

Iván Egry

Die Physik der Musik und ihrer Instrumente

Von Schallschnellen, Wolfstönen und Liebesfüßen



Inhaltsverzeichnis

[Cover](#)

[Titelblatt](#)

[Impressum](#)

[Vorwort](#)

[1 Einleitung](#)

[Literatur](#)

[2 Akustik](#)

[2.1 Einleitung](#)

[2.2 Die Wellengleichung](#)

[2.3 Lautstärke](#)

[2.4 Harmonische Wellen](#)

[2.5 Helmholtz-Gleichung](#)

[2.6 Erzwungene Schwingungen](#)

[2.7 Frequenzanalyse](#)

[2.8 Zeit-Frequenz-Analyse](#)

[2.9 Schallausbreitung in Festkörpern](#)

[Literatur](#)

[3 Musik](#)

[3.1 Die Notenschrift](#)

[3.2 Tonintervalle](#)

[3.3 Tonleitern, Tonarten und Akkorde](#)

[Literatur](#)

[4 Instrumente](#)

[4.1 Klassifizierung](#)

[Literatur](#)

[4.2 Saiteninstrumente](#)

[Literaturhinweise](#)

[4.3 Blasinstrumente - Grundlagen](#)

[Literatur](#)

[4.4 Blechblasinstrumente](#)

[Literatur](#)

[4.5 Die Orgel](#)

[Literatur](#)

[4.6 Holzblasinstrumente](#)

[Literatur](#)

[5 Zusammenfassung](#)

[Liste der Symbole](#)

[Stichwortverzeichnis](#)

[Wiley End User License Agreement](#)

Tabellenverzeichnis

Kapitel 3

[Tab. 3.1 Notenbezeichnungen.](#)

[Tab. 3.2 Oktavbezeichnungen und Tonhöhen.](#)

[Tab. 3.3 Frequenzen der eingestrichenen Oktave auf Grundlage des Kammertons \$a' = \dots\$](#)

[Tab. 3.4 Tempobezeichnungen.](#)

[Tab. 3.5 Tonintervalle der reinen Stimmung.](#)

[Tab. 3.6 Beziehung der n-ten Harmonischen zu Akkordintervallen der reinen Stimmu...](#)

[Tab. 3.7 Tonintervalle in der reinen und gleichstufig temperierten Stimmung.](#)

[Tab. 3.8 Tonintervalle in Halbtonschritten der Dur- und Moll-Tonleitern. Dur- un...](#)

[Tab. 3.9 Tonintervalle der gebräuchlichsten Kirchentonarten. Dur- und Moll-Tetra...](#)

Kapitel 4

[Tab. 4.1 Pedalstellungen der Harfe.](#)

[Tab. 4.2 Dicken und Zugspannungen von Gitarrensaiten \(D'Addario EJ46\).](#)

[Tab. 4.3 Größenverhältnisse, Stimmung und Tonumfang innerhalb der Geigenfamilie.](#)

[Tab. 4.4 Beispiele für konische oder zylindrische Instrumente mit offenem oder g...](#)

[Tab. 4.5 Einschwingzeiten von Blechblasinstrumenten. \(Nach I.W. Bergbaur\).](#)

[Tab. 4.6 Lage der Naturtöne.](#)

[Tab. 4.7 Wirkungsweise der Trompetenventile.](#)

[Tab. 4.8 Ventilkombinationen für chromatische Spielweise.](#)

[Tab. 4.9 Einschwingzeiten von Holzblasinstrumenten. \(Nach I. W. Bergbaur\).](#)

[Tab. 4.10 k-Werte für die Lochpositionen gemäß Dur-Tonleiter.](#)

[Tab. 4.11 Tonumfang und Größe der Blockflötenfamilie.](#)

[Tab. 4.12 Notation und Tonumfang der Querflötenfamilie.](#)

[Tab. 4.13 Notation und Tonumfang der Klarinettenfamilie.](#)

[Tab. 4.14 Notation und Tonumfang der Saxofonfamilie.](#)

[Tab. 4.15 Tonumfang der Oboenfamilie.](#)

Abbildungsverzeichnis

Kapitel 1

[© A. Egry.](#)

Kapitel 2

[Abb. 2.1 Eine ebene Welle \(a\) © F. Balck; und eine zweidimensionale Kugelwelle \(...\)](#)

[Abb. 2.2 Laufende Welle \(a\) und stehende Welle \(b\).](#)

[Abb. 2.3 Umrechnung nach Phon und Isophone nach ISO 226:2003.](#)

[Abb. 2.4 Impedanz einer harmonischen stehenden Welle.](#)

[Abb. 2.5 Zweidimensionale Kugelwelle.](#)

[Abb. 2.6 Resonanzkurve eines harmonischen Oszillators bei unterschiedlichen Dämp...](#)

[Abb. 2.7 Schwebung zweier Töne mit \$\delta\omega/\omega_0 = 4\%\$.](#)

[Abb. 2.8 Zeitdarstellung von \(a\) Sägezahn- \(b\) Rechteck- und \(c\) Dreieckschwingu...](#)

[Abb. 2.9 Fourier-Koeffizienten von Sägezahn-, Rechteck- und Dreieckschwingung, n...](#)

[Abb. 2.10 Zeitsignal \(a\); Fourierspektrum \(b\) und Wasserfalldiagramm \(c\) eines M...](#)

