



Juan G. Roederer

Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik

Zweite Auflage

Mit 79 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo
Hong Kong Barcelona
Budapest

Professor Dr. JUAN G. ROEDERER
Geophysical Institute
University of Alaska
Fairbanks, AK 99775-0800
USA

Übersetzt von FRIEDEMANN MAYER

Titel der englischen Originalausgabe: Juan G. Roederer, Introduction to the Physics and Psychophysics of Music. Heidelberg Science Library
© 1973, 1975 by Springer-Verlag New York Inc.

ISBN-13: 978-3-642-97495-3 e-ISBN-13: 978-3-642-97494-6
DOI: 10.1007/978-3-642-97494-6

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Roederer, Juan G.:
Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik /
Juan G. Roederer. [Übers. von Friedemann Mayer]. – 2. Aufl. –
Berlin, Heidelberg, New York; London; Paris; Tokyo; Hong
Kong; Barcelona; Budapest: Springer, 1993
Einheitssacht.: Introduction to the physics and psychophysics of music
(dt.)
ISBN-13: 978-3-642-97495-3

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-¹⁹⁹³sendung, 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. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1977, 1993

Softcover reprint of the hardcover 2nd edition 1993

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk 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 dürfen.

Satz: Brühlsche Universitätsdruckerei, Gießen

32/3145 -543210 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

Meiner lieben Mutter gewidmet

Vorwort zur zweiten deutschen Auflage

Vieles hat sich seit der Herausgabe der ersten deutschen Auflage meines Buches ereignet. Ende 1977 folgte ich einem Ruf nach Fairbanks, um die Direktion am Geophysikalischen Institut der Universität Alaska zu übernehmen, ein Amt, das ich neun Jahre innehatte. Seit Ende 1986 bin ich als Professor der Physik an der Universität tätig; gleichzeitig war ich mehrere Jahre Vorsitzender der United States Arctic Research Commission. Die vielseitigen Verpflichtungen, besonders als Direktor eines großen Instituts, dessen Forschungsbereich sich vom Erdinneren über die arktische Atmosphäre und die Nordlichtzone bis hin zu den Grenzen des Sonnensystems erstreckt, erlaubten es mir nicht, meine musikwissenschaftlichen Studien noch weiter zu vertiefen. Deshalb handelt es sich bei dieser neuen Ausgabe lediglich um eine korrigierte Version der 1. Auflage. Da ich aber beabsichtige, mich in Kürze emeritieren zu lassen, habe ich mich verpflichtet, die englische Originalausgabe gründlich zu überarbeiten. Man darf erwarten, daß das aktualisierte und erweiterte Manuskript dann auch bald ins Deutsche übersetzt werden wird. Das vorliegende Buch soll daher in erster Linie dem wachsenden Interesse an dieser Thematik Rechnung tragen, zumal das Literaturangebot hierzu in Deutschland bis heute nicht allzu umfangreich ist.

Auch auf den Gebieten der musikalischen Akustik, Psychoakustik und Neuropsychologie der Musik hat sich in dieser Zeitspanne vieles getan. Besonders für die letztgenannten Bereiche hat das Interesse in bedeutendem Maße zugenommen, neue Forschungsgruppen sind entstanden und auch internationale wissenschaftliche Kongresse und Seminare beschäftigen sich jetzt regelmäßig mit diesen Themen. Die Pionierarbeit, die wir mit den ersten „Workshops über die Physikalischen und Neuropsychologischen Grundlagen der Musik“ beim Carinthischen Sommer in Ossiach in den 70er Jahren geleistet haben hat viele Früchte getragen! Zur Beruhigung des Lesers weise ich jedoch ausdrücklich darauf hin, daß trotz der vielen Fortschritte in diesen Bereichen der Inhalt des Buches nicht etwa überholt ist, sondern seine grundlegenden Erkenntnisse vielmehr bestätigt wurden. Die letzten Entwicklungen in der Neurobiologie tragen dazu bei, das Allgemeinbild der Musikperzeption klarer zu beleuchten und Fortschritte in der Elektroakustik erlau-

ben es, einen genaueren Einblick in die Akustik der Musikinstrumente zu gewinnen. Einen besonderen Aufschwung erlebte die systematische Erforschung der höheren kognitiven Gehirnprozesse beim musikalischen Hören und Empfinden^{1,2}, ein Thema, das ich in einer weiteren Auflage eingehend behandeln werde.

