



Science Networks · Historical Studies  
Band 19

Herausgegeben von Erwin Hiebert und Hans Wußing

In Zusammenarbeit mit:

K. Anderson, Aarhus  
D. Barkan, Pasadena  
H.J.M. Bos, Utrecht  
U. Bottazzini, Bologna  
J.Z. Buchwald, Toronto  
K. Chemla, Paris  
S.S. Demidov, Moskva  
E.A. Fellmann, Basel  
M. Folkerts, München  
P. Galison, Cambridge  
I. Grattan-Guinness, Bengeo

J. Gray, Milton Keynes  
R. Halleux, Liège  
S. Hildebrandt, Bonn  
E. Knobloch, Berlin  
Ch. Meinel, Regensburg  
W. Purkert, Leipzig  
D. Rowe, Mainz  
A.I. Sabra, Cambridge  
R.H. Stuewer, Minneapolis  
V.P. Vizgin, Moskva

Dieter Ullmann  
**Chladni und die  
Entwicklung der Akustik  
von 1750-1860**

1996

Birkhäuser Verlag  
Basel · Boston · Berlin

Autorenadresse:

Dr. Dieter Ullmann  
Institut für Mathematik  
Universität Potsdam  
Postfach 601553  
D-14415 Potsdam

A CIP catalogue record for this book is available from the Library of Congress,  
Washington D.C., USA

Deutsche Bibliothek – CIP -Einheitsaufnahme

**Ullmann, Dieter:**

Chladni und die Entwicklung der Akustik : 1750-1860 /

Dieter Ullmann. - Basel ; Boston ; Berlin : Birkhäuser, 1996

(Science networks ; Vol. 19)

ISBN-13: 978-3-0348-9941-3

e-ISBN-13: 978-3-0348-9195-0

DOI: 10.1007/978-3-0348-9195-0

NE: GT

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

© 1996 Birkhäuser Verlag, Postfach 133, CH-4010 Basel, Schweiz

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1996

Camera-ready Vorlage durch den Autor erstellt

Gedruckt auf säurefreiem Papier, hergestellt aus chlorfrei gebleichtem Zellstoff. TCF ∞



Meiner Frau INGEBORG

und unseren Kindern FRANK, LARS, VERONIKA, CHRISTOPH und JAN gewidmet

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort	IX
1. Akustik in der Zeit um 1750	1
2. Kindheit, Jugend und Studienjahre CHLADNIS	7
3. Arbeitsjahre in Wittenberg	
3.1 Das Erstlingswerk "Entdeckungen über die Theorie des Klanges" (1787)	13
3.2 Biegeschwingungen von Stäben und Platten. Die Klangfiguren	17
3.3 Musikinstrumentenbau in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts	33
3.4 CHLADNIS Euphon (1790)	41
4. Die Zeit 1790-1802	
4.1 Erste Reisejahre	47
4.2 Begegnung mit LICHTENBERG und die Meteoritenschrift von 1794	53
4.3 Dehnungs- und Torsionsschwingungen von Stäben	59
4.4 Akustische Begriffsbestimmungen	65
4.5 Die Schallgeschwindigkeit in Festkörpern	69
4.6 Die Schallgeschwindigkeit in Gasen	75
4.7 Der Clavicylinder	83
4.8 Musikinstrumentenbau der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts	87
5. Das Hauptwerk "Die Akustik"	
5.1 Entstehung, Aufbau und Inhalt des Buches	91
5.2 Begegnung mit NAPOLÉON und die Übersetzung ins Französische	95
5.3 Auswirkungen des Buches auf die Akustikforschung bis 1860	99
6. Die Zeit 1803-1815	
6.1 Reisen in Europa	115
6.2 Schallausbreitung in der Atmosphäre über große Entfernungen	123
6.3 Die mathematische Behandlung der Biegeschwingungen von Platten	127

7. Die letzten Lebensjahre	
7.1 Das Werk "Neue Beyträge zur Akustik"	131
7.2 Das Meteoritenthema wird in das Vortragsprogramm aufgenommen	137
7.3 Das Gebäude der Berliner Singakademie und die Akustik geschlossener Räume	143
7.4 Letzte Schriften und Tod	157
8. Auswirkungen auf die Akustik bis zum Auftreten von HELMHOLTZ	
8.1 Die Arbeiten SAVARTS	163
8.2 Das Problem der Klangfarbe	173
8.3 Kombinationstöne	181
8.4 Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten	187
8.5 Mit HELMHOLTZ beginnt eine neue Ära der Akustikforschung	191
9. Literaturverzeichnis	203
10. Personenregister	227
11. Sachregister	233

## Vorwort

Die Akustik ist ein Gebiet, das erstaunlicherweise in der wissenschaftshistorischen Literatur nur relativ selten zu finden ist. Darstellungen längerer Epochen in der Entwicklung dieses Fachgebietes haben noch größeren Seltenheitswert. Nach dem Zweiten Weltkrieg erschien bisher lediglich F.V. HUNTS "Origins in acoustics", das im wesentlichen die Zeitepoche von der Antike bis NEWTON beschreibt. Ein Buch, das in gewisser Weise als eine Fortsetzung betrachtet werden kann, ist CANNON/DOSTROVSKYS "The evolution of dynamics: Vibration theory from 1687 to 1742". Es setzt jedoch gemäß seinem Titel ganz bestimmte Akzente. Mit NEWTONS "Principia" von 1687 beginnt eine Periode ausgesprochen theoretischer Forschung auf dem Gebiet der Akustik, für die Namen wie z.B. TAYLOR, SAUVEUR, EULER, D'ALEMBERT, JOHANN und DANIEL BERNOULLI Zeugnis ablegen. Dieses Überwiegen der Theorie wird 1787 mit dem Auftreten CHLADNIS wieder zugunsten des Experiments verschoben. Da es über die Tätigkeit der eben genannten Forscher bereits einige ausführliche Darstellungen gibt, beginnt die detaillierte Betrachtung in diesem Buch erst im Erscheinungsjahr von CHLADNIS Erstlingswerk.

Ziel dieses Buches ist es, nicht nur die akustischen Arbeiten CHLADNIS zu beschreiben, sondern auch seinen Einfluß auf die Forschung bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts aufzuzeigen. Insbesondere wird die bahnbrechende Wirkung seiner Monographie "Die Akustik" aus dem Jahre 1802 ausführlich besprochen. Erst mit dem Eintritt von HELMHOLTZ in die akustische Forschung 1855 beginnt eine neue Ära, in der auch die Arbeiten der Physiologen und der Psychologen an Bedeutung gewinnen. Die Biographie CHLADNIS wird nur soweit beschrieben, wie sie für seine wissenschaftlichen Arbeiten von Bedeutung ist. Für alle weitergehenden biographischen Fragen benutze man die Bibliographien bei POGGENDORFF (POGGENDORFF 1969a, 135-137) und ULLMANN (ULLMANN 1983a, 71-72).

Soweit es im Rahmen einer populärwissenschaftlichen Reihe, die einen größeren Leserkreis ansprechen soll, möglich war, hat der Verfasser bereits in einer Biographie des Wittenberger Physikers 1983 eine Beschreibung der Ziele dieses Buches versucht. Ein Jahr später wurde von ihm eine Art Programm zu diesem nun vorliegenden Buch vorgestellt

(ULLMANN 1984a). Es dokumentiert in überzeugender Weise, was aus der Zusammenarbeit von Physikern, Mathematikern, Musikern, Musikinstrumentenbauern und auch Architekten im betrachteten Zeitraum entstanden ist.

Viel verdanke ich meinem im Februar 1995 verstorbenen Lehrer und Doktorvater KURT SCHUSTER, bei dem ich in Jena vor vierzig Jahren in die Akustik eingeführt wurde. Während der Ausarbeitung des Manuskripts waren mir zahlreiche Freunde und Kollegen in vielen Fragen behilflich. Ich nenne hier nur die Herren Prof. Dr. CLAUS LANGE (Dresden) und Dr. sc. WALTER WESSEL (Berlin). Ihnen sage ich meinen besonderen Dank.

Der Verfasser möchte, last but not least, dem Birkhäuser Verlag, insbesondere den Herausgebern und Frau D. WÖRNER, für die angenehme Zusammenarbeit herzlich danken.

Berlin, Sommer 1995

Dieter Ullmann

## 1. Akustik in der Zeit um 1750

Die akustischen Grundkenntnisse zu Beginn des 18. Jahrhunderts kann man in vier Punkten zusammenfassen:

1. Schall beruht auf schneller Kompression eines Mediums - wie z.B. Luft - und darauffolgender Verdünnung oder umgekehrt.
2. Ein musikalischer Ton ist ein schnell wiederholter Schall; seine Höhe kann mit der Frequenz seiner Schwingung identifiziert werden. Nur Töne eines bestimmten Frequenzbereichs sind hörbar.
3. Die Schallgeschwindigkeiten aller hörbaren Töne in Luft sind gleich.
4. Eine Schallquelle kann viele, voneinander verschiedene Töne aussenden. Die Töne, die sie einzeln aussendet, kann sie auch gleichzeitig emittieren. Der tiefste dieser Töne heißt Grundton. Die anderen Töne, die Obertöne oder Harmonische (auch Partialtöne) genannt werden, gehören, wenn sie einzeln erzeugt werden, zu Bewegungen mit bestimmten, bewegungslosen Stellen, die Schwingungsknoten genannt werden (nach DOSTROVSKY/BELL/TRUESDELL 1980a, 665-666).

Diese Ergebnisse beruhen auf Untersuchungen einer Vielzahl von Forschern des 17. Jahrhunderts. GALILEO GALILEI (1564-1642) beschrieb 1638 in seinem Werk "Discorsi" am Ende des 1. Tages auch Versuche, die für die Akustik von Bedeutung sind. Am Beispiel der Saite wurde die Erscheinung der Resonanz erklärt. GALILEI setzte auf eine Viola ein mit Wasser gefülltes Glas. Bei Resonanz zwischen Saite und Glas konnte man das Mitschwingen direkt an den Wellen der Wasseroberfläche sehen. GALILEI fand für Saitenschwingungen, daß deren Frequenz  $\nu$  umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Dichte  $\rho$  ist. Etwa zur gleichen Zeit entdeckte MARIN MERSENNE (1588-1648), daß die Frequenz der schwingenden Saite außerdem direkt proportional der Quadratwurzel aus der Spannkraft  $F$  und umgekehrt proportional der Saitenlänge  $l$  und der Quadratwurzel des Querschnitts  $q$  ist:

$$\nu = (1/l)(F/q\rho)^{1/2}. \quad (1.1)$$

Der Franzose erkannte auch schon die Bedeutung der Obertöne und sagte, daß bei Saitenschwingungen ihre Frequenzen im Verhältnis 1:2:3:4:... stehen.

MERSENNE maß den ersten Wert für die Schallgeschwindigkeit in Luft (LENIHAN 1951a; ULLMANN 1982a). Die Zeit zwischen der Sichtbarkeit des Mündungsfeuers einer Kanone und dem Eintreffen des Schalls bei einem entfernten Beobachter wurde gemessen und mit der bekannten Entfernung zwischen Geschütz und Beobachter die Schallgeschwindigkeit berechnet. Als Ergebnis erhielt MERSENNE den viel zu hohen Wert von 230 toises/s = 448 m/s (1 toise = 1,949 m). In seiner "Harmonie universelle" von 1636 findet man noch eine zweite Meßmethode, bei der die Zeit zwischen dem Direktschall und dem Echo gemessen wird, wobei die Entfernung zur reflektierenden Wand, die das Echo hervorruft, bekannt war. Nach dieser Methode erhielt MERSENNE einen Wert von 162 toises/s = 316 m/s für die Schallgeschwindigkeit in Luft, ein Wert, der der Wirklichkeit schon bedeutend näher war. Die Diskrepanz konnte nicht beseitigt werden. Es fällt auf, daß MERSENNE in seinen späteren Werken den höheren Wert bevorzugte.

Bereits 1667 wurden durch die Accademia del Cimento in Florenz neue Werte für diese wichtige Größe der Akustik publiziert (ULLMANN 1982a, 28-29).

Nach einer Idee von ATHANASIOS KIRCHER (1602-1680) aus dem Jahre 1643 hatte OTTO V. GUERICKE (1602-1686) 1653/54 und unabhängig von ihm ROBERT BOYLE (1627-1691) 1660 im Rezipienten eine Glocke aufgehängt. Pumpte man den Rezipienten luftleer, so hörte man den Schlag der Glocke immer schwächer. Daraus wurde gefolgert, daß Schall - im Unterschied zu Licht - zur Ausbreitung ein Medium braucht (ULLMANN 1980a).

Der experimentelle Nachweis der Flageolettöne gelang 1674 den Engländern WILLIAM NOBLE (?-1681) und THOMAS PIGOT (?-1686). Bei den Streichinstrumenten werden die Töne durch leichte Berührung der Saite an den Stellen erzeugt, die dem Drittel, Viertel usw. der Saitenlänge entsprechen. NOBLE und PIGOT benutzten zur Sichtbarmachung der Schwingungsknoten und -bäuche aufgesetzte Papierreiter, die an den Schwingungsknoten liegenbleiben, im Bereich der Schwingungsbäuche aber abgeworfen werden (MILLER 1935a, 23; TRUESDELL 1960a, 118-119).

Bedeutende akustische Arbeiten veröffentlichte um 1700 der Franzose JOSEPH SAUVEUR (1653-1716) (DOSTROVSKY 1975a, 201-204, 206-209). Er untersuchte genauer das Schwebungsphänomen, das man schon länger kannte. Wenn die Frequenzen zweier gleichzeitig erklingender, starker Schallquellen nur wenig differieren, so hört man eine amplitu-

denmodulierte Schwingung, die sogenannte Schwebung. SAUVEUR erkannte, daß die Frequenz der Schallintensität sich aus der Differenz der Frequenzen der beiden Schallquellen ergibt. Auf diesem Weg gelang ihm auch die Ermittlung der absoluten Frequenz der Töne. Über das Monochord kannte man bisher nur Frequenzverhältnisse. Durch Abstimmung zweier Orgelpfeifen auf ein musikalisches Intervall, dessen Frequenzverhältnis über das Monochord bestimmt war, und durch Messung der Schwebungen gelangen SAUVEUR die ersten genaueren Messungen absoluter Tonfrequenzen, nachdem sich hier schon früher MERSENNE auf einem anderen Wege versucht hatte, jedoch mit recht ungenauen Ergebnissen. Von SAUVEUR stammen übrigens auch die Begriffe Schwingungsknoten und Schwingungsbauch.

Mit der Aufstellung der Differential- und Integralrechnung durch GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ (1646-1716) und ISAAC NEWTON (1643-1727) hatte man einen Kalkül, der der weiteren Entwicklung der Mechanik ungeahnte Möglichkeiten erschloß. In NEWTONS Hauptwerk "Philosophiae naturalis principia mathematica", das 1687 in erster Auflage erschien, wurde die Frage nach der Schallfortpflanzung in elastischen Medien das erste Mal vom Standpunkt der Theorie behandelt. Als Ergebnis seiner Untersuchungen ergab sich für den Zusammenhang zwischen Fortpflanzungsgeschwindigkeit  $c$ , Druck  $p$  und Dichte  $\rho$  die Formel

$$c = (p/\rho)^{1/2}, \quad (1.2)$$

aus der für Luft unter Normalbedingungen ein viel zu niedriger Wert für  $c$  resultierte (vgl. Kap. 4.6). Dieser Zwiespalt zwischen Theorie und Experiment hat NEWTON stark beschäftigt, und er gab in den folgenden Auflagen (1713 und 1726) seines Buches verschiedene Gründe an, die eine Korrektur des nach (1.2) berechneten Wertes ergeben würden (DOSTROVSKY 1975a, 209-218).

Mit der Differential- und Integralrechnung hatte man nun aber auch das Instrument in der Hand, die Saitenbewegung, die für die Schallerzeugung von grundlegender Bedeutung ist, mathematisch zu behandeln. Die schwingende Saite ist zudem ein Beispiel, wie man für kleine Auslenkungen ein Problem der Kontinuumsmechanik ohne Materialgesetz lösen konnte, denn die Saite ist - analog zur Membran - ein Körper, der erst durch Spannung elastisch wird.



Der Engländer BROOK TAYLOR (1685-1731) war der erste, der 1713 eine Lösung für die schwingende Saite angab. Er ging von zwei Hypothesen aus. Zunächst nahm er an, daß die Saitenkrümmungen proportional zu den Auslenkungen sind. Zweitens setzte er die Beschleunigungen der Punkte einer schwingenden Saite den diesen Punkten zugeordneten Krümmungen proportional. Damit gelang die Herleitung eines Ausdruckes für die Frequenz, der mit dem experimentell ermittelten Resultat von MERSENNE übereinstimmte. TAYLORS Saite schwingt nur in der Grundform, alle Teile befinden sich zu jedem Zeitpunkt auf der gleichen Seite der Ruhelage und erreichen sie zu gleicher Zeit. Alle Saitenpunkte haben also die gleiche Schwingungszeit. TAYLOR erkannte aber auch, daß die Saite der Länge  $l$  außer dem Grundton auch den Grundton einer halb, drittel, viertel usw. so langen, gleichbeschaffenen Saite abgeben kann. Daß die Saite sich bei ihrer Schwingung von selbst in mehrere Teile aufspaltet und diese Teile schwingen, als ob jeder Teil eine ganze Saite sei, das wußte TAYLOR noch nicht. Die Erweiterung der TAYLORSchen Methode auf Teilschwingungen höherer Ordnung gelang erst einige Jahre später (SZABÓ 1987a, 318-326; DOSTROVSKY/CANNON 1987a, 51-54).

JEAN BAPTISTE LE ROND D'ALEMBERT (1717-1783) ging in seiner Arbeit aus dem Jahre 1747 (gedruckt 1749) ebenfalls vom Theorem von TAYLOR aus, nach dem die beschleunigende Kraft bei der (kleinen) Auslenkung  $y$  einer Saite von der  $z$ -Achse der Krümmung proportional sei. D'ALEMBERT kam zur Wellengleichung, deren Lösung bei den Randbedingungen  $y(0,t)=0=y(l,t)$  und bei der Anfangsbedingung  $y(s,t=0)=0$  zu

$$y(s,t) = f(t+s) - f(t-s) \quad (1.3)$$

angegeben wurde, wobei  $f(t+2l)=f(t)$ , d.h. von der Periode  $2l$  ist.  $s$  ist dabei die Bogenlänge, und für kleine Auslenkungen ist  $ds = dz$  (SZABÓ 1987a, 328-334; DOSTROVSKY/CANNON 1987a, 66-67).

DANIEL BERNOULLI (1700-1783) baute 1753 die allgemeine Lösung der Wellengleichung durch die Superposition von Einzellösungen auf. Seine Überlegungen basieren auf Beobachtungen an Musikinstrumenten:

... alle schwingenden Körper [können] eine Unmenge von Tönen von sich geben ... aber diese Vielfalt der Schwingungen bei der Saite verschweigen die Herren d'Alembert und Euler; sie war aber Herrn Taylor nicht unbekannt ... In der Tat stimmen alle Musiker darin

überein, daß eine gezupfte Saite außer ihrem Grundton zugleich auch noch andere, sehr viel hellere Töne von sich gibt ... Dies ist der offensichtliche Beweis dafür, daß sich in einer und derselben Saite eine Überlagerung mehrerer Arten Taylorscher Schwingungen zugleich einstellen kann. (BERNOULLI 1755a, 151-152)

Die einzelnen Schwingungen der Saite sind nach BERNOULLI von der Form

$$y_n = A_n \cdot \sin(n\pi z/l) \cdot \cos(n\pi ct/l) \quad , \quad (1.4)$$

wobei  $n$  eine ganze positive Zahl ist und  $c$  sich aus dem Ausdruck für die Frequenz der Saitenschwingungen ergibt. Die allgemeine Lösung ist dann wegen der Linearität der Wellengleichung

$$y(z,t) = \sum y_n \quad (n = 1, \dots, \infty). \quad (1.5)$$

Daß die BERNOULLISCHE Lösung (1.5) der D'ALEMBERTSchen (1.3) nicht widerspricht, ergab sich erst viele Jahrzehnte später aus den Arbeiten von JEAN BAPTISTE JOSEPH FOURIER (1768-1830). Der Aufbau der allgemeinen Lösung (1.5) aus den Teilschwingungen rief nun den Widerspruch von D'ALEMBERT, LEONHARD EULER (1707-1783) und JOSEPH LOUIS LAGRANGE (1736-1813) hervor, überhaupt ist die Geschichte der Theorie der schwingenden Saite eine Folge von Kontroversen, insbesondere zwischen D'ALEMBERT, EULER und BERNOULLI (LINDSAY 1966a, 631-632). EULER war es unmöglich, anzunehmen, daß eine analytisch gegebene, nicht-periodische Kurve durch eine trigonometrische Reihe dargestellt werden kann. Weder bei BERNOULLI noch bei EULER spielt die Frage nach der Bestimmung der Koeffizienten  $A_n$  in (1.4) eine Rolle, obwohl sich beide Forscher in ihren Arbeiten mit dem Summieren von trigonometrischen Reihen beschäftigt haben (SZABÓ 1987a, 343-346). Auch der junge JOSEPH LOUIS LAGRANGE hat sich 1759 und 1760/61 mit zwei umfangreichen Arbeiten unter anderem der Theorie der schwingenden Saite gewidmet (LAGRANGE 1759a/1760/61a; SZABÓ 1987a, 346-350). Sein Untersuchungsgegenstand besteht aus  $n$  diskreten Massenpunkten  $m$ , die in äquidistanten Abständen auf der vorgespannten und masselosen Saite aufgereiht sind. Er löste das Problem als dynamisches System mit endlich vielen Freiheitsgraden. Dann führte LAGRANGE den Grenzübergang  $n \rightarrow \infty$  durch, wobei  $m$  endlich bleibt. Ziel der Arbeit war die Bestätigung der Ergebnisse von EULER; BERNOULLIS

Lösung gegenüber blieb LAGRANGE ablehnend.

Die Theorie der Stabschwingungen erforderte - im Unterschied zu der der Saitenschwingungen - Kenntnisse aus der Elastomechanik. EULER und DANIEL BERNOULLI haben hier in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts wichtige Arbeiten geliefert (s. Kap. 3.2). Ausgangspunkt war ein Ausdruck für die Formänderungsenergie, die in einem Stab infolge Verbiegung aufgespeichert wird, und die Durchführung einer Variationstechnik, bei der dieser Ausdruck minimiert wird (SZABÓ 1987a, 375-385).

Auch die theoretische Behandlung der Schwingungen von Orgelpfeifen wurde von EULER und BERNOULLI in Angriff genommen (s. Kap. 5.3). EULER hatte 1746 einen Beitrag zur schwingenden Membran geleistet, dem zweidimensionalen Gegenstück zur gespannten Saite (s. Kap. 5.3). Sein Interesse für Zahlentheorie fand auch in der Untersuchung der musikalischen Konsonanz und Dissonanz ihren Niederschlag. Mit der Gradus-suavitatis-Funktion wird jedem musikalischen Intervall eine positive ganze Zahl zugeordnet, die Konsonanzgrad genannt wird (MAZZOLA 1990a, 56-58; DOSTROVSKY/CANNON 1987a, 71-73).

Wie dieser skizzenhafte Überblick über die Entwicklung der Akustik um 1750 zeigt, war die mathematische Behandlung von Schwingungsproblemen, die für die Lehre vom Schall wichtig waren, bereits weit entwickelt. Es fehlten jedoch systematische experimentelle Untersuchungen für dieses Gebiet. Mit CHLADNIS Erstlingswerk von 1787 kündigte sich hier eine Wende an. Darüber hinaus hat die einsetzende Entwicklung der experimentellen Akustik - wie auf den folgenden Seiten noch gezeigt wird - auch Lösungen spezieller elastizitätstheoretischer Probleme eingeleitet.

## 2. Kindheit, Jugend und Studienjahre CHLADNIS

Die Universität Wittenberg, 1502 gegründet, erlebte ihre Glanzzeit in den Jahrzehnten danach, als MARTIN LUTHER (1483-1546) und PHILIPP MELANCHTHON (1497-1560) dort als akademische Lehrer wirkten. Im 18. Jahrhundert war die Blütezeit dieser Universität längst vorbei. Trotzdem lag diese Hochschule mit fast 800 Studenten in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts noch über dem Durchschnitt der deutschen Universitäten. Erst der Siebenjährige Krieg brachte einen Tiefpunkt. Die Zahl der Studenten sank unter 400 ab. Die Stadt, die damals noch 5000 Einwohner hatte, wurde von den Preußen besetzt. Im Oktober 1760 erlitt Wittenberg durch die Österreicher und die Rheinarmee starke Zerstörungen und kapitulierte. Nach diesem Niedergang erlebte die Universität insbesondere durch die Tätigkeit einiger hervorragender Rechtsgelehrter eine kurze Erholungsphase, die Studentenzahl kletterte kurzfristig wieder über die Zahl 700 hinaus (JUNGHANS 1979a, Klapptafel).

Als Ordinarius wirkte in dieser Zeit an der juristischen Fakultät ERNST MARTIN CHLADNI (1715-1782). Seine Vorfahren stammten aus der heute in der Slowakei liegenden Stadt Trenčín (deutsch: Trentschin, ungarisch: Trencsén) an der Waag, die seit dem Mittelalter zum Königreich Ungarn gehörte und dann Teil der habsburgischen Monarchie war (ERSCH/GRUBER 1828a, 14-15)<sup>1</sup>. GEORG CHLADNI floh 1673 wegen seines evangelischen Glaubens während der Verfolgung der Protestanten in Ungarn unter LEOPOLD I. (1640-1705) nach Deutschland und wurde 1680 Prediger in Hauswalde in der Oberlausitz. Dessen Sohn MARTIN (1669-1725) studierte in Wittenberg Theologie, war ab 1719 Propst an der dortigen Schloßkirche und latinisierte seinen Namen zu Chladenius. Von seinen drei Söhnen blieb der jüngste, der oben genannte Jurist ERNST MARTIN in Wittenberg. Er heiratete am 22.10.1753 die Tochter JOHANNA SOPHIA des Hofgerichtsprotonotars JOHANN FRIEDRICH CLEMENT.

Die Hauptstraßen des mittelalterlichen Wittenberg liefen parallel zur Elbe und stießen in der Mitte der Stadt auf den Marktplatz mit Rathaus und Stadtkirche. Östlich vom Markt führte die Mittelstraße vom Marktplatz zum Elstertor. Im Haus Mittelstr. 5 wurde am 30.

---

<sup>1</sup> das slowakische Wort "chladný" bedeutet "kühl"

November 1756 als erstes Kind des Ehepaares ERNST MARTIN und JOHANNA SOPHIA CHLADNI der Sohn ERNST FLORENS FRIEDRICH geboren. In dem noch aus dem Mittelalter stammenden Haus hatte in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts der Ratsherr und Buchhändler BARTHOLOMÄUS VOGEL (gest. 1569) ein Verlagsgeschäft betrieben. 1743 erwarb



Abb. 2.1. E.F.F. CHLADNI. Nach einer Lithographie von LUDWIG A. VON MONTMORILLON (Foto: Staatsbibliothek zu Berlin. Preußischer Kulturbesitz)



Abb.2.2. CHLADNIS Geburtshaus, Wittenberg, Mittelstr. 5 (rechts)

es JOHANN FRIEDRICH CLEMENT und 1762 dessen Schwiegersohn ERNST MARTIN CHLADNI<sup>2</sup>. Ursprünglich war das Gebäude nur zweigeschossig. 1814 wurden die Dachgiebel abgetragen und ein durchgehendes zweites Obergeschoß erbaut (BELLMANN et al. 1979a, 140). Zu dem Grundstück gehörte eine private Wasserleitung. Den Anschluß konnten sich nur wohlhabende Bürger, meist Universitätsprofessoren, leisten. Mittels hölzerner Röhren, wozu durchbohrte Kiefernstämmen benutzt wurden, gelangte seit dem 16. Jahrhundert gutes Trinkwasser von den nächsten Fläminghöhen nördlich der Stadt in die Zapfsäulen in den Höfen der angeschlossenen Häuser. Erst mit dem Bau der städtischen Wasserleitung 1884 verloren diese "Röhrenwässer" ihre Bedeutung.

Der Jurist ERNST MARTIN CHLADNI war im Sommersemester 1757 Rektor der Universität. So hatte er das Recht, seinen kaum einjährigen Sohn ERNST FLORENS FRIEDRICH am 11.10.1757 in die Matrikel der Universität eintragen zu lassen (JUNTKE 1966a, 68). Ziel des Vaters war es von Anfang an, aus seinem Sohn gleichfalls einen tüchtigen Juristen werden zu lassen.

CHLADNI wuchs als Einzelkind auf, denn eine 1759 geborene Tochter ERNESTINE

<sup>2</sup> Angaben über die Geschichte des Hauses verdankt der Autor dem Hauseigentümer, Herrn OSWALD KARIUS (1981)

starb schon 5 Monate nach der Geburt. 1761 verlor er die Mutter, und ERNST MARTIN CHLADNI ging eine zweite Ehe mit JOHANNA CHARLOTTE GREIPZIGER (1725-1801) ein, die kinderlos blieb.

CHLADNI hat in einem einleitenden Kapitel seines Hauptwerkes "Die Akustik" (CHLADNI 1802a, XII-XXII) seine strenge Erziehung und entbehrungsreiche Kindheit im Elternhaus in Wittenberg selbst geschildert. Gegen Ende seines Lebens beschrieb er 1824 diese Zeit auch in einem autobiographischen Artikel für die Zeitschrift "Caecilia", der erst nach seinem Tod erschien und von der Zeitschrift als Nekrolog veröffentlicht wurde (CHLADNI 1827a):

Mein Vater ... hat mich, als einzigen Sohn, zwar immer sehr freundlich behandelt, und mir von geschickten Lehrern im Hause guten Unterricht geben lassen; ich ward aber, wiewohl in guter Absicht, immer in einer solchen Beschränkung gehalten, wie sie wohl schwerlich, bey den jetzigen Begriffen von Erziehung, gegenwärtig in irgend einem Hause Statt finden wird, so dass ich selten aus dem Hause und an die freye Luft kam, und mit andern jungen Leuten meines Alters gar keinen Umgang haben konnte. Schon damals fühlte ich, dass diese Beschränkung nicht nöthig war, und nicht für mich passte, da ich keine Neigung zu Unordnungen oder zur Unthätigkeit hatte; es ward auch dadurch ganz das Entgegengesetzte bewirkt, nämlich desto mehr Neigung zu einer Unabhängigkeit, bey welcher ich meine Verhältnisse und Beschäftigungen selbst bestimmen könnte. (CHLADNI 1827a, 297-298)

Dieser Rückblick des fast 70jährigen Physikers auf seine Kindheit erklärt so manche Besonderheiten im Leben und Wirken CHLADNIS.

Als Lieblingsbeschäftigungen gab er Naturkunde an, und hier besonders Erd- und Himmelskunde. Weiter schrieb er: "Zur Tonkunst hatte ich auch grosse Lust; es ward mir aber erst etwa im 19ten Jahre verstattet, Etwas davon zu lernen, weil man glaubte, dass ich dadurch von andern Beschäftigungen möchte zu sehr abgehalten werden" (CHLADNI 1827a, 298).

Zur weiteren Ausbildung schickte der Vater seinen Sohn auf die Landesschule Grimma, die er vom 8.5.1771 bis 21.3.1774 besuchte (FISCHER 1932a). Mit den drei Schulen in Grimma, Meißen und Schulpforte (bei Naumburg/Saale), die in säkularisierten Klöstern eingerichtet wurden, schuf sich der sächsische Staat Ausbildungsstätten für seine zukünftigen Beamten, Lehrer und protestantischen Prediger. Schulbesuch in Grimma war in der Familie CHLADNI schon Tradition, bereits der Großvater MARTIN CHLADNI war von 1683-1688 Schüler dieser Schule gewesen (FRAUSTADT 1900a).

Die strenge Erziehung im Elternhaus in Wittenberg setzte sich in Grimma gewissermaßen fort, indem der Schüler CHLADNI nicht mit den anderen im Alumnat, sondern als Extraner bei dem Altsprachler JOHANN HEINRICH MÜCKE (1735-1799) wohnte, "... wo ich zwar guten Unterricht genoss, aber, wiewohl auch in guter Absicht, fast noch beschränkter gehalten ward, als vorher im väterlichen Hause ..." (CHLADNI 1827a, 298). Mit CHLADNI wohnte auch CHRISTIAN GOTTFRIED KÖRNER (1756-1831), der spätere Vater des Dichters THEODOR KÖRNER (1791-1813), als Extraner bei MÜCKE.

Für die spätere Entwicklung CHLADNIS sind einige Lehrer der Schule von Bedeutung gewesen. Rektor in Grimma war von 1763-1782 JOHANN TOBIAS KREBS (1716-1782), Bruder des BACHschülers JOHANN LUDWIG KREBS (1713-1800). KREBS unterrichtete nur alte Sprachen, jedoch war unter den Schülern bekannt, daß er ein guter Musiker war. Da KREBS sich durch viele Besonderheiten auszeichnete - er hatte mit der Jugend Geduld, war nicht nachtragend, und durch seine vorbildliche pädagogische Arbeit genoß die Grimmaer Schule damals einen guten Ruf - wird auch der Einfluß auf CHLADNIS musikalische Interessen nicht unbedeutend gewesen sein (FISCHER 1932a).

Den Musikunterricht erteilte seit 1769 HEINRICH GOTTFRIED REICHARD (1742-1801), dessen Herkunft aus einer bekannten Schleizer Musikerfamilie für Qualität des Unterrichts bürgt. Im Nekrolog heißt es über ihn: "Er verwaltete sein Amt stets mit Eifer und Gewissenhaftigkeit, war ein treuer, friedfertiger und freundschaftlicher College, ein väterlicher Freund, Führer und Rathgeber seiner Schüler..." (SCHLICHTEGROLL 1802a, 169).

Mathematiklehrer CHLADNIS war der gebürtige Wittenberger GOTTLÖB HEINRICH RICHTER (1718-1796). Dieser erteilte keinen Physikunterricht, obwohl seine Bibliographie (MEUSEL 1811a) auch Abhandlungen über Optik enthält. CHLADNI hat noch keinen Physikunterricht in Grimma gehabt, erst nach RICHTERS Tod gab der Mathematiklehrer auch Physik.

Nach dem Schulbesuch folgte CHLADNI den Wünschen des Vaters und begann ein Jurastudium in Wittenberg. "Hierauf ward ich, ganz gegen meine Neigung, genöthigt, in Wittenberg Rechtswissenschaft zu studiren, weil mein Vater glaubte, dadurch mich am glücklichsten machen zu können. Auch in dieser Zeit war ich immer unter genauerer Aufsicht, als vielleicht irgend einer von den dort Studirenden" (CHLADNI 1827a, 298).

Dieser ständigen Bevormundung durch den Vater konnte sich der junge Mann 1778 (ERLER 1909a, 52) mit dem Wechsel zur Universität Leipzig entziehen. In dieser Zeit traten



die eigentlichen Interessen CHLADNIS immer stärker hervor: "Während der Zeit meiner Studien in Wittenberg und Leipzig erhielt ich erst Erlaubniss und Gelegenheit, etwas Klavierspielen nebst den ersten Anfangsgründen der Musik zu lernen, und suchte hernach durch Nachlesen mancher Schriften von Marpurg und Andern mir mehrere Kenntnisse in diesem Fache zu erwerben" (CHLADNI 1827a, 298).

Zur aktiven und passiven Beschäftigung mit Musik und Akustik war der Boden Leipzigs geradezu ideal. Die Stadt besaß ein reiches Musikleben. Seit 1781 gab es im Gewandhaus öffentliche Konzerte. Dazu kam, daß der Rektor der Universität - zur Zeit als CHLADNI promovierte - der Physiker CHRISTLIEB BENEDIKT FUNK (1736-1786) war. Dieser amtierte von 1763 bis 1773 auch als Kantor an der Leipziger Nikolaikirche und war als Physiker akustischen Fragen sehr zugetan. Gleich in seiner ersten berühmten Schrift von 1787 setzte sich CHLADNI mit bestimmten Vorstellungen über das Schwingen fester Körper bei FUNK auseinander (CHLADNI 1787a, 14-15).

Mit zwei Dissertationen, einer philosophischen und einer juristischen, beendete CHLADNI 1782 sein Studium in Leipzig und kehrte nach Wittenberg zurück. Am 4.3.1782 war der Vater gestorben, und das Leben CHLADNIS veränderte sich grundlegend.

### 3. Arbeitsjahre in Wittenberg

#### 3.1 Das Erstlingswerk "Entdeckungen über die Theorie des Klanges" (1787)

CHLADNI fühlte sich nach dem Tod seines Vaters für seine Stiefmutter verantwortlich. Das war auch zunächst der Hauptgrund dafür, trotz seiner schwierigen finanziellen Situation in Wittenberg zu bleiben. In einem unveröffentlichten Brief vom 24. November 1782 an einen Professor, vermutlich in Leipzig, schrieb er: "Zu dem academischen Leben mag ich mich gar nicht applicieren, sondern ich will mich mit der Praxi vor hiesigem Hofgerichte und Consistorio begnügen".<sup>3</sup> CHLADNIS eigentliche wissenschaftliche Interessen haben sich gegenüber dieser in der Briefstelle erwähnten Absicht, die nur dazu diente, seine finanzielle Lage zu verbessern, jedoch schnell durchgesetzt. Vom Wintersemester 1783 bis zum Sommersemester 1789 kündigte er unter den Dozenten der juristischen Fakultät und vom Wintersemester 1789 bis zum Sommersemester 1792 in der philosophischen Fakultät der Universität Vorlesungen an<sup>4</sup>. Anfangs las er noch über juristische Themen. Bereits im Sommersemester 1784 bot CHLADNI auch Vorlesungen über Geometrie an, denen sich später solche über mathematische Geographie hinzugesellten. Für das Sommersemester 1786 kommt das erste Mal: "gratis vero hora VIII ad IX theoriam Musices proponet", für das Wintersemester 1786: "in theoria Musices tradenda perget", für das Wintersemester 1789: "theoriam Physices quaternis diebus explicabit" und für das Sommersemester 1790: "theoriam Musices physico-mathematicam exponet, eamque experimentis, partim ab ipso inuentis, partim iam antea notis, illustrabit".

JOHANN ERNST ZEIHNER (1720-1784) bekleidete ab 1764 die erste der beiden Mathematikprofessuren an der Universität Wittenberg. Als er 1784 starb, bewarb sich CHLADNI um diese Stelle. Seine Hoffnungen auf größere wirtschaftliche Unabhängigkeit zerschlugen sich jedoch, denn beide Mathematikprofessuren wurden unter JOHANN JAKOB EBERT (1737-1805) vereinigt, der seit 1769 die untere Mathematikprofessur bekleidete (FRIEDENSBURG 1917a).

---

<sup>3</sup>Staatsbibliothek zu Berlin. Preußischer Kulturbesitz. Sammlung Darmstaedter. Sign.: F1b 1790

<sup>4</sup>Eigene Forschungen im Archiv der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg in Halle/S.

CHLADNI begann ab 1782 auch mit umfangreichen akustischen Experimenten in seiner Wittenberger Wohnung:

Ich sah es ... eine geraume Zeit hindurch als ein Hauptgeschäft an, solche klingende Körper genau zu untersuchen, die vorher noch gar nicht gehörig untersucht waren, indem die damals vorhandenen Untersuchungen sich meistens blos auf Saiten und auf die Schwingungen der Luft in Blasinstrumenten bezogen. Zuerst stellte ich über die von L. Euler und Daniel Bernoulli theoretisch untersuchten Transversalschwingungen eines Stabes, Experimente an, und sodann über die, noch von Niemanden untersuchten Schwingungen einer Fläche. (CHLADNI 1827a, 299)

Er bezog sich also auf theoretische Untersuchungen von EULER, D. BERNOULLI und GIOR-DANO RICCATI (1709-1790) (s. Kap. 3.2). Literatur, die in Wittenberg nicht zur Verfügung stand, besorgte sich CHLADNI durch Vermittlung des Leipziger Physikers und Mathematikers KARL FRIEDRICH HINDENBURG (1741-1803) aus Leipzig (EBSTEIN 1905a, 440-441).

Zur Schwingungserregung bediente sich CHLADNI nach verschiedenen anderen Versuchen schließlich des Geigenbogens. Die Anregung dazu erhielt er aus den Schriften des Bachbiographen JOHANN NICOLAUS FORKEL (1749-1818):

Da man an der Harmonika des berühmten Hrn. Fränklin<sup>2</sup> viele und große Unbequemlichkeiten gefunden hat, so hat ihr der Abt Mazzuchi eine ganz neue Einrichtung gegeben. Die Glocken sind in zwey Fuß langen Kästchen befestigt, deren Breite sich nach der Breite der Glocken richtet, denen sowohl als den dem Kästchen selbst der Künstler jede beliebige Stellung geben kann. Die Glocken werden mit einem Fiddelbogen gestrichen, dessen Haar er mit einer Mischung aus Colophonium und Terpentin oder Wachs, oder auch Seife bestreicht. (FORKEL 1779a, 321)

Die Fingerspitzen der Glasharmonikaspieler litten auf die Dauer von der Reibung an den Glockenrändern. Außerdem, so wird berichtet, waren die hohen Obertöne der Glasharmonika für die Nerven des Solisten schädlich. Deshalb hat, wie FORKEL berichtete, der italienische Abt einen Geigenbogen benutzt. CHLADNI selbst machte sich über die Anbringung einer Tastatur bei der Glasharmonika Gedanken (CHLADNI 1787a, 27), wie man überhaupt schon den ersten akustischen Arbeiten des Wittenberger Physikers anmerken kann, daß er sich mit den Anwendungen seiner Forschungsergebnisse auf den Instrumentenbau auseinandergesetzt hat.

---

<sup>2</sup>BENJAMIN FRANKLIN (1706-1790) gilt als Erfinder der Glasharmonika (1763)

Die entscheidende Anregung zur Sichtbarmachung des Schwingungsverhaltens kam von Experimenten des Göttingers GEORG CHRISTOPH LICHTENBERG (1742-1799). Im Jahre 1777 hatte er Gleitentladungen auf einem Dielektrikum durch Bestäuben mit Mennige- und Schwefelpulver sichtbar machen können. Die dabei entstehenden Figuren haben bei positiver



Abb. 3.1.1. G. CHR. LICHTENBERG (Foto: Staatsbibliothek zu Berlin, Preußischer Kulturbesitz)

und negativer Elektrode ein jeweils verschiedenes Aussehen. Nach CHLADNIS eigenen Aussagen waren es diese Figuren, die bei ihm die Idee erzeugten: "... dass wohl auch auf

klingenden Körpern sich nach Verschiedenheit der Schwingungsart verschiedene Erscheinungen zeigen würden, wenn man Etwas aufstreute" (CHLADNI 1827a, 300).

Es ist bemerkenswert, daß auch CHLADNIS zweite bedeutende wissenschaftliche Leistung, die Theorie des extraterrestrischen Ursprungs der Meteorite, auf Anregungen von LICHTENBERG zurückging (s. Kap. 4.2).

CHLADNI streute zur Sichtbarmachung des Schwingungsverhaltens von Stäben und Platten feinen Sand auf:

Alle Stellen des klingenden Körpers, an denen die Axe von den schlangenförmigen Krümmungen durchschnitten wird, lassen sich, wenn dessen Oberfläche gerade ist, und horizontal gehalten wird, sichtbar machen, wenn man vor oder bey dem Streichen etwas Sand auf dieselbe streuet, welcher von den schwingenden Stellen, öfters mit vieler Heftigkeit, heruntergeworfen wird, und an den sich nicht bewegenden Stellen liegend bleibt. (CHLADNI 1787a, 4)

CHLADNI selbst prägte für die Figuren den Begriff "Klangfigur" (CHLADNI 1787a, 19) und interpretierte sie als Knotenlinien.

Die Ergebnisse der jahrelangen Untersuchungen erschienen 1787 in Leipzig beim Verlag WEIDMANNs Erben und REICH unter dem Titel "Entdeckungen über die Theorie des Klanges" mit 11 Kupfertafeln und insgesamt 166 Figuren. Die Tafeln stammen von dem Leipziger Universitätszeichenmeister JOHANN STEPHAN CAPIEUX (1754-1813), der schon viele naturwissenschaftliche Bücher anderer Autoren illustriert hatte und darin reiche Erfahrungen besaß.

### 3.2 Biegeschwingungen von Stäben und Platten. Die Klangfiguren

CHLADNI beschrieb, wie die Klangfiguren entstehen:

Zu deutlicher Darstellung solcher Klänge wird erfordert, daß man den klingenden Körper an einer oder mehreren Stellen, die bey der verlangten Art des Klanges in Ruhe bleiben, mit den Fingern oder auf andere Art halte, den Rand desselben an einer schicklichen Stelle unter einem rechten Winkel mit dem Violinbogen streiche, und, wenn man verlangt, daß die Abtheilung des klingenden Körpers sichtbar werden soll, auf die horizontal gehaltene Oberfläche desselben Sand streue, welcher von den schwingenden Stellen heruntergeworfen wird, und auf den nicht schwingenden Stellen ruhig liegend bleibt ... Manche solcher Arten der schwingenden Bewegung lassen sich ohne viele Mühe erhalten, zu manchen andern aber ist öfters viele Gedult, und eine anhaltende Uebung in dieser Art von Versuchen nöthig ... (CHLADNI 1787a, 18-19)

Bei der Angabe der Tonhöhen betonte CHLADNI, daß es schwer sei, besonders in den höheren Oktaven, die Töne durch das Gehör richtig zu bestimmen. Er glaubt aber nicht, daß er Fehler größer als einen halben Ton gemacht habe (CHLADNI 1787a, 47).

Die Beschreibung seiner Versuche mit den Klangfiguren begann CHLADNI mit der Untersuchung von Biegeschwingungen elastischer Stäbe. CHLADNI zitierte Arbeiten von EULER (EULER 1744a, 1782a), DANIEL BERNOULLI (BERNOULLI 1751a) und GIORDANO RICCATI (RICCATI 1782a). Ausgangspunkt bei EULER, der eine Idee von DANIEL BERNOULLI verwendet hat, war die (zeitfreie) Differentialgleichung

$$d^4u/dx^4 = Ku. \quad (3.2.1)$$

In  $K$  steckt die Frequenz, die Dichte  $\rho$  und der Elastizitätsmodul  $E$  des Stabes mit dem Querschnitt  $q$ , der sich in der Ruhelage längs der  $x$ -Achse erstreckte. Die Auslenkungen  $u$  parallel zur  $z$ -Achse wurden als so klein angenommen, daß sie auf geradlinigem Wege erfolgen. EULER führte die Pendelbedingung ein, nach der jeder Punkt des Stabes wie ein isochrones Pendel schwingt, d.h., die Kraft ist proportional zur Auslenkung. Das führte ihn

auf die Gleichung (3.2.1).

Nach Art der Lagerung des Stabes unterscheidet man verschiedene Randbedingungen: 1) freie Enden, 2) unterstützte Enden (bei CHLADNI: "etwas fest"), 3) feste (eingespannte) Enden. EULER und BERNOULLI setzten am freien Ende  $d^2u/dx^2 = d^3u/dx^3 = 0$  und am festen Ende  $u = du/dx = 0$ . Die Lösungen dieses Randwertproblems (TRUESDELL 1960a, 165-170, 192-199, 322-330; CANNON/ DOSTROVSKY 1981a, 73-76, 94-102; SZABÓ 1987a, 382-385) ergeben für einen Stab der Länge  $l$  in moderner Schreibweise die Eigenfrequenzen

$$f_k = [s_k^2 / (2\pi I^2)] (EI/\rho q)^{1/2} \quad (3.2.2)$$

( $I$  = Trägheitsmoment der Querschnittsfläche  $q$ ) mit den Beiwerten  $s_k$  für  $k = 1 \dots 5$  und für die Randbedingungen 3 und fest-frei:

	Stabende fest-fest	Stabende fest-frei
$s_1$	4,730	1,875
$s_2$	7,853	4,694
$s_3$	10,996	7,855
$s_4$	14,137	10,996
$s_5$	17,279	14,137

Setzt man die Frequenz des Grundtons gleich 1, so besitzen die relativen Eigenfrequenzen die Werte:

	Stabende frei-frei fest-fest	Stabende fest-frei
$f_1$	1	1
$f_2$	2,76	6,27
$f_3$	5,41	17,57
$f_4$	8,94	34,37
$f_5$	13,37	56,84

Sie steigen also, insbesondere bei einseitig eingespanntem Stab, sehr schnell mit der Ordnungszahl an (TRENDELENBURG 1961a, 76-77).

Bereits BERNOULLI hat zur Verifizierung seiner theoretischen Resultate eigene Experimente angestellt und die relativen Frequenzen bestimmt (CANNON/DOSTROVSKY 1981a, 101-102). Dazu benutzte er Glasstäbe mit einer Dicke kleiner als 0,8 cm und der Länge von etwa 30 cm. Auf ihnen markierte er die Schwingungsknoten entsprechend seinen Berechnungen, hielt sie an diesen Stellen leicht zwischen zwei Fingern und regte sie zu Biegeschwingungen durch Antippen an. Die Ergebnisse stimmten gut mit seinen theoretischen Resultaten überein. Auch die Proportionalität der Frequenz mit  $1/l^2$  hat BERNOULLI experimentell geprüft. In diesem Zusammenhang erinnerte er an die Carillons, Metallophone, die aus Metallstäben unterschiedlicher Länge bestehen.

CHLADNI wiederholte solche Versuche mit seiner Methode der Klangfiguren. Wir greifen einige Fälle heraus:

In dem ersten Falle, wo ein Ende des Stabes ganz unbeweglich, das andere aber frey ist, wird bey dem tiefsten und einfachsten Klange die Axe des Stabes *a b* fig. 147 von der

*Tab. XI.*

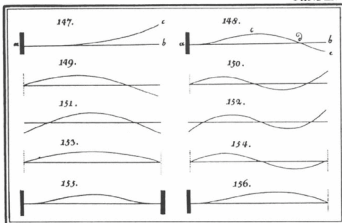


Abb. 3.2.1. Biegeschwingungen von Stäben. Aus Tafel XI von CHLADNIS Erstlingswerk



krummen Schwingungslinie *a c* nirgends durchschnitten, sondern nur in dem Punkte *a* berührt, wo das unbewegliche Ende ist. Es erscheint dieser Klang bey jedem in einer Wand oder in einem Schraubenstocke befestigten Stabe, Nagel oder Stifte, sehr leicht, wenn man irgend einer Stelle, die nicht allzunahe an dem unbeweglichen Ende ist, denselben anschlägt oder streicht ... Außer dem itzt erwähnten Klange lassen sich auf dem nämlichen Stabe noch mehrere hervorbringen, bey welchen die krumme Schwingungslinie die Axe in 1, 2, 3 oder mehreren Punkten durchschneidet. Um jeden dieser Klänge einzeln zu erhalten, berühre man eine oder mehrere Stellen, wo Durchschnittspuncte sind, und schlage oder streiche in der Mitte eines schwingenden Theils. So wird z.B. der Klang, (fig. 148.) bey welchem die krumme Linie *a c d e* die Axe *a b* nur in dem einen Punkte *d* schneidet, zum Vorschein kommen, wenn der an dem Ende *a* unbewegliche Stab *a b* bey *d* berührt, und ungefähr bey *c*, oder allenfalls nahe an dem Ende *b* angeschlagen oder gestrichen wird. (CHLADNI 1787a, 6-7)

Bei den höheren Schwingungsmoden nähern sich die äußersten Schwingungsknoten immer weiter den Stabenden. Die Töne verhalten sich, den Grundton ausgenommen, wie die Quadratzahlen von 3, 5, 7 usw. Später ergänzte CHLADNI, daß sich die Frequenzen der ersten zur zweiten Schwingungsmode wie das Quadrat von 2 zum Quadrat von 5 verhalten (CHLADNI 1827b, 29).

Sind beide Stabenden frei, so treten bei dem Grundton eines Stabes zwei Schwingungsknoten auf (Abb. 3.2.1., Fig. 151), bei dem folgenden drei (Abb. 3.2.1., Fig. 152), usw.

Um jeden beliebigen Klang eines an heyden Enden freyen Stabes zu erhalten, lege man an zwey Stellen, wo Schwingungsknoten sind, den Stab auf nicht allzuharte Unterlagen, als etwa auf zweyen mit Tuch überzogene Stege, die sich nach Belieben verrücken lassen,... und streiche oder schlage den Stab zwischen zweyen Schwingungsknoten. (CHLADNI 1787a, 9)

CHLADNI gab die Tonverhältnisse auch in diesem Fall genau an und sagte: "Wird keine große Genauigkeit erfordert, so kann man annehmen, daß sich die Töne verhalten, wie die Quadrate der Zahlen 3, 5, 7, 9 u.s.f." (CHLADNI 1787a, 10).

Der Vergleich mit den Frequenzen aus obiger Tabelle zeigt sogar gute Übereinstimmung.

Sind beide Stabenden fest eingespannt, so schwingt im Grundton der Stab wie in Abb. 3.2.1., Fig. 155. Nach der Theorie stimmen die Frequenzen mit dem Fall frei-frei

überein. CHLADNI hatte hier beim Vergleich mit den theoretischen Resultaten Schwierigkeiten:

Ich glaubte diese Tonverhältnisse anzutreffen, wenn ich jedes Ende des Stabes in einen Schraubenstock sehr fest einspannte; es war aber keine Genauigkeit der Beobachtungen dabey möglich, weil durch stärkeres oder schwächeres Einspannen die Tonverhältnisse sehr verändert wurden, und mithin alle Resultate sehr verschieden ausfielen. (CHLADNI 1787a, 11-12)

CHLADNIS Interesse und Beschäftigung mit Instrumentenkunde und Instrumentenbau kommt schon auf den ersten Seiten seines Erstlingswerkes zum Ausdruck. Im Zusammenhang mit den Biegeschwingungen von Stäben unter den Randbedingungen fest-frei erwähnte der Forscher die Nagelgeige, ein in der Mitte des 18. Jahrhunderts erfundenes Streichstabspiel, das aus einem hölzernen Resonanzkasten und einer Anzahl in Kreisbogenform angeordneter und abgestimmter Eisen- oder Stahlstifte besteht. Man bestrich die Stifte mit einem Geigenbogen. Die Töne sollen denen des Violinflageolets am nächsten kommen (SACHS 1930a, 66).

Nach diesen einleitenden Untersuchungen der Biegeschwingungen von Stäben kommt CHLADNI zum eigentlichen Zweck seines Buches, der Betrachtung der Schwingungen solcher Körper, "... bey denen elastische Krümmungen ganzer Flächen nach mehreren Dimensionen zugleich in Betrachtung kommen ... ; indem weder Berechnungen, die mit der Erfahrung übereinstimmen, noch richtige Beobachtungen darüber vorhanden sind" (CHLADNI 1787a, 1).

Bereits EULER hatte sich 1764 mit der Schwingung von Glocken beschäftigt (EULER 1766a). Damit hatte er das Problem der Plattenschwingungen übersprungen und befand sich mitten in der kinetischen Schalentheorie. Den rotationssymmetrischen Glockenkörper zerlegte er in Kreisinge und behandelte diese wie gekrümmte Balken. Nur die Deformation in der Radialrichtung wurde berücksichtigt, die Dehnung in Tangentialrichtung blieb außer acht (SZABÓ 1987a, 403-404). EULER schrieb bereits gegen Ende seiner Arbeit, daß sein Versuch, die Töne der Glocken zu beschreiben, bloße Hypothese sei (EULER 1766a, 281). CHLADNI führte den tieferen Grund für das Scheitern dieser Bemühungen an, indem er erwähnte, daß das Verhalten biegeungssteifer Platten und Schalen "... vielmehr aus allgemeinen Eigenschaften elastischer Flächenkrümmungen zu erklären sind, für welche die gehörigen Berechnungsarten erst noch gefunden werden müssen..." (CHLADNI 1787a, 24).

Zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Kreisscheiben benutzte CHLADNI Scheiben aus Blech oder Glas. Im Grundton (Abb. 3.2.2, Fig. 2) teilt sich die Scheibe in

vier Teile. Dazu berühre man die Scheibe an einer beliebigen Stelle der Knotenlinien  $gr$  und  $nq$  und streiche sie an den Punkten  $f, p, m, n$ . Über die höheren Schwingungsmoden schrieb CHLADNI:

*Tab. I.*

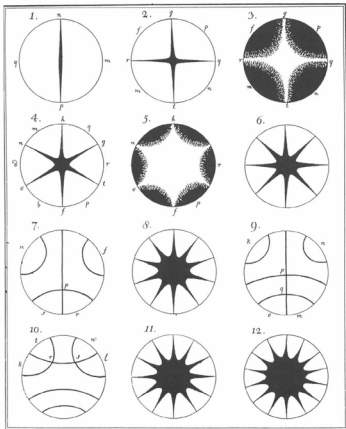


Abb. 3.2.2. Tafel I aus CHLADNI'S Erstlingswerk

Nächst dem Grundtone einer Glocke oder runden Scheibe ist der einfachste der, bey welchen sie (fig. 4.) sich in sechs einander gleiche schwingende Theile eintheilt, wodurch die natürliche Gestalt derselben in den drey festen Linien *hf*, *nr* und *og* durchschnitten wird. Der Ton einer Scheibe ist dabey um eine große None höher, als der Grundton ... Man erhält diesen Klang leicht, wenn man die Glocke oder Scheibe in der Mitte hält oder aufstemmt, zugleich aber noch eine andere Stelle auf einer der festen Linien berührt, und an einer ungefähr 30 oder 90 Grade davon entfernten Stelle, als bey *q*, *r*, *p*, *b*, *d* oder *m* mit dem Violinbogen streicht. (CHLADNI 1787a, 31-32)

Entsprechendes gilt nun für die nächsthöheren Schwingungsmoden. So war der Ton bei 4 Knotengeraden (Abb. 3.2.2., Fig. 6) um fast eine kleine Septime höher als beim Versuch mit 3 Geraden und um zwei Oktaven über dem Grundton. Von diesen Idealfiguren fand CHLADNI nun abgeänderte Formen, bei denen sich das Aussehen veränderte, der Ton aber der gleiche blieb:

Eine sehr gewöhnliche Abänderung dieser Klangfigur [Fig. 6, D.U.] ist fig. 7; man erhält sie leicht bey den meisten Scheiben, wenn man sie nicht in der Mitte, sondern bey *p*, wo die beyden Linien einander durchschneiden, etwa mit den Daumen oben, und mit dem zweyten oder dritten Finger unten, hält, und bey *f* oder *n*, oder allenfalls bey *r* oder *s* streicht. (CHLADNI 1787a, 33)

War der Grundton einer Scheibe mit zwei Knotenlinien *C*, so erhielt CHLADNI für die Töne mit einer höheren Zahl von Knotenlinien die Folge:

Zahl der Linien: 2 3 4 5 6 7 8 ...