[Abb. 2.11 Ein Gabor-Wavelet mit \$\tau = 0\$, \$\sigma = 1\$, \$\nu = 2\$.](#)

[Abb. 2.12 Verhältnis der transversalen und longitudinalen Schallgeschwindigkeit ...](#)

Kapitel 3

[Abb. 3.1 Notenschlüssel.](#)

[Abb. 3.2 Notenund Pausenlängen.](#)

[Abb. 3.3 Beispiel einer Partitur.](#)

[Abb. 3.4 Frequenzverhältnisse in Cent.](#)

[Abb. 3.5 Cent-Skala auf einem digitalen Stimmgerät. \(© Korg\).](#)

[Abb. 3.6 C-Dur-Tonleiter.](#)

[Abb. 3.7 C-Moll-Tonleitern.](#)

[Abb. 3.8 Die Blues-Tonleiter.](#)

[Abb. 3.9 Pentatonische Tonleitern.](#)

[Abb. 3.10 C-Dur und A-Moll als Paralleltonarten.](#)

Kapitel 4

[Abb. 4.1 Mundstücke verschiedener Blasinstrumente: \(a\) \(Orgel-\)Pfeife Michaelmep...](#)

[Abb. 4.2 Das Theremini von moog. © Moog Music.](#)

[Abb. 4.3 Ein symphonisches Orchester in amerikanischer Aufstellung. Bild: Matsta...](#)

[Abb. 4.4 Die Glenn Miller Big Band. © Glenn Miller Orchestra.](#)

[Abb. 4.5 \(a\) Ein historischer Helmholtzresonator aus Messing für den Ton „sol3“,...](#)

[Abb. 4.6 Mündungskorrektur als Funktion der Wellenlänge. Nach Levine und Schwing...](#)

[Abb. 4.7 Die ersten drei Schwingungsmoden einer beidseitig eingespannten Saite.](#)

[Abb. 4.8 Fingerpositionen zur Erzielung von Flageolet-Tönen.](#)

[Abb. 4.9 Die Ausgangslage einer gezupften Saite.](#)

[Abb. 4.10 Das Frequenzspektrum einer bei \$L/2\$ und \$L/3\$ gezupften Saite.](#)

[Abb. 4.11 Eine Konzertharfe. © Salvi-Minerva.](#)

[Abb. 4.12 Die Pedale einer Harfe. © victoria1998/Adobe Stock.](#)

[Abb. 4.13 Gitarrentypen: \(a\) Konzertgitarre, \(b\) Banjo, \(c\) Mandoline und \(d\) E-...](#)

[Abb. 4.14 Position der Gitarrenbünde auf dem Griffbrett.](#)

[Abb. 4.15 Abstand zwischen zwei Gitarrenbünden in Prozent der Saitenlänge \$L\$.](#)

[Abb. 4.16 Der Kapodaster. © Tom Haubner/Gitarrenratgeber.de.](#)

[Abb. 4.17 Längenverhältnisse und Positionen der Bünde beim Einsatz eines Kapodaster...](#)

[Abb. 4.18 Admittanz einer Gitarre. Senkrechte Striche entsprechen dem Ton E in s...](#)

[Abb. 4.19 Ein Cimbalom. Bild: Habrda/Adobe Stock.](#)

[Abb. 4.20 Frequenzspektrum geschlagener Saiten für \$\beta = 1/4\$.](#)

[Abb. 4.21 Konzertflügel \(a\) und Klavier \(Piano\) \(b\). © Steinway & Sons/Wikimedia ...](#)

[Abb. 4.22 Modell einer Repetitionsmechanik mit Filzkopf und Dämpfern. A: Taste, ...](#)

[Abb. 4.23 Anschlagposition \$\beta\$ des Hammers in Abhängigkeit von der Tonhöhe.](#)

[Abb. 4.24 Anharmonizitätskoeffizienz B von Klaviersaiten als Funktion der Freque...](#)

[Abb. 4.25 Das Railsback-Diagramm zeigt die Abweichung von der wohltemperierten S...](#)

[Abb. 4.26 Helmholtz-Bewegung einer gestrichenen Saite.](#)

[Abb. 4.27 Sägezahnschwingung einer gestrichenen Saite in Abhängigkeit der Bogenp...](#)

[Abb. 4.28 Der Einschwingvorgang der ersten fünf Harmonischen bei einer Violine. ...](#)

[Abb. 4.29 Verschiedene Schwingungsformen einer gestrichenen Saite. © P. Galluzzo...](#)

[Abb. 4.30 Das Schelleng-Diagramm zeigt den Bereich zulässiger Bogenkräfte als Fu...](#)

[Abb. 4.31 Schelleng-Diagramm in linearer Auftragung. Eingetragen ist auch die Di...](#)

[Abb. 4.32 Ein Geigenbogen. © S. Dirr.](#)

[Abb. 4.33 Aufbau einer Geige \(schematisch\).](#)

[Abb. 4.34 Eine „silent violin“ © Yamaha Music Europe GmbH.](#)

[Abb. 4.35 Chladnische Klangfiguren auf einer modellhaften Geigendecke \(a-d\): 145...](#)

[Abb. 4.36 Admittanz einer Geige \(schematisch\). Senkrechte Striche entsprechen de...](#)