Fairbanks, Juni 1993

JUAN G. ROEDERER

¹ Roederer, J. G.: Neuropsychological processes relevant to the perception of music: an introduction. In: Musik in der Medizin. R. Spintge und R. Droh (Hg.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, S. 81–106 (1987)

² Rösing, H., J. G. Roederer: Musik in der Entwicklung der Menschheit, in Musikpsychologie: ein Handbuch in Schlüsselbegriffen. H. Bruhn, R. Oerter, H. Rösing (Hg.), Urban und Schwarzenberg München Wien Baltimore, S. 351–359 (1985)

Vorwort zur ersten deutschen Auflage

Manche Musiker regen sich auf, wenn in ihrem Kunstbereich Physiker, Psychoakustiker oder Neuropsychologen „herumschnüffeln“. Andere Musiker hingegen lassen sich mit Elektroden bestücken, damit ihre mannigfaltigen psychophysiologischen Reaktionen bei dieser oder jener Wagner-Passage registriert und wissenschaftlich ausgewertet werden können. Und geht es um Komponisten, so gibt es welche, die entsetzt ausrufen: „Es interessiert mich nicht zu wissen, *warum* ich gerne Musik mache!“; dafür gibt es aber auch andere, die ohne elektronisch erzeugte psychophysikalische Effekte neue Musik gar nicht schaffen wollen.

Dieses Buch verfolgt einen mehrfachen Zweck. Erstens soll es interessierten Musikern helfen zu verstehen, auf welche physikalische Weise musikalische Töne in einem Musikinstrument erzeugt werden und sich im Raum ausbreiten, und wie Musik vom Zuhörer empfangen und empfunden wird. Der Verfasser ist überzeugt, daß zusätzliche Kenntnis auf diesem Gebiet dem Musiker von durchaus praktischem Nutzen für seine künstlerische oder pädagogische Tätigkeit sein kann. Physikalisches und mathematisches Vorwissen jenseits des durchschnittlichen Schulniveaus ist dazu nicht erforderlich. Zweitens soll dieses Buch dem musikliebenden Wissenschaftler viele Fragen, die er sich zweifelsohne bezüglich Musik und Tonempfindung gestellt haben dürfte, beantworten. Dem Audiologen und Neuropsychologen wird es hoffentlich nützliche Beispiele liefern, die anhand der relativ einfachen akustischen Reizmuster der Musik zeigen, wie das Nervensystem Sinnesinformation verarbeitet. Dem Musikpsychologen wird ein Versuch dargeboten, die Frage „warum lieben wir Musik?“ von einem neuro-funktionellen Standpunkt aus zu beantworten. Schließlich soll dieses Buch dem fortschrittlichen Komponisten neue Ideen bieten, um die spezielle Arbeitsweise des menschlichen Gehörs in seinem Schaffen ausbeuten zu können.

Der Text ist ursprünglich als einführendes Lehrbuch für Studenten entstanden, die das Fach „Musical Acoustics“ (oder mit ähnlichem Titel) an amerikanischen Universitäten hören. In der Tat gibt es in den USA schon mehrere hundert Universitäten, die solch einen Kurs, meistens als interdisziplinäres Wahlfach, den Studenten aller ihrer Fakultäten bieten. Leider ist es bisher an den Universitäten der deutschsprachigen Länder in Europa noch nicht ganz so weit gekommen.

Wird ein Buch in die Muttersprache des Verfassers übersetzt, sollte man doch erwarten, daß er diese Aufgabe selbst übernimmt. Das war aus Zeitmangel in diesem Fall leider nicht möglich. Mein besonderer Dank gilt deshalb dem Übersetzer, Herrn Friedemann Mayer, der diese äußerst schwierige Aufgabe in einer Weise gemeistert hat, die gewiß auch die Zustimmung des Lesers finden wird. Herrn Dr. Ing. Ernst Terhardt bin ich zu herzlichem Dank verpflichtet für seine sorgfältige Prüfung des deutschen Manuskripts, für das deutsche Wortverzeichnis und für eine zusätzliche Liste deutschsprachiger Literaturquellen.

Denver, Frühjahr 1977

JUAN G. ROEDERER

Vorwort zur ersten englischen Auflage

Dieses Buch beschäftigt sich mit den physikalischen Systemen und psychophysikalischen Prozessen, die in Zusammenhang mit jenem Phänomen stehen, das wir allgemein als „Musik“ bezeichnen. Wir werden untersuchen, welche objektiven physikalischen Eigenschaften von Klangmustern mit bestimmten subjektiven psychologischen Empfindungen der Musik assoziiert sind. Wir werden darlegen, auf welche Weise diese Klangmuster in Musikinstrumenten erzeugt werden, wie sie sich in ihrer Umgebung fortpflanzen und wie sie schließlich vom Gehör wahrgenommen und im Gehirn interpretiert werden. Bei diesem Unternehmen werden wir die Sprache, Denkweise und Untersuchungsmethode des Physikers benutzen — ohne jedoch auf komplizierte Mathematik zurückzugreifen (wodurch unsere Darstellung allerdings beträchtlichen Beschränkungen unterlegen ist). Physikalisches Vorwissen wird beim Leser nicht vorausgesetzt, wohl aber, daß er mit Musik vertraut ist, insbesondere mit Notenschrift, Tonleitern und Intervallen, daß er zumindest eine gewisse Grundkenntnis der Musikinstrumente besitzt und daß er charakteristische musikalische „Empfindungen“ aus eigenem Erleben her kennt.

