

Psychoakustische Schallfeldsynthese für Musik

Tim Ziemer

Psychoakustische Schallfeldsynthese für Musik

Raum schaffen für Komposition, Aufführung,
Akustik und Wahrnehmung



Springer

Tim Ziemer
Institut für Systemische Musikwissenschaft
Universität Hamburg
Hamburg, Deutschland

ISBN 978-3-031-26862-5 ISBN 978-3-031-26863-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-26863-2>

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

Springer

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Nature Switzerland AG 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Lektorat: Thomas Diztinger

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Nature Switzerland AG und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland

*Meiner verstorbenen Familie gewidmet:
Wolli, Mölli, die Alten und die Zwillinge.
Wann sehen wir uns wieder?*

Vorwort

Musik und Raum ist eines der heißesten Themen der aktuellen Forschung und Anwendungen. Wellenfeldsynthese, 3D-Audio in Spielen, der ATMOS-Kino-Audio-Standard, Konzertsaal-, Techno-Club- oder Home-Entertainment-Akustik – einen akustischen 3D-Raum zu gestalten ist heute eine der größten Faszinationen und Herausforderungen.

Dieses Buch beleuchtet das Thema Raum und Audio aus vielen Blickwinkeln. Moderne Methoden der Raumakustik, der Signalverarbeitung, der Konzertsaalgestaltung, der Auralisation oder der Visualisierung verbessern sich derzeit sehr schnell. Das Buch gibt einen umfassenden Überblick über all diese Aspekte, basierend auf mathematischen Gleichungen, die in anderen Lehrbüchern heute oft kaum noch zu finden sind, wie z. B. bei der Herleitung des Kirchhoff-Helmholtz-Integrals und seiner Verbindung zum Huygens-Prinzip. Solche Gleichungen sind zwar alltäglich, aber ihre Herleitung und Begründung lehrt über ihre Stärken und Grenzen. Indem er sich diesen Methoden von Grund auf neu nähert, ist Tim Ziemer in der Lage, ein tiefes Verständnis für die Gründe zu vermitteln, warum diese Methoden heute verwendet werden.

Das Buch berücksichtigt auch Neuromusikologie, Psychoakustik, Semantik und Philosophie und gibt faszinierende Einblicke in neuronale Interaktionen und Kodierungen, semantic Loads, synästhetische Beziehungen sowie historische und ethnische Unterschiede der Wahrnehmung und Behandlung von Musik und Raum. Tim Ziemer beschreibt, dass sich das menschliche Gehör aus dem Seitenlinienelement der Fische entwickelt hat, mit dem sie Wasserströmungen um sich herum wahrnehmen und deshalb Schwärme bilden können. Das Ohr „tastet“ also den Raum ab, um zu erkennen, wo wir uns befinden. Die Lokalisierung einer Schallquelle wiederum wird durch ein Zusammenspiel von linker und rechter Gehirnhälfte stark gefördert, eine weitere der vielen Aufgaben, die unser Gehör im Bereich der räumlichen Wahrnehmung erfüllen kann.

Aus der Geschichte sind viele Beispiele für die Nutzung des Raums in der Musik bekannt und diskutiert worden. Monteverdi platzierte verschiedene Musikinstrumentengruppen in verschiedenen Räumen und fügte so unterschiedlichen Nachhall hinzu, so wie ein modernes Mischpult Delays und Effekte für verschiedene

Instrumentengruppen hinzufügt. In der Steinzeit fand man in Höhlen bestimmte Orte, an denen verschiedene Vokale am besten klangen. Ovid erzählt uns von der Verwandlung einer Nymphe namens Echo (von griechisch *echon*, sich verhalten wie), die alles erwiderte, was man sagte. Sie verwandelte sich in einen Stein, und seither sprechen Steine zurück.

Solche Echos finden sich auch in Musikinstrumenten, die von Impulsen durchlaufen und an verschiedenen Stellen reflektiert werden. Gitarren, Geigen oder Klaviere sind also auch Echokammern, und wir hören sie mit einem eigenen Raum, einer wahrgenommenen Quellenausdehnung (Apparent Source Width, ASW). In der Tat assoziieren wir den Klang von Musikinstrumenten sehr oft mit räumlichen oder taktilen Attributen wie rauh, flach, tief, offen. Ein Heavy-Metal-Gitarrensound ist bekanntlich ein Brett, Geigen können hohl klingen, Klaviere ausgedehnt und groß, Flöten klein.

Beim Vergleich von Audioequipment ist die Räumlichkeit heute vielleicht das wichtigste Qualitätskriterium. Digital/Analog-Wandler (DAC) gelten als gut, wenn sie tief klingen, in der Lage sind, Musikinstrumente abzustufen und sie räumlich darzustellen. Andernfalls klingen sie vielleicht flach, klein und daher dumpf. Das Gleiche gilt für Lautsprecher und Kopfhörer. Bei der Verwendung eines 3D-Virtual-Reality-Headsets beim Gaming wollen wir den Klang so differenziert hören wie in unserer realen 3D-Umgebung.

Tim Ziemer stellt all diese Aspekte und noch viel mehr vor. Er arbeitet seit vielen Jahren auf diesem Gebiet und hat faszinierende Anwendungen für 3D-Audio entwickelt. Vielleicht am bemerkenswertesten ist seine Idee einer psychoakustischen Schallfeldsynthese. Es hat sich bereits gezeigt, dass die Anwendung von Wahrnehmungsregeln in der Audiosignalverarbeitung die Klangqualität enorm verbessern kann. Am bekanntesten dürfte MP3 sein, wo psychoakustische Regeln zu einem Audiokompressionsalgorithmus genutzt wurden. Auch die psychoakustische Schallfeldsynthese macht sich solche Vorteile zunutze. Sie nutzt den Präzedenz-Effekt des Hörens, einen sehr bekannten und leistungsfähigen Effekt, um die Gestaltung eines solchen Schallfelds zu verbessern.

Diese Entwicklung war nur möglich, weil Tim Ziemer ein tiefes Verständnis für alle Aspekte von Audio und Raum hat, sei es akustisch, psychologisch, semantisch, philosophisch oder historisch. Sein Buch ist daher auch eine Fundgrube für alle, die sich für die Entwicklung neuer Algorithmen zur Verbesserung von Raumklang inspirieren lassen wollen. Wer das Ganze kennenlernen möchte, findet hier eine hervorragende Einführung mit vielen Referenzen und Quellen.

Das Buch ist ein wunderbares Beispiel für die Systematische Musikwissenschaft als interdisziplinäres Forschungsgebiet, das musikalische Akustik und Signalverarbeitung, Musikpsychologie und Neurokognition sowie Musikethnologie und verwandte Disziplinen vereint. Um Musik zu verstehen, muss man all diese Aspekte berücksichtigen und sich ein Gesamtbild machen. Erst dann werden solche Erfindungen möglich, wie sie Tim Ziemer in diesem wunderbaren und inspirierenden Buch vorstellt.

Daher bietet das Buch einen umfassenden Überblick über die Forschung im Bereich Raumklang und Musik. Ich habe es sehr gerne gelesen und hoffe, dass es viele inspiriert, die in diesem Bereich arbeiten oder sich für das sehr alte und immer wieder neue Forschungsthema Musik und Raum interessieren.

Hamburg, Deutschland
März 2019

Rolf Bader

Vorwort

Meine Arbeit an räumlichem Audio für die Musikpräsentation begann, als ich 2008 Magisterstudent an der Universität Hamburg war. Mein Professor, Rolf Bader, sagte etwas wie: „Wir haben fünfzehn Lautsprecherboxen. Wählen Sie das gewünschte Schallfeld und lösen Sie ein lineares Gleichungssystem, um entsprechende Lautsprecher-signale zu erzeugen.“ Was so einfach klingt, hat mir wirklich zu schaffen gemacht: *Was ist das Schallfeld, das ich will? Welchen Klangeindruck wünsche ich mir? Welches Hörerlebnis möchte ich bieten? Was muss getan werden, ist aber noch nicht erreicht worden? Und wie kann ich das erreichen?* Die Aufgabe setzte eine Kettenreaktion in Gang. Die Suche nach dem idealen Musikhör-Erlebnis beschäftigt Philosophen, Forscher, Künstler und Ingenieure seit Jahrhunderten. Das Thema wurde aus der Sicht der Ästhetik, des Musikinstrumentenbaus und der Synthesizer-Entwicklung, der Komposition und Aufführungspraxis, der Raumakustik, der Audio-technik, der Psychophysik, der Musikethnologie, der Musikpsychologie und -soziologie, der Musiktheorie und vieler anderer Bereiche angegangen. Interessanterweise sind viele musikalische Konzepte, Ideale und offene Fragen mit der Räumlichkeit in der Musik verbunden.