[Abb. 4.37 Zusammenwirken zwischen Saite, Steg und Korpus einer Geige.](#)

[Abb. 4.38 Simulation des Wolfstons. Obere Kurve: Saitengeschwindigkeit am Ort de...](#)

[Abb. 4.39 Der Wolfston Antiresonator im Einsatz auf einem Bass. Es ist das metal...](#)

[Abb. 4.40 Ein Sordino auf einer Geige. © J. Heidenreich.](#)

[Abb. 4.41 Kumulierte Häufigkeit des A-Werts für die drei Geigenklassen.](#)

[Abb. 4.42 Die Geigenfamilie: Geige, Bratsche, Cello. © Geigenbau Leonhardt.](#)

[Abb. 4.43 Ein elektronischer Kontrabass. © Yamaha Music Europe GmbH.](#)

[Abb. 4.44 Tonumfang der Geigenfamilie.](#)

[Abb. 4.45 Kontra-C-Verlängerung bei einem Kontrabass. © G. Pianzola Bern.](#)

[Abb. 4.46 Größenverhältnisse innerhalb der Geigenfamilie: Ideale und tatsächlich...](#)

[Abb. 4.47 Blockschalbild eines Blasinstruments mit Rückkopplung zwischen schwin...](#)

[Abb. 4.48 Ein Horn \(Längsschnitt\).](#)

[Abb. 4.49 Die Volumenänderung im Horn durch eine Schallwelle.](#)

[Abb. 4.50 Endliches konisches Horn mit Öffnung bei \$x = x_1\$.](#)

[Abb. 4.51 Druckverteilung in einem offenen Zylinderrohr.](#)

[Abb. 4.52 Druckverteilung in einem geschlossenen Zylinderrohr.](#)

[Abb. 4.53 Druckverteilung in einem konischen Rohr.](#)

[Abb. 4.54 Graphische Lösung der Eigenwertgleichung für ein endliches konisches R...](#)

[Abb. 4.55 Die Frequenz der ersten 8 Eigenfrequenzen beim Übergang von konischem ...](#)

[Abb. 4.56 Anharmonizität der Obertöne für ein unvollständig konisches Rohr für R...](#)

[Abb. 4.57 Typische Eingangsimpedanz einer Posaune. © A. Braden.](#)

[Abb. 4.58 Impedanz eines Zylinders mit \$\(Z\(0\)/Z_c\)^2 = 0,05\$ \(a\) und \$\(Z\(0\)/Z_c\)^2 - 2 = 0...\$](#)

[Abb. 4.59 Die drei Typen von Ventilen bei Blasinstrumenten. Nach Fletcher.](#)

[Abb. 4.60 Der Volumenfluss \$v\$ als Funktion der Mundöffnung \$x\$.](#)

[Abb. 4.61 Druck im Mundstück \(linke Skala\) und Querschnittsfläche der Mundöffnung...](#)

[Abb. 4.62 Signalhorn \(a\). ©EMD Music; Jagdhorn \(b\). © Musikhaus Kirstein GmbH.](#)

[Abb. 4.63 Blechblasinstrumente: \(a\) Posaune. © MUSIK MEYER GmbH; \(b\) Trompete. © ...](#)

[Abb. 4.64 Tonumfang ausgewählter Blechblasinstrumente.](#)

[Abb. 4.65 Die Dynamik von Blechblasinstrumenten.](#)

[Abb. 4.66 Trompetenmundstück \(a\) und Hornmundstück \(b\). © Mundstückbau Bruno Til...](#)

[Abb. 4.67 Die Lage der ersten 6 Naturtöne in musikalischer Notation.](#)

[Abb. 4.68 Melodie des Hornsignals „Rückzug“.](#)

[Abb. 4.69 Ventilkombinationen für chromatische Spielweise der Trompete.](#)

[Abb. 4.70 Impedanzkurve einer Trompete mit den ersten acht Naturtönen. Eingezeic...](#)

[Abb. 4.71 Funktionsweise von Trompetenventilen: Das Drehventil \(a in Aufsicht\) u...](#)

[Abb. 4.72 Klassische Trompete mit Drehventil \(a\) und Jazztrompete mit Périnetven...](#)

[Abb. 4.73 Einschwingverhalten der Trompete für den Ton \$f\$ \(nach Backhaus\).](#)

[Abb. 4.74 Verschiedene Dämpfertypen. a-e: Straight - Cup - Bucket - Harmon - Plu...](#)

[Abb. 4.75 Dynamikumfang der Trompete mit verschiedenen Dämpfern pianissimo \(unte...](#)

[Abb. 4.76 Differenzspektren für den geschlossenen Plunger und den Bucket. © M. B...](#)

[Abb. 4.77 Kornett \(a\) und Taschentrompete \(b\). © MUSIK MEYER GmbH.](#)

[Abb. 4.78 Eine Aida-Trompete mit einem Ventil. © Thein Brass OHG.](#)

[Abb. 4.79 Das Flügelhorn. © Thein Brass OHG.](#)

[Abb. 4.80 Die Familie der BÜgelhörner: \(a\) Althorn. © MUSIK MEYER GmbH; \(b\) Teno...](#)

[Abb. 4.81 Ein F/B Doppelhorn. © Gebr. Alexander.](#)