Töne: *C d c' g'+ cis'' fis'' b''...*

(CHLADNI 1787a, 34). Das Pluszeichen bei dem Ton der Figur mit fünf Knotengeraden zeigt an, daß der Ton etwas höher als *g'* war. Die Frequenzfolge bedeutet Proportionalität mit den Quadraten von 2, 3, 4...

Dann führte CHLADNI Klangfiguren vor, bei denen sich außer den Knotengeraden auch Knotenkreise zeigen. Besonders einfach ließ sich der Fall erzeugen, wo ein Knotenkreis und eine durch die Scheibenmitte gehende Knotengerade erscheinen. Dazu muß man nur die Scheibe mit zwei Fingern an einer Stelle halten, wo sich Kreis und Gerade schneiden und in einer Entfernung von 90° von der gehaltenen Stelle am Rand streichen. Der Ton ist ungefähr eine None höher als in dem Fall, wo nur ein Knotenkreis auftritt.

Bey den nunmehr zu erwähnenden Arten des Klanges, wo sich mehr als ein Kreiß zeigt, ist dieses merkwürdig, daß die Kreiß bey jedem Klange eine bestimmte Anzahl von Biegungen

haben, ausgenommen der innerste Kreis, welcher bisweilen ganz zirkelförmig, mehrtheils aber oval ist. Die Anzahl der Biegungen ist bey jedem Kreise die nämliche, ihre Lage ist allezeit so beschaffen, daß die Bogen zweener benachbarten Kreise sich gegenseitig einander abwechselnd nähern und von einander entfernen, und mithin der erste Kreis mit dem dritten, der zweyte mit dem vierten u. s. w. parallel geht, doch mit dem Unterschiede, daß die Bogen

*Tab. III.*

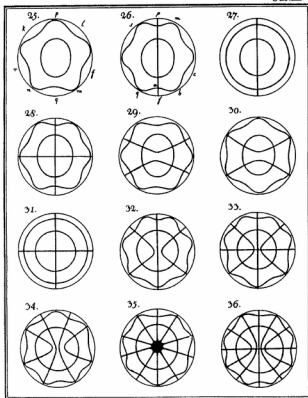


Abb.3.2.3. Tafel III aus CHLADNIS Erstlingswerk

der Kreiße immer flacher werden, je näher die Kreiße der Mitte der Scheibe sind. (CHLADNI 1787a, 38)

Um z.B. Fig. 26 (Abb. 3.2.3) zu erzeugen, berührt man die Saite mit dem Daumen der linken Hand bei  $b$ , mit einem anderen Finger derselben Hand bei  $f$  oder  $g$ , stemmt sie mit diesen Fingern bei  $m$ ,  $p$  oder  $s$  an und streicht bei  $c$ . Auch hier gibt es mehrere verschiedene Klangfiguren der gleichen Zahl von Knotenkreisen und Knotenlinien, die jeweils den gleichen Ton geben. So erhielt CHLADNI für die Figuren 28-31 (Abb. 3.2.3) denselben Ton  $b''$ , für Fig. 26 und 27 den Ton  $e''+$ . In einer Tabelle (Abb. 3.2.4) stellte der Forscher seine Ergebnisse mit den Kreisscheiben eindrucksvoll zusammen, wobei er vom Grundton  $C$  ausging. Die Zahlen über der Tonangabe beziehen sich auf die Abbildung der jeweiligen Klangfigur im Tafelteil seines Buches.

Ist  $K$  die Zahl der Knotenkreise,  $L$  die Zahl der Knotenlinien, so erhielt CHLADNI für die möglichen Frequenzen  $\nu$  einer Kreisscheibe die Gesetzmäßigkeit

$$\nu \sim (2K + L)^2. \quad (3.2.3)$$

Dieses Gesetz stimmt bis auf kleine Abweichungen, die er bei der Tonangabe durch + oder - kennzeichnete.

Bei seinen Versuchen mit Kreisplatten äußerte sich CHLADNI auch zu den Stellen maximaler Schwingungsamplitude:

Bey dem Grundtone und bey den übrigen Arten des Klages, wo sich sternförmige Figuren zeigen, machen nicht etwa, wie man glauben könnte, die Stellen, welche dem Rande am nächsten sind, die weitesten Schwingungen, sondern der Punct, wo die Schwingungen am weitesten sind, oder der Mittelpunct der Schwingungen ist in jedem schwingenden Theile in einiger Entfernung von dem Rande ... Wenn unter dem Sande, dessen man sich zum Bestreuen bedient, ganz feine Staubtheilchen befindlich sind, und die Scheibe ganz genau horizontal gehalten wird, werden diese Puncte oft sichtbar; indem der feinste Staub auf denselben sich anhäuft, wovon man die Ursachen sich leicht selbst wird erklären können.

(CHLADNI 1787a, 30-31)

Die letzte Bemerkung ist übertrieben. Die weitere Entwicklung der Erforschung der CHLADNISCHEN Klangfiguren zeigte, daß zur Klärung dieses Problems neue Versuchsreihen nötig waren. MICHAEL FARADAY (1791-1867) hat nach CHLADNIS Tod eine Arbeit veröffentlicht, bei der auch Klangfiguren beschrieben wurden, die unter einem Rezipienten im Vakuum

entstanden, wobei außer Sand auch feiner Bärlappssamen benutzt wurde (FARADAY 1831a).

Zahl der Linien:

		0	1	2	3	4	5	6	7	8
Zahl der Streife:	0			fig. 2. C	4. d	6. 7. c	8--10. g--gis	11. cis	12. fis	13--17. b
	1	18. Gis	19. b	20. 21. g	22. d--dis	23. gis	24. cis	≡≡≡ e--f	≡≡ g	
	2	25. gis+	26. 27. e+	28-31. b	32. dis	33. 34. g	35. b--h	36. cis	≡≡≡ dis	
	3	37. b--h	38. 39. e+	40. 41. gis--a	42. 43. c	44. 45. dis	46. 47. fis	48. gis+	≡≡ b	
	4	49. a	50-52. cis	53. f	54. g--gis	55. b	56. h--c	57. cis		
	5	58. f	59. 60. gis	≡≡≡ h	61. cis					
	6	≡≡≡ h	62. d	63. e	64. 65. f+					
	7	66. e								

Abb. 3.2.4. Tabelle (CHLADNI 1787a, 46)

In diesem Fall beobachtete der englische Forscher, daß sich an den Knotenlinien sowohl der schwere Sand, als auch die ganz leichten Teilchen des Bärlappssamens ansammeln. Die Beobachtung CHLADNIS muß also etwas mit den Luftströmungen über der schwingenden Platte zu tun haben. Die sich bewegende Luft kann den schweren Sand auf der Platte nicht in Bewegung setzen, sie hat nur Einfluß auf das leichte Lycopodiumpulver. Im einzelnen stellte sich das FARADAY so vor:

Die Ströme, die ich über der Oberfläche der Platte, Membranen etc. betrachtet habe und die von den ruhenden Teilen nach den Zentren oder Linien der Bewegung gehen, rühren notwendigerweise von der mechanischen Wirkung dieser Oberfläche auf die Luft her. Wenn sich irgendein besonderer Teil der Oberfläche während seiner Schwingung nach oben bewegt, so treibt er die Luft vorwärts und überträgt eine bestimmte Kraft auf sie ... ; wenn [der Teil] während seiner Schwingung umkehrt, weicht er von der Luft, die er weggeschleudert hat, zurück, die letztere tendiert folglich dazu, in das Teilvakuum, das er gebildet hat, zurückzukehren ... ein Luftstrom unmittelbar über [der Oberfläche] von dem ruhenden zu den schwingenden Plattenteilen wird erzeugt. (FARADAY 1831a, 306)

An der Diskussion, was mit den Sandkörnern nach Erregung der Platte zu Biegeschwingungen wirklich passiert, beteiligte sich auch FÉLIX SAVART (1791-1841), worüber in Kap. 8.1 berichtet werden soll. 1931 fand die Frage der Gleichsetzung der Sandfiguren mit den Knotenlinien eine (vorläufige) Antwort durch Experimente von E.N. DA C. ANDRADE (1887-1971) und D.H. SMITH (ANDRADE/SMITH 1931a). Die beiden Engländer verwendeten dünne Stahlplatten und erregten sie auf elektromagnetische Weise zu Biegeschwingungen. Man erkannte, daß die Klangfiguren sich beiderseits der Knotenlinien bis zu Kurven erstreckten, an denen die Maximalbeschleunigung der Platte gerade gleich der Fallbeschleunigung  $g$  ist. Ist die Erregung sehr stark, so sind die Klangfiguren schmal, bei schwacher Erregung liegen die Begrenzungen der Klangfiguren weit weg von den Knotenlinien.

CHLADNI beschrieb nun nach den Klangfiguren für die Kreisscheibe diejenigen für die Scheibe mit quadratischer Form.

Bey den meisten Arten des Klages einer Quadratscheibe sind die mehreren nach einer Richtung gehenden Linien geneigt, eine bestimmte Anzahl von Krümmungen anzunehmen; die wenigern Linien, welche nach der andern Richtung gehen, zeigen sich mehrentheils gerade. Es stehen, wie schon oben bemerkt ist, bey den meisten Figuren die einwärtsgehenden Biegungen einer Linie den auswärtsgehenden Biegungen der benachbarten Linie entgegen, so daß sie sich abwechselnd einander nähern und von einander entfernen ... (CHLADNI 1787a, 52)

Von den Formen und der Vielfalt der Klangfiguren waren schon CHLADNIS Zeitgenossen fasziniert, worüber in Kap. 4.1 im Zusammenhang mit den Reisen des Forschers zu berichten ist. Sogar CHLADNI selbst schrieb: "Jede dieser Klangfiguren ist mannigfaltigen Abänderungen unterworfen, die den Tapeten- und Cattunfabrikanten genug Stoff zu Bereicherung ihrer Musterkarten geben können" (CHLADNI 1787, 53).



Ähnlich wie bei den Kreisscheiben gab CHLADNI auch hier die Töne in Form einer Tabelle an, wobei in der Senkrechten die Zahl der nach der einen Richtung gehenden Knotenlinien, in der Waagerechten die Zahl der nach der anderen Richtung verlaufenden Linien verzeichnet ist. Klangfiguren wie z.B. 89 und 90, 91 und 92 und 99 und 100 geben jeweils wieder den gleichen Ton (Abb. 3.2.5).

Bezeichnet man mit  $h$  die Dicke einer Platte, mit  $d$  ihren Durchmesser, so erhielt CHLADNI für die Frequenz  $\nu$

$$\nu = h/d^2, \quad (3.2.4)$$

Gegen Ende seines Buches machte CHLADNI wieder eine Bemerkung über die Bedeutung der Töne von Scheiben, die darauf hindeutet, daß er sich auch mit der Anwendung seiner Untersuchungen für den Instrumentenbau beschäftigte:

Die bisherigen Bemerkungen über die Klänge der Scheiben lassen sich zu Verfertigung eines aus Glas- oder Metallscheiben bestehenden Instruments anwenden, welches mit zween oder mehreren Violinbogen, oder vielleicht auf gewisse andere Art noch vollstimmiger gespielt werden könnte, und der gewöhnlichen Harmonika in Ansehung des Klanges einigermaßen ähnlich, auch vielleicht eines noch weitern Umfanges, und besonders in den höhern Tönen einer größern Stärke fähig seyn würde; worüber ich ein andermal mehr zu sagen gedenke. (CHLADNI 1787a, 65)

In Kap. 3.4 wird gezeigt, wie CHLADNIS neues Musikinstrument aufgebaut war.

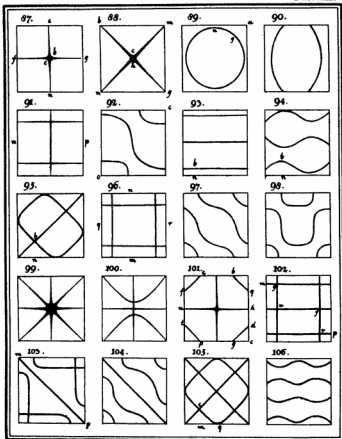
Die größte Bedeutung von CHLADNIS Erstlingswerk liegt darin, mit seinen dargestellten Experimenten das empirische Material für eine noch aufzustellende Plattentheorie und ihre differentialgeometrischen Grundlagen gegeben zu haben. Das hat der Autor am Ende des Buches noch einmal betont:

Vielleicht können die obigen Bemerkungen über die elastischen Krümmungen einer Scheibe und Glocke Anlaß geben, um überhaupt die Theorie der Krümmungen einer Fläche oder eines Körpers, welche ein unbegrenztes Feld zu weiteren Untersuchungen darbietet, mehr zu bearbeiten, als bisher geschehen ist; indem doch nun mehrere Voraussetzungen zu deren Berechnung, und mehrere Mittel, um die Richtigkeit derselben durch Versuche zu prüfen, vorhanden sind. (CHLADNI 1787a, 77)

CHLADNI widmete sein Buch "Der Kayserlichen Academie der Wissenschaften zu St. Petersburg welche schon so viele Aufschlüsse über die Theorie des Klanges gegeben hat, zu

weiterer Untersuchung...". In dieser Widmung kommt die Hochachtung des Autors gegenüber dem Schaffen von EULER und DANIEL BERNOULLI zum Ausdruck. Die Petersburger

*Tab. VIII.*



*Commons:Public domain.*

Abb. 3.2.5. Tafel VIII aus CHLADNIS Erstlingswerk

Akademie, 1725 durch die Zarenwitwe KATHARINA I. (1684-1727, reg. 1725-1727) gegründet, war für EULER von 1727 bis 1741 und nach seinem Berliner Aufenthalt von 1766 bis an sein Lebensende wissenschaftliche Heimstatt. BERNOULLI arbeitete von 1725 bis 1733



Abb. 3.2.6. Widmung in CHLADNIS' Erstlingswerk

in St. Petersburg. Beide Forscher lebten bei Herausgabe von CHLADNIS' Buch 1787 nicht mehr. Diese Widmung sollte nun der Anlaß für eine der größeren Vortragsreisen CHLADNIS' werden (s. Kap. 4.1).

Noch zu CHLADNIS Lebzeiten begann der Mathematiklehrer am Danziger Gymnasium FRIEDRICH STREHLKE (1797-1886) mit umfangreichen Experimenten an Klangfiguren. Seine erste Arbeit erschien 1825 (STREHLKE 1825a). Mit feinem Quarzsand erhielt er ganz zarte Klangfiguren, und seine Ergebnisse faltete er in den folgenden zwei Sätzen zusammen:

I. Die Klangfiguren, oder die bei schwingenden Scheiben in Ruhe bleibenden Stellen der Oberfläche sind nicht gerade, sondern stets krumme Linien, aber Linien im Sinne der Geometrie, keine Flächen.

II. Diese Linien durchschneiden sich nicht. (STREHLKE 1825a, 212)

Diese Aussagen erregten CHLADNIS Widerspruch (CHLADNI 1825a). STREHLKES Ergebnisse, so CHLADNI, würden durch ungleichmäßige Dichte und Dicke der verwendeten Metallscheiben zustandekommen. Weitere Untersuchungen des Danziger Lehrers (STREHLKE 1830a) bestärkten ihn jedoch in seinen Ergebnissen. Er vermaß seine Klangfiguren, und bei denen, die sich durch eine Kegelschnittgleichung in der Form

$$y^2 = px + qx^2 + r \quad (3.2.5)$$

darstellen ließen, ermittelte STREHLKE die Werte von  $r$ ,  $p$  und  $q$  experimentell. LORD RAYLEIGH (JOHN WILLIAM STRUTT) (1842-1919) verwendete in seinem berühmten Buch "The Theory of Sound" STREHLKES Meßergebnisse, um einen Vergleich zu den Ergebnissen von KIRCHHOFFS Plattentheorie (vgl. Kap. 6.3) herzustellen (RAYLEIGH 1877a, §220-§226).

Die Ergebnisse STREHLKES erscheinen heute mit den Erkenntnissen der Arbeit von ANDRADE/SMITH in einem anderen Licht als zu Zeiten CHLADNIS.

Eine interessante Deutung der CHLADNISCHEN Klangfiguren veröffentlichte 1833 CHARLES WHEATSTONE (1802-1875). Sein Ziel ist: "Ich werde mich bemühen, zu zeigen, daß alle Figuren der schwingenden Flächen aus sehr einfachen Moden von Schwingungen resultieren, die isochron verlaufen und superponiert sind" (WHEATSTONE 1833a, 596).

An einem einfachen Beispiel, nämlich dem der quadratischen Platte, sei seine Methode erläutert. Wir gehen von Knotenlinien aus, die jeweils parallel zu je zwei Quadratseiten verlaufen. Man denkt sich das Schwingungsverhalten in einem bestimmten Moment so, daß die mit + bezeichneten Gebiete nach aufwärts, die mit - bezeichneten nach abwärts in Bewegung sind. Wirken die Anregungen zu beiden Schwingungssystemen in der gleichen Platte zusammen, so erhält man das resultierende Schwingungssystem durch Überlagerung

der beiden. Zunächst kann man sagen, daß die doppelt schraffierten Stellen entgegengesetzt



Abb. 3.2.7. WHEATSTONESche Erklärung der Klangfiguren (aus WALLER 1961a, Tafel 30)

zu jenen schwingen, wo keine Schraffierung ist. Auch bleiben die Stellen, wo sich die ursprünglichen Knotenlinien schneiden, weiterhin in Ruhe. Die Richtungen nach oben und nach unten sind außerdem gleichwertig und keine von beiden kann überwiegen. Die Knotenlinie muß also zwischen den Grenzen der doppelt schraffierten und der hellen Felder symmetrisch hindurchgehen. Auf diese Weise kam WHEATSTONE zur Klangfigur mit den Knotenlinien längs der Diagonale und der Geraden, die die Mitten benachbarter Quadratseiten verbinden. In ähnlicher Weise hat der Forscher Schwingungssysteme mit Knotenlinien verschiedener Zahl und verschiedener Neigung gegen den Plattenrand zusammengesetzt und könnte so eine größere Zahl von CHLADNischen Klangfiguren erklären. Figuren mit krummen Knotenlinien ließen sich nur durch Superposition von vier einfachen Figuren ableiten.

CHLADNische Klangfiguren eignen sich hervorragend zur Untersuchung von Decke und Boden der Streichinstrumente. Dazu verwendet man heute besonders holographische Aufnahmen (CREMER 1981a, 276-291). Sie geben auch Auskunft darüber, ob die zwischen den Knotenlinien eingeschlossenen Gebiete stark oder schwach schwingen.

### 3.3. Musikinstrumentenbau in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts

Die Jahre um 1750 waren eine Zeit großer Veränderungen auf vielen Gebieten des gesellschaftlichen Lebens. Der Absolutismus trat in das Stadium, in dem einzelne Herrscherpersönlichkeiten ihre Position durch Entmachtung rivalisierender Adelsgruppen ausdehnten und festigten. Die Zentralisierung der staatlichen Macht bedingte Vereinfachung der Rechtsverhältnisse, Einflußnahme auf Wirtschaft, Kultur und Verwaltung. Diese Aufgaben waren mit den herkömmlichen ständischen Machtinstrumenten nicht mehr zu bewältigen. Die Staatsverwaltung brauchte Personen, die diese immer komplizierter werdenden Aufgaben lösen konnten. Mit dem Bildungshorizont eines durchschnittlichen Adligen war das nicht mehr zu schaffen. Der Staat benötigte eine gebildete Beamtenschaft mit juristischen, volkswirtschaftlichen und agrartechnischen Kenntnissen. Der Stand von Geburt war dabei zweitrangig, gefragt waren Kenntnisse und Fähigkeiten. Es war die Zeit der Emanzipation des Bürgers, der, mit den Ideen der Aufklärung ausgerüstet, bei entsprechenden Fähigkeiten Karriere machen konnte. Gerade in Deutschland war die Zahl der Universitäten im Vergleich zu anderen Ländern sehr hoch. Jeder Landesherr war darauf bedacht, eigene Bildungsanstalten für die Ausbildung zu Beamten, Geistlichen, Lehrern und Ärzten zu besitzen (BOECKMANN/SCHILLING/SCHULZE/STÜRMER 1990a, 270-276). Das deutsche Bildungsbürgertum war sich seiner Bedeutung durchaus bewußt. Überall bildeten sich Lesevereine und Tischgesellschaften, wo über Gelesenes diskutiert und die Ereignisse der Zeit besprochen wurden.

Diese Entwicklung hatte auch Einfluß auf die Musikkultur. Das Musikleben war in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts durch das Wirken einer überaus großen Zahl von bedeutenden Komponisten ein wichtiger Faktor gesellschaftlichen Lebens geworden. Auf der Grundlage der Aufklärung hatten sich neue künstlerische Anschauungen entwickelt. Die Pflege der Hausmusik und des Volksliedes nahm einen großen Aufschwung, und das Konzertwesen löste sich aus der engen Bindung an den Hof und bekam auch öffentlichen Charakter. Ab 1781 gab es in Leipzig die für jedermann zugänglichen Konzerte im Gewandhaus, Halle besaß seit 1758 ein wöchentliches Konzert, und in Berlin wurde 1790 die Singakademie gegründet. Gaben in der Musikausübung bei Hofe oft italienische Künstler

den Ton an, so entwickelte sich die nationale Musikkultur vor allen Dingen auf dem Boden bürgerlicher Musikkpflege. Durch die Meister z.B. der Mannheimer Schule vollzog sich eine Orchesterreform, aus der schließlich das klassische Orchester als dynamischer Klangkörper hervorging. Zur Bedeutung gelangte die klassische Sonatenform, und sie war schließlich der Rahmen für die Ablösung einer gewissen Starre des Barockorchesters durch größere Beweglichkeit im Ausdruck. Die Instrumentierung wurde differenzierter. Violinen, Querflöten, Hörner und die neu eingeführte Klarinette gaben dem neuen Stilgefühl künstlerischen Ausdruck. Die Bläser traten im Orchester als selbständige Gruppe in Erscheinung.

Auf diese Weise war ein Werkzeug geschaffen, das in der Lage war, das emotionale Innenleben auszudrücken, während das metaphysisch orientierte Klangverständnis ganz in den Hintergrund trat. Damit war die entscheidende Wende in der musikalischen Blickrichtung auf die natürliche Umwelt des Menschen und auf die davon ausgehende seelische Resonanz vollzogen. Auf musikalischem Gebiet setzte sich auf diese Weise die Aufklärung durch. (HEYDE 1986a, 230)

Der Instrumentenbau war im 18. Jahrhundert zu hoher Blüte gelangt. Eine beachtliche Zahl neuer Erfindungen führte zu Verbesserungen an bewährten Musikinstrumenten und zur Konstruktion ganz neuer. Besonders fällt die große Zahl neuer Instrumente aus der Klasse der Streich-Idiophone auf, und CHLADNIS neues Instrument, über das in Kap. 3.4 berichtet werden soll, gehört hierher. Von der Nagelgeige war schon im Kap. 3.2 die Rede. 1791 wurde sie von dem Zeichenlehrer TRÄGER in Bernburg/Saale zu einem Nagelklavier umgebaut. Durch ein Pedal wurde ein Leinenband in Umdrehung versetzt, das durch Tastenniederdruck einen Kontakt zu dem entsprechenden Stift gab. Der Londoner CHARLES CLAGGET (1740-1795) hatte 1788 ein Patent auf ein Streichgabelklavier erhalten. Dort wurden anstelle der Stahlstifte des Nagelklaviers Stimmgabeln als Klangkörper verwendet.

Große Verbreitung hatte die 1763 von BENJAMIN FRANKLIN (1706-1790) erfundene Glasharmonika und ihre vielen Abarten. London hatte sogar in MARIANNE DAVIES (1744-1792) eine Virtuosa für dieses Instrument (SACHS 1966a, 76). In Deutschland gab es mehrere berühmte Glasharmonikaspieler, und WOLFGANG AMADEUS MOZART (1756-1791), JOHANN GOTTLIEB NAUMANN (1741-1801), JOHANN FRIEDRICH REICHARDT (1752-1814) und LUDWIG VAN BEETHOVEN (1770-1827) schrieben für dieses Instrument. In Karlsruhe erweiterte JOSEF ALOIS SCHMITTBAUER (1718-1809) in den siebziger Jahren des 18. Jahrhunderts den ursprünglichen Tonumfang  $g-g''$  auf  $c-f'''$ , später sogar bis  $c''''$  (SACHS

1966a, 76). 1784 wurde durch den Organisten DAVID TRAUOGOTT NICOLAI (1733-1799) in Görlitz und KARL LEOPOLD RÖLLIG (gest. 1804) in Berlin an die Glasharmonika eine Klaviatur gebaut, durch die Streichpolster gegen die umlaufenden Glocken gedrückt wurden. Auch nach diesem Prinzip gab es im Anschluß an die erwähnten Erbauer Weiterentwicklungen (SACHS 1966a, 77-78).

Das in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts erfundene Hammerklavier erhielt im letzten Drittel dieses Jahrhunderts mit Erfindung der Prellmechanik mit Auslösung (Deutsche Mechanik oder Wiener Mechanik) einen bemerkenswerten Fortschritt. Auslösung bedeutet sofortige Freigabe des Hammers nach dem Anschlag, so daß er in die Ruhelage zurückkehrt und erneut zum Anschlag bereit ist. In diesem Zusammenhang ist besonders der Augsburgener JOHANN ANDREAS STEIN (1728-1792) zu nennen.

Für Hausmusiken in den oft engen Räumen des Bürgertums eignete sich das 1745 von dem Geraer Orgelbauer CHRISTIAN ERNST FRIEDERICI (1709-1780) gebaute aufrecht stehende Pyramidenklavier besonders gut. Vielleicht spielen mit der Pyramidenform auch kunstgewerbliche Formen des aufkommenden Klassizismus eine Rolle. Das gilt auf alle Fälle für die Lyragitarre, ein ausgesprochenes Dameninstrument, deren Umrisse einer griechischen Kithara nachempfunden sind. Die Lyragitarre gilt als Erfindung von FRANÇOIS LUPOT D.Ä. (1725-1804) 1778 in Orléans (HEYDE 1986a, 230).

Bei den Hörnern waren um 1760 die Klappen an den Griffbüchern aufgekommen, und um 1750 führte der Dresdner Hornist ANTON JOSEPH HAMPEL (1710-1771) bei den Naturwaldhörnern das Stopfen ein, bei dem durch Einführen der Faust in den Schallbecher der Ton um einen Ganz- oder Halbton tiefer wurde. HAMPEL hat auch das Inventionshorn erfunden, ein Waldhorn, das durch Einsetzen von U-förmigen Stimmbögen verschiedener Größe in jede gewünschte Stimmung gebracht werden kann. Die Querflöte erhielt in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts neue Klappen und Auszüge (SACHS 1966a, 314). Die alten Querflöten ohne Klappen waren nur diatonisch, auf ihnen konnte man lediglich Töne einer Tonleiter hervorbringen. Zu den Wegbereitern der Klappenflöte zählte besonders der Leipziger Flötist JOHANN GEORGE TROMLITZ (1725-1805).

Eine erste Baßklarinetten baute 1772 GILLES LOT in Paris. Bei ihr rücken die Fingerlöcher so weit auseinander, daß zum Spielen ein komplizierter Hilfsklappenmechanismus nötig wird. 1770 wurde in Passau das Bassethorn gebaut, eine Klarinette in Alllage (SACHS 1966a, 344-355).



GEORG JOSEPH VOGLER (1749-1814), wegen seiner Priesterweihe Abbé VOGLER genannt, war der Erfinder des Simplifikationssystems bei der Orgel. Dabei ergaben sich Vereinfachungen im Aufbau der Orgel, besonders aber wurden bei seinem System beim Spiel auftretende Differenztöne dazu benutzt, die großen Pfeifen einzusparen, wozu Oktave und Duodezime gleichzeitig angeschlagen werden mußten. Das Simplifikationssystem rief bei den Organisten großen Widerspruch hervor, es konnte sich nicht durchsetzen (SACHS 1966a, 361).

Flötenuhren, also eine Art Drehorgeln mit Uhrwerk, sind Erfindungen des 16. Jahrhunderts, haben aber, beginnend in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts, nun eine Glanzzeit. Um die Wende zum 19. Jahrhundert taucht das Harmonium auf, ein Tasten-Windinstrument mit durchschlagenden Zungen, wobei der Ton durch die periodische Unterbrechung des Luftstroms erzeugt wird. Als Erfinder seien stellvertretend für viele andere außer Abbé VOGLER hier nur der ab 1753 in Kopenhagen wirkende CHRISTIAN GOTTLIEB KRATZENSTEIN (1723-1795) und der Wiener Instrumentenbauer JOHANN NEPOMUK MAELZEL (1772-1838) erwähnt (SACHS 1966a, 388). Die Weiterbildung dieses Instruments setzt voll im 19. Jahrhundert ein.

Bei der hier nur skizzenhaft angedeuteten Entwicklung des Musikinstrumentenbaus in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts spielen Werkstattüberlieferung und praktische Erfahrung der Instrumentenbauer sicher die Hauptrolle. Es ist aber kaum vorstellbar, wie diese Entwicklung ohne Kenntnisse der physikalischen Zusammenhänge bei der Tonerzeugung möglich gewesen sein soll. Betrachtet man die Funktionsweise eines Musikinstruments, so ist dies eine objektive Darstellung physikalischer Vorgänge. Bei der Beschreibung musikalischer Klänge spielen dann auch psychoakustische Empfindungsgrößen eine Rolle. Für die Beurteilung verschiedener Interpretationen eines Musikstückes kommen nun zusätzlich subjektive Wertungen des Hörers hinzu. Was die Qualitätskriterien eines Musikinstruments betrifft, so führt man heute drei Punkte auf:

1. Geht man von der Kenntnis der physikalischen Funktionsweise aus, so lassen sich Bedingungen für das Entstehen stabiler Schwingungen und damit für eine sichere Ansprache ableiten.
2. Wenn man (ohne Rücksicht auf den Spieler) akustische Messungen an vielen anerkannt guten und weniger guten Instrumenten durchführt und nach charakteristischen Unterschieden in den Ergebnissen sucht, so lassen sich ebenfalls objektive Kriterien ableiten.

3. Durch Hörtests mit Zuhörern und Spieltests mit Musikern lassen sich Kriterien auf subjektiver Basis gewinnen, die man mit objektiven Meßdaten korreliert (MEYER/WOGRAM 1989a, 3-4).

Diese Kriterien zeigen, daß die Entwicklung der Akustik im 18. und auch im 19. Jahrhundert in ihren Ergebnissen noch weit davon entfernt war, die Punkte 1 - 3 voll zur Anwendung bringen zu können. Die akustischen Tatsachen, die man im 18. Jahrhundert kannte, waren so bescheiden, daß sie für den hohen Stand im Instrumentenbau dieses Jahrhunderts gegenüber dem Einfluß der Empirie nur eine Nebenrolle gespielt haben konnten.

Die Frage nach der Höherentwicklung im Instrumentenbau ist problematisch, sie ist uneingeschränkt zu bejahen nur für die technische Seite. Es liegt hier eine Wechselwirkung zwischen Musikkultur und Instrumentenbau vor, die z.B. ausschließt, die mittelalterliche Drehleier als primitiv abzuwerten. In solchem Sinne wurde in diesem Kapitel bewußt von Weiter- und nicht von Höherentwicklung gesprochen.

Mit Hilfe heutiger naturwissenschaftlicher Methoden konstruierte Instrumente sind qualitativ nicht grundsätzlich besser oder schlechter als die alten. Daraus den Schluß zu ziehen, daß die alten Handwerksmethoden und -praktiken gleich hoch wie die wissenschaftlichen Methoden entwickelt seien, wäre allerdings zu weit gegangen. Denn man muß einräumen, daß im alten Handwerk noch eine andere, nämlich die künstlerische Gestaltungsweise sehr zur Anwendung kam. Der wissenschaftliche und der künstlerische Weg sind nicht direkt vergleichbar, aber die Beziehungen zwischen beiden anhand konkreter instrumentenbaulicher Lösungen aufzuzeigen, dies dürfte zu den interessantesten künftigen Aufgaben der Instrumentenkunde gehören. (HEYDE 1986a, 39-40)

Schon zeitig begann CHLADNI mit einer Systematik der Musikinstrumente. 1795 erschienen zwei Aufsätze, in denen im Zusammenhang mit Erörterungen über den Aufbau der Klanglehre (Akustik) auch die verschiedenen Schallquellen (und damit die Musikinstrumente) nach (z.T.) physikalischen Gesichtspunkten geordnet wurden (CHLADNI 1795a; 1795b):

- 1) Absolut biegsam, und erst durch Spannung elastisch
  - a) nach einer Richtung ausgedehnt (Saiten)
  - b) nach mehreren Richtungen ausgedehnt (Paucken- und Trommelfelle)
- 2) für sich elastisch
  - a) nach einer Richtung ausgedehnt
    - α) gerade (Stäbe)

- β) gekrümmt (Gabeln, Ringe etc.)
  - b) nach mehreren Richtungen ausgedehnt
  - α) gerade (Scheiben)
  - β) gekrümmt (Glocken, Gefässe etc.)
- 3) blosse Luft, welche in Pfeifen und Blasinstrumenten der klingende Körper ist  
(CHLADNI 1795a, 127).

Man könnte gegen diese Systematik einwenden, daß im Punkt 3 die Luft gewissermaßen als Sonderfall angesehen wird. Der Grund dafür liegt in der in CHLADNIS ersten Schriften immer wieder kritisierten Rolle der Klanglehre, die bisher nur bei der Lehre von der Luft behandelt worden sei: "Denn ein Klang besteht in einer zitternden (oder welches gleichbedeutend ist, schwingenden) Bewegung eines elastischen Körpers" (CHLADNI 1795b, 102-103). CHLADNI will die Akustik bei der "Lehre von der Bewegung" abgehandelt sehen. Die Bedeutung der Luft spielt in obiger Systematik nur noch als ein Unterpunkt (3) eine Rolle, auch wenn sie physikalisch gesehen unter Punkt 2 stehen müßte.

In der 1821 erschienenen Schrift "Beyträge zur praktischen Akustik und zur Lehre vom Instrumentbau" systematisierte CHLADNI die Schallquellen im Prinzip genauso wie 1795, wenn auch in etwas anderer Reihenfolge. Die Musikinstrumente wurden von ihm jedoch in zwei Hauptklassen, "Singinstrumente" und "Klinginstrumente", eingeteilt. Singinstrumente sind dabei solche, bei denen die Töne durch Streichen oder Reiben hervorgerufen werden und die nach Belieben andauern können. Klinginstrumente dagegen sollen diejenigen sein, wo die Töne durch Schlag oder Stoß entstehen und die nicht beliebig fortdauern können. Die Singinstrumente teilte CHLADNI ein in solche

- A. mit Saiten (Geigen, Bogenklaviere usw.)
- B. mit Luft, in eine Röhre eingeschlossen (Blasinstrumente, Orgel usw.)
- C. mit Stäben oder schmalen Streifen, gerade oder gekrümmt (Clavicylinder, Euphon, Eisenvioline usw.)
- D. mit Glocken (Glasharmonika)

und die Klinginstrumente in solche

- A. mit Saiten (Spinett, Harfe, Klavier usw.)
- B. mit Stäben oder schmalen Streifen aus Glas, Metall, Holz usw. (Triangel, Strohfiedel usw.)
- C. mit gespannten Membranen (Trommel, Pauke usw.)
- D. mit geraden oder krummen für sich elastischen Flächen (Becken, Glockenspiel usw.)

(nach CHLADNI 1821a, 3-9).

Nur teilweise kann man aus heutiger Sicht bei dieser Systematik von einer Einteilung nach Melodie- und Rhythmusinstrumenten sprechen. Bei reinen Rhythmusinstrumenten existieren viele unharmonische Teiltöne, sie haben keinen ausgeprägten Tonhöhencharakter. Bei den Melodieinstrumenten überwiegen die harmonischen Teiltöne, die Tonhöhe ist eindeutig durch den Grundton bestimmt. Wie man sieht, überschneiden sich bei der CHLADNISCHEN Systematik Melodie- und Rhythmusinstrumente.

Nach ERICH MORITZ v. HORNBOSTEL (1877-1935) und CURT SACHS (1881-1959) teilt man (seit 1914) die Musikinstrumente nach Art der Tonerzeugung in fünf Gruppen, wobei Spielweise und Bau sekundäre Unterscheidungsmerkmale sind:

1. Idiophone (Schlaginstrumente ohne Fell, Rasseln usw.)
2. Membranophone (Trommeln, Pauken)
3. Chordophone (Geigen, Klaviere usw.)
4. Aerophone (Blasinstrumente, Orgeln usw.)
5. Elektrophone

(MICHELS 1977a, 25).

Die letzte Gruppe spielt entsprechend der Entwicklung der Elektroakustik erst seit einigen Jahrzehnten eine Rolle. Sehr heterogen ist die Gruppe der Idiophone. Der emittierte Schall rührt im allgemeinen nicht nur von der Selbstschwingung des Materials her. Zur Verstärkung und Ausstrahlung ist oft ein Luftresonator notwendig, so daß dann eigentlich ein gekoppeltes System vorliegt (Celesta, Nagelgeige). Viele Idiophone besitzen jedoch eine große Oberfläche und kleine Dämpfung, so daß zur Abstrahlung kein Resonator nötig ist (TARNCZY 1991a, 280-281).

Ein neues, vom physikalischen Standpunkt geschriebenes Buch über die Wirkungsweise von Musikinstrumenten faßt die Gruppen Idiophone und Membranophone unter dem Begriff "Percussion Instruments" zusammen (FLETCHER/ROSSING 1991a, 495-605).

### 3.4 CHLADNI Euphon (1790)

Im Zusammenhang mit den Untersuchungen über die Biegeschwingungen von Stäben und Platten, deren Ergebnisse im Erstlingswerk von 1787 veröffentlicht wurden, muß CHLADNI auch der Gedanke der Erfindung eines neuen Musikinstrumentes gekommen sein. Verschiedene Bemerkungen, wie im Kap. 3.1 und 3.2 schon erwähnt, deuten darauf. Die wirtschaftliche Lage des Forschers war schlecht, die Einkünfte aus seinen Privatvorlesungen waren vermutlich nur gering gewesen. Da mag dem Physiker, dem schon als Kind und Jugendlichen Reisen in ferne Länder verlockend gewesen waren, die Idee gekommen sein, mit der Demonstration der faszinierenden und publikumswirksamen Klangfiguren durch Deutschland und die angrenzenden Länder zu reisen, um dem Bildungsbürgertum, aus dem sich die Hauptzahl seiner Zuhörer zusammensetzte, damit gleichzeitig eine populär-wissenschaftliche Einführung in die Akustik zu geben. Aus heutiger Sicht mag diese Art des Broterwerbs für einen Physiker vom Range eines CHLADNI fragwürdig sein. Für CHLADNI selbst war es dies jedoch nicht, wie aus seinen Äußerungen deutlich zu ersehen ist: "Ein Bewegungsgrund zu diesem Entschlusse war auch der, weil ich glaubte, dieses als ein Mittel ansehen zu können, um mit mehrer Unabhängigkeit meinen Trieb zum Reisen zu befriedigen, welches ausserdem sich nicht würde haben thun lassen" (CHLADNI 1827a, 300).

Diese Worte schrieb, ohne eine Spur von Resignation, CHLADNI nach über dreißigjähriger Reisetätigkeit, denn das Zitat stammt aus einer kurzen Autobiographie, die der Verfasser (bereits) 1824 schrieb. Dieser Drang zur Unabhängigkeit war vermutlich auch der Grund dafür, daß er nie eine Stelle annahm. Dazu bot sich nämlich mehrmals die Gelegenheit, wie noch zu berichten sein wird. Der Wunsch nach Unabhängigkeit ließ ihn auch zeit lebens unverheiratet bleiben.

Zur Abrundung des Vorlesungsprogramms über Akustik mit der Demonstration der Klangfiguren bot sich nun auch die Vorführung eines neuen Musikinstrumentes an, dessen Wirkungsweise aus den Ergebnissen der akustischen Untersuchungen des Forschers erklärt werden konnte. Nach vielen Versuchen war 1790 das erste Instrument fertig, es bekam den Namen Euphon ("Wohlklinger"). Der Aufbau, der bis zur Publikation des Buches vom Jahre

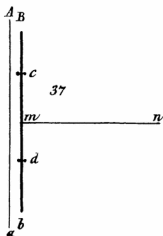


Abb. 3.4.1. Prinzip des Euphons  
(aus CHLADNI 1821a, Taf. IV, Fig. 37)

1821 geheim blieb, ist aus Abb. 3.4.1 ersichtlich. Ein sogenannter Klangstab aus Eisen  $Bb$  ist in den Schwingungsknoten  $cd$  an dem Resonanzboden  $Aa$  befestigt. Der sogenannte Streichstab  $mn$  aus Glas ist senkrecht zum Klangstab an einem Schwingungsbauch desselben befestigt und wird mit befeuchteten Fingern der Länge nach gestrichen. Dabei wird der Klangstab zu Transversalschwingungen erregt. Die Tonhöhe der Eisenstäbe hängt von der Länge und Dicke ab, wobei die Frequenz der Dicke proportional und dem Quadrat der Länge umgekehrt proportional ist. An sein neues Instrument stellte CHLADNI acht Forderungen:

- 1) Die Einrichtung muß so einfach, als möglich seyn...
- 2) Alles muß dauerhaft genug seyn,... um den Transport zu vertragen.
- 3) Jeder Theil muß mit Leichtigkeit können herausgenommen und eingesetzt werden...
- 4) Man darf kein Nebengeräusch hören...
- 5) Die Töne müssen einerley Intonation und einerley Stärke haben...
- 6) Die Ansprache der Töne muß leicht seyn...
- 7) ...es [wird] vortheilhaft seyn, wenn ein solches Instrument unverstimmbar ist...
- 8) nach Belieben in größern oder kleinern Verhältnissen, oder auch in

verschiedenen Gestalten kann gebaut werden. (CHLADNI 1821a, 13-14)

Die Töne eines Euphons können beliebig lange gehalten werden. Durch stärkeren oder schwächeren Druck und langsamerer oder schnellerer Reiben kann man die Lautstärke variieren. Der Tonumfang des Instrumentes war  $3 \frac{1}{2}$  Oktaven. Es durfte nicht zu groß dimensioniert sein, denn es sollte ja bequem auf Reisen mitgenommen werden.

Die Stücke, welche man auf dem Euphon spielen will, müssen dem Instrumente angemessen seyn. Geschwinde Sätze, wenn man sie auch durch viele Uebung wollte vortragen lernen, würden nie so viele Wirkung thun, als langsame und ausdrucksvolle Sätze. Die Stücke, welche ich am liebsten darauf gespielt habe, und welche am meisten gefielen, waren die zwey Sammlungen Harmonikasonaten von Naumann, manches von mir dazu eingerichtete Andante von Haydn und Mozart, und auch ein und anderer von mir vierstimmig für den Umfang meines Instruments ... eingerichtete Choral. Auf diesem Instrumente kommt es ... darauf an ... sangbare Sätze mit dem möglichsten Ausdrucke und mit einem möglichst angenehmen Klange vorzutragen. Es scheint sich auch das Euphon schon deshalb mehr, als irgend ein anderes Instrument, für diese Bestimmung zu eignen, weil die Empfindung des Spielenden sich den klingenden Körpern unmittelbar durch die Berührung der Finger mittheilt, ohne Dazwischenkunft eines andern Mechanismus. (CHLADNI 1821a, 175)

Gleich nach Fertigstellung des ersten Euphons veröffentlichte CHLADNI darüber in zwei Zeitschriften einen kurzen Artikel, im "Journal von und für Deutschland" sogar mit einem Kupferstich (Abb. 3.4.2) (CHLADNI 1790a; 1790b). Der genaue Aufbau wurde, wie schon erwähnt, nicht erklärt, denn das Instrument stellte, zusammen mit CHLADNIS Vorträgen und der Demonstration der Klangfiguren, die ganze Existenzgrundlage des Forschers dar.

Von der ganzen inneren Einrichtung des Euphons, welche auf ganz neu entdeckten Gesetzen der Bewegung beruht, und von allem, was bey dessen Bau zu beobachten ist, werde ich, wie es auch ganz billig ist, schlechterdings unter keiner andern Bedingung das mindeste bekannt machen, ausser, wenn mir die sowohl auf diese Erfindung, als auch auf meine übrigen akustischen Versuche gewendete Mühe, Zeit und Unkosten hinlänglich vergütet werden. (CHLADNI 1790b, 202)

Das Geheimnis des Aufbaus des Euphons (und des später erfundenen Clavicylinders) wurde erst mit der Publikation von 1821 enthüllt. Darüber wird in Kap. 7.4 ausführlich berichtet werden.

Im Laufe der Zeit hat CHLADNI das Euphon mehrfach verändert und verbessert. Dazu gehörte auch eine Abart, bei der die Klangstäbe gabelförmig gebogen - ähnlich einer

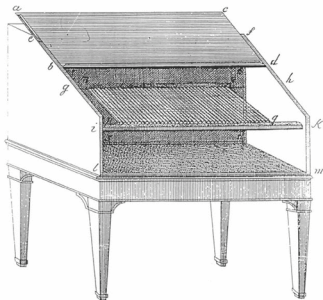


Abb. 3.4.2. CHLADNI erstes Euphon (aus: Journal von und für Deutschland 7(1790)3, S. 201; Foto: Staatsbibliothek zu Berlin. Preußischer Kulturbesitz)

Stimmgabel - und die gläsernen Streichstäbe zwischen den Gabelenden befestigt waren (CHLADNI 1822a). Eine solche Bauart hatte den Vorzug, daß das Instrument wegen der gekrümmten Stäbe relativ klein gehalten werden konnte. Der Kritik an seinem Spiel begegnete CHLADNI mit folgender Argumentation:

Die Mehrheit der Stimmen hat sich bis jetzt zu Gunsten meines Euphons erklärt; die wenigen, welche die Harmonika [d.h. die Glasharmonika, D.U.] vorziehen, vermuthlich, weil sie ein sehr vollkommenes Instrument dieser Art meisterhaft spielen gehört haben, bitte ich zu bedenken, daß ein Euphon weit mehrerer Vollkommenheit, als es jetzt hat, fähig ist, wenn man es weit größer bauen will....; daß ich auch wegen anderer, physischer und mecha-



nischer Beschäftigungen nur wenige Zeit auf das Spielen gewendet habe, und also auf eigentliche Virtuosität keine Ansprüche mache, welche bloß von solchen zu erwarten ist, die den größten Theil ihrer Zeit auf die Ausübung eines Instruments verwenden können. (CHLADNI 1795c, 312-313)

Es dauerte nicht lange, und andere versuchten sich mit der Neuerfindung des Euphons oder mit Abarten desselben. Ein Nieskyer Arzt, CHRISTIAN FRIEDRICH QUANDT (1766-1806), machte in einer Veröffentlichung 1800 mit einer Methode der Tonerzeugung bekannt, die zu einem dem Euphon ähnlichen Instrumente führte. Er bezeichnete alles als seine Erfindung, CHLADNI wurde nicht erwähnt (QUANDT 1800a). Die Streichstäbe des CHLADNISchen Euphons waren für jeden Hörer der Vorträge des Physikers sichtbar. Unbekannt war die Art der eigentlichen Schallquelle und deren Verbindung mit den Streichstäben. QUANDT fand die Lösung in der Anbindung von gläsernen Streichstäben an jeweils einen Arm von Stimmgabeln. Er gab außerdem einen Aufbau an, der mit CHLADNIS Bauart identisch war. CHLADNI hat sich dagegen gewandt, Abarten seines Instrumentes zu bauen ohne ihn zu erwähnen (CHLADNI 1800a). Bereits der Herausgeber des "Journal des Luxus und der Moden", der Weimarer Unternehmer FRIEDRICH JOHANN JUSTIN BERTUCH (1747-1822) und der Maler GEORG MELCHIOR KRAUS (1733-1806) schrieben in einer Fußnote zu CHLADNIS Artikel von 1795: "Wäre es möglich in Teutschland das Patent-Wesen für neue Erfindungen einzuführen, so wie es in England mit größtem Nutzen für dieß Reich schon lange besteht, so würde der Erfinder des Euphons für seine Mühe würdig belohnt, und zugleich der Wunsch des Publicums seine vortreffliche Erfindung genießen zu können erfüllt seyn" (CHLADNI 1795c, 313).

## 4. Die Zeit 1790-1802

### 4.1 Erste Reisejahre

1791 begann CHLADNI seine Reisetätigkeit, die ihn - mit Unterbrechungen - durch halb Europa führte. Für diese Reisen hatte er einen eigenen Reisewagen, bei dem auch Platz für sein Euphon (und später für den Clavicylinder) vorhanden war. Zwischen den Reisen hielt er sich immer wieder für längere oder kürzere Zeit in seiner Wittenberger Wohnung auf (ab



Abb. 4.1.1. Portal des Hauses Wittenberg, Schloßstr. 10. Foto: Landesamt für Denkmalpflege, Sachsen-Anhalt, Halle/S.

1813 in der Kemberger Wohnung). 1792 verkaufte CHLADNI sein Elternhaus in der Mittelstraße 5, blieb aber bis zum Tod der Stiefmutter am 21.4.1801 dort wohnen. Erst danach zog er in das Haus Schloßstraße 10 mit dem Namen "Zur Goldenen Kugel". Dort lebte auch der Inhaber des Wittenberger Lehrstuhls für Physik, CHRISTIAN AUGUST LANGGUTH (1754-1814). Das Haus "Zur Goldenen Kugel" war ebenfalls der Wohnsitz des Theologieprofessors MICHAEL WEBER (1754-1833), hier kam 1804 dessen Sohn WILHELM zur Welt (gest. 1891), der später berühmte Physiker. Der häufige persönliche Umgang des jungen WILHELM WEBER mit CHLADNI im Hause Schloßstraße 10 hat auch auf die Themenwahl seiner ersten Forschungsarbeiten gewirkt. Er hat sich am Anfang seiner Laufbahn zusammen mit seinem Bruder ERNST HEINRICH WEBER (1795-1878) der Wellenlehre zugewandt.

Es wurde schon früher berichtet, daß sich CHLADNI bei der von ihm selbst gewählten Lebensweise nicht unzufrieden fühlte. Manche Orte besuchte er im Laufe seines Lebens mehrfach. In etlichen hielt er sich einige Wochen oder gar Monate auf, besonders dann, wenn sich dort eine gute Bibliothek befand, oder wenn er Kontakte zu bedeutenden Persönlichkeiten knüpfen konnte. Zu diesen Reisen gibt es leider kein Tagebuch.

Sehr oft bin ich gefragt worden, ob ich denn nicht gesonnen sey, eine Beschreibung meiner Reisen zu liefern. Hierauf antworte ich, daß ich ganz und gar keine Lust dazu habe und es auch für überflüssig halte, da die von mir bereis'ten Gegenden schon hinlänglich bekannt sind. Ich habe deshalb auch nie ein Tagebuch gehalten, und höchstens nur etwa den Tag der Ankunft an einem Orte oder den der Abreise angemerkt, aber doch die vorzüglichsten Personen und Gegenstände alle im Gedächtnisse behalten, manche selbst mit den geringfügigsten Umständen. (CHLADNI 1817a, XII)

Heute müssen aus den schriftlichen Äußerungen CHLADNIS, aus Berichten seiner Zeitgenossen, aus dem vorhandenen Briefwechsel und aus den vielen Einzelveröffentlichungen die Reisewege rekonstruiert werden. CHLADNIS erste Reise führte nach Dresden, die erste Berlinreise war vom Januar bis Februar 1792 (HOPPE 1977a, 260, Fußnote 1), ein weiterer längerer Berlinaufenthalt innerhalb des in diesem Kapitel betrachteten Zeitraums war vom Dezember 1798 bis März 1799. Am Ende des Jahres 1792 kam CHLADNI nach Göttingen, und die persönliche Begegnung mit GEORG CHRISTOPH LICHTENBERG sollte - wie im folgenden Kapitel beschrieben wird - für CHLADNIS wissenschaftliches Betätigungsfeld von großer Bedeutung werden. 1777 hatte LICHTENBERG Gleitentladungen auf einem Dielektrikum durch Bestäuben mit Mennige- und Schwefelpulver sichtbar machen können. Nach

eigener Aussage waren diese LICHTENBERGSchen Figuren für CHLADNI der Anlaß, seine Platten mit feinem Sand zu bestreuen. Als CHLADNI im Februar 1793 nach Bremen zu dem Arzt und Astronomen HEINRICH WILHELM MATTHIAS OLBERS (1758-1840) weiterreiste, gab ihm LICHTENBERG ein Empfehlungsschreiben mit:

... nehme ich mir die Freyheit Ihnen den Überbringer dieses, Herrn Dr. Chladni aus Wittenberg, zu empfehlen. Sie werden in ihm einen Mann von sehr tiefen Einsichten nicht blos in alles was die Natur der Töne, sondern Physic überhaupt angeht, finden. Daß er der Erfinder eines neuen musikalischen Instruments ist, das er Euphon nennt, wird Ihnen bekant seyn. Aber dieses ist, in meinen Augen wenigstens, nichts gegen das, was der vortreffliche Mann für die Theorie der Schwingungen tönender Körper durch Sichtbarmachung derselben gethan hat. Er hat ein ganz neues Feld eröffnet, und ich bin überzeugt, seine Versuche werden für einen Mann von Ihrem Geiste eine unerschöpfliche Unterhaltung seyn. (SCHMANK 1953a, 372)

CHLADNI reiste dann von Bremen über Hamburg, wo er sich von März bis Mitte April aufhielt (LOEWENFELD 1929a, 121-122), nach Kopenhagen weiter, das er 1797 ein zweites Mal besuchte.

Das Buch "Entdeckungen über die Theorie des Klanges" mit der Widmung an die Akademie in St. Petersburg war der Anlaß zu einer Reise in die russische Hauptstadt. Sie begann Anfang 1794 und führte über Danzig (heute Gdańsk), Königsberg (heute Kalininograd) und Riga an die Stadt an der Newa. Am 22.5.1794 wurde CHLADNI zum Korrespondierenden Mitglied der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften gewählt, und am 31.5.1794 führte er dort die Klangfiguren und das Euphon vor (Nova Acta Acad. Sci. Imp. Petrop. 12(1794), 38 (1801)). Den Rückweg wählte der Akustiker über Narva nach Tallinn (Reval) und von da per Schiff nach Flensburg. Mitte August 1794 traf er wieder in Wittenberg ein. Bei dem Zwischenaufenthalt auf der Hinreise in Danzig hat CHLADNI vermutlich Versuche mit der singenden Flamme bei dem dort wirkenden JOHANN CHRISTIAN AYCKE (1766-1854) gemacht (CHLADNI 1795d). Der Mangel an geeigneten wissenschaftlichen Geräten in Wittenberg hat oft dazu geführt, daß er sich bei seinen Reisen der Möglichkeiten in den Labors bestimmter Forscher bediente. Wissenschaftliche Geräte waren damals in der Regel noch Privatbesitz der Professoren, und ihre Anschaffung war bei dem kleinen Gehalt der Universitätslehrer eine kaum erschwingliche Investition.

Am 3.8.1795 hielt CHLADNI in Erfurt einen akustischen Vortrag und führte das Euphon vor. Gremium war die 1754 gegründete Kurfürstlich-Mainzische Gesellschaft oder

Akademie nützlicher Wissenschaften, die ihren Sitz in dieser thüringischen Stadt hatte (KIEFER 1993a, 94) und deren Korrespondierendes Mitglied CHLADNI im Anschluß an seine Demonstrationen wurde. Berühmtheit erlangte sein Vortrag "Ueber die Longitudinalschwingungen der Saiten und Stäbe" am 2.1.1796 vor dieser Akademie. Er erschien nicht nur in der Schriftenreihe dieser Wissenschaftsgesellschaft, sondern wegen seiner großen Bedeutung auch in Buchform 1796 im Verlag GEORG ADAM KAYSER in Erurt. Über den Inhalt soll in Kap. 4.3 gesprochen werden. Als sich CHLADNI in den Jahren 1797-1798 in Dresden, Prag, München und Wien aufhielt, bot sich die Gelegenheit zu umfangreichen Versuchen im La-



Abb. 4.1.2. CHLADNI 1800 auf Vortragsreise in Regensburg (aus dem Bildarchiv des Deutschen Museums, München)

bor des Wieners JOSEPH FRANZ VON JACQUIN (1766-1839), die zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen führte (CHLADNI 1798a). Darüber soll in Kap. 4.6 ausführlich die Rede sein.