Viele Musiker sind enttäuscht, dass selbst die besten E-Pianos es nicht schaffen, so groß zu klingen wie ein Konzertflügel. Tonhöhe, Lautstärke und Dynamik, zeitliche und spektrale Feinstruktur und sogar die Haptik von E-Pianos können dem Original sehr nahe kommen und realistisch wirken. Manche E-Pianos erzeugen sogar eine tieffrequente Vibration der Klavierbank. Das soll die Spielbedingungen realistischer machen, indem es Informationen für den Tastsinn hinzufügt. Manche Keyboards werben mit mystischen Konzertflügel-Tasten oder *erweiterten* Stereo-breiten-Funktionen, deren aufwändige Signalverarbeitung ein Firmengeheimnis bleibt. Allerdings können auch ungeübte Hörer sofort erkennen, ob sie einen echten Flügel oder eine Lautsprecherwiedergabe von einem E-Piano oder einem Raumklangsystem hören. Da die zeitliche und spektrale Dynamik nahezu perfekt rekonstruiert wird, bleibt nur noch die räumliche Dynamik übrig. Natürlich hat die Raumakustik einen großen Einfluss auf die wahrgenommene Räumlichkeit des Klangs. Aber als Musikwissenschaftsstudent, der viel Zeit in einem Freifeldraum verbracht hat, wusste ich, dass ein Konzertflügel auch ohne nennenswerte Raumreflexionen

immer groß klingt. Der große schwingende Resonanzboden erzeugt ein kompliziertes Schallfeld. Hier sorgen interaurale Pegel- und Phasenunterschiede dafür, dass es breit klingt. Außerdem verändern sich der Klangeindruck und die interauralen Unterschiede leicht, wenn man den Kopf bewegt. Kopfbewegungen sind typisch für das Hören von Musik oder das Spielen von Musikinstrumenten. So habe ich meine Aufgabe gefunden: Die Klangabstrahlungseigenschaften von Musikinstrumenten zu erfassen und zu rekonstruieren, um ein räumliches und natürliches Hörerlebnis für Hörer zu schaffen, die sich beim Hören bewegen können. Leider lieferte der Stand der Technik bei Mikrofon-Array-Messungen und Lautsprecher-Array-Technik nur mäßig befriedigende Ergebnisse für unsere Konstellation von vergleichsweise vielen Mikrofonen (128) und wenigen Lautsprechern (15, die einen Hörbereich in einem akustisch unbehandelten Raum von drei Seiten umgeben). Also passte ich die konventionelle Technik an meine Bedürfnisse an, wobei ich mit den typischen Problemen der Sparsity, der Unterabtastung und der inversen Probleme konfrontiert wurde. Da ich jedoch Musikwissenschaftler bin, habe ich Lösungen gefunden, die den Ursprung des Gehörs, die psychologische Organisation des Klangs, Vorstellungen von Musikproduktion, Komposition und Aufführungspraxis sowie die musikalische Akustik im Hinblick auf Instrumentenakustik, Raumakustik und insbesondere Psychoakustik berücksichtigen. Das Ergebnis könnte man als *psychoakustisches Schallfeldsynthesesystem für die Musikpräsentation* bezeichnen. Es zielt nicht auf eine perfekte physikalische Kopie eines gewünschten Schallfeldes ab. Stattdessen liefert es die Hinweise, die das Gehör benötigt, um die Quelle zu lokalisieren und ihre räumliche Ausdehnung sowie ihr natürliches Timbre zu erfahren, die an verschiedenen Hörpositionen sehr unterschiedlich sein können. Die Hinweise werden mit der erforderlichen Präzision geliefert, wobei die zeitliche, spektrale und räumliche Genauigkeit des Gehörs berücksichtigt wird.

Allgemeine Bemerkungen und ein Überblick über die Struktur und den Inhalt dieses Buches werden in Kap. 1 gegeben. Einige Konzepte der Räumlichkeit in der Musik werden in Kap. 2 besprochen, wobei die Räumlichkeit in der Musikpsychologie, der Komposition und der modernen Musikproduktion, der Musiktheorie und dem Music Information Retrieval betrachtet wird. Die primäre Funktion des Gehörs ist das räumliche Hören und die mentale Repräsentation der Außenwelt. Eine Abhandlung über die Biologie des Gehörs findet sich in Kap. 3. Die Beziehung zwischen der physischen Außenwelt und ihrer mentalen Repräsentation wird in Kap. 4 erörtert. Die Schallabstrahlungseigenschaften von Musikinstrumenten und Mikrofonarraymethoden zu ihrer Aufnahme werden in Kap. 5 zusammengestellt. Der abgestrahlte Schall von Musikinstrumenten breitet sich durch den Hörraum aus und erreicht die Ohren der Zuhörer direkt oder nach Einzel- oder Mehrfachreflexionen. Der Einfluss der Raumakustik auf das räumliche Hörerlebnis wird in Kap. 6 behandelt. Konventionelle stereophone Audiosysteme werden vor dem Hintergrund der Darstellung von Raumklang in Kap. 7 besprochen. Die Wellenfeldsynthese stellt eine Alternative zu stereophonen Audiosystemen dar. Sie überwindet bestimmte Einschränkungen, bringt aber auch neue Herausforderungen für die räumliche Musikpräsentation mit sich. Der Ansatz wird in Kap. 8 hergeleitet und diskutiert. Schließlich wird in Kap. 9 die psychoakustische Schallfeldsynthese als neues Paradigma in der Entwicklung räumlicher Audiotechnik vorgestellt.

Der vorgestellte Ansatz der psychoakustischen Schallfeldsynthese für Musik ist ein exemplarischer Fall, der den Vorteil psychoakustischer Überlegungen bei der Entwicklung neuer räumlicher Audiotechnologien verdeutlicht. Mit der psychoakustischen Schallfeldsynthese ist es möglich, einen gewünschten Klangeindruck mit Hilfe eines hybriden Ansatzes zu erzeugen, der physikalische und wahrnehmungsbezogene Aspekte des Schallfeldes einbezieht. Psychoakustische Kontrolle ist ein neues Paradigma, das für viele weitere Audiotechnologien genutzt werden kann. Der Ansatz ist nicht auf Musik beschränkt, sondern kann auch Anwendungen mit Sprache, Sonifikation und vielem mehr umfassen. Der Ansatz legt den Grundstein für eine neue Generation psychoakustischer Audiotechnologie und für ein Überdenken etablierter Audiosysteme.

Hamburg, Deutschland
Mai 2017

Tim Ziemer

Danksagung

Mein Dank gilt Rolf Bader und Albrecht Schneider, die mir alle Grundlagen beigebracht haben und mir dann genügend Freiraum gaben, meinen eigenen Gedanken zu folgen und eigene Wege zu finden. Ihr Mut, neue Felder zu betreten und unkonventionelle Lösungen zu finden, hat mich inspiriert, das gesamte Spektrum der systematischen Musikwissenschaft zu betrachten und Ansätze und Lösungen aus den Bereichen Biologie, Musiktheorie, Instrumentenakustik, Raumakustik und Psychoakustik, Kognitionswissenschaft und Musikpsychologie, Elektrotechnik und Informatik zu finden. Ich bin dankbar, dass sie mir immer wieder Ratschläge geben und mich unterstützen, wo immer sie können.

Ich danke dem interdisziplinären Gutachterausschuss meiner Dissertation. Neben Rolf Bader und Albrecht Schneider gaben auch Wolfgang Fohl, Georg Hajdu, Christiane Neuhaus und Clemens Wöllner kritisches Feedback aus verschiedenen Blickwinkeln und wertvolle Anregungen für die weitere Forschung im Bereich räumliches Audio für Musik, die in diesem Buch ihren Höhepunkt findet.

Eine Reihe von Stiftungen und Gesellschaften hat mich bei der Präsentation meiner Forschungsergebnisse und der Arbeit an diesem Buch finanziell unterstützt. Ich danke der Claussen-Simon-Stiftung, die mich bei der Fertigstellung dieses Buches sehr unterstützt hat, und dem Deutschen Akademischen Austauschdienst, der viele meiner Konferenzreisen finanziert hat.

Mein Team an der Universität Hamburg hat mir immer den Rücken gestärkt, insbesondere Niko Plath, Florian Pfeifle, Michael Blaß, Christian Köhn, Orie Takada, Claudia Stirnat, Jost Fischer, Rolf Bader, Albrecht Schneider, Christiane Neuhaus, Marc Pendzich, Clemens Wöllner, Konstantina Orlandatou, Lenz Hartmann, Jesper Hohagen und Henning Albrecht. Es war für mich inspirierend zu sehen, wie viele Disziplinen auf dem Gebiet der systematischen Musikwissenschaft vereint sind. Sie haben mir Einblicke in Ihre Arbeit gegeben, die Ansätze aus den Bereichen Biologie, Mathematik, digitale Signalverarbeitung, Physik, Ethnologie, Informatik, Kognitionswissenschaft, Psychologie, Soziologie, Kunst, Kultur, Wirtschaft, Politik und Geisteswissenschaften nutzt. Sie haben mir die Macht der Interdisziplinarität vor Augen geführt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Allgemeine Bemerkungen	1
1.2	Schnittpunkt von Raum und Musik	3
	Literatur	6
2	Räumliche Konzepte der Musik	11
2.1	Der Raum in der Musikpsychologie	11
2.2	Raum in Komposition und Aufführungspraxis	17
2.3	Raum in der Musikproduktion	21
2.3.1	Raum in Aufnahmetechniken	22
2.3.2	Raum in Techniken des Musikabmischens	27
2.4	Raum in der Musiktheorie	32
2.5	Raum in computergestützter Musikanalyse	35
	Literatur	44
3	Biologie des Gehörs	51
3.1	Funktionelle Entwicklung des Gehörs	51
3.1.1	Das Seitenlinienorgan	52
3.1.2	Gehör der Fische	55
3.2	Das menschliche Gehör	56
3.2.1	Das menschliche Ohr	56
3.2.2	Die Hörbahn des Menschen	60
	Literatur	69
4	Psychoakustik	73
4.1	Schwellenwerte und eben wahrnehmbare Unterschiede	74
4.2	Kritische Bandbreiten	79
4.3	Maskierung	82
4.3.1	Monaurale Maskierung	83
4.3.2	Binaurale Maskierung	88