Bis vor etwa 25 Jahren schenkte man der Rolle des Gehirns, d.h. des Zentralnervensystems, bei der eigentlichen Wahrnehmung, Identifizierung und Bewertung musikalischer Klänge wenig Beachtung. Der stark „mechanistische“ Ansatz der Forscher des 19. Jahrhunderts, besonders des berühmten von Helmholtz, hielt sich bis weit in die erste Hälfte unseres Jahrhunderts. Nach diesem Ansatz wurde die Wahrnehmung von Tönen hauptsächlich als Ergebnis der Umwandlung bestimmter, genau definierter Eigenschaften von Klangwellen (Frequenz, Intensität und Spektrum) in mehr oder weniger genau definierte Klassen von neuronalen Signalen angesehen (die Information über Tonhöhe, Lautstärke und Klangfarbe verschlüsseln sollten). Heute wissen wir, daß das Zentralnervensystem eine weitaus aktivere Rolle spielt, eine so wichtige Rolle, daß ohne es selbst die Wahrnehmung solch grundlegender Merkmale wie z. B. der Tonhöhe unmöglich wäre. Daher werden wir in diesem Buch in großem Maße auf die Psychophysik zurückgreifen; diese Disziplin versucht, grob gesagt, die kausale Beziehung zwischen den physikalischen

Reizen unserer Sinnesorgane und den psychologischen Empfindungen bzw. den physiologischen Reaktionen psychischer und physischer Art quantitativ zu erfassen. Wir wollen versuchen, Physik und Psychophysik — genauer Psychoakustik — eng miteinander zu verknüpfen; scheinen sie doch in der Musik selbst ganz natürlich ineinander verwoben: nicht nur Tonhöhe, Lautstärke und Klangfarbe sind ein Produkt physikalischer und psychoakustischer Prozesse, sondern ebenso die Empfindungen, die mit Konsonanz und Dissonanz, Dominanz der Tonika, Triller, Verzerrungen, Vibrato, Phrasierung, Schwebungen, dem Klangeinsatz, Andauern und Abklingen eines Tones, Rhythmus usw. verbunden sind.

Bücher über die physikalischen oder akustischen Grundlagen der Musik stehen in großer Zahl zur Verfügung. Auf dem neuesten Stand ist das Werk von John Backus (1969). Von den über Psychoakustik zur Verfügung stehenden Texten hat jedoch keiner einen einführenden Charakter. Einige Übersichtsartikel über einschlägige Themen finden sich bei Tobias (1970) und bei Plomp und Smoorenburg (1970). Eine umfassende Erörterung enthält Flanagan's Buch über Sprache (1972). Und dann haben wir natürlich noch das klassische Werk von von Békésy (1960). Eine umfassende, neueste Forschungsergebnisse einbeziehende Darstellung der Vorgänge im Gehirn findet sich bei Sommerhoff (1974); Musikpsychologie wird in der klassischen Terminologie bei Lundin (1967) behandelt. Originalarbeiten aus der Forschung über die physikalischen Grundlagen der Musik und Psychoakustik werden z. B. in der Zeitschrift *Journal of the Acoustical Society of America* veröffentlicht. Das vorliegende Buch will nicht Duplikat, sondern Synthese bereits vorhandener Literatur sein. Die Verknüpfung von Physik und Psychoakustik war das wichtigste Ziel, das der Autor dabei verfolgt hat.