[Abb. 4.82 Ein Sousaphon in B. © Miraphone eG.](#)

[Abb. 4.83 Impedanzvergleich zwischen gestopften und ungestopften Hörnern. \(a\) ni...](#)

[Abb. 4.84 Tenorposaune mit Quartventil \(a\) und Bassposaune mit Quart- und Terzve...](#)

[Abb. 4.85 Posaunenzugpositionen zwischen 3. und 2. Harmonischen.](#)

[Abb. 4.86 Die Lage der Zugpositionen mit und ohne Quartventil. MUSIK MEYER GmbH.](#)

[Abb. 4.87 Die Orgel der Konzerthalle in Madison. © Archiv Klais.](#)

[Abb. 4.88 Spieltisch der Orgel in der Kathedrale Notre-Dame de Paris. © Pufui Pc...](#)

[Abb. 4.89 Rotierende Leslie-Lautsprecher. DukeHammond/Wikimedia Commons/Public_D...](#)

[Abb. 4.90 Lingualpfeifen mit aufschlagender Zunge. © J. Schuke.](#)

[Abb. 4.91 Spanische Trompeten der Wilbrand Orgel in der Basilika zu Seligenstadt...](#)

[Abb. 4.92 \(a\) metallische Labialpfeifen. © Michaelmep/138 images/Pixabay; \(b\) La...](#)

[Abb. 4.93 Schwingung des Luftblatts innerhalb einer halben Periode. © Reprinted ...](#)

[Abb. 4.94 Auslenkung des Luftblatts als Funktion des Abstands von der Kernspalte...](#)

[Abb. 4.95 Die turbulente kinetische Energie der Strömung am Labium nach 5 ms \(a\)...](#)

[Abb. 4.96 Die Einschwingzeiten verschiedener Orgelregister als Funktion der Tonh...](#)

[Abb. 4.97 Einschwingzeiten der einzelnen Teiltöne einer offenen metallischen Lab...](#)

[Abb. 4.98 Eine gedackte hölzerne Orgelpfeife. © Archiv Klais.](#)

[Abb. 4.99 Mündungskorrekturen bei geschlossenen und offenen Orgelpfeifen.](#)

[Abb. 4.100 Frequenzspektren verschiedener Orgelpfeifen als Funktion der harmonis...](#)

[Abb. 4.101 Längen- und Weitenmessur nach Töpfer \(L/L1, D/D1\) als Funktion der no...](#)

[Abb. 4.102 Holzblasinstrumente \(a\) Querflöte, \(b\) Klarinette, \(c\) Oboe, \(d\) \(Sop...](#)

[Abb. 4.103 Eine Klappentrompete. © Institute of Interpretation Bern University o...](#)

[Abb. 4.104 Tonumfang der Holzblasinstrumente.](#)

[Abb. 4.105 Die Dynamik der Holzbläser.](#)

[Abb. 4.106 Frequenzverhältnis der Obertöne für Besselhörnern mit Bessel-Exponent...](#)

[Abb. 4.107 Querschnitt durch ein zylindrisches Horn mit geschlossenen Tonlöchern...](#)

[Abb. 4.108 Größe und Lage der Tonlöcher \(schematisch\).](#)

[Abb. 4.109 Größe und Lage eines einzelnen Lochs.](#)

[Abb. 4.110 Die Lochkorrektur als Funktion des Lochradius \$B = \(b/r\)^2\$ für verschie...](#)

[Abb. 4.111 Die Lochkorrektur \$\Delta x_k\$ als Funktion des Parameters \$Q_k = t/L\(r/b\)^2\$ für ...](#)

[Abb. 4.112 Ein Gabelgriff. Schwarze Löcher sind geschlossen, weiße geöffnet.](#)

[Abb. 4.113 Eine Tenor- und zwei Sopranblockflöten. © F. Balck.](#)

[Abb. 4.114 Fourierspektrum einer Querflöte für den Ton f. © R. Nave, Hyperphysi...](#)

[Abb. 4.115 Querflöte mit Kopf-, Mittel- und Fußstück. © Pearl Musical Instrument...](#)

[Abb. 4.116 Mundplatte einer Querflöte. © Pearl Musical Instrument Co.](#)

[Abb. 4.117 Der Stimmkork einer Querflöte.](#)

[Abb. 4.118 Piccolo\(a\) und Bassflöte \(b\). © Pearl Musical Instrument Co.](#)

[Abb. 4.119 Fourierspektren der verschiedenen Register einer Klarinette. © R. Nav...](#)

[Abb. 4.120 Einschwingverhalten der Klarinette für den Ton a'. Nach Backhaus.](#)

[Abb. 4.121 Vergleich Oehlerklarinetten \(a\) und Boehmklarinetten \(b\). © Moennig-Adl...](#)

[Abb. 4.122 Fingersatz für c', g' und e'''. Geschlossene Löcher sind schwarz markiert.](#)

[Abb. 4.123 Klarinettenmundstück.](#)

[Abb. 4.124 Ein Klarinettenblatt.](#)

[Abb. 4.125 Volumenfluss am Klarinettenmundstück als Funktion der Druckdifferenz....](#)

[Abb. 4.126 Frequenzänderung als Funktion der Blattöffnung für verschiedene Werte...](#)

