbelägen (Doppelbalken)	237
3.6.3.2	Verbundplatten (Dreischichtbalken)	242

3.7	Dämpfung durch Resonatoren	245
3.7.1	Dämpfung durch dicke Schichten (Schüttungen)	250
3.8	Dämpfung von Fügestellen	252
3.8.1	Fügestellendämpfung durch Relativbewegung in Normalenrichtung	252
3.8.2	Fügestellendämpfung durch Relativbewegung in tangentialer Richtung	257
3.9	Literatur	259
4	Impedanzen	263
4.1	Definition von Punktimpedanz, Wellenimpedanz und Admittanz	263
4.2	Messung mechanischer Punktimpedanzen	265
4.2.1	Bestimmung von Kraft und Schnelle	265
4.2.2	Vergleich mit einem bekannten Widerstand	268
4.2.3	Sonstige Meßmethoden	271
4.3	Eingangsimpedanzen von unendlich ausgedehnten Stäben und Platten	273
4.3.1	Anregung von Quasilongitudinalwellen in Stäben	273
4.3.2	Anregung von Biegewellen auf Balken	274
4.3.3	Die Biegewelleneingangsimpedanz der homogenen Platte	279
4.4	Wellenimpedanz	285
4.4.1	Verfahren zur Berechnung der Wellenimpedanzen	285
4.4.2	Beispiele	286
4.4.3	Zusammenhang zwischen Wellenimpedanz und Punktimpedanz	288
4.4.3.1	Platte mit Schubsteife	290
4.4.3.2	Der unendliche, isotrope Halbraum	292
4.4.3.3	Weitere Beispiele (orthotrope Platte, dicke Platte, Plattenstreifen, Rohr)	294
4.4.4	Momentenimpedanzen	300
4.4.5	Verfahren zur Berechnung von Impulsantworten	303
4.5	Leistungsübertragung in unbegrenzte, ebene Strukturen	304
4.5.1	Verfahren zur Berechnung der Körperschalleistung	304
4.5.1.1	Fernfeldmethode	304
4.5.1.2	Fouriertransformation	306
4.5.2	Zusammenhang mit der Punktadmittanz	307
4.5.2.1	Anwendung auf Platten und dgl.	307
4.5.2.2	Anwendung auf den elastischen Halbraum	309
4.5.3	Deutung der Ergebnisse und Beispiele	309
4.6	Zusammenfassung von Impedanz- und Admittanzformeln; Näherungsbeziehungen	313
4.7	Anregung von endlichen Systemen	316
4.7.1	Allgemeine Eigenschaften	316
4.7.2	Anwendungsbeispiele	320
4.7.3	Leistungsbetrachtungen	324

4.8	Spezielle Probleme	332
4.8.1	Stoßanregung	332
4.8.1.1	Näherungslösung	332
4.8.1.2	Exakte Berechnungsmethode	336
4.8.2	Körperschallanregung durch eine plötzliche Entlastung	342
4.8.3	Rauhe Oberflächen als Körperschallquellen	344
4.8.4	Parameteranregung	347
4.8.5	Elastische Lagerung	351
4.9	Literatur	353
5	Dämmung von Körperschall	357
5.1	Material- und Querschnitt-Wechsel	357
5.1.1	Dämmung von Longitudinalwellen	358
5.1.2	Dämmung von BiegeWellen	360
5.2	Rechtwinklige Ecken und Verzweigungen	364
5.2.1	BiegeWellenanregung einer Ecke	364
5.2.2	Longitudinalwellenanregung einer Ecke	368
5.2.3	Rechtwinklige Verzweigungen mit Biege- und Longitudinalwellenanregung	369
5.3	Körperschalldämmung durch elastische Zwischenlagen	374
5.3.1	Longitudinalwellendämmung durch elastische Zwischenlagen	374
5.3.2	BiegeWellendämmung durch elastische Zwischenlagen	377
5.4	Körperschalldämmung durch Sperrmassen	381
5.4.1	Longitudinalwellendämmung durch Sperrmassen	381
5.4.2	BiegeWellendämmung durch symmetrische Sperrmassen	382
5.4.3	Exzentrische Sperrmasse (Kopplung von Longitudinal- und BiegeWellen)	386
5.5	Kettenleiter	389
5.5.1	Masse-Feder-Ketten	389
5.5.2	Kettenleiter für Longitudinalwellen	393
5.5.3	Biegekettenteiler	398
5.6	Anwendung des Hamiltonschen Prinzips auf Körperschallübertragungsprobleme	404
5.6.1	Vorgehensweise	404
5.6.2	Einfaches Anwendungsbeispiel	406
5.6.3	BiegeWellen und Longitudinalwellen bei einer unsymmetrischen Sperrmasse	408
5.7	Probleme des schrägen Einfalls	414
5.7.1	Allgemeine Betrachtungen zur Bewertung des schrägen Einfalls	414
5.7.2	Allgemeine Folgerungen aus den Randbedingungen	417
5.7.2.1	Wellenzahlen bzw. Winkel	417
5.7.2.2	Amplituden	419
5.7.3	Beispiele	421