4.4	Räumliches Gehör	89
4.4.1	Forschungsbedingungen und Definition von Begriffen	90
4.4.2	Horizontale Ebene	92
4.4.3	Medianebene	97
4.4.4	Entfernungshören	99
4.4.5	Lokalisierung von verschiedenen Schallquellen	100
4.5	Auditive Szenenanalyse	102
4.5.1	Eigenschaften von Strömen und ihren Elementen	103
4.5.2	Prinzipien der primitiven Gruppierung	106
4.5.3	Schemabasierte Gruppierungsprinzipien	112
4.5.4	Organisation auf der Grundlage der Prinzipien der auditiven Szenenanalyse	112
4.5.5	Auditive Szenenanalyse in der Komposition	117
4.6	Nutzbarkeit von psychoakustischem Wissen für Audiosysteme	117
	Literatur	119
5	Räumlicher Klang von Musikinstrumenten	123
5.1	Wellengleichung und Lösungen	123
5.1.1	Homogene Wellengleichung	123
5.1.2	Schallfeld	124
5.1.3	Homogene Helmholtz-Gleichung	125
5.1.4	Ebene Wellen	126
5.1.5	Inhomogene Wellengleichung	128
5.1.6	Punktquellen	129
5.2	Der räumliche Klang von Musikinstrumenten	132
5.3	Messung der Abstrahlcharakteristik von Musikinstrumenten	136
5.3.1	Fernfeld-Aufnahmen	137
5.3.2	Beamforming	143
5.3.3	Nahfeld-Aufnahmen	145
5.4	Visualisierung der Abstrahlcharakteristik von Musikinstrumenten	150
	Literatur	157
6	Räumliche Akustik	163
6.1	Geometrische und architektonische Raumakustik	164
6.1.1	Ray Tracing	166
6.2	Subjektive Raumakustik	170
6.2.1	Objektive Daten	171
6.2.2	Subjektive Eindrücke	180
	Literatur	187
7	Konventionelle Stereophonie	191
7.1	Technische Anforderungen	191
7.2	Audio-Systeme	192
7.2.1	Mono	193
7.2.2	Stereo	195
7.2.3	Quadrophonie	203

7.2.4	Dolby Surround	206
7.2.5	Diskreter Surround Sound	209
7.2.6	Immersive Audio-Systeme	212
7.2.7	Kopfbezogener stereophoner Klang	218
7.3	Diskussion über Audiosysteme	220
	Literatur	221
8	Wellenfeldsynthese	225
8.1	Schallfeldsynthese-Geschichte	226
8.2	Theoretische Grundlagen der Schallfeldsynthese	231
8.2.1	Huygens'sches Prinzip	231
8.2.2	Kirchhoff-Helmholtz-Integral	233
8.3	Wellenfeldsynthese	236
8.3.1	Einschränkungen für die Implementierung	237
8.3.2	Rayleigh-Integrale	237
8.3.3	Räumliche Begrenzung	248
8.3.4	Abhörraum	248
8.4	Schallfeldsynthese und Abstrahlcharakteristik	250
8.5	Vorhandene Schallfeldsyntheseinstallationen	254
	Literatur	263
9	Psychoakustische Schallfeldsynthese	269
9.1	Psychoakustische Argumentation	270
9.1.1	Integrationszeiten	270
9.1.2	Frequenzauflösung	272
9.2	Physikalische Grundlagen	273
9.2.1	Abstrahlung des Lautsprechers	273
9.2.2	Abstrahlcharakteristik von Musikinstrumenten	275
9.2.3	Extrapolation des Schallfeldes	277
9.2.4	Schallfeld-Rekonstruktion	277
9.3	Implementierung der Psychoakustik	285
9.3.1	Implementierung der kritischen Bandbreiten	286
9.3.2	Implementierung der interauralen Kohärenz	290
9.3.3	Anwendung des Präzedenzeffekts	292
9.3.4	Implementierung von Integrationszeiten	297
9.3.5	Implementierung der Maskierung	298
9.3.6	Implementierung der Timbrewahrnehmung	299
9.3.7	Implementierung der Auditory Scene Analysis	300
9.4	Zusammenfassung	301
9.5	Die Zukunft der psychoakustischen Schallfeldsynthese	302
	Literatur	305

Symbole und Abkürzungen

Symbole

α	Winkel zwischen der Normalrichtung der Wellenfront und der Sekundärquelle
β	Absorptionskoeffizient
$\gamma(t - \tau)$	Zeitfenster
$\Gamma(\omega, \varphi)$	Lösung für den Azimutwinkel der Helmholtz-Gleichung
$\Gamma_Q(\omega, \varphi)$	Horizontale Strahlungscharakteristik der Quelle
$\Gamma_Y(\omega, \varphi)$	Horizontale Strahlungscharakteristik der Sekundärquelle
δ	Dirac-Delta
κ	Matrix-Konditionszahl
ϕ	Phase
φ	Azimutwinkel
φ_0	Blickrichtung in der horizontalen Ebene
φ_Q	Azimutwinkel der Quelle im kopfbezogenen Koordinatensystem
λ	Wellenlänge
Π	Funktion des Radius
ϑ	Polarwinkel
Θ	Lösung für den Polarwinkel der Helmholtz-Gleichung
ρ	Dichte
σ	Standardabweichung
ω	Kreisfrequenz ($\omega = 2\pi f$)
Ω	Breite der Strahlungskeulen des Beamformers oder des Schallstrahlers
$\Psi(\omega, \varphi, \vartheta)$	Sphärische Harmonische (Lösung für Azimut- und Polarwinkel der Helmholtz-Gleichung)
a	Kodierungsfaktor
\hat{A}	Amplitude
$\hat{\mathbf{A}}$	Amplituden- oder Verstärkungsvektor
$A(\omega)$	Komplexe Amplitude

b	Dekodierungsfaktor
B	Surround-/Rear-Kanal („Back“)
BQI	Binauraler Qualitätsindex ($=1 - IACC$)
BR	Bass-Verhältnis (Bass Ratio)
c	Schallgeschwindigkeit
C	Center-Kanal
C_{80}	Clarity Factor (Verhältnis von frühen zu späten Reflexionen)
const	Konstante
$d(\mathbf{Y})$	Fensterfunktion
D	Manipulationsfaktor, der die Amplitude der Quelle in die Amplitude des Aufnehmers umwandelt
dB	Schalldruckpegel in Dezibel
dB _{SL}	Dezibel-Spektrum-Pegel
dB _{SPL}	Dezibel Schalldruckpegel
dir	Direkter Ton
e	Eulersche Zahl ($\approx 2.718281828\dots$)
EDT	Frühe Abklingzeit (Early Decay Time)
EEL	Early-Ensemble-Level
eig	Eigenwert
f	Frequenz
\mathbf{f}	Stetig differenzierbare Vektorfunktion
F	Vorderer Kanal („Front“)
FF	Fernfeld
g	Spezielle Lösung der Green'schen Funktion im Zeitbereich (Impulsantwort)
\tilde{g}	Allgemeine Lösung der Green'schen Funktion im Zeitbereich
G	Spezielle Lösung der Green'schen Funktion im Frequenzbereich (komplexe Übertragungsfunktion)
\tilde{G}	Allgemeine Lösung der Green'schen Funktion im Frequenzbereich
G_X	Klangstärke
h	Index („Höhe“)
H	Hallmaß
$H_n^{(2)}(\omega, r)$	Sphärische Hankel-Funktion zweiter Art und n-ter Ordnung
ι	Imaginäre Einheit $\sqrt{-1}$
$I_n(r)$	Sphärische Besselfunktion zweiter Art und n-ter Ordnung
IACC	Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient
IACF	Interaurale Kreuzkorrelationsfunktion
ITD	Interauraler Zeitunterschied
ITDG	Initial Time Delay Gap
$J_n(r)$	Sphärische Besselfunktion erster Art und n-ter Ordnung
k	Wellenzahl $\left(k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \right)$
K	Ausbreitungsmatrix
$K(\omega, \varphi)$	Ausbreitungsfunktion

l	Index („Länge“)
L	Linker Kanal („Links“)
\mathbf{L}	Position des linken Lautsprechers
$L\ 1$	Trennlinie zwischen Quellenbereich und quellenfreiem Bereich
LFC	Lateral Fraction Coefficient
\lg	Dekadischer Logarithmus
LG	Lateral Strength
max	Maximum
min	Minimum
$\mathbf{M}_m(\mathbf{Q}, \varphi)$	Position der Mikrofone
NF	Nahfeld
$p(t)$	Schalldruck im Zeitbereich (Schallsignal)
$P(\omega)$	Schalldruck im Frequenzbereich (Spektrum)
$P(t, \omega)$	Schalldruck im Zeit-/Frequenzbereich
$P_n^m(\cos \vartheta)$	Assoziierte Legendre-Funktionen
pre	Vorhersage (Pprediction)
Q	Primärquelle
\mathbf{Q}	Position der Primärquelle
Q'	Spiegelquelle
\mathbf{Q}'	Position der Spiegelquelle
\mathbf{Q}_p	Position der Phantomschallquelle
r	Radius
\mathbf{r}	Ortsvektor in Polar-/Kugelkoordinaten
\mathbf{r}'	Spiegelposition in polaren/Kugel-Koordinaten
R	Rechter Kanal („Rechts“)
\mathbf{R}	Position des rechten Lautsprechers
bzw.	Resonanz
RR	Reverberation Ratio
RT	Reverberation Time (Abklingzeit)
s	Lautsprecherbasis
S	Oberfläche des quellenfreien Volumens
\tilde{S}	Äquivalente Absorptionsfläche
$S\ 1$	Trennebene zwischen Quellvolumen und quellenfreiem Volumen (siehe Abb. 8.8b)
$S\ 2$	Halbkugelförmige Trennfläche zwischen einem Quellvolumen und einem quellenfreien Volumen (siehe Abb. 8.8b)
SL	Spektrum Level
SDI	Spatial Diffusion Index
SPL	Schalldruckpegel
st	Statisch
ST	Support
ST_{early}	Early Support
ST_{late}	Late Support
T	Übertragungskanal („Übertragung“/„Total“/„Track“)
T_{fade}	Überblenddauer des Präzedenzfades

t_e	Echoschwelle
t_s	Center Time
TR	Treble Ratio
U	Quellvolumen (siehe Abb. 8.8)
v	Schallschnelle im Zeitbereich
V	Quellenfreies Volumen (siehe Abb. 8.8)
w	Index (Breite (width))
\mathbf{x}	Ortsvektor in kartesischen Koordinaten
\mathbf{X}	Abhörposition
X	Platzhalter für einen Frequenz- oder Amplitudenabfall
\mathbf{y}	Lautsprechermatrix mit allen Lautsprecherstandorten
\mathbf{Y}	Position der Sekundärquelle
\mathbf{Y}'	Gespiegelte Position der Sekundärquelle
Y_n	Sphärische Besselfunktion zweiter Art und n-ter Ordnung (sphärische Neumann-Funktion)
z	Kritische Bandbreite der Bark-Skala
∇	Nabla-Operator
∇^2	Laplace-Operator