[Abb. 4.127 Die Klarinettenfamilie: Bassklarinetten, Basshorn, Klarinetten. © He...](#)

[Abb. 4.128 Stimmung der Klarinettenfamilie.](#)

[Abb. 4.129 Das Tárogató. © Ch. Ledermann.](#)

[Abb. 4.130 Tenorsaxophon mit aufgesetztem Mundstück. © Yamaha Music Europe GmbH.](#)

[Abb. 4.131 Frequenzspektrum Altsaxophon für den Ton Es in 3 Oktaven.\)](#)

[Abb. 4.132 Die Saxophonfamilie: Sopran- \(a\), Alt- \(b\), Tenor- \(c\) und Baritonsaxo...](#)

[Abb. 4.133 Der Korpus einer Oboe. © Moennig-Adler.](#)

[Abb. 4.134 Doppelrohrblatt einer Oboe. © Kreedo e. K.](#)

[Abb. 4.135 Volumenfluss am Oboenmundstück als Funktion der Druckdifferenz.](#)

[Abb. 4.136 Frequenzspektrum von Oboe und Fagott für das mittlere c'. Rohdaten wi...](#)

[Abb. 4.137 Die Familie der Doppelrohrblattinstrumente: Oboe \(a\), Englischhorn \(b...](#)

[Abb. 4.138 Daumenklappen beim Fagott: linker Daumen \(a\) und rechter Daumen \(b\).](#)

Die Physik der Musik und ihrer Instrumente

**Von Schallschnellen, Wolfstönen und
Liebesfüßen**

Iván Egry



Autor

Prof. Dr. Iván Egry

Am Alten Bahndamm 16a

52072 Aachen

Deutschland

Titelbild

Unter Verwendung einer Abbildung von GettyImage, ID 140364867/daitoZen (Guitar Strings).

Alle Bücher von WILEY-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2022 Ernst & Sohn GmbH, Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Print ISBN 978-3-527-41411-6

ePDF ISBN 978-3-527-83695-6

ePub ISBN 978-3-527-83696-3

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

„Ein Leben ohne Musik ist möglich, aber sinnlos“

(frei nach Loriot)

Vorwort

Dieses Buch hat eine lange Vorgeschichte. Immer schon habe ich mich für die Rolle der Physik auf Gebieten interessiert, die nicht zu ihrem klassischen Anwendungs- und Forschungsbereich gehören, wie z. B. die Physik im Sport oder eben auch in der Musik. Während meines aktiven Berufslebens fehlte mir dafür aber leider die Zeit und Muße. Mit dem Ruhestand drängten diese alten Ideen wieder nach vorne, und so entstand mein Buch über die Physik des Golfs, während meine Pläne für ein Buch über die Physik in der Musik weiter verstaubten. Den Ausschlag gaben schließlich Gespräche und Diskussionen mit Profimusikern, bei denen mir klar wurde, wieviel Nachholbedarf in dieser Hinsicht besteht (um es mal positiv auszudrücken). Dazu kam die erfreuliche Reaktion des Verlags, als ich anfangs meinen Vorschlag, ein solches Projekt in Angriff zu nehmen, vortrug. Dann kam die Coronapandemie, und ich hatte auf einmal viel Zeit und nichts zu tun. In dieser Hinsicht hatte der Lockdown auch seine guten Seiten, die natürlich all den Kummer und das Leid, den der Lockdown verursachte, nicht aufwiegen können.

Die Literaturrecherchen zu diesem Thema führten zurück bis ins 19. Jahrhundert und es zeigte sich, dass große Koryphäen der Physik auf diesem Feld tätig gewesen waren, darunter Helmholtz und Rayleigh. (Anekdote aus Oxford: Beim Dinner fragt die Dame ihren professoralen Tischherrn: „In which fields are you working?“ und er antwortet: „I am not working in the fields.“) Mit Aufkommen der Relativitäts- und Quantentheorie gab es aber auf einmal spannendere Aufgaben und die theoretische Akustik versank in einen Dornröschenschlaf.

Durch die Möglichkeiten der modernen Computer und die Entwicklung der elektronischen Musik bekam das Gebiet neuen Auftrieb, weil es jetzt nicht nur möglich war, die komplizierten Differentialgleichungen numerisch zu lösen und Klangentstehung in komplexen Geometrien zu simulieren, sondern auch, weil es neben der Analyse analoger Musik auch gelang, Klänge synthetisch herzustellen.

Dieses Buch kann und soll nicht alle Details der musikalischen Akustik behandeln, aber es soll einen Ein- und Überblick darüber geben, worum es bei diesem Thema geht und was die Physik zur Lösung praktischer Probleme beitragen kann.

An dieser Stelle ist es unbedingt erforderlich, den vielen Menschen zu danken, die zum Gelingen (sagen wir: zur Fertigstellung) dieses Buches beigetragen haben. An allererster Stelle möchte ich meiner Frau Sabine danken, die mich nicht nur bei der Literaturbeschaffung tatkräftig unterstützt hat, sondern auch meine zeitweilige schlechte Laune, wenn es mal wieder nicht weiter ging, ertragen musste. Mein Bruder Andreas hat die Karikaturen gezeichnet, die hoffentlich zum Lesevergnügen beitragen werden. Dafür nochmal herzlichen Dank! Gute Freunde haben die erste Fassung kritisch durchgelesen und dafür gesorgt, dass sprachliche und inhaltliche Fehler gefunden und korrigiert werden konnten. Dies gilt insbesondere für Dr. Susanne Schröder und Prof. Hans-Walter Staudte. Herrn Dr. Andreas Sendtko und Dr. Martin Preuß vom Verlag Wiley-VCH danke ich für ihre freundliche und professionelle Unterstützung. Nicht zuletzt möchte ich den Kollegen, Verlagen und Firmen danken, die mir Abdruckgenehmigungen für die zahlreichen Abbildungen erteilt haben.