#### 4.2 Begegnung mit LICHTENBERG und die Meteoritenschrift von 1794

Auch im Rahmen einer Akustikgeschichte muß auf das zweite Betätigungsfeld CHLADNIS wenigstens kurz eingegangen werden. 1791 war in Göttingen die 5. Auflage von JOHANN CHRISTIAN POLYKARP ERXLEBENS (1744-1777) "Anfangsgründe der Naturlehre" durch LICHTENBERG neu herausgegeben worden. Im § 758 dieses Buches war zu lesen:

Die sog. Sternschnuppen oder Sternschneuzen ... sind vielleicht ähnliche Wirkungen fetter Dünste in dem Luftkreise, die sich entweder wirklich entzünden oder auch nur bloß leuchten; und eben dahin gehören die fliegenden Drachen, Feuerkugeln (bolides) und mehrere der gleichen bisweilen gesehene Erscheinungen, bei denen übrigens auch vielleicht, wenigstens zu Zeiten, einige Elektrizität mit im Spiele ist. (Zitiert nach CHLADNI/HOPPE 1979a, 18)

Als CHLADNI zur Jahreswende 1792/93 nach Göttingen kam, sprach er mit LICHTENBERG u.a. auch über diesen Paragraphen des ERXLEBENSCHEN Buches und über die Natur der Feuerkugeln. CHLADNI berichtete: "Als ich ihm weiter mit Fragen zusetzte, wofür man sie denn eigentlich halten könne, ... antwortete er, die Feuerkugeln möchten wohl etwas nicht Tellurisches, sondern Kosmisches sein, nämlich etwas, das nicht in unserer Atmosphäre seinen Ursprung habe, sondern von außen in derselben anlangt und darin sein Wesen treibe; was es aber sey, wisse er nicht" (CHLADNI 1819a, 7-8).

Diese von LICHTENBERG hingeworfene Bemerkung, die er selbst nicht ernst nahm (wie später noch berichtet werden wird), ließ CHLADNI nicht los, und noch während seines Göttinger Aufenthaltes im Januar/Februar 1793 studierte er in der dortigen Universitätsbibliothek alle verfügbaren Berichte über Meteoritenfälle und Feuerkugeln. Nach seiner Rückkehr ließ er sich weiteres Material zu diesem Thema aus Leipzig in seine Wittenberger Wohnung kommen (EBSTEIN 1905a, 443-444). Danach begann er mit der Abfassung des Manuskripts zu seinem zweiten Buch mit dem Titel "Ueber den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen, und über einige damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen" (CHLADNI 1794a), das 1794 gleichzeitig im Verlag C.J. GÖSCHEN in Leipzig und bei J.F. HARTKNOCH in Riga erschien. Aus dem Titel läßt sich nicht erkennen, daß durch diese Schrift die Meteoritenkunde begründet wurde und in ihr

Ansichten über den Ursprung der Meteorite (CHLADNI sprach von "meteorischen Massen" oder "Meteor-Steinen") und Feuerkugeln (Bolide) vorgetragen wurden, die heute zur Selbstverständlichkeit geworden sind. Zusammen mit der acht Jahre später erschienenen Monographie "Die Akustik" gehört dieses Buch zu den bedeutendsten naturwissenschaftlichen Büchern der Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert.

Meteoritenfälle und Feuerkugeln kannte man schon im Altertum. Man beschrieb sie als vom Himmel gefallene erloschene Sterne und brachte ihnen religiöse Verehrung entgegen. Noch im Mittelalter wußte man etwas von der Tatsache, daß Steine vom Himmel fallen können. Ein solches Ereignis wurde oft mit religiösen Vorstellungen verbunden. Der am 7.11.1492 bei Ensisheim im Elsaß gefallene Steinmeteorit mit der Masse von 125 kg fand seinen Aufbewahrungsort in der Kirche des Ortes, und SEBASTIAN BRANT (1457/58-1521) verfaßte den Text zu einem Einblattdruck, in dem dieser Stein als böses Omen für den Kampf Kaiser MAXIMILIANS I. (1459-1519) gegen seine Feinde gedeutet wurde, denn der Kaiser hielt sich bei seinem Feldzug gegen Frankreich am 26.11.1492 in Ensisheim auf.

In der Zeit der Aufklärung lehnte man solche Deutungen als Wunderglaube ab. Unter den überlieferten Berichten zu Meteoritenfällen fanden sich viele, die übertrieben, unglaubwürdig oder gar falsch waren. Es ist interessant, daß infolge solcher Kommentare die Wissenschaft der Aufklärung sich überhaupt gegen den Fall von Steinen vom Himmel wandte. Solche Naturereignisse rechnete man am Ende des 18. Jahrhunderts noch zu den Lufterrscheinungen derselben Kategorie wie Blitze, Nordlicht, Zodiakallicht und Wetterleuchten.

1749 fand der russische Bauer und Schmied JAKOB MEDWEDEF auf einem Berge bei Krasnojarsk in Sibirien eine 16 Zentner schwere Eisenmasse. Der aus Berlin stammende Naturforscher und Sibirienreisende PETER SIMON PALLAS (1741-1811) hat sie 1776 das erste Mal wissenschaftlich beschrieben (PALLAS 1776a, 417-422). Das Pallas-Eisen, das nach heutiger Nomenklatur ein Stein-Eisenmeteorit ist, wurde nach St. Petersburg gebracht, und noch PALLAS selbst hat Probestücke von der Masse in verschiedene Orte geschickt, so auch 1776 nach Berlin als Dank für seine Ernennung zum Auswärtigen Mitglied der Gesellschaft Naturforschender Freunde (HOPPE 1976a). Dieses Berliner Probestück war übrigens der einzige Meteorit, den CHLADNI bei der Abfassung des Manuskriptes für das Buch von 1794 aus eigener Anschauung kannte. Er hat das Pallas-Eisen - über dessen Natur man sich bis dahin nicht einig war - zum Ausgangspunkt seiner Theorie gemacht und sogar in den Titel



des Werkes aufgenommen. Ein zweiter Grund für die Hervorhebung dieses Fundes war der Anteil an gediegenem Eisen, der bei den damals bekannten irdischen Mineralen äußerst selten war.

In seiner Schrift setzte sich CHLADNI zunächst mit den zeitgenössischen Erklärungsversuchen für Feuerkugeln auseinander. Sie gingen ausnahmslos von der Vorstellung ihres Ursprungs in der Atmosphäre aus. Er verwarf alle diese Versuche und erklärte mit einer Wahrscheinlichkeit, die nahe an Gewißheit grenzt: "Daß das Wesen der Feuerkugeln in Anhäufung der Nordlichtmaterie, in einem Übergange der Elektrizität aus einer Gegend der Atmosphäre in die andere, in einer Anhäufung lockerer brennbarer Materien in der obern Luft und in Entzündung einer langen Strecke von brennbarer Luft nicht besteht..." (CHLADNI/HOPPE 1979a, 56-57), sondern daß Feuerkugeln aus dichten und schweren Grundstoffen bestehen, kosmischen Ursprungs sind und die Leuchterscheinungen durch Abbremsvorgänge des Körpers beim Eintritt in die Erdatmosphäre hervorgerufen werden würden. CHLADNI übertrug diesen Schluß mit einem gewissen Grad von Wahrscheinlichkeit auch auf die Sternschnuppen (Meteore). Daß bei ihnen keine Niederfälle beobachtet wurden, führte er auf eine größere Entfernung ihrer Bahnen von der Erde zurück, bei der sie die Atmosphäre nur streifend berühren würden. Bemerkenswert ist CHLADNIS Vorschlag, durch gleichzeitige Beobachtungen der Meteore von verschiedenen Orten auf der Erde aus ihre Bahnen und Höhe genauer zu erforschen. Diese Anregung wurde bald darauf (1798) von HEINRICH WILHELM BRANDES (1777-1834) und JOHANN FRIEDRICH BENZENBERG (1777-1846) aufgegriffen und in die Tat umgesetzt.

Den CHLADNISCHEN Vorstellungen am nächsten waren die des englischen Astronomen und Kometenforschers EDMUND HALLEY (1656-1742). Er hielt Feuerkugeln "... für Materie, die im allgemeinen Weltraume zerstreut gewesen, sich irgendwo gesetzt habe und von der Erde in ihrem Laufe angetroffen werde..." (CHLADNI/HOPPE 1979a, 55). Jedoch fehlte bei HALLEY der Hinweis auf einen Zusammenhang mit den gefundenen Meteoritenmassen.

CHLADNI sammelte in seiner Schrift eine Reihe von Berichten aus der Literatur über die aus Feuerkugeln niedergegangenen Stein- und Eisenmassen. Als ausgebildeter Jurist hat er dabei die glaubwürdigen von den unglaubwürdigen Berichten getrennt und betont, "... welche Genauigkeit in Erzählung oder Wiedererzählung von Naturbegebenheiten nötig ist, um nichts von seiner eigenen Erklärungsart in die Tatsachen hinüberzutragen" (CHLADNI/HOPPE 1979a, 66).

Beim Pallas-Eisen untersuchte CHLADNI die Möglichkeit einer Entstehung als Verhüttungsprodukt, als Ergebnis einer vulkanischen Eruption oder als mögliches Endprodukt bei einem Schmelzvorgang durch Blitzeinwirkung. Da alle diese Deutungsversuche für das Pallas-Eisen auf Grund der Verhältnisse am Fundort nicht in Frage kamen, blieb nur noch ein kosmischer Ursprung übrig. So kam CHLADNI zu dem bemerkenswerten Schluß, daß Meteoritenfunde und Meteoritenfälle, Feuerkugeln und wahrscheinlich auch Sternschnuppen (Meteore) einen gemeinsamen Ursprung haben und kosmischer Herkunft sein müssen.

Im §16 "Einige fernere Erläuterungen" des Buches von 1794 betonte der Forscher die Veränderlichkeit der Himmelskörper, ihre Bildung und Zerstörung. Über die Bildung schrieb er:

... daß entweder materielle Teile, die vorher in einem mehr lockern und chaotischen Zustande in einem größern Raume zerstreut gewesen sind, sich durch die Anziehungskraft in große Massen angehäuft haben; oder, daß Weltkörper aus den Teilen einer zerstückten weit größern Masse sind gebildet worden ... (CHLADNI/HOPPE 1979a, 86)

Die bei der Bildung übriggebliebenen kleinen Massenteile - so CHLADNI - gelangen in die Nähe anderer Weltkörper, z.B. des Planeten Erde, und rufen Erscheinungen wie Feuerkugeln oder Sternschnuppen hervor.

Die Schlüsse CHLADNIS in seiner Schrift von 1794 waren selbst einem so unkonventionell denkendem Geist wie LICHTENBERG so gewagt, daß dieser zunächst zurückhaltend reagierte. Der Akustiker schrieb 1819:

Noch nach dem Erscheinen meiner Abhandlung war die ganze Sache Lichtenbergen so fremdartig, daß er zu Hrn. Prof. Harding<sup>6</sup> und zu Andern sagte: es sey ihm bey dem Lesen meiner Schrift anfangs so zu Muthe gewesen, als wenn ihn selbst ein solcher Stein am Kopfe getroffen hätte, und er habe anfangs gewünscht, daß ich sie nicht geschrieben hätte. Späterhin ward er davon überzeugt, und im Göttingischen Taschenkalender auf 1797 äußerte er, der Mond (dem er es zuschrieb) sey ein unartiger Nachbar, weil er mit Steinen nach uns werfe. (CHLADNI 1819a, 7, Fußnote)

CHLADNI hat LICHTENBERG in der Schrift von 1794 als Geburtshelfer seiner Meteoritentheorie übrigens nirgends erwähnt. Der Grund hierfür lag in der von ihm vorausgesehenen Reaktion der wissenschaftlichen Welt auf dieses Buch, für dessen Inhalt er ganz allein die

---

<sup>6</sup>KARL LUDWIG HARDING, 1765-1834, Astronom in Lilienthal bei Bremen und Göttingen

Verantwortung übernehmen wollte, "... weil ich den anfänglichen Vorwurf einer Versündigung gegen Physik, gegen Aufklärung, und gegen Orthodoxie lieber allein tragen, als jemanden mit hineinziehen wollte..." (CHLADNI 1819a, 10).

Auf die weitere Entwicklung des Meteoritenthemas kann im Rahmen einer Akustikgeschichte natürlich nicht eingegangen werden.

### 4.3. Dehnungs- und Torsionsschwingungen von Stäben

Zum Schluß seines Erstlingswerkes von 1787 teilte CHLADNI eine Beobachtung an Saiten mit, die ihn auf die Untersuchung einer neuartigen Schwingungsform führte. Er schrieb:

An etwas langen und dünnen Saiten zeigt sich eine, soviel mir bekannt ist, noch von niemanden beobachtete Folge von Schwingungsarten, wenn man sie mit dem Violinbogen unter einem sehr spitzen Winkel streicht. Wenn das Streichen in deren Mitte oder in keiner großen Entfernung davon geschieht, so hört man einen Klang, der den gewöhnlichen Grundton der Saite ungefähr um drey bis fünf Octaven an Höhe übertreffen kann.... Alle diese Töne klingen ziemlich unangenehm, und lassen sich deshalb nicht füglich zu einem practischen Gebrauche anwenden; verdienen aber doch wegen ihrer gänzlichen Abweichung von allen übrigen Schwingungsarten genauer untersucht zu werden. Sie haben kein bestimmtes Verhältniß gegen die durch rechtwinkliches Streichen zu erhaltenden Töne; indem dabey sehr wenig auf die Spannung der Saite ankommt... (CHLADNI 1787a, 76)

Damit waren von CHLADNI die Longitudinalschwingungen (oder Längentöne) begrenzter Festkörper entdeckt worden, und schon in der Schrift von 1787 wurden wesentliche Eigenschaften dieser Schwingungsart erwähnt. Bei dieser Schwingungsart sprechen wir heute von Dehnungsschwingungen (extensional vibrations), weil bei Körpern, deren Querausdehnung klein zur Schallwellenlänge ist auch kleine Querverschiebungen der Mediumteilchen auftreten. Nur in unbegrenzten Festkörpern verlaufen die Schwingungen longitudinal. Die Differentialgleichung für die Dehnungswellen eines homogenen Stabes mit dem Elastizitätsmodul  $E$  und der Dichte  $\rho$  und einer Ausdehnung in der  $x$ -Achse lautet in moderner Schreibweise ( $u$  Verschiebung in  $x$ -Richtung, Index bedeutet partielle Ableitung)

$$u_{xx} = (E/\rho)u_{tt} \quad (4.3.1)$$

mit der Schallgeschwindigkeit

$$c = (E/\rho)^{1/2}. \quad (4.3.2)$$

Die Theorie dieser Erscheinung behandelte SIMÉON DENIS POISSON (1781-1840) in seinem Werk "Traité de mécanique", das 1811 in Paris in erster Auflage erschien (POISSON 1833a, Bd. 2, 316-331; SZABÓ 1987a, 462).

CHLADNI untersuchte in den Jahren nach 1787 diese Schwingungsart zunächst an gespannten Saiten (CHLADNI 1792a). 1792 war von dem Freiburger Mathematiker und Physiker FRIEDRICH GOTTLIEB V. BUSSE (1756-1835) ein Artikel erschienen, in dem dieser von den Vogeltönen auf Geigen und Harfen sprach (BUSSE 1792a). CHLADNI wies darauf hin, daß diese Töne mit den von ihm bereits 1787 erwähnten Längentönen identisch sind. Schließlich wurden Stäbe aus verschiedenem Material untersucht, die der Forscher durch Reiben mit einem feuchten Tuch in Längsrichtung zu Schwingungen anregte. Die im Anschluß an den schon im Kap. 4.1 erwähnten Vortrag vom 2. Januar 1796 in Erfurt erschienene Publikation "Ueber die Longitudinalschwingungen der Saiten und Stäbe" faßt die Ergebnisse der Arbeiten CHLADNIS auf diesem Gebiet zusammen. WILHELM WEBER hat 1830 die Entdeckung der Dehnungsschwingungen fester Körper als die "vielleicht ... wichtigste akustische Entdeckung Chladni's" (WEBER 1892a, 178) bezeichnet. WEBER hatte die Hoffnung ausgesprochen, daß man die Reinheit der Metalle nun auch aus ihren Dehnungsschwingungen erkennen kann. In einem Auszug aus der Schrift von 1796 schrieb CHLADNI:

Daß ... auch feste Körper nach der Richtung der Länge schwingen können, und sich dabey nach ebendenselben Naturgesetzen richten, wie die in einer Röhre enthaltene ausdehnbare Flüssigkeit, und daß die Gesetze dieser Longitudinalschwingungen von den Gesetzen der Transversalschwingungen ganz verschieden sind, habe ich an Saiten ... 1792, und an Stäben in meiner Schrift: über Longitudinalschwingungen der Saiten und Stäbe, zuerst gezeigt. (CHLADNI 1797a, 8)

Wichtigstes Ergebnis war, daß die Längentöne harmonisch zueinander liegen und sich bei gleicher Saiten- oder Stabbeschaffenheit umgekehrt wie ihre Längen verhalten. Bei Veränderungen der Spannkraft und der Dicke wurden kaum Tonhöhenänderungen gemessen, dagegen erwies sich das Material von großem Einfluß. Um einigermaßen tiefe Töne zu erhalten, mußte die Stab- oder Saitenlänge relativ groß sein.

CHLADNI unterschied drei Randbedingungen: 1) ganz frei, 2) an einem Ende befestigt

und 3) an beiden Enden befestigt. Er hielt den Stab an einem Schwingungsknoten. War die Randbedingung gemäß 1), so hatte der Stab in seiner Grundschiwingung in der Mitte einen Schwingungsknoten, beim ersten Oberton lagen die zwei Knoten im Abstand  $l/4$  von den Enden entfernt, wenn  $l$  die Stablänge bedeutet. Entsprechendes gilt für die höheren Obertöne, die Tonfolge war wie 1, 2, 3, 4 usw. Wurde der Stab an einem Ende befestigt, so trat eine Tonfolge wie 1, 3, 5, 7 usw. auf. CHLADNI betonte die Ähnlichkeit der Schwingungsverhältnisse mit den Tönen einer Pfeife, bei der die eingeschlossene Luft die Schwingungen ausführt. In offenen Pfeifen liegen dieselben Tonverhältnisse wie beim beiderseits freien Stab vor, bei einer gedackten Pfeife ist für die Tonfolge ein Vergleich mit der Randbedingung 2) gerechtfertigt.

In einer Tabelle in seiner Schrift von 1796 hat CHLADNI die unterschiedlichen Eigenschaften der Transversal- und Longitudinalschwingungen bei Stäben übersichtlich nebeneinandergestellt. Dabei unterlief ihm der Fehler, daß er noch keine Abhängigkeit der Frequenz der Longitudinaltöne von der Dichte des Mediums erkennen konnte: "Auf die spez. Schwere kommt gar nichts an, wie denn z.B. Weidenholz, Glas, Eisen, Tannenholz nur wenig voneinander verschieden sind; so auch Eichenholz und Messing" (CHLADNI 1796a).

Durch weitere Untersuchungen korrigierte CHLADNI 1802 diesen Punkt, indem er schrieb, daß die Frequenz der Longitudinalschwingungen "... wahrscheinlich auch umgekehrt wie die Quadratwurzeln der Schwere ... "(CHLADNI 1802a, 109) sei. Auch in der Schrift von 1827 ist sich der Akustiker über die Abhängigkeit der Longitudinalfrequenz von der Dichte noch nicht so ganz sicher: "Die Töne verschiedener Materien scheinen sich wie die Quadratwurzeln der longitudinalen Steifigkeit und wie die umgekehrten Quadratwurzeln der Schwere zu verhalten" (CHLADNI 1827b, 31).

Die Differentialgleichung für die Torsionswellen in kreiszylindrischen Stäben ist (mit den gleichen Bezeichnungen wie bei (4.3.1))

$$\varphi_{xx} = (G/\rho)\varphi_{xx}, \quad (4.3.3)$$

und ihre Geschwindigkeit beträgt

$$c = (G/\rho)^{1/2}, \quad (4.3.4)$$

wobei  $\varphi$  die Winkelverdrehung des Querschnitts ist und  $G$  der Schub- oder Torsionsmodul.

CHLADNI untersuchte im Anschluß an die Arbeiten von 1796 und 1797 auch Torsionsschwingungen von Stäben und verglich sie mit den Biegungs- und Dehnungsschwingungen:

Seit einiger Zeit habe ich bemerkt, dass ausser diesen beiden Richtungen der schwingenden Bewegung [transversal und longitudinal, D.U.] noch eine dritte statt findet, wo sich der Stab oder jeder der Theile, in welche er sich abtheilt, abwechselnd, rechts und links, schraubenförmig dreht, wobei die Schwingungsknoten oder die Grenzen der schwingenden Theile, eben so wie bei andern Arten der Schwingungen, ohne Bewegung bleiben. Es lassen sich dergleichen drehende Schwingungen am leichtesten an einem hinlänglich langen cylindrischen Stabe, dessen Oberfläche so glatt als möglich ist, hervorbringen, wenn man den Stab an einer Stelle, wo ein Schwingungsknoten ist, mit zwei Fingern der einen Hand locker hält, und mit einem zwischen den Fingern der andern Hand gehaltenen wollenen Lippchen, an einer schwingenden Stelle, in einer drehenden Bewegung reibt. (CHLADNI 1799a, 88)

Es könnte aus diesem Zitat der Eindruck entstehen, als ob CHLADNI die Torsionsschwingungen als eine dritte Klasse von Schwingungen neben den transversalen und longitudinalen betrachtet hat. Diesem möglichen Mißverständnis tritt der Forscher in seinen späteren Schriften entgegen und bezeichnete sie als besondere Form transversaler Schwingungen.

Die möglichen Schwingungsformen bei unterschiedlichen Randbedingungen sind ganz ähnlich wie bei der Longitudinalschwingung. Im Unterschied dazu stellte CHLADNI jedoch fest: " ... dass, so weit ich es beobachtet habe, bei einer drehenden Richtung der schwingenden Bewegung der Ton allemahl um eine Quinte tiefer ist, als wenn der Stab unter eben denselben Umständen longitudinal schwingt" (CHLADNI 1799a, 89).

Hinter dieser Bemerkung steckt natürlich die Tatsache, daß für isotrope Stoffe

$$E/G = 2(1 + \sigma) \quad (4.3.5)$$

ist, mit  $\sigma$  als Poissonscher Zahl ( $\sigma \leq 1/2$ ), eine Beziehung, die erst in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts bekannt wurde (SZABÓ 1974a).

Torsionsschwingungen hatte vor CHLADNI bereits 1784 CHARLES AUGUSTIN COULOMB (1736-1806) untersucht. Mit Hilfe der von ihm entwickelten Drehwaage konnte er die Frequenzen von Torsionsschwingungen bestimmen (TRUESDELL 1960a, 405-408; SZABÓ 1987a, 386).

Mit den Torsionsschwingungen in Zusammenhang brachte nun CHLADNI eine

Beobachtung, die er in der Schrift von 1787 beschrieb, aber damals nicht erklären konnte (CHLADNI 1787a, 75-76). Spannte er einen vierseitigen prismatischen Stab mit einem Ende in einen Schraubstock und strich von einer Kante in diagonaler Richtung mit dem Violinbogen, so sammelte sich der Sand auf der horizontalen Seite des Stabes längs einer geraden Linie in der Mitte. Das zeigte sich auf jeder Seite des Stabes, wenn sie nur horizontal gehalten wurde.

Die Ursache davon liegt darin, weil an den Kanten, wegen ihrer grösseren Entfernung von der Achse, die Excursionen bei diesen Schwingungen grösser sind, als in der Mitte einer jeden Seite, weshalb der aufgestreute Sand, welcher von den näher an den Kanten befindlichen Stellen weggeworfen wird, in der näher bei der Achse befindlichen Mitte einer jeden Seite, wo die Schwingungen am kleinsten sind, der Länge nach sich anhäufen muss. (CHLADNI 1799a, 90)

CHLADNI hielt seine Beschreibung der Torsionsschwingungen für so wichtig, daß er sie in (fast) identischer Form in zwei verschiedenen Zeitschriften veröffentlichen ließ (CHLADNI 1799a und 1799b). Der Unterschied zwischen beiden Versionen besteht lediglich in der Seitenangabe zu der schon 1787 beschriebenen Beobachtung, die in der Publikation der "Annalen der Physik" (CHLADNI 1799a) fehlerhaft war.



#### 4.4 Akustische Begriffsbestimmungen

In den betrachteten Zeitraum fallen nun Versuche, in die Begriffe Ton, Klang und Geräusch Klarheit zu bringen. Bis zur vollen Klärung in dem Sinne, wie die Begriffe heute verwendet werden, vergehen allerdings noch mehr als fünfzig Jahre.

Ganz diffus ist die Aussage des Physikers und Chemikers FRANZ CARL ACHARD (1753-1821), der in seinen Vorlesungen über Experimentalphysik, die er 1791 in Berlin herausgab, schrieb:

Wenn die Luft mit Geschwindigkeit aus einem Raume, in welchem sie stark zusammen gepreßt ist, in einem andern übergeht, in welchem sie eine geringere Dichtigkeit hat, oder wenn sie aus engen Oeffnungen fester, oder gespannter Körper hervortritt, so bringt sie, in uns, durch das Organ des Gehörs, eine Empfindung hervor, die man nach der Verschiedenheit des Grades, in welchem sie uns empfindbar wird, oder nach ihrer Dauer, Schall, Klang, Geräusch, oder Knall nennt. (ACHARD 1791a, §845)

Nicht nur, daß hier die Akustik wieder bei der Lehre von der Luft abgehandelt wird, wogegen sich CHLADNI mehrfach heftig wandte, die Begriffe Schall, Klang, Geräusch und Knall werden darüber hinaus mit der Empfindungsstärke im Gehör und mit ihrer Dauer in Verbindung gebracht.

CHLADNIS Äußerungen zu diesem Themenkomplex in seinem Werk aus dem Jahre 1787, also vier Jahre vor ACHARD, waren da schon wesentlicher zutreffender:

Ein Klang entsteht, wenn ein elastischer Körper gleichzeitige und hörbare Schwingungen macht. Die Gleichzeitigkeit der Schwingungen ist unstreitig die einzige wesentliche Eigenschaft, durch welche sich ein Klang von jedem andern Geräusche unterscheidet ... Ton nennt man einen Klang, bey dem man nur auf seine Höhe oder Tiefe, d.i. auf die mehrere oder mindere Geschwindigkeit der Schwingungen, Rücksicht nimmt. (CHLADNI 1787a, 71-72)

In CHLADNIS Hauptwerk "Die Akustik" wurden 1802 die im Buch von 1787 gegebenen Definitionen von Klang, Geräusch und Ton präzisiert:

Bey einem Schalle sind die Schwingungen (sowohl in Ansehung der Zeiträume, in welchen sie geschehen, als auch in Ansehung der Gestaltveränderungen des elastischen Körpers) entweder gleichartig, und (durch das Gehör wie auch durch andere bisher bekannt gewordene Mittel) bestimmbar oder sie sind es nicht; im erstern Falle ist es ein Klang, im letztern ein

Geräusch ... Wenn man bey einem Klange blos auf die Geschwindigkeit der zitternden Bewegung, nicht aber auf die Eigenschaften und Gestaltveränderungen des klingenden Körpers Rücksicht nimmt, so nennt man ihn einen Ton... (CHLADNI 1802a, 3)

Nur wenn die Schwingungen eines elastischen Körpers bezüglich der Zeitintervalle und der Gestaltsänderungen gleichartig sind, so CHLADNI, ist der entstehende Schall kein Geräusch, sondern ein musikalisch verwertbarer Klang. Der Wittenberger Forscher benutzte den Begriff Klang also für einen aus Teiltönen zusammengesetzten Schall. Es fehlte natürlich noch der Hinweis darauf, daß nach heutiger Definition eines Klanges die Teiltöne harmonisch zueinander liegen müssen. Der Begriff Ton wurde bei CHLADNI im Sinne von Frequenz benutzt, er ist gleich der Zahl der Schwingungen, welche in einer gewissen Zeit stattfinden.

Völlig unbekannt war um die Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert noch die Ursache für die Verschiedenheit der Klänge unterschiedlicher Musikinstrumente. Natürlich wußte man, daß der Ton z.B. einer Flöte und der einer Geige trotz gleicher Tonhöhe unterschiedliche Qualitäten besitzt. Noch in der Schrift von 1827 schrieb CHLADNI: "Von der qualitativen Verschiedenheit der Klänge (im Französischen timbre, wofür man wohl im Deutschen das Wort: Laut brauchen könnte) ist das Wesentliche noch unbekannt" (CHLADNI 1827b, 5-6).

Die weitere Entwicklung in der Klärung des Begriffs Klangfarbe wird im Kap. 8.2 beschrieben.

1802, in dem Werk "Die Akustik", verwendete CHLADNI die Begriffe Longitudinal- und Transversalschwingungen bzw. Longitudinal- und Transversalwellen in dem Sinne, wie wir das auch noch heute tun. Dabei bestehen die longitudinalen (oder primären) Schwingungen in Verdichtungen und Verdünnungen, die transversalen (oder sekundären) in Beugungen. Mit Beugungen sind bei CHLADNI Bewegungen gemeint, die Formänderungen großen Widerstand entgegensetzen. Daß die von ihm entdeckten Dehnungsschwingungen, die er als Longitudinalschwingungen bezeichnete, in Wirklichkeit ein Mischtyp sind, bei dem außer der longitudinalen Verschiebung der Medienteilchen auch kleine transversale Verschiebungen auftreten, mindert nicht das Verdienst CHLADNIS, diese Einteilungsart als erster systematisch benutzt zu haben (s. auch Kap. 8.1). Auch die Torsionsschwingungen bzw. Torsionswellen wurden 1802 (CHLADNI 1802a, §133) und 1827 konsequent dem Typus Transversalschwingungen bzw. Transversalwellen zugeordnet, wie bereits im Kap. 4.3 berichtet

wurde. Die Erkenntnis, daß Transversalwellen nur in solchen elastischen Medien möglich sind, für die der Schubmodul  $G \neq 0$  ist, gehört einer späteren Zeit an.

Diese uns heute geläufigen Begriffe Longitudinal- und Transversalschwingungen haben sich nicht überall sofort durchgesetzt. Selbst der für die Entwicklung der Akustik hochverdiente FÉLIX SAVART, über dessen Arbeiten im Kap. 8.1 berichtet werden soll, verwendete eine verwirrende Terminologie. Mehr zur Abschreckung sei eine Fußnote CHLADNIS in seiner Schrift von 1827 zitiert, wo es zu diesem Thema heißt:

Savart ist ... veranlasst worden, ... in den *Ann. de Chimie* t. 25, p. 18 und 260<sup>7</sup> die Begriffe und Benennungen mehr, als nöthig ist, zu vielfältigen. Wenn an einer Platte eine die Oberfläche berührende Bewegung der Länge nach Statt findet, nennt er sie tangential longitudinal (ich longitudinal), wenn die an der Oberfläche tangential Bewegung perpendicular auf die Seitenkanten geschieht, nennt er diese Bewegung tangentialtransversal, (ich würde sie als eine transversale in der Richtung der Breite ansehen ...) ... Die Bewegungen, welche perpendicular gegen die Oberfläche einer Platte geschehen, nennt er normal (ich transversal) ... (CHLADNI 1827b, 19, Fußnote)

Völlig zu Recht schließt CHLADNI seine Ausführungen zur Kritik an der Terminologie SAVARTS mit dem Argument:

... Die Ausdrücke: tangential und normal kann ich deshalb nicht billigen, weil jede mögliche Bewegung, die schiefen ausgenommen, gegen eine von den drei Dimensionen des Körpers tangential, und gegen die beiden übrigen normal ist. Ob eine von den Dimensionen oder Oberflächen des Körpers grösser oder kleiner ist, kann doch wohl im Wesentlichen der Begriffe keinen Unterschied machen. (CHLADNI 1827b, 19, Fußnote)

---

<sup>7</sup> gemeint ist SAVART 1824a

#### 4.5 Die Schallgeschwindigkeit in Festkörpern

Um 1750 kannte man nur den Wert der Schallgeschwindigkeit in Luft, dafür gab es zwölf Messungen von verschiedenen Forschern (LENIHAN 1952a; ÜLLMANN 1982a). Für andere Gase, für Festkörper und Flüssigkeiten waren keine Werte vorhanden, sogar über die Größenordnungen gab es keine realistischen Vorstellungen.

1789 (ASCHOFF 1981a, 27, Fußnote 13) stellte der in Frankfurt/Oder wirkende CHRISTIAN ERNST WÜNSCH (1744-1828) Experimente mit Holzlatten an. 72 Dachlatten von je 24 Fuß ( $\approx 7.5$  m) Länge waren an ihren Enden miteinander verzapft und zwischen Pfählen so aufgehängt, daß die ganze Anordnung um einen länglichen viereckigen Teich geführt werden konnte, wobei Anfang und Ende nur wenige Fuß voneinander entfernt waren. Die Gesamtlänge der Dachlatten betrug so 542 m. "Hierauf lehnte ich das Ohr an das Ende der letzten Latte, und klopfte mit einem Hammer an den Umfang der ersten ... mein angelehntes Ohr hörte den durch diese verbundenen festen Körper herum geleiteten Schall nur äusserst schwach..." (WÜNSCH 1793a, 187).

Der Grund für den Fehlschlag des Versuches war natürlich die Lautstärke des in unmittelbarer Nähe des Beobachters erzeugten Luftschalls durch den Hammerschlag. Nun unterbrach WÜNSCH die Lattenverbindung an der Ecke, die dem Beobachtungsort diagonal gegenüberlag und postierte dort einen Gehilfen, der das Ende der 36. Latte anschlug. "Man hörte nun den durch diese 36 Latten fortgeleiteten Schall ungemein stark, und zwar jedesmal in eben dem Moment, in welches der Schlag fiel ..." (WÜNSCH 1793a, 187-188).

An den Versuchen beteiligte sich auch JOHANN SIGISMUND GOTTFRIED HUTH (1763-1818), der 1789 an die Universität Frankfurt/Oder gekommen war und sich auch in der Akustik durch Übersetzung einer Abhandlung von JOHANN HEINRICH LAMBERT (1728-1777) über akustische Instrumente aus dem Französischen mit einigen eigenen Zusätzen einen Namen machte. Aus diesem Versuchsergebnis zog nun WÜNSCH den Schluß, daß sich der Körperschall in Holz wenn schon nicht mit unendlicher Geschwindigkeit, so doch wegen des Sichtkontakts zwischen Beobachter und Gehilfen mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen müsse. Die Schallgeschwindigkeit in Hölzern liegt im Bereich von 3300 bis 5200 m/s, Werte, die nach der gewählten direkten Methode der Schallgeschwindigkeitsmessung mit

den experimentellen Hilfsmitteln der damaligen Zeit überhaupt nicht gemessen werden konnten.

Die CHLADNISCHE indirekte Methode ging davon aus, daß die longitudinalen Schwingungen der Luftsäulen, z.B. in einer Orgelpfeife, analog zu den longitudinalen Stabschwingungen behandelt werden können. Stäbe aus dem zu untersuchenden Material wurden in der Mitte gehalten, so daß bei der Grundschiwingung die Stablänge gleich der halben Wellenlänge des Tones ist. Dieser Ton wurde nun mit dem Grundton einer gleichlangen offenen Pfeife verglichen, die dasselbe Schwingungsverhalten wie der Stab zeigt.

Nun sind die Töne eines Stabes von Zinn ungefähr um 2 Octaven und eine große Septime höher; von Silber um 3 Octaven und einen ganzen Ton; von Kupfer beynahe um 3 Octaven und eine Quinte; Eisen und Glas ungefähr um 4 Octaven und einen halben Ton höher, als die Töne der Luftsäule in einer eben so langen offenen Pfeife ... (CHLADNI 1797a, 13)

Mit der Kenntnis der Schallgeschwindigkeit in Luft erhielt CHLADNI aus diesen Messungen für die Schallgeschwindigkeit (genauer: für die Geschwindigkeit der Dehnungswellen) in verschiedenen Festkörpern die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Werte, bei denen auch ein Vergleich mit modernen Meßergebnissen angegeben wird:

Stoff	c [Pariser Fuß/s] (CHLADNI 1797a, 13)	c [m/s]	c [m/s] (TRENDELENBURG 1961a, 235-237)
Zinn	7800	2533	2730
Silber	9300	3021	2640
Kupfer	12500	4060	3580
Glas	17500	5684	3490 - 5300
Eisen	17500	5684	5170
versch. Hölzer	11000-18000	3573 - 5846	3300 - 5200
gebr. Pfeifenton	10000-12000	3248 - 3898	3650

(1 Pariser Fuß = 0.3248 m)

In seinem Hauptwerk "Die Akustik" gab CHLADNI 1802 die Ergebnisse seiner Messungen für 17 verschiedene Holzarten bekannt, eine Abhängigkeit von der Schnittrichtung relativ zur Holzfaser wurde auch erwähnt (CHLADNI 1802a, 107-108).

Der Wert der gemessenen Schallgeschwindigkeit für Eisen führte wenige Jahre später zu einer umfangreichen Diskussion, worüber gleich berichtet werden soll.

Mit der Kenntnis der Schallgeschwindigkeit hatte man nun die Möglichkeit, nach der Formel (4.3.2) die Elastizitätsmoduln verschiedener isotroper Festkörper zu berechnen, wozu man lediglich noch die Dichte kennen mußte.

An die Publizierung der angegebenen Werte für die Schallgeschwindigkeit schließt sich bei CHLADNI noch eine Diskussion einer Arbeit von ÉTIENNE PÉROLLE an (PÉROLLE 1800a), bei der es um die Schalleitfähigkeit in festen Körpern geht. Sie ist i. allg. besser als durch die Luft. Zu diesem Komplex gibt es viele Beobachtungen, z.T. aus sehr alter Zeit. So kann man auch bei verschlossenen Ohren über einen Stab eine Schallquelle gut hören, wenn das eine Ende an die Zähne gehalten wird, das andere an die Tonquelle. Auf diese Weise kann ebenfalls eine Unterhaltung zwischen zwei Personen stattfinden. "Auch durch Anstämmung eines Stabes oder andern Körpers an die Schläfe, an den Scheitel oder an die äusern knorpelichten Theile des Ohres wird der Schall zu den innern Gehörwerkzeugen geleitet, wovon man sich leicht überzeugen kann, wenn man eine Uhr bey verschlossenen Ohren an diese Theile des Kopfes von einem Andern halten läßt, worüber auch Perolle ... Versuche bekannt gemacht hat" (CHLADNI 1797a, 15-16).

PÉROLLE hat durch Eintauchen einer wasserdichten Uhr in eine Flüssigkeit auch gezeigt, daß diese ebenfalls den Schall leitet, eine Tatsache, die damals noch nicht allgemein akzeptiert war. In diesem Zusammenhang betonte CHLADNI noch einmal einen ihm sehr wichtigen Punkt, auf den schon mehrfach hingewiesen wurde:

Hieraus erhellet, ... , daß es ganz unrichtig ist, wenn in den meisten physischen Lehrbüchern ... der Schall nur als eine Bewegung der Luft angesehen, und die Theorie desselben bey der Lehre von der Luft abgehandelt wird. Hören heißt nichts anders, als einen Schall, d.i. eine schnelle, zitternde Bewegung eines elastischen Körpers, vermittelt der Gehörwerkzeuge empfinden; ob diese zitternde Bewegung durch die Luft, oder durch andere flüßige und feste Körper bis zu dem Gehörnerven fortgeleitet, ob sie auch, wie am gewöhnlichsten geschieht, durch das äussere Ohr, oder ob sie durch andere Theile des Kopfes ihm mitgetheilt wird, ist im Wesentlichen einerley. (CHLADNI 1797a, 16)

Eine heute zur Selbstverständlichkeit gewordene Tatsache mußte sich vor zweihundert Jahren erst langsam behaupten.

Körperschalleitung kann beeindruckend demonstriert werden durch die "verzauberte

Lyra" des Engländers CHARLES WHEATSTONE (1802-1875). Der Physiker, der aus einer Familie von Instrumentenbauern stammte, stellte ein Tasteninstrument in das Obergeschoß eines Hauses. Ein Draht führte zum Resonanzboden einer Lyra, die sich im Untergeschoß befand. Dort konnte dann ein größerer Zuhörerkreis die Darbietung verfolgen (WHEATSTONE 1831a).

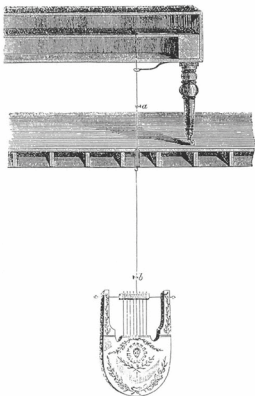


Abb. 4.5.1 WHEATSTONES "Verzauberte Lyra" (aus WHEATSTONE 1879a, 56)

1808 hat JEAN BAPTISTE BIOT (1774-1862) Versuche zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Gußeisen angestellt, deren Ergebnisse eine jahrzehntelange Diskussion ausgelöst haben. Ende 1808 kam CHLADNI nach Paris, und BIOT konnte schreiben: "Ein sinnreicher Physiker, den wir jetzt in Paris zu besitzen das Vergnügen haben, Herr Chladni, Erfinder sehr schöner Versuche über die Schwingungen der festen Körper, hat ein Mittel vorgeschlagen, die Geschwindigkeit der Schallfortpflanzung durch einen festen Körper zu bestimmen" (BIOT 1810a, 409).

Obwohl BIOT hier CHLADNIS indirekte Methode der Messung der Schallgeschwindigkeit hervorhob und kurz vorher in seiner Arbeit die kleinen Entfernungen, die zur direkten Messung bei anderen Gelehrten verwendet worden waren, kritisierte, beschrieb er nun seine eigenen Experimente an Wasserleitungsrohren in Paris, die wieder nach der direkten Methode durchgeführt wurden. Bei diesen Messungen halfen BIOT der Astronom ALEXIS BOUVARD (1767-1843), ein Herr MALUS (höchstwahrscheinlich der Entdecker der Lichtpolarisation durch Reflexion ÉTIENNE LOUIS MALUS (1775-1812), der um diese Zeit von Straßburg nach Paris kam) und ein Experte von genau gehenden Seeuhren, Herr MARTIN.

Die Rohre bestanden aus Gußeisen und waren jeweils 2.515 m lang. Zwischen zwei Rohren befand sich ein Ring aus Blei, der mit getoertem Barchent umwickelt war. Die ersten Versuche gingen über eine Länge von 197.27 m bzw. 394.55 m. Schließlich benutzte BIOT eine Strecke aus 376 Rohren, die eine Länge (einschließlich der Bleiringe) von 951.25 m ergaben. Durch eine Glocke bzw. einen Hammerschlag am Rohrende wurde ein Schall erzeugt, der sich durch die Luft und das Röhrenmetall unterschiedlich schnell fortpflanzte. Aus mehr als 200 Versuchen bekam BIOT für die Zeitdifferenz den Mittelwert von 2.5 s. Die Lufttemperatur war 11 °C, der Luftschall benötigte für die 951.25 m lange Strecke mit der Geschwindigkeit 340.95 m/s also 2.79 s. Aus der Differenz von 0.29 s ergab sich eine Schallgeschwindigkeit in Gußeisen, die etwa 10.5 mal größer war als die in Luft. Dieser Wert war, verglichen mit den Ergebnissen CHLADNIS, sehr niedrig. Die Differenz konnte nicht einfach auf Meßfehler zurückgeführt werden. Bei CHLADNIS Aufenthalt in Paris sprach er persönlich mit BIOT auch über diese Diskrepanz (CHLADNI 1817a, 85). Er führte sie darauf zurück, daß durch die Bleiringe zwischen den Rohrstücken das Material nicht homogen sei und betonte, daß auch BIOT dies als Ursache für die Differenz anerkenne:

Es ist also ungegründet ... , daß Biots Versuche mit meinen Angaben nicht gut übereinstimmten, denn, wenn auch die Röhren von Eisen wären, wie es vorauszusetzen



#### 4.6 Die Schallgeschwindigkeit in Gasen

Mit der Messung der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen im Labor des Wiener Chemikers und Botanikers JOSEPH FRANZ VON JACQUIN betrat CHLADNI 1798 wieder Neuland, denn man kannte bis dahin nur die Schallgeschwindigkeit in Luft aus Versuchen mit hinreichender Genauigkeit. Der gleiche Gedanke für eine indirekte Messung, der zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Festkörpern führte, brachte auch bei Gasen erste Ergebnisse. Verglichen wird der Ton einer Orgelpfeife in dem zu untersuchenden Gas mit dem Ton, den die gleiche Pfeife in Luft ergibt.

Es ward eine offene zinnerne Orgelpfeife, in welcher die Länge der schwingenden Luftsäule, von der Ritze, wo die eingeblasene Luft ausgeht, bis zu dem Ende etwa 6 Zoll betrug, an dem obern Ende in dem Halse einer gläsernen Glocke, der mit einem Hahne wohl verschlossen werden konnte, befestigt. Bey dem Untertauchen der gläsernen Glocke in dem Wasserapparate ward also zu Vermeidung aller Beymischung der atmosphärischen Luft zugleich auch die Pfeife mit Wasser angefüllt. An dem Hals der Glocke ward eine Blase angeschraubt, die ebenfalls mit einem Hahne versehen war, und vorher, soviel als möglich, zusammengedrückt und ausgesogen ward. Hierauf ward sowohl die Glocke als auch die an deren Hals geschraubte Blase mit dem zu untersuchenden Gas soweit angefüllt, daß das Wasser, wodurch die Glocke gesperrt war, innerhalb und ausserhalb der Glocke gleiche Höhe hatte, so daß der Druck, welchen das Gas litt, dem Drucke der Atmosphäre gleich war. Das Anblasen der Pfeife geschah durch Drücken der Blase ... Zu genauer Beurtheilung der Töne hatte ich zwey Saiten mit dem Tone, welchen gemeine Luft gab, in Einklang gestimmt. (CHLADNI 1798a, 69-70)

Die Versuche wurden bei Raumtemperaturen von  $10 - 12 \text{ }^\circ\text{R}$  ( $= 13 - 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) durchgeführt. Zunächst wurde Sauerstoff durch Erhitzen von Braunstein gebildet und damit die Glocke und Blase gefüllt. Der Ton war über einen halben Ton (oder fast einen ganzen Ton) tiefer als in Luft. Daraus ergab sich die Schallgeschwindigkeit in Sauerstoff zu 950-960 Pariser Fuß/s ( $= 309 - 312 \text{ m/s}$ ). Stickstoff wurde nach drei verschiedenen Arten gebildet, durch Schwefelleber, durch ein Gemisch von Eisen und Schwefel und schließlich durch Salpetergas (Stickstoffoxid). In allen drei Fällen war der Ton um einen halben Ton tiefer als bei Luft,

das ergab für die Schallgeschwindigkeit den Wert von 990 Pariser Fuß/s (= 322 m/s). Auch bei Kohlendioxid (gebildet aus Kreide und Schwefelsäure) und Stickstoffoxid (gebildet aus Salpetersäure und Kupfer) war der Ton tiefer als beim Anblasen der Pfeife mit Luft. Die Schallgeschwindigkeit ergab sich in beiden Fällen zu 840 Pariser Fuß/s (= 273 m/s) bzw. 980 Pariser Fuß/s (= 319 m/s). Ein Vergleich all dieser Werte mit den modernen (vgl. folgende Tabelle) zeigt, daß CHLADNIS Ergebnisse für eine erste Messung gar nicht so weit von der Wirklichkeit entfernt waren. Ein völlig unzulängliches Ergebnis ergab sich nur bei Wasserstoff, der aus Eisen und Schwefelsäure, in einem zweiten Versuch aus Zink und Salzsäure und schließlich dadurch gebildet wurde, daß man Wasserdämpfe durch eine glühende Röhre leitete. Der Ton der Pfeife war jedesmal weit höher als bei Luft und die Ergebnisse für die Schallgeschwindigkeit streuten zwischen 2100 und 2500 Pariser Fuß/s (= 683 - 813 m/s) je nach Herstellungsart (CHLADNI 1802a, 230).

Stoff	c [m/s] (CHLADNI 1802a, 230)	c [m/s] bei 15 °C (TRENDELENBURG 1961a, 221)
Sauerstoff	309 - 312	324
Stickstoff	322	343
Kohlendioxid	273	265
Stickstoffoxid	319	333
Wasserstoff	683 - 813	1300

Der CHLADNISCHE Versuch ist in der Folgezeit mit kleinen experimentellen Abweichungen oft wiederholt worden. FRANCIS KERBY und A. MERRICK veröffentlichten 1810 Versuche, in denen sie eine Pfeife und einen Blasebalg unter einen Rezipienten brachten. Zunächst wurde die Luft mit einer Luftpumpe entfernt und dann mittels Blasebalg die Pfeife mit dem zu untersuchenden Gas zum Tönen gebracht. Die beobachteten Tönhöhen wurden mit Hilfe eines Monochords gemessen (KERBY/MERRICK 1811a).

BENZENBERG, der seine Experimente zu diesem Thema 1811 durchführte, verwendete einen Apparat, der aus einer gläsernen Glocke bestand. Diese Glocke war mit einem Korkstöpsel verschlossen, in dem ein Thermometer und eine Orgelpfeife gesteckt waren.

Der Stöpsel war luftdicht verharzt. Auf der Orgelpfeife war eine Schweinsblase angebracht. Um Blase und Glocke luftleer zu machen, wurde die Glocke mit Wasser gefüllt und darauf unter dem Wasser einer pneumatischen Wanne umgewendet. Nun konnte man die Glocke mit dem Gas füllen, das man untersuchen wollte. Sobald Glocke und Blase mit dem Gas gefüllt waren, wurde der Apparat in die pneumatische Wanne gestellt und beim Drücken der Blase hörte man den Ton. "Herr Hölterhof, der ein feines Gehör und eine langjährige Übung im Stimmen hat, hatte die Gefälligkeit, die Saite auf dem Monochord jedesmal in den Einklang mit dem Tone zu stimmen, den die Orgelpfeife gab. Dieses geschah durch Verschieben des Steges" (BENZENBERG 1812a, 21).

Die Versuchsergebnisse für 0 °C werden, zusammen mit den Zahlen von KERBY und MERRICK, in der folgenden Tabelle zusammengestellt (die Originalwerte waren wieder in Pariser Fuß/s angegeben):

Gas	$c$ [m/s]	$c$ [m/s]
	KERBY/MERRICK	BENZENBERG
Sauerstoff	318	306
Stickstoff	351	335
Kohlendioxid	281	279
Wasserstoff(geb. aus Eisen und Schwefelsäure)	708	667

Die gemessenen Schallgeschwindigkeiten differieren bei Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff sehr stark voneinander. Am auffälligsten ist eine Annäherung der Werte bei Kohlendioxid. Der Herausgeber der "Annalen der Physik", LUDWIG WILHELM GILBERT (1769-1824), schrieb dazu in einer Fußnote: "Benzenberg hat nicht auf die Reinheit der Gasarten geachtet. Kohlensäure Luft ist am leichtesten rein zu entbinden, daher rührt wahrscheinlich die gute Übereinstimmung der Resultate" (BENZENBERG 1812a, 25, Fußnote).

Besonders bemerkenswert ist der Unterschied der bei allen vier Forschern gemessenen Werte bei Wasserstoff zu dem heute bekannten Wert für die Schallgeschwindigkeit in diesem Gas. Die ersten genaueren Ergebnisse für Schallgeschwindigkeiten in verschiedenen Gasen wurden mit der 1866 von AUGUST ADOLPH KUNDT (1839-1894) erfundenen Methode

der Staubfiguren gewonnen. In ihr verband er die Methode der Dehnwellen in Stäben mit der Sichtbarmachung der stehenden Wellen mittels Bärklappsamen oder Aluminiumpulver (KUNDT 1866a).

NEWTON hatte in seinem Hauptwerk "Philosophiae naturalis principia mathematica" (1. Aufl. London 1687) eine Formel hergeleitet, die es gestattete, aus dem Druck  $p$  und der Dichte  $\rho$  eines elastischen Mediums die Fortpflanzungsgeschwindigkeit  $c$  elastischer Wellen in diesem Medium zu berechnen

$$c = (p/\rho)^{1/2} \quad (4.6.1)$$

(CANNON/DOSTROVSKY 1981a, 9-14). Wendet man die Formel auf Luft unter Normalbedingungen an, so erhält man für die Schallgeschwindigkeit den viel zu kleinen Wert von  $c_N = 289$  m/s. Man kannte schon zu NEWTONS Zeiten den Betrag der Schallgeschwindigkeit in Luft so genau, daß man die Abweichung des theoretischen von den experimentell bestimmten Werten mit Befremden zur Kenntnis nahm (HUNT 1978a, 109-121). Bereits NEWTON fühlte sich in der 2. und 3. Auflage seines erwähnten Buches (1713 und 1726) veranlaßt, nunmehr an der Formel (4.6.1) Korrekturen anzubringen. Nach NEWTON hat es durch EULER und LAGRANGE weitere Versuche gegeben, das Dilemma zu beseitigen (FINN 1964a, 9-10). Erst PIERRE SIMON DE LAPLACE (1749-1827) hatte zu Beginn des 19. Jahrhunderts die entscheidende Idee. Der Hauptfehler aller bisherigen Überlegungen bestand darin, den Vorgang der Schallfortpflanzung stillschweigend als isothermen Prozeß angesehen zu haben. In Wirklichkeit müssen jedoch infolge Kompressionen und Dilatationen durch die Schallwelle Temperaturänderungen Berücksichtigung finden. LAPLACE beauftragte BIOT, diesem Gedanken genauer nachzugehen (BIOT 1804a, 397). BIOT ging davon aus, daß sich in der Luft beim Durchgang einer Schallwelle Dichte und Druck (=Elastizität) um kleine Beträge ändern: "Auf ähnliche Weise müssen bei der Fortpflanzung des Schalles die abwechselnden Verdichtungen und Ausdehnungen der Luft eine Aenderung der Temperatur, und mithin der spezifischen Elasticität in denjenigen Theilchen hervor bringen, für welche jene Aenderungen der Dichtigkeit Statt finden" (BIOT 1804a, 391). Die Lagrangeschen Bewegungsgleichungen für ein kompressibles Fluid wurden mit dem Ansatz der Dichte- und Druckänderung beim Durchgang des Schalles auf die Wellengleichung für eine ebene Schallwelle reduziert, und BIOT erhielt für die Geschwindigkeit

$$c = c_N (1 + k)^{1/2}, \quad (4.6.2)$$

wobei  $c_N$  den NEWTONSchen Wert der Schallgeschwindigkeit bedeutet. BIOT berechnete aus dieser Formel aus dem experimentell bekannten Wert von  $c$  in Luft den Wert für  $k$  und fand daraus bei einer Kompression auf die doppelte Dichte eine Temperaturerhöhung um  $68,8 \text{ }^\circ\text{R}$  ( $= 82,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (GRATTAN-GUINNESS 1990a, 452-455; FRANKEL 1977a, 56-57). Später hat der Physiker versucht, diese Temperaturschwankungen in verschiedenen Dämpfen (Wasser-, Äther- und Alkoholdämpfe) nachzuweisen (BIOT 1810b).

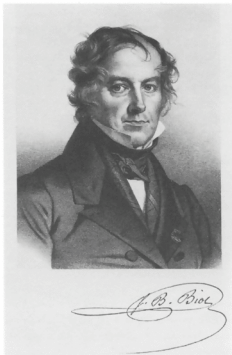


Abb. 4.6.1. JUAN B. BIOT (1774-1862). (Foto: Staatsbibliothek zu Berlin. Preussischer Kulturbesitz)

Von F. DELAROCHE (1775?-1813) und JACQUES ÉTIENNE BÉRARD (1789-1869) wurden 1813 Messungen von spezifischen Wärmen verschiedener Gase veröffentlicht (DELAROCHE/BÉRARD 1813a). Hier setzte noch einmal LAPLACE an, und in einer Arbeit aus dem Jahre 1816 schrieb er:

Wenn man die Temperatur der Luft erhöht, während ihr Druck unverändert derselbe bleibt, wird bloß ein Theil des Wärmestoffs, den sie enthält, dazu verwendet, diese Wirkung hervorzubringen. Der andere Theil wird latent, und dient, sie auszudehnen und ihren Raum zu vergrößern, und dieser Theil ist es, der sich entbindet, wenn man die so ausgedehnte Luft durch Druck wieder zu ihrem anfänglichen Raume zurück bringt. Diesem zu Folge muß nothwendig auch die Wärme, welche dadurch, dass zwei benachbarte Theilchen einer schwingenden Luftfiber sich einander nähern, frei wird, die Temperatur der Luft erhöhen, indem sie sich allmählig durch die Luft und die umgebenden Körper verbreitet. Da aber diese Verbreitung ... und die Strahlung ... im Vergleich mit der Geschwindigkeit der Vibrationen der Lufttheilchen ausnehmend langsam vor sich gehen, so lässt sich ohne merkbare Fehler annehmen, dass während der Dauer einer Vibration die Menge der Wärme zwischen den beiden benachbarten Theilchen dieselbe bleibt. Dann aber müssen sich diese Theilchen indem sie sich einander nähern, sich stärker abstossen, aus zwei Gründen: erstens, weil, wenn ihre Temperatur constant bliebe, ihr gegenseitiges Zurückstossen im verkehrten Verhältnisse ihrer Entfernung wachsen würde; und zweitens, weil der sich entwickelnde latente Wärmestoff ihre Temperatur erhöht. Newton hat nur die erste dieser beiden Ursachen von Repulsion in Betracht gezogen... (LAPLACE 1817a, 239-240)

Die hier mit Gedankengängen der Wärmestofftheorie des 18. Jahrhunderts entwickelten Vorstellungen führten zu dem Schluß, daß sich die Elastizität des Gases infolge des zweiten Grundes vergrößert und sich somit auch die Schallgeschwindigkeit erhöht. Das ergab nun die Formel

$$c = (c_p/c_v \cdot p/\rho)^{1/2}, \quad (4.6.3)$$

wobei  $c_p$  die spezifische Wärme bei konstantem Druck und  $c_v$  die bei konstantem Volumen bedeutet. Die Größe  $k$  in Formel (4.6.2) ist also  $(c_p - c_v)/c_v$ . Da in der zitierten Arbeit von LAPLACE keinerlei Formeln erscheinen, taucht Gleichung (4.6.3) dort explizit nicht auf. Sie wird nur verbal beschrieben.