Abkürzungen

AAC	Advanced Audio Codec (psychoakustischer Kompressionsalgorithmus)
AC-3	Adaptiver Transformationskodierer Nr. 3 (psychoakustischer Kompressionsalgorithmus)
ADT	Künstliches Double Tracking
ar.	Arithmetisch
ASC	Schwerpubkt des Spektrums („Audio Spectrum Centroid“)
ASW	Scheinbare Quellbreite
ATRAC	Adaptive Transform Acoustic Coding (Algorithmus zur Audiokompression)
ATSC	Advanced Television System Committee
BEM	Boundary-Elemente-Methode
BWV	Bach-Werke-Verzeichnis
c#	Programmiersprache C-Sharp
CD	Compact Disc (digitaler Datenträger)
CD-ROM	Compact Disc-Read-Only-Speicher (digitaler Datenträger)
CRC	Cyclic Redundancy Check (ein Fehlererkennungssystem)
CTC	Übersprechungsunterdrückung („Crosstalk cancellation“)
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
DIN	Deutsches Institut für Formung
DOA	Ankunftsrichtung („Direction Of Arrival“)
DSP	Digitale Signalverarbeitung

DVB	Digitale Videoübertragung
DVD	Digital Versatile Disc (digitaler Datenträger)
ER	Frühe Reflexionen („Early Reflections“)
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	Schnelle Fourier-Transformation
GPU	Grafikprozessor-Einheit
GUI	Grafische Benutzeroberfläche
h/w/d	Höhe/Breite/Tiefe („height“/„width“/„depth“)
HDMI	Hochauflösende Multimedia-Schnittstelle
Hi-Fi	High Fidelity (Qualitätsanforderungen an Audiowiedergabesysteme)
HOA	Ambisonics höherer Ordnung
HRTF	Kopfbezogene Übertragungsfunktion
ICLD	Pegeldifferenz zwischen den Kanälen
ICTD	Zeitverschiebung zwischen den Kanälen
ILD	Interauraler Pegelunterschied
ISO	Internationale Organisation für Normung
ITD	Interaurale Zeitverschiebung
JND	Eben wahrnehmbarer Unterschied („Just Noticeable Difference“)
K-H-Integral	Kirchhoff-Helmholtz-Integral
LA	Hörbereich („Listening Area“)
LD	Laser-Disc
LEV	Listener Envelopment
LFC	Lateral Fraction Coefficient
LFE	„Low Frequency Effects“ (Subwoofer)
LR	Späte Reflexionen („Late Reflections“)
LSR	Regression der kleinsten Quadrate („Least Square Regression“)
MADI	Digitale Mehrkanal-Audioschnittstelle
MDAP	Multiple Direction Amplitude Panning
MEM	Minimum-Energie-Methode
MIR	„Music Information Retrieval“ (Computergestützte Musikanalyse)
MLP	Meridian Lossless Packing (verlustfreies Audiocodierungsformat)
MP3	MPEG II Audio Layer 3 (psychoakustischer Audiokompressionsalgorithmus)
NAH	Akustische Nahfeld-Holografie
NFC-HOA	Nahfeld-kompensierte Ambisonics höherer Ordnung
NWDR	NordWestDeutscher Rundfunk (deutsche öffentlich-rechtliche Rundfunkanstalt)
ORTF	Office de Radiodiffusion Télévision Française
PA	Beschallungslautsprecher („Public Address“)
PC	Personal Computer
PCM	Puls-Code-Modulation
RC	Abstrahlcharakteristik („Radiation Characteristics“)

RMS	Root-Mean-Square (Vergleichswert für die Leistung von Verstärkern)
SACD	Super Audio Compact Disc
SDDS	Sony Dynamic Digital Sound
SPL	Schalldruckpegel
TV	Fernsehen (Television)
VBAP	Vektor Base Amplitude Panning
VCA	Spannungsgesteuerter Verstärker
VOG	Voice Of God-Lautsprecher
WFS	Wellenfeldsynthese

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Drei Dimensionen in der Musik, nach Wellek. (Nach Schneider (1989), S. 115)	13
Abb. 2.2	Poème Électronique des Architekten Le Corbusier und der Komponisten Varèse und Xenakis. (Foto von Hagens (2018), bereitgestellt unter Creative Commons Lizenz)	19
Abb. 2.3	Aufbau für „Réponse“ von Boulez. Ein Ensemble steht in der Mitte, umgeben von Publikum, Soloinstrumenten und Lautsprechern. Die Lautsprecher verwenden Amplitudenpanning, um manipulierte Solopassagen durch den Raum „wandern“ zu lassen (durch die Pfeile angedeutet). (Nach Boulez und Gerzso (1988), S. 178 f., der eine Übersetzung von Boulez und Gerzso (1988) ist)	20
Abb. 2.4	„Hörbild“; ein Lautsprecherensemble, das Sabine Schäfer 1995 als musizierende Klangskulptur schuf. Sie nutzte die Installation weiterhin als Musikinstrument für ihre Kompositionen. (Foto von Felix Groß mit freundlicher Genehmigung von Sabine Schäfer)	20
Abb. 2.5	Stereo-Aufnahmetechniken, die verschiedene Teile des abgestrahlten Trommelklangs einfangen. (Nach Ziemer (2017), S. 309)	24
Abb. 2.6	Pseudostereo durch High-Passing des linken (oben) und Low-Passing des rechten Kanals (unten)	28
Abb. 2.7	Pseudostereo durch Anwendung komplementärer Kammfilter auf den linken und rechten Kanal. (Aus Ziemer (2017), S. 312)	29
Abb. 2.8	Pseudostereo durch Phasenrandomisierung. Die Originalaufnahme wird auf den linken Kanal geleitet (oben). Die Phasen aller Frequenzkomponenten der Originalaufzeichnung werden randomisiert und auf den rechten Kanal geleitet (unten). Die Amplitudenspektren (rechts) bleiben identisch, aber die	

	Zeitreihen (links) haben sich verändert, z. B. ist der steile Anstieg bei 0,3 s verloren gegangen	30
Abb. 2.9	Drei Dimensionen in Musikmischungen und die Audioparameter, die sie steuern. (Nach Edstrom (2011), S. 186)	32
Abb. 2.10	Zweidimensionale Modelle der tonalen Hierarchie. Links: Eulers „Tonnetz“ (1739); eine primitive Darstellung der tonalen Hierarchie, die den Grad der tonalen Beziehung durch die Nähe darstellt. Rechts: Ein fortschrittlicheres Modell von Weber (1821–24), das auch parallele Tonarten berücksichtigt. (Nach Lerdahl (2001), S. 43 und 44)	33
Abb. 2.11	Kreisförmige Modelle der tonalen Hierarchie. Links: „Regionaler Kreis“ von Heinichen (1728), rechts: „Doppelter Quintenzirkel“ von Kellner (1737), mit Anpassung der Abstände zwischen parallelen Tonarten. (Nach Lerdahl (2001), S. 43)	33
Abb. 2.12	Links: Shepards „melodic map“ (1982), die Drobischs Helix-Darstellung (1855) zu einer Doppelhelix erweitert, um Halbtonbeziehungen zu berücksichtigen. Rechts: Modell der kognitiven Nähe von Krumhansl (1983), S. 40. (Nach Lerdahl (2001), S. 44 und 46, Shepard (1982), S. 362 und Krumhansl et al. (1982))	34
Abb. 2.13	Links: Der hyperhexatonische Raum von Richard Cohn, Mitte: Brian Hayers Tabelle der tonalen Beziehungen oder Tonnetz, rechts: Eine Region innerhalb eines dreidimensionalen Tonnetzes mit verschiedenen Intervallen (4, 7 und 10 Halbtöne) pro Schritt entlang jeder Achse. (Aus Cohn (1998), S. 172 und 175, und aus Gollin (1998), S. 198, mit freundlicher Genehmigung von Richard Cohn und von Edward Gollin).	35
Abb. 2.14	Typische zweidimensionale Darstellung einer PCM-Datei. Die horizontale Dimension stellt die Zeit dar, die vertikale Dimension den relativen Schalldruck	36
Abb. 2.15	Phasenraumdiagramme eines ungedämpften Sinustons (links), eines gedämpften komplexen Tons (Mitte) und der ersten 20 ms eines atubularen Glockentons (rechts)	37
Abb. 2.16	Spektrogramm eines Ausschnitts aus einem Tanzmusikstück. Die Abszisse ist die Zeitdimension, die Ordinate ist eine logarithmische Frequenzskala und die Druckamplitude ist durch die Helligkeit von –96 dB (schwarz) bis 0 dB (weiß) relativ zur höchstmöglichen Amplitude von 2^{16} in einer PCM-Datei mit einer Abtasttiefe von 16 Bit kodiert. Das sich wiederholende Muster stammt vom 4-on-the-floor-beat und der Resonanzfilter im Hochfrequenzbereich sieht aus wie eine Sternschnuppe	38
Abb. 2.17	Faktorisierung einer nichtnegativen Matrix eines künstlichen Signals, das zwei Frequenzen trennt. (Nach Wang und Plum-bley (2005), S. 2)	40