Abschließend möchte ich den Lesern danken, dass sie sich für dieses Buch entschieden haben und wünsche ihnen viel Freude und Erkenntnisgewinn beim Lesen.

Aachen, im Dezember 2021

Iván Egry

1

Einleitung

Musik ist ein universales und universelles Phänomen. Sie ist in allen Kulturkreisen vorhanden und sie begleitet uns von der Wiege bis zur Bahre. (Neueren Forschungen zufolge kann bereits der Fötus im Mutterleib Musik wahrnehmen.) Musik kommt in der Natur vor, z. B. als Vogelgezwitscher oder auch als Pfeifen des Windes, und sie ist eine Kunstform. Unser Sinnesorgan zur Wahrnehmung von Tönen und also auch von Musik, ist das Ohr. Musik löst bei jedem Zuhörer Emotionen aus, wenn sie auch manchmal als störend empfunden wird, „dieweil sie mit Geräusch verbunden“. Was genau Musik ist, lässt sich allerdings kaum definieren. Jeder Versuch einer Definition scheitert daran, dass er Randbereiche ausschließt, die, je nach Sichtweise, auch zur Musik gehören. In jedem Fall ist Musik eine zeitliche Abfolge von Tönen (Geräuschen?), die zueinander in Beziehung stehen.

Es ist aber auch gar nicht die Aufgabe dieses Buches, das Wesen der Musik zu ergründen. Es geht vielmehr darum, zu diskutieren, wie Musik gemacht wird, eben um die Physik der Musikinstrumente. Der Teilbereich der Physik, der sich mit diesen Fragen beschäftigt, ist die Akustik, genauer die musikalische Akustik. Leider ist dieses Fach aus den meisten Curricula an deutschen Hochschulen verschwunden; auch weltweit gibt es nur wenige Orte, wo zu diesem Thema aktiv geforscht wird. Das ist umso erstaunlicher, da die Musik und ihre Entstehung seit jeher Physiker¹⁾ fasziniert haben, und viele Physiker auch selbst musiziert haben, z. B. Albert Einstein. Das mag daran liegen, dass die Musik in ihrer Struktur der Mathematik sehr ähnlich ist. Die Frequenzen von Tönen, deren

Zusammenklingen wir als harmonisch empfinden, stehen in einem einfachen numerischen Verhältnis zueinander, und auch der Rhythmus bzw. die Länge der Noten wird durch einfache Brüche definiert: 4/4-Takt, 3/4-Takt usw. Etwas plakativ könnte man formulieren, dass Musik Mathematik hörbar macht.

Die großen Koryphäen der Musiktheorie sind zuallererst Pythagoras und Herrmann von Helmholtz, aber auch der indische Physiker C.V. Raman, der in anderem Zusammenhang (für die nach ihm benannte Raman-Spektroskopie) 1930 den Nobelpreis erhielt und – selbstverständlich – J.W. Strutt (der spätere Baron Rayleigh) mit seinem Buch *The Theory of Sound*. Diese Forscher haben die Grundlagen durch ihre experimentellen und theoretischen Arbeiten gelegt, auf denen alle späteren Entwicklungen beruhen. Ende des 19. und zu Beginn des 20. Jahrhunderts gab es noch keine Computer, und die obengenannten Untersuchungen basieren auf aufwendigen analytischen Näherungen der konstitutiven Gleichungen der Akustik. H. von Helmholtz äußerte in seinem Buch die Befürchtung, dass sich diese Probleme wohl nie zufriedenstellend würden lösen lassen. Heutzutage kann man mit Hochgeschwindigkeitskameras die Schallschwingungen sichtbar machen und mit kommerzieller Software die Schallerzeugung und Schallausbreitung in beliebig geformten Hohlräumen simulieren.

Zur Musiktheorie und insbesondere zur Physik der Musikinstrumente gibt es zahlreiche Bücher und Veröffentlichungen, die meisten in englischer Sprache, aber auch einige in Deutsch. Das moderne Standardwerk ist zweifelsohne das Buch von N.H. Fletcher und T.D. Rossing: *The Physics of Musical Instruments*. Leider ist dieses Buch sehr mathematisch und auch für den Fachmann schwer zu lesen. Auf der anderen Seite gibt es viele Versuche, dieses

Gebiet dem Laien ohne mathematische Kenntnisse näherzubringen. Hier sind die Bücher von A.H. Benade hervorzuheben, von denen einige auch auf Deutsch erschienen sind, z. B. *Musik und Harmonie*. Manche dieser Bücher scheitern daran, dass sie im Bestreben, allgemein verständlich zu sein, zu stark vereinfachen. Schon Einstein hat gesagt: „Make it as simple as possible, but not simpler.“ Dann gibt es viele Bücher, die sich auf einen speziellen Aspekt oder ein spezielles Instrument konzentrieren. In dieser Hitliste führen die Klarinette und die Geige mit weitem Abstand. Selbstverständlich ist auch auf diesem Gebiet das Internet eine fast unerschöpfliche Quelle. Hier gilt es allerdings, die Spreu vom Weizen zu trennen. Herausragend ist die Website der University of New South Wales (Sydney, Australien). Sie ist didaktisch perfekt aufbereitet und erlaubt auch einen tieferen Einstieg in die Theorie der Musikinstrumente. Ein fantastisches Projekt ist das ständig weiterentwickelte E-Book *Euphonics – The Science of Musical Instruments* von Jim Woodhouse unter <https://euphonics.org>. Ebenfalls lohnenswert ist die Instrumentenkunde der Vienna Symphonic Library.

Angesichts dieser Vielfalt von Veröffentlichungen ist die Frage berechtigt, wozu dieses neue Buch gut sein soll. Zunächst einmal wendet sich dieses Buch in gleicher Weise an Physiker und Musiker. Physik ist nicht Selbstzweck, sondern soll helfen, die Grundlagen der Musik besser zu verstehen. Der Anspruch und das Konzept dieses Buches sind, möglichst einheitlich und systematisch die Physik der Musik und der Musikinstrumente darzustellen. Nur so wird das zugrunde liegende Prinzip sichtbar, und man erkennt, auf wie unterschiedliche Weise die einzelnen Instrumentengattungen die Prinzipien der Klangerzeugung in die Praxis umsetzen. Auf der anderen Seite muss man sich klar machen, dass dieses Gebiet sowohl in Breite als auch in Tiefe so gut wie unerschöpflich ist. Daher bin ich

um eine Auswahl nicht herumgekommen; das war eine der großen Herausforderungen beim Schreiben dieses Buches. Diese Auswahl ist sicherlich subjektiv und trägt den externen wie auch meinen eigenen Beschränkungen Rechnung. So wird man vergeblich z. B. nach psychoakustischen, historischen und sozialen Aspekten der Musik suchen. Auch die Raumakustik, wie sie beim Entwurf von Konzertsälen eine Rolle spielt, wird in diesem Buch nicht behandelt. Bei den Instrumenten habe ich mich auf die beiden wichtigsten Gruppen, die Saiten- und Blasinstrumente, beschränkt.

Wenn man die Wirkungsweise der einzelnen Instrumente nicht nur beschreiben, sondern auch verstehen will, geht das nicht ohne Mathematik. Hier gilt es, sich in der Tiefe zu beschränken. Das angestrebte mathematische Niveau geht über populärwissenschaftliche Veröffentlichungen hinaus, ist aber weniger anspruchsvoll als das einer Fachpublikation. Da jede Formel – auch in einem Sachbuch – die Gefahr birgt, Leser vom Weiterlesen abzuschrecken, habe ich versucht, ihre Anzahl so gering wie möglich zu halten und auf langwierige Herleitungen verzichtet. Die meisten Formeln lassen sich mit Kenntnissen der Schulmathematik verstehen. Einige wenige Formeln, insbesondere Differentialgleichungen, gehen darüber hinaus. Für den naturwissenschaftlich gebildeten Leser enthalten sie relevante Information in Kurzform, für die anderen wird die Bedeutung und der Inhalt dieser Gleichungen in Prosa erklärt und meist auch mit Hilfe von Grafiken veranschaulicht. Da wir uns im Wesentlichen mit Schallwellen beschäftigen werden, ist die Kenntnis der trigonometrischen Funktionen (Sinus- und Kosinusfunktion) hilfreich.

Das Buch beginnt mit einer kurzen Einführung in die Akustik. Dies ist ein mathematisch anspruchsvolles Kapitel. Im Sinne Machiavellis habe ich die größtmögliche

Grausamkeit an den Anfang des Buches gestellt. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Begriffe wie Schallgeschwindigkeit, Wellenlänge und Frequenz eingeführt und ihr Zusammenhang erläutert. Als wichtiges Hilfsmittel für die Frequenzanalyse wird die Fouriertransformation eingeführt.

Das nächste Kapitel behandelt die eigentliche Musiktheorie. Töne, Obertöne, Akkorde, Tonleitern und die verschiedenen Stimmungen (reine Stimmung, wohltemperierte Stimmung) werden diskutiert. Der Leser erfährt, dass „Cent“ in der Musiktheorie keine Währungseinheit und „Komma“ kein Satzzeichen ist. Es ist dieses Kapitel, in dem der enge Zusammenhang zwischen Mathematik und Musik besonders sichtbar wird.

Die folgenden Kapitel sind das Kernstück des Buches und behandeln die Physik der Musikinstrumente. Dabei beschränken wir uns auf die beiden wichtigsten Instrumentklassen, die Saiten- und die Blasinstrumente. Saiteninstrumente heißen auch Chordophone („Saitenklinger“), und die Blasinstrumente sind Aerophone („Luftklinger“). Wir verzichten auf die Diskussion der Perkussionsinstrumente (Trommel, Pauke, Becken, Xylophon ...) , weil sie sich durch ihr Prinzip der Tonerzeugung zu stark von den beiden oben genannten Gruppen unterscheiden. Genauso fehlt das archaischste aller Musikinstrumente: die menschliche Stimme. Im Grunde genommen gehört sie zur Gruppe der Chordophone, wobei die Stimmbänder die Rolle der Saiten übernehmen. Um die Stimmbildung zu verstehen, bedarf es neben physikalischer auch anatomischer Kenntnisse. Sie zu modellieren und mathematisch zu beschreiben, ist sehr kompliziert und würde den Rahmen dieses Buches sprengen.



© A. Egry.

Jedes Kapitel enthält auch ein Literaturverzeichnis, in dem sowohl die verwendete als auch weiterführende Literatur zur Vertiefung des jeweiligen Themas angegeben ist. Es erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und ist eine rein subjektive Auswahl.

Alles in allem soll dieses Buch sowohl ein Lesebuch als auch ein Nachschlagewerk sein. Manche Musiker werden vielleicht das eine oder andere Aha-Erlebnis haben und ihr Instrument besser verstehen. Interessierte Physiker werden womöglich überrascht sein über die komplexen Zusammenhänge bei der Tonentstehung. Ihnen sei gesagt, dass die in diesem Buch vorgestellten Theorien und Modelle in jedem Fall das Prinzip korrekt wiedergeben, aber nicht ausreichen, subtile Details vollständig abzubilden. In seinem Buch erzählt Benade, dass Instrumentenbauer geringschätzig auf die physikalischen Modelle herabschauen, weil sie weit hinter ihrer handwerklichen Erfahrung zurückbleiben. Das hat sich seitdem grundlegend geändert, beleuchtet aber die grundsätzliche Problematik.

Übrigens: Wer das Buch bis zu Ende gelesen hat, wird auch erfahren, was es mit Schallschnellen, Wolfstönen und Liebesfüßen auf sich hat.

Literatur

Die beiden Klassiker sind zweifelsohne:

- Helmholtz, H. (1981). *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Frankfurt am Main: Minerva Verlag; (im Original erschienen bei Vieweg, Braunschweig, 1863).
- Strutt, J.W. (2011). *The Theory of Sound*. Cambridge University Press; (im Original erschienen bei MacMillan, London, 1877).

Die heutigen Standardwerke sind:

- Fletcher, N.H. und Rossing, T.D. (1998). *The Physics of Musical Instruments*, Heidelberg: Springer.
- Hall, D. (2008). *Musikalische Akustik*. Schott: Mainz.
- Hirschberg, A., Kergomard, J. und Weinreich, G. (Hrsg.) (1995). *Mechanics of Musical Instruments*. New York: Springer.
- Chaigne, A. und Kergomard, J. (2016). *Acoustics of Musical Instruments*. New York: Springer.
- Nederveen, C.J. (1998). *Acoustical Aspects of Woodwind Instruments*, revised edition. Northern Illinois University Press.
- Campbell, M., Gilbert, J. und Myers, A. (2021). *The Science of Brass Instruments*. New York: Springer.

Fast formelfreie lesenswerte Bücher sind:

- Benade, A.H. (1960). *Musik und Harmonie – Die Akustik der Musikinstrumente*. München: Kurt Desch Verlag.
- Winkler, K. (1992). *Die Physik der Musikinstrumente*. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, Akademischer Verlag.
- Reuter, C. und Auhagen, W. (2014). *Musikalische Akustik*. Laaber: Laaber Verlag.

Vorträge und Dokumente im Internet:

- Lücke, W. (2003). Theorie zur Physik der Musikinstrumente, www.wolfgangluecke.de/skripten/musi.pdf (zuletzt aufgerufen am 13.08.2021).
- Kemp, Y. (2010). Die Physik der Musikinstrumente, <https://www.desy.de/~kemp/talks/music/19012010/19012010.html> (zuletzt aufgerufen am 13.08.2021).
- Lohse, T. und zur Nedden, M. (2007). Die Physik der Musikinstrumente, wwwhera-b.desy.de/people/nedden/lectures/02_03/musik/musik.ppt (zuletzt aufgerufen am 13.08.2021).
- Lapp, D. (o. J.). The Physics of Music and Musical Instruments, <http://kellerphysics.com/acoustics/Lapp.pdf> (zuletzt aufgerufen am 13.08.2021).
- Website der University of New South Wales (Sydney, Australien) (o. J.). <http://newt.phys.unsw.edu.au/music/> (zuletzt aufgerufen am 13.08.2021).
- Instrumentenkunde der Vienna Symphonic Library (2002–2022). <https://www.vsl.co.at/de/Academy/Instrumentology> (zuletzt aufgerufen am 13.08.2021).

- Webseite von J. Woodhouse (o. J.). Euphonics – The science of musical instruments. <https://euphonics.org> (zuletzt aufgerufen am 04.10.2021)
- Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC) (2013). <http://www.speech.kth.se/smac-smc-2013> (zuletzt aufgerufen am 13.08.2021).

Darüber hinaus enthält natürlich Wikipedia <https://de.wikipedia.org/wiki/Musik#> (zuletzt aufgerufen am 13.08.2021) viele exzellente Seiten zu Akustik und Musikinstrumenten.

1) In Ermangelung einer besseren Lösung wird in diesem Buch durchgängig das generische Maskulinum verwendet. Damit sind alle Menschen, unabhängig vom Geschlecht, in gleicher Weise und gleichberechtigt gemeint.