LAPLACE beschäftigte sich auch in der Folgezeit mit dem Problem. Die dabei

auf tretenden Irrtümer und die Zusammenhänge mit dem Grad der Genauigkeit der gemessenen spezifischen Wärmen gehören jedoch in das Gebiet der Geschichte der Thermodynamik (FENN 1964a).

#### 4.7 Der Clavicylinder

Schon kurz nach Fertigstellung des Euphons beschäftigte sich CHLADNI mit der Frage, wie man bei diesem Instrument das Reiben der Stäbe mit den Fingern durch eine mechanische Vorrichtung ersetzen kann. Am günstigsten wäre dabei ein Spielen mittels Tastatur  $T$  (Abb. 4.7.1). Die Tasten sind über Fäden  $TL$  jeweils mit einer Leiste  $lL$  verbunden, auf

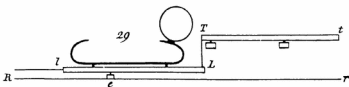


Abb. 4.7.1. Prinzip des Clavicylinders (aus CHLADNI 1821a, Tafel III, Fig. 29)

der die gabelförmig gebogenen Klangstäbe sitzen. Diese sind in ihren Schwingungsknoten an der Leiste befestigt.  $RT$  ist der Resonanzboden. Durch Niederdrücken einer Taste wird der zugehörige Klangstab gegen eine angefeuchtete, mit Glaszylindern bedeckte Walze gedrückt, die durch einen Fußtritt in Umdrehungen versetzt werden kann. Durch diese Walze wird der Klangstab zu Schwingungen angeregt. CHLADNI nannte dieses Instrument, dessen erste Ausführung nach jahrelangen Versuchen 1799 fertig war (CHLADNI 1800b, 1800c, 1800d), Clavicylinder, weil eine Klaviatur und ein streichender Zylinder unentbehrliche Bestandteile sind.

Das Prinzip des Instruments war der Tonerzeugung bei der Glasharmonika gewissermaßen entgegengesetzt, "... bey dieser sind nämlich die sich um ihre Axe drehenden Glocken der klingende Körper, und die Finger ... sind der streichende Körper, aber bey einem Clavicylinder ist die sich umdrehende Walze der streichende Körper, und das, was



unmittelbar oder mittelbar angedrückt wird, ist der klingende Körper" (CHLADNI 1821a, 9-10).

Neben der eben besprochenen Bauart, wo die klingenden Körper unmittelbar der Streichwalze genähert werden, gibt es noch eine andere Ausführung, bei der die klingenden Körper unverrückt bleiben und wo ein daran angebrachter Streichstab der Streichwalze genähert wird. Dieser Streichstab überträgt, ähnlich wie beim Euphon, die durch die Walze vermittelten Schwingungen auf den Klangstab.

Während die ersten von CHLADNI gebauten Instrumente nach dem Prinzip des unmittelbaren Kontakts von Klangstab und Streichwalze gebaut waren, folgten die später konstruierten Clavicylinder dem Prinzip der mittelbaren Übertragung der Schwingungsanregung. Dies hatte den Vorteil, daß die Klangkörper fest und sicher saßen, ein Gesichtspunkt, der bei CHLADNIS Reisetätigkeit mit dem dauernden Transport des Instruments von Ort zu Ort sehr wichtig war. Auch fallen bei dieser Konstruktion Anschlagsgeräusche fort, weil der Streichstab nicht direkt mit dem Resonanzboden verbunden ist.

CHLADNI dehnte den Tonumfang seines neuen Instruments schließlich auf 4 1/2 Oktaven aus. Wie schon beim Bau des Euphons, hatte er zur Herstellung des Clavicylinders nur die Hilfe eines Tischlers für das Gehäuse, eines Schlossers für die eisernen Klangstäbe und einer Glashütte für die gläsernen Teile in Anspruch genommen, alles andere war in Eigenbau geschaffen worden. Es darf auch nicht vergessen werden, daß die Vorführung der Instrumente Euphon und Clavicylinder, zusammen mit einem akustischen Vortrag über ihre Wirkungsweise, bis etwa 1816 CHLADNIS einzige Erwerbsquelle waren, und er durch die Mithilfe eines Instrumentenbauers ein Bekanntwerden seiner Ideen befürchten mußte. Von 1816 ab nahm er auch das Meteoritenthema in sein Vortragsprogramm auf und führte seine Meteoritensammlung vor.

Der Clavicylinder hatte den Vorteil, daß man bei ihm einen Ton so lang wie nötig fort dauern lassen konnte. Auch war die Lautstärke durch stärkeren oder geringeren Druck auf die Tasten variabel zu gestalten. Das Instrument war unverstimmbar.

Über den Charakter der Musikstücke, die für den Clavicylinder geeignet sind, schrieb CHLADNI: "Sangbare und harmonische Sätze werden diesem Instrumente angemessener seyn, als solche, bey denen es hauptsächlich auf Fertigkeit ankommt. Wenn man will, wird man zwar bey gehöriger Uebung auch manchen sehr geschwinden Satz auf dem Clavicylinder vortragen können; man muß es aber nicht wollen, weil es nicht das ist, was

sich am besten dafür schickt ..." (CHLADNI 1821a, 124).

Was den Vergleich einer musikalischen Darbietung auf dem Euphon und auf dem Clavicylinder anbetrifft, so sagte CHLADNI selbst dazu:

Mir scheint ... das Spielen und das Hören des Clavicylinders mehr mit einer gesunden und nahrhaften Speise zu vergleichen zu seyn, von der man viel und oft genießen kann; das Spielen und das Hören des Euphons aber mehr mit einer Leckerey, von der man weniger und seltener, etwa zum Desert, einiges genießen muß. Die Erfahrung hat mich gelehrt, daß von Personen, die Kenntniß der Tonkunst und Sinn für edlere harmonische Sätze haben, gewöhnlich der Clavicylinder, aber von Andern, die diese Kenntnisse und diesen Sinn nicht haben, und die alles nur nach dem augenblicklichen Eindrücke beurtheilen, gewöhnlich das Euphon vorgezogen worden ist, und daß, wenn beyde Instrumente sollen gehört werden, und keinem von beyden in der Beurtheilung oder Vergleichung soll Unrecht gethan werden, es rathsam ist, erst auf dem Clavicylinder einiges zu spielen, und hernach auf dem Euphon, nicht aber in umgekehrter Ordnung. (CHLADNI 1821a, 12)

Noch mehr als beim Euphon haben beim Clavicylinder zeitgenössische Instrumentenbauer versucht, aus dem äußeren Erscheinungsbild und nach den Erläuterungen des Wittenberger Physikers Nachahmungen des Instruments zu bauen. Diese Abarten unterscheiden sich im Prinzip nur im Material, aus dem Stäbe und Walze bestehen und funktionieren nach dem älteren Prinzip der unmittelbaren Reibung durch die Walze. Selbst die besten deutschen Instrumentenbauer versuchten sich an dieser Aufgabe. So baute JOHANN CHRISTIAN DIETZ (1773-1849) in Emmerich 1805 das Melodion, bei dem die Klangstäbe aus Messing und die Streichwalze aus Zinn waren. 1810 erfand UTHE in Sangerhausen das Xylharmonicon, so genannt, weil für die Klangstäbe Holz verwendet wurde, und im gleichen Jahr erschien das Uranion des Friedrichrodaer Instrumentenbauers J. D. BUSCHMANN, das im Prinzip ähnlich gebaut war (SACHS 1930a, 73).

Selbst nach der Veröffentlichung des Baugeheimnisses von CHLADNIS Clavicylinder im Jahre 1821 haben sich noch viele mit dem Bau dieses Instruments beschäftigt (CHLADNI 1824a). Ein Nachzügler ist das 1848 in Demmin gebaute Xylomelodichord von NAETER: "Das Auftreten dieses Spätlings nach Aktenschluß berührt komisch genug; es ist aber kennzeichnend für die gerade im Instrumentenbau gewaltige Schar der 'Erfinder', die überzeugungstreu und unbelehrbar Arbeitskraft, Zeit und Vermögen an erledigte Dinge verschwenden" (SACHS 1930a, 73).

Dem Autor ist keine einzige Komposition eines namhaften und zeitgenössischen

Komponisten für solche Streichstabspiele bekannt. Diese Musikinstrumente blieben eine Zeiterscheinung.

#### 4.8 Musikinstrumentenbau der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts

CHLADNI hat die Entwicklungen im Instrumentenbau aufmerksam verfolgt und in der in Leipzig erschienenen "Allgemeine musikalische Zeitung" ab 1821 detailliert beschrieben (CHLADNI 1821b, 1824b, 1825b, 1826a). Nur einige wesentliche Neuheiten, auch solche, die nach CHLADNIS Tod aufkamen, können hier Erwähnung finden.

Die bedeutendste Erfindung für das Hammerklavier war die von SÉBASTIAN ERARD (1752-1831) 1823 gefundene Repetitionsmechanik oder Doppelte Auslösung. Nach der in Kap. 3.3 erwähnten Wiener Mechanik ist diese Pariser Schule der entscheidende Schritt zum modernen Klavier. Nach dem Anschlag gerät der Hammer, solange der Finger auf der Taste liegt, in eine Zwischenlage. Dies ermöglicht ihm, bei wiederholter Tastenbetätigung aus geringerer Entfernung rascher zum erneuten Anschlag zu kommen. Erst nach Loslassen der Taste kehrt der Hammer vollends in seine Ruhelage zurück.

ERARD ist auch der entscheidende Erfinder der Pedalarhe (SACHS 1930a, 243). Durch halbes Niedertreten je eines der sieben Pedale kann der betreffende Ton um einen halben Ton, durch ganzes Niedertreten um einen ganzen Ton erhöht werden. Somit werden bei der Harfe alle Tonarten spielbar.

Besonders interessierte sich CHLADNI für die Entwicklung der Streichklaviere (Bogenklaviere). Bei diesem Instrument wird durch Tastendruck die entsprechende Saite eines Klaviers an das Streichband geführt, dessen Bewegung durch Pedalwirkung hervorgerufen wird. Nach Anfängen im 15. Jahrhundert haben sich eine Vielzahl von Instrumentenbauern und Erfindern an diesem Instrument versucht. CHLADNI berichtete über eine bestimmte Abart eines solchen Klaviers vom Italiener FRANCESCO TACCANI (CHLADNI 1821c); ein ganz ähnliches Instrument hatte der Physiker auf seiner Reise nach St. Petersburg bereits 1794 (CHLADNI schrieb 1793, vermutlich ein Erinnerungsfehler) in Königsberg/Pr. bei dem dort selbsthaften Mechaniker GARBRECHT gesehen. Bogenklaviere halten den Ton so lange, wie die Taste gedrückt bleibt. Da CHLADNI eigene Hörerfahrungen mit diesem Instrument hatte, konnte er bei einem Vergleich mit seinem Clavicylinder mit einem gewissen Recht zugunsten seiner Erfindung optieren: "Man wird ... den Zweck, ein Tasteninstrument mit fort dauernden Tönen und mit willkürlich zunehmender und abnehmender

Stärke des Klanges zu haben, leichter, sicherer und dauerhafter erreichen können, wenn man hierzu keine Saiten, sondern Klangstäbe anwenden, und also anstatt eines Bogenklaviers lieber einen Clavicylinder bauen will ..." (CHLADNI 1821c, 587).

Die Lektüre der in den erwähnten vier Jahrgängen von "Allgemeine musikalische Zeitung" vorhandenen Artikel über neue Musikinstrumente dokumentiert darüber hinaus die vielfältigen persönlichen Kontakte, die CHLADNI mit einer großen Zahl von Instrumentenbauern und Mechanikern in halb Europa hatte. Auch dies war ein Vorteil seiner Lebensweise mit den vielen Reisen.

Die zahlreichen Versuche, bei den Hörnern die Lücken zwischen Naturtönen auszufüllen, führten im zweiten Jahrzehnt des 19. Jahrhunderts auch zur Erfindung der Ventile. LEGERAN (CHLADNI schrieb LEGRAM) "... hat Trompeten verfertigen lassen, wo durch einen mit dem Daumen der rechten Hand zu bewegendem Schieber ... leicht und schnell alle halben Töne der Tonleiter ... können hervorgebracht werden" (CHLADNI 1821b, 396-397). So beschrieb der Physiker die Slide trumpet, die aber bereits in den ersten Jahren des 19. Jahrhunderts von WOODHAM in London gebaut worden war.

Interessant ist eine Bemerkung CHLADNIS, die sich wahrscheinlich auf den Onkel von CHARLES WHEATSTONE, einem Instrumentenbauer in London bezieht. Das Zitat zeigt außerdem, daß die in Kap. 4.5 beschriebene "Verzauberte Lyra" Vorgänger hatte:

Nach mehren Zeitungen ... (1825) ... hat ein Einwohner von London, der sich seit 15 Jahren mit Akustik beschäftigt ..., ein Mittel gefunden, die Töne eines Instrumentes, oder eines ganzen Orchesters auf eine grosse Weite durch metallene Drähte fortzuleiten, die mit einem mitten in einem Zimmer befindlichen Ringe in Verbindung stehen, an dem eine Gitarre befestigt wird. Man hört die in grosser Entfernung hervorgebrachten Töne so, als ob sie in der Höhlung des Instrumentes erregt würden, und die Täuschung soll so vollkommen seyn, dass einige Kunstverständige geglaubt haben, es sey ein Mechanismus in der Gitarre verborgen. Der Erfinder behauptet, dass der Schall dadurch mehre (englische) Meilen weit könne geleitet werden. (CHLADNI 1825b, 727)

Bei der Querflöte soll auf die von THEOBALD BOEHM (1794-1881) ab 1832 gebaute Flöte hingewiesen werden, bei der die Grifflöcher nach akustischen Gesetzen gebohrt waren und nicht nach dem Prinzip der bequemsten Spielart. Die Spielbarkeit wird dann über ein Klappensystem erreicht. Nach anfänglicher konischer Bohrung ging BOEHM dann später zur Zylindermensur über.

In der Instrumentenkunde ist dieser Flötist zugleich ein Beispiel für die fruchtbare

Zusammenarbeit mit einem Naturwissenschaftler. Der Physiker und Geologe CARL EMIL VON SCHAFHÄUTL (1803-1890) hatte ab 1846 BOEHM bei Berechnungen wesentlich geholfen (VENTZKE 1966a). Er schrieb 1882 aus der Erinnerung: "Ich brachte Boehm sehr oft Resultate langer Rechnungen, allein sobald er seine Flöte danach construiert hatte, waren immer ein paar Schwingungen zu wenig oder zu viel" (VENTZKE 1966a, 47). Die Erklärung dafür ist, daß bei der Flöte so viele, den Ton beeinflussende Umstände dazu kamen, die sich analytisch nur schwer fassen ließen. BOEHM setzte als Mechaniker mit seiner Erfindung mechanischer Hilfsmittel die Grenze, der sich die Theorie nur nähern konnte. Als Virtuose konnte allein BOEHM beurteilen, ob das Produkt der Zusammenarbeit den künstlerischen Anforderungen gewachsen war oder nicht. Aus seinen Erfahrungen konnte so SCHAFHÄUTL zum Problem der Zusammenarbeit von Musiker (bzw. Instrumentenbauer) und Akustiker 1882 die folgenden bedeutenden Sätze niederschreiben:

Wenn die Theorie, der schaffende Gedanke im Stande ist, messend und rechnend in das innere Wesen der Bewegungserscheinungen einzudringen und zum Beispiel die Gesetze der tönenden Schwingungen dem Geiste klar zu machen, so wird es nur dem genialen Mechaniker und Virtuosen allein möglich, auf den Ergebnissen der Theorie weiter bauend ein wirkliches, d. i. ein praktisches musikalisches Instrument zu schaffen, zu dessen Vollendung ohne diese Eigenschaften des Virtuosen Jahrhunderte nothwendig gewesen sein müßten. (VENTZKE 1966a, 48)

## 5. Das Hauptwerk "Die Akustik"

### 5.1 Entstehung, Aufbau und Inhalt des Buches

Die 1768 in Leipzig gegründete "Fürstlich Jablonowskische Gesellschaft der Wissenschaften", die auf eine Stiftung von JOSEPH ALEXANDER PRÜß, Fürst von Jablonow (1712-1777) zurückgeht, vergab regelmäßig goldene Preismedaillen für die besten Arbeiten über Themen aus der polnischen Geschichte, der politischen Ökonomie, der Physik und der Mathematik. Als mathematische Aufgabe für das Jahr 1797 wurde das Thema gestellt: "Entwurf einer allgemeinen Theorie der Akustik und der dabei vorkommenden Hauptsätze, nach den neuesten Untersuchungen und Entdeckungen"<sup>8</sup>. Wesentlich beteiligt an der Ausschreibung war der Leipziger Physiker und Mathematiker KARL FRIEDRICH HINDENBURG (EBSTEIN 1905a, 446). CHLADNI hatte zu ihm schon mehrere Jahre einen guten Kontakt. Die Preisaufgabe war in lateinischer oder französischer Sprache zu beantworten, und der Einsendeschluß war Ende März 1798. CHLADNI beteiligte sich an der Ausschreibung und verfaßte eine Arbeit, die 21 handschriftlich geschriebene Seiten in lateinischer Sprache mit dem Motto: "Quantum est, quod nescimus" umfaßt<sup>9</sup>. Diese Schrift erhielt am 2.1.1799 den ersten Preis. In einem Brief vom 19.1.1799 an HINDENBURG (EBSTEIN 1905a, 446) berichtete CHLADNI von seinem Plan, diese Schrift als Grundlage für ein größeres Werk über Akustik zu benutzen. Es war beabsichtigt, dieses Werk 1800 herausgeben zu können. Die Suche nach einem geeigneten Verlag erwies sich als schwierig, keinesfalls wollte er es wieder, wie 1787, bei WEIDMANN'S Erben und REICH in Leipzig publizieren lassen (EBSTEIN 1905a, 447). Schließlich erschien das Buch mit einer Widmung an die Batavische Gesellschaft der Wissenschaften zu Haarlem im Verlag BREITKOPF & HÄRTEL in Leipzig Anfang 1802 unter dem schlichten Titel "Die Akustik". Dahinter verbirgt sich die erste Monographie über die Lehre vom Schall überhaupt. LORENZ OKEN (1779-1851) schrieb in einer Rezension in der Zeitschrift "Isis" 1817 über das Werk: "Dies ist, wir wissen was wir sagen, das einzige Werk der deutschen Physiker, das Epoche gemacht, das einen ganzen Zweig in die Physik

---

<sup>8</sup>nach eigenen Forschungen in der Handschriftenabteilung der Leipziger Universitätsbibliothek

<sup>9</sup>aufbewahrt in der Handschriftenabteilung der Leipziger Universitätsbibliothek

eingeführt hat ..." (STEINMETZ 1958a, 544).

In der Vorrede (S. III - XII) schrieb CHLADNI:

Bei so vielen neuern Vermehrungen menschlicher Kenntnisse und Verbesserungen des Vortrages derselben hat die Akustik das unverdiente Schicksal gehabt, weit mangelhafter, als andere Theile der Naturkunde, behandelt zu werden. ... über das Ganze der Akustik ist aber noch kein einziges nur mittelmäßiges Werk vorhanden... Im gegenwärtigen Werke habe ich mich bemüht, die Akustik so allgemein, als möglich, vorzutragen mit Benutzung alles dessen, was von Andern und von mir hierin entdeckt ist. (CHLADNI 1802a, III)

Insbesondere war es die Absicht des Verfassers, die ganz verstreut publizierten Arbeiten zur Akustik solcher Forscher wie BERNOULLI, EULER, LAGRANGE, LAMBERT und RICCATI inhaltlich zu beschreiben. Wie CHLADNI alle vorhandenen akustischen Abhandlungen sammelte und genau zitierte und dieses Material mit seinen eigenen Forschungen zu einem einheitlichen Ganzen verband, ist im höchsten Grade bewunderungswürdig und mustergültig. Charakteristisch ist auch der überall durchgeführte Vergleich zwischen Theorie und Experiment.

CHLADNI erwähnte erneut ein lange Zeit gültig gewesenes Vorurteil, welches den Fortschritten der Akustik hinderlich gewesen war:

Eins der gewöhnlichsten Vorurtheile ist, daß das Wesen des Schalles allemahl in Schwingungen der Luft bestehe ... Die Luft ist zwar das gewöhnlichste Fortleitungsmittel des Schalles; daß sie aber nicht schlechterdings dazu nothwendig ist, folgt schon aus dem ersten Begriffe von einem Schalle. Dieser besteht nämlich in einer schnellen zitternden Bewegung irgend eines Körpers... (CHLADNI 1802a, IX)

Auf diesen Punkt hatte CHLADNI schon in seinen Publikationen der vergangenen Jahre mehrfach hingewiesen. Das war nicht ohne Folgen geblieben. Seit der (posthumen) 4. Auflage des Buches "Grundriß der Naturlehre" (Halle/S 1801) von FRIEDRICH ALBERT CARL GREN (1760-1798) wird die Lehre vom Schall nicht mehr im Zusammenhang mit der Luft, sondern mit der Schwingungs- und Wellenlehre beschrieben (KRAFFT 1986a, 84).

Nach dem autobiographischen Abschnitt "Einige Nachrichten zur Geschichte meiner akustischen Entdeckungen" (S. XIII-XXII) beginnt das eigentliche Buch und zerfällt nach einer Einleitung (§1 - §7, S. 1-4) in vier Hauptteile. Der erste Teil (§8 - §41, S. 7-56) enthält die allgemeine Tonlehre und wurde vom Verfasser als der arithmetische Teil der Akustik beschrieben. Das meiste, was hier gesagt wird, war musikverständigen Lesern der Zeit um 1800 wahrscheinlich bekannt. Den Ruhm des Buches machen die folgenden drei



Teile aus. Im zweiten Teil (§42 - §190, S. 59-212), dem Hauptteil des Werkes, ist von den Ursachen der Schallentstehung, den Schwingungen elastischer Körper, die Rede. Nach allgemeinen Bemerkungen über Longitudinal- und Transversalschwingungen wird über Saiten- und Membranschwingungen berichtet und dann werden die Schwingungen von Luft in Blasinstrumenten untersucht. Nach der Besprechung von Schwingungen eines geraden und gekrümmten Stabes (z.B. einer Stimmgabel) geht CHLADNI zu den Schwingungen einer Scheibe über und bespricht dann die einer Glocke. Der zweite Teil wird abgeschlossen mit Bemerkungen über das Beisammensein mehrerer Schwingungsarten, ein seit den Arbeiten EULERS, BERNOULLIS, D'ALEMBERTS und LAGRANGES über Saitenschwingungen viel-diskutiertes Problem. Der dritte Teil (§191 - §230, S. 215-272) bespricht Fragen der Schallausbreitung und die mit ihr verbundenen Probleme. Neben der Ausbreitung in Luft und anderen Gasen, wobei auch geschlossene Räume (Raumakustik) untersucht werden, kommen Fragen der Ausbreitung in Flüssigkeiten und Festkörpern zur Sprache. Der abschließende vierte Teil (§231 - §259, S. 275-304) behandelt die Fragen des Schallempfangs, also den physiologischen Teil der Akustik. Ein Tafelanhang mit insgesamt 269 Figuren beschließt das Buch.

Mit diesem logischen Aufbau seines Werkes errichtete CHLADNI ein Lehrgebäude, das nicht nur dadurch an Übersichtlichkeit gewann, sondern sich durch seine konsequente Beschreibung als Lehre von den Schwingungen elastischer Körper als gleichwertig neben die anderen Gebiete der Physik stellen konnte.

## 5.2 Begegnung mit NAPOLÉON und die Übersetzung ins Französische

1807 trat CHLADNI eine Reise an, die ihn über Amsterdam, Paris, Basel, Zürich, Florenz, Venedig, München erst 1812 wieder in sein Heim nach Wittenberg zurückführte (s. Kap. 6.1). Dezember 1808 traf er in Paris ein. Dort lag damals ein Zentrum der Wissenschaft in Europa. CHLADNI hatte sich vom Institut de France: "... eine Commission erbeten, zu unpartheyischer Beurtheilung dessen, was ich für die Wissenschaft und deren Anwendung auf Kunst zu thun mich bestrebt hatte" (CHLADNI 1826b, 137).

Die Kommission bestand aus der Klasse für Physik und Mathematik aus dem Zoologen BERNARD GERMAIN ÉTIENNE DE LACÉPÈDE (1756-1825), dem Kristallographen und Mineralogen RENÉ-JUST HAÜY (1743-1822) und dem Ingenieur GASPAR CLAIR FRANÇOIS MARIE RICHE DE PRONY (1755-1839). CHLADNI sagte zu dieser Auswahl, daß es sich um Forscher handele, die die meisten Kenntnisse von Tonkunst hatten. Aus der Klasse der schönen Künste wurden die Komponisten ANDRÉ ERNEST MODESTE GRÉTRY (1741-1813), ÉTIENNE NICOLAS MÉHUL (1763-1817) und FRANÇOIS JOSEPH GOSSEC (1734-1829) in die Kommission berufen. Da das Euphon auf der Reise zwischen Brüssel und Paris durch Erschütterungen sehr gelitten hatte, konnte CHLADNI den Mitgliedern der Kommission nur den Clavicylinder vorführen und die Klangfiguren zeigen (CHLADNI 1810a, 419-422). Der unter der Federführung von PRONY verfaßte und im *Moniteur universel* 1809, S. 43-44 publizierte Bericht über den Clavicylinder fiel sehr günstig aus (wiederabgedruckt z.B. in CHLADNI 1809a, 358-361). Das gleiche galt für den Bericht über die Klangfiguren und verwandte Probleme im *Moniteur universel* 1809, S. 367-369 (wiederabgedruckt z.B. in CHLADNI 1809a, 362-375). Mehrere Mitglieder des Institut de France äußerten nun den Wunsch einer Übersetzung von "Die Akustik" ins Französische und betonten, daß CHLADNI selbst der richtige Mann für diese Aufgabe wäre. Dieser Vorschlag kam insbesondere aus den Kreisen der Mitglieder der südlich von Paris tagenden *Société d'Arcueil*, und zwar hier besonders von LAPLACE (CHLADNI 1826b, 138). Man erkannte in Frankreich bereits sieben Jahre nach Erscheinen des Werkes "Die Akustik" die Bedeutung dieses Buches für weitere Forschungen auf dem Gebiet der Lehre vom Schall auch in diesem Land, wenn es in der Landessprache vorliegen würde. CHLADNI stellte zur Realisierung dieses Vorschlags zwei

Anwendung auf manche andere Gegenstände nützlich seyn würde, und dass auch diese Versuche ein Mittel seyn würden, um manche Resultate der Theorie mit Resultaten der Erfahrung zu vergleichen. (CHLADNI 1826b, 141)

Hierauf kam die Frage der Übersetzung von "Die Akustik" ins Französische zur Sprache, und NAPOLEON erklärte sein Interesse an der Arbeit. Am folgenden Morgen schon erhielt CHLADNI eine Anweisung über 6000 Francs. Einer Übersetzungsarbeit in Paris stand nun nichts mehr im Wege.

CHLADNI legte großen Wert auf die Feststellung, daß eine wörtliche Übersetzung von "Die Akustik" nicht in Frage kam. Gründe dafür gab es mehrere:

So, um nur ein Paar Beyspiele anzuführen, musste ich schon deshalb den Anfang des Buches ganz anders, als im Deutschen einrichten, weil man für die drey so verschiedenen Begriffe von Schall (welches alle hörbaren Schwingungen bezeichnet), Klang, (Schall der in Hinsicht auf Zeit und Raum bestimmbar ist, das Entgegengesetzte von Geräusch) und Ton (Geschwindigkeit der Schwingungen) im französischen nur das einzige Wort *son* hat. - Ferner waren im französischen und italiänischen keine Zeichen und Ausdrücke vorhanden für die in verschiedenen Octaven enthaltenen Töne; ich musste also erst kurze Zeichen und Ausdrücke dafür geben, welche seitdem auch angenommen sind, wo ich, mit Beybehaltung der dortigen Benennungen der Töne, jeden Ton in der grossen Octave durch Hinzufügung der Zahl 1, in der kleinen Octave durch Hinzufügung der Zahl 2 u.s.f. bezeichnet habe. Diese Bezeichnungsart musste ich in einem besondern Paragraphen vortragen, der im Deutschen nicht seyn durfte; - und so waren noch mehrere Zusätze, Weglassungen, Abkürzungen, und Veränderungen der Ideenfolge nothwendig. (CHLADNI 1826b, 142 Fußnote)

Die Paragrafeneinteilung im französischen Werk ist aus diesen Gründen von der in "Die Akustik" verschieden. Unter dem Titel "Traité d'Acoustique" erschien CHLADNIS Arbeit im November 1809 bei COURCIER. Große Probleme bereitete dem Verfasser der Wortlaut der Widmung. CHLADNI wollte einerseits Schmeichelei vermeiden, andererseits war er dankbar für die Möglichkeit der Übersetzung und wollte das auch zum Ausdruck bringen. Schließlich fand er eine Formulierung, die eigentlich nur eine Tatsache zum Ausdruck brachte: "Napoléon le Grand a daigné agréer la dédicace de cet ouvrage, après en avoir vu les expériences fondamentales". Zu "Napoléon le Grand" sagte CHLADNI 1826 entschuldigend, daß man sich 1809 so ausdrücken mußte (CHLADNI 1826b, 143 Fußnote).

Im März 1810 packte CHLADNI seinen Reisewagen und fuhr nach Straßburg weiter.

### 5.3 Auswirkungen des Buches auf die Akustikforschung bis 1860

In der Einleitung definierte CHLADNI die Begriffe Klang, Geräusch und Ton. Im Kap. 4.4 wurde darüber bereits ausführlich berichtet. Im Kap. 8.2 wird gezeigt werden, wie die Begriffsbestimmungen bis zu den Arbeiten von HELMHOLTZ immer präziser wurden.

MERSENNE ersann 1636/37 eine Methode, wie man von der Zählung langsamer Schwingungen langer Saiten durch Verkürzung derselben auf höhere Frequenzen extrapolieren konnte. An diese Idee knüpfte CHLADNI 1800 mit seinem Tonometer an. Schmale Eisen- oder Messingstäbe wurden einseitig fest eingeklemmt und in Biegeschwingungen versetzt. Der schwingende Stabteil  $l$  war zunächst so lang, daß seine Bewegung mit dem Auge verfolgt und gezählt werden konnte. Dann verkürzte man den Stab so weit, daß sein Ton  $f$  mit dem zu messenden übereinstimmte. Aus der Gesetzmäßigkeit

$$f \sim 1/l^2 \quad (5.3.1)$$

konnte dann die gesuchte Frequenz berechnet werden. CHLADNI wählte einen Stab, der in 1 Sekunde 4 Schwingungen machte (2 Hz). Bei Verkürzung auf den achten Teil hörte man  $8^2 \cdot 4 = 256$  Schwingungen (128 Hz), also den Ton  $c'$ : "... so möchte es wohl am rathsamsten seyn, eine solche Tonhöhe ... als feste Tonhöhe anzunehmen; man würde sie vermittelst des hier angegebenen Tonometers an allen Orten sehr leicht, und mit mehrerer Genauigkeit erhalten können ..." (CHLADNI 1800e, 9).

Die Erfindung der Lochsirene durch CHARLES CAGNIARD DE LA TOUR (1777-1859) im Jahre 1819 war eine Methode der Schwingungszahlmessung, die günstiger als die mit dem Tonometer war. Fig. 2 (Abb. 5.3.1) gibt die Seitenansicht, Fig. 3 die Aufsicht auf die rotierende Scheibe  $ss$ ,  $A$  ist der Windkasten,  $B$  die Zuführung zum Blasebalg. Die Löcher in der Scheibe und im Deckel des Windkastens sind schräg gebohrt (Fig. 4). So setzt der Luftstrom die Scheibe von allein in Rotation. Das Zählwerk  $z$  zeigt die Zahl der Umdrehungen der Scheibe  $s$  an. Bei konstanter Umdrehung der Scheibe wird ein Klang bestimmter Höhe erzeugt. Erhöht man die Umdrehungsgeschwindigkeit, so erhöht sich die Tonhöhe des Klanges. Insbesondere durch Verwendung verschiedener Scheiben unterschiedlicher Loch-

zahl sind die Verwendungsmöglichkeiten der Sirene für akustische Versuche viel zahlreicher als die des Tonometers (CAGNIARD DE LA TOUR 1819a).

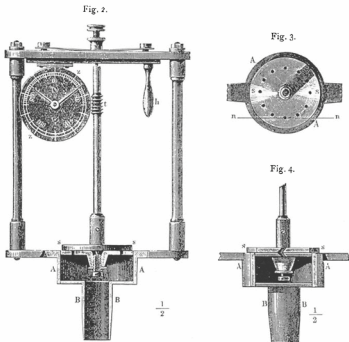


Abb. 5.3.1. Sirene nach CAGNIARD DE LA TOUR (aus HELMHOLTZ 1913a, 23)

Die eben beschriebene Sirene wurde verbessert und entwickelte sich so zu einem Meßgerät, das für die Lösung immer komplizierterer Fragen der Akustik, z.B. der Kombinationstöne, unentbehrlich wurde. HEINRICH WILHELM DOVE (1803-1879) führte die Lochscheibe mit vier Lochkränzen ein. Seine Sirene konnte also Akkorde geben (DOVE 1851a). Schließlich erfand HELMHOLTZ 1856 die Doppelsirene (HELMHOLTZ 1856a), die aus zwei mehrstimmigen DOVESchen Sirenen zusammengesetzt ist. Durch Drehungen des oberen

gegen den unteren Windkasten konnten mit dieser Sirene Schwebungen hervorgerufen werden.

Der Krefelder Seidenfabrikant JOHANN SCHEIBLER (1777-1837) beschäftigte sich in seiner Freizeit viel mit akustischen Experimenten. 1834 beschrieb er eine Methode, Schwingungszahlen durch Schwebungen zu ermitteln. SCHEIBLER benutzte zwei Stimmgabeln mit den Frequenzen  $x$  bzw.  $2x$ . Es wurden  $p - 1$  weitere Stimmgabeln angefertigt. Ihre Töne lagen genau im Oktavintervall der beiden Ausgangsstimmgabeln. Die Frequenz jeder Stimmgabel war jeweils 4 Hz größer als die der nächst tieferen. Schlug man je zwei Gabeln mit dieser Frequenzdifferenz an, so hörte man genau 4 Schwebungen in der Sekunde. Daraus ergab sich nun  $2x = x + 4p$  oder  $x = 4p$ . Muß man z.B. zwischen  $a$  und  $a'$  54 Stimmgabeln einschalten, bei der jede folgende mit der vorhergehenden 4 Schwebungen gibt, so ist  $p = 55$ , d.h.  $x = 220$  und damit die Frequenz von  $a' = 440$  Hz. Mit dieser Methode des SCHEIBLERSchen Tonometers konnten Frequenzen sehr gut bestimmt werden. Allerdings summierte sich ein Einzelfehler bei der Schwebungsfrequenzmessung infolge der großen Zahl der Einzelmessungen auf.

Die Entwicklung, die die Klärung des Begriffs Klangfarbe in den Jahrzehnten nach 1802 genommen hat, wird in dem Sonderkapitel 8.2 ausführlich besprochen. Im Anschluß daran, im Kap. 8.3, wird der Erklärung der den Musikern schon länger bekannten Differenztöne nachgegangen.

JOHN SHORE war 1711 Gardetrompeter und 1714 Lautenspieler in der Kapelle am

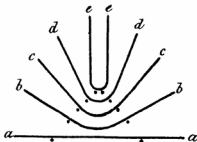


Abb. 5.3.2. Zur Erklärung der Stimmgabelschwingungen (CHILADNI 1821a, Tafel I, Fig. 5)

Gespannte Membranen sind das zweidimensionale Gegenstück gespannter Saiten. Es bilden sich beim Schwingen Knotenlinien aus, die durch aufgestreuten Sand sichtbar gemacht werden können. Die Töne liegen unharmonisch zueinander. EULER publizierte 1766 eine Arbeit (EULER 1766b), in der eine Theorie der Schwingungen rechteckiger und kreisförmiger Membranen gegeben wurde. Es sei hier als Beispiel die Rechteckmembran herausgegriffen. Die beiden Ränder liegen parallel zur  $x$ - und  $y$ -Achse und erstrecken sich bis  $x = a$  und  $y = b$ . EULER denkt sich die Membran zusammengesetzt aus gespannten Saiten in  $x$ - und  $y$ -Richtung. Hat ein Punkt der Membran die Auslenkung  $z(x,y)$  erfahren, so wird er von der Rückstellkraft der Saite parallel zur  $x$ -Achse und von der parallel zur  $y$ -Achse in die Ausgangslage zurückgeführt. Unter der Annahme, daß diese beiden Spannungen gleich sind, erhielt EULER die Differentialgleichung

$$c^2 z_{xx} = z_{xx} + z_{yy} \quad , \quad (5.3.2)$$

in den Ausdruck  $c$  gehen diese Spannung und die Dichte der Membran ein. EULER suchte nach Lösungen der Form  $z = v \sin(\omega t + A)$  und erhielt für eine eingespannte Membran für die Eigenfrequenzen  $f$

$$f = c[(m^2/a^2) + (n^2/b^2)]^{1/2} \quad , \quad (5.3.3)$$

wobei  $m, n$  ganze Zahlen sind (TRUEDELL 1960a, 330-355).

Durch einen Irrtum in der Randbedingung fehlt in (5.3.3) der Faktor  $1/2$ . Dies führte bei CHLADNI zu der Bemerkung, daß EULERS Berechnungen "... wohl schwerlich möchten der Natur ganz gemäß seyn..." (CHLADNI 1802a, 80).

Auch die Ergebnisse einer Theorie von RICCATI (RICCATI 1786a), in der dieser die Schwingungen eines nach allen Richtungen gleichförmig gespannten Paukenfelds mit kreisförmiger Berandung untersuchte, werden von CHLADNI als nicht allgemein richtig erkannt (CHLADNI 1802a, 78-79).

SIMÉON-DENIS POISSON hat mit einer Theorie aus dem Jahre 1829 (POISSON 1829a) die korrekte Formel für (5.3.3) hergeleitet, und die kreisförmige Membran wurde 1862 durch den Mathematiker R. FR. ALFRED CLEBSCH (1833-1872) behandelt (CLEBSCH 1862a). Auch SAVART hat sich mit Membranschwingungen eingehend beschäftigt (vgl. Kap. 8.1).

HELMHOLTZ interessierte sich im Zusammenhang mit seiner Resonanztheorie des Hörens für die Schwingungsverhältnisse auf der Basilmembran, die nach verschiedenen Richtungen verschieden stark gespannt ist. Für eine mathematische Analyse dachte er sich die Membran als eben ausgespannt zwischen den Schenkeln eines Winkels. Die Bewegungsgleichung mit bestimmten Randbedingungen wurde gelöst. Von den möglichen Bewegungen einer solchen Membran interessierten nur diejenigen, die durch eine dauernd wirkende periodische Kraft hervorgerufen werden. So konnte HELMHOLTZ zeigen, daß von jedem Ton nur bestimmte schmale Streifen der Basilmembran in Schwingungen versetzt werden können (HELMHOLTZ 1913a, 639-645).

Schallabsorption ist ein Begriff, der bei CHLADNI noch nicht vorkommt. Lediglich über die Abhängigkeit der Schallstärke von der Entfernung von der Schallquelle finden sich Bemerkungen. Führte CHLADNI 1802 noch Autoren an, die annahmen, die Schallintensität sei umgekehrt proportional zur Entfernung, so wurde aber auch das richtige Abstandsgesetz erwähnt (CHLADNI 1802a, 232-233).

Die Theorie der Bewegung zäher Fluide hatte sich zu Beginn des 19. Jahrhunderts stark entwickelt (SZABÓ 1987a, 260-271). 1822 legte CLAUDE LOUIS MARIE HENRI NAVIER (1785-1836) eine Denkschrift vor, in der Bewegungsgleichungen fluider Körper aufgestellt werden, bei deren Herleitung intermolekulare Kräfte der Flüssigkeitsteilchen eine Rolle spielen. 1834 konnte BARRÉ DE SAINT-VENANT (1797-1886) die Theorie neu fundieren. Er kam ohne Kräfte zwischen den Molekülen aus, maßgebend waren nur die Relativgeschwindigkeiten der Flüssigkeitsteilchen. Seine neue und einzige Hypothese ist die, daß in bewegten zähen Flüssigkeiten Schubspannungen in Richtung der Gleitungen auftreten, die der Gleitgeschwindigkeit proportional sind.

Der Engländer GEORGE GABRIEL STOKES (1819-1903) publizierte 1845 eine Arbeit über die innere Reibung in einem sich bewegenden Fluid und über die Bewegungsgleichungen. Er leitete eine Beziehung zwischen den bei ST. VENANT auftretenden zwei Viskositätskonstanten  $\lambda'$  und  $\mu$  her, die sich aus der Forderung ergab, daß auch bei kompressiblen Fluiden der hydrostatische Druck gleich dem arithmetischen Mittelwert der Normalspannungen sei:

$$\lambda' = (-2/3)\mu . \quad (5.3.4)$$



Mit der Grundgleichung im eindimensionalen Fall

$$\rho \cdot du/dt + dp/dx - (4\mu/3) \cdot d^2u/dx^2 = 0, \quad (5.3.5)$$

die später nach NAVIER und STOKES benannt wurde, wobei  $\rho$  die Dichte,  $u$  die Geschwindigkeit und  $p$  der Druck ist, und mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung gelang STOKES eine Aussage über die Absorption einer Schallwelle in einem fluiden Medium aufgrund der inneren Reibung  $\mu$ . Dazu hatte er für die Schallwelle in  $x$ -Richtung den Ansatz gemacht

$$u = C_1 \cdot e^{-ct} \cos\{(2\pi/\lambda)(bt - x) + C_2\} \quad (5.3.6)$$

mit  $C_1$  und  $C_2$  als Konstanten,  $b$  als Phasengeschwindigkeit der Schallwelle und  $\lambda$  als Wellenlänge. Für den Absorptionskoeffizienten  $c$  erhielt STOKES:

$$c = 8\pi^2\mu/3\lambda^2\rho \quad (5.3.7)$$

(STOKES 1845a). 1868 hat GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF (1824-1887) auch den Einfluß der Wärmeleitung auf die Schallabsorption untersucht (KIRCHHOFF 1868a).

Ein Kapitel, zu dem CHLADNI selbst noch keine eigenen Untersuchungen angestellt hat, ist die Physik schwingender Luftsäulen, wie sie insbesondere für die Wirkungsweise der Blasinstrumente von Bedeutung ist. Was man darüber vor 1750 wußte, war nur wenig mehr als das, was NEWTON in den "Principia" darüber geschrieben hatte. Die Schriften, auf die sich CHLADNI bei der Darstellung der Akustik der Blasinstrumente und Orgelpfeifen in "Die Akustik" bezog, sind die von DANIEL BERNOULLI (BERNOULLI 1764a, vgl. auch DOSTROVSKY/CANNON 1987a, 63-68), JOHANN HEINRICH LAMBERT (LAMBERT 1775a), EULER (EULER 1772a), JOSEPH LOUIS LAGRANGE (LAGRANGE 1759a u. 1760/61a) und RICCATI (RICCATI 1767a) (vgl. auch TRUESDELL 1955a, IX-CV).

Um einen Überblick über den Kenntnisstand in der Physik schwingender Luftsäulen um 1800 zu bekommen, folgen wir den Ausführungen CHLADNIS:

Mehrere Bestimmtheit findet sich bey solchen Schwingungen der Luft, welche vermittelt einer schnellen Strömung derselben durch eine enge Oeffnung veranlaßt werden. Die Höhe und Tiefe der Töne hängt hier von zwey Umständen ab, 1) von der Kraft, mit welcher die

Luft durch die enge Oeffnung zu dringen strebt, so daß, wenn die Oeffnung sich nicht verändert, bey einer größern Kraft die Töne höher werden, 2) von der Größe der Oeffnung, so daß bey einerley Kraft die Töne desto höher sind, je kleiner die Oeffnung ist. (CHLADNI 1802a, 80-81)

Die hier für Schneidetöne angegebenen Gesetzmäßigkeiten gelten, streng genommen, nur für den Fall des nicht angekoppelten Resonators.

CHLADNI beschrieb nun die Wirkungsweise der Zungenpfeifen ("Rohrwerke" oder "Schnarrwerke" bei CHLADNI):

Das Mundstück ist bey diesen Pfeifen so beschaffen, daß die eine Seite der engen Oeffnung, durch welche die eingeblasene Luft strömt, aus einem Streifen von Messingblech besteht, welcher die Zunge genennt, und durch die eindringende Luft auch in zitternde Bewegung gesetzt wird ... Derjenige Theil der Pfeife, in welchem sich die mitklingende Luftmasse befindet, ist gewöhnlich weit kürzer, als an andern Orgelpfeifen, es wird nämlich durch die Kraft des Anblasens, verbunden mit den Schwingungen der Zunge die in dem übrigen Theile der Pfeife enthaltene Luftmasse genöthigt, in ganz andern Zeiträumen zu zittern, als sie ihrer eigenthümlichen Beschaffenheit nach zittern würde ... (CHLADNI 1802a, 84)

Hier kommt schon zum Ausdruck, daß die Grundfrequenz einer Zungenpfeife im wesentlichen mit der Eigenfrequenz der frei schwingenden Zunge übereinstimmt, wenn die Dämpfung der Zunge klein ist gegenüber der Dämpfung des angekoppelten Resonators. Dies ist aber bei metallischen Zungen meistens der Fall.

CHLADNI beschrieb danach die Wirkung der Lippenpfeifen (bei ihm auch "Flötenwerke" genannt), hier

... hängen die Töne hauptsächlich von der Länge der schwingenden Luftsäule ab, so daß durch eine Verschiedenheit des Blasens sich keine andern Töne hervorbringen lassen, als solche, die mit der Länge der schwingenden Luftsäule, oder mit den Längen der Theile, in welche sie sich auf eine regelmäßige Art eintheilt, in umgekehrtem Verhältnisse stehen. (CHLADNI 1802a, 84)

Über die Grifflöcher schrieb CHLADNI:

An Blasinstrumenten, wo an den Seiten sich Löcher befinden, wird dadurch, daß man diese offen läßt, die schwingende Luftsäule abgekürzt, wodurch also die Töne höher werden. In welchen Verhältnissen aber durch die verschiedenen Arten von Oeffnung oder Verschließung der Seitenlöcher die Töne erhöht oder erniedrigt werden, ist zwar durch die Erfahrung ziemlich genau bestimmt, es scheint aber der gegenwärtige Zustand der Mechanik und Analyse noch nicht zu einer theoretischen Untersuchung dieser Veränderungen hinlänglich zu

seyn ... (CHLADNI 1802a, 85)

Die gründliche Erforschung der Wirkungsweise der Grifflöcher begann erst im 20. Jahrhundert (RAMAN 1927a, 404-405).

Die Schwingungsverhältnisse der Luft im Resonator hängen davon ab, ob das Blasinstrument an beiden Enden offen oder nur an einem Ende offen ist. "Das Ende, wo geblasen wird, wenn es auch, wie bey Hörnern und Trompeten, ganz an den Mund gesetzt wird, ist doch als offen anzusehen" (CHLADNI 1802a, 86). Es war noch unbekannt, daß die Klarinette - die erst seit MOZARTs Zeiten ins Orchester Eingang gefunden hat - und die anderen Instrumente mit einfachem Rohrblatt hier eine Ausnahme machen. Infolge der hohen Eigenschwingungen der zum Anblasen benutzten Rohrblattzunge schwingt ihr Ansatzrohr wie eine einseitig geschlossene Pfeife. Aber auch die Formen des Ansatzrohres (ob konisch oder zylindrisch) spielen in diesem Zusammenhang eine Rolle (TARNOCZY 1991a, 59).

In einer an beyden Enden offenen Pfeife, wohin auch alle gewöhnlichen Arten von Blasinstrumenten zu rechnen sind, bewegt sich bey der einfachsten Schwingungsart die darinnen enthaltene Luft so, daß in der Mitte ein Schwingungsknoten ist ... Bey der zweyten Schwingungsart, wo der Ton um eine Octave höher ist, als bey der ersten, sind zwey Schwingungsknoten vorhanden, deren jeder um den vierten Theil der ganzen Länge von den Enden entfernt ist ... (CHLADNI 1802a, 86-87)

-Diese Überlegung wurde vom Verfasser nun auf noch höhere Schwingungsmoden ausgedehnt, die möglichen Frequenzen verhalten sich dann wie 2:4:6:8:... Bei den gedackten Pfeifen sind die Verhältnisse etwas anders. Der Grundton "... ist um eine Octave tiefer, als bey der einfachsten Schwingungsart in einer eben so langen offenen Pfeife. Bei der zweyten Schwingungsart ... [ist] der Ton ... um eine Octave und eine Quinte höher, als bey der ersten Schwingungsart ... Ueberhaupt verhält sich die Reihe der möglichen Töne einer gedeckten Pfeife, wie die Zahlen 1, 3, 5, 7 etc." (CHLADNI 1802a, 88-89).

Mit den Zungenpfeifen hat sich 1829 der junge WILHELM WEBER theoretisch ausführlich beschäftigt (WEBER 1829a). Dabei wird die Zungenpfeife das erste Mal als ein System der Kopplung von Zungenschwingung und Luftsäulenschwingung betrachtet. Er erkannte auch, daß zwar Metallzungen bestrebt sind (wie oben erwähnt), in ihrer Eigenschwingung zu oszillieren, diese jedoch durch die Rückwirkung der Luft im Resonator beeinflußt werden kann. Mit einer Verlängerung des Ansatzrohres bei einer Zungenpfeife

genügen und die Randbedingungen an den festen Wänden und in unendlicher Entfernung befriedigen. Er betrachtete ein zylindrisches Rohr. Die Dimension der Öffnung sei klein gegen die Wellenlänge. Nur auf einer kurzen, d.h. gegen die Schallwellenlänge kleinen Strecke von der Mündung aus gerechnet, darf die Gestalt der Pfeife von der Zylinderform abweichen. Eine trichterförmige Erweiterung der Pfeife wird also nicht ausgeschlossen. Die Pfeifenmündung liege in einer ebenen Wand, die sich nach allen Seiten ins Unendliche erstreckt. Für das Geschwindigkeitspotential in der Pfeife, wo die Wellen noch eben sind, machte HELMHOLTZ einen Ansatz, desgleichen für das Geschwindigkeitspotential im fernen Teil des freien Raumes mit seinen kugelförmigen Wellen. Für das zwischen solchen bekannten Gebieten liegende Gebiet mit zunächst unbekanntem Geschwindigkeitspotential läßt sich nun mit Hilfe des GREENSchen Satzes die Gestalt von  $\varphi$  aus den Werten in jenen Gebieten herleiten. Es stellte sich nun heraus, daß die Resonanz einer einseitig geschlossenen Pfeife dann am stärksten ist, wenn die reduzierte Länge  $s + l$  ein ungerades Vielfaches der Viertelwellenlänge ist. Für die Mündungskorrektur  $s$  einer zylindrischen Pfeife mit dem Radius  $R$  erhielt so HELMHOLTZ den Wert  $(\pi/4)R = 0,785 R$ . WERTHEIM hatte für die gleiche Pfeifenart experimentell  $s$ -Werte aus dem Intervall  $0,638 R < s < 0,832 R$  erhalten.

In derselben Arbeit bestimmte HELMHOLTZ übrigens auch die Resonanzen in Hohlräumen, deren Dimensionen klein gegen die Schallwellenlänge sind (HELMHOLTZ-Resonator). Hat ein Hohlraum das Volumen  $S$  und eine kreisförmige Öffnung mit dem Flächeninhalt  $s$ , so fand er die Resonanzfrequenz  $n$  ( $c$  - Schallgeschwindigkeit) aus:

$$n = (c/\pi^{5/4}) \cdot (s)^{1/4} (2S)^{1/2} . \quad (5.3.9)$$

Wie schon CHLADNI bemerkte, erscheinen die Seitenwände einer Pfeife für die Tonbildung zunächst unwesentlich (CHLADNI 1802a, 83). Bei kräftiger Erregung verspürt man jedoch das Vibrieren des Materials, und diese Schwingungen sind umso stärker, je schwächer das Wandmaterial ist. Der Leipziger Arzt und Stimmphysiologe KARL FRIEDRICH SALOMO LISCOVIUS (1780-1844) interessierte sich für das Thema und untersuchte den Einfluß der Wandung (LISCOVIUS 1842a) und der Weite (LISCOVIUS 1843a) der Labialpfeifen. Während CHLADNI 1802 noch schrieb: "Die Weite einer Pfeife trägt nichts zur Bestimmung der Töne bey ..." (CHLADNI 1802a, 90), so gilt das zwar für Pfeifen mit enger Mensur, es wird jedoch bereits 1827 diese Bemerkung mit Bezug auf SAVART (s. Kap. 8.1)

korrigiert: "... wenn aber die Breite mehr, als ungefähr  $1/6$  der Länge beträgt ... hängen die Töne auch von den übrigen Dimensionen der Röhre ab ..." (CHLADNI 1827b, 26). 1843 veröffentlichte LISCOVIUS genauere Untersuchungen über den Einfluß der Mensur:

Wenn der Umfang des Querschnitts des Kanals den vierten Theil der Länge nicht übersteigt, ist die Tonhöhe gemäß der Länge des Kanals. Wenn der Umfang des Querschnitts nur noch zwei Mal in der Länge enthalten ist, so ist der Ton um eine grosse Terz tiefer, als er nach der Länge des Kanals seyn sollte. Wenn der Umfang des Querschnitts mit der Länge des Kanals gleich gross ist, so ist der Ton über eine reine Quinte tiefer, als er der Länge des Kanals zufolge seyn sollte. Und wenn der Umfang des Querdurchschnitts zwei Mal so gross ist, als die Länge des Kanals, so ist der Ton fast um eine ganze Octave tiefer, als er der Kanal länge nach seyn sollte. Ist er vier Mal so gross, so spricht die Pfeife nicht an. (LISCOVIUS 1843a, 99)

Bei dem Studium des Einflusses des Wandmaterials von Labialpfeifen auf die Tonhöhe setzte LISCOVIUS Untersuchungen von SAVART aus dem Jahre 1825 fort (über diese wird im Kap. 8.1 berichtet werden). Ersetzte man die starren Wände einer Pfeife durch Pergament, so klangen diese Pfeifen tiefer.

Ein Blick in die zusammenfassende Literatur über Akustik aus der Wende zum 20. Jahrhundert zeigt, wie schnell sich die Erforschung der Blasinstrumente in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts entwickelt hat (AUERBACH 1909a, 413-493).

Wenig sagte CHLADNI 1802 von der menschlichen Stimme. Über den Einfluß der Stimmritzenöffnung schrieb er:

Ist diese Oeffnung weit genug, so zieht die Luft, wie bey dem gewöhnlichen Athmen, still hindurch; wird sie aber verengert, so reibt sich die aus den Lungen durch die Lufröhre ausgehende Luft bey ihrer Durchpressung durch diese beyden Membranen<sup>10</sup> an dieselben, und setzt sie dadurch in eine schnelle zitternde Bewegung, welche der ausgehenden Luft mitgetheilt wird. Dieser schnell zitternden Luft, welche man Stimme nennt, setzen die übrigen Sprachwerkzeuge bey dem Ausgange aus dem Munde mancherley Hindernisse in den Weg, und stellen dabey mancherley sehr verschieden gestaltete Oeffnungen dar, wodurch die Stimme auf mancherley Weise articulirt wird. (CHLADNI 1802a, 82)

Eine Unterscheidung des Verhaltens der Stimmbänder bei stimmhaften und stimmlosen Lauten wurde hier noch nicht gemacht.

---

<sup>10</sup>die Stimmbänder

CHLADNI war ein Forscher, der an der Entstehung von Sprachlauten sehr interessiert war. Persönliche Erinnerungen hatte WILHELM WEBER und schrieb über den Wittenberger Physiker:

Er war zu dieser Untersuchung in mehrerer Rücksicht vorzüglich geschickt: denn er kannte nicht nur den Bau der menschlichen Sprechwerkzeuge, sondern besass auch eine durch Uebung sehr ausgebildete Fertigkeit, die Sprachlaute, so wie sie in den Sprachen der verschiedenen Völker vorkommen, möglichst genau nachzuahmen. Hierbei kam es ihm sehr zu statten, dass er, ausser den griechischen und lateinischen Sprachen ... das Französische und Italienische vollkommen sprach ... , das Engländische getrieben und auch mit der niederländischen, spanischen, russischen, neugriechischen und mit der hebräischen Sprache sich einiger Massen beschäftigt ... Er achtete nun auf den Zustand seiner Sprechorgane, während er verschiedene Laute aussprach, mit der ihm eigenthümlichen Beobachtungsgabe. (WEBER 1892a, 190)

Es war anzunehmen, daß sich CHLADNI mit den wenigen Bemerkungen zu diesem Thema in "Die Akustik" (1802) nicht zufriedengab. Bereits in der französischen Fassung des Buches von 1809 folgten Beobachtungen über die Entstehung der Vokale (CHLADNI 1809a, 67-71). Bei *a* bleiben die äußeren und die inneren Teile des Mundes ganz offen. Von *a* ausgehend, teilte er nun die übrigen Vokale in drei Reihen ein:

- 1) Vokale, bei denen das Innere des Mundes offen bleibt, das Äußere aber verengt wird, von CHLADNI mit *ò*, *ó* und *u* (im Französischen *ou*) bezeichnet,
- 2) Vokale, bei denen das Äußere des Mundes offen bleibt, das Innere sich aber verengt, von CHLADNI mit *â* (im Französischen *ê* oder *aî*), *e* (im Französischen *é*) und *i* bezeichnet, und
- 3) Vokale, wo sich sowohl das Äußere wie das Innere verengt, von CHLADNI mit *ò´* (im Französischen *eû*), *ó´* (im Französischen *eû*) und *û* (im Französischen *u*) bezeichnet.