Eine der unangenehmsten Aufgaben beim Verfassen eines Buches ist die Entscheidung, welche Themen angesichts des nur in äußerst begrenztem Maße zur Verfügung stehenden Platzes ausgelassen oder vernachlässigt werden sollen. Wie die Entscheidung des Autors auch ausfällt, sie wird immer jemanden auf den Plan rufen, der diese oder jene Auslassung beanstandet! Einige der vernachlässigten oder ausgelassenen Themen seien hier ohne Versuch einer Rechtfertigung angeführt. In der Erörterung der Erzeugung musikalischer Töne werden — auf Kosten der Darstellung konkreter musikalischer Situationen — vorwiegend fundamentale Mechanismen untersucht. Die menschliche Stimme wurde ebenso fast völlig übergangen wie die Besprechung anharmonischer Töne (Schlaginstrumente) oder elektronischer Tonerzeugung; computererzeugte Musik ist nicht einmal erwähnt. Auf seiten der Psychoakustik wird nur die Wahrnehmung einzelner oder mehrfach überlagerter *sinusoidaler* Töne untersucht, ohne ein Wort über Experimente mit

Rauschband- oder Impulsreizmuster zu verlieren. Desgleichen wurden die hydrodynamischen und elektrophysiologischen Prozesse in der Schnecke ebenso ausgelassen wie eine Beschreibung der Neuroanatomie des Gehörtrakts. Und es wird praktisch nichts über Rhythmus und Stereohören und nur sehr wenig über die historische Entwicklung gesagt. Schließlich liegt bei den Literaturverweisen der Schwerpunkt auf psychoakustischen Themen. Dabei werden bevorzugt Artikel aus solchen Quellen zitiert, die einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich sind. Detaillierte Angaben über Originalarbeiten finden sich in den meisten der zitierten Artikel.

Das vorliegende Buch geht aus einem Vorlesungsskript hervor, von der Universität Denver für die Studenten des Kurses „Physikalische Grundlagen der Musik“ veröffentlicht, der im Herbst 1970 eingeführt wurde. Zusätzlich zu den üblichen Vorlesungen sollen diese Studenten eine Reihe akustischer und psychoakustischer Experimente in einem bescheidenen Laboratorium durchführen. Die Durchführung solcher Experimente, von denen wir einige beschreiben werden, ist für ein eindeutiges Verständnis der wichtigsten zugrunde liegenden physikalischen und psychoakustischen Begriffe unerlässlich. Leider erfordern solche Experimente häufig eine elektronische Ausrüstung, die dem „gewöhnlichen“ Leser nicht ohne weiteres zur Verfügung stehen wird. Wir bitten den Leser deshalb, unserer Beschreibung der Experimente zu vertrauen und zu glauben, daß sie wirklich so ablaufen, wie wir es im Text behaupten! Wenn irgend möglich, werden wir darauf hinweisen, wie ein bestimmtes Experiment mit Hilfe einer einfachen musikalischen Ausrüstung durchgeführt werden kann.

Zu Dank verpflichtet ist der Autor den Professoren A. H. Benade von der Case Western Reserve University (Cleveland) und R. T. Schumacher von der Carnegie-Mellon University (Pittsburgh) für hilfreiche Anmerkungen und Kritik. Die Abschnitte 4.5 und 4.6 dieses Buches basieren auf neuesten, zum größten Teil noch unveröffentlichten Untersuchungen Prof. Benades und seiner Mitarbeiter. Dank und Anerkennung schuldet der Autor ferner Norma Lanier für ihre tüchtige Arbeit als Sekretärin, James Haworth für das sachkundige Anfertigen der Zeichnungen, David Clint für die photographischen Arbeiten und seiner Frau Beatriz für die sorgfältige Durchsicht des Manuskriptes.

Vorwort zur zweiten englischen Auflage

Die erste Auflage dieses Buches liegt nur ein Jahr zurück. Es ist als erfreuliches Zeichen zu werten, daß sie schon nach so kurzer Zeit vergriffen war. Seit der Abfassung des Originalmanuskriptes (Mitte 1972) hat sich, speziell auf dem Gebiet der Psychoakustik, manches getan. Auch sind von Kollegen und Studenten, die dieses Buch in der Vorlesung benutzt haben, zahlreiche wertvolle Anregungen eingegangen.

Die wesentlichen Änderungen in dieser zweiten Auflage tragen den jüngsten bedeutenden Entwicklungen im Verständnis der Tonhöhenwahrnehmung komplexer Töne (Abschnitte 2.7, 2.8, 2.9 und 4.8) Rechnung. Schauen Sie sich die Buchstaben des Titels auf der Titelseite an! Sehen Sie Umrisse, die in Wirklichkeit physikalisch gar nicht vorhanden sind? Ein Teil der Änderungen in der zweiten Auflage besteht in der Einführung eines diesem visuellen Phänomen analogen im Hörsystem, das eine mögliche Erklärung der Tonhöhenwahrnehmung komplexer Töne liefert (s. Literaturverweise: Terhardt 1974, Goldstein 1974 und Wightman 1973). Im Zusammenhang damit wurden auch einige neue Vorstellungen über Konsonanz und Dissonanz eingearbeitet (Abschnitt 5.2). Abschnitt 2.9 ist neu und enthält eine kurze Beschreibung der Hauptinformationskanäle im Hörsystem. Die Spezialisierung der Hirnhemisphären im Hinblick auf Sprach- und Musikverarbeitung ist Thema des neuen Abschnittes 5.4. In den „physikalischen“ Abschnitten wurden nur einige wenige Korrekturen und Klarstellungen vorgenommen. Wir halten den Charakter des vorliegenden Buches jetzt für noch „interdisziplinärer“ als in seiner ersten Auflage.