5.7.3.1	Biegewellenübertragung über Ecken und Verzweigungen	421
5.7.3.2	Anregung von „in-plane Wellen“ an Ecken etc.	424
5.7.3.3	Übertragung über Versteifungen (Spanten, Rippen und dgl.)	427
5.7.4	Anmerkungen zur Verwendung des Hamiltonschen Prinzips	431
5.8	Dämmung zwischen parallelen Platten	432
5.8.1	Kontinuierliche Kopplung durch eine elastische Zwischenschicht (Schwimmender Estrich)	432
5.8.2	Punktförmige Schallbrücken	438
5.9	Statistische Energieanalyse (SEA)	441
5.9.1	Analogien zur statistischen Raumakustik	441
5.9.2	Energiefluß in gekoppelten Oszillatoren	445
5.9.3	Schätzung von Kopplungsverlustfaktoren	448
5.9.3.1	Eindimensionale Anordnungen	448
5.9.3.2	Mehrdimensionale Anordnungen	452
5.9.4	Anwendungsbeispiele	454
5.10	Literatur	456
6	Abstrahlung von Körperschall	459
6.1	Messung der abgestrahlten Leistung	459
6.2	Definition und Messung des Abstrahlgrades	463
6.3	Der Strahlungsverlustfaktor	466
6.4	Elementarstrahler	468
6.4.1	Ungerichteter Kugelstrahler (Monopol)	468
6.4.2	Dipolstrahler, Abstrahlung von Wechselkräften	470
6.4.3	Die unendliche Platte	473
6.4.4	Zylinderstrahler	477
6.4.5	Impulsschallquellen	481
6.5	Der ebene Strahler in der schallharten Wand	484
6.5.1	Der ebene Strahler als Summe von Punktquellen	485
6.5.2	Der ebene Strahler als Summe von ebenen Wellen (Wellenzahlspektren)	491
6.6	Abstrahlung von Biegewellen	495
6.6.1	Abstrahlung von einer halbunendlichen Platte	495
6.6.2	Die Grenzfrequenz	497
6.6.3	Abstrahlung von Eigenformen	501
6.6.4	Abstrahlung von Biegewellen bei gegebener äußerer Anregung	504
6.6.4.1	Grundgleichungen	504
6.6.4.2	Beispiele	506
6.6.5	Vergleich mit Messungen	509
6.6.6	Weitere Anmerkungen zur Abstrahlung von Körperschall	513
6.6.6.1	Zylinderstrahler mit vorgegebener äußerer Anregung	513
6.6.6.2	Ebene Platten mit Versteifungen etc.	515

6.6.6.3	Abstrahlung von beliebig geformten Körpern mit vorgegebener Schnellverteilung	517
6.7	Anregung von Platten und dgl. durch Schallwellen (Luftschalldämmung)	520
6.7.1	Dämmung von Einfachwänden (Platten)	520
6.7.2	Doppelwände mit Schallbrücken	523
6.8	Zusammenhang zwischen Abstrahlung und Anregung	526
6.8.1	Das Reziprozitätsprinzip	526
6.8.2	Anregung und Abstrahlung in einem Hallraum	528
6.8.3	Richtcharakteristiken von Anregung und Abstrahlung	530
6.8.4	Schalldämmung oberhalb der Grenzfrequenz	532
6.8.5	Schalldämmung in der Nähe der Grenzfrequenz	535
6.9	Anwendung der statistischen Energieanalyse SEA auf Schalldämmprobleme	536
6.9.1	Nebenwegübertragung	536
6.9.2	Doppelwände	539
6.9.3	Mehrfachwände mit vielen starren Verbindungen	542
6.10	Literatur	544
	Sachverzeichnis	547