CHLADNI hat sich gegen Ende seines Lebens zu diesem Thema noch einmal ausführlich geäußert (CHLADNI 1824c) und ist auch auf zeitgenössische Publikationen dazu eingegangen (CHLADNI 1826e).

Bereits 1799 wurde von der Petersburger Akademie der Wissenschaften ein Preis für die Analyse der Vokale und für die Erfindung eines Instruments ausgesetzt, das den Klang dieser Vokale möglichst gut wiedergibt. Den Preis gewann der Professor der Physiologie an der Universität Halle/S. CHRISTIAN GOTTLIEB KRATZENSTEIN, der später in St. Petersburg und Kopenhagen wirkte. Vokale wurden bei ihm als Klänge bezeichnet, die durch die unterschiedliche Stellung des Mundes und der Zunge hervorgerufen werden (KRATZENSTEIN

seiner Maschine besaß einen Blasebalg und als Schwingungsgenerator eine Zungenpfeife mit aufschlagender Zunge und Schalltrichter. Wenn dieser mehr oder weniger mit der Hand abgedeckt wurde, entstanden die verschiedenen Vokale. Für Zischlaute waren durch Tasten einschaltbare akustische Generatoren vorgesehen, für Nasallaute zwei Rohrstücke, für Gaumen-*r* eine Schnarre und für Explosivlaute war ein kleiner Zusatzblasebalg unterhalb des Vokalgenerators angebracht (ASCHOFF 1984a, 236-239). Besonders Worte aus der lateinischen, italienischen und französischen Sprache konnten wegen ihres Vokalreichtums mit diesem Gerät wiedergegeben werden.

CHARLES WHEATSTONE hat sich für die Sprechmaschine KEMPELNS interessiert und hat sie in den dreißiger Jahren des 19. Jahrhunderts verbessert nachgebaut (WHEATSTONE 1879a, 364).

Ein Fortschritt in der Untersuchung der Sprachlaute konnte erst nach Bekanntwerden

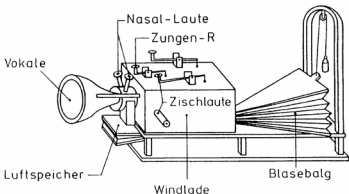


Abb. 5.3.4. Sprechmaschine von KEMPELEN (aus ASCHOFF 1984a, Bild XII.15)

der FOURIERanalyse und der Klärung der Begriffe Ton, Klang und Klangfarbe einsetzen (s. Kap. 8.2). Mit Erfindung der Resonatoren als Untersuchungsmittel kam dann HELMHOLTZ zu einer Resonanztheorie der Vokale, die im Prinzip auch heute noch gültig ist (HELMHOLTZ

1859b) (s. Kap. 8.5).

Das Wissen über die Vorgänge im Ohr beschrieb CHLADNI 1802 auf einprägsame Weise:

Ein Schall gelangt gewöhnlich auf folgende Art zu unserer Empfindung. Die durch die Bewegungen des schallenden Körpers erschütterte Luft theilt die erhaltenen Eindrücke dem Trommelfelle mit, dadurch werden die damit in Verbindung stehenden und hebelartig auf einander wirkenden Gehörknöchelchen in Bewegung gesetzt, und diese Bewegung wird mittelst der das eyrunde Fenster bedeckenden Grundfläche des Steigbügels dem im Vorhofe, in den halbcirkelförmigen Canälen, und in der Vorhofstreppe der Schnecke befindlichen Wasser mitgetheilt, und zugleich wird auch die in der Trommelhöhle befindliche Luft durch die Bewegungen des Trommelfelles erschüttelt, wodurch auch die Membrane, welche das runde Fenster bedeckt (*membrana secundaria tympani*), und das hinter derselben in der Trommelstreppe der Schnecke befindliche Wasser miterschüttelt wird. Diese auf doppelte Art (durch das eyrunde und durch das runde Fenster) dem Wasser des Labyrinths mitgetheilten schnellen Stoßbewegungen werden von der in demselben befindlichen Substanz des Gehörnerven, welche sich in dem Vorhofe und den halbcirkelförmigen Canälen in breyiger und häutiger, in der Schnecke aber in faseriger Gestalt zeigt, als Schall empfunden, und diese Empfindung wird durch den weitem Fortgang des Gehörnerven, endlich dem Gehirne, welches allem Ansehen nach der allgemeine Sitz der Empfindungen ist, mitgetheilt. (CHLADNI 1802a, 284)

Die Kenntnisse vom Schallempfang durch das Ohr hatten sich parallel zur Erforschung der Ohranatomie und zu den sich im Laufe der Zeit vertiefenden Einsichten in akustische Gesetzmäßigkeiten entwickelt (BÉKÉSY/ROSENBLITH 1948a; ZWISLOCKI 1981a).

Der große Fortschritt in der Hörtheorie geschah mit der Veröffentlichung der Resonanztheorie des Hörens durch HELMHOLTZ 1862 (s. Kap. 8.5). Auch diese Theorie hat ihre Vorläufer gehabt (ZIMMERMANN 1993a). In seinem Werk von 1767 betrachtete RICCATI den Hörnerv als ein Bündel von verschiedenen Nerven, die in kleinen Stufen vom tiefsten bis zum höchsten Ton gehen und wo bei Schallempfang derjenige Nerv in Schwingungen versetzt wird, der in Gleichklang zum tönenden Körper steht (RICCATI 1767a, 78 ff.). Diese Theorie verwarf RICCATI jedoch wieder und nahm an, daß der Hörnerv ein mechanischer Wellenleiter sei, der dem Gehirn alle hörbaren Töne zuleitet. Er konnte nicht wissen, daß die Fortleitung im Hörnerv elektrischer Natur ist. Zu einer möglichen Ergänzung beider Theorien kam RICCATI nicht.



## 6. Die Zeit 1803-1815

### 6.1 Reisen in Europa

Am Ende des Jahres 1802 begann für CHLADNI die längste Reiseperiode seines Lebens. Unterbrochen durch nur kurze Aufenthalte in Wittenberg, führte sie den Forscher bis 1812 durch halb Europa. Aus autobiographischen Artikeln und aus Äußerungen von Zeitgenossen kann man die Reisetätigkeit heute einigermaßen lückenlos rekonstruieren. CHLADNI ist oft gefragt worden, ob er nicht einen Bericht über seine Reisen geben wolle (CHLADNI 1817a, XII). Er finde, so antwortete er, eine Beschreibung so bekannter Gegenden wie die von ihm bereisten für überflüssig. Außerdem möchte er keine Bemerkungen über das Privatleben der besuchten Personen und deren Äußerungen weitergeben<sup>11</sup>:

ich will ... lieber den Vortheil und die sehr zweydeutige Celebrität, welche sich vielleicht dadurch erlangen ließen, entbehren, als mir das Zutrauen verderben, was so Manche, selbst bisweilen bey der ersten Bekanntschaft, mir bezeigt haben. Da ich auf dieses vielen Werth setze, so würde ich von dieser Seite mehr verlieren, als ich auf der andern gewinnen könnte. (CHLADNI 1817a, XII)

Anfang 1803 kam CHLADNI nach Weimar und besuchte auch JOHANN WOLFGANG V. GOETHE (1749-1832) in seinem Haus am Frauenplan. Über diese erste Begegnung schrieb der Hausherr am 26.1.1803 in einem Brief an FRIEDRICH V. SCHILLER (1759-1805):

... Doctor Chladni ist angekommen und hat seine ausgearbeitete Akustik in einem Quartbände mitgebracht. Ich habe sie schon zur Hälfte gelesen<sup>12</sup> und werde Ihnen darüber mündlich, über Inhalt, Gehalt, Methode und Form manches Erfreuliche sagen können. Er gehört ... unter die Glückseligen, welche auch nicht eine Ahndung haben, daß es eine Naturphilosophie giebt und die nur, mit Aufmerksamkeit, suchen die Phänomene gewahr zu werden, um sie nachher so gut zu ordnen und zu nutzen als es nur gehen will ... Sie können denken, daß ich, sowohl bey dem Lesen des Buches, als bey einer mehrstündigen Unterhaltung immer nach meiner alten Direction fortgeforscht habe, und ich bilde mir ein, einige recht gute Merk-

---

<sup>11</sup> einzige Ausnahme ist der in Kap. 5.2 erwähnte Bericht über die Audienz bei NAPOLEÓN I.

<sup>12</sup> aus einem Katalog über GOETHE'S Bibliothek (RUPPERT 1958a) geht hervor, daß sich das Buch heute nicht mehr im Haus am Frauenplan befindet

puncte, zu weiteren Richtungen, bezeichnet zu haben. Überhaupt sehe ich es als ein gutes Omen an, daß er eben jetzt kommt, da wir, mit einiger Wahrscheinlichkeit, Zeltern erwarten<sup>13</sup>. Auch hatte ich eben die Farbenlehre einmal wieder durchgedacht und finde mich, durch die, in so vielem Sinn, kreuzenden Bezüge, sehr befördert. (GOETHE 1894a, 170)

In diesem Brief wird schon angedeutet, was zehn Jahre später für GOETHEs Denken in Fragen der Klangfiguren von großer Bedeutung wird. 1813 entdeckte THOMAS JOHANN SEEBECK (1770-1831) die entoptischen (d.h. im Körper entstehenden) Farbfiguren, die infolge Spannungsdoppelbrechung bei polarisiertem Licht in Gläsern entstehen. Für GOETHEs Naturschau sind die Hauptworte, mit denen die Natur zum Menschen spricht, Totalität, Urphänomen, Polarität und Steigerung (BUCHWALD 1946a, 260). So sieht der Dichter später zwischen den entoptischen Farbfiguren SEEBECKs und den CHLADNischen Klangfiguren Gemeinsamkeiten, er erkennt in beiden Phänomenen das Wirken polarer Erscheinungen. In der um 1800 mit den naturphilosophischen Schriften von FRIEDRICH WILHELM JOSEPH V. SCHELLING (1775-1854) eingeleiteten kurzen Periode der romantischen Naturphilosophie sah GOETHE nur eine Theorie. Die Natur wurde als universelles Ganzes betrachtet, was GOETHE durchaus nicht fremd war, aber nach der Meinung der romantischen Naturphilosophen konnte man diese Einstellung nicht durch Verstandesschlüsse erreichen, sondern allein durch die Idee der Vernunft (LIND 1992a, 297-312). Obwohl es Lehrbücher z.B. der Physik von Naturphilosophen gab, die einem experimentellen Ansatz zuzuordnen sind, gab es aber auch Lehrbücher, die die Physik in spekulativer Weise behandelten. An solche dachte wohl GOETHE, wenn er betonte, daß er in der Naturbetrachtung von der sinnlichen Wahrnehmung ausgeht. Am 13.4.1813 schrieb GOETHE in einem Briefkonzept an SEEBECK unter Bezugnahme auf die entoptischen Farbfiguren:

... Die Ähnlichkeit mit den Chladnyschen Figuren ist überraschend und die Vergleichung der Bedingungen unter welchen beyde entstehen, höchst belehrend. Ist doch dort auch Ruhe und Bewegung, Strebendes und Widerstrebendes in dem Körper auf den gewirkt wird. Diese manifestirt der Sand. Wer würde sagen, daß die Figuren im Sande stecken und durch den Fidelbogen herausgezogen werden? (GOETHE 1900a, 312)

Die Steigerung ist bei GOETHE ein Vorgang, der im Naturgeschehen einen Richtungssinn festlegt und neue Formen entstehen läßt. Die Erscheinung der CHLADNischen Klangfiguren hat GOETHE begeistert, sie war ein wichtiges Phänomen für seine Art, die Natur zu sehen.

<sup>13</sup> zu einer Begegnung mit CARL FRIEDRICH ZELTER (1758-1832) kam es damals noch nicht

Er hat die Versuche des Wittenberger Physikers noch oft selbst wiederholt. In einem Briefkonzept an WILHELM V. HUMBOLDT (1767-1835) vom 14.3.1803 schrieb er:

... Doctor Chladni war vor einiger Zeit hier. Durch ein abermals neuerfundenes Instrument introducirt er sich bey der Welt und macht sich seine Reise bezahlt; denn bey seinen übrigen Verdiensten um die Akustik könnte er zu Hause sitzen, lange weilen und darben. In einem Quartbande hat er diesen Theil der Physik recht brav, vollständig und gut geordnet abgehandelt. Wenn man sich nach einem höhern Standpunkte umsieht, wo das Hören, mit seinen Bedingungen, als ein Zweig einer lebendigen Organisation erschiene; so ist es jetzt eher möglich dahin zu gelangen, weil eine solche Vorarbeit gemacht ist, die dann freylich, von den Nachfolgern, noch tüchtig durchgeknetet werden muß. Die von ihm entdeckten Figuren, welche auf einer, mit dem Fiedelbogen, gestrichnen Glastafel entstehen, hab ich die Zeit auch wieder versucht. Es läßt sich daran hübsch anschaulich machen, was das einfache Gegebene, unter wenig veränderten Bedingungen, für manchfaltige Erscheinungen hervorbringt. Nach meiner Einsicht liegt kein ander Geheimniß hinter diesen wirklich sehr auffallenden Phänomenen. (GOETHE 1894a, 197-198)

Zu einer Ausarbeitung der Tonlehre durch GOETHE ist es trotz jahrzehntelanger Beschäftigung damit nicht mehr gekommen. Geblieben ist eine ausführliche Tabelle, in der die Lehre in drei Abteilungen vorgetragen wird. In der ersten Spalte, überschrieben: "Organisch (subjektiv)", wird die Schallentstehung durch die Stimme aufgeführt, der Empfang durch das Ohr und die Wirkung auf den ganzen Körper (Rhythmik). Die 2. Spalte ist überschrieben: "Mechanisch" und beinhaltet die Musikinstrumente. Die 3. Spalte ("Mathematik") erwähnt die Tonverhältnisse, die Harmonischen und die Tongeschlechter Dur und Moll (DREYER 1976a). Die Tabelle fand GOETHE sehr wichtig, sie hing in seinem Schlafzimmer.

Die Fachphysik konnte dem Dichter in seiner Art der Naturbetrachtung nicht folgen. Schon die zeitgenössischen Physiker lehnten z.B. seine Farbenlehre ab. GOETHE antwortete darauf mit polemischen Äußerungen gegen die Naturwissenschaftler, in der auch seine ganze Skepsis gegenüber der Apparatephysik deutlich wird. In einem Brief an den Berliner Staatsrat CHRISTOPH FRIEDRICH LUDWIG SCHULTZ (1781-1834) vom 29.6.1829 schrieb er:

Was meiner Farbenlehre eigentlich ermangelte, war, daß nicht ein Mann wie Chladni sie ersonnen oder sich ihrer bemächtigt hat; es mußte einer mit einem compendiosen Apparat Deutschland bereisen, durch das Hokus Pokus der Versuche die Aufmerksamkeit erregen, einen methodischen Zusammenhang merken lassen und das Practische unmittelbar mittheilen, das Theoretische einschwärzen, den Professoren der Physik überlassen, ihrer verworrenen

Glück mit Freuden dransetzte, eine, bis auf ihn, noch gar nicht im Zusammenhange angesehene Wissenschaft zu bearbeiten und das Gefundene dem Publikum mitzuthellen, das ihn bisher mit nicht belohnt hat, als mit dem weitverbreiteten Schalle seines Namens und mit der Quantität papierner Ehrendiplome. (AMZ 9(1806/07), 356)

Aus Mannheim wurde am 25.5. 1807 jedoch ein fast leerer Saal gemeldet:

... andertheils aber findet freylich nicht jeder seine Rechnung dabey, ein doch immer unvollkommenes, zumal mit geringer Kunst gespieltes Instrument, dessen Einrichtung nicht erklärt wird, anzuhören, und isolirte Experimente ohne erschöpfende Erklärung, als welche in solcher Eil gar nicht möglich ist - anzusehen. (AMZ 9(1806/07), 752-753)

Im Dezember 1807 war CHLADNI in Amsterdam, fand dort günstige Aufnahme und reiste über Brüssel nach Paris weiter, wo er kurz vor Jahresende 1808 eintraf. Dieser Aufenthalt dauerte bis März 1810 und war für CHLADNI persönlich und wissenschaftlich ein voller Erfolg (s. Kap. 5.2). Über Straßburg ging die Reise dann nach Basel weiter. Aus einem Brief aus dieser Stadt vom 8.5.1810 geht hervor, daß er auch Mineralien (vielleicht auch Meteorite?) mitführte und sie dann nach Wittenberg vorausschickte. In Zürich, der nächsten Station, traf sich CHLADNI auch mit dem Komponisten HANS GEORG NÄGELI (1773-1836). Über Genf und den Mont Cenis ging die Reise nach Turin weiter, wo er am 16.10.1810 eintraf (ULLMANN 1982b, 52). Dort blieb er den Winter 1810/11 über. Dem Instrumentenbauer LUIGI CONCONE überließ er "gegen billige Vergütung" (CHLADNI 1821a, 120) die Pläne für den Bau des Clavicylinders. Ein damals von CONCONE gebautes Instrument, welches dieser ausdrücklich als Erfindung von CHLADNI bezeichnete, befindet sich im Musikinstrumentenmuseum der Universität Leipzig (Abb. 6.1.1). Mitte April 1811 meldet sich der Physiker aus Mailand wieder. Die Aufenthalte waren neben der Vortragstätigkeit ausgefüllt mit Arbeiten an seinem Clavicylinder, den er laufend verbesserte, mit Kontakten zu berühmten Zeitgenossen und mit Forschungsarbeiten in wissenschaftlichen Bibliotheken. Im Mai 1811 reiste CHLADNI über Pavia, Parma, Genua nach Florenz. Aus mehreren Briefen des Physikers aus dieser Stadt an den Theologen und Komponisten JOHANN PAUL SCHULTHESIUS (1748-1816) sind wir über die Aktivitäten CHLADNIS in dieser Zeit gut unterrichtet (ULLMANN 1982b). SCHULTHESIUS war Sekretär der 4. Klasse (Schöne Künste) der 1808 gegründeten Accademia Italiana di Scienze, Lettere ed Arti, die ihren Sitz in Livorno hatte. Auf seine Empfehlung hin wurde CHLADNI korrespondierendes Mitglied dieser Akademie. Das Titelblatt des 1817 in Leipzig erschienenen Buches "Neue Beyträge zur

er am 19.6.1812 erneut GOETHE traf - in die Heimat zurück. Die längste Reiseperiode CHLADNIS war damit beendet.

Beim Rückzug von NAPOLÉONS Heer aus Rußland schloß sich ein Teil desselben 1813 in die noch zu Sachsen gehörige Festung Wittenberg ein. Im Zuge der Einquartierungen in der Stadt wurden Hörsäle beschlagnahmt, und der größte Teil der Professoren übersiedelte in die nahe bei Wittenberg liegenden kleinen Städte Schmiedeberg und Kemberg. Auch CHLADNI verließ seine Wohnung in der Schloßstraße 10 und bezog Zimmer in Kemberg. Wittenberg selbst erlitt das Schicksal einer Festung. Im September 1813 begann die Beschließung der Stadt durch die Preußen. Viele Häuser wurden ein Opfer der Flammen. Auch das Haus in der Schloßstraße, in dem der Physiker noch einen Teil seines Eigentums aufbewahrte, erlitt große Beschädigungen. CHLADNI verlor dabei viele Erinnerungsgegenstände, die er im Laufe seiner Reisen gesammelt hatte. Nach dem Wiener Kongreß kam Wittenberg an Preußen, die Universität wurde 1816 mit der in Halle/S. vereinigt. CHLADNI blieb bis an sein Lebensende in Kemberg wohnen, er verzichtete auf eine Rückkehr in seine Geburtsstadt.

## 6.2. Schallausbreitung in der Atmosphäre über große Entfernungen

Die Entfernung, bis zu der ein Schallereignis im Freien noch gehört werden kann, hängt natürlich in erster Linie von der Schallstärke selbst ab. CHLADNI gab als weitere Faktoren die Windrichtung und andere Nebenumstände (z.B. den Einfluß einer Gebirgskette) an (CHLADNI 1802a, 236-237). Er beschrieb auch die bekannte Tatsache, daß die Schalleitung längs des Erdbodens besser ist als durch die Luft, und man so Ereignisse hören kann, die sonst nicht mehr vernehmbar sein würden.

Neben diesen Beobachtungen, bei denen der Luftschall direkt von der Quelle zum Beobachter kommt, gibt es auch Ereignisse, die so weit vom Beobachter entfernt sind, daß infolge Absorption an eine direkte Schallausbreitung längs des kürzesten Weges nicht mehr gedacht werden kann.

Am 14. Oktober 1806 kam es zwischen NAPOLÉONS Truppen und den preußisch-sächsischen Heeren zur Doppelschlacht bei Jena und Auerstedt (Abb. 6.2.1). CHLADNI berichtete, er habe an diesem Tag den Lärm der Schlachten bis nach Wittenberg, also über eine Entfernung von ca. 150 km, gehört. Dabei sei eine Wahrnehmung auch durch Schalleitung im Erdboden feststellbar gewesen. Da ihm der direkte Schallempfang durch die Luft selbst unwahrscheinlich erschien, führte er das Ereignis mehr auf das Leitvermögen der Erde zurück:

... dass manche Modificationen des Schalles in die Ferne mehr den der Erde mitgetheilten Zitterungen, als der Luft zuzuschreiben sind, scheint mir ganz richtig zu seyn, da ich denselben Kanonendonner der Schlacht bei Jena im J. 1806 ... in Wittenberg sowohl in Zimmern als im Freien bei Anlegung des Kopfes an eine Wand besser, als durch die Luft gehört habe, welches auch Andere, die ich darauf aufmerksam machte, eben so fanden. (CHLADNI 1821d, 63)

Es gibt noch einen anderen Zeugen für dieses akustische Ereignis. 1818 berichtete C. W. FRÖHLICH, Besitzer eines Landgutes in der Nähe von Luckenwalde bei Berlin, also von Jena/Auerstedt noch weiter entfernt als Wittenberg:

Hier liess ich am 14. October 1806, dem Tage der Schlachten von Jena und Auerstädt, durch



Abb. 6.2.1. Mittel- und Ostdeutschland mit den Orten der Schlachten bei Jena und Auerstedt

einige zwanzig Frauen den Kohl im Garten abhauen. Nachmittags hörten wir hier den Kanonendonner so stark, dass ich Mühe hatte, diese Frauen bei der Arbeit zu erhalten. Alle ergriff Furcht und Schrecken. Auch mir war es ängstlich. .... Was unsere Verwunderung über die Heftigkeit des Kanonendonners ... noch vermehrte, war die Wahrnehmung, dass an dem Tage der Wind aus dem Morgen wehte, also dem Schalle von dem 26 Meilen entfernten Schlachtfelde entgegen ... Diese Umstände führten mich auf den Gedanken, dass die Fortpflanzung des Schalls mehr von der Eigenschaft der davon getroffenen Erdschichten, als von der Beschaffenheit der Luft abhängig seyn möchte. (FRÖHLICH 1818a, 401-402)

Auch FRÖHLICH dachte also, wie CHLADNI, vorwiegend an eine Ausbreitung längs des Erdbodens, obwohl er - dem Berichte zufolge - den Luftschall kräftiger hörte als CHLADNI in Wittenberg.

Erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts sind Fälle von Schallausbreitung über große Entfernungen, die man in der älteren Literatur häufig findet (CHLADNI 1817a, 81) und deren Wahrheitsgehalt oft bezweifelt wurde, genauer untersucht worden. Der Geophysiker FRANCIS JOHN W. WHIPPLE (1876-1943) hat 1923 die erste richtige Erklärung dafür gegeben (WHIPPLE 1923a), auch ALFRED WEGENER (1880-1930) hat sich in seiner Grazer Zeit ausführlich mit dem Phänomen beschäftigt (WEGENER 1924/25a). Man fand, daß es bei Luftschall zwei Hörbarkeitszonen gibt. Das innere Hörbarkeitsgebiet hat einen von der Stärke der Schallquelle abhängigen Radius (z.B. 50 km). Die zweite Hörbarkeitszone beginnt bei etwa 120 km und kann bis 250 km reichen. Dazwischen, in der "Zone des Schweigens", wird von den Ereignissen am Ort der Schallquelle nichts vernommen. Der Schall im zweiten Bereich, also der von CHLADNI und FRÖHLICH beobachtete Kanonendonner, kommt nicht direkt von der Quelle, sondern läuft über sehr hohe Atmosphärenschichten. Bei Vorhandensein einer Inversion in der Lufthülle, und darauf wies als erster WHIPPLE hin, gelangt der schräg zur Erdoberfläche ablaufende Schall infolge Brechung in der Atmosphäre nach größerer Entfernung wieder zur Erdoberfläche zurück. Gerade an Herbsttagen, wo häufig warme Luft über kalten Schichten liegt, sind solche Inversionen öfters anzutreffen. Nimmt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zu, so kehrt ein mit dem Wind ablaufender Schallstrahl nach langem Laufweg wieder zur Erde zurück. Beide Effekte - Wind und Inversion - können sich überlagern und verstärken. Explosions- und Kanonenschall enthält außerdem viele niederfrequente Komponenten, und diese erfahren in der Luft nur eine geringe Absorption (TRENDELENBURG 1961a, 271-277).



### 6.3 Die mathematische Behandlung der Biegeschwingungen von Platten

CHLADNI hatte 1787 sein Erstlingswerk "Entdeckungen über die Theorie des Klanges" der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in St. Petersburg "zu weiterer Untersuchung ehrerbietigst vorgelegt". Nun fühlten sich insbesondere die Theoretiker angesprochen, die der deutschen Sprache mächtig waren. JAKOB II BERNOULLI (1759-1789), ein Enkel von JOHANN I BERNOULLI (1667-1748) und ein Neffe von DANIEL BERNOULLI, war in St. Petersburg tätig, heiratete eine Enkelin EULERS und ertrank in jungen Jahren in dieser Stadt beim Baden in der Nawa. Am 21.10.1788, also ein reichliches Jahr nach dem Besuch CHLADNIS in St. Petersburg, legte er der Akademie eine Plattentheorie vor (BERNOULLI 1788a)<sup>14</sup>. Dabei ging er von der EULERSchen Differentialgleichung (3.2.1) für die Biegeschwingungen von Stäben aus. Danach vollzog BERNOULLI den entscheidenden, aber falschen Schritt. Er faßte die rechteckige Platte als eine Doppelschicht aus senkrecht zueinander angeordneten und miteinander fest verbundenen Stäben auf und kam in Erweiterung der Gleichung (3.2.1) auf die zweite Koordinate  $y$  und mit  $c^4$  als Konstante auf die Plattengleichung

$$u_{xxxx} + u_{yyyy} = u/c^4. \quad (6.3.1)$$

In dieser Gleichung fehlt auf der linken Seite das Glied  $2u_{xyxy}$ ; BERNOULLI hatte noch keine klaren Vorstellungen von Normal- und Schubspannungen und deren Wirkungen. Er selbst schätzte seine Theorie richtig ein: "... ich präsentiere diese Arbeit lediglich als einen ersten Versuch, und ich bin weit davon entfernt zu glauben, ich hätte ein Problem ausgeschöpft" (zitiert nach SZABÓ 1987a, 409), und CHLADNI schrieb: "Die ersten theoretischen Untersuchungen von Jacob Bernoulli beruhten auf unrichtigen Voraussetzungen, und gaben Resultate, die mit der Erfahrung gar nicht übereinstimmten" (CHLADNI 1817a, 3).

---

<sup>14</sup> der Verfasser folgt in diesem Kapitel den Ausführungen von SZABÓ (SZABÓ 1987a, 407-424) und GRATTAN-GUINNESS (GRATTAN-GUINNESS 1990a, 461-470). Wegen Einzelheiten sei auf diese Schriften verwiesen

Die Herausgabe von "Die Akustik" in Frankreich 1809 unter dem Titel "Traité d'acoustique" machte auch die Franzosen mit den Arbeiten CHLADNIS bekannt, die die deutsche Sprache nicht verstanden (Kap. 5.2). Bereits in den Pariser Akademieberichten für das Jahr 1808 war ein Preisausschreiben veröffentlicht worden, das die Aufstellung einer mathematischen Theorie von Schwingungen elastischer Flächen und ihren Vergleich mit dem Experiment ("La classe propose donc pour sujet de prix de donner la théorie mathématique des vibrations des surfaces élastiques, et de la comparer à l'expérience", Mémoires de la Classe des sciences mathématiques et physiques de l'Institut de France. Anné 1808, tom IX, Paris 1809, S. 240-241.) beinhalteten. Der Abgabetermin war der 1.10.1811, er mußte zweimal verlängert werden, zunächst bis zum 1.10.1813, dann bis zum 1.10.1815. Der Mathematikerin SOPHIE GERMAIN (1776-1831) wurde 1816 der erste Preis zuerkannt. Ihre drei Arbeiten zu den drei Preisausschreiben wurden nie veröffentlicht, erst 1821 hat sie in einer Buchpublikation die Öffentlichkeit mit einer verbesserten und erweiterten Fassung bekannt gemacht. Darin schrieb sie selbst über die Entstehungsgeschichte ihrer Arbeiten:

Schon beim ersten Anblick der Chladnischen Experimente schien mir die mathematische Begründung dieser Erscheinungen möglich ... Weder das Bewußtsein meiner Unfähigkeit, noch der Mangel systematischer Schulung in der Analysis, noch auch die kurze Frist, die mir noch bis zum Termin der Bewerbung [1.10.1811, D.U.] übrig blieb, konnten mich davon abhalten, der Akademie eine Denkschrift zu überreichen. In derselben entwickelte ich die Hypothese, die ich mir gebildet hatte. Ich war davon überzeugt, daß sie einige Beachtung verdiente, und es lag mir sehr viel daran, sie dem Urteil der Akademie zu unterbreiten. Ich hatte schwere Fehler darin gemacht, die man übrigens auf den ersten Blick erkennen mußte. Man hätte daraufhin die ganze Arbeit verwerfen können, ohne sich der Mühe einer weiteren Durchsicht zu unterziehen. Glücklicherweise aber erkannte Lagrange, der zur Prüfungskommission gehörte, den Grundgedanken und leitete daraus die Gleichung ab, die ich hätte finden müssen, wenn ich die Regeln der mathematischen Rechnung genau beachtet hätte. Als ich sah, daß dieser große Mathematiker, den bis dahin selbst die Schwierigkeiten der Untersuchung abgeschreckt hatten, der von mir aufgestellten Hypothese eine wissenschaftliche Tragweite zuschrieb, gewann sie in meinen Augen einen höheren Wert ... Von Neuem stellte die Akademie dieselbe Preisaufgabe und gab dazu eine Frist von zwei Jahren. (GERMAIN 1821a, Vorrede)

Noch 1815 schrieb CHLADNI in der "Allgemeinen musikalischen Zeitung" im Hinblick auf das bis dahin erfolglose Preisausschreiben der Pariser Akademie: "In Deutschland möchte

wol Gauss derjenige seyn, welcher so schwierigen Untersuchungen am meisten gewachsen wäre, wenn er das Talent, welches er auf einen noch wichtigern Gegenstand, auf neue Methoden, die Bahnen der Weltkörper zu bestimmen, angewendet hat, hierauf hätte anwenden wollen\* (AMZ 17(1815), 14).

Die Hypothese von SOPHIE GERMAIN in der dritten Version von 1815 bestand darin, daß sie die elastische Kraft (bzw. das elastische Potential) - analog zu EULERS Theorie für den Stab - als proportional zu der mittleren Krümmung annahm. Mit Hilfe des LAGRANGEschen Variationsprinzips der virtuellen Verschiebungen erhielt sie als Differentialgleichung schwingender Platten

$$N^2(u_{xxxx} + 2u_{xyyy} + u_{yyyy}) + u_x = 0, \quad (6.3.2)$$

mit  $N^2$  als elastischer Konstanten, über die damals noch Unklarheit herrschte. Das ist, der Gestalt nach, bereits die richtige Gleichung für die Biegeschwingungen von Platten. SOPHIE GERMAIN behauptete, daß  $N^2$  proportional zur vierten Potenz der Plattendicke  $h$  ist. Das ist falsch, für eine Platte gilt nämlich

$$N^2 = Eh^2/[12(1-\sigma^2)\rho], \quad (6.3.3)$$

wobei  $\rho$  die Dichte,  $E$  der Elastizitätsmodul und  $\sigma$  die POISSONSche Zahl ist. Die Rechnungen von SOPHIE GERMAIN enthalten viele Fehler, und ein Mathematikhistoriker unserer Tage fragt, ob sich damals die Preiskommission des zu unbekümmerten Lesens der Preisschrift schuldig gemacht hat oder eines Übermaßes an Ritterlichkeit - oder beides (GRATTAN-GUINNESS 1990a, 468).

GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF hat 1850 eine wichtige Arbeit veröffentlicht (KIRCHHOFF 1850a), in der das Problem erneut behandelt wurde. KIRCHHOFF zeigte, daß die Hypothese von SOPHIE GERMAIN von der Proportionalität der elastischen Kräfte zur mittleren Krümmung zu falschen Randbedingungen führt. Der Physiker führte nun in die Bedingung für das Gleichgewicht der Platte noch einen Term mit der Gaußschen Krümmung ein. Dieser hat auf die Form der Differentialgleichung (6.3.2) keinen Einfluß. Für die kreisförmige Platte mit freiem Rand gelang KIRCHHOFF die Lösung und die Angabe der relativen Frequenzen, bezogen auf die Frequenz der Grundschiwingung mit zwei Knotendurchmessern und ohne Knotenkreis.

## 7. Die letzten Lebensjahre

### 7.1 Das Werk "Neue Beyträge zur Akustik"

In einem Brief vom 1.1.1815 aus seiner Wohnung in Kemberg schrieb CHLADNI an den Schriftsteller JOHANN AUGUST APEL (1771-1816), Schwager des Mathematikers KARL FRIEDRICH HINDENBURG, nach Leipzig:

... Ich habe nämlich wieder eine ganze Menge von neuen akustischen Beobachtungen gemacht, die ich bald als einen Nachtrag zu meinem Werke über die Akustik zu machen gedenke. Die Forschungen, besonders über das so merkwürdige Zahlensystem, welches in den Tonverhältnissen einer Quadratscheibe enthalten ist, waren sehr mühsam, haben aber doch eine ziemliche Ausbeute von neuen Resultaten gegeben. (ERSTEIN 1905a, 449)

Diese Briefstelle ist der erste Hinweis auf eine bevorstehende neue Publikation für das Gebiet der Akustik, die 1817 bei BREITKOPF & HÄRTEL in Leipzig erschien und den Titel "Neue Beyträge zur Akustik" trägt. Die Vorrede wurde im Mai 1816 geschrieben.

CHLADNI ging von den Beobachtungen aus, die er 1787 und 1802 (bzw. 1809) publizierte. Er wies auf die Schwierigkeiten einer mathematischen Theorie der Plattenschwingungen hin und äußerte sich zum gerade vergebenen Preis für die Preisaufgabe des Institut de France: "... welches, weil keine Abhandlung erschienen war, die das Verlangte geleistet hätte, die Zeit des Concurses zu wiederholten Malen verlängert, und endlich der einzigen, eine richtige Differentialgleichung und sonst einiges Neue enthaltenden Abhandlung von Demoiselle Germain den Preis zuerkannt hat" (CHLADNI 1817a, 3). Zur Unterstützung weiterer mathematischer Untersuchungen auf diesem Gebiet wollte CHLADNI seine Experimente, die er 1787 und 1802 (bzw. 1809) publiziert hatte, noch einmal sorgfältig wiederholen und übersichtlich darstellen. Bei den Frequenzangaben verbürgte sich der Physiker bis auf einen Viertelton. Wie in seinem Werk von 1802, wird bei der Angabe der verschiedenen Schwingungsarten die Zahl  $n$  der Knotenlinien nach der einen Richtung der Platte durch einen senkrechten Strich von der Zahl  $n'$  nach der Querrichtung getrennt:  $n | n'$ . Da viele Schwingungsarten mit dem gleichen Zahlenpaar  $n | n'$  in der Form zweier unterschiedlicher Frequenzen auftraten, wurde durch einen Unterstrich angedeutet, daß damit die Schwingungsart mit dem tieferen Ton gemeint ist, mit einem Oberstrich die mit

dem höheren Ton. War der Ton etwas höher als angegeben, so wurde ein + zugefügt, bei etwas tieferem Ton ein - .

CHLADNI begann seine Darstellung mit einer Untersuchung der Quadratscheibe. Ist die Summe der Knotenlinien einer Quadratscheibe eine gerade Zahl, so gibt es Schwin-

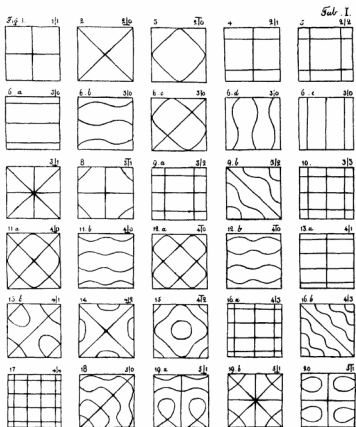


Abb. 7.1.1. Taf. I aus CHLADNI 1817a

gungsarten, die zu zwei etwas unterschiedlichen Tönen gehören; Ausnahme ist der Fall  $n | n$ , wo nur Schwingungsarten eines Tones beobachtet wurden (Abb. 7.1.1). Ist die Summe der Knotenlinien jedoch eine ungerade Zahl, so hörte CHLADNI für alle dabei vorkommenden Klangfiguren den gleichen Ton.

CHLADNI bezog alle Töne auf das Subkontra  $C_2$ , also auf einen Ton von 16 Hz. So kam er zu der Tafel V, in der die Ergebnisse für eine Quadratscheibe mit ihren relativen Schwingungszahlen übersichtlich dargestellt wurden (Abb. 7.1.2). Wie bereits bei den Untersuchungen über Stabschwingungen (s. Kap. 3.2), versuchte CHLADNI auch hier, die relativen Frequenzen durch ein Produkt kleiner ganzer Zahlen darzustellen. Er tat das, obwohl durch die Theorie von EULER über die Biegeschwingungen von Stäben gesichert war, daß die möglichen Frequenzen unharmonisch zueinander liegen. Man mußte also davon ausgehen, daß das auch bei den Biegeschwingungen elastischer Platten der Fall sein würde. CHLADNI betonte immer wieder die Schwierigkeiten der Frequenzbestimmung.

Eine ganz vollkommen genaue Bestimmung aller Tonverhältnisse läßt sich nicht erreichen, weil manche Verhältnisse an sich immer etwas schwankend sind, und nicht an allen Scheiben sich ganz gleich zeigen; indem man bey den Versuchen mit keinen mathematischen Scheiben, sondern mit physischen Scheiben zu thun hat, und also wegen kleiner Verschiedenheiten und Unregelmäßigkeiten der Gestalt, des innern Gefüges, u.s.w. eben so wenig die strengste Genauigkeit Statt finden kann, wie von einer auf dem Papier gezogenen Linie alles das im strengsten Sinne wahr ist, was sich von einer mathematischen Linie sagen läßt. (CHLADNI 1817a, 14)

Im 2. Teil des Buches schlossen sich neue Untersuchungen von Rechteckscheiben und elliptischen Scheiben an. Danach folgen in einem 3. Teil 32 Seiten Bemerkungen und Zusätze zu seinem Buch "Die Akustik". CHLADNI bezieht sich auf die Paragrafeneinteilung dieses Werkes. Einige Entwicklungslinien der Akustik wurden bereits im Kap. 5.3 besprochen, in Kap. 8 werden dann Arbeiten auf besonders herausgegriffenen Gebieten näher erläutert.

Darüber hinausgehend soll hier noch auf eine Erfindung eingegangen werden, die für eine bestimmte Eigenschaft des Clavicylinders von Bedeutung ist. Der französische Verwaltungsbeamte GABRIEL JOSEPH GRENIÉ (1756-1837) beschäftigte sich in seiner Freizeit mit akustischen Experimenten. Ihm gelang auch die Erfindung einer Expressivorgel, die die Eigenschaft hat, daß die Töne durch variablen Tastendruck schwächer oder stärker gemacht

und auch 1817 scheint die Frage noch nicht gelöst gewesen zu sein (CHLADNI 1817a, 65). Bisher galt der Klavierbauer SÉBASTIEN ERARD in der Literatur (RIEMANN 1959a, Artikel über GRENIÉ) immer als Erfinder der Expressivorgel (1830). Wegen der persönlichen Bekanntschaft von CHLADNI und GRENIÉ ist ein Irrtum des Wittenberger Physikers über diesen Gegenstand ausgeschlossen. Für diese Fragen interessierte sich CHLADNI besonders deshalb, weil ein Vorzug seines Instrumentes Clavicylinder gerade darin bestand, daß die wechselnde Tonstärke vom Fingerdruck auf die Tasten abhängig war.

Für die Beziehungen CHLADNIS zu seinen Zeitgenossen ist von Bedeutung, daß er z.B. BIOT und BENZENBERG als seine Freunde bezeichnete (CHLADNI 1817a, 57). Zur Beurteilung der Wirkung der akustischen Untersuchungen des Physikers im Kreise der Instrumentenbauer sind auch Bemerkungen von Wichtigkeit, denen man entnehmen kann, daß sich z.B. CHLADNI und der Erfinder des Metronoms JOHANN NEPOMUK MAELZEL persönlich kannten.

## 7.2 Das Meteoritenthema wird in das Vortragsprogramm aufgenommen

Als "Neue Beyträge zur Akustik" 1817 in Leipzig erschien, war der Verfasser schon seit längerer Zeit wieder auf Vortragsreise. Im Frühjahr 1815 begann eine neue Reiseperiode, die zunächst ins Erzgebirge und nach Leipzig und Dresden führte. Nach einem kurzen Zwischenaufenthalt in Kemberg war CHLADNI vom November 1815 bis März 1816 wieder in Berlin. Am 21.12.1815 erfolgte dort seine Wahl zum korrespondierenden Mitglied der Königlichen Akademie der Wissenschaften (AMBERGER 1950a). In Berlin fand CHLADNI ein freundschaftliches Verhältnis zu CARL FRIEDRICH ZELTER, der 1800 die Leitung der Singakademie übernommen hatte. ZELTERS wirtschaftliche Verhältnisse waren nicht die besten, und so zeugt eine Stelle aus einem Brief CHLADNIS an APEL vom März 1816 von seiner Hilfsbereitschaft gegenüber dem Musiker: "Da er eine sehr zahlreiche Familie hat, für die er sorgen muss, so möchte er schwerlich viel Geld auf Ankaufung neuer Bücher wenden können. Fast alle seiner Freunde und Bekannten schenken ihm ihre Schriften, und ich habe es auch immer gethan" (ERSTEIN 1905a, 458).

Durch ZELTERS Vermittlung wäre es zur Jahreswende 1815/16 vielleicht zu einer Anstellung des Physikers in Berlin gekommen (RIEMER 1833/34a, 210, 215, 217). Ähnliche Bestrebungen gab es später auch für Jena und Dresden. CHLADNI war wegen seines fortgeschrittenen Alters nicht grundsätzlich gegen ein Selbstwerden (CHLADNI 1817a, XII). Hauptsächlich war es aber wohl das Bedürfnis nach eigener Unabhängigkeit, das ihn letzten Endes davor zurückschreckte, eine Stelle anzunehmen.

1816 begann CHLADNI damit, auch das Meteoritenthema in sein Vortragsprogramm mit aufzunehmen. Seit dem Erscheinen der im Kap. 4.2 erwähnten Schrift beschäftigte sich der Forscher weiter mit diesem Gegenstand und veröffentlichte zahlreiche Zeitschriftenartikel. Er verfolgte aufmerksam die Entwicklung auf diesem Gebiet und hatte jetzt bei den Reisen auch seine Meteoritensammlung, die bei seinem Tode 41 Stück umfaßte, als Demonstrationsobjekt dabei. 1819 erschien in Wien, im Verlag J. G. HEUBNER, CHLADNIS großes Werk "Ueber Feuer-Meteore, und über die mit denselben herabgefallenen Massen". Darin sammelte er alle Nachrichten über Meteoritenereignisse und gab eine ausführliche Darstellung seiner Theorie. Die Entwicklung dieses Themas kann in unserem Zusammenhang



essantes zeitgeschichtliches Dokument ist eine Äußerung CHLADNIS aus einem Brief vom 14.7.1817 über das Leben in der Universitätsstadt: "Göttingen ist übrigens ein vortrefflicher Ort für einen, der sich ausschliesslich mit der Wissenschaft beschäftigen will, und so auch für einen, der als Professor angestellt ist, und ausser einem guten Gehalte gern recht viele Louisd'ors für Vorlesungen einnimmt, (wofür so manche Professoren mehr Eifer zeigen, als für Vervollkommnung der Wissenschaft); ..." (EBSTEIN 1907a, 105-106). Von Göttingen ging die Fahrt über Braunschweig, wo ein Wiedersehen mit dem Literaturhistoriker JOHANN JOACHIM ESCHENBURG (1743-1820) stattfand, nach Hannover. Für CHLADNIS Gesinnung spricht, daß ihm dort die gar zu große Absonderung der Stände nicht behagte (EBSTEIN 1907a, 106). In Bremen, der nächsten Station der Reise, trifft er sich mit dem Arzt und Astronomen HEINRICH WILHELM MATTHIAS OLBERS, "... der es allein schon verdient, dass man seinetwegen eine Reise nach Bremen macht ..." (EBSTEIN 1907a, 106). Für CHLADNIS wissenschaftliche Arbeit am Meteoritenthema war es von großer Bedeutung, mit dem Kometenforscher OLBERS engen Kontakt pflegen zu können. Über Hamburg, Emden, Münster kam der Physiker im Sommer 1817 schließlich in die Rheingegend. Über eine interessante bautechnische Anwendung der Klangfiguren berichtete er in einem Brief aus Koblenz vom 30.1.1818:

Hier in Coblenz hat ein achtungswerther Freund von mir, der Baumeister De Lassaulx, mein Verfahren, die Schwingungen einer Fläche durch aufgestreuten Sand sichtbar darzustellen, welches er vormalis in Marburg gesehen hatte, auf eine sinnreiche Art zu einem technischen Behufe angewendet. Zu einer von ihm kühn angelegten, frei schwebenden, inwendig hohlen steinernen Wendeltreppe mussten die Stufen nebst den Unterlagen von unten auf durchbohrt werden, um die eisernen Klammern durch eingegossenes Blei zu befestigen. Damit der Stein auf der obern Seite, wenn die noch zu durchbohrende Strecke dünn war, nicht splitterte, war es nothwendig, von oben entgegen zu bohren. Um nun den Punkt, wo dieses geschehen sollte, genau zu treffen, streute er etwas Sand auf die obere Fläche, welcher durch sein Auseinanderweichen die Stelle anzeigt, wo entgegen gebohrt werden musste. Anfangs konnten die Arbeiter dieses gar nicht recht begreifen, hernach aber fanden sie es recht gut. Das Auseinanderweichen des Sandes fing schon an, bemerkbar zu werden, wenn die noch zu durchbohrende Strecke dieser ziemlich weichen Sandsteinart etwa 1 1/2 Zoll betrug. (CHLADNI 1818a, 10-11)

JOHANN CLAUDIUS VON LASSAULX (1781-1848) war Neuromaniker und Landbaumeister bei der Regierung in Koblenz. Die zitierte Briefstelle zeigt, wie beruflich weitgefächert das

Bildungsbürgertum war, das sich für CHLADNI Arbeiten interessierte und die Vorträge besuchte.

Von Karlsruhe aus machte der Physiker im Sommer 1818 einen Abstecher nach Paris. Er hatte die Reise bereits Monate vorher geplant, weil er noch weiteres Material für sein großes Meteoritenbuch, das dann 1819 in Wien erschien, sammeln wollte:

Sehr vortheilhaft für diesen Zweck und auch für Einsammlung noch mancher andern wissenschaftlichen Notizen würde es seyn, wenn ich mich auf eine Diligence setzen, und (versteht sich, ohne mein Instrument, nur mit wenig Gepäck) nach Paris auf einige Wochen reisen wollte, um dort die Bibliothek der Akademie der Wissenschaften, welche immer das Neueste von wissenschaftlichen Societätsschriften enthält, recht zu benutzen. (LOEWENFELD 1929a, 139)

Im letzten Jahresquartal 1818 hielt sich CHLADNI in München auf. Er bewunderte die drei neuen wissenschaftlichen Anstalten (Botanischer Garten, Chemisches Laboratorium und Sternwarte), die es bei seinem letzten Besuch in dieser Stadt 1812 noch nicht gab. Ein Ausflug führte ihn nach Benediktbeuern, wo sich seit 1806 das optische Institut des JOSEPH VON UTZSCHNEIDER (1763-1840) befand. Dabei machte CHLADNI auch die persönliche Bekanntschaft mit JOSEPH VON FRAUNHOFER (1787-1826).

Auf einer kleinen Seitenreise nach Benediktbeuern, um das optische Institut zu sehen, war es mir besonders interessant, von der dortigen Bereitungsart des Flintglases, welches viel besser, als das englische ist, einen deutlicern Begriff zu bekommen, und auch bei dem eben so gefälligen und bescheidenen, als verdienstvollen Fraunhofer von der Richtigkeit seiner Beobachtungen über die Streifen im Lichtspectrum der Sonne und anderer erleuchtenden Körper mich durch den Augenschein zu überzeugen. (CHLADNI 1819b, 98-99)

Über FRAUNHOFERS berühmte Entdeckung hatte sich CHLADNI schon früher geäußert. Die festgestellte Koinzidenz der *D*-Linie (von FRAUNHOFER so genannt) im Sonnenspektrum mit der gelben Linie im Flammenspektrum war eine bemerkenswerte Tatsache, bis zur Aufstellung der Spektralanalyse durch KIRCHHOFF und ROBERT BUNSEN (1811-1899) sollten aber noch viele Jahrzehnte vergehen. Es ist nun interessant, welche Folgerungen aus FRAUNHOFERS Entdeckung man damals zu ziehen hoffte. CHLADNI schlug vor, die Lage der Linien in den Spektren der Fixsterne genau zu vermessen,

... so könnte uns dieses in der Folge, wenn man (vielleicht erst nach Jahrhunderten) Veränderungen in den Lichtsystemen beobachten sollte, Aufschlüsse über die qualitative Veränderlichkeit des Lichts mancher Fixsterne verschaffen. Denn es scheinen (nach Her-

schel) abgesehen von den Fixsternen, welche sich periodisch verändern, manch andere Fixsterne an Licht ab- oder zugenommen, manche auch ihre Farbe verändert zu haben. Selbst unsere Sonne mag in den uralten Zeiten, wo tropische Thiere und Pflanzen einheimisch in Gegenden waren, die den Polen näher sind, mehr Licht und Wärme als jetzt gegeben zu haben; die Anwesenheit solcher Ueberreste in diesen Gegenden lässt sich wenigstens nicht füglich anders als so erklären, ohne der Natur Gewalt anzuthun. (CHLADNI 1818a, 2)

Im Juli 1820 war die Neubesetzung der frei gewordenen Stelle des Inspektors am Grünen Gewölbe in Dresden akut. Wie aus einem unveröffentlichten Brief vom 15.7.1820 an den Archäologen CARL AUGUST BÖTTIGER (1760-1835)<sup>15</sup> hervorgeht, interessierte sich CHLADNI für diese Stelle und bewarb sich darum. Ein handschriftlicher Zusatz von anderer Hand auf diesem Brief bestätigte, daß der Oberkammerherr mit der Besetzung durch CHLADNI einverstanden war. Wie schon in Berlin und Jena, scheiterte auch dieser Versuch wahrscheinlich an des Physikers Bedürfnis nach Unabhängigkeit. Offiziell begründete CHLADNI seine Absage mit dem zu geringen Gehalt, das ihm in Dresden angeboten wurde<sup>16</sup>.

Bei einem Aufenthalt CHLADNIS 1820 in der Stadt an der Elbe kam es auch zu einer Begegnung mit CARL MARIA V. WEBER (1786-1826) (WEBER 1912a, 329-330). Der Komponist des "Freischütz" muß ebenfalls an akustischen Fragen interessiert gewesen sein, denn er besaß ein Exemplar von "Die Akustik".

In seinen letzten Lebensjahren hat CHLADNI von Kemberg aus nur noch kurze Reisen innerhalb Deutschlands unternommen. Bei einem Aufenthalt vom März bis Mai 1825 in Berlin kam es zu einer Zusammenarbeit des Akustikers mit dem Architekten CARL THEODOR OTTMER (1800-1843), der die Pläne für den Neubau der Singakademie angefertigt hatte. Über dieses bemerkenswerte Ereignis wird im folgenden Kapitel ausführlich gesprochen.

Auf einer Vortragsreise im Januar/Februar 1826 in Frankfurt/M. führte CHLADNI zusammen mit WILHELM SÖMMERING Untersuchungen zur Stimmgabelschwingung durch, über die bereits im Kap. 5.3 berichtet wurde.

---

<sup>15</sup>aufbewahrt in der Sächsischen Landesbibliothek Dresden

<sup>16</sup>nach einem unveröffentlichten Brief vom 21.8.1820 an C.A. BÖTTIGER aus der Sächsischen Landesbibliothek Dresden

### 7.3 Das Gebäude der Berliner Singakademie und die Akustik geschlossener Räume

Seit der Antike kannte man die akustischen Probleme, die bei einer größeren Zahl von Zuhörern in den Theatern auftraten. Anleitung für deren Lösung waren insbesondere die "Zehn Bücher über Architektur" (*De architectura libri X*), die der Römer VITRUVIUS um 20 v. Chr. verfaßt hat. Das 5. Buch ist öffentlichen Bauten gewidmet (VITRUVIUS 1964a) und beschäftigt sich auch mit der Hörsamkeit eines antiken Theaters. Alle einschlägigen Fragen, wie das Prinzip des Amphitheaters mit gestuften Sitzreihen und die Resonanzräume werden hier erwähnt und wirkten Jahrhunderte nach (s. Kap. 7.4).

Im 17. Jahrhundert wurde das antike Theater zu einem Rängetheater weitergebildet. Theatergebäude mußten nämlich eine wachsende Zahl von Zuschauern fassen, die Raumvolumina durften aus akustischen und optischen Gründen jedoch nur unwesentlich zunehmen. So kam es zu Räumen mit übereinander angeordneten Rängen. Die erste Einrichtung dieser Art war das Teatro di San Cassiano in Venedig, das 1637 eröffnet wurde (LEWCOCK 1980a, 59). Solche Theater hatten eine kurze Nachhallzeit, die reichliche Verwendung von Holz sorgte für die wünschenswerte Absorption tiefer Frequenzen, die Schallwege zum Hörer waren wegen der Kleinheit der Räume noch kurz, und durch die vielen Verzierungen an Decke und Logen wurde für gute Schalldiffusität gesorgt (ULLMANN 1989a, 210). Im Teatro Regio in Turin wurde 1738 unter dem Holzfußboden, auf dem das Orchester sitzt, eine halbzylindrische Resonanzkammer angebracht (LEWCOCK 1980a, 59). Auf diese Weise bekam das kleine Streichorchester mehr Gewicht gegenüber dem großen Chor auf der Bühne.

Am Ende des 18. Jahrhunderts waren es zwei Publikationen, die für die Gestaltung der Zuschauerräume eines Theaters Maßstäbe setzten, "Essai sur l'architecture théâtrale" von PIERRE PATTÉ (Paris 1782) und "A treatise on theatres" von G. SAUNDERS (London 1790). PATTÉ wies in seiner Schrift darauf hin, daß ein elliptischer Theatergrundriß wegen der Brennpunkteigenschaften einer Ellipse akustisch besonders günstig sei. Nach PATTÉ sollen sich die Schallstrahlen, die von der Bühne ausgehen, in erster Linie im Parkett in der Nähe des zweiten Brennpunktes konzentrieren, wobei hier die günstigen Zuhörerplätze sein sollen. Ein Zuschauerraum kann jedoch nicht als ideales Ellipsoid gebaut werden, die Ränge

sorgen für eine Aufteilung der der Bühne gegenüberliegenden Wand, und der Bühnenraum selbst konnte nicht in jedem Fall durch eine ellipsoide Fläche im Hintergrund begrenzt sein. SAUNDERS untersuchte die Form, die es am besten erreichte, jeden Zuhörer in die gleiche Entfernung von der Bühne zu bringen. So kam er zu dem Vorschlag eines Dreiviertelkreises als Grundriß. SAUNDERS lehnte Verzierungen im Zuschauerraum ab. Nach seiner Meinung würde dadurch die ungehinderte Schallausbreitung gestört. Auch hätte die Decke des Raumes keinen Einfluß auf die Schallreflexion.

Nichts kennzeichnet den niedrigen Stand der Theorie der Schallausbreitung in geschlossenen Räumen am Ende des 18. Jahrhunderts besser als die Tatsache, daß CHLADNI diesem Gegenstand in seinem Werk "Die Akustik", das immerhin einen Umfang von 310 Seiten hat, nicht mehr als 7 Seiten widmete (CHLADNI 1802a, 249-256). In seiner Schrift von 1817 (CHLADNI 1817a, 83-84) und im Kompendium von 1827 (CHLADNI 1827b, 64-66), über das im nächsten Kapitel berichtet wird, gab er Ergänzungen zu diesem Thema. In einem Zeitschriftenaufsatz hat CHLADNI kurz vor Lebensende seine Kenntnisse über Raumakustik noch einmal prägnant zusammengefaßt (CHLADNI 1826f).