Zahlreiche kritische Anmerkungen aus der Leserschaft fordern weitere Abbildungen und mehr ausgesprochen musikalische Beispiele und schlagen die Einbeziehung von Problemen und Fragen vor, die für Vorlesungen von praktischem Nutzen sind. Leider ist es zur Zeit unmöglich, diese Monographie zu einem richtiggehenden Lehrbuch zu erweitern. Wenn jedoch dieses anspruchsvolle Interesse anhält, könnte ich mich zu einem späteren Zeitpunkt durchaus dazu entschließen. Ein erster kleiner Schritt in dieser Richtung ist die Hinzufügung des Anhangs III, der sich mit einigen didaktischen Aspekten befaßt.

Denver, Januar 1975

JUAN G. ROEDERER

Inhalt

1 Musik, Physik und Psychophysik	1
1.1 Die beteiligten physikalischen Systeme	1
1.2 Charakteristische Eigenschaften musikalischer Klänge	3
1.3 Der Zeitfaktor in der Musik	5
1.4 Physik und Psychophysik	7
1.5 Was ist Musik?	12
2 Schallschwingungen, reine Töne und die Wahrnehmung der Tonhöhe	15
2.1 Bewegung und Schwingung	15
2.2 Einfache harmonische Bewegung	19
2.3 Akustische Schwingungen und die Empfindung reiner Töne	21
2.4 Überlagerung reiner Töne: Schwebungen erster Ordnung und die Frequenzgruppe	28
2.5 Andere Effekte erster Ordnung: Kombinationstöne und Ohr- Obertöne	37
2.6 Effekte zweiter Ordnung: Schwebungen verstimmter Kon- sonanzen	41
2.7 Grundtonerkennung (“fundamental tracking”)	45
2.8 Verschlüsselung von Toninformation im peripheren Nerven- system	50
2.9 Subjektive Grundtonhöhe und die Rolle des Zentralnerven- systems	56
3 Schallwellen, akustische Energie und die Wahrnehmung von Lautstärke	69
3.1 Elastische Wellen, Kraft, Energie und Leistung	69
3.2 Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge und akustische Leistung	74
3.3 Überlagerung von Wellen; stehende Wellen	84

3.4	Intensität, Schall-Intensitätspegel und Lautstärke	87
3.5	Der Lautstärke-Wahrnehmungsmechanismus und damit zusammenhängende Prozesse	99
4	Erzeugung musikalischer Klänge, komplexe Töne und die Wahrnehmung der Klangfarbe	103
4.1	Stehende Wellen in einer Saite	103
4.2	Erzeugung komplexer stehender Wellen in Saiteninstrumenten	108
4.3	Schallschwingungsspektren und Resonanz	117
4.4	Stehende Längswellen in einer idealisierten Luftsäule	127
4.5	Erzeugung komplexer stehender Schwingungen in Blasinstrumenten	132
4.6	Klangspektren von Blasinstrumenten	139
4.7	Reflexion und Absorption von Schall in geschlossenen Räumen	142
4.8	Wahrnehmung der Tonhöhe und der Klangfarbe von musikalischen Tönen	147
4.9	Erkennung musikalischer Klänge	153
5	Überlagerung und Zeitfolge komplexer Töne und die Wahrnehmung von Musik	159
5.1	Überlagerung komplexer Töne	159
5.2	Die Empfindung musikalischer Konsonanz und Dissonanz	163
5.3	Aufstellung von musikalischen Tonleitern	170
5.4	Die Standardskala und der Tonhöhenstandard	175
5.5	Warum gibt es Tonleitern, und warum erleben wir musikalische Empfindungen?	179
5.6	Die Aufteilung von Sprach- und Musikverarbeitung auf beide Hirnhälften	184
	Anhang I. Einige quantitative Aspekte des Streichmechanismus	191
	Anhang II. Einige quantitative Aspekte neuerer Modelle der zentralen Tonhöhenverarbeitung	195
	Anhang III. Einige Bemerkungen zum Unterricht des Faches „Physik und Psychophysik der Musik“	205
	Literatur	209
	Namen- und Sachverzeichnis	215