

Michael Möser

Technische Akustik

Michael Möser

Technische Akustik

7., erweiterte und aktualisierte Auflage

Mit 263 Abbildungen

 Springer

Prof. Dr.-Ing. Michael Möser
Technische Universität Berlin
Institut für Technische Akustik
Einsteinufer 25
10587 Berlin
moes0338@mailbox.TU-Berlin.de

Bibliografische Information der Deutsche Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-540-71386-9 Springer Berlin Heidelberg New York

ISBN 978-3-540-22510-2 6. Auflage Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003, 2005, 2007

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Digitale Druckvorlage des Autors
Herstellung: LE-TeX, Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig
Umschlaggestaltung: WMXDesign, Heidelberg
Gedruckt auf säurefreiem Papier 68/3100 YL - 5 4 3 2 1 0

Dieses Buch widme ich meinen Eltern Christel und Anton Möser

Vorwort

Vorwort zur siebten Auflage

Auch für die siebte Auflage der 'Technischen Akustik' bestehen die Absichten des Verfassers hauptsächlich in der größtmöglichen Aufklärung seiner Sachverhalte und im Bemühen darum, dem Leser einen einfachen, durchsichtigen und klaren Zugang zu den geschilderten Inhalten und Aussagen zu bieten. Soweit irgend möglich werden anschauliche Vorgehensweisen benutzt und vor allem auch Begründungen für alle Schritte angegeben, ohne dass dabei auf hohe inhaltliche Qualität und mathematische Beschreibung des Stoffes durch geeignete Gleichungen verzichtet wird.

Die Hauptunterschiede zu den Vorgängerauflagen bestehen auch diesmal wieder vor allem in einem größeren inhaltlichen Angebot. Es ist ein neues Kapitel dazugekommen, ein zweites wurde erheblich überarbeitet, und schließlich sind insgesamt 101 Rechenübungen nebst Lösungen entwickelt worden, die Gelegenheit geben sollen, den gesamten Stoff anzuwenden und zu vertiefen. Natürlich sind nebenbei auch einige Fehler behoben (die sich offenbar unvermeidlich einschleichen, trotz Korrekturlesen durch Dritte) und kleinere Unterlassungssünden bereinigt worden.

Das neue Kapitel betrifft die Grundlagen der Übertragungstheorie und die Nützlichkeit der Fourierschen Zerlegung von beliebigen Verläufen in sinusförmige (oder wellenförmige) Bestandteile. Gewiss gehört auch für den Akustiker das Grundwissen über die Beschreibung von 'Systemen' (wie Übertrager anderenortes gern genannt werden) zur Ausbildung, Begriffe wie 'Impulsantwort', 'Übertragungsfunktion', 'Faltung' und 'Faltungssatz' sollten für ihn keine Fremdworte bilden. Auch das Konzept, nach welchem einem selbst wellenförmigen Strahler ein sehr einfach zu verstehendes Schallfeld in Form einer schräg abgestrahlten Welle zugeordnet ist, darf in einem Grundlagenbuch zur Akustik gewiss nicht fehlen. Der Gedanke, beliebige Strahlerverläufe dann in Wellenkomponenten zu zerlegen, drängt sich nachgerade auf; jede Wellenkomponente trägt dann mit einem Schallfeldanteil in Form einer ebenen, fortschreitenden Welle mit einer ganz bestimmten Laufrichtung zum

Gesamtfeld bei. Die Einzelheiten sind im neuen Kapitel, dem letzten dieses Buches, aufgeführt.

Gründlich überarbeitet worden ist das Kapitel über Schallschutzwände. Alleine in Deutschland dürften wohl viele hundert Streckenkilometer an Straße und Schiene mit Wänden oder Wällen zum ausschließlichen Zweck der Lärmbekämpfung ausgerüstet sein. Angesichts dieser Tatsache ist es um so überraschender, dass sie in der Lehre oft geringe Beachtung finden. Nur wenige Lehrbücher oder Standardwerke über Akustik gehen überhaupt auf dieses Thema ein; manchmal werden zwar die beschreibenden Formeln hergeleitet, die Schilderung von Wirkkonzept oder praktischem Pegel-Minderungspotenzial aber fehlt fast immer. Vielleicht mit gutem Grund: Die Behandlung dieses Gegenstandes ist nicht gerade trivial, sondern durchaus anspruchsvoll und gehört - mathematisch gesehen - sicher zum schwierigeren Teil des vorliegenden Buches. Um so größer waren die Bemühungen des Autors, die anfangs etwas komplexere wellentheoretische Beschreibung mit Hilfe von Näherungen auf die Kernsubstanz der Aussagen zurückzuführen; mit einem verblüffend einfachen und einleuchtenden Resultat, dessen praktische Konsequenzen für den Alltagseinsatz im entsprechenden Kapitel gründlich gewürdigt werden.

Und schließlich findet man in der siebten Auflage zu jedem Kapitel Rechenübungen und deren Ergebnisse (im Anhang) aufgeführt, wobei stets auch der Lösungsweg genannt wird. Das Niveau des ganzen Buches ist breit gefächert; es reicht immerhin von dem einfachen, aber höchst notwendigen Gesetz der Pegeladdition bis hin zu einem Beugungsproblem, das erst vor etwa 50 Jahren von Sommerfeld (für Licht) gelöst wurde. Naturgemäß betrifft diese Breite auch die Rechenübungen, sowohl 'einfache' wie 'schwere' Aufgaben sind enthalten. Manche Aufgabe dient nur dem Zweck, den geschilderten Stoff anzuwenden oder an Hand von Formeln Zahlenwerte zu ermitteln; andere Übungen versuchen darüber hinaus, den Stoff des betreffenden Kapitels noch zu erweitern und zu ergänzen. Leserin und Leser mögen entscheiden, welche Aufgaben sie für sich als interessant und angemessen ansehen. Meine beiden Ratschläge zu ihrer Bearbeitung folgen. Man bemühe sich selbst zunächst intensiv um eine eigene Lösung, ohne gleich hinten im Anhang nachzuschlagen. Man lasse sich nicht entmutigen, wenn sich einmal eine eigene Lösung nicht einstellen will oder gar in die falsche Richtung führt.

Auch für diese siebte Auflage meines Buches wünsche ich meinen Lesern eine interessante und lehrreiche Lektüre. Über Anmerkungen, wie man es (noch?) besser machen kann, wo noch immer Fehler auftreten und was sonst dem Buch noch dienlich sein könnte, würde ich mich sehr freuen (moes0338@mailbox.tu-berlin.de).

Berlin, im Januar 2007,

Michael Möser

Vorwort zur sechsten Auflage

Auch die hier nun vorliegende sechste Auflage der „Technischen Akustik“ versteht sich - wie die fünfte - als Lehrbuch zum Selbststudium ebenso wie zur Vorlesungsbegleitung. Und auch die Absichten, die den Verfasser beim Herstellen der Neuauflage geleitet haben, sind im Prinzip ganz unverändert geblieben (siehe unten). Die Darstellungen bauen neben der notwendigen ausführlichen Formeldarstellung auch auf Anschaulichkeit und auf die Vorstellungskraft der Leser. Nicht nur das 'Wie', sondern auch das 'Warum' steht bei der Schilderung der einzelnen Schritte im Vordergrund.

So unterscheidet sich denn die Neuauflage vor allem durch ihren doch deutlich gewachsenen Umfang von ihrer Vorgängerin. Ein neues Kapitel ist dazugekommen. Es behandelt die Grundlagen der sogenannten 'aktiven' Lärmbekämpfung, ein oft diskutierter Stoff, der heute sicher zum akustischen Allgemeinwissen zählt. Zu diesem Thema sind die grundlegendsten Betrachtungen aufgenommen worden. Einige andere Kapitel haben Erweiterungen erfahren, z. B. werden bei der Wellenausbreitung nun auch das bewegte Medium und der Doppler-Effekt betrachtet. Kleinere Neuheiten betreffen z.B. den schrägen Schalleinfall bei den Absorbern und die Kanalverzweigungen bei den Schalldämpfern ebenso wie einige andere kleinere Nachträge aus der Praxis. Manche Ungereimtheit und mancher Fehler wurde beseitigt.

Jedes Kapitel enthält jetzt an seinem Schluß eine Zusammenfassung, die noch einmal auf das Wesentliche hinweist und in knapper Skizze das inhaltliche Gerüst errichtet. Sie dient der einprägsamen Übersicht über das vorher ausführlich behandelte Thema.

Ich wünsche meinen Lesern ein interessantes und lehrreiches Studium meines Buches.

Berlin, im Sommer 2004,

Michael Möser

Vorwort zur fünften Auflage

Die „Vorlesungen über Technische Akustik“ verstehen sich als Lehrbuch. Ausdrücklich hat der Verfasser der vorliegenden fünften Auflage beim Schreiben ein Buch beabsichtigt, das ebenso dem autodidaktischen Selbststudium wie der Vorlesungsbegleitung dienen soll. Das Buch richtet sich dabei an alle, die bereits eine gewisse Einübung in die physikalisch-technische Denkweise und in den Ausdruck ihrer Inhalte durch mathematische Formeln mitbringen. Was man über die gewöhnlichen Grundkenntnisse (wie z.B. Differenzieren und Integrieren) hinaus können muss, kann im Anhang erlernt werden: der Umgang mit komplexen Zahlen z.B. wird hier nicht nur erläutert, er wird vor allem auch von seiner Nützlichkeit her begründet. Es ist überhaupt ein wesentliches Anliegen des Verfassers, nicht nur das Wie, sondern vorrangig auch das

Warum seines jeweiligen Vorgehens und Voranschreitens zu erklären: meistens bestehen Verständnisschwierigkeiten ja nicht im Nachvollziehen der Schritte, sondern in der oft unbeantwortet gebliebenen Frage, warum man es so und nicht anders macht. Der Verfasser hat sich hier stets redlich um Klarheit bemüht.

Auch beschränken sich die Erläuterungen keineswegs auf die formelmäßige Behandlung der Sachverhalte. Unbestreitbar bilden die Formeln zwar die eindeutigste Beschreibung der Inhalte und nur sie schildern auch der Größe nach die Probleme und die Wirkungsweisen von sachgerechten Auslegungen der Lösungen. Dennoch bleibt ein Übriges zu tun. Nur die anschauliche, auf die Vorstellung bauende Erläuterung und Erklärung lässt Verstehen, Begreifen und Erkennen – kurz: inhaltliche Beherrschung – wirklich entstehen. Der Verfasser ist der Überzeugung, dass Lernen – dem Lernenden ohnedies schon schwer genug – vom Lehrenden so leicht wie irgend möglich gemacht werden muss; der Leser entscheide darüber, ob sich diese Absicht hier auch in die Tat umgesetzt hat.

In vieler Hinsicht ist diese Neuauflage dem großen Lothar Cremer verpflichtet. Nicht zuletzt verdankt der Autor sein eignes Wissen dem Studium der Cremer-originalen Erstauflage; auch sind wichtige Entdeckung Lothar Cremers natürlich Bestandteil der hier vorliegenden Auflage. Als Beispiele genannt seien nur die Cremer'sche Optimalimpedanz (im Kapitel über Schalldämpfer) und die vielleicht wichtigste Entdeckung dieses Universalakustikers: gemeint ist der Koinzidenzeffekt, der erst eine befriedigenden Erklärung der Schalldämmung von Wänden, Decken, Fenstern und anderen flächigen Bauteilen ergeben hat und zum Kern des Grundlagenwissen zählt.

Von der Cremer'schen (und der Cremer/Hubert'schen) Auflage unterscheidet sich diese neue Ausgabe durch eine deutlich veränderte Themenauswahl. Cremer war dem universellen Überblick verpflichtet: von der Hörpsychologie über die Physik der Geige, den Tonaufzeichnungsverfahren und der Bau- und Raum-Akustik; alles, was mit Akustik zu tun hatte, war „sein“ Gegenstand, alle akustischen Teilgebiete lagen ihm am Herzen. Die neue, fünfte Auflage dagegen widmet sich mehr der Ingenieurausbildung. Der Versuch, sich auf das zu beschränken, was dem heute in der Akustik praktisch tätigen Ingenieur an Rüstzeug und Verständnis not tut, hat zu der getroffenen Themenauswahl geführt.

Aus diesem Anspruch heraus legen die „Vorlesungen“ vor allem Wert auf die wichtigsten Maßnahmen zur Beruhigung der akustischen Umwelt. Alle Kapitel zwischen der elastischen Entkopplung (Kapitel 5) und der Beugung (Kapitel 11) haben direkt und indirekt die Frage zum Gegenstand, wie die Lautstärke in den praktisch wichtigsten akustischen Umgebungen – in Gebäuden und im Freien nämlich – verringert werden kann. Natürlich lässt sich über dieses Ziel erst sprechen, wenn auch die inhaltlichen Voraussetzungen dafür schon geschaffen worden sind. Die Schalldämmung von Wänden etwa kann nur begreifen, wer schon etwas über Körperschall und insbesondere über die Biegewellen auf Platten gehört hat. Deshalb werden den genannten

„Maßnahmenkapiteln“ die „Medienkapitel“ 2 bis 4 vorangestellt, um überhaupt erst das erforderliche Grundlagenwissen über die Natur von Schall und Schwingungen zu erarbeiten. Als Einleitung dienen einige Bemerkungen über die Wahrnehmung von Schall. Den Schluss bilden die wichtigsten Mess- und Sende-Einrichtungen der Akustik: die Mikrophone, Lautsprecher und Körperschallaufnehmer. Spezielle Messverfahren sind vorher schon in den betreffenden Kapiteln behandelt worden oder bilden sogar deren Ausgangspunkt; so beginnt z.B. das Kapitel über Absorption mit der Frage, wie diese durch Messung charakterisiert werden kann.

Der Verfasser dankt für die Hilfe, die ihm bei der Erarbeitung dieses Buches zuteil wurde. Insbesondere sei Bärbel Töpfer-Imelmann für die grafische Gestaltung und Tanja Lescau für das geduldige Schreiben großer Teile von Herzen gedankt.

Berlin, im Juli 2002,

Michael Möser

Inhaltsverzeichnis

1	Wahrnehmung von Schall	1
1.1	Terz- und Oktav-Filter	8
1.2	Die Hörfläche	10
1.3	Die A-Bewertung	11
1.4	Zeitlich veränderliche Geräusche	13
1.5	Zusammenfassung	15
1.6	Literaturhinweise	15
1.7	Übungsaufgaben	15
2	Grundbegriffe der Wellenausbreitung	19
2.1	Thermodynamik von Schallfeldern in Gasen	20
2.2	Eindimensionale Schallfelder	27
2.2.1	Grundgleichungen	27
2.2.2	Fortschreitende Wellen	33
2.2.3	Komplexe Schreibweise	37
2.2.4	Stehende Wellen und Resonanzphänomen	38
2.3	Dreidimensionale Schallfelder	42
2.4	Energie- und Leistungstransport	44
2.5	Intensitäts-Messverfahren	50
2.5.1	Zeitbereichsverfahren	51
2.5.2	Frequenzbereichsverfahren	51
2.5.3	Messfehler und Grenzen des Verfahrens	55
2.5.4	Normen	59
2.6	Wellenausbreitung im bewegten Medium	60
2.7	Zusammenfassung	66
2.8	Literaturhinweise	67
2.9	Übungsaufgaben	67
3	Schallausbreitung und Schallabstrahlung	71
3.1	Ungerichtete Schallabstrahlung von Punktquellen	71
3.2	Ungerichtete Schallabstrahlung von Linienquellen	73

3.3	Volumenquellen	74
3.4	Das Schallfeld zweier Quellen	77
3.5	Lautsprecherzeilen	85
3.5.1	Eindimensionale Kolbenmembran	87
3.5.2	Die Formung von Haupt- und Nebenkeulen	90
3.5.3	Elektronisches Schwenken	95
3.5.4	Fernfeldbedingungen	100
3.6	Schallabstrahlung von Ebenen	103
3.6.1	Schallfeld auf der Achse vor einer Kreis-Membran	106
3.7	Zusammenfassung	111
3.8	Literaturhinweise	111
3.9	Übungsaufgaben	111
4	Körperschall	117
4.1	Einleitung	117
4.2	Die Biegewellengleichung für Stäbe	120
4.3	Die Ausbreitung der Biegewellen	124
4.4	Stabresonanzen	126
4.4.1	Unterstützte Stabenden	127
4.4.2	Eingespannte Stabenden	129
4.4.3	Freie Stabenden	132
4.5	Biegeschwingungen von Platten	133
4.5.1	Die Wellengleichung und ihre Lösungen	133
4.5.2	Plattenresonanzen	137
4.6	Zusammenfassung	140
4.7	Literaturhinweise	141
4.8	Übungsaufgaben	141
5	Elastische Isolation	143
5.1	Wirkung elastischer Lagerung auf starrem Fundament	145
5.2	Dimensionierung elastischer Lagerung	151
5.3	Einfluss der Fundamentnachgiebigkeit	153
5.3.1	Fundament-Impedanz	154
5.3.2	Die Wirkung der Fundament-Impedanz	155
5.4	Ermittlung des Übertragungspfades	160
5.5	Messung des Verlustfaktors	163
5.6	Die dynamische Masse	165
5.7	Ausblick	167
5.8	Zusammenfassung	167
5.9	Literaturhinweis	168
5.10	Übungsaufgaben	168

6	Schallabsorption	171
6.1	Schallausbreitung im Kundtschen Rohr	171
6.2	Messungen im Kundtschen Rohr	178
6.2.1	Mini-Max-Verfahren	180
6.2.2	Wellentrennung	183
6.3	Die Wandimpedanz	185
6.4	Theorie des quasi-homogenen Absorbers	187
6.5	Spezielle absorbierende Anordnungen	193
6.5.1	Die „unendlich dicke“ poröse Schicht	193
6.5.2	Die poröse Schicht endlicher Dicke	196
6.5.3	Der poröse Vorhang	201
6.5.4	Resonanzabsorber	204
6.6	Der schräge Schalleinfall	211
6.7	Zusammenfassung	214
6.8	Literaturhinweise	215
6.9	Übungsaufgaben	216
7	Grundlagen der Raumakustik	219
7.1	Das diffuse Schallfeld	224
7.1.1	Nachhall	226
7.1.2	Der stationäre Zustand	228
7.1.3	Messung des Absorptionsgrades im Hallraum	234
7.2	Zusammenfassung	235
7.3	Literaturhinweise	236
7.4	Übungsaufgaben	236
8	Schalldämmung	241
8.1	Messung der Luftschalldämmung	243
8.2	Luftschalldämmung einschaliger Bauteile	246
8.3	Zweischalige Bauteile (biegeweiche Vorsatzschalen)	257
8.4	Trittschalldämmung	263
8.4.1	Messung des Trittschallpegels	264
8.4.2	Verbesserungsmaßnahmen	265
8.5	Zusammenfassung	268
8.6	Literaturhinweise	269
8.7	Übungsaufgaben	270
9	Schalldämpfer	273
9.1	Querschnittsänderungen schallharter Rohrleitungen	274
9.1.1	Einfacher Querschnittssprung	274
9.1.2	Verzweigungen	277
9.1.3	Kammerschalldämpfer	282
9.1.4	Kammer-Kombinationen	287
9.2	Wandungsschalldämpfer	292
9.2.1	Der schallhart berandete Kanal	293

9.2.2	Der schallweich berandete Kanal	294
9.2.3	Der Schalldämpfer mit beliebiger Wandungsimpedanz . .	295
9.2.4	Näherungsbetrachtungen für die Grundmode	296
9.2.5	Wandungen aus absorbierenden Schichten	299
9.2.6	Wandungen aus Resonatoren	303
9.2.7	Beliebige Querschnittsgeometrien	307
9.2.8	Exakte Berechnung bei beliebiger Impedanz	308
9.3	Zusammenfassung	314
9.4	Literaturhinweis	314
9.5	Übungsaufgaben	314
10	Schallschutzwände	317
10.1	Beugung an der schallharten Schneide	318
10.2	Näherung für das Einfügungsdämmmaß	335
10.3	Bedeutung der Höhe von Schallschutzwänden	338
10.4	Schallschutzwälle	339
10.5	Absorbierende Schallschutzwände	340
10.6	Bedeutung des Schalldurchganges durch die Abschirmwand . .	342
10.7	Ausblick	343
10.8	Zusammenfassung	343
10.9	Literaturhinweise	344
10.10	Übungsaufgaben	344
10.11	Anhang: MATLAB-Programm für die Fresnel-Integrale	346
11	Elektroakustische Wandler für Luftschall	349
11.1	Das Kondensatormikrophon	352
11.2	Richtungsempfindlichkeit von Mikrophonen	359
11.3	Das elektrodynamische Mikrophon	363
11.4	Der elektrodynamische Lautsprecher	367
11.5	Akustische Antennen	371
	11.5.1 Mikrophon-Zeilen	372
	11.5.2 Zeidimensionale Sensor-Anordnungen	381
11.6	Zusammenfassung	386
11.7	Literaturhinweise	387
11.8	Übungsaufgaben	387
12	Grundlagen der aktiven Lärmbekämpfung	389
12.1	Der Einfluss von Nachbildeffekten	394
	12.1.1 Gekreuzt laufende Wellen	395
12.2	Reflexion und Absorption	397
12.3	Aktive Stabilisierung selbsterregter Schwingungen	402
12.4	Zusammenfassung	411
12.5	Literaturhinweise	411
12.6	Übungsaufgaben	411

13	Eigenschaften und Beschreibung von Übertragern	413
13.1	Eigenschaften von Übertragern	414
13.1.1	Linearität	414
13.1.2	Zeitinvarianz	415
13.2	Beschreibung durch die Impulsantwort	416
13.3	Das Invarianz-Prinzip	421
13.4	Fourier-Zerlegung	421
13.4.1	Fourier-Reihen	422
13.4.2	Fourier-Transformation	430
13.4.3	Die Übertragungsfunktion und der Faltungssatz	433
13.4.4	Symmetrien	435
13.4.5	Impulsantworten und Hilbert-Transformation	437
13.5	Fourier-Akustik: Die Wellenlängen-Zerlegung örtlich verteilter Schallfelder	439
13.5.1	Abstrahlung von Ebenen	441
13.5.2	Abstrahlung von Biegewellen	443
13.5.3	Akustische Holographie	446
13.5.4	Dreidimensionale Schallfelder	447
13.6	Zusammenfassung	450
13.7	Literaturhinweise	451
13.8	Übungsaufgaben	451
A	Rechnen mit Pegeln	455
A.1	Dekadischer Logarithmus	455
A.2	Pegel-Umkehrgesetz	456
A.3	Gesetz der Pegeladdition	457
B	Komplexe Zeiger	461
B.1	Einführung in das Rechnen mit komplexen Zahlen	461
B.2	Verwendung komplexer Zeiger zur Beschreibung akustischer Vorgänge	463
C	Lösungen der Übungsaufgaben	467
C.1	Übungsaufgaben aus Kapitel 1	467
C.2	Übungsaufgaben aus Kapitel 2	471
C.3	Übungsaufgaben aus Kapitel 3	476
C.4	Übungsaufgaben aus Kapitel 4	488
C.5	Übungsaufgaben aus Kapitel 5	493
C.6	Übungsaufgaben aus Kapitel 6	496
C.7	Übungsaufgaben aus Kapitel 7	504
C.8	Übungsaufgaben aus Kapitel 8	508
C.9	Übungsaufgaben aus Kapitel 9	510
C.10	Übungsaufgaben aus Kapitel 10	512
C.11	Übungsaufgaben aus Kapitel 11	515
C.12	Übungsaufgaben aus Kapitel 12	517

XVIII Inhaltsverzeichnis

C.13 Übungsaufgaben aus Kapitel 13	521
Index	531