Man betrachtete das Problem damals vom Standpunkt der geometrischen Raumakustik, die sich auf das Studium des Schallverlaufs beschränkte. Bekannt waren die Werte der Schallgeschwindigkeit in Luft und einigen anderen Medien (s. Kap. 4.5 u. 4.6), man wußte Bescheid über die Abnahme der Schallintensität mit dem Quadrat der Entfernung von der Schallquelle, kannte die Erscheinung der Resonanz und die Tatsache, daß das Ohr pro Sekunde höchstens 9 verschiedene Schalleindrücke unterscheiden kann. Wie im Kap. 5.3 beschrieben, gab es über Schallabsorption und verwandte Fragen große Unklarheiten.

Trotz der geringen Kenntnisse über Raumakustik ist die Feststellung bemerkenswert, daß die Architekten barocker Theater, alter Konzertsäle und Kirchen auch auf Sprachverständlichkeit und Musikwirkung Rücksicht genommen haben. Sicher war es in erster Linie ein Werk des Zufalls, wenn die fertigen Gebäude akustisch positive Eigenschaften hatten. Es gibt jedoch eine Wechselwirkung zwischen Stilform und Hörsamkeit. So sind z.B. romanische und gotische Kirchen auf Grund ihrer langen Nachhallzeit  $T$  mit einem Maximum bei 100 Hz für den gregorianischen Gesang der katholischen Messe bestens geeignet. Der Emporeneinbau und die Verwendung von viel Holz in den Kirchen der Reformationszeit kam der neuen Bedeutung der Predigt im Gottesdienst - und damit der Sprachverständlichkeit - entgegen (MEYER 1980a, 140). Barockkirchen haben eine größere Halligkeit im

mittleren Frequenzbereich. Die zahlreichen Holzeinbauten in den Kirchen dieser Stilepoche (Emporen, Podeste usw.) wirken als Tiefenschlucker. Damit aber werden die akustischen Verhältnisse solcher Gebäude ideal für die Wirkung von Musik polyphonen Charakters (LOTTERMOSE 1952a). Bei der gotischen Thomaskirche in Leipzig führten die vielen Holzeinbauten der Barockzeit, die bei der Restaurierung im 19. Jahrhundert wieder entfernt wurden, zu Nachhallzeiten von 1,7 s bei 500 Hz (KEIBS/KUHL 1959a). Aus alten Stichen der Zeit um 1750 kann man sich jedenfalls ein genaues Bild der Innenausstattung machen und mit den heutigen Hilfsmitteln diesen  $T$ -Wert berechnen. Von  $T = 1,7$  s ist auszugehen, wenn man beurteilen will, daß BACH in der Zeit seines Thomaskantorats gerade für Aufführungen in dieser Kirche komponierte. Der geringe Wert von 1,7 s entspricht mehr der Akustik eines Konzertsaals als der einer Kirche.

Bei den Opernhäusern spielt neben dem Orchesterklang auch die Verständlichkeit des Sängers eine Rolle. Deshalb müssen die Nachhallzeiten der Operntheater geringer sein als die der Konzertsäle.

KARL DITERS VON DITERSDORF (1739-1799) lobte den ovalen Saal im Schloß Johannisberg bei Breslau (heute Wrocław). Er war 13,5 m lang und nicht breiter als 10 m. Wegen dieser Kleinheit der Dimensionen wirkt sich die Schallkonzentration positiv aus. Der reflektierte Schall trifft mit Verzögerungen, die höchstens 15 ms gegenüber dem Direkt-schall betragen, beim Zuhörer ein, und beide Schallanteile verschmelzen im Ohr (MEYER 1980a, 144).

Der 1781 eröffnete Konzertsaal des alten Leipziger Gewandhauses bot bis zu einem Umbau nur 400 Zuhörern Platz. In ihm fanden bis 1884 die berühmten Gewandhauskonzerte statt. Im mittleren Frequenzbereich lag die Nachhallzeit im besetzten Zustand bei 1,2 s. Die Werke zeitgenössischer Komponisten konnten unter solchen Verhältnissen mit einer durchsichtigen Klanggestalt zur Aufführung gebracht werden (MEYER 1980a, 127-128).

Das gilt auch für die Konzertsäle, in denen JOSEPH HAYDN (1737-1806) viele seiner Sinfonien selbst dirigiert hat. In den Sälen der Schlösser von Eisenstadt und Esterháza (Fertőd), die ihren Originalzustand weitgehend bewahrt haben, wurden 1978 Nachhallmessungen durchgeführt und Werte von 1,7 bzw. 1,25 s für den mittleren Frequenzbereich gefunden (MEYER 1978a). Die für Esterháza (d.h. mit  $T = 1,25$  s) geschaffenen Kompositionen HAYDNS zeigen rhythmische Feinstrukturen und Dynamiksprünge, die im Saal des Schlosses Eisenstadt mit  $T = 1,7$  s im Nachhall untergegangen wären.

WOLFGANG AMADEUS MOZART (1756-1791) hat seine heitersten und turbulentesten Opern (z.B. "Die Entführung aus dem Serail" und "Così fan tutte") für die Aufführung im Burgtheater in Wien geschrieben. Bei einer Zuhörerzahl von 1000 lag im mittleren Frequenzbereich die Nachhallzeit bei 1 s. Daß die erwähnten Opern gerade in diesem Theater zur Aufführung kamen, war kein Zufall. Die geringe Nachhallzeit war hier für die akustische Wirkung äußerst günstig (SINGER 1959a).

Bei den alten Barocktheatern kam noch eine andere Tatsache dazu. Für die Deutlichkeit rhythmisch stark gegliederter Motive ist auch das Intensitätsverhältnis zwischen Direktschall und Nachhall von Bedeutung, das für die einzelnen Platzgruppen eines Konzertsaals oder Theaters recht unterschiedlich ist. In den Barocktheatern (z.B. im Markgräflichen Opernhaus Bayreuth) war nun im allgemeinen der Orchestergraben nur wenig tiefer als der Zuschauerraum. So kam beim Zuhörer ein starker Direktschall an, und der Klang war durchsichtig.

Bei der Problematik war es naheliegend, daß es in erster Linie Architekten waren, die sich um 1800 mit solchen Fragen beschäftigten. Die Physiker hielten sich damals noch im Hintergrund. Bei der Darstellung des Raumakustik-Kapitels in "Die Akustik" berief sich CHLADNI in erster Linie auf JOHANN GOTTLIEB RHODE (1762-1827), der in verschiedenen Orten als Lehrer tätig war und sich in Riga als Dramaturg versucht hat. In seiner Schrift "Theorie der Verbreitung des Schalles für Baukünstler", die 1800 in Berlin erschien, ging RHODE von der grundsätzlichen Erfüllbarkeit der Forderung nach einer guten Theaterakustik aus. "Der Architect hält sich bloss an jene Gesetze der Verbreitung [des Schalles, D.U.], und vermag bei einer richtigen Anwendung derselben auf den Zweck seines Gebäudes, auch die schwierigste Aufgabe aufzulösen" (RHODE 1800a, 6). Da aber der Architekt bei Anwendung der Schallgesetze oft - wie die Erfahrung lehrte - keinen Erfolg hatte, muß die Anwendung fehlerhaft gewesen sein. RHODE ging bei seiner Untersuchung von dem Gesetz der geradlinigen Schallausbreitung und dem Reflexionsgesetz aus. Er kannte die Abnahme der Schallintensität mit dem Quadrat der Entfernung von der Schallquelle, das Echoggesetz, und er wußte von der Wirkung der Sprach- und Kommunikationsrohre. Unter künstlicher Verbreitung des Schalles verstand RHODE alle Hilfsmittel, die durch Reflexion (er sprach von "Brechung") und Verstärkung bewirken, daß Schall dort noch hörbar und verständlich ist, wo er nach seiner natürlichen Verbreitung nicht mehr hörbar oder verständlich wäre. Für die Theaterinnenräume verlangte RHODE glatte Seitenwände: "Jede starke Hervor-

springung hemmt das Wegbrechen der Schallstrahlen von der Bühne, und wenn sie auch nicht im Stande ist Wiederhall hervorzubringen, so steht sie doch der freien Verbreitung im Wege; eben so verschluckt jede Vertiefung die Strahlen welche hineinfallen, ohne sie weiter zu brechen" (RHODE 1800a, 64-65). Die Rolle der Holzverkleidungen war RHODE nicht klar. Überhaupt sind alle Fragen der Schallabsorption damals noch ungenügend erforscht gewesen. "Die Bretter können nicht mehr wirken als jede glatte Kalkwand, nehmlich den Schall fortbrechen, und wenn sie mehr thun, wenn sie selbst in Schwingung gerathen und - gleich einem Resonanzboden mittönen, schaden sie ... offenbar der Deutlichkeit" (RHODE 1800a, 61-62).

Hier konnte noch keine Rede sein von der Rolle einer Holzverkleidung als Tiefenschlucker, der die Deutlichkeit wesentlich erhöht.

Als günstigen Theatergrundriß empfahl RHODE das Theater mit parallelen Seitenwänden, wobei der Zuschauerraum auf der Schmalseite kreisförmig geschlossen ist und aufsteigende Sitzreihen hat (HARTMANN 1990a).

Das Buch von RHODE war keine Einzelercheinung. Um die Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert gab es eine Fülle von Publikationen, die sich vor allem mit akustisch günstigen Grundrißlösungen für die Zuschauerräume von Opern- und Schauspielhäusern beschäftigten (ULLMANN 1989a). Hervorgehoben werden soll hier ein Büchlein von CARL FERDINAND LANGHANS (1782-1869), dem Sohn des Erbauers des Brandenburger Tores in Berlin. Der Architekt führte auch 1843/44 den Umbau des Königlichen Opernhauses (Staatsoper Unter den Linden) in Berlin durch. LANGHANS erkannte deutlich die Bedeutung des Nachhalls für die Darbietung von Sprache und Musik:

Ein nach und nach langsam verlöschender Nachhall in kleinen und grossen Gebäuden ist angenehm und nothwendig, um uns den Zauber der Musik und der Töne geniessen zu lassen. Ohne diesen wird das Vergnügen davon um Vieles verringert. Wir dürfen also einen solchen Nachhall nicht muthwillig unterdrücken. Wir müssen ihn im Gegentheil ganz seiner Natur nach zu erhalten suchen, und wenn es möglich ist, bewirken. (LANGHANS 1810a, 39)

Schon CHLADNI schrieb acht Jahre früher über die Bedeutung des Nachhalls: "Hingegen scheint einiger Nachhall für die Wirkung der Musik mehr vortheilhaft, als schädlich zu seyn, vorausgesetzt, daß er nicht so stark, und nicht so anhaltend ist, daß die Töne dadurch unrein oder undeutlich werden" (CHLADNI 1802a, 252).

CHLADNI und LANGHANS kannten sich persönlich (CHLADNI 1802a, 256), und es ist



ZELTER widmete sich der Bachpflege. Unter seiner Leitung hatte der Chor 1825 fast 250 Mitglieder. Die alten Proben- und Aufführungsräume im Saal der Akademie der Künste (Unter den Linden) erwiesen sich als zu klein. Der Ruf nach einem eigenen Gebäude wurde immer lauter (SCHÜNEMANN 1941a).

1812 legte KARL FRIEDRICH SCHENKEL (1781-1841) Pläne für ein solches Gebäude vor. Sie sind erhalten (RAVE 1941a, 145-152) und zeigen einen langen Saal mit einem kassettierten Tonnengewölbe. Aus finanziellen Gründen unterblieb die Ausführung. Das Gewölbe wäre, so darf man vermuten, für die Hörsamkeit nicht günstig gewesen.

1822 kam CARL THEODOR OTTMER (1800-1843) aus Braunschweig zur Weiterbildung an die Berliner Bauakademie (THEOBALD 1976a). Bereits ein Jahr später wurde dem jungen Architekten der Neubau eines Theaters in der Berliner Königsstadt übertragen, das 1824 eingeweiht wurde<sup>17</sup>. Bei der Planung des Zuschauerraumes zeigte es sich, daß OTTMER großes Interesse an guten akustischen Verhältnissen bekundete. Sechs Jahre später hat er in einer Schrift seine Absichten ausführlich begründet. Er betonte auch, daß sein Entwurf CHLADNI Ansichten über gute Hörsamkeit entsprechen würde (OTTMER 1830a, 14).

1824 legte OTTMER Pläne für den Neubau der Singakademie vor, und am 27. März 1825 wurde beschlossen, ihn mit der Bauausführung zu beauftragen (ULLMANN, 1990a). Der Bau liegt Am Festungsgraben 2, Berlin-Mitte, und ist ein langgestrecktes, klassizistisches Gebäude. Im Erdgeschoß enthielt er das Vestibül und die Wohnung des Direktors der Singakademie, während der 1. Stock im wesentlichen durch den großen Konzertsaal ausgefüllt war, er konnte fast 1200 Zuhörer fassen (Abb.7.3.1 und 7.3.2).

Als OTTMER mit dem Bau betraut wurde, war CHLADNI gerade in Berlin und gab zwei Vorlesungsreihen über Akustik und Meteorite. Noch vor der Grundsteinlegung am 30. Juni 1825 zeigt OTTMER dem Akustiker die Pläne, der sich daraufhin positiv zu der zu erwartenden Hörsamkeit äußerte. Der Konzertsaal zählte zu dem von CHLADNI grundsätzlich positiv bewerteten Typus der langgestreckten, im Grundriß rechteckigen Räume. Am 2. Januar 1827 fand in dem fast vollendeten Gebäude ein Probekonzert statt. Zufällig war CHLADNI wieder in Berlin. Er wollte von dort aus nach Breslau reisen, wo er dann am 3. April 1827 gestorben ist (s. Kap. 7.4). Am 8. Januar 1827 schrieb der Physiker für die Allgemeine musikalische Zeitung (Leipzig) über dieses Konzert einen ausführlichen Bericht:

---

<sup>17</sup> es stand bis 1932 am Berliner Alexanderplatz, diente jedoch nur bis 1851 als Theater

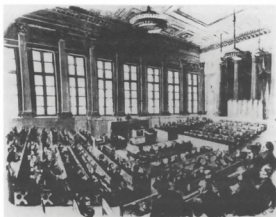


Abb. 7.3.1. Der Konzertsaal der Berliner Singakademie während der Nationalversammlung 1848 (SCHÖNEMANN 1941a)

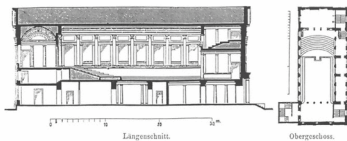


Abb. 7.3.2. Längsschnitt und Grundriß der Singakademie nach dem Umbau 1865 (Architekten-Verein zu Berlin 1877a, 340-341)

Unter die günstigen Ereignisse auf meiner jetzigen Reise über Berlin nach Breslau glaube ich auch das rechnen zu müssen, dass ich just zu rechter Zeit hieher gekommen bin, um die erste Wirkung des Gesanges in dem neubauten Saale der Berliner Sing-Akademie zu hören. Der Erbauer ist der Hofbaumeister Otmar, ein noch junger, sehr talentvoller Mann, der schon durch mehre Baue, unter andern auch den des hiesigen Königsstädter Theaters, sich Ehre erworben hat. Bey meiner vorigen Anwesenheit in Berlin im Anfange des Sommers 1825 hatte er das Zutrauen zu mir, den Plan mir zu zeigen, um zu hören, ob ich etwa in akustischer Hinsicht etwas zu bemerken hätte. Ich fand aber nicht das mindeste dagegen einzuwenden, und erwartete vielmehr die beste Wirkung. Diese Erwartung ist auch vollkommen erfüllt worden, als am 2. Januar die jetzt über 300 Mitglieder starke Sing-Akademie sich zum erstenmale in diesem Saale versammelte und das 16stimmige Kyrie und Gloria von Fasch ausführte, welche Wahl wohl auch die schicklichste war, theils wegen der Vollstimmigkeit und Gediegenheit der Composition, theils auch, um dem Stifter der Anstalt die gebührende Ehre zu bezeigen. Da der Saal und das Gebäude noch nicht ganz vollendet ist, manches auch noch nicht ganz ausgetrocknet war, und die Luft noch überall durchzog, so war es nicht sowohl als eine förmliche Einweihung, sondern vielmehr als die erste Probe anzusehen. Die Wirkung des Gesanges war so vortrefflich, als man sie nur wünschen oder erwarten konnte. Es mochte eines oder mehre Chöre auf das Orchester, oder weiter nach vorn, oder in die Seitenlogen, oder auf die Tribüne über dem Eingange des Saales, oder auch in den kleinern Saal, welcher mittelst einer weiten Oeffnung mit dem grössern verbunden werden kann, gestellt werden; man mochte auch als Zuhörer sich befinden, an welcher Stelle des Saales oder der Tribünen man wollte, so war die Wirkung unter allen Umständen gut, präcis, deutlich und hinreichend stark, ohne die mindeste Spur von einem der Deutlichkeit schadenden Nachhall oder Echo. Alle die Anwesenden, mit denen ich darüber gesprochen habe, waren über die vortreffliche Wirkung einverstanden; indessen, da wohl selten etwas Gutes ohne Widerspruch oder Tadel bleibt, so ist schon vermuthet worden, dass es auch an nachtheiligen und vielleicht schiefen Urtheilen nicht fehlen werde, welche aber wohl auf dem Wege der Theorie oder auf dem Wege der Erfahrung schwer würden zu beweisen seyn. Auch auf die Augen that der Saal, welcher ein längliches Viereck ist, durch seine einfache Einrichtung und geschmackvolle nicht überladene Verzierung eine angenehme und freundliche Wirkung; wie denn auch die übrige Einrichtung des Gebäudes mir sehr bequem und zweckmässig zu seyn scheint. (CHLADNI 1827c, 44-45)

Der Saal fand schnell das Lob der Berliner Musikfreunde. Auch ZELTER war mit der Hörsamkeit zufrieden und theilte das GOETHE in Weimar mit. Ein besonderer Höhepunkt war

deskirchen in Eisenach zur Abfassung eines Regulativs für den evangelischen Kirchenbau, das aus 16 Punkten besteht und im wesentlichen auf die Architekten FRIEDRICH AUGUST STÜLER (1800-1865), CHRISTIAN VON LEINS (1814-1892) und CONRAD WILHELM HASE (1818-1902) zurückging, es wurde für den Kirchenbau in der Epoche des Historismus von größter Wichtigkeit (s. z.B. MAI 1976a, 197-199). Als architektonische Grundformen wurden darin das längliche Viereck (bei dem auch ein Querschiff vorhanden sein kann) und der Zentralbau (in Form des Achtecks) empfohlen. Im Altarraum steht der Altar, die Kanzel soll an einem Pfeiler des Chorbogens angebracht sein. Es ist kultur- und wissenschaftshistorisch von großer Bedeutung, daß neben theologischen Gründen für das Regulativ auch akustische angegeben werden. So wird die Forderung, daß die Länge des Schiffs die Breite nicht wesentlich überschreiten darf, mit dem Bedürfnis nach guter Hörsamkeit begründet. Der im Grundriß achteckige Bau wird gegenüber einem kreisförmigen bevorzugt, weil man bei letzterem unangenehme Schallkonzentrationen befürchten mußte. Man wußte auch, daß die Verwendung von Holz im Innenraum günstig für die Hörsamkeit ist und empfahl die Verwendung dieses Materials. Das Eisenacher Regulativ hat nicht nur theologische und architekturhistorische Bedeutung, es ist auch ein Zeugnis dafür, daß viele Kirchenarchitekten des 19. Jahrhunderts sich um die Lösung akustischer Probleme bemüht haben.

WILHELM WEBER gab 1825 gemeinsam mit seinem Bruder, dem Physiologen ERNST HEINRICH WEBER, ein Buch heraus, in dem er mittels der Gesetzmäßigkeiten der Wellenlehre akustische und optische Phänomene beschrieb. Darin finden sich die für die Akustik von Kirchen und damit für alle geschlossenen Räume wichtigen Sätze:

Mit Luft erfüllte grosse Räume müssen ... noch so lange zu resoniren fortfahren, bis die Schallwellen ihren Lauf so weit fortgesetzt haben, dass die Durchkreuzungen an den bestimmten Stellen aufhören. Das Nachhallen in Kirchen ist daher nicht etwa eine besondere Wirkung der Gestalt der Kirche, die von der Gestalt des Gewölbes, oder von anderen besonderen Einrichtungen abhängt, sondern eine nothwendige Wirkung der Grösse des Raumes, der grossen Höhe, Breite und Länge, die noch von der Eigenschaft des Fussbodens, der Decke und der Wände, den Schall sehr vollkommen zurückzuwerfen, unterstützt wird. (WEBER/WEBER 1825a, 543)

Erst dreißig Jahre später beschäftigte sich wieder ein Physiker, der Amerikaner JOSEPH HENRY (1797-1878), mit Fragen der Raumakustik und gab dieser Wissenschaft neue Impulse. Als 1854 der Plan für den Bau eines Hörsaals der Smithsonian Institution in Washing-

ton, deren Sekretär HENRY war, entstand, wurde der Physiker beauftragt, mit dem Architekten zusammenzuarbeiten, damit für die Hörsamkeit (und für die Sichtverhältnisse) günstige Bedingungen geschaffen würden. Die Errichtung dieses Hörsaals ist darüber hinaus ein weiteres frühes Beispiel für die Zusammenarbeit von Architekt und Akustiker, wie sie dann im 20. Jahrhundert fast zur Selbstverständlichkeit wurde (SHANKLAND 1977a).

HENRY begann mit Versuchen auf dem Rasen vor der Westwand des alten Gebäudes der Smithsonian Institution (HENRY 1857a). Durch Händeklatschen und Beobachtung des reflektierten Schalles bestimmte er die kritische Entfernung von der Wand, bei der der Nachhall in ein deutlich wahrnehmbares Echo überging. Dafür erhielt der Physiker die Strecke von 30 Fuß (=9,14 m) und nannte sie "limit of perceptibility". Ist die Zeitdifferenz zwischen direktem und reflektiertem Schall größer als es diesem "limit" entspricht, so ist ein Echo wahrnehmbar, das für einen Hörsaal unbedingt vermieden werden muß. Die oben angeführte kritische Wegstrecke war schon CHLADNI bekannt, seine angegebenen 17m kommen der heute üblichen Größenordnung jedoch näher (CHLADNI 1802a, 242).

HENRY maß eine Abhängigkeit der Nachhalldauer eines geschlossenen Raumes von dessen Volumen und von den Schallabsorptionsverhältnissen der Begrenzungsflächen. Er stellte weiter eine Abhängigkeit dieser Zeitspanne von der Schallintensität und der Lokalisierung reflektierender Flächen im Raum fest (HENRY 1857a, 127). Dabei würde die Nachhalldauer um so länger sein, je größer die ursprüngliche Lautstärke des Schalles war.

Um den Einfluß der Wandabsorption auf die Nachhallzeit festzustellen, experimentierte HENRY mit Stimmgabeln, die er auf verschiedene Materialien stellte, um die Resonanzdauer zu messen. Seine Stimmgabel tonte in Luft (ohne Resonanzboden) 252 s lang. Stellte er diese Gabel auf eine dünne Platte aus Kiefernholz, die lediglich am Rand befestigt war, so schwang sie nur etwa 10 s lang, jedoch wurde eine Schallverstärkung beobachtet. Diese kurze Schwingungsdauer erklärte HENRY mit dem Hinweis, daß beim Aufsetzen einer schwingenden Stimmgabel auch die gesamte Holzplatte zu Schwingungen angeregt wird, was auf Kosten der Schwingungsenergie der Gabel gehen muß. Die Schallverstärkung rührt - so der amerikanische Physiker - daher, daß nun die gesamte Platte Schall abstrahlt. Wurde die Holztafel fest mit Mauerwerk verbunden, so war die Schallverstärkung nach Aufsetzen der Stimmgabel wesentlich geringer, dafür tonte die Gabel auch bedeutend länger. Die Abklingzeit wurde von HENRY übrigens durch Annäherung eines auf die Stimmgabel abgestimmten Hohlraumresonators an die Gabelzinken bestimmt. Es ist dies ein ganz früher Beleg für die

Anwendung von Resonatoren als Meßinstrumente außerhalb der durch HELMHOLTZ selbst durchgeführten Experimente in anderen Gebieten der Akustik (vgl. Kap. 8.5). HENRYs Arbeit wurde die erste systematische - wenn auch nur qualitative - Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Nachhallzeit und Wandabsorption.

Vom oben angeführten Zitat der Gebrüder WEBER führte der Weg direkt zu den Untersuchungen von WALLACE CLEMENT SABINE (1868-1919) und zur empirisch 1900 gefundenen Nachhallformel

$$T = 0,171 V/a , \quad (7.3.1)$$

der ersten quantitativen Beziehung, mit der man aus dem gegebenen Volumen  $V$  eines Raumes und den Schallabsorptionseigenschaften der Raumbegrenzungen  $a$  ( $a$  heißt heute äquivalente Schallabsorptionsfläche) die Nachhallzeit  $T$  berechnen kann, wobei der Faktor später mit 0,163 angegeben wurde (SABINE 1900a). SABINE definierte die Nachhallzeit als die Zeitspanne, innerhalb der die Schallenergie vom  $10^6$ -fachen des Schwellenwertes zur Hörschwelle selbst absinkt.

Eine exakte wellentheoretische Darstellung der Formel (7.3.1) gelang erst KURT SCHUSTER (1903-1995) und ERICH WAETZMANN (1882-1938) im Jahre 1929 (SCHUSTER/WAETZMANN 1929a). Gleichzeitig zeigten sie, wie auch einige Monate später CARL F. EYRING (1889-1951), auf welche Weise (7.3.1) für höhere mittlere Schallabsorptionsgrade abgeändert werden muß (EYRING 1929/30a).

#### 7.4 Letzte Schriften und Tod

In den letzten Lebensjahren erschienen noch einmal zahlreiche Publikationen von CHLADNI. Über akustische Themen waren es 25 Aufsätze und eine Monographie, die ab Jahresbeginn 1826 veröffentlicht wurden. Die Thematik kreist um die Akustik alter und neuer Musikinstrumente, um die menschliche Stimme, die Akustik geschlossener Räume, um die bereits erwähnte Wirkung einer Stimmgabel (vgl. Kap. 7.2) und um musiktheoretische Fragen. Es erschienen auch Rezensionen und wertvolle autobiographische Berichte (CHLADNI 1826b und 1827a). CHLADNI entwickelte eine ähnlich hohe literarische Produktivität auch für das Meteoritenthema, wenn auch hier für den gleichen Zeitraum die Zahl der Veröffentlichungen geringer war.

CHARLES CAGNIARD DE LA TOUR hatte 1819 seine von ihm erfundene Lochsirene der Öffentlichkeit bekanntgegeben (vgl. Kap. 5.3). Sie entwickelte sich im 19. Jahrhundert zu einem wichtigen Schallgenerator, der bei SAVART, SEEBECK, DOVE und HELMHOLTZ für die Durchführung akustischer Experimente von enormer Wichtigkeit war. Alle im Laufe der Zeit gebauten Abarten der 1819 erfundenen Sirene funktionierten nach dem gleichen Prinzip: Es wird eine schnelle Folge von Schallimpulsen erzeugt, die für den Beobachter die Empfindung eines kontinuierlich ausgestrahlten Schalles hervorrufen. Die Tonhöhe ist durch die Pulsfrequenz bestimmt. Bisher kannte man Schallquellen als schwingende Festkörper (Platten, Stäbe, Saiten) oder schwingende Luftsäulen (Pfeifen usw.). Diese Erfahrung verband Schallwellen mit sinusförmigen Bewegungen. Die Sirene brachte nun eine neue Betrachtungsweise in die Akustik, und tatsächlich ergaben schließlich Experimente mit der Sirene den Anlaß zu einer Diskussion über die Natur des Tones und die Definition der Klangfarbe (vgl. Kap. 8.2). Die Entwicklung hat CHLADNI in einem Artikel aus dem Jahre 1826 vorausgesehen. Im Zusammenhang mit der Tonerzeugung bei der Sirene schrieb er dort: "Hier zeigt sich also ein Tönen ohne einen klingenden Körper, bloss durch unmittelbar der umher befindlichen Luft mitgetheilten Stöße. Diese Vorrichtung könnte wohl zu noch mehreren Untersuchungen führen" (CHLADNI 1826g, 456-457).

Auch Hiebtöne und der Schall einer Flinten- oder Kanonenkugel werden erwähnt, ohne freilich hierfür eine Erklärung geben zu können. Aber als Fazit stehen schon bei

bis sich die dem stationären Zustand entsprechende Resonanzschwingung aufgeschaukelt hat. Ist der Schallimpuls beendet, so gibt der Resonator den anfangs aufgenommenen Energiebetrag wieder ab, er klingt nach. Schallgefäße sind also in Wirklichkeit Schallschlucker und wirken nachhallverlängernd, ein Effekt, der bei den Freilufttheatern mit ihrer extrem kurzen Nachhallzeit erwünscht war (CREMER 1976a, 179).

CHLADNI erwähnte in seinem Aufsatz von 1827 ein weiteres Mittel der Schallverstärkung bei den Griechen und Römern. Sie trugen bei den Tragödien- und Komödienaufführungen Gesichtsmasken, die mit sprachrohrartigen Mündungen versehen waren. Auch hier ist der Physiker bezüglich der Wirkung skeptisch:

Die Wirkung solcher Masken kann nun nach unsern Begriffen auch nicht anders, als sehr schlecht gewesen seyn, weil die Stimme ungefähr so geklungen haben muss, als ob man durch ein Sprachrohr redete, und weil die Verstärkung sehr ungleich gewesen seyn muss, nachdem der Schauspieler das Gesicht mehr nach der einen, oder nach der andern Seite wendete. (CHLADNI 1827d, 127)

Der Skepsis gegenüber den Methoden der Schallverstärkung in der Antike (so, wie er es verstand), setzte CHLADNI am Schluß seines Aufsatzes die raumakustischen Grundsätze entgegen, wie sie bereits im Kap. 7.3 erwähnt wurden.

1826 begann CHLADNI die Arbeit an einem Akustik-Kompendium, das nach seinem Tod 1827 unter dem Titel "Kurze Uebersicht der Schall- und Klanglehre, nebst einem Anhang, die Entwicklung und Anordnung der Tonverhältnisse betreffend" im Verlag B. SCHOTT's Söhne in Mainz erschien. Die letzten Korrekturabzüge erreichten den Verfasser noch in Breslau wenige Tage vor seinem Tod (CHLADNI 1827a, 308). Das Buch nimmt Bezug auf alle seine früheren Bücher akustischen Inhalts und bringt eine reiche Sammlung von Literaturhinweisen sowie eine Besprechung akustischer Arbeiten aller Forscher, die nach 1802 an diesen Problemen gearbeitet haben. WILHELM WEBER schrieb 1828 in einer Rezension zu diesem Kompendium:

Eine solche Uebersicht ist gerade jetzt für Viele, die in der Akustik mit der Zeit fortschreiten wollen, ein grosses Bedürfniss, weil sich, seitdem Chladni durch seine Akustik den Eifer für dieses Fach unter den Physikern und Musikfreunden aufgeregt hat, Mehrere nicht ohne Glück mit der Erweiterung einzelner Theile derselben beschäftigt haben ... (WEBER 1892b, 198)

In der dann folgenden Aufzählung von Forschern wird FÉLIX SAVART besonders hervor-



gehoben, dessen Ergebnisse zum Teil den Widerspruch CHLADNIS hervorgerufen hatten (s. auch Kap. 8.1). Es waren SAVARTS Arbeiten und auch die Resultate der Gebrüder WEBER, die den Autor bewogen, das Phänomen Resonanz etwas genauer zu beschreiben. Obwohl die Erscheinung seit dem Altertum bekannt war, fehlte es bisher an systematischen Untersuchungen. In CHLADNIS Monographie "Die Akustik" wurde Resonanz noch unter dem Oberbegriff "Mitklingen" abgehandelt (CHLADNI 1802a, §228). Jetzt konnte er sich auf die ausführliche Darstellung dieser Fragen in ERNST HEINRICH und WILHELM WEBERS "Wellenlehre" von 1825 beziehen (WEBER/WEBER 1825a). Die Gebrüder WEBER unterschieden noch zwei Arten von Resonanz:

- ... die erste Art bewirkt nur eine vollkommene Mittheilung der Schwingungen von einem tönenden Körper an ein Medium von einem verschiedenen Kohäsionszustande und von einer verschiedenen Dichtigkeit. Die zweite Art der Resonanz verstärkt den Ton über den Grad der Stärke hinaus, den er in einem unbegrenzten Medio bei der vollkommensten Mittheilung haben könnte. (WEBER/WEBER 1825a, 396-397)

Ein Unterschied zwischen Mitschwingen und Resonanz wurde noch nicht gemacht. Noch in Bd. 2 ("Akustik") des WINKELMANNschen "Handbuch der Physik" aus dem Jahre 1909 wird das Mitschwingen als Resonanz bezeichnet; der heute als Resonanz bezeichnete Fall heißt dort "maximale Resonanz" (AUERBACH 1909a, 124).

Daß der Unterschied zwischen Mitschwingen und Resonanz noch nicht gemacht wurde, ist bei der Lektüre des CHLADNISchen Buches immer zu beachten. Auch aus verschiedenen Versuchsbeschreibungen wird das deutlich. Wird eine Stimmgabel an das Ende einer offenen Röhre gehalten, so wird die Luft in derselben zum Mitschwingen angeregt, dazu "... ist es nicht nothwendig, dass die darin enthaltene Luft genau denselben Ton gebe, sondern die Verstärkung erfolgt auch, wiewohl in minderem Grade, wenn der Ton nicht gar zu sehr verschieden ist ... ." (CHLADNI 1827b, 53).

Schon die Gebrüder WEBER haben auf einen wichtigen Unterschied zwischen Körpern mit freien Schwingungen (die sie "forttönende" Körper nennen) und Resonanzschwingungen hingewiesen:

- ... dass die Wellen forttönender Körper eine Breite haben müssen, die ein aliquoter Theil des Weges ist, den die Welle von einer zurückwerfenden Grenze des Körpers zur anderen zu durchlaufen hat. Dieses ist bei den Körpern, die zur Resonanz fähig sein sollen, nicht nöthig. (WEBER/WEBER 1825a, 401)

Es müssen sich in den Resonatoren ja nicht unbedingt stehende Wellen bilden. In vielen Fällen haben sie geometrische Abmessungen, die die Bildung stehender Wellen mit niedriger Frequenz gar nicht gestatten, wobei es natürlich auch Musikinstrumente gibt, deren Resonatoren stehende Wellen zeigen, z.B. Labial- und Zungenpfeifen. CHLADNI drückte diese Tatsache so aus:

Zum Selbsttönen eines Körpers ist erforderlich, dass die Breite der durch Stöße erregten Wellen ein aliquoter Theil des Körpers sey, so dass eine und dieselbe Welle bei dem wiederholten Hin- und Herlaufen nach gleichen Zeiten in dieselben Punkte ihrer schon vorher durchlaufenen Bahn zurückkehrt; bei resonirenden Körpern ist aber dieses nicht nothwendig ... (CHLADNI 1827b, 15-16)

CHLADNI legte deshalb besonderen Wert auf die Unterscheidung von Klangfiguren und Resonanzfiguren und konnte manche seiner wissenschaftlichen Differenzen mit SAVART auf den bei diesem nicht mit der nötigen Konsequenz durchgeführten Unterschied zurückführen (CHLADNI 1827b, 56-57; vgl. auch Kap. 8.1).

Im Kap. 7.3 wurde schon berichtet, daß sich CHLADNI Anfang des Jahres 1827 in Berlin aufhielt. Von dort führte ihn sein Weg nach Breslau, wo er Vorlesungen hielt. Seinen weiteren Reiseplan erläuterte er in einem Brief an den Komponisten und Herausgeber der Zeitschrift "Caecilia" JACOB GOTTFRIED WEBER (1779-1839): "Bis zum 14. April bleibe ich noch hier; hernach gehe ich nach Frankfurt an der Oder, wo ich, wenn Vorlesungen zu Stande kommen, einige Wochen zu bleiben und sodann über Berlin wieder zurückzureisen gedenke" (CHLADNI 1827a, 307).

Es sollte jedoch ganz anders kommen. Über CHLADNIS letzte Stunden sind wir nur unterrichtet, weil er sich unmittelbar vor seinem Tod am 3.4.1827 im Hause des Mineralogen und Naturphilosophen HENRIK STEFFENS (1773-1845) in Breslau aufhielt und dieser in seinen Erinnerungen darüber berichtet hat:

Eines Abends, zur gewöhnlichen Theestunde, traf er mit mehreren Freunden bei mir zusammen; das Gespräch war lebhaft und die Unterhaltung zog meine Gäste so an, daß sie sich erst gewöhnlich spät trennten. ... Der Musikdirektor Mosewius, mein Freund, begleitete ihn nach seiner Wohnung, die nicht sehr weit von uns entfernt war ... Den andern Morgen um 6 Uhr ward ich durch einen Boten geweckt. Die Wirthin hatte, wie gewöhnlich, das Frühstück herauf getragen, und fand Chladni vom Schläge getroffen in einer Ecke auf dem Fenstertritt hingestreckt. Ich eilte nach seiner Wohnung und sah ihn eben so. Es war klar, daß der Schlagfluß ihn schon am späten Abend, kurz nachdem er die Gesellschaft verlassen.

getroffen hatte. (STEFFENS 1844a, 295-297)

Auf dem Elisabethkirchhof der Breslauer Nikolaivorstadt fand CHLADNI am 7.4.1827 seine letzte Ruhestätte.

Bereits 1825 hatte der Physiker sein Testament gemacht. Universalerbe war sein Hauswirt in Kemberg. Die wertvolle Meteoritensammlung, die bis zu seinem Tod auf 41 Stück angewachsen war, erhielt das Mineralien-Kabinett der Berliner Humboldt-Universität. Sie befindet sich heute im dortigen Museum für Naturkunde (HOPPE 1987a).

## 8. Auswirkungen auf die Akustik bis zum Auftreten von HELMHOLTZ

### 8.1 Die Arbeiten SAVARTS

Ab 1819 erschienen in Frankreich in schneller Folge akustische Arbeiten eines Mannes, der in vielen Zügen sowohl mit CHILADNI als auch mit HELMHOLTZ verglichen werden kann. FÉLIX SAVART wurde 1791 in Mézières als Sohn eines Ingenieurs geboren, der an der Militärschule in Metz beschäftigt war. Nach dem Medizinstudium in Metz und Straßburg, das er mit einer Dissertation 1816 beschloß, war er ab 1817 als Arzt in Metz tätig. 1819 ging er nach Paris, und hier wurde wegen seiner akustischen Arbeiten, über die gleich berichtet werden soll, BIOT auf ihn aufmerksam. Der Name des BIOT-SAVARTSchen Gesetzes (1820) erinnert noch heute an die Zusammenarbeit der beiden Persönlichkeiten. BIOT war derjenige, der die Begabung des jungen SAVART erkannte und ihn immer wieder ermunterte, seine physikalischen Studien fortzuführen.

Von 1820 bis 1827 lehrte SAVART an einer privaten Pariser Lehranstalt, 1827 wurde er Mitglied der Académie des Sciences. Etwa zur gleichen Zeit finden wir ihn als Professor für Experimentalphysik am Collège de France, in einer Stelle, die er bis zu seinem frühen Tod 1841 in Paris innehatte (MCKUSICK/WISKIND 1959a; DOSTROVSKY 1975b).

Von SAVART fehlt bis heute eine wissenschaftliche Biographie, die das Wirken dieses bedeutenden französischen Experimentalphysikers ausführlich beschreibt. Deshalb soll den Arbeiten SAVARTS für die Akustik hier ein besonderer Abschnitt gewidmet sein.

Etwa ab 1817, also neben seiner Tätigkeit als Arzt in Metz, begann SAVART mit den Untersuchungen an der Violine. Er baute eine trapezförmige Geige mit rechteckigen Schalllöchern anstelle der üblichen  $f$ -Löcher. Sicher hatte SAVART die handwerkliche Begabung seines Vaters geerbt, der auch physikalische Präzisionsinstrumente baute. Seine Resultate veröffentlichte er in einem Buch "Mémoire sur la construction des instruments à cordes et à archet", das 1819 in Paris im Verlag H. ASSELIN erschien (SAVART 1819a) und dem im selben Jahr ein Bericht zum gleichen Thema in der Zeitschrift "Annales de chimie et de physique" folgte (SAVART 1819b). Ausgehend von Experimenten mit Schwingungen von isolierten Holzplatten, die über einen Steg im Zentrum der Platte angeregt wurden, benutzte er die Methode der CHILADNischen Klangfiguren zum Studium der Knotenlinien. Zu der

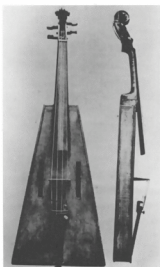


Abb. 8.1.1. SAVARTS Trapezgeige  
(HUTCHINS 1983a, 1424)

eigenartigen Trapezform der Violine kam der Forscher über den Gedanken, daß Symmetrie und Regelmäßigkeit die besten Voraussetzungen für einen guten Ton sein sollten. SAVART ließ seine Geige durch Mitglieder der Académie des Sciences und der Académie des Beaux-Arts prüfen. Von der musikalischen Seite gehörte u.a. der Komponist LUIGI CHERUBINI (1760-1842), der ab 1788 ständig in Paris lebte, der Kommission an. Das Urteil fiel ausgesprochen günstig aus, wenn auch der Ton etwas gedämpft erschien. Trotzdem hat sich das Instrument nicht durchsetzen können.

In seinen Vorlesungen am Collège de France im Jahre 1838/39 äußerte sich SAVART noch einmal zu seinen Arbeiten mit der Geige (SAVART 1975a, SAVART 1976a). Daraus ist erkennbar, daß der Franzose der erste Wissenschaftler war, der mit der Violine experimentierte (HUTCHINS 1983a). SAVART hatte für seine Untersuchungen die Unterstützung des Geigenbauers JEAN BAPTISTE VUILLAUME (1798-1875), der ihm Gelegenheit bot, Decken und Böden von Instrumenten von ANTONIO STRADIVARI (1644?-1737) und GIUSEPPE GUARNERI (1698-1744) zu untersuchen. Viele Instrumente aus der Zeit vor 1800 wurden nämlich

von den Geigenbauern auseinandergenommen und verändert, um ihren Klang dem musikalischen Geschmack der Zeit anzupassen - so stieg z.B. der Kammerton von 425 Hz im frühen 18. Jahrhundert auf 440 Hz im frühen 19. - und ihren Ton für die inzwischen größeren Konzertsäle lauter werden zu lassen. Dazu verlängerte man den Hals, der Griffbrettwinkel wurde größer, der Steg höher, der Balzbalken schwerer. Die Instrumente der AMATI-Familie und die des Tirolers JACOB STAINER (1621-1683) mit ihren dünnen Hölzern haben diese Umbauten schlechter vertragen als die Geigen von STRADIVARI und GUARNERI (HUTCHINS 1983a, 1424).

Geigenbauer prüfen bei Decke und Boden eines Instrumentes die Klopföne. Dazu halten sie die Platte an einem Ende zwischen Daumen und Zeigefinger fest und beklopfen sie mit dem Fingerknöchel. SAVART untersuchte diese Resonanztöne der Fichtendecken und Ahornböden mit Hilfe einer hölzernen Zange, die die zu untersuchenden Platten genau in den Kreuzungspunkten zweier Knotenlinien hielt, " ... es wurde gefunden, daß der Schall in guten Violinen zwischen dem eingestrichenen *Cis* und *D* für die Decke und für den Boden zwischen *D* und *Dis* variiert, so daß zwischen ihnen immer eine Differenz von einem Halbton oder einem ganzen Ton ist" (SAVART 1976a, 16).

Heute weiß man, daß es eine Eigenschaft aller guten Instrumente ist, wenn die Hauptplattentöne von Decke und Boden etwa einen halben bis einen ganzen Ton auseinanderliegen. Im Unterschied zu SAVARTS Ergebnissen kann jedoch auch der Klopfon der Decke höher liegen als der des Bodens, also gerade umgekehrt wie bei den Untersuchungen an den Geigen, die der französische Physiker verwendete (HUTCHINS 1988a, 90).

Wichtig waren auch SAVARTS Untersuchungen über die Wirkung des Stimmstocks, jenes Holzstabes zwischen Boden und Decke, der fast genau unter dem Fußpunkt des Steges sitzt, der zur höher gestimmten Saite gehört. Seine Stärke und Position hat erheblichen Einfluß auf den Klang einer Geige. Bis in die Jetztzeit hinein hält sich die Vorstellung, daß es die Hauptaufgabe des Stimmstocks sei, die Schwingungen von der Decke zum Boden des Instrumentes zu leiten. Dabei haben schon die Untersuchungen SAVARTS dazu beigetragen, diese Bedeutung des Stimmstocks einzuschränken: "Es kann nicht angenommen werden, daß der Stimmstock als Schalleiter wirkt, der nur der Ausbreitung der Bewegung dient, denn dieser Gegenstand kann nicht in sondern auf die Geige gesetzt werden, und seine Wirkung bleibt die gleiche" (SAVART 1975a, 324).

Zu diesem Zweck hatte SAVART aus einer Versuchsgeige den Stimmstock entfernt

Schwingungsmoden und den in Luft erregten Schallwellen existiert, als nach unmittelbaren Beobachtungen und Versuchen bestimmt" (SAVART 1820a, 121). Schließlich stellte SAVART fest, daß er nur Stäbe in Longitudinalschwingungen versetzen könne, die an beiden Enden frei sind, aber nicht bei anderen Randbedingungen. CHLADNI war über die zitierte Äußerung tief verletzt und schrieb an GILBERT, den Herausgeber der "Annalen der Physik":

Wenn ich wieder nach Leipzig komme, will ich Sie durch einige in Ihrer Gegenwart anzustellende Versuche von der Richtigkeit der Sache überzeugen, und wenn die Sache sich nicht so verhält, wie ich gesagt habe, will ich auf alles Zutrauen, das Sie etwa zu mir als Physiker haben können, Verzicht thun, welches doch wohl die stärkste Versicherung ist, die ich gegenwärtig Ihnen geben kann. (CHLADNI 1821e, 161)

Übrigens hat SAVART 1824 seine obigen Behauptungen betreffs Longitudinalschwingungen wieder zurückgenommen (SAVART 1824a, 247).

An der Bewegungsrichtung der Sandkörner auf länglichen elastischen Körpern nach Schwingungserregung erkannte SAVART, ob Längs- oder Querschwingungen vorlagen. Bei Querschwingungen hüpfte der Sand auf und ab, bei Längsschwingungen verschob er sich auf der Oberfläche.

Bei zwei Streifen derselben Materie mit gleicher Länge und Breite, aber verschiedener Dicke beobachtete SAVART, daß die Klangfiguren auf beiden Streifen an verschiedenen Stellen waren, obwohl beide Stäbe bei Longitudinalschwingungen den gleichen Ton gaben. SAVART deutete das ganz richtig so, daß der Stab auch ein wenig in die Quere schwingt, also keine reinen Longitudinalschwingungen ausführt. Man spricht heute deshalb von Dehnungsschwingungen bzw. Dehnwellen.

Schließlich untersuchte SAVART die Verhältnisse, wenn rechteckige Streifen fester elastischer Körper mit ihren Seitenlinien rechtwinklig aufeinander befestigt sind. Schon bei den Untersuchungen zur Violine spielten diese Probleme eine Rolle, aber auch CHLADNI hatte den gleichen Fall schon ausführlich beschreiben. SAVART kam zu dem Ergebnis: "Sind zwei oder mehrere Streifen rechtwinklich auf einander befestigt, so kommen alle einander parallele in einerlei Art, alle auf einander senkrechte Streifen aber in entgegengesetzte Arten schwingender Bewegung, in transversale die einen, in longitudinale die andern" (SAVART 1820a, Übers. 148).

In einer Arbeit aus dem Jahre 1823 beschäftigte sich SAVART mit der Schwingung in zylindrischen Röhren und bereicherte so die Kenntnis über die Physik der Blasinstrumente

gegen eine dünne Platte, die dieser Öffnung genähert wird, so wird diese Platte zur Wand gezogen. Dabei entstehen tiefe, dumpfe Töne (SAVART 1827a). Diese Töne, so erklärte es SAVART, entstehen durch Eigenschwingungen der Platte selbst. Denn hielt man Scheiben gleicher Dicke aber verschiedenen Durchmessers vor die Öffnung, so verhielten sich die Tonhöhen umgekehrt wie die Quadrate ihrer Durchmesser. Bestreute man die Scheiben mit Sand, konnte man ihre Klangfiguren studieren.

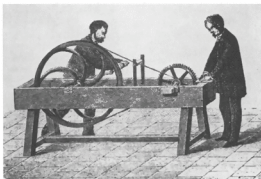


Abb. 8.1.2. SAVARTS Zahnradversuch (aus HUTCHINS 1983a, 1424). Die Züge des Experimentators am Zahnrad sind die von FÉLIX SAVART

1830 lieferte SAVART einen bedeutenden Beitrag zur Frage nach den Frequenzgrenzen des menschlichen Gehörs. Um dieses Problem, über das man in der Literatur recht verschiedene Angaben finden konnte, experimentell zu beantworten, griff der Franzose auf die schon von ROBERT HOOKE (1635-1703) im Jahre 1681 beschriebene Zahnrad sirene zurück. Dabei wurden Zahnräder in gleichmäßige Umdrehung versetzt, und man hielt kleine Holzscheiben dagegen, die einen bestimmten Ton gaben (Abb. 8.1.2). Zunächst benutzte SAVART ein Messingrad mit einem Durchmesser von 24 cm, das 360 Zähne hatte. Dieser Apparat besaß noch keinen Zähler, man maß die Frequenzen durch Vergleich mit dem Monochord. Jeder Stoß eines Zahnes zusammen mit dem Zwischenraum gilt als Schwingung (SAVART sprach von "Doppelschwingung"). Bis 4000 Schläge pro Sekunde konnte SAVART mit dieser Sirene rein hören. Darüber wurden die Töne schwach und unrein. Schließlich benutzte der Physiker ein Rad von 82 cm Durchmesser mit 720 Zähnen. Er konnte damit bis



Ergebnis, daß das 16füßige  $C_1$  der Orgel eine weitgehend kontinuierliche Empfindung im Ohr gibt, die als Ton (von 32 Hz) bezeichnet werden kann (HELMHOLTZ 1913a, 293). Bei der 32füßigen Oktave ist die Empfindung der einzelnen Luftstöße schon deutlich wahrnehmbar.

## 8.2 Das Problem der Klangfarbe

Man wußte schon seit langer Zeit, daß der Ton z.B. einer Flöte und eines Saiteninstrumentes trotz gleicher Tonhöhe ganz unterschiedliche Qualitäten besitzt. Trotzdem war die Ursache der Verschiedenheit der Klänge der Musikinstrumente bis in die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts ein ungelöstes Problem (vgl. Kap. 4.4). Entwicklungen in der Mathematik und der Experimentiertechnik begünstigten gegen Ende des in diesem Buche betrachteten Zeitraumes eine Lösung dieser Frage.

1822 erschien das Buch "Théorie analytique de la chaleur" des Franzosen JEAN BAPTISTE JOSEPH FOURIER . In ihm behauptete sein Autor, daß sich eine völlig willkürliche Funktion in der Form einer unendlichen Reihe nach trigonometrischen Funktionen entwickeln lasse. Drei Jahre vor FOURIERS Buch übergab CHARLES CAGNIARD DE LA TOUR seine Lochsirene der Öffentlichkeit (vgl. Kap. 5.3). Damit war die Erzeugung von Tönen bestimmter Frequenz auf mechanischem Wege möglich.

Bei Beobachtung der Technik von Saiteninstrumentenspielern ist CHLADNI kurz vor Ende seines Lebens eine Erklärung für das Problem der Klangfarbe gelungen, die schon in Richtung der späteren Lösung liegt:

Wenn nun der erste Impuls zu schnell und zu heftig auf einen kleinen Theil der Saite wirkt, als dass die entfernteren Theile schnell genug nachgeben könnten, wo also die Biegung anfangs eckig ausfallen muss, oder wenn die Saite unter einem rechten Winkel oder unter einem etwas schiefen Winkel in Bewegung gesetzt wird, oder wenn der Impuls an einer mehr nach dem Ende zu oder nach der Mitte zu befindlichen Stelle angebracht wird, u. s. w. so muss durch alle diese Verschiedenheiten des Impulses, und also auch der Gestalt, welche die Saite anfangs annimmt, auch eine Verschiedenheit des Lautes, welchen sie giebt, bewirkt werden. (CHLADNI 1827e, 190-191)

CHLADNI verwendete hier den Begriff "Laut", wo wir heute "Klangfarbe" sagen würden.

AUGUST SEEBECK (1805-1849) - er war der Sohn des Entdeckers des thermoelektrischen Effektes THOMAS JOHANN SEEBECK - begann 1840 umfangreiche Experimente mit der Lochsirene. Zu dieser Zeit war er Berliner Gymnasiallehrer und Privatdozent an der Universität. Seine Sirene bestand aus einer dünnen Scheibe  $A$  aus Pappe oder Blech, die um

bleibt.

Nach diesen Experimenten schien es so, als ob ein Ton aus einer annähernd isochronen Folge von Impulsen besteht, deren Form willkürlich ist (VOGEL 1990a, 3).

GEORG SIMON OHM (1789-1854), von 1833 bis 1849 Direktor der Polytechnischen Schule Nürnberg, veröffentlichte 1839 seine erste akustische Arbeit, die sich mit Kombinationstönen beschäftigte (vgl. Kap. 8.3). 1843 knüpfte OHM in einer großen Arbeit an die SEEBECKSchen Versuche mit der Lochsirene an. OHM war der Meinung, daß durch die SEEBECKSche Veröffentlichung von 1841 die alte Tondefinition umgestoßen wird. Unter alter Tondefinition versteht OHM:

Es müssen die zur Bildung eines Tones von der Schwingungsmenge  $m$  erforderlichen Eindrücke in Intervallen von der Länge  $1/m$  hinter einander hergehen, und in jedem dieser Intervalle fortdauernd die Form  $a \sin 2\pi(mt + p)$  entweder ganz rein in sich tragen, oder diese Form muss wenigstens als ein reeller Bestandteil aus jenen Eindrücken abgeschieden werden können. (OHM 1892a, 591)

Weiter wird verlangt, daß die Phase  $p$  in aufeinanderfolgenden Intervallen gleich ist und der Faktor  $a$  jeweils das gleiche Vorzeichen hat. OHM berief sich dabei auf alte Erfahrungen bei der Tonbildung in Saiten- und Blasinstrumenten. In solchen Instrumenten schwingt die Saite oder die Luft gleichzeitig in mehreren Schwingungsmoden, und die Frequenz einer bestimmten Mode ist ein ganzzahliges Vielfaches der Grundschiwingung. Für kleine Amplituden ist die Gesamtschiwingung die Summe der Teilschiwingungen (vgl. Kap. 1 und 5.3). Die Erfahrung bestätigt dies. Das geübte Ohr ist nämlich in der Lage, Grundton und Obertöne, z.B. einer gezupften Saite, wirklich zu hören. Das deutete darauf hin, daß das Ohr eine Schallwelle in ihre pendelförmigen Schwingungen, aus denen sie zusammengesetzt ist, auflösen kann.

OHM begann in der Arbeit von 1843 nun, mit dieser Tondefinition die SEEBECKSchen Versuche mit der Lochsirene neu zu erklären. Wenn die Sirene, so OHM, eine Welle der Form  $F(t)$  produziert, die im Intervall  $-l$  bis  $+l$  periodisch ist, so gilt nach FOURIER

$$F(t) = A_0 + A_1 \cos \pi t/l + A_2 \cos 2\pi t/l + \dots + B_1 \sin \pi t/l + B_2 \sin 2\pi t/l + \dots \quad (8.2.1)$$

Jeder Term, abgesehen von  $A_0$ , stellt nun einen reinen Ton dar, und das Ohr hört genau die einzelnen harmonischen Töne dieser Reihe. Diese Aussage OHMS bekam seit HELMHOLTZ

den Namen "OHMSches Gesetz" (TURNER 1977a, 12). Um nun die Verbindung zu den SEEBECKSchen Sirenenversuchen zu bekommen, machte OHM für  $F(t)$  einen speziellen Ansatz. Für jedes Zeitintervall  $2l$  gelte im Intervall  $2\lambda$  ( $\lambda \leq l$ )

$$F(t) = a \sin 2\pi t / 4\lambda, \quad (8.2.2)$$

ansonsten ist im Intervall  $2l$  die Funktion  $F(t) = 0$ . OHM war sich dessen bewußt, daß der Ansatz (8.2.2) sehr speziell ist:

Es ist hier der grösseren Einfachheit halber zwar nur eine besondere jedoch entschieden einseitige Form der Verdichtung oder Verdünnung der Betrachtung zu Grund gelegt worden, es lässt sich aber die Untersuchung ganz in derselben Weise völlig allgemein und mit dem gleichen Erfolge durchführen, wozu nichts weiter als ein grösserer Raum gefordert wird, den zu sparen ich mich verpflichtet hielt. (OHM 1892a, 595, Fußnote)

OHMS Arbeit ist jedoch auch so sehr umfangreich, und die ausgedehnten Rechnungen, um die FOURIERKoeffizienten zu erhalten, verdunkeln eher den Zweck der ganzen Herleitung (TURNER 1977a, 5). Bei der Amplitudenberechnung erhielt OHM das Ergebnis, daß die Intensitäten der einzelnen Harmonischen mit zunehmender Frequenz sehr stark abnehmen, ein Resultat, das durch die Erfahrung bestätigt wird. Für den Fall, daß  $\lambda = l$  war, unterlief OHM ein Rechenfehler. Hier erhielt er für den Grundton eine unendlich große Amplitude. OHM wußte natürlich, daß das physikalisch nicht möglich sein konnte. Für ihn war es aber eine Erklärung der Tatsache, daß man bei einem zusammengesetzten Ton normalerweise nur den Grundton hört, während die höheren Harmonischen nur für Geübte wahrnehmbar sind.