Abb. 2.18	Akkordhistogramme eines Musikstücks in C-Dur.	40
Abb. 2.19	Psychologischer Stimmungsraum, ein Modell zur Anordnung von Emotionen im zweidimensionalen Raum	41
Abb. 2.20	Darstellung der Ähnlichkeit von Musikstücken in einem dreidimensionalen semantischen Raum mit den Dimensionen fröhlich-traurig, akustisch-synthetisch, ruhig-aggressiv inte- griert in den Musikplayer und -empfeher mufin. (Aus Magix AG (2012), mit der Genehmigung der Magix Software GmbH).	42
Abb. 3.1	Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Haarzellen auf dem Neuromast eines Zebrafisches. Die gestrichelte weiße Linie trennt zwei Regionen mit unterschiedlichen Ausrichtungen der Haarzellen. Die schwarzen Pfeile zeigen die Achse der maximalen Reaktion an. (Aus Popper und Platt (1993), S. 102)	52
Abb. 3.2	Zeichnung des Kopfes eines Fisches mit entfernter Haut. Die Kanäle, die die Neuromasten enthalten, sind entlang der Seitenlinien verteilt, die natürlich von der Haut bedeckt sind. (Entnommen aus Dijkgraaf (1989), S. 8).	53
Abb. 3.3	Frequenzgang von Sinneshaarzellen im Seitenlinienorgan (links) und im Gehör (rechts) von Fischen. (Abbildung entnommen aus Kalmijn (1989), S. 199)	54
Abb. 3.4	Schematische Darstellung des menschlichen Ohrs. (Aus Zwicker und Fastl (1999), S. 24).	57
Abb. 3.5	Schematische Darstellung einer abgerollten Cochlea. Scala vestibuli und Tympanie verbinden das ovale und das runde Fenster und sind mit Perilymphe gefüllt. Die Scala media trennt diese beiden und ist mit Endolymphe gefüllt	58
Abb. 3.6	Einhüllende einer hochfrequenten (schwarz) und einer niederfrequenten (grau) Wanderwelle in der Cochlea. Die Hüllkurven sind linksschief, d. h. die hochfrequente Basisregion wird stärker angeregt als die niederfrequente Apexregion.	59
Abb. 3.7	Vereinfachtes Schema der Hörbahn mit den 6 Stationen und einigen aufsteigenden (links) und absteigenden (rechts) Verbindungen. (Nach Ryugo (2011), S. 4)	61
Abb. 3.8	Beispielhafte Frequenz-Schwellenwertkurve für eine Hörnervenfaser. Bei der Best-Frequenz reicht ein niedriger Schalldruckpegel am Trommelfell aus, um das neuronale Feuern zu aktivieren.	62
Abb. 3.9	Kodierungsschema von Frequenz ($1/\tau$), Amplitude (\hat{A}) und Phase (ϕ) im Hörnerv	63
Abb. 4.1	Hörschwelle und Schmerzgrenze. (Nach Zwicker und Fastl (1999), S. 17)	75

Abb. 4.2	Eben wahrnehmbarer Unterschied (Just Noticeable Difference, JND) des Schalldruckpegels für drei verschiedene Frequenzen. (Nach Backus (1969), S. 86)	76
Abb. 4.3	Eben wahrnehmbarer Unterschiede (Just Noticeable Difference, JND) des Schalldruckpegels für verschiedene Pegel von weißem Rauschen (White Noise, WN) und einem 1-kHz-Ton. (Aus Zwicker und Fastl (1999), S. 176).	76
Abb. 4.4	Eben wahrnehmbarer Unterschied (Just Noticeable Difference, JND) im Schalldruckpegel aufeinanderfolgender Tonbursts über die Signaldauer relativ zu einer Dauer von 200 ms eines 1-kHz-Tons für verschiedene Modulationsfrequenzen und verschiedene Schalldruckpegel. (Aus Zwicker und Fastl (1999), S. 181)	76
Abb. 4.5	Deutliche Unterschiede in der zeitlichen Abfolge von tiefen (33 und 49,5 Hz), mittleren (1056 und 1584 Hz) und hohen (5280 und 7920 Hz) Tönen mit dreieckiger Wellenform. (Aus Ziemer et al. (2007), S. 23)	77
Abb. 4.6	Schematische Darstellung einer ausgerollten Cochlea (gestrichelte Kontur) mit der Einhüllenden einer Wanderwelle, die durch eine Frequenz von 1 kHz (hellgrau) ausgelöst wird. An ihrem Scheitelpunkt wird das neuronale Feuern durch einen cochleären Mechanismus verstärkt (dunkelgraue Kurve). Die Abszisse veranschaulicht die lineare Ausrichtung der Frequenzen in Bark im Gegensatz zur logarithmischen Verteilung in Hertz	80
Abb. 4.7	Diagramm der kritischen Bandbreite über die Frequenz. (Nach Zwicker und Fastl (1999), S. 158).	82
Abb. 4.8	Muster für einen 500-Hz-Masker und einen 1-kHz-Masker mit fünf verschiedenen Amplituden (angegeben durch die Zahlen neben den Linien). Eine zweite Frequenz muss diese Schwelle überschreiten, um für einen Hörer wahrnehmbar zu sein. (Wiedergegeben aus Ehmer (1959, S. 1117), mit Genehmigung der Acoustical Society of America)	84
Abb. 4.9	Gemeinsames Maskierungsmuster eines 200-Hz-Tons mit den ersten neun Obertönen mit zufälliger Phase und gleichen Amplituden von 40 und 60 dB. Die gestrichelte Linie zeigt die absolute Schwelle. (Aus Zwicker und Fastl (1999), S. 71)	84
Abb. 4.10	Zeitliche Entwicklung der maskierten Schwelle für einen 2-kHz-Masker mit unterschiedlichen Dauern (durchgezogene Linie =200 ms, gestrichelte Linie =5 ms). Für Maskerdauern bis zu 200 ms gilt: Je kürzer das Signal, desto steiler ist der zeitliche Abfall der Maskierungsschwelle. (Aus Zwicker und Fastl (1999), S. 84)	87
Abb. 4.11	Schematische Darstellung eines zeitlichen Maskierungsmusters mit Pre-Masking, Overshoot-Phänomen, simultaner Maskierung, einem 5 ms-Sustain und Post-Masking für einen Masker von 60 dB _{SPL}	87

Abb. 4.12 Zeitliches Maskierungsmuster einer Folge von Geräuschen mit kritischer Bandbreite. Die schraffierten Balken geben die Dauer der 70 dB lauten Maskierer an, die durchgezogene Linie verbindet die untersuchten Maskierungsschwellen, die als Kreise dargestellt sind. Die gestrichelten Linien stellen die Schwellenwerte vor und nach der Maskierung dar, wie sie aus den Forschungsergebnissen mit einem einzelnen kritischen bandbreiten Rauschen erwartet werden. (Wiedergegeben aus Fastl (1977, S. 329), mit Genehmigung des Deutschen Apotheker Verlags).	88
Abb. 4.13 Zentrales Maskierungsmuster für einen 1-kHz-Ton-Burst-Masker mit einer Dauer von 250 ms und Masken verschiedener Frequenzen und einer Dauer von 10 ms. Die Maskierungsschwelle ist in der Nähe des Maskierungsbeginns (TRANSIENT) viel höher als in der Nähe des Maskierungsbeginns (STEADY STATE). In beiden Fällen liegt die Schwelle weit unter der monauralen Maskierung. (Wiedergegeben aus Zwislocki et al. (1968, S. 1268), mit Genehmigung der Acoustical Society of America)	89
Abb. 4.14 Vergleich der zeitlichen Muster vor und nach der Maskierung für monaurale (durchgezogene Linien) und binaurale Signale (gestrichelte Linien). Der Maskierer ist ein 50 ms langes Breitbandrauschen auf 70 dB _{SL} , die Testsignale sind 10 ms lange 1-kHz-Tonbursts. (Wiedergegeben aus Elliott (1962, S. 1112), mit Genehmigung der Acoustical Society of America)	90
Abb. 4.15 Freifeldraum der Universität Göttingen während einer Versuchsanordnung mit 65 Lautsprechern. (Wiedergegeben aus Meyer et al. (1965, S. 340), mit Genehmigung des Deutschen Apotheker Verlags).	91
Abb. 4.16 Die horizontale (links) und die mediane Hörebene (rechts). (Nach Angaben in Blauert (1974)).	92
Abb. 4.17 Hörereignisrichtungen (Kugeln) und Lokalisationsunschärfen (graue Kurven) bei festen Schallereignissen (Pfeile) in der horizontalen Ebene. Nach Blauert (1997), S. 41, mit Daten aus Haustein und Schirmer (1970) und Preibisch-Effenberger (1966).	93
Abb. 4.18 Beispiele für Lokalisationsinversionen in der horizontalen Ebene, nach Blauert (1974), S. 35	94
Abb. 4.19 Lateralisation (schwarze Linie) und Lateralisationsunschärfe (Bereich innerhalb der gestrichelten Linien) pro interauraler Pegeldifferenz (upper Delta Modifying Above upper A With in dB). (Nach Blauert (1997), S. 158)	94
Abb. 4.20 Lateralisierung pro ITD based on data from Blauert (1997), p. 144.	95

Abb. 4.21 Binauraler Abstandsunterschied für eine Quelle im Nah- und Fernfeld. (Nach Kling und Riggs (1971), S. 351)	95
Abb. 4.22 Lokalisation (Kugeln) und Lokalisationsunschärfe (graue Kurven) in der Medianebene für Sprache eines bekannten Sprechers. Die gestrichelten grauen Linien verbinden das zugehörige Schallereignis mit dem Hörereignis. (Nach Blauert (1997), S. 44)	97
Abb. 4.23 Schematischer Weg der Hörereignisrichtung für schmalbandiges Rauschen variabler Mittenfrequenzen aus beliebigen Richtungen in der Medianebene. (Nach Blauert (1974), S. 36)	98
Abb. 4.24 Hörereignisabstand für verschiedene Arten von Sprache, die über einen Lautsprecher vor einem Zuhörer präsentiert werden. (Nach Blauert (1997), S. 46)	99
Abb. 4.25 Abstand von Schallquelle und Hörereignis bei Knallgeräuschen mit etwa 70 Phon. Die gestrichelten grauen Linien verbinden das zugehörige Schallereignis und das Hörereignis. (Nach Blauert (1997), S. 47).	100
Abb. 4.26 Demonstration der Emergenz. Man kann die rechts stehende Person erkennen, obwohl ihr die Beine fehlen. Das Originalfoto wird in Abschn. 6.2.1 vorgestellt	104
Abb. 4.27 Veranschaulichung des Prinzips der Zugehörigkeit. Im oberen Bild sind entweder mehrere Geigen oder zwei Personen, die Schulter an Schulter stehen, gleichzeitig zu sehen. Zusätzliche Hinweise können eine bestimmte Gruppierung erzwingen (unten), wie die kompletten Geigen (links) oder zusätzliche Gesichtszüge	106
Abb. 4.28 Veranschaulichung des Prinzips der Harmonizität. Zwei harmonische Reihen sind mit unterschiedlichen Graustufen kodiert. Die schwarz eingezeichnete Frequenz ragt aufgrund ihrer hohen Amplitude aus der Reihe heraus. Sie kann daher als dritter Hörstrom wahrgenommen werden, insbesondere wenn ihr zeitliches Verhalten nicht mit dem Rest der Obertonreihe übereinstimmt	107
Abb. 4.29 Veranschaulichung des Prinzips der Synchronität. Fünf Frequenzen beginnen gleichzeitig und erzeugen einen harmonischen Klang. Nach etwa drei Perioden setzt ein weiterer Teilton mit viel höherer Amplitude ein und ragt optisch und akustisch hervor	109
Abb. 4.30 Veranschaulichung des Prinzips der guten Fortführung durch drei leicht veränderte Versionen von gebündelten Achtelnoten	109
Abb. 4.31 Veranschaulichung des Schließungsprinzips beim Sehen und Hören. Ein systematisch in der Tonhöhe gleitender Ton, der von Stille unterbrochen wird, wird durch eine unterbrochene Zickzacklinie dargestellt. Wenn die Stille mit Geräuschen (Balken) aufgefüllt wird, scheint der in der Tonhöhe gleitende Ton kontinuierlich zu sein, ebenso wie die Zickzacklinie. (Nach Bregman (1990), S. 28)	110

Abb. 4.32	Spektren eines Shepard-Tons zu zwei verschiedenen Zeitpunkten. Obwohl alle Teiltöne in der Frequenz zunehmen, bleibt der Spektralschwerpunkt nahezu unverändert. Wenn ein Teilton die Hüllkurve am oberen Frequenzende verlässt, tritt ein neuer Teilton am unteren Frequenzende ein. Dadurch entsteht der Eindruck einer unendlich ansteigenden Tonhöhe	116
Abb. 5.1	Zweidimensionale Darstellung einer sich ausbreitenden ebenen Welle (links) und einer sich entlang der x -Achse ausbreitenden evaneszenten Welle (rechts) Nach Ziemer (2018), S. 332. Ein Video ist auf https://tinyurl.com/yaeqpn8nzu finden.	127
Abb. 5.2	Darstellung des Positionsvektors \mathbf{x} bzw. \mathbf{r} über kartesische und sphärische Koordinaten Nach Ziemer (2018), S. 333.	130
Abb. 5.3	Illustration des Mauerlocheffekts. Wellenfronten erreichen einen kleinen Spalt aus allen möglichen Richtungen innerhalb eines Raumes. Hinter dem Spalt breiten sich diese Wellenfronten wie ein Monopol aus, der seinen Ursprung an der Spaltstelle hat Ein Video ist auf https://tinyurl.com/y8tnhf8 zu finden	133
Abb. 5.4	Interaurale Pegelunterschiede (links) und interaurale Phasenunterschiede (rechts) eines Shakuhachi-Teiltones für Hörer in verschiedenen Hörwinkeln und Abständen Aus Ziemer (2014), S. 553.	134
Abb. 5.5	Frequenzbereiche mit annähernd monopolförmiger Schallabstrahlung (schwarz) oder Dipolabstrahlung (grau) von Orchesterinstrumenten Daten aus Meyer (2009), S. 130, ergänzt durch Messungen an der Universität Hamburg	135
Abb. 5.6	Foto eines Mikrofonarrays für Fernfeldaufnahmen von Musikinstrumenten Reproduziert aus Pätynen und Lokki (2010), S. 140, mit Genehmigung des Deutschen Apotheker Verlags	138
Abb. 5.7	Polares Fernfeldabstrahlungsmuster der Amplitude (links) und (rechts) einer Shakuhachi-Frequenz, gemessen in 1 m Entfernung mit 128 Mikrofonen, linear interpoliert. Man beachte, dass die Phase periodisch ist, d. h. $\phi(2\pi) = \phi(0)$	138
Abb. 5.8	Polardiagramme der ersten fünf circular harmonics. Die Werte des Realteils sind über dem Azimutwinkel φ aufgetragen. Die verschiedenen Schattierungen stellen die gegenphasigen Keulen dar, die Punkte auf der Kurve markieren die Werte für die entsprechenden Winkel	141
Abb. 5.9	Beispielhafte Legendre-Funktionen mit verschiedenen m und n . Obere Reihe: Negative Vorzeichen sind grau. Untere Reihe: Pfeile und Zahlen zeigen den Verlauf von 90 bis -90°	142
Abb. 5.10	Exemplarische sphärische harmonische Funktionen mit verschiedenen m und n	142
Abb. 5.11	Darstellung von Realteil (links) und Imaginärteil (rechts) der sphärischen Hankel-Funktion zweiter Art und der Ordnungen $0-5$	143
Abb. 5.12	Allgemeine Richtungsempfindlichkeit eines Beamformers mit Hauptkeule Ω_{main} und Nebenkeulen Ω_{side}	144

Abb. 5.13	Abstrahlcharakteristiken nach mit $\Omega = 0$, $\Omega = 100$ und $\Omega = 1000$ Nach Ziemer und Bader (2017), S. 485	148
Abb. 5.14	Chladni-Figur mit Knotenpunkten auf einer kreisförmigen Platte Nach Chladni (1787), S. 89	151
Abb. 5.15	Chladni-Figuren einer Rückenplatte, erhalten durch Sand (links) und durch Hologramm-Interferometrie (rechts) Aus Hutchins (1981), S. 174 und 176 mit freundlicher Genehmigung von Joe Wolfe.	151
Abb. 5.16	Interferogramm der Deckenplatte einer Gitarre, erstellt mit Hilfe der elektronischen TV-Holografie Aus Molin (2007), S. 1107	152
Abb. 5.17	Richtung der stärksten Abstrahlung von Frequenzen und deren statischer Richtfaktor Γ_{st} Angepasst von Meyer (2008), S. 158	152
Abb. 5.18	Grobe Beschreibung der Feldabstrahlung eines Flügels für zwei verschiedene Frequenzbereiche. Die grauen Flächen zeigen Richtungen mit einer Amplitude von 0 bis -3 dB bezogen auf die lauteste gemessene Amplitude Aus Meyer (2008), S. 165	153
Abb. 5.19	Polardiagramme einer Oboe für verschiedene Frequenzen Aus Meyer (2009), S. 131	153
Abb. 5.20	Konturdiagramme zur Darstellung der Abstrahlcharakteristik einer Tuba für verschiedene Winkel und Frequenzen Wiedergegeben aus Pätynen und Lokki (2010, S. 141), mit Genehmigung des Deutschen Apotheker Verlags	154
Abb. 5.21	Amplitude und Phase einer einzelnen Frequenz eines gespielten Tons, aufgenommen in 128 Winkeln um eine Geige herum Aus Ziemer und Bader (2017), S. 484, mit der Genehmigung der Audio Engineering Society	155
Abb. 5.22	Dreidimensionale Polardiagramme der Abstrahlcharakteristik verschiedener Teiltöne von Musikinstrumenten Aus Vorländer (2008), S. 127.	156
Abb. 5.23	Ballondigramm einer aus Feldmessungen berechneten Gitarrenabstrahlung Reproduziert aus Richter et al. (2013), S. 7, mit Genehmigung der Acoustical Society of America	156
Abb. 5.24	Schallgeschwindigkeit in einem Querschnitt durch eine Shakuhachi. Pfeillänge und -richtung geben Richtung und Geschwindigkeit der Teilchenbewegung an.	157
Abb. 6.1	Ein einfaches Strahlendiagramm eines Konzertsaals mit Direktschall (graue Pfeile) und Reflexionen erster Ordnung (schwarze Pfeile) von Spiegelquellen (graue Punkte). Nach Deutsches Institut für Normung (2004), S. 218	167
Abb. 6.2	Quelle Q und Spiegelquellen Q' in einer rechtwinkligen Ecke. Beachten Sie, dass die Konturen den gerichteten	

	Strahlungsfaktor einer Punktquelle darstellen, nicht die Wellenfront der sich ausbreitenden Welle, die als kugelförmig angenommen wird. Die Pfeile zeigen die Blickrichtung des Instruments an. Die reduzierte Konturgröße der Quellen ist das Ergebnis der Schallabsorption durch die Wände	167
Abb. 6.3	Modell (links) im Maßstab 1: 20 und resultierender Saal (rechts) des Konzerthauses Berlin. Aus Ahnert und Tennhardt (2008), S. 251	169
Abb. 6.4	Virtual-Reality-Implementierung „Virtual Electronic Poem“, die das „Poème Électronique“ mit Hilfe von stereoskopischer Visualisierung und binauralen Impulsantworten rekonstruiert, die mit einer Ray-Tracing-Software gewonnen wurden. Grafik von Stefan Weinzierl mit freundlicher Genehmigung	169
Abb. 6.5	Raumakustik, dargestellt als Black Box, die ein Eingangssignal mit einer unbekannten Filterfunktion filtert (oben). Bei Verwendung eines Eingangssignals $A_{in}(\omega) = 1$, d. h. eines Dirac-Delta-Impulses, entspricht das Ausgangssignal der Filterfunktion (unten).	171
Abb. 6.6	Aufnahme einer Schreckschusspistole auf der Bühne des Docks Clubs in Hamburg als Quellsignal für eine Impulsantwortmessung	172
Abb. 6.7	Quadrierter Schalldruckpegel nach dem Abschalten des lang anhaltenden weißen Rauschens (grau). RT_{30} (durchgezogene schwarze Linie) und EDT (gestrichelte schwarze Linie) sind die Least Squares Regressions der Zeitspanne eines Druckpegelabfalls von -5 auf -35 dB _{SPL} und $-0,1$ auf $-10,1$ dB _{SPL} , wie durch die gestrichelten Linien angegeben	173
Abb. 6.8	Detail einer Raumimpulsantwort. Direktschall, ER und ITDG sind eingezeichnet. Die zunehmende Dichte der Reflexionen und der mit der Zeit abnehmende Druck sind zu erkennen	174
Abb. 7.1	Stereodreieck. Robuste Phantomschallquellen können verteilt werden zwischen $\pm 30^\circ$	195
Abb. 7.2	Das Sinusgesetz der Stereophonie betrachtet das Verhältnis zwischen Gegenkathete und Hypotenuse von zwei Dreiecken	196
Abb. 7.3	Das Tangensgesetz berücksichtigt das Verhältnis zwischen der Gegenkathete und der Ankathete zweier Dreiecke	197
Abb. 7.4	Winkel einer Phantomschallquelle ϕ_Q unter Verwendung des Sinusgesetzes (schwarz), des Tangensgesetzes (grau) und des Chowning-Panning-Gesetzes (gestrichelt).	198
Abb. 7.5	Verstärkungsverhältnis $\Delta \hat{A}$ über den Quellenwinkel ϕ_Q gemäß dem Sinusgesetz (schwarz), dem Tangensgesetz (grau) und dem Chowning-Panning-Gesetz (gestrichelt)	199

Abb. 7.6	Lautsprecher mit einem gemeinsamen Gehäuse können den Eindruck von Phantomschallquellen jenseits des Lautsprecherbasis vermitteln	200
Abb. 7.7	Phänomene, die bei der zeitversetzten Wiedergabe von gleichen Signalen zwischen zwei Lautsprechern auftreten. Nach Dickreiter (1987), S. 129	201
Abb. 7.8	Amplitudenbasiertes Panning zwischen Lautsprecherpaaren. Je weiter die Lautsprecher von der Blickrichtung weggedreht werden, desto unklarer wird die Phantomschallquellenposition. (hier durch die Helligkeit der Lautsprecherbasis und den Gesichtsausdruck angezeigt)	204
Abb. 7.9	Scheiber-Aufbau. Quellen können vorne und hinten (grau) verteilt werden. Die Lokalisierungsgenauigkeit ist jedoch gering	204
Abb. 7.10	Dynaquad-Setup. Panning erzeugt keine stabilen Quellenpositionen.	204
Abb. 7.11	Lautsprecheranordnung für Dolby-Surround-Sound-Systeme. Die Frontlautsprecher werden auf einer Kreislinie um den Sweet Spot herum mit Blick auf die Mitte angeordnet. Die Surround-Lautsprecher sind zwischen 0,6 und 1 m hinter und über der Hörposition angeordnet und nicht auf den Sweet Spot ausgerichtet	206
Abb. 7.12	5.1-Lautsprecheranordnung nach ITU-R BS.775	209
Abb. 7.13	Von der ITU empfohlene 7.1-Lautsprecheranordnung (links) und SDDS-Anordnung (rechts)	211
Abb. 7.14	Immersive 7.1-Lautsprecheranordnung (3.1/2 + 2)	213
Abb. 7.15	Dolby Atmos-Setups 3.1/2 + 4 (links) und 3.1/4 + 2 (rechts)	213
Abb. 7.16	Aktive Lautsprecher bei Anwendung von Vector Base Amplitude Panning in drei Fällen. Links: Die Position der Quelle fällt mit der Position eines Lautsprechers zusammen. Mitte: Die Quelle liegt an der Grenze eines Lautsprechertripels. Rechts: Die Quelle liegt innerhalb eines Lautsprechertripels. Der graue Pfeil zeigt auf die Quelle, die schwarzen Pfeile auf die aktiven Lautsprecher	216
Abb. 7.17	Beispiel für Multiple Direction Amplitude Panning. Durch Panning zwischen den Lautsprechern 1 und 2 wird die blaue Quelle erzeugt. Durch Panning zwischen den Lautsprechern 2 und 3 wird die rote Quelle erzeugt. Zusammen erzeugen sie die violette Phantomschallquelle mit einer größeren räumlichen Ausdehnung.	217
Abb. 8.1	Illustration des akustischen Vorhangs. (Nach Ziemer (2016), S. 55).	226
Abb. 8.2	Mikrofonsetups für Ambisonics erster Ordnung in zwei Dimensionen mit verschiedenen Aufbauten. (Nach Ziemer (2017a), S. 315)	227

Abb. 8.3	Ambisonics-Mikrofonarray in einem Schallfeld, (nach Ziemer (2017a), S. 316)	228
Abb. 8.4	Veranschaulichung des Huygens'schen Prinzips. Jeder Punkt auf einer Wellenfront kann als der Ursprung einer Elementarwelle betrachtet werden. Zusammen bilden die Elementarwellen die sich weiter ausbreitende Wellenfront. (Aus Ziemer (2016), S. 54)	232
Abb. 8.5	Welle einer atmenden Kugel zu drei Zeitpunkten in 2D. Die atmende Kugel zum Zeitpunkt t_0 (a) erzeugt eine Wellenfront zum Zeitpunkt t_1 (b). Punkte auf dieser Wellenfront können als Elementarquellen betrachtet werden, die ebenfalls Wellenfronten zum Zeitpunkt t_2 (c) erzeugen. Durch Überlagerung entsprechen diese Wellenfronten der weiter abgestrahlten Wellenfront der atmenden Kugel (d). (Aus Ziemer (2016), S. 55)	232
Abb. 8.6	Zweidimensionale Darstellung der Superposition. Monopol- und Dipolquelle bilden eine kardioidförmige Strahlung. (Nach Ziemer (2018), S. 335. Nach Ziemer (2016), S. 57)	234
Abb. 8.7	Kirchhoff-Helmholtz-Integral zur Beschreibung des Huygens'schen Prinzips für eine sich nach außen ausbreitende Welle. (Aus Ziemer (2018), S. 334)	235
Abb. 8.8	Drei Volumen V mit möglichen Quellenpositionen Q . (Nach Ziemer (2016), S. 58)	236
Abb. 8.9	Gewünschtes Schallfeld oberhalb und gespiegeltes Schallfeld unterhalb einer Trennebene nach dem Rayleigh-I-Integral für sekundäre Monopolquellen (a) und dem Rayleigh-II-Integral für sekundäre Dipolquellen (b). (Nach Ziemer (2018), S. 337 und 338)	239
Abb. 8.10	Veranschaulichung der räumlichen Fensterung: Eine kreisförmige Wellenfront überlagert sich mit virtuellen Reflexionen von zwei (a) oder einem (b) zusätzlichen Lautsprecherarray(s). Wenn diejenigen Lautsprecher stummgeschaltet werden, deren Normalrichtung um mehr als 90° von der lokalen Wellenfrontausbreitungsrichtung abweicht (c), ist die synthetisierte Wellenfront wesentlich klarer. Hier ist der verbleibende Synthesefehler ein Abbruchfehler, der sich aus der endlichen Länge des Lautsprecherarrays ergibt. (Nach Ziemer (2018), S. 338)	240
Abb. 8.11	Verschiedene Einfallswinkel für eine Quellenposition. (Aus Ziemer (2016), S. 68)	245
Abb. 8.12	Virtuelle Quellen mit (b und d) und ohne (a und c) Aliasing. Fehlerhafte Wellenfronten überlagern sich mit den gewünschten Wellenfronten. Alle synthetisierten Wellenfronten weisen einen Abbruchfehler auf, der kompensiert werden muss. (Nach Ziemer (2016), S. 69)	245

Abb. 8.13	Oberhalb der kritischen Frequenz treten regelmäßige Fehler auf (a). Durch Phasenrandomisierung (b) wird die Verteilung von Amplitude und Phase unregelmäßig. (Nach Ziemer (2018), S. 340 und 341)	247
Abb. 8.14	Abbrucheffect einer virtuellen ebenen Welle (a) und seine Kompensation durch Anwendung eines Kosinusfilters (b). Die vom linken Ende des Lautsprechers ausgehende sphärische Wellenfront wird eliminiert. Der verbleibende Fehler wird durch das nicht mittels Tapering behandelte rechte Ende des Arrays verursacht. (Nach Ziemer (2016), S. 71)	248
Abb. 8.15	Eine virtuelle Punktquelle in der Ecke. Wenn zwei lineare Lautsprecherarrays aufeinandertreffen, ist der Abbruchfehler gering. (Nach Ziemer (2018), S. 343)	249
Abb. 8.16	Schallfeld in einem freien Feld (a), in Gegenwart einer reflektierenden Wand (b) und einer stark absorbierenden Wand (c). (Nach Ziemer (2018), S. 343)	250
Abb. 8.17	120 auf der Oberfläche eines Dodekaeders montierte Lautsprecher für die Sound Radiation Synthesis. (Aus Avizienis et al. (2006), mit Genehmigung der Audio Engineering Society).	251
Abb. 8.18	Aufbau für die Simulation und die tatsächliche Implementierung der Synthese einer komplexen Abstrahlcharakteristik mittels Wellenfeldsynthese. (Aus Corteel (2007), S. 4, bereitgestellt unter Creative Commons Lizenz)	252
Abb. 8.19	Oktaederförmiger Lautsprecher zur Synthese der Abstrahlcharakteristik von Musik an 8 diskreten Orten. (Aus Ziemer (2016), S. 155)	254
Abb. 8.20	Aufbau einer kreisförmigen Wellenfeldsynthesesystems für die Forschung. (Nachdruck aus Gauthier und Berry (2008, S. 1994) mit Genehmigung der Acoustical Society of America)	255
Abb. 8.21	Wellenfeldsyntheseaufbau für Forschung und Entwicklung am Fraunhofer IDMT.	256
Abb. 8.22	Psychoakustisches Schallfeldsynthesesystem an der Universität Hamburg. (Aus Ziemer (2016), S. 157)	257
Abb. 8.23	Vollduplex-Wellenfeldsynthesesystem für die Kommunikation. (Aus Emura und Kurihara (2015), mit Genehmigung der Audio Engineering Society).	257
Abb. 8.24	Wellenfeldsynthesesystem an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg gekoppelt mit Motion-Capture-Technologie. (Originalfoto von Wolfgang Fohl, bereitgestellt unter Creative Commons Lizenz. Das Foto ist in Graustufen umgewandelt)	258

Abb. 8.25	Panoramabild des Lautsprechersystems in einem Hörsaal der Technischen Universität Berlin mit 832 Kanälen und mehr als 2700 Lautsprechern. (Pressestelle TU Berlin, mit freundlicher Genehmigung von Stefan Weinzierl)	259
Abb. 8.26	Wellenfeldsynthesesystem für Musikinstallationen und networked music performance an der Hochschule für Musik und Theater Hamburg	259
Abb. 8.27	Foto des Lautsprechersystems auf der Seebühne Bregenz. Die Lautsprecher sind neben und hinter dem Publikum angeordnet. (Aus Slavik und Weinzierl (2008), S. 656)	260
Abb. 8.28	Einbau der Wellenfeldsynthese in ein Auto. (Foto aus Audi Technology Portal (2019), © Audi)	262
Abb. 8.29	Ebene Wellen mit mehreren Lautsprechern in einer Soundbar zu synthetisieren vergrößert den Sweet Spot für Stereosuellsignale	262
Abb. 9.1	Kreisförmiges Mikrofonarray zur Aufnahme der Abstrahlcharakteristik eines Lautsprechers	274
Abb. 9.2	Foto des Messaufbaus zur Aufnahme der Abstrahlcharakteristik eines Shakhuchi. Die Mikrofone ragen aus dem kreisförmigen Ring heraus, der hinter dem Instrumentalisten zu sehen ist.	276
Abb. 9.3	Vorwärtsausbreitung von einer Quelle \mathbf{Q} zu Empfängern \mathbf{X}_m mit Hilfe der Ausbreitungsmatrix \mathbf{K} , die den Winkelamplitudenfaktor Γ' enthält	278
Abb. 9.4	Gemessene Abstrahlcharakteristik eines Lautsprechers bei Frequenzen von 250 Hz (links) und 2,5 kHz (rechts). Aus Ziemer (2016), S. 164–165	280
Abb. 9.5	Aufbau des simulierten Szenarios, das die Leistung der Regularisierungstechniken demonstriert	281
Abb. 9.6	Zustandszahlen κ für jedes Frequenzband ohne Regularisierung (schwarz) und bei Anwendung der MEM- (hellgrau) und r-Methode (grau). Aus Ziemer und Bader (2017), S. 486, mit Genehmigung der Audio Engineering Society	282
Abb. 9.7	Beispielhafte Rekonstruktionsenergie E (schwarz) und Zustandszahl κ (grau) für verschiedene Frequenzbänder im gegebenen Szenario. Beide werden berechnet als $10 \lg \frac{\text{value}}{\text{max}}$	283
Abb. 9.8	Rekonstruktionsenergie E für jedes Frequenzband ohne Regularisierung (schwarz) und bei Anwendung der MEM (hellgrau) und r-Methode (grau). Aus Ziemer und Bader (2017), S. 486, mit Genehmigung der Audio Engineering Society	284
Abb. 9.9	Lautsprecheramplituden für zwei nahe beieinander liegende virtuelle Quellen mit demselben Quellsignal, gelöst mit der Strahlungsmethode (links) und der Methode der minimalen Energie (rechts). Aus Ziemer (2016), S. 296	285

Abb. 9.10	Eigenmode einer rechteckigen Membran zur Demonstration einer zweidimensionalen stehenden Welle. Es ist keine Wellenfront zu erkennen. Dennoch können zwei Punkte Schalldruckpegel- und Phasenunterschiede aufweisen	286
Abb. 9.11	Zeitreihen (oben) und Spektren (unten) eines originalen elektronischen Bassdrum-Samples (links) und einer Version mit 25 (Mitte) und 2048 (rechts) Frequenzen, deren Amplitude und Phase manipuliert wurden. Insbesondere Phasenmanipulationen beeinträchtigen die Gesamtkontur der Zeitreihe.	289
Abb. 9.12	Abstrahlcharakteristik und Extrapolationspfade von einer virtuellen komplexen Punktquelle zu 3 Hörern im Abstand von 1, 1,5 und 3 m. Aus Ziemer (2017a), S. 323.	291
Abb. 9.13	Beispiel für Breite und Detailreichtum eines nahen Objekts im Vergleich zu einem entfernten Objekt. Das nahe Cembalo wirkt und klingt breit und detailreich. Das entfernte Cembalo in einem freien Feld sieht schmal und punktförmig aus und klingt auch so. Cembalo-Darstellung entnommen aus VictorianLady (2016)	291
Abb. 9.14	Virtueller (Q) und wahrgenommener Quellort (Polardiagramm) für eine spektrale Schallfeldsynthese ohne die Implementierung des Precedence-Fades. Aus Ziemer (2011b), S. 194, mit Genehmigung der Audio Engineering Society	293
Abb. 9.15	Virtueller (Q) und wahrgenommener Quellort (Plot) für eine spektrale Schallfeldsynthese bei Anwendung des Precedence-Fades. Aus Ziemer (2011b), S. 194, mit Genehmigung der Audio Engineering Society	294
Abb. 9.16	Demonstration des Precedence-Fades in einem 5.1-Lautsprechersystem. Die virtuelle Quelle befindet sich vorne rechts. Aus Ziemer und Bader (2017), S. 489, mit Genehmigung der Audio Engineering Society	295
Abb. 9.17	Wahrgenommene Quellorte bei Anwendung des Precedence-Fades auf das ungefilterte Quellsignal. Aus Ziemer und Bader (2017), S. 492, mit Genehmigung der Audio Engineering Society.	296
Abb. 9.18	Wahrgenommene Quellorte im psychoakustischen Schallfeldsynthesesystem. Aus Ziemer und Bader (2017), S. 492, mit Genehmigung der Audio Engineering Society	296
Abb. 9.19	Maskierungsschwelle (hellgraue Fläche) des Signals des Precedence-Speakers (schwarz), der ein anderes Lautsprechersignal (grau) in der psychoakustischen Schallfeldsynthese teilweise verdeckt	298
Abb. 9.20	Beispiel für eine frequenzabhängige Ausdehnung des Hörbereichs. Der Grauwert der Hörpunkte, die die Hörzone abtasten, gibt die Frequenz an.	303

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1	Bark Skala und entsprechende Frequenzen	81
Tab. 6.1	Zusammenfassung der subjektiven Eindrücke, objektiven Messwerte und Idealwerte der raumakustischen Parameter für Sinfonie- und Opernaufführungen	186
Tab. 7.1	Anforderungen an ein stereophones Lautsprechersystem	192
Tab. 7.2	Ergänzung der Anforderungen an Lautsprechersysteme	192
Tab. 7.3	Übersicht über Herkunft und Anzahl der Kanäle verschiedener Lautsprechersysteme im Zeitverlauf. Ein zusätzlicher Subwoofer ist mit „1“ gekennzeichnet	193
Tab. 7.4	Auslenkung der Ohantomschallquelle bei verschiedenen ICTDs nach Friesecke (2007), S. 146	201
Tab. 7.5	Übersicht über die erweiterten Dolby-Digital-Formate	210
Tab. 7.6	Vor- und Nachteile herkömmlicher stereophoner Tonsysteme, insbesondere von Stereo und 5.1 Surround	221