Die Bedeutung von OHMS Arbeit von 1843 war weniger die Behauptung, daß ihr Autor zusammengesetzte Töne in harmonische Pendelschwingungen zerlegt. Daß Saiten- und Blasinstrumente Töne hervorbringen, die aus Harmonischen bestehen, wußten die Mathematiker schon lange, und geübte Musiker konnten sie auch hören. Die Bedeutung von OHMS Arbeit besteht vor allem darin, daß das Ohr eine solche Synthese auch bei Klängen vornimmt, von denen man nicht annehmen konnte, daß sie aus Pendelschwingungen bestehen würden. OHMS Tondefinition war keine Behauptung über Schallquellen, es war eine Behauptung über die Physiologie der Schallwahrnehmung (TURNER 1977a, 7).

In einer Erwiderung auf OHM ging SEEBECK 1844 von der folgenden Reihe aus:

$$a_1 \cos 2\pi(mt + \tau_1) + a_2 \cos 2\pi(2mt + \tau_2) + a_3 \cos 2\pi(3mt + \tau_3) + \dots + a_n \quad (8.2.3)$$

und fragte: "Hat an der Erzeugung des Tones  $m$  nur das erste Glied der Reihe ... einen Antheil, oder können auch die folgenden Glieder zur Bildung dieses Tones beitragen?" (SEEBECK 1844a, 353). SEEBECK nannte die Form, die sich nur auf das erste Glied der Reihe bezieht - und den OHMSchen Standpunkt wiedergibt - die engere Form; bei der weiteren Form (8.2.3) besteht das Wesen des Tones in der periodischen Wiederkehr eines Impulses. In einer Arbeit aus dem Jahre 1843 hatte SEEBECK gezeigt, daß unter Annahme der weiteren Form sich alle an der Sirene beobachteten Erscheinungen sehr einfach erklären lassen (SEEBECK 1843a). Die Erfahrung, so meinte SEEBECK, spreche nicht gegen die weitere Form, wohl aber in einigen Punkten gegen die engere.

Um zu beweisen, daß die Erfahrung in einigen Punkten gegen die engere (OHMSche) Form spricht, griff SEEBECK ein Argument OHMS auf, nach dem "... zur Erklärung einer Naturbegebenheit keine andern Ursachen anzunehmen seyen, als welche nothwendig und hinreichend sind ..." (OHM 1892a, 591). SEEBECK bestritt diesen Grundsatz natürlich nicht, aber er sprach sich gegen die engere Form aus, weil sie weder notwendig noch hinreichend sei. Die engere Form will SEEBECK nur als Spezialfall gelten lassen. Ein Ton könne von dieser Form sein, aber es gelte nicht, daß jeder Ton der engeren Form genügen muß. Die Annahme der engeren Form ist nach SEEBECK also nicht notwendig.

Die Annahme der engeren Form ist nach SEEBECK aber auch nicht hinreichend, um die auf akustischem Gebiet vorliegenden Erfahrungen zu erklären,

... weil sie ... keine Verschiedenheit des Klanges zulässt. Denn in dem Werte  $a \cos 2\pi(mt + \tau)$  bestimmt  $m$  die Höhe,  $a$  die Stärke des Tones und  $\tau$  ist offenbar für die Beschaffenheit desselben von keiner Bedeutung, also bleibt Nichts übrig, was eine Verschiedenheit des Klanges begründen könnte. Man müsste also, bei jener Annahme, alle diese Verschiedenheiten entweder der Beimischung von Geräuschen oder dem unvermerkten Mitklingen von Beitönen, kurz solchen Eindrücken, die nicht zum Tone selbst gehören, zuschreiben, was gewiss nicht für alle jene Unterschiede, namentlich für die der Vocale, ausreichend ist. Diess führt darauf, dass zur Erklärung der Klangverschiedenheit noch eine veränderliche Grösse, etwa ein Factor  $\varphi(f)$ , in dem Ausdruck der engeren Schwingungsform aufzunehmen ist. Ist dieser Factor periodisch, und ist seine Periode der von  $a \cos 2\pi mt$  gleich oder ein aliquoter Teil davon, so würde diess nichts anderes geben, als eben die weitere Form. Sollte aber jener Factor eine andere, längere oder gar incommensurable Periode haben können, so

würde daraus folgen, dass selbst die weitere Definition noch zu enge ist ... (SEEBECK 1844a, 364-365)

Zugleich liest man bei SEEBECK:

Wie die Bewegung beschaffen seyn müsse, damit der Ton einfach (frei von Beitönen) sey, ist uns noch unbekannt, und es bildet das Letztere, meines Erachtens, die nächste und wichtigste Frage, welche sich an diese Discussion knüpft. (SEEBECK 1844a, 368)

OHM antwortete 1844 auf die SEEBECKsche Arbeit. SEEBECKs Kritik setzte immer wieder bei OHMs Berechnung der Intensitätsverhältnisse des Grund- zu den Obertönen an und machte auch auf den schon erwähnten Rechenfehler aufmerksam. Die von OHM berechneten Intensitätsverhältnisse stehen - nach SEEBECK - im Widerspruch zur Erfahrung. Darauf antwortete OHM:

Jene von SEEBECK wahrgenommenen Widersprüche beruhen auf einer Gehörstäuschung, in welcher unser Ohr befangen ist, in ähnlicher Weise, wie unser Auge ... Ich nehme nämlich an, dass unser Ohr unwillkürlich den Hauptton für stärker ansieht, als er wirklich ist, und die Beitöne für schwächer, als sie wirklich sind ... (OHM 1892a, 646)

Hier bricht dann auch OHMs Beschäftigung mit diesem Problem ab. Bezugnehmend auf seine geringe Musikalität, schrieb der Physiker: "Doch es ist Zeit, dass ich abbreche, denn schon überfällt mich einige Beklemmung in Folge der Kühnheit, womit ich Hypothesen wage in einer Sache, von der ich fast wie ein Blinder von der Farbe rede ..." (OHM 1892a, 648). SEEBECKs Interesse an der Problematik ging auch nach seiner Berufung zum Direktor der Technischen Bildungsanstalt in Dresden - der Vorläuferin der Technischen Universität - weiter und endete erst mit seinem frühen Tod im Jahre 1849.

EDUARD BRANDT (gest. 1861), Oberlehrer in Insterburg im damaligen Ostpreußen (heute Tschernjachowsk), lieferte 1861 eine Arbeit, die von der OHMschen Tondefinition ausging. Die Klangfarbendefinition gründete er auf die Existenz der Obertöne (oder "Beitöne", wie er sagte) und schloß:

... [es] sind in der Zahl der Beitöne, ihrer Intensität, den Verhältnissen ihrer Schwingungszahlen so mannigfaltige Elemente gegeben, dass die Annahme, die Verschiedenheit der Klangfarbe könne zum grösseren Theil von der Combination und Aenderung dieser Elemente abhängen, nicht so viel Unwahrscheinliches haben dürfte. (BRANDT 1861a, 326)

Aus einer Fußnote (BRANDT 1861a, 324) geht hervor, daß BRANDT den Aufsatz bereits im Sommer 1855 entworfen hatte zu dem Zweck, ihn HELMHOLTZ vorzulegen. Dieser sprach sich anerkennend über die Arbeit aus und machte später den Vorschlag der Veröffentlichung.

chung.

BRANDT hatte seine Behauptungen, die aus obigem Zitat hervorgehen, durch Versuche an einer schwingenden Saite erhärtet, wobei er durch Änderung ihrer Schwingungsform verschiedene Obertöne hervorrief bzw. verschwinden ließ und sich überzeigte, daß dadurch der Charakter des Tones eine wesentliche Änderung erfuhr (ULLMANN 1988a).

Der Streit OHM-SEEBECK und damit die Lösung des Klangfarbenproblems mußten unentschieden bleiben, da die experimentellen Hilfsmittel für seine Schlichtung noch nicht vorhanden waren. Erst HELMHOLTZ war mit den von ihm erfundenen Resonatoren in der Lage, obertonfreie Töne zu hören und auf diese Weise eine Klanganalyse vorzunehmen. Er konnte damit die OHMsche Definition des Tones bekräftigen, stellte die bekannte Klangfarbendefinition auf und gab mit seiner Resonanztheorie des Hörens eine Erklärung dafür, wie die Schalleindrücke im Innenohr in Tonempfindungen umgesetzt werden (HELMHOLTZ 1859b).

Für die weitere Entwicklung des Begriffs Klangfarbe vergleiche man z.B. die Ausführungen im Buch von ROEDERER (ROEDERER 1993a, 147-153). Über die Bedeutung des Streites OHM-SEEBECK für die HELMHOLTZsche Wahrnehmungstheorie vergleiche man Kap. 8.5.

### 8.3 Kombinationstöne

Differenztöne, die auftreten, wenn zwei Töne der Frequenzen  $p$  und  $q$  zusammenklingen und einzeln eine hohe Intensität haben, sind bei Musikern und Orgelbauern seit alter Zeit bekannt gewesen. Der am reußischen Hof im thüringischen Lobenstein tätig gewesene Organist GEORG ANDREAS SORGE (1703-1778) hat auf diese Erscheinung hingewiesen. In einem 1744 erschienenen Werk über Stimmung von Orgeln und anderer Instrumente ließ er seinem Scholaren die Frage stellen: "Wie kömmt es denn, daß sich bey Stimmung einer Quint 2-3 auch noch der dritte Klang in einer subtilen Mittönung meldet und hören läßt, und zwar allemal eine Octav zu dem tiefen Klang der Quint?". Und der Musiker antwortet darauf: "Die Natur hat darinnen ihr liebliches Spiel, und weiset, daß bey 2-3 die 1 noch fehle, und sie solchen Klang gerne dabey haben wolle, damit die Ordnung von 1-2-3 z.E. cc'g' vollkommen sey, daher kommt auch, daß eine Quinta 3 Fuß den Ton so vollkommen macht, und einen dritten Klang mit sich führet, der fast so stark ist, als ein gelindes Gedackt" (SORGE 1744a, 40-41). Die vom Autor gegebene Erklärung für den Differenzton ist natürlich physikalisch vollkommen unbefriedigend. Physikalische Erklärungen sind jedoch nicht der Zweck des Buches von SORGE gewesen.

JEAN-BAPTISTE ROMIEU (1732-1766) wirkte als Advokat in Montpellier und interessierte sich außer für landwirtschaftliche, meteorologische und chemische Fragen auch für die Akustik und Musiktheorie (ROMIEU 1876/79a). Er experimentierte mit Tönen und gab seine Ergebnisse am 29.4.1751 vor der Societé Royales des Sciences de Montpellier bekannt. Am 16.12.1751 folgte ein zweiter Bericht und wurde 1752 veröffentlicht. Darin liest man: "Als ich eine kleine Orgelpfeife mit einem Instrument stimmen wollte, das man 'ton' oder 'diapason' nennt und alle beide anblies, wurde ich dadurch überrascht, daß ich unabhängig von ihren beiden einzelnen Tönen einen dritten, tiefen und deutlich wahrnehmbaren Ton hörte ..." (ROMIEU 1876/79a, 272). Nach ROMIEU leiten sich die Schwingungen eines Differenztones aus dem größten gemeinschaftlichen Teiler der Primärtöne her.

Die Differenztöne werden oft TARTINISCHE Töne genannt. 1754 erschien in Padua GIUSEPPE TARTINIS (1692-1770) berühmte Schrift "Trattato di musica secondo la vera scienza dell'armonia". Gleich im ersten Kapitel dieses Buches werden die Differenztöne, die



der Verfasser 'terzo suono' nannte, erwähnt.

Man hat neuerdings ein harmonisches Phänomen entdeckt, daß die bisherigen akustischen Ergebnisse bestätigt und uns außerdem noch neue Gesetzmäßigkeiten offenbart. Werden auf einem Instrument, das die Töne lange und laut aushalten kann (z.B. Trompeten, Jagdhörner, Streichinstrumente, Oboen usw.) gleichzeitig zwei Töne gespielt, so entsteht durch das Aufeinanderprallen der beiden Luftvolumen, die in Schwingung versetzt werden, ein dritter Ton. Für unsere Zwecke ist eine genaue physikalische Erklärung, wie das Entstehen dieses dritten Tones vor sich geht, unnötig; uns genügt es, die Beziehung zwischen dem dritten Ton und den beiden gegebenen Tönen zu kennen. Wenn ein Geiger die folgenden Intervalle [Abb. 8.3.1] stark, lang ausgehalten und rein intoniert, wird man die hier als Viertelnoten angegebenen dritten Töne wahrnehmen. Die Intervalle können auch von zwei, fünf bis sechs Schritte voneinander entfernten Geigern gespielt werden. Die Töne müssen aber immer stark genug und lang ausgehalten gespielt sein. Am besten hört man die dritten Töne genau in der Mitte zwischen den beiden Spielern; denn der dritte Ton entsteht dort, wo die beiden schwingenden Luftvolumen aufeinanderprallen. Wird unser Beispiel auf zwei Oboen gespielt, dann können die beiden Oboisten, weil der Oboenton stärker ist als der Geigenton, in viel größerer Entfernung aufgestellt werden. (TARTINI 1754a, 13-14; 1966a, 72-73)

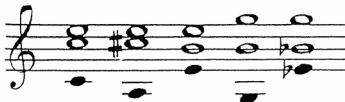


Abb. 8.3.1. Notenbeispiel nach TARTINI (aus TARTINI 1966a, 72)

Schon das Notenbeispiel zeigt, daß TARTINI die Differenztöne im allgemeinen um eine Oktave zu hoch angab. Die Differenztöne zusammen mit den Obertönen zum Ausgangspunkt musiktheoretischer Überlegungen gemacht zu haben, bleibt davon unberührt und ist TARTINI'S bleibendes Verdienst.

TARTINI hat immer größten Wert darauf gelegt, als Entdecker der Differenztöne zu gelten. Diesen Anspruch vertrat er besonders gegenüber ROMIEU und J.A. SERRE, der in

seinen "Essais sur les principes de l'harmonie" (Paris 1753) ebenfalls das Phänomen Differenztöne beschrieb. 1767 schrieb TARTINI zu dieser Frage: "Beim Geigenspiel entdeckte der Autor diese Erscheinung - dank einer glücklichen Fügung - ungefähr im Jahre 1714, also im Alter von 22 Jahren. Noch heute leben in Ancona nicht wenige Zeugen, die sich daran erinnern" (TARTINI 1767a, 36; 1966a, 65). Er behauptete ferner, sich die Differenztöne bereits ab 1728 (als er in Padua die Geigenschule herausgab) beim Stimmen seines Instrumentes zunutze gemacht zu haben. Nicht alle Wissenschaftshistoriker glaubten TARTINI, und so wurde als Entdecker der Differenztöne bis in die jüngste Zeit hinein häufig auf SORGE verwiesen. 1992 wurde jedoch ein bisher unbekanntes Schreiben von 1738 aus der Biblioteca Comunale in Udine veröffentlicht, das der Komponist FRANCESCANTONIO VALLOTTI (1697-1780) an GIORDANO RICCATI schrieb, in dem die frühe Entdeckung TARTINIS nicht nur erwähnt, sondern die Frequenz des Differenztones auch mit dem größten gemeinsamen Teiler der beiden Primärtöne gleichgesetzt wurde (BARBIERI 1992a, 220).

Schon ROMIEU hatte in seiner Arbeit von 1752 eine physikalische Erklärung für das Entstehen der Differenztöne gegeben, die jedoch erst durch die Arbeit von JOSEPH LOUIS LAGRANGE aus dem Jahre 1759 bekannt werden sollte (LAGRANGE 1759a, chap. III, § 64; 1867a, 142-144) und in den folgenden Jahrzehnten allgemein akzeptiert wurde. Diese Theorie beruht auf den Schwebungen zwischen den beiden Primärtönen mit den Frequenzen  $p$  und  $q$  und gleicher Amplitude  $A$  ( $v$  - Schallgeschwindigkeit,  $x$  - Ausbreitungsrichtung):

$$\xi_1 = A \sin 2\pi p(t - x/v) \quad ; \quad \xi_2 = A \sin 2\pi q(t - x/v) . \quad (8.3.1)$$

Die Überlagerung beider Wellen ergibt an der Stelle  $x=0$ :

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A \cos 2\pi[(p-q)/2]t \cdot \sin 2\pi[(p+q)/2]t . \quad (8.3.2)$$

Ist  $|p-q| \ll p+q$ , so hört man eine Schwingung der mittleren Frequenz  $(p+q)/2 = p = q$  mit der langsam veränderlichen Amplitude  $2A \cos 2\pi[(p-q)/2]t$ . Übersteigen die Zahl der Schwebungen oder Stöße die untere Hörgrenze, so werden sie einzeln nicht mehr wahrgenommen, sondern verschmelzen zu einem Ton, dem beobachteten Differenzton.

THOMAS YOUNG (1773-1829) beschrieb 1800 Differenztöne zweiter Ordnung. Nach der Erklärung des Differenztones erster Ordnung im Sinne von LAGRANGE fuhr der eng-

Ordnung schrieb OHM: "Sein Erscheinen ist jedoch an die Bedingung geknüpft, dass die Schwingungsformen der beiden ihn erzeugenden Töne einander ähnlich seien ..." (OHM 1892a, 573). Es darf vermutet werden, daß mit dem Ausdruck "einander ähnlich" bereits auf die Dinge hingewiesen wird, die OHM vier Jahre später in deutlicher Form vertritt. Die beiden Erzeugertöne müßten, so meinte OHM hier mit großer Wahrscheinlichkeit, sinusförmige Gestalt (8.3.1) haben, wobei dann bei Überlagerung eine Gleichung der Gestalt (8.3.2) resultiert. Das bedeutete für OHM jedoch gleichzeitig, daß nicht der Differenzton erster Ordnung und einer der Primärtöne zusammen für das Zustandekommen eines Differenztons zweiter Ordnung verantwortlich sein kann, wie es HÄLLSTRÖM behauptete:

Da die Schwingungsform des Hällström'schen ersten Combinationstones den Schwingungsformen der ihn erzeugenden Töne nothwendigerweise immer sehr unähnlich werden muss, so kann dieser erste Combinationston mit keinem der beiden ursprünglichen Töne einen ferneren Combinationston liefern, wie Hällström zur Erlangung seiner folgenden Combinationstöne anzunehmen sich veranlasst sah. (OHM 1892a, 574)

OHM schlug nun vor, die Differenztöne höherer Ordnung so zu erklären, daß man sie mit den harmonischen Obertönen, die den Grundton begleiten, in Zusammenhang bringt. Daraus würde nun weiter folgen, daß diese Erklärung nur für die Töne solcher Musikinstrumente gilt, die harmonische Obertöne haben, wie z.B. Blas- und Saiteninstrumente. Bei schwingenden Stäben, z.B. einer Stimmgabel, wo die Obertöne nicht harmonisch zum Grundton liegen, versagt diese Deutung.

Hier setzten nun die Arbeiten von HELMHOLTZ an, die 1856 zur Veröffentlichung seiner grundlegenden Publikation "Ueber Combinationstöne" führten (TURNER 1977a, 14). Schwebungen können nach HELMHOLTZ schon deshalb nicht die Ursache für die Entstehung von Kombinationstönen sein, weil (8.3.2) kein Ton im OHMSchen Sinne mehr ist (vgl. Kap. 8.5).

#### 8.4 Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten

Über die Schalleitfähigkeit von Flüssigkeiten sind im 17. und 18. Jahrhundert viele Beobachtungen publiziert worden. CHLADNI hat in seiner Monographie von 1802 darüber berichtet (CHLADNI 1802a, 258-259). Es wurde auf die im Wasser lebenden Tiere verwiesen, die mit Gehörwerkzeugen versehen sind. Insbesondere hört man auch Schall, der im Wasser erzeugt wurde, in der umgebenden Luft. PÉROLLE hat 1790 über Versuche berichtet (PÉROLLE 1800a), bei denen er eine Taschenuhr, die er vorher wasserdicht gemacht hatte, in Wasser tauchte. Hierbei beobachtete er nicht nur die Leitfähigkeit des Wassers für Schall, er machte auch Untersuchungen zur Schallfortpflanzung in verschiedenen Flüssigkeiten. Außer Wasser verwendete er Terpentinöl, Weingeist und Olivenöl. Bei der Beurteilung dieser Experimente ist darauf zu achten, daß der Beobachter in Luft hörte, der Schall also aus der zu untersuchenden Flüssigkeit wieder ausgetreten war. CHLADNI glaubte noch 1802: "Indessen möchte wohl die Art, wie der Schall durch das Wasser verbreitet wird, nicht füglich als eine Zusammendrückung und Wiederausdehnung (wie bey der Luft und den Gasarten) sondern vielmehr als eine von dem schallenden Körper dem Wasser durch einen unbemerkt kleinen Raum mitgetheilte Stoffbewegung anzusehen seyn ..." (CHLADNI 1802a, 258), aber schließlich verbreitete sich die Kenntnis von der von Null verschiedenen Kompressibilität des Wassers.

Noch in seinem Kompendium von 1827 schrieb CHLADNI über die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten: "Die Geschwindigkeit ... ist noch nicht durch Versuche bestimmt" (CHLADNI 1827b, 66-67). Aus der Theorie von LAPLACE war jedoch zu entnehmen, daß die Schallgeschwindigkeit in Wasser etwa das 4 1/2-fache von der in Luft betragen müßte (LAPLACE 1817a). Auch GEORG WILHELM MUNKE (1772-1847) vermutete für die Schallgeschwindigkeit in Wasser einen höheren Wert als für Luft (MUNKE 1814a).

Im November 1826 wurde durch den Physiker JEAN DANIEL COLLADON (1802-1893) mit Hilfe von Messungen im Genfer See die Schallgeschwindigkeit in Wasser das erste Mal gemessen, und die Ergebnisse hat er dann zusammen mit dem Mathematiker JACQUES CHARLES FRANÇOIS STURM (1803-1855) im Jahre 1827 publiziert (COLLADON/STURM 1827a). Als CHLADNI im März 1827 die Korrekturfahnen für sein Kompendium in Breslau

erhielt, wußte er von diesen Messungen noch nichts. Zwischen den Küstenorten Rolle und Thonon wurde längs einer Strecke von ca. 13,5 km von Booten aus gemessen. Die mittlere Wassertemperatur war 8,1 °C. In einem der Boote befand sich ein Mitarbeiter (s. Abb. 8.4.1), der nach verabredeten Zwischenzeiten einen Hammer gegen eine im Wasser befindliche Glocke schlug. Gleichzeitig wurde eine kleine Menge Schießpulver als optisches Signal zum Aufblitzen gebracht. COLLADON beobachtete im anderen Boot. Ein Chronometer maß die Zeit zwischen dem Erscheinen des Blitzes und der Wahrnehmung des Glockenschalls. Dazu wurde ein großes Hörrohr aus Blech ins Wasser gesteckt. Es war 5 m lang und hatte unten eine trichterförmige Erweiterung. Das Ergebnis mehrerer Beobachtungsreihen ergab eine Schallgeschwindigkeit von 1435 m/s für Wasser der angegebenen Temperatur. Als Fehler gaben die Autoren  $\pm 24$  m/s an.

Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten in anderen Flüssigkeiten als Wasser geschah dann durch den in Paris lebenden WERTHEIM. Er benutzte, ähnlich wie CHLADNI für feste und gasförmige Körper, eine indirekte Methode zur Messung. In einem mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllten Kasten befand sich eine Orgelpfeife, deren Ton verglichen wurde mit dem Ton, den die gleiche Pfeife in Luft ergab. So konnten die Schallgeschwindigkeiten im Seine- und Meerwasser, in Lösungen von schwefelsaurem Natron ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), kohlensaurem Natron ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), salpetersaurem Natron ( $\text{NaNO}_3$ ), Alkohol und Terpentinöl bestimmt werden (WERTHEIM 1848a). Später wurden dann für solche Messungen die Methode der KUNDTschen Staubfiguren benutzt, die genauere Werte lieferte (AUERBACH 1909a, 535-542).

## 8.5 Mit HELMHOLTZ beginnt eine neue Ära in der Akustikforschung

HELMHOLTZ begann im Jahre 1855 mit akustischen Untersuchungen. Als Mediziner und Physiologe, Schüler von JOHANNES PETER MÜLLER (1801-1858), interessierte er sich besonders für die Umwandlung von hinsichtlich Frequenz, Intensität und Spektrum genau bestimmten Schallwellen in neurale Signale, die eine Information über Tonhöhe, Lautstärke und Klangfarbe tragen sollen. MÜLLER leitete mit seinem Hauptwerk "Handbuch der Physiologie des Menschen" (Koblenz 1833-1840) eine neue Epoche der Physiologie ein, bei der es eine enge Verbindung zu den anderen Naturwissenschaften gab. Gerade die Schüler MÜLLERS besaßen eine gründliche Vorbildung in Physik (RECHENBERG 1994a, 32-35).

Wie schon in Kap. 8.3 erwähnt, befaßte sich HELMHOLTZ in seinen ersten akustischen Arbeiten mit den Kombinationstönen.

Nach einer historischen Einleitung in seiner grundlegenden Arbeit von 1856 (HELMHOLTZ et) betonte HELMHOLTZ die Notwendigkeit, obertonfreie Töne für seine Versuche zu benutzen. Er verwendete als Schallquellen Stimmgabeln und als Resonatoren Monochordsaiten.

Wenn wir nun eine Stimmgabel an einer solchen Stelle auf eine Saite aufsetzen, wo diese in dem Grundtone der Gabel mitschwingt, so werden allerdings die höheren unharmonischen Töne der Gabel das Mitschwingen der Saite nicht erregen, und nicht auf deren Resonanzbuden und die umgebende Luftmasse übertragen werden, wohl aber die höhere Octave des Grundtones. Um diese auszuschliessen muss man der Saite selbst unharmonische Obertöne geben, was sehr leicht zu bewirken ist, dadurch, dass man in der Mitte des mitschwingenden Saitenstückes eine kleine Belastung anbringt ... Wenn man also die Gabel nun in dem letzteren Punkte aufsetzt, erregt man nur den Grundton und nicht mehr gleichzeitig dessen höhere Octave ... Man erhält auf diese Weise ziemlich laute und lang anhaltende reine Töne ... (HELMHOLTZ 1856a, 507-508)

Eine zweite Methode, den Grundton von Stimmgabeln ohne die Obertöne zu hören, beruhte auf der Wirkung resonierender Lufthohlräume. Diese sogenannten HELMHOLTZschen Resonatoren spielten von jetzt ab in der Akustik eine große Rolle. Bringt man eine Gabel vor die Mündung eines passenden Resonators, so schwillt der Grundton stark an, während keine Verstärkung der Obertöne wahrzunehmen ist.



Abb. 8.5.1. H. v. HELMHOLTZ (Frontispiz aus HELMHOLTZ: Wiss. Abhandl. Bd. 1. Leipzig 1882)

HELMHOLTZ machte sodann die Entdeckung, daß es außer den Differenztönen auch wesentlich schwächere - Summationstöne gibt, und beide Phänomene faßt man seitdem unter dem Namen Kombinationstöne zusammen.

Schwebungen sieden für HELMHOLTZ als Entstehursache für die Kombinationstöne aus. Eine Schwebung ist kein Ton im OHMSchen Sinne mehr (vgl. Kap. 8.3), sie ergäbe auch keine Summationstöne.

Durch diese Ueberlegungen auf das Ungenügende der bisherigen Theorien aufmerksam gemacht, glaubte ich einen Fingerzeig, der auf den richtigen Weg führen konnte, in dem bisher wenig beachteten Umstände zu entdecken, dass die Combinationstöne nur bei starken primären Tönen auftreten, und ihre Intensität in einem viel schnelleren Verhältnisse zu

wachsen scheint, als die der primären Töne. Danach glaubte ich vermuthen zu dürfen, dass sie bei Wellenzügen von unendlich kleinen Amplituden, wie man theoretisch die Schallwellen gewöhnlich annimmt, nicht vorkommen möchten, sondern nur bei solchen von endlichen Amplituden. (HELMHOLTZ 1856a, 531)

Der Einfachheit halber behandelte HELMHOLTZ in seiner Theorie nur die Schwingung eines einzelnen Massenpunktes der Masse  $m_1$  in  $x$ -Richtung, wobei er für die elastische Kraft den Ansatz

$$k = ax + bx^2 \quad (8.5.1)$$

machte. Wirken nun auf den Massenpunkt zwei Schallwellenzüge mit den Kräften  $f \sin pt$  und  $g \sin(qt+c)$ , so gilt für die Bewegungsgleichung

$$-m_1 d^2x/dt^2 = ax + bx^2 + f \sin pt + g(\sin qt + c), \quad (8.5.2)$$

die HELMHOLTZ durch den Reihenansatz

$$x = \varepsilon x_1 + \varepsilon^2 x_2 + \varepsilon^3 x_3 + \dots, \quad f = \varepsilon f_1, \quad g = \varepsilon g_1 \quad (8.5.3)$$

integrierte und Glieder mit gleichen Potenzen von  $\varepsilon$  einzeln Null setzte.  $x_2$  enthält dann die Töne mit den Frequenzen  $2p$ ,  $2q$ ,  $p - q$  und  $p + q$ ,  $x_3$  enthält  $3p$ ,  $3q$ ,  $2p+q$ ,  $2p - q$ ,  $p + 2q$ ,  $p - 2q$ ,  $p$  und  $q$ ,  $x_4$  ergibt Kombinationstöne dritter Ordnung usw. Wenn man also nach HELMHOLTZ annimmt, daß bei Schwingungen des Trommelfells das Quadrat der Elongationen auf die Schwingungen Einfluß gewinnt, so ist das Entstehen der Kombinationstöne geklärt. Ferner wird darauf hingewiesen, daß der Ansatz (8.5.1) bei Vorzeichenwechsel von  $x$  eine Änderung von  $|k|$  bewirkt. Der Ansatz paßt also zu einem elastischen Körper, der sich gegen Verschiebungen in positiver und negativer  $x$ -Richtung nicht symmetrisch verhält. HELMHOLTZ betonte, daß sich besonders das Trommelfell durch eine Asymmetrie auszeichnet, da es durch den Stil des Hammers stark nach innen gezogen wird.

Wie oben schon erwähnt, erkannte HELMHOLTZ, daß ein Widerspruch zum OHM'schen Gesetz vorliegen würde, wenn periodische Intensitätsschwankungen eine Tonempfindung von der Frequenz der Schwankung auslösen würden. Ein anderes kommt jedoch hinzu.



HELMHOLTZ ging in seiner Resonanztheorie des Hörens (HELMHOLTZ 1869a) davon aus, daß die Basilarmembran als ein System von Resonatoren in Form von quergespannten Fasern verschiedener Eigenfrequenz angesehen werden kann. Infolge der Dämpfung der Fasern wird durch einen Ton ein relativ breiter Bereich von Fasern zum Mitschwingen angeregt. Das erklärt zwar, warum man beim gleichzeitigen Hören von zwei eng benachbarten Tönen der Frequenzen  $p$  und  $q$  eine einzige Schwingung der mittleren Frequenz  $(p+q)/2$  hört, deren Amplitude mit der Frequenz  $(p-q)/2$  schwankt - also die schon erwähnte Schwebung -, es wird jedoch nicht deutlich, wie nach der alten Stoßtheorie für die Differenztöne (s. Kap. 8.3) jenseits der Frequenzunterscheidungsgrenze - also für ein großes Primärtonintervall - ein einzelner Differenzton gehört werden kann. In diesem Fall haben sich die beiden Resonanzbereiche auf der Basilarmembran nämlich genügend weit voneinander entfernt. Hier ist ebenfalls die HELMHOLTZsche Theorie in Vorteil. Die Stoßtheorie erklärt ferner nicht die Summationstöne, obwohl deren Existenz heute verschiedentlich angezweifelt wird (ROEDERER 1993a, 40). So kann (formal) der Summationston erster Ordnung  $p+q$  als Differenzton zwischen dem 1. Oberton von  $p$  und dem Differenzton 1. Ordnung von  $p - q$  aufgefaßt werden.

Diesen Vorzügen der HELMHOLTZschen Theorie stehen bestimmte Mängel gegenüber. So ist der Differenzton  $p-q$  nach HELMHOLTZ nur ein Effekt zweiter Ordnung. Versuche haben aber gezeigt, daß dieser Ton für kleine Intervalle erhebliche Stärke haben kann. Der Differenzton  $p-q$  ist nur bis etwa zur Quinte besonders kräftig. Bei größeren Intervallen werden die Kombinationstöne sehr schwach, was nach der HELMHOLTZschen Theorie nicht verständlich ist. Für die Stärke der Kombinationstöne ist auch das Intensitätsverhältnis  $p/q$  ausschlaggebend, während es nach HELMHOLTZ für die Intensität der Kombinationstöne nur auf das Produkt der Amplituden von  $p$  und  $q$  ankommt. Außerdem haben Experimente gezeigt, daß für höhere Frequenzlagen der Primärtöne der Differenzton  $p-q$  stärker ist als in tieferen Lagen. Auch dieses Ergebnis ist aus der von HELMHOLTZ entwickelten Theorie nicht ableitbar.

Für die Weiterentwicklung des Verständnisses der Kombinationstöne steht vor allen Dingen der Name von ERICH WAETZMANN, der zu Beginn des 20. Jahrhunderts an der Technische Hochschule im damaligen Breslau über das Thema gründliche Untersuchungen angestellt hat (ULLMANN 1986a, 48-52). Heute weiß man auch, daß nicht das Trommelfell für die Entstehung von Kombinationstönen verantwortlich ist, sondern daß sie das Ergebnis

einer nichtlinearen Verzerrung des akustischen Signals in der Schnecke sind (ROEDERER 1993a, 37-41).

Es muß, wenigstens ganz kurz, im Zusammenhang mit der Schilderung des Streits OHM-SEEBECK (s. Kap. 8.2) auf die HELMHOLTZsche Wahrnehmungstheorie und den Einfluß der Lernprozesse eingegangen werden. Wie in Kap. 8.2 beschrieben wurde, hatte es OHM als Gehörtäuschung erklärt, daß das Ohr die Obertöne als Verstärkung des Grundtones auffaßt, und SEEBECK hatte erwidert, das Ohr müsse der einzige Richter in Fragen der Hörempfindungen sein. HELMHOLTZ wies nun darauf hin, daß man beim Bewußtwerden einer Empfindung - z.B. einer Klangempfindung - zwei Grade unterscheiden müsse:

Der niedere Grad des Bewußtwerdens ist derjenige, bei welchem der Einfluß der betreffenden Empfindung sich nur in der von uns gebildeten Vorstellung von den äußeren Dingen und Vorgängen geltend macht und diese bestimmen hilft. Dies kann geschehen, ohne daß wir uns dabei zur Erkenntnis zu bringen brauchen oder vermögen, welchem besonderen Teil unserer Empfindungen wir die Anschauung dieses oder jenes Verhältnisses in unseren Wahrnehmungen verdanken. Wir wollen in diesem Falle ... den Ausdruck brauchen, daß der betreffende Empfindungseindruck perzipiert sei. Der zweite, höhere Grad des Bewußtwerdens ist der, wo wir die betreffende Empfindung unmittelbar als einen vorhandenen Teil der zurzeit in uns erregten Summe von Empfindungen unterscheiden. Eine solche Empfindung wollen wir als ... apperzipiert ... bezeichnen. Beides muß sorgfältig voneinander geschieden werden. (HELMHOLTZ 1913a, 107)

SEEBECK und OHM erkannten beide an, daß die harmonischen Obertöne eines Klanges perzipiert werden, denn ihre Einwirkung verändert die Stärke oder Klangfarbe des betreffenden Schalleindrucks. Der Streit OHM-SEEBECK reduziert sich auf die Frage, ob die Obertöne auch apperzipiert werden können, ob sie also auch ohne physikalische Hilfsmittel - wie z.B. Resonatoren - wahrgenommen werden können. Nun werden die einfachen Töne vom Ohr sehr selten gehört. Selbst Stimmgabeln geben bei starker Erregung noch schwache Obertöne. HELMHOLTZ schrieb nun:

Wenn aber von den Summanden nur eine einigermaßen verwaschene und schwankende Kenntnis da ist, so wird auch die Zerlegungsweise der Summe in entsprechendem Maße unsicher werden müssen. Wenn wir nicht ganz sicher wissen, was dem als Grundton zu betrachtenden Teile des Klanges zuzurechnen ist, so wird auch unsicher, was den Obertönen angehört. Deshalb müssen wir wenigstens im Anfang uns die einzelnen Elemente, die unterschieden werden sollen, vorher einzeln hörbar machen, um eine ganz frische Er-

innerung an die Empfindung zu haben, die ihnen entspricht ... (HELMHOLTZ 1913a, 111-112)

Die Obertöne eines Klanges werden also perzipiert, jedoch nicht immer apperzipiert. Sie können aber durch einen Lernprozeß auch ohne Benutzung physikalischer Hilfsmittel zur bewußten Wahrnehmung gebracht werden. Auch da, wo die Obertöne nicht isoliert wahrgenommen werden, verraten sie ihre Existenz in der Empfindung durch Veränderung in der Klangfarbe.

TURNER hat darauf hingewiesen, daß die HELMHOLTZschen Anschauungen nicht auf der Annahme allein mechanistischer Prinzipien beruhen, wie man sie dem Forscher oft unterstellte (z.B. ROEDERER 1993a, XI), sondern auf der sorgfältigen Abgrenzung der Probleme, die mechanistisch behandelt werden können, von denen, bei denen das nicht möglich ist (TURNER 1977a, 21). Damit erweist sich HELMHOLTZ auch als ein Wegbereiter für moderne Forschungskonzepte in der Akustik, wie wir sie etwa seit der Mitte des 20. Jahrhunderts kennen. Heute weiß man, daß das Zentralnervensystem für akustische Wahrnehmungen eine ganz aktive Rolle spielt, und so werden Beziehungen zwischen den physikalischen Reizen des Gehörganges und den psychologischen Empfindungen immer mehr zum Untersuchungsgegenstand.

Die HELMHOLTZsche Wahrnehmungstheorie spielte auch in seiner physiologischen Optik eine wichtige Rolle.

In CHLADNIS Hauptwerk von 1802 wurden die Begriffe Konsonanz und Dissonanz noch ganz in der Weise erklärt, wie sie seit Jahrhunderten üblich waren: "Ein Intervall ist consonierend, wenn die Zahlen der Schwingungen in einem so einfachen Verhältnisse stehen, daß das Gehör sie am leichtesten faßt, und dadurch beruhigt wird, dahingegen ein Intervall dissonierend ist, wenn die Zahlen der Schwingungen in einem weniger einfachen Verhältnisse stehen ... (CHLADNI 1802a, 8). Vor MERSENNE hätte man lediglich anstelle vom Verhältnis der Schwingungszahlen vom Verhältnis der Saitenlängen auf dem Monochord gesprochen, alles andere wäre unverändert gewesen. CHLADNI gibt noch an, daß konsonierende Intervalle solche mit den Zahlen 1 bis 6 sind, die Zahl 7 gibt den Übergang zur Dissonanz.

HELMHOLTZ' Theorie der Kombinationstöne ist nicht die Darstellung eines relativ eng begrenzten Phänomens der Akustik, sie spielt auch eine Rolle in seiner Konsonanztheorie. Nach HELMHOLTZ hängt der Grad der Dissonanz von der Stärke der durch das Schweben der Obertöne der beiden das Ohr treffenden Klänge hervorgerufenen Rauigkeit

ab (HELMHOLTZ 1913a, 299-324). Stimmen die beiden Klänge in allen Obertönen genau überein, verschwinden also die Schwebungen, so liegt ein ideal konsonantes Intervall vor. Wie liegen jedoch die Verhältnisse bei einfachen, also obertonfreien Tönen? Sie würden nur dann Schwebungen geben, wenn die Intervalle klein sind. Man könnte bei aus reinen Tönen bestehenden größeren Intervallen Konsonanz und Dissonanz nicht mehr unterscheiden. HELMHOLTZ erläutert nun, daß bei solchen Intervallen reiner Töne die Schwebungen ihrer Kombinationstöne für Konsonanz und Dissonanz verantwortlich sind (HELMHOLTZ 1913a, 325-347). Das wirkt sich z.B. bei den weiten gedackten Orgelpfeifen aus, die nur einfache Töne haben. Lediglich die engen Intervalle der Sekunden geben kräftige Schwebungen, während unreine größere Intervalle nur die schwachen Schwebungen des 1. Differenztones liefern. Deshalb unterscheiden sich hier dissonante Intervalle (mit Ausnahme der Sekunden) nur wenig von den konsonanten.

HELMHOLTZ unterschied vier verschiedene Konsonanzgrade. Als "absolute Konsonanz" betrachtete er Klänge, deren Grundtöne im Oktavverhältnis (1:2) oder in der Duodezime (1:3) stehen. "Volle Konsonanz" besitzen die Quinte (2:3) und die Quarte (3:4). Die große Sexte (3:5) und die große Terz (4:5) bezeichnete er als "mittlere Konsonanz" und die kleine Terz (5:6) sowie die kleine Sexte (5:8) als "unvollkommene Konsonanz" (HELMHOLTZ 1913a, 320-321).

Auch das Thema Konsonanz/Dissonanz ist in der Folgezeit nicht bei den Anschauungen von HELMHOLTZ stehengeblieben. Über die Tonverschmelzungstheorie nach dem Psychologen und Musikforscher CARL STUMPF (1848-1936) aus dem Jahre 1898, bei der Konsonanz und Dissonanz ein Quantitäts- und kein Qualitätsunterschied ist, geht die Entwicklung bis zu der Auffassung unserer Tage, nach der der Mechanismus zur Erkennung räumlicher Anregungsmuster auf der Basilarmembran für Konsonanz verantwortlich ist (ROEDERER 1993a, 163-170).

1857 begann HELMHOLTZ mit den Untersuchungen über die Vokale (HELMHOLTZ 1857a). Bereits 1832 lag von WHEATSTONE eine Theorie der Vokaltöne vor (s. Kap. 5.3), und HELMHOLTZ korrespondierte in dieser Frage mit FRANZ CORNELIUS DONDERS (1818-1889), der besonders auf die begleitenden Geräusche aufmerksam machte, die bei der Vokalbildung der menschlichen Stimme entstehen. HELMHOLTZ leugnete diese Geräusche, also die Unregelmäßigkeiten der Luftbewegung, nicht, wichtiger für die Unterscheidung der Vokale sind für ihn jedoch die Obertöne, die den Grundton begleiten.

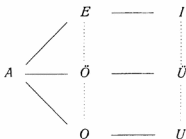


Abb. 8.5.2. Vokalschema (aus HELMHOLTZ 1913a, 172)

an. Er bestimmte auch die Notenwerte für diese Töne, sie sind in verschiedenen Dialekten und Sprachen etwas unterschiedlich. Der für die Akustik der Vokallaute wichtige Begriff "Formant" wurde erst Jahrzehnte später (1890) von dem Physiologen LUDIMAR HERMANN (1838-1914) eingeführt.

1858 baute HELMHOLTZ einen Apparat zur Klangfarbenbestimmung, eine Art Synthesizer, der eine Nachahmung der verschiedenen Vokale der menschlichen Sprache ermöglichte. Eine Stimmgabel wurde elektromagnetisch zu Schwingungen angeregt und befand sich vor einer Resonanzröhre, deren Öffnung durch einen Deckel ganz oder teilweise geschlossen werden konnte (Abb. 8.5.3). Ist der Resonator auf die Stimmgabel abgestimmt, so wird der Ton stark gehört, außerdem muß er in diesem Fall direkt vor die Stimmgabel geschoben werden. Verdeckt man die Röhre nur teilweise mit dem Deckel, so kann man dem Ton jede beliebige Stärke geben.

Der ganze Synthesizer bestand nun aus mehreren solcher Grundapparaturen mit unterschiedlichen Stimmgabeln. Man konnte auf diese Weise verschiedene Zusammensetzungen des Grundtones mit einem oder mehreren harmonischen Obertönen in verschiedener Stärke hörbar machen.

Dieses Gerät bot gegenüber den Tönen, die Musikinstrumente lieferten, ideale Experimentiermöglichkeiten: Der Schall wurde erzeugt mit konstanter Frequenz und Lautstärke und beliebiger Dauer. Das Gerät diente HELMHOLTZ der Nachahmung und Rekonstruktion von Vokalen (HELMHOLTZ 1859b). Mit dem Gerät konnte auch die Frage beantwortet werden, ob sich die Verhältnisse ändern, wenn der Grundton eine andere Frequenz

hat. Der Forscher sprach nach entsprechenden Experimenten die Vermutung aus, daß " ... auch hier dasselbe Verhältniss der Nebentöne zum Grundton entscheidend für den Vocal-

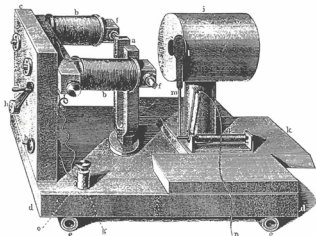


Abb. 8.5.3. HELMHOLTZscher Apparat zur Klangfarbenbestimmung (aus HELMHOLTZ 1913a, 196)

charakter zu sein schien, wie in der tieferen Lage" (HELMHOLTZ 1859b, 287). Auch die Frage nach dem Einfluß der Phasenbeziehungen vom Grundton zu den Obertönen auf die Klangfarbe konnte HELMHOLTZ mit dem beschriebenen Gerät beantworten. Bei Stromumkehr an dem Elektromagneten konnte nämlich die Phase verändert werden. Zum gleichen Ergebnis kam man auch, wenn man die Resonanzröhren durch Verengung ihrer Mündungen etwas verstimmte. Als Ergebnis erhielt er eine Phasenunabhängigkeit der Klangfarbe.

Gegen dieses Ergebnis hatte sich übrigens u.a. 1881 der in Paris lebende RUDOLPH KOENIG (1832-1901) ausgesprochen (KOENIG 1881a). Die Akustik ist jedoch hundert Jahre lang den HELMHOLTZschen Ergebnissen gefolgt. Erst in jüngster Zeit hat man erkannt, daß Phasenveränderungen zwischen den Komponenten eines Tones, wenigstens sekundär, für den Klangfarbeneindruck von Bedeutung sind (ROEDERER 1993a, 151).

Wahrscheinlich 1860 (RECHENBERG 1994a, 140) begann HELMHOLTZ in Heidelberg mit der Abfassung eines Manuskriptes, das im Oktober 1862, als es abgeschlossen war, den

Titel "Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik" erhielt im Frühjahr 1863 im Verlag Friedrich Vieweg & Sohn in Braunschweig erschien. In der Einleitung äußerte sich der Verfasser über Sinn und Zweck des Werkes:

Das vorliegende Buch sucht die Grenzgebiete von Wissenschaften zu vereinigen, welche, obgleich durch viele natürliche Beziehungen aufeinander hingewiesen, bisher doch ziemlich getrennt nebeneinander gestanden haben, die Grenzgebiete nämlich einerseits der physikalischen und physiologischen Akustik, andererseits der Musikwissenschaft und Ästhetik. Dasselbe wendet sich also an einen Kreis von Lesern, welche einen sehr verschiedenartigen Bildungsgang durchgemacht haben und sehr abweichende Interessen verfolgen ... (HELMHOLTZ 1913a, 1)

Das Buch erlebte eine schnelle Folge von Neuauflagen. Die 4. Auflage (1877) war die letzte, die HELMHOLTZ selbst redigierte, die 5. (1896) und 6. Auflage (1913) besorgte der Physiker RICHARD WACHSMUTH (1868-1941). In der 1. Abteilung: "Die Zusammensetzung der Schwingungen" wird über Obertöne und Klangfarben berichtet. Die 2. Abteilung: "Die Störungen des Zusammenklanges" erörtert Kombinationstöne und Schwebungen und beschreibt Konsonanz und Dissonanz. Während der Stoff der 1. Abteilung eine Mischung von physikalischen und physiologischen Gesichtspunkten darstellt, vereinigt die 2. Abteilung physikalische und psychologische Fragen. Die 3. Abteilung, das Schlußkapitel: "Die Verwandtschaft der Klänge", beschreibt Tonleitern und Fragen der Tonalität. Hier überwiegen nun psychologisch-ästhetische Probleme der Musik.

Es ist fast eine Geschichte der Akustik in Kurzform, wenn HELMHOLTZ am Ende seiner Einleitung zur 1. Auflage 1862 schrieb:

Bisher ist von der Lehre vom Schall fast nur der physikalische Teil ausführlich behandelt worden, d.h. man hat die Bewegungen untersucht, welche tönende feste, flüssige oder luftförmige Körper ausführen, wenn sie einen dem Ohr vernehmbaren Schall hervorbringen. Diese physikalische Akustik ist ihrem Wesen nach nichts als ein Teil der Lehre von den Bewegungen der elastischen Körper ... Neben der physikalischen besteht eine physiologische Akustik, welche die Vorgänge im Ohr selbst zu untersuchen hat. Von dieser Wissenschaft hat derjenige Teil, welcher die Leitung der Schallbewegung vom Eingang des Ohres bis zu den Nerven ausbreitungen im Labyrinth des inneren Ohres behandelt, mannigfache Bearbeitung erfahren ... Freilich müssen wir zugleich sagen, daß noch nicht viel sichergestellte Ergebnisse hierin gewonnen sind ... Die Untersuchung der Vorgänge in jedem unserer

Sinnesorgane hat im allgemeinen drei verschiedene Teile. Zunächst ist zu untersuchen, wie das Agens, welches die Empfindung erregt, also im Auge das Licht, im Ohr der Schall, bis zu den empfindenden Nerven hingeleitet wird. Wir können diesen ersten Teil den physikalischen Teil der entsprechenden physiologischen Untersuchung nennen. Zweitens sind die verschiedenen Erregungen der Nerven selbst zu untersuchen, welche verschiedenen Empfindungen entsprechen, und endlich die Gesetze, nach welchen aus solchen Empfindungen Vorstellungen bestimmter äußerer Objekte, d.h. Wahrnehmungen, zustande kommen. Das gibt also noch zweitens einen vorzugsweise physiologischen Teil der Untersuchung, der die Empfindungen, und drittens einen psychologischen, der die Wahrnehmungen behandelt. Während nun für die Lehre vom Gehör der physikalische Teil schon vielfältig in Angriff genommen worden ist, haben wir bisher aus dem physiologischen und psychologischen Teile nur unvollständige und zufällige Einzelheiten in der Wissenschaft aufzuweisen ... (HELMHOLTZ 1913a, 5-6)

Dieses lange Zitat stellte nicht nur einen historischen Rückblick dar, es zeigte auch Forschungsschwerpunkte auf, wie sie von HELMHOLTZ mit initiiert wurden. Zusammen mit der in dieser Zeit sich allmählich entwickelnden Elektroakustik führte das schließlich - gemeinsam mit den Arbeiten und Erfahrungen von Musikern, Musikinstrumentenbauern und Architekten - zu dem Lehrgebäude, das heute die Akustik darstellt.



## 9. Literaturverzeichnis

ACHARD, FRANZ CARL (1753-1821)

1791a Vorlesungen über die Experimentalphysik. 2. Teil. Berlin

AMBERGER, ERIK

1950a Die Mitglieder der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin 1700-1950. Berlin

ANDRADE, EDWARD NEVILLE DA COSTA (1887-1971); SMITH, D.H.

1931a The method of formation of sound figures on a vibrating plate. Proc. Phys. Soc. London  
**43**, 405-411

ARCHITEKTEN-VEREIN ZU BERLIN (Hrsgb.)

1877a Berlin und seine Bauten. 1. Teil. Berlin

ASCHOFF, VOLKER (geb. 1907)

1981a Drei Vorschläge für nichtelektrisches Fernsprechen aus der Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert. Deutsches Museum München. Abhandlungen und Berichte **49**, Heft 3

1984a Geschichte der Nachrichtentechnik. Bd. 1: Beiträge zur Geschichte der Nachrichtentechnik von ihren Anfängen bis zum Ende des 18. Jahrhunderts. Berlin etc. 2. Aufl. Berlin etc. 1989

AUERBACH, FELIX (1856-1933)

1909a Akustik. In: WINKELMANN, A. (Hrsgb.): Handbuch der Physik. Bd. 2. 2. Aufl. Leipzig

BARBIERI, PATRIZIO

1992a Tartinis Dritter Ton und Eulers Harmonische Exponenten. Mit einem unveröffentlichten Manuskript Tartinis. Musiktheorie **7**, 219-234

BÉKÉSY, GEORG V. (1899-1972); ROSENBLITH, W.A.

1948a The early history of hearing - observations and theories. Journal of the Acoustical Society of America **20**, 727-748

BELL, JAMES FREDERICK (geb. 1914)

1973a The experimental foundations of solid mechanics. In: FLÜGGE, S. (ed.): Handbuch der Physik. Bd. VIa/1. Berlin etc.

BELLMANN, FRITZ; HARKSEN, MARIE-LUISE; WERNER, ROLAND

1979a Die Denkmale der Lutherstadt Wittenberg. Weimar

**BENZENBERG, JOHANN FRIEDRICH (1777-1846)**

1812a Versuche über die Geschwindigkeit des Schalles in verschiedenen Luftarten. *Annalen der Physik* 42, 12-29

**BERNOULLI, DANIEL (1700-1782)**

1751a De vibrationibus et sono laminarum elasticarum commentationes physico-mathematicae. *Commentarii Academiae Scientiarum Imp. Petropolitanae* 13(1741-43), 105-120

1755a Réflexions et éclaircissements sur les nouvelles vibrations des cordes. *Histoire de l'Académie R. des Sciences et Belles-Lettres* 9(1753), 147-172. Zitat S. 151-153: "... tous les corps sonores renferment en puissance une infinité de sons ... Mais ce n'est pas de cette multitude de vibrations appliquée aux cordes tendues, que Mrs. d'Alembert & Euler prétendent parler; elle n'étoit pas inconnue à M. Taylor ... Effectivement tous les Musiciens conviennent, qu'une longue corde pincée donne en même tems, outre son ton fondamental, d'autre tous beaucoup plus aigus ... Voilà une preuve évidente, qu'il peut se faire dans une seule & même corde en un mélange de plusieurs sortes de vibrations Tayloriennes à la fois." (Deutsche Übersetzung aus SZABÓ 1987a, 341)

1764a Recherches physiques, mécaniques et analytique, sur le son et sur les tons des tuyaux d'orgues différemment construits. *Mémoires de l'Académie R. des Sciences depuis 1666 jusqu'à 1699, Paris 1762*, 431-485

**BERNOULLI, JAKOB II (1759-1789)**

1788a Essai théorique sur les vibrations des plaques élastiques, rectangulaires et libres. *Nova Acta Academiae Scientiarum Imp. Petropolitanae* 5(1787), 197-219

**BIOT, JEAN BAPTISTE (1774-1862)**

1804a Untersuchungen über die Fortpflanzung des Schalles in Luft. *Annalen der Physik* 18, 385-397. Übersetzung von: Sur la théorie du son. *Journal de physique* 55(1802), 173-182 (dem Autor war nur die Übersetzung zugänglich)

1810a Versuche über die Fortpflanzung des Schalles durch feste Körper und durch sehr lange Röhren. *Annalen der Physik* 35, 407-424. Übersetzung von: Expériences sur la propagation du son à travers les corps solides et à travers l'air, dans des tuyaux très-allongés. *Mém. de Physique et de Chimie de la Société d'Arcueil* 2(1809), 405-423 (dem Autor war nur die Übersetzung zugänglich)

1810b Versuch über die Erzeugung des Schalles in Dämpfen. *Annalen der Physik* 35, 425-432. Übersetzung von: Expériences sur la production du son dans les vapeurs. *Mém. de Physique et de Chimie de la Société d'Arcueil* 2(1809), 94-103 (dem Autor war nur die Übersetzung zugänglich)

- BOCKMANN, HARTMUT (geb. 1934); SCHILLING, HEINZ (geb. 1942); SCHULZE, HAGEN (geb. 1943); STÜRMER, MICHAEL (geb. 1938)  
 1990a Mitten in Europa. Deutsche Geschichte. Berlin (Goldmann 12807)
- BRANDT, EDUARD (†-1861)  
 1861a Ueber die Verschiedenheit des Klanges (Klangfarbe). *Annalen der Physik und Chemie* **112**, 324-336
- BUCHWALD, EBERHARD (1884-1975)  
 1946a Goethes Naturschau. Die Naturwissenschaften **33**, 259-265
- BÖHLER, R.W.  
 1988a Meteorite. Urmaterie aus dem interplanetaren Raum. Basel
- BUSSE, FRIEDRICH GOTTLIEB VON (1756-1835)  
 1792a Neue Bemerkungen über die Vogelötöne auf Geigen und Harfen. *Musikalisches Wochenblatt*, 23. Stück, 177-181; 24. Stück, 185-187
- CAGNIARD DE LA TOUR, CHARLES (1777-1859)  
 1819a Sur la sirène, nouvelle machine d'acoustique destinée à mesurer les vibrations de l'air qui constituent le son. *Annales de chimie et de physique* **12**, 167-171
- CANNON, JOHN T. (geb. 1941); DOSTROVSKY, SIGALIA (geb. 1942)  
 1981a The evolution of dynamics. *Vibration theory from 1687 to 1742*. New York etc. (Studies in the History of Mathematics and Physical Sciences 6)
- CATEL, LOUIS (1776-1819)  
 1815a Grundzüge einer Theorie der Bauart Protestantischer Kirchen. Berlin
- CILADNI, ERNST FLORENS FRIEDRICH (1756-1827)  
 1782a Unveröffentlichter Brief vom 24.11.1782 aus Wittenberg, vermutlich an einen Professor in Leipzig. Staatsbibliothek zu Berlin. Preußischer Kulturbesitz  
 1787a Entdeckungen über die Theorie des Klanges. Leipzig. Wiederabdruck Leipzig 1980  
 1790a Von dem Euphon, einem neuerfundenen musikalischen Instrumente. *Journal des Luxus und der Moden* **5**, 539-543  
 1790b Von dem Euphon, einem neuerfundenen musikalischen Instrumente. *Journal von und für Deutschland* **7**, Heft 3, 201-202  
 1792a Ueber die Längentöne einer Saite. *Musikalische Monatsschrift* (Berlin) **2**. Stück, 33-35  
 1794a Ueber den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen, und über einige damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen. Leipzig und Riga. Wieder-

- abdruck in CHLADNI/HOPPE 1979a
- 1795a Brief an den Herausgeber. Archiv der reinen und angewandten Mathematik 1, 126-128
- 1795b Beyträge zur Beförderung eines besseren Vortrages der Klanglehre. Der Gesellschaft Naturforschender Freunde zu Berlin neue Schriften 1, 102-124
- 1795c Nachricht von einigen neuen Vervollkommnungen des Euphons, von dessen Erfinder, Hrn. Doctor Chladni, aus Wittenberg. Journal des Luxus und der Moden 10, 309-313
- 1795d Beobachtungen über die durch Brennen der entzündbaren Luft in einer Röhre hervorzubringenden Töne. Der Gesellschaft Naturforschender Freunde zu Berlin neue Schriften 1, 125-130
- 1796a Über Longitudinalschwingungen der Saiten und Stäbe. Erfurt. Ebenfalls in: Acta Academiae Electoralis Moguntinae Scientiarum utilium quae Erfordiae est 12
- 1797a Auszug aus der Schrift: Ueber Longitudinalschwingungen der Saiten und Stäbe. Nebst beygefüigten Bemerkungen über die Fortleitung des Schalles durch feste Körper. Magazin für den neuesten Zustand der Naturkunde 1, Heft 1, 7-17
- 1798a Bemerkungen über die Töne einer Pfeife bei verschiedenen Gasarten. Magazin für den neuesten Zustand der Naturkunde 1, Heft 3, 65-79. Wiederabdruck in: Philos. Mag. 4(1799), 275-282
- 1799a Ueber drehende Schwingungen eines Stabes. Annalen der Physik 2, 87-90
- 1799b Ueber drehende Schwingungen eines Stabes. Der Gesellschaft Naturforschender Freunde zu Berlin neue Schriften 2, 274-277
- 1800a Erklärung, veranlasst durch die Abhandlung zu Anfange des 19ten Stückes der allgem. musik. Zeitung d. J.. Allgemeine musikalische Zeitung (Leipzig) 2, Intelligenzblatt No. 22, 50
- 1800b Nachrichten von dem Clavicylinder, einem neuerfundnen musikalischen Instrumente. Magazin für den neuesten Zustand der Naturkunde 2, 150-153
- 1800c Nachricht des Herrn Dr. Chladni's in Wittenberg von seinem Clavicylinder. Annalen der Physik 4, 494-496
- 1800d Nachricht von dem Clavicylinder, einem neuerfundnen Instrumente, enthaltend Bemerkungen über einige etwas damit verwandte Tasteninstrumente. Allgemeine musikalische Zeitung (Leipzig) 2, 305-313
- 1800e Eine neue Art, die Geschwindigkeit der Schwingungen, bei einem jeden Ton durch den Augenschein zu bestimmen, nebst einem Vorschlage zu einer festen Tonhöhe. Annalen der Physik 5, 1-9
- 1802a Die Akustik. Leipzig. 2. Aufl. Leipzig 1830
- 1809a Traité d'Acoustique. Paris. 2. Aufl. Paris 1812
- 1810a Etwas über die Schicksale und Beschäftigungen des Hrn. D. Chladni während seines Aufenthaltes in Paris. Allgemeine musikalische Zeitung (Leipzig) 12, 419-422
- 1817a Neue Beyträge zur Akustik. Leipzig. Wiederabdruck Leipzig 1980
- 1818a Verschiedene physikalische Bemerkungen aus einem Briefe des D. Chladni. Annalen der Physik 59, 1-11

- 1819a Ueber Feuer-Meteore, und über die mit denselben herabgefallenen Massen. Wien
- 1819b Einige wissenschaftliche Nachrichten aus München, aus einem Briefe des Dr. Chladni. *Annalen der Physik* 61, 98-103
- 1821a Beyträge zur praktischen Akustik und zur Lehre vom Instrumentbau, enthaltend die Theorie und Anleitung zum Bau des Clavicylinders und damit verwandter Instrumente. Leipzig. Wiederabdruck Leipzig 1980
- 1821b Nachrichten von einigen (theils wirklichen, theils vielleicht nur angeblichen) neueren Erfindungen und Verbesserungen musikalischer Instrumente. *Allgemeine musikalische Zeitung* (Leipzig) 23, 393-398
- 1821c Nachrichten von der neuesten musikalischen Literatur in Italien, mitgetheilt von E.F.F. Chladni, aus dem XVIIten und XXIsten Bande der *Biblioteca Italiana*. Nebst einigen von ihm beygefügtten Bemerkungen über Bogenklaviere. *Allgemeine musikalische Zeitung* (Leipzig) 23, 583-587
- 1821d Über seine neuern Bekanntmachungen akustischer Gegenstände und praktischer Anwendung derselben. *Annalen der Physik* 69, 51-64
- 1821e Erläuterung und Berichtigung einer Aeusserungen in dem vorstehenden Aufsätze des Herrn Dr. Felix Savart. *Annalen der Physik* 68, 160-164
- 1822a Fortsetzung der Beyträge zur praktischen Akustik, enthaltend manche Verbesserungen und Zusätze, wie auch Nachrichten von einem vor kurzem auf eine ganz neue Art gebauten Euphon. *Allgemeine musikalische Zeitung* (Leipzig) 24, 789-792; 805-814; 821-826
- 1824a Ueber Beschäftigung Anderer mit dem Bau des Clavicylinders. *Allgemeine musikalische Zeitung* (Leipzig) 26, 825-828
- 1824b Nachrichten von einigen (theils wirklichen, theils vielleicht nur angeblichen) neueren Erfindungen und Verbesserungen musikalischer Instrumente. *Allgemeine musikalische Zeitung* (Leipzig) 26, 809-814
- 1824c Über die Hervorbringung der menschlichen Sprachlaute. *Annalen der Physik* 76, 187-216
- 1825a Bemerkungen über die Klangfiguren der Scheiben. *Annalen der Physik und Chemie* 5, 345-350
- 1825b Nachrichten von einigen (theils wirklichen, theils vielleicht nur angeblichen) neueren Erfindungen und Verbesserungen musikalischer Instrumente. *Allgemeine musikalische Zeitung* (Leipzig) 27, 725-730
- 1826a Nachrichten von einigen (theils wirklichen, theils vielleicht nur angeblichen) neueren Erfindungen und Verbesserungen musikalischer Instrumente. *Allgemeine musikalische Zeitung* (Leipzig) 28, 693-696
- 1826b Über seine Aufnahme bey Napoléon und sonst in Paris. *Cécilia* 5, 137-144
- 1826c Erklärung der gleichstarken Schallverbreitung einer Stimmgabel, in der Richtung der Schwingungen und in der Quere, und der äußerst schwachen in einer dazwischen liegenden Richtung. *Archiv für die gesamte Naturlehre* 7, 92-96
- 1826d Weitere Bemerkungen über die gleich starke Schallverbreitung in der Richtung der Schwingungen und in die Quere, und über die schwächere in dazwischen liegenden Richtungen;

- nach gemeinschaftlich mit Herrn Dr. Wilhelm Sömmering angestellten Untersuchungen. Archiv für die gesamte Naturlehre 8, 91-103
- 1826e Nachrichten von neueren Untersuchungen der Stimm- und Singwerkzeuge. Allgemeine musikalische Zeitung (Leipzig) 28, 299-301
- 1826f Ueber vortheilhafte Einrichtung eines Locals für gute Wirkung des Schalles. Allgemeine musikalische Zeitung (Leipzig) 28, 565-570
- 1826g Ueber Töne bloss durch schnell auf einander folgende Stösse, ohne einen klingenden Körper. Annalen der Physik und Chemie 8, 453-460
- 1827a E.F.F. Chladni †. Caecilia 6, 297-308
- 1827b Kurze Uebersicht der Schall- und Kanglehre, nebst einem Anhang, die Entwicklung und Anordnung der Tonverhältnisse betreffend. Mainz
- 1827c Aus einem Briefe des Hrn. Dr. Chladni, den neuen Saal der Berliner Sing-Akademie betreffend. Allgemeine musikalische Zeitung (Leipzig) 29, 44-45
- 1827d Über Schallverstärkungen in den Theatern der Alten. Caecilia 6, 117-128
- 1827e Über die verschiedene Beschaffenheit des Klanges eines Instrumentes, nachdem es von verschiedenen Spielern behandelt wird; auch über das Zerschlagen der Claviersaiten (mit einem Vorwort von Gfr. Weber). Caecilia 6, 183-192

CHLADNI, ERNST FLORENS FRIEDRICH; Erläuterungen von GÜNTER HOPPE

- 1979a Über den kosmischen Ursprung der Meteorite und Feuerkugeln (1794). Leipzig (Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften 258)

CLEBSCH, RUDOLF FRIEDRICH ALFRED (1833-1872)

- 1862a Theorie der Elasticität fester Körper. Leipzig

COLLADON, DANIEL (1802-1893)

- 1887a Mémoire sur la compression des liquides et la vitesse du son dans l'eau par MM. D. Colladon et C. Sturm. Paris

COLLADON, JEAN-DANIEL (1802-1893); STURM, JACQUES CHARLES FRANÇOIS (1803-1855)

- 1827a Sur la compression des liquides. Du mémoire sur la compression des liquides. Annales de chimie et de physique 36, 113-159, 225-257. Deutsche Übersetzung in: Annalen der Physik und Chemie 12(1828), 39-76, 161-197

CREMER, LOTHAR (1905-1990)

- 1976a Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Bd. II: Wellentheoretische Raumakustik. Stuttgart
- 1981a Physik der Geige. Stuttgart

DAHL, HELMA (Bearb.)

1970a Goethes amtliche Schriften. Goethes Tätigkeit im Geheimen Consilium. 2. Band: Die Schriften der Jahre 1788-1819. 2. Halbband: 1798-1819. Weimar

DELAROCHE, F. (1775?-1813); BÉRARD, JACQUES ETIENNE (1789-1869)

1813a Mémoire sur la détermination de la chaleur spécifique des différens gaz. *Annales de chimie* 85, 72-110, 113-182

DOSTROVSKY, SIGALIA (geb. 1942)

1975a Early vibration theory: Physics and music in the seventeenth century. *Archive for History of Exact Sciences* 14, 169-218

1975b Félix Savart. In: GILLISPIE, CHARLES COULSTON (ed.): *Dictionary of scientific biography*. Vol. XII. New York

DOSTROVSKY, SIGALIA (geb. 1942); BELL, JAMES F. (geb. 1914); TRUESDELL CLIFFORD (geb. 1919)

1980a Physics of music. In: SADIE, S. (ed.): *The new Grove dictionary of music and musicians*. Vol. 14. London, S. 664-677

DOSTROVSKY, SIGALIA (geb. 1942); CANNON, JOHN T. (geb. 1941)

1987a Entstehung der musikalischen Akustik (1600-1750). In ZAMINER, FRIEDER (Hrsgb.): *Geschichte der Musiktheorie*. Bd. 6: Hören, Messen und Rechnen in der frühen Neuzeit. Darmstadt, S. 7-79

DOVE, HEINRICH WILHELM (1803-1879)

1851a Beschreibung einer Lochsirene für gleichzeitige Erregung mehrerer Töne. *Annalen der Physik und Chemie* 82, 596-598

DREYER, ERNST-JÜRGEN (geb. 1934)

1976a Versuch, eine Morphologie der Musik zu begründen. Mit einer Einleitung über Goethes Tonlehre. Bonn (Abhandlungen zur Kunst-, Musik- u. Literaturwissenschaft 229)

DU BOIS-REYMOND, FELIX HENRY (1782-1865)

1862a Kadmus oder Allgemeine Alphabetik vom physikalischen, physiologischen und graphischen Standpunkt. Berlin

EBSTEIN, ERICH (1880-1931)

1905a Aus Chladnis Leben und Wirken. *Mitteilungen zur Geschichte der Medizin und der Naturwissenschaften* 4, 438-460

1907a Chladnis Vortragsreise durch Norddeutschland im Jahre 1817. *Mitteilungen zur Geschichte der Medizin und der Naturwissenschaften* 6, 103-107

ERLER, G. (Hrsgb.)

1909a Die Jüngere Matrikel der Universität Leipzig 1559-1809. Bd. III. Leipzig

ERSCH, JOHANN SAMUEL (1766-1828); GRUBER, JOHANN GOTTFRIED (1774-1851)

1828a Allgemeine Encyclopädie der Wissenschaften und Künste. Bd. 17. Leipzig

EULER, LEONHARD (1707-1783)

1744a De curvis elasticis. In: Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes. Additamentum I. Lausanne/Genf. Wiederabdruck in Leonhardi Euleri Opera Omnia. Ser. 1, Vol. XXIV, S. 231-297. Bern 1952

1766a Tentamen de sono campanorum. Novi Commentarii Academiae Scientiarum Imp. Petropolitanae 10(1764), 261-281. Wiederabdruck in Leonhardi Euleri Opera Omnia. Ser. 2, Vol. X, S. 360-376. Bern 1947

1766b De motu vibratorio tympanorum. Novi Commentarii Academiae Scientiarum Imp. Petropolitanae 10(1764), 243-260. Wiederabdruck in: Leonhardi Euleri Opera Omnia. Ser. 2, Vol. X, S. 344-359. Bern 1947

1772a Sectio quarta de motu aëris in tubis. Novi Commentarii Academiae Scientiarum Imp. Petropolitanae 16(1771), 281-425. Wiederabdruck in: Leonhardi Euleri Opera Omnia. Ser. 2, Vol. XIII, S. 262-369. Lausanne 1955

1782a Investigatio motuum quibus laminae et virgae elasticæ contremiscunt. Acta Academiae Scientiarum Imp. Petropolitanae I(1779), 103-161. Wiederabdruck in: Leonhardi Euleri Opera Omnia. Ser. 2, Vol. XI, part 1, S. 223-268. Lausanne 1957

EYRING, CARL F. (1889-1951)

1929/ Reverberation time in "dead" rooms. Journal of the Acoustical Society of America

30a 1(1929/30)2, 217-241

FARADAY, MICHAEL (1791-1867)

1831a On a peculiar class of Acoustical Figures; and on certain Forms assumed by groups of particles upon vibrating elastic Surfaces. Philos. Trans. Roy. Soc. London, 299-318. Wiederabdruck in: LINDSAY, R. BRUCE (ed.): Acoustics. Historical and Philosophical Development. Stroudsburg, Pa. 1973, S. 211-230 (Benchmark Papers in Acoustics). Zitat S. 306: "The currents which I have considered as existing upon the surface of the plate, membranes, &c. from the quiescent parts towards the centres or lines of vibration, arise necessarily from the mechanical action of that surface upon the air. As any particular part of the surface moves upwards in the course of its vibration, it propels the air and communicates a certain degree of force to it ..; as it returns, in the course of its vibration, it recedes from the air so projected, and the latter consequently tends to return into the partial vacuum thus formed ..., an advance of the air immediately above it is made from the quiescent towards the vibrating parts of the plates."



FINN, BERNARD S.

1964a Laplace and the speed of sound. *Isis* 25, 7-19

FISCHER, JOACHIM

1988a Napoleon und die Naturwissenschaften. Wiesbaden/Stuttgart (Boethius. Texte und Abhandlungen zur Geschichte der exakten Wissenschaften 16)

FISCHER, WALTHER

1932a Erinnerungen einiger bekannter Fürstenschüler an ihre in Grimma verbrachte Schulzeit. *Augustiner-Blätter* 9, H.2, 37-46

FLETCHER, NEVILLE H.; ROSSING, THOMAS, D. (geb. 1929)

1991a *The physics of musical instruments*. New York etc.

FORKEL, JOHANN NIKOLAUS (1749-1818)

1779a *Musikalisch-kritische Bibliothek*. Bd. 3. Gotha

FOURIER, JEAN BAPTISTE JOSEPH DE (1768-1830)

1822a *Théorie analytique de la chaleur*. Paris

FRANKEL, EUGENE

1977a J., B. Biot and the mathematization of experimental physics in Napoleonic France. *Historical Studies in the Physical Science* 8, 33-72

FRAUSTADT, ALBERT

1900a *Grimmenser-Stammbuch. Lebensnachrichten über Zöglinge der Fürstenschule Grimma vom Jahre der Gründung 1550 bis heute*. Meißen

FRIEDENSBURG, WALTER

1917a *Geschichte der Universität Wittenberg*. Halle/S

FRÖHLICH, C.W.

1818a Einige Gedanken, über die Verbreitung des Schalls in die Ferne. *Annalen der Physik* 58, 401-405

GERMAIN, SOPHIE (1776-1831)

1821a *Recherches sur la théorie des surfaces élastiques*. Paris [Übersetzung des Zitats nach SZABÓ 1987a, 412]

GOETHE, JOHANN WOLFGANG VON (1749-1832)

1894a Weimarer Ausgabe. IV. Abt., Bd. 16 (Briefe 1802.1803). Weimar

1900a Weimarer Ausgabe. IV. Abt., Bd. 23. Weimar

1908a Weimarer Ausgabe. IV. Abt., Bd. 45. Weimar

#### GRATTAN-GUINNESS, IVOR

1990a *Convolutions in French mathematics, 1800-1840*. Basel etc. (Science Networks. Historical Studies 2-4)

#### HÄLLSTRÖM, GUSTAV GABRIEL (1775-1844)

1832a Von den Combinationstönen. *Annalen der Physik und Chemie* 24, 438-466

#### HARTMANN, GÖNTHER

1990a Aus der Frühgeschichte der Raumakustik. *Acustica* 72, 247-257

#### HELMHOLTZ, HERMANN VON (1821-1894)

1856a Ueber Combinationstöne. *Annalen der Physik und Chemie* 99, 497-540. Wiederabdruck in: *Wissenschaftliche Abhandlungen*. Bd. 1. Leipzig 1882, S. 263-302

1857a Ueber die Vocale. *Archiv für die holl. Beitr. zur Natur- u. Heilkunde* 1, 354-355. Wiederabdruck in: *Wissenschaftliche Abhandlungen*. Bd. 1. Leipzig 1882, S. 395-396

1859a Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden. *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 57, 1-72. Wiederabdruck in: *Wissenschaftliche Abhandlungen*. Bd. 1. Leipzig 1882, S. 303-382 und *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften*. Bd. 80. Leipzig 1896. Nachdruck Thun u. Frankfurt/M 1995

1859b Ueber die Klangfarbe der Vocale. *Annalen der Physik und Chemie* 108, 280-290. Wiederabdruck in: *Wissenschaftliche Abhandlungen*. Bd. 1. Leipzig 1882, S. 397-407

1860a On the motion of the strings of a violin. *Proc. Glasgow Philos. Soc.*, 4. Ser, 21, 393-396. Wiederabdruck (in deutscher Übersetzung) in: *Wissenschaftliche Abhandlungen*. Bd. 1. Leipzig 1882, S. 410-419

1861a Zur Theorie der Zungenpfeifen. *Verhandlungen des naturhist.-med. Vereins Heidelberg* 2, 159-164. Wiederabdruck in: *Wissenschaftliche Abhandlungen*. Bd. 1. Leipzig 1882, S. 388-394

1869a Ueber die Schallschwingungen in der Schnecke des Ohres. *Verhandl. des Heidelberger Vereins* 5, 33-38. Wiederabdruck in: *Wissenschaftliche Abhandlungen*. Bd. 2. Leipzig 1883, S. 582-588

1913a *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Braunschweig. 1. Aufl. 1863, 2. Aufl. 1865, 3. Aufl. 1870, 4. Aufl. 1877, 5. Aufl. 1896, 6. Aufl. 1913. Wiederabdruck der 6. Aufl. Hildesheim 1968

#### HENRY, JOSEPH (1797-1878)

1857a On acoustics applied to public buildings. *Proc. American Association for the Advancement of Science* 10, 119-135

HEYDE, HERBERT (geb. 1940)

1986a Musikinstrumentenbau. 15.-19. Jahrhundert. Kunst-Handwerk-Entwurf. Leipzig

HOPPE, GÜNTER

1976a Das Pallas-Eisen, ein Ausgangspunkt für die Meteoritentheorie E.F.F. Chladnis (1794). *Zeitschr. für geologische Wissenschaften (Berlin)* 4, 521-528

1977a Ernst Florens Friedrich Chladni. Zum 150. Todestag des Begründers der Meteoritenkunde. *Chemie der Erde* 36, 249-262

1987a Die Meteoritensammlung E.F.F. Chladnis. *Die Sterne* 63, 315-329

HUNT, FREDERICK VINTON (1905-1972)

1978a *Origins in acoustics. The science of sound from antiquity to the age of Newton.* New Haven/London

HUTCHINS, CARLEEN M. (geb. 1911)

1983a A history of violin research. *Journal of the Acoustical Society of America* 73, 1421-1440

1988a Klang und Akustik der Geige. In: *Die Physik der Musikinstrumente. Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung.* Heidelberg, S. 88-98

JUNGHANS, HALMAR

1979a Wittenberg als Lutherstadt. Berlin

JUNTKE, FRITZ (Bearb.)

1966a *Album Academiae Vitebergensis. Jüngere Reihe, Teil 3: 1710-1812.* Halle/S

KEIMS, L.; KUHLE, W.

1959a *Zur Akustik der Thomaskirche in Leipzig.* *Phono* 5, 6, 3-5

KEMPELEN, WOLFGANG RITTER VON (1734-1804)

1791a *Mechanismus der menschlichen Sprache nebst Beschreibung seiner sprechenden Maschine.* Wien

KERBY, FRANCIS; MERRICK, A.

1811a Einige Versuche über das Tönen der Gasarten. *Annalen der Physik* 39, 438-441. Übersetzung von: The results of some experiments on the sonorous properties of gases. *Journal of Nat. Philosophy, Chemistry and the Arts* 27(1810), 269-271 (dem Autor war nur die Übersetzung zugänglich)

KIEFER, J.

- 1993a Die Vortragstätigkeit an der "Akademie nützlicher Wissenschaften" zu Erfurt während der Jahre 1754-1803. Sonderschriften der Akademie gemeinnütziger Wissenschaften zu Erfurt 19, 73-180

KIRCHHOFF, GUSTAV (1824-1887)

- 1850a Ueber das Gleichgewicht und die Bewegung einer elastischen Platte. Journal für die reine und angewandte Mathematik 40, 51-88
- 1868a Ueber den Einfluss der Wärmeleitung in einem Gase auf die Schallbewegung. Annalen der Physik und Chemie 134, 177-193

KOENIG, RUDOLPH (1832-1901)

- 1881a Bemerkungen über die Klangfarbe. Annalen der Physik und Chemie 14, 369-393

KRAFFT, FRITZ (Hrsgb.) (geb. 1935)

- 1986a Große Naturwissenschaftler. Biographisches Lexikon. 2. Aufl. Düsseldorf

KRATZENSTEIN, CHRISTIAN GOTTLIEB (1723-1795)

- 1780a Tentamen coronatum de voce. St. Petersburg
- 1782a Sur la naissance et la fonction des voyelles. Journal de physique 21, 358-380

KUNDT, AUGUST ADOLPH (1839-1894)

- 1866a Ueber neue akustische Staubfiguren und Anwendung derselben zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern und Gasen. Annalen der Physik und Chemie 127, 497-523

LAGRANGE, JOSEPH LOUIS (1736-1813)

- 1759a Recherches sur la nature et la propagation du son. Miscellanea Philosophico-Mathematica Societatis Privatae Taurinensis 1, I-X, 1-112. Wiederabdruck in: Oeuvres de Lagrange (Hrsgb.: M. J.-A. SERRET). Bd. 1. Paris 1867, S. 39-148
- 1760/ 61a Nouvelles recherches sur la nature et la propagation du son. Miscellanea Philosophico-Mathematica Societatis Privatae Taurinensis 2, 11-172. Wiederabdruck in: Oeuvres de Lagrange (Hrsgb.: M. J.-A. SERRET). Bd. 1. Paris 1867, S. 151-316

LAMBERT, JOHANN HEINRICH (1728-1777)

- 1777a Observations sur les flûtes. Nouv. Mém. Acad. R. des Sciences et des Belles Lettres Berlin 1775, 13-48

LANGHANS, CARL FERDINAND (1782-1869)

- 1810a Ueber Theater oder Bemerkungen über Katakustik in Beziehung auf Theater. Berlin

LAPLACE, PIERRE SIMON (1749-1827)

- 1817a Ueber die Länge des Sekundenpendels und die Geschwindigkeit des Schalls in verschiedenen Mitteln. *Annalen der Physik* 57, 225-243. Übersetzung von: Sur la vitesse du sons dans l'air et dans l'eau. *Annales de chimie et de physique* 3(1816), 238-241. Zitat S. 238-239: "Lorsqu'on élève sa température, sa pression restant la même, une partie seulement du calorique qu'il reçoit est employée à produire cet effet: l'autre partie, qui devient latente, sert à dilater son volume. C'est est qui se développe quand on réduit par la compression l'air ainsi dilaté à son volume primitif. La chaleur dégagée par le rapprochement de deux molécules voisines d'une fibre aérienne vibrante, élève donc leur température, et se répand de proche en proche sur l'air et les corps environnans; mais cette diffusion et l'irradiation se faisant avec une extrême lenteur relativement à la vitesse des vibrations, on peut supposer sans erreur sensible que, pendant la durée d'une vibrations, la quantité de chaleur reste la même entre deux molécules voisines. Ainsi ces molécules, en se rapprochant, se repoussent davantage, d'abord, parce que leur température étant supposée constante, leur répulsion mutuelle augmente en raison inverse de leur distance; ensuite, parce que le calorique latent qui se développe élève leur température. Newton n'a eu égard qu'à la première de ces deux causes de répulsion."

LENIHAN, J.M.A.

- 1951a Mersenne and Gassendi. An early chapter in the history of sound. *Acustica* 1, 96-99  
 1952a The velocity of sound in air. *Acustica* 2, 205-212

LEWCOCK, RONALD

- 1980a Acoustics. §1: Room acoustics. In: SADIE, STANLEY (ed.): *The New Grove Dictionary of Music and Musicians*. Bd. 1. London

LIND, GUNTER (geb. 1939)

- 1992a Physik im Lehrbuch 1700-1850. Zur Geschichte der Physik und ihrer Didaktik in Deutschland. Berlin etc.

LINDSAY, R. BRUCE (1900-1985)

- 1966a The story of acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America* 39, 629-644

LISCOVIUS, KARL FRIEDRICH SALOMO (1780-1844)

- 1842a Ueber Pfeifen mit häutigen Wänden. *Annalen der Physik und Chemie* 57, 497-503  
 1843a Ueber den Einfluss der verschiedenen Weite der Labialpfeifen auf ihre Tonhöhe. *Annalen der Physik und Chemie* 58, 95-100

LOEWENFELD, K.

- 1929a E.F.F. Chladni. Skizze von Leben und Werk. *Abhandlungen aus dem Gebiet der Naturwis-*

senschaften (Hrsgb. vom Naturwiss. Verein in Hamburg) 22, 117-144

LOTTERMOSE, WERNER (geb. 1909)

1952a Nachhallzeiten in Barockkirchen. *Acustica* 2, 109-111

MAI, HARTMUT

1976a Der Kirchenbau des 19. und frühen 20. Jahrhunderts in Thüringen. In: *Laudate dominum. Thüringer kirchliche Studien. Bd. 3.* Berlin

MAZZOLA, GUERINO

1990a Geometrie der Töne. *Elemente der Mathematischen Musiktheorie.* Basel etc.

McKUSICK, VICTOR A.; WISKIND, H. KENNETH

1959a Félix Savart (1791-1841), physician-physicist. Early studies pertinent to the understanding of murmurs. *Journal of the History of Medicine and Allied Science* 14, 411-423

MELDE, FRANZ (1832-1901)

1888a Über Chladni's Leben und Wirken, nebst einem chronologischen Verzeichnis seiner literarischen Arbeiten. 2. Aufl. Marburg

MEUSEL, JOHANN GEORG (1743-1820)

1811a Lexikon der vom Jahre 1750 bis 1800 verstorbenen deutschen Schriftsteller. Bd. 11. Leipzig. Artikel über G.H. Richter

MEYER, ERWIN (1899-1972); CREMER, LOTHAR (1905-1990)

1933a Über die Hörsamkeit holzausgekleideter Räume. *Z. techn. Physik* 14, 500-507

MEYER, JÜRGEN (geb. 1933)

1978a Raumakustik und Orchesterklang in den Konzertsälen Joseph Haydns. *Acustica* 14, 145-162

1980a Akustik und musikalische Aufführungspraxis. 2. Aufl. Frankfurt/M. (Fachbuchreihe: Das Musikinstrument 24)

MEYER, JÜRGEN (geb. 1933); WÖGRAM, KLAUS (geb. 1940)

1989a Perspektiven der Musikinstrumentenakustik. *Acustica* 69, 1-12

MICHEL, ULRICH

1977a Atlas zur Musik. Tafeln und Texte. Systematischer Teil. Historischer Teil: Von den Anfängen bis zur Renaissance. München

MILLER, DAYTON CLARENCE (1866-1941)

1935a Anecdotal history of the science of sound. To the beginning of the 20th century. New York

MÜNCKE, GEORG WILHELM (1772-1847)

1814a Ueber die Fortpflanzung des Schalles durch Wasser. *Annalen der Physik* **48**, 66-104

OHM, GEORG SIMON (1789-1854)

1839a/ Bemerkungen über Combinationstöne und Stüsse. *Annalen der Physik und Chemie* **47**,

1892a 463-466. Wiederabdruck in: *Gesammelte Abhandlungen von G.S. Ohm* (Hrsgb.: E. LOMMEL). Leipzig 1892, S. 573-576

1843a/ Ueber die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene und ähnlicher

1892a tonbildender Vorrichtungen. *Annalen der Physik und Chemie* **59**, 513-565. Wiederabdruck in: *Gesammelte Abhandlungen von G.S. Ohm* (Hrsgb.: E. LOMMEL). LEIPZIG 1892, S. 587-633

1844a/ Noch ein Paar Worte über die Definition des Tones. *Annalen der Physik und Chemie* **62**, 1

1892a -18. Wiederabdruck in: *Gesammelte Abhandlungen von G.S. Ohm* (Hrsgb.: E. LOMMEL). Leipzig 1892, S. 634-649

OTTMER, CARL THEODOR (1800-1843)

1830a Architectonische Mittheilungen. I.Abt.: Das Königtäd'tsche Schauspielhaus zu Berlin. Braunschweig

PALLAS, PETER SIMON (1741-1811)

1776a Reisen durch verschiedene Provinzen des Russischen Reiches, 1771-1773. Vol. III. St. Petersburg

PEROLLE, ÉTIENNE

1800a Versuche über die Fortpflanzung des Schalles durch feste und flüssige Körper, und über die Resonanz musikalischer Instrumente. *Annalen der Physik* **3**, 167-180. Übersetzung von: *Mém. Acad. Turin* 5(1790), 91 ff (dem Autor war nur die Übersetzung zugänglich)

POGGENDORFF, JOHANN CHRISTIAN (1796-1877)

1969a Biographisch-literarisches Handwörterbuch der exakten Naturwissenschaften. Bearb. von RUDOLF ZAUNICK. Bd. VIIa. Supplement. Berlin

POISSON, SIMÉON DENIS (1781-1840)

1811a/ *Traité de mécanique*. T. I u. 2. 1. Aufl. u. 2. Aufl. Paris. Deutsche Übersetzung: *Lehrbuch der Mechanik*. Bd. I u. 2. Berlin 1835/36

1829a *Mémoire sur l'équilibre et le mouvement des corps élastiques*. *Mémoires de l'Acad. Sci. Paris* **8**, 357-570

QUANDT, CHRISTIAN FRIEDRICH (1766-1806)

1800a Ueber die durch Glasstäbe andern Körpern entlockten Töne. Allgemeine musikalische Zeitung (Leipzig) 2, 321-324

RAMAN, CHANDRASEKHARA VENKATA (1888-1970)

1927a Musikinstrumente und ihre Klänge. In: GEIGER, H.; SCHEEL, K. (Hrsgb.): Handbuch der Physik. Bd. 8: Akustik. Berlin

RAVE, P.O. (Hrsgb.: Akademie des Bauwesens)

1941a Karl Friedrich Schinkel. Berlin. 1. Teil: Bauten für die Kunst, Kirchen, Denkmalpflege. Berlin

RAYLEIGH LORD (JOHN WILLIAM STRUTT) (1842-1919)

1877a The theory of sound. London. 2. Aufl. 1894. Deutsche Übersetzung: Die Theorie des Schalles. Braunschweig 1879

RECHENBERG, HELMUT (geb. 1937)

1994a Hermann von Helmholtz. Bilder seines Lebens und Wirkens. Weinheim etc.

RHODE, JOHANN GOTTLIEB (1762-1827)

1800a Theorie der Verbreitung des Schalles für Baukünstler. Berlin

RICCATI, GIORDANO (1709-1790)

1767a Delle corde ovvero fibre elastiche schediasmi fisico-matematici. Bologna

1782a Delle vibrazioni sonore dei cilindri. Mem. di Mat. e Fisica della Soc. Italiana 1, 444-525

1786a Dissertazione fisico-matematica delle vibrazioni del tamburo. Saggi scient. e letterari dell'Accademia di Padova 1, 419-446

RIEMANN, KARL WILHELM JULIUS HUGO (1849-1919)

1939a Musik-Lexikon. Personenteil A-K. 12. Aufl. Mainz

RIEMER, FRIEDRICH WILHELM (1774-1845)

1833/ Briefwechsel zwischen Goethe und Zelter in den Jahren 1796 bis 1832. Bd. 2.

34a Berlin

ROCHE, ÉDOUARD

1876/ Notice sur les travaux scientifiques de J.-B. Romieu, Membre de la Société royale des

79a Sciences de Montpellier. Mémoires de l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, Section des Sciences 9, 255-270



ROEDERER, JUAN G. (geb. 1929)

- 1993a Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik. 2. Aufl. (1. Aufl. 1977). Berlin etc. Übersetzung von: Introduction to the physics and psychophysics of music. New York etc. 1973/75

ROMIEU, JEAN-BAPTISTE (1732-1766)

- 1876/ 79a Nouvelle découverte des sons harmoniques graves dont la résonance est très-sensible dans les accords des instruments à vent. Académie Roy. des Sciences Montpellier 1752. Wiederabdruck in: Mémoire de l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, Séc. de Sciences 9, 271-276. Zitat S. 272: "Ayant voulu accorder un petit tuyau d'orgue sur l'instrument appelé 'ton' ou 'diapason', et les ayant embouchés tous deux pour les faire résonner ensemble, je fus surpris d'entendre, indépendamment de leurs deux sons particuliers, un troisième son, grave et fort sensible."

RUPPERT, HANS (Bearb.)

- 1958a Goethes Bibliothek. Katalog. Weimar

SABINE, WALLACE CLEMENT (1868-1919)

- 1900a Reverberation. The American Architect and Engineering Record. Wiederabdruck in : Collected papers in acoustics. Cambridge, Mass. 1923, S. 3-68. Neudruck Los Altos, CA 1993. Gekürzt auch in LINDSAY, R.B.: Acoustics: Historical and philosophical development. Stroudsburg, Pa 1973, S. 417-457 (Benchmark Papers in Acoustics)

SACHS, CURT (1881-1959)

- 1930a Handbuch der Musikinstrumentenkunde. 2. Aufl. Leipzig. Nachdruck Leipzig 1966

SAVART, FÉLIX (1791-1841)

- 1819a Mémoire sur la construction des instruments à cordes et à archet. Paris  
 1819b Rapport sur un mémoire relatif à la construction des instrumens à corde et à archet. Annales de chimie et de physique, 2. Sér. 12, 225-255  
 1820a Sur la communications des mouvemens vibratoires entre les corps solides. Annales de chimie et de physique, 2. Sér. 14, 113-172. Deutsche Übertragung: Versuche über die Mittheilung der tönenden Erzitterungen fester Körper unter einander (und neue Versuche über die Längen-Schwingungen). Annalen der Physik 68(1821), 113-159. Zitat S. 121: "... que les a le premier observées, en a déterminé les lois plutôt par l'analogie qu'on remarque entre ce mode de mouvement et les ondes excitées dans l'air, que par des observations directes et expérimentales." Zitat S. 152: "... lorsque deux ou un plus grand nombre de verges sont réunies de manière à former un assemblage de lames placées rectangulairement entre elles, toutes les lames qui ont une même direction, l'horizontale ou la verticale, par exemple, affectent le même mode de mouvement; et si le mouvement est longitudinal pour les verges

de l'une des deux directions, il est transversal pour toute les autres."

- 1823a Recherches sur les vibrations de l'air. *Annales de chimie et de physique*, 2. Sér. 24, 56-88
- 1824a Du mémoire sur les vibrations des corps solides, considérées en général. *Annales de chimie et de physique*, 2. Sér. 25, 12-50, 138-178, 225-269
- 1824b Recherches sur les usages de la membrane du tympan et de l'oreille externe. *Annales de chimie et de physique*, 2. Sér. 26, 5-39
- 1827a Note sur les sons produits dans l'expérience de M. Clément. *Annales de chimie et de physique*, 2. Sér. 35, 53-56. Deutsche Übersetzung: Ueber die bei dem Versuche des Hrn. Clément erzeugten Töne. *Annalen der Physik und Chemie* 10(1827), 288-292
- 1830a Note sur la sensibilité de l'organe de l'ou. *Annales de chimie et de physique*, 2. Sér. 44, 337-352. Deutsche Übersetzung: Ueber die Empfindlichkeit des Gehörorgans. *Annalen der Physik und Chemie* 20(1830), 290-304. Engl. Übersetzung bei LINDSAY, R.B. (ed.): *Acoustics: Historical and philosophical development*. Stroudsburg, Pa. 1973, S. 203-209 (Benchmark Papers in Acoustics)
- 1831a Note sur la limite de la perception des sons graves. *Annales de chimie et de physique*, 2. Sér. 47, 69-74. Deutsche Übersetzung: Ueber die Gränze der Hörbarkeit tiefer Töne. *Annalen der Physik und Chemie* 22(1831), 596-600
- 1975a The violin. In: HUTCHINS, CARLEEN M. (ed.): *Musical acoustics. Part I: Violin family components*. Stroudsburg, Pa. 1975, S. 323-327 (Benchmark Papers in Acoustics 5). Übersetzung aus: *L'Institut* 8(1840), 54-56. Zitat S. 324: "It is not to be supposed that the soundpost acts as a conductor of sound, serving only to spread the motion, for this piece can be put not in the violin but on the violin, and its action remains the same." Zitat S. 326: "... to maintain this foot in an almost complete state of immobility, so that the left foot may ... communicate its movements to the bar of the instrument."
- 1976b On musical instruments. In: HUTCHINS, CARLEEN M. (ed.): *Musical acoustics. Part II: Violin family functions*. Stroudsburg, Pa. 1976, S. 15-18 (Benchmark Papers in Acoustics 4). Übersetzung aus: *L'Institut* 8(1840), 69-71, 91-92, 122-124. Zitat S. 16: "... we have found that the sound varies in good violins between C sharp 3 and D3 for the belly, and for the back between D3 and D sharp 3, so that there is always a difference between them of a half or a whole tone."

SCHEIBLER, JOHANN (1777-1837)

- 1834a *Der physikalische und mathematische Tonmesser*. Essen

SCHIMANK, HANS (1888-1979)

- 1936a Zur Frühgeschichte der Akustik. *Akustische Zeitschrift* 1, 106-114
- 1953a Beiträge zur Lebensgeschichte von E.F.F. Chladni. *Sudhoffs Archiv Gesch. Med. Naturwiss.* 37, 370-376

SCHLICHTEGROLL, ADOLF HEINRICH FRIEDRICH (1765-1822)

1802a Nekrolog der Teutschen für das neunzehnte Jahrhundert. Bd. 1. Gotha. LENZ, C.G.: M. Heinrich Gottfried Reichard, S. 167-176

SCHÖNEMANN, GEORG (1884-1945)

1941a Die Singakademie zu Berlin, 1791-1941. Regensburg

SCHUSTER, KURT (1903-1995); WAETZMANN, ERICH (1882-1938)

1929a Über den Nachhall in geschlossenen Räumen. Annalen der Physik, 5. F., 1, 671-695

SEEBECK, AUGUST (1805-1849)

1841a Beobachtungen über einige Bedingungen der Entstehung von Tönen. Annalen der Physik und Chemie 53, 417-436

1843a Ueber die Sirene. Annalen der Physik und Chemie 60, 449-488

1844a Ueber die Definition des Tones. Annalen der Physik und Chemie 63, 353-368

SHANKLAND, ROBERT S.

1977a Architectural acoustics in America to 1930. Journal of the Acoustical Society of America 61, 2, 250-254

SINGER, H.

1959a Das ideale Mozart-Theater. Phono 5, 4, 8-9

SORGE, GEORG ANDREAS (1703-1778)

1744a Anweisung zur Stimmung und Temperatur sowohl der Orgelwerke, als auch anderer Instrumente, sonderlich aber des Claviers. In einem Gespräche zwischen einem Musico-theoretico und seinem Scholaren. Hamburg

STEFFENS, HENRIK (1773-1845)

1844a Was ich erlebte. Bd. 9. Breslau

STEINMETZ, MAX (Hrsgb.)

1958a Geschichte der Universität Jena 1548/58-1958. Bd. 2. Jena

STOKES, GEORGE GABRIEL (1819-1903)

1845a On the theories of the internal friction of fluids in motion, and of the equilibrium and motion of elastic solids. Transactions Cambridge Philos. Soc. 8, 287-305. Wiederabdruck in: Mathematical and physical papers I(1880), 75-102. Reprint in LINDSAY, R.B. (ed.): Acoustics. Historical and philosophical development. Stroudsburg, Pa. 1973, S. 262-289 (Benchmark Papers in Acoustics)

STREHLKE, FRIEDRICH (1797-1886)

1825a Beobachtungen über die Klangfiguren auf ebenen nach allen Dimensionen schwingenden homogenen Scheiben. *Annalen der Physik und Chemie* 4, 205-218

1830a Ueber Klangfiguren auf Quadratscheiben. *Annalen der Physik und Chemie* 18, 198-225

SZABÓ, ISTVÁN (1906-1980)

1974a Die Geschichte der Materialkonstanten der linearen Elastizitätstheorie homogener isotroper Stoffe. *Die Bautechnik* 51, 1-8

1987a Geschichte der mechanischen Prinzipien und ihrer wichtigsten Anwendungen. 3. Aufl. Basel etc. 1. Aufl. 1977, 2. Aufl. 1979 (*Wissenschaft und Kultur* 32)

TARNOCZY, TAMÁS (geb. 1915)(unter Mitwirkung von JÜRGEN MEYER)

1991a Einführung in die musikalische Akustik. Budapest. Ung. Original Budapest 1982

TARTINI, GIUSEPPE (1692-1770)

1754a Trattato di musica secondo la vera scienza dell'armonia. Padua. Deutsche Übersetzung: Traktat über die Musik gemäß der wahren Wissenschaft von der Harmonie. Übersetzt und erläutert von ALFRED RUBELI. Düsseldorf 1966 (Orpheus-Schriftenreihe zu Grundfragen der Musik 6). Zitat S. 13-14: "Si è poi scoperto un nuovo fenomeno armonico, che prova mirabilmente lo stesso, e molto di più. Dati due suoni di qualunque strumento musicale, che possa protrarre, e rinforzare il suono per quanto tempo si voglia (trombe, corni di caccia, strumenti d'arco, oboè ec.) si ha un terzo suono prodotto dall'urto de' due volumi di aria mossi dalli due dati suoni. Nulla importa al presente bisogno la spiegazione fisica del modo, con cui si produce questo terzo; basta il fatto, e questo si ha debito di spiegare. Da un suonator di Violino si suonino equitemporaneamente con arcata forte, e sostenuta i seguenti intervalli perfettamente intonati. Si sentirà un terzo suono affatto distinguibile, e sarà il sottoposto segnato in note chiuse musicali. Lo itesso succederà, se saranno suonati gli esposti intervalli da due suonatori di Violino distanti tra loro cinque, o sei passi, suonando ciascuno la sua nota nello stesso tempo, e sempre con arcata forte, e sostenuta. L'uditore posto nel mezzo rispettivo de' due suonatori sentirà molto più questo terzo suono, che vicino a ciascuno de' due suonatori: segno fisico-evidente della cagione del terzo suono, ch'è l'urto de' due rispettivi volumi d'aria mossi dalle vibrazione delle due corde suonate. Si avrà lo stesso effetto da due suonatori dell'Oboè posti tra loro in molto maggior distanza. Essendo il suono dell'Oboè più forte del suono dell Violino, si sentirà meglio il risultato terzo suono, e nel mezzo rispettivo de' due suonatori si sentirà egregiamente, sebbene si sente abbastanza in qualunque sito." Deutsche Übersetzung aus TARTINI 1966, 72-73.

1767a De' principj dell'armonia musicale. Padua. Zitat S. 36: " Nell' anno 1714, giovine di anni 22, incirca scopre fortunatamente sul Violino questo fenomeno in Ancona, dove non pochi ricordevoli testimonj sopravvivono ancora." Deutsche Übersetzung aus TARTINI 1966, 65, Anm. 109.

THEOBALD, RAINER (geb. 1943)

1976a Carl Theodor Ottmer als Theaterarchitekt. Untersuchungen zur Entstehung und Wirkung von Theaterbauten in der Epoche des Biedermeier. Dissertation FU Berlin

TODHUNTER, ISAAC (1820-1884); PEARSON, KARL (1857-1936)

1886a A history of the theory of elasticity and of the strength of materials from Galilei to the present time. Vol. I: Galilei to Saint-Venant 1639-1850. Cambridge

1893a Vol. II: Saint-Venant to Lord Kelvin. Cambridge

TRENDELENBURG, FERDINAND (1896-1973)

1961a Einführung in die Akustik. 3. Aufl. Berlin etc.

TRUESDELL, CLIFFORD AMBROSE (geb. 1919)

1955a The theory of aerial sound. In: Leonhardi Euleri Opera Omnia. Ser. 2, Bd. XIII. Lausanne S. XIX-LXXII

1960a The rational mechanics of flexible or elastic bodies 1638-1788. In: Leonhardi Euleri Opera Omnia. Ser. 2, Bd. XI, part 2. Zürich

TURNER, R. STEVEN

1977a The Ohm-Seebeck dispute, Hermann von Helmholtz and the origins of physiological acoustics. The British Journal for the History of Science 10, 1-24

ULLMANN, DIETER (geb. 1934)

1980a Ein akustisches Experiment A. Kirchers und seine Geschichte. Zum 300. Todestag des Gelehrten. NTM-Schriften. Gesch. Naturwiss., Techn., Med., Leipzig 17, 1, 61-68

1982a Die ersten Messungen der Schallgeschwindigkeit in Luft und das Schallortungsverfahren von Jonas Meldercreutz. Centaurus 26, 25-37

1982b Chladni's Italienreise nach Briefen an J.P. Schultthesius. NTM-Schriften. Gesch. Naturwiss., Techn., Med., Leipzig 19, 2, 51-57. Berichtigung *ibid.* 20, 2, 89

1983a Ernst Florens Friedrich Chladni. Leipzig (Biographien hervorragender Naturwissenschaftler, Techniker und Mediziner 65)

1984a Chladni und die Entwicklung der experimentellen Akustik um 1800. Archive History Exact Sci. 31, 35-52

1986a Helmholtz-Koenig-Waetzmann und die Natur der Kombinationstöne. Centaurus 29, 40-52

1988a Ohm-Seebeck-Helmholtz und das Klangfarbenproblem. NTM-Schriften. Gesch. Naturwiss., Techn., Med., Leipzig 25, 1, 65-68

1989a Die Entwicklung der Raumakustik im 19. Jahrhundert. Sudhoffs Archiv. Z. f. Wissenschaftsgeschichte 73, 208-215

1990a Chladni und Ottmer - ein frühes Beispiel für die Zusammenarbeit von Akustiker und Architekt. Acustica 71, 58-63

- 1991a Geschichte der Raumakustik im evangelischen Kirchenbau des 19. Jahrhunderts. *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte* 14, 241-249

VENTZKE, KARL

- 1966a Die Boehmflöte. Frankfurt/M (Fachbuchreihe: Das Musikinstrument 15)

VITRUVIUS (MARCUS VITRUVIUS POLLIO) (um 30 v. Chr.)

- 1964a Zehn Bücher über Architektur. Übersetzt und mit Anmerkungen versehen von C. FENSTERBUSCH. Berlin

VOGEL, STEPHAN

- 1990a Sensation of tone and perception of sound. Helmholtz and the 19th century acoustics. Unveröffentl. Manuskript

VULMIUS, WALTHER (1860-1944)

- 1891a Das Stammbuch von August v. Goethe. *Deutsche Rundschau* 68, 71-85

WALLER, MARY DESIRÉE (?-1959)

- 1961a Chladni figures. A study in symmetry. London

WEBER, ERNST HEINRICH (1785-1878); WEBER, WILHELM (1804-1891)

- 1825a Wellenlehre auf Experimente gegründet oder über die Wellen tropfbarer Flüssigkeiten mit Anwendung auf die Schall- und Lichtwellen. Leipzig. Wiederabdruck in: Wilhelm Weber's Werke. (Hrsgb.: Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen) Bd. 5. Berlin 1893

WEBER, MAX MARIA V. (1822-1881)

- 1912a Carl Maria v. Weber. Ein Lebensbild. Berlin

WEBER, WILHELM E. (1804-1891)

- 1829a Theorie der Zungenpfeifen. *Annalen der Physik und Chemie* 17, 193-246. Wiederabdruck in: Wilhelm Weber's Werke. (Hrsgb.: Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen) Bd. 1. Berlin 1892, S. 292-331
- 1829b Versuche mit Zungenpfeifen. *Annalen der Physik und Chemie* 16, 415-438. Wiederabdruck in: Wilhelm Weber's Werke (Hrsgb.: Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen) Bd. 1. Berlin 1892, S. 276-291
- 1892a Lebensbild E.F.F. Chladni's. In: ERSCH, J.S.; GRUBER, J.G. (Hrsgb.): *Allgemeine Encyclopädie der Wissenschaften und Künste*. Bd. 21. Leipzig 1830, S. 177-190. Wiederabdruck in: Wilhelm Weber's Werke (Hrsgb. Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen) Bd. 1. Berlin 1892, S. 168-197

- 1892b Kurze Uebersicht der Schall- und Klanglehre, nebst einem Anhang, die Entwicklung und Anordnung der Tonverhältnisse betreffend, von E.F.F. Chladni, Dr. der Philosophie und Rechte, Mitgließe verschiedener Akademien und anderer Wissenschaftlichen Gesellschaften. Mainz 1827. *Caecilia* 8(1828), 189-201. Wiederabdruck in: Wilhelm Weber's Werke (Hrsgb.: Königliche Akademie der Wissenschaften zu Göttingen) Bd. 1. Berlin 1892, S. 198-206

WEGENER, ALFRED (1880-1930)

- 1924/ Die äußere Hörbarkeitszone. *Z. Geophysik* 1, 297-314  
25a

WERTHEIM, GUILLAUME (1815-1861)

- 1848a Mémoire sur la vitesse du son dans les liquides. *Annales de chimie et de physique, Sér. 3*, 23, 434-475. Deutsche Übersetzung: Ueber die Geschwindigkeit des Schalls in Flüssigkeiten. *Annalen der Physik und Chemie* 77(1849), 427-445, 544-571  
1851a Mémoire sur les vibrations sonores de l'air. *Annales de chimie et de physique, Sér. 3*, 31, 385-432

WERTHEIM, GUILLAUME (1815-1861); BRÉGUET, LOUIS FRANÇOIS CLÉMENT (1808-1883)

- 1851a Expériences sur la vitesse du sons dans le fer. *Comptes Rend. Acad. Sci. Paris* 32, 293-294

WHEATSTONE, CHARLES (1802-1875)

- 1831a On the transmission of musical sounds through solid linear conductors, and on their subsequent reciprocation. *J. Roy. Inst.* 5, 223-238. Wiederabdruck in: *The scientific papers of Sir Charles Wheatstone*. London 1879, S. 47-63. Deutsche Übersetzung: Ueber die Fortpflanzung der Töne durch starre lineare Leiter, und die dadurch hervorgerachte Resonanz. *Annalen der Physik und Chemie* 26(1832), 251-268  
1833a On the figures obtained by strewing sand on vibrating surfaces, commonly called acoustic figures. *Philos. Trans. of the Royal Soc. of London* 123, 593-633. Wiederabdruck in: *The scientific papers of Sir Charles Wheatstone*. London 1879, S. 64-83. Zitat S. 596: "I shall endeavour to show that all the figures of vibrating surfaces are the resultants of very simple modes of vibration, oscillating isochronously, and superposed upon each other."  
1879a Referate über Willis, Kempelen und Kratzenstein. *London and Westminster Review*, October 1837. Wiederabdruck in: *The scientific papers of Sir Charles Wheatstone*. London, S. 348-367

WHIPPLE, FRANCIS JOHN W. (1876-1943)

- 1923a The high temperature of the upper atmosphere as an explanation of zones of audibility. *Nature* 111, 187

WÜNSCH, CHRISTIAN ERNST (1744-1828)

- 1793a Nachricht von einem Versuche, welcher lehret, dass der Schall durch feste elastische Körper unendlich geschwind oder doch eben so geschwind, als das Licht, sich bewegt. Sammlung der Deutschen Abhandlungen, welche in der Königl. Akad. Wiss. zu Berlin vorgelesen worden in den Jahren 1788 u. 1789. 1793, 187-188

YOUNG, THOMAS (1773-1829)

- 1800a/ Outlines of experiments and inquiries respecting sound and light. Philos. Trans. of the Roy. Soc. of London 1800, 106-150. Deutsche Übersetzung: Untersuchungen über Schall und Licht. Annalen der Physik 22(1806), 249-285, 337-396

ZAMMINER, FRIEDRICH (1817-1858)

- 1855a Die Musik und die musikalischen Instrumente in ihrer Beziehung zu den Gesetzen der Akustik. Gießen

ZIMMERMANN, PETER (geb. 1938)

- 1993a Entwicklungslinien der Hörtheorie. NTM-Schriftenr. Gesch. Naturwiss, Techn. Med., n. Ser. 1, 19-36

ZWISLOCKI, J.J.

- 1981a Sound analysis in the ear: A history of discoveries. American Scientist 69, 184-192



## 10. Personenregister

- ACHARD, FRANZ CARL (1753-1821) 65  
 D'ALEMBERT, JEAN BAPTISTE LE ROND (1717-1783) 4, 5, 93  
 ANDRADE, E.N. DA C. (1887-1971) 27  
 APEL, JOHANN AUGUST (1771-1816) 131  
 APPUNN, ANTON (1839-1900) 170  
 AYCKE, JOHANN CHRISTIAN (1766-1854) 49  
  
 BEETHOVEN, LUDWIG VAN (1770-1827) 34  
 BENZENBERG, JOHANN FRIEDRICH (1777-1846) 55, 76-77  
 BÉRARD, JACQUES ÉTIENNE (1789-1869) 80  
 BERNOULLI, DANIEL (1700-1783) 4, 5, 6, 14, 17, 18-19, 29-30, 92, 93, 105, 127  
 BERNOULLI, JAKOB II (1759-1789) 127  
 BERNOULLI, JOHANN I (1667-1748) 127  
 BERTHOLLET, CLAUDE-LOUIS (1748-1822) 96  
 BERTUCH, FRIEDRICH JOHANN JUSTIN (1747-1822) 45  
 BIOT, JEAN BAPTISTE (1774-1862) 73, 78-79  
 BOEHM, THEOBALD (1794-1881) 88-89  
 BÖTTIGER, CARL AUGUST (1760-1835) 141  
 BOUVARD, ALEXIS (1767-1843) 73  
 BOYLE, ROBERT (1627-1691) 2  
 BRANDES, HEINRICH WILHELM (1777-1834) 55  
 BRANDT, EDUARD (?-1861) 178-179  
 BRANT, SEBASTIAN (1457/58-1521) 54  
 BREGUET, LOUIS FRANÇOIS CLÉMENT (1808-1883) 74  
 BUNSEN, ROBERT (1811-1899) 140  
 BUSCHMANN, J.D. (um 1810) 85  
 BUSSE, FRIEDRICH GOTTLIEB V. (1756-1835) 60  
  
 CAGNIARD DE LA TOUR, CHARLES (1777-1859) 99-100, 157, 173  
 CAPIEUX, JOHANN STEPHAN (1754-1813) 16  
 CATEL, LOUIS (1776-1819) 152  
 CHLADNI, ERNESTINE (1759) 10  
 CHLADNI, ERNST FLORENS FRIEDRICH (1756-1827) passim  
 CHLADNI, ERNST MARTIN (1715-1782) 7, 8, 9, 10, 11-12  
 CHLADNI, GEORG (1637-1692) 7  
 CHLADNI, JOHANNA CHARLOTTE geb. GREIPZIGER (1725-1801) 10, 48  
 CHLADNI, JOHANNA SOPHIA geb. CLEMENT (?-1761) 7, 8, 10  
 CHLADNI, MARTIN (1669-1725) 7, 10  
 CLAGGET, CHARLES (1740-1795) 34  
 CLEBSCH, RUDOLPH FRIEDRICH ALFRED (1833-1872) 103  
 CLEMENT, JOHANN FRIEDRICH (um 1760) 7, 9  
 CLÉMENT, NICOLA (1779-1841) 168  
 COLLADON, JEAN DANIEL (1802-1893) 187-189  
 CONCONE, LUIGI (um 1810) 119  
 COULOMB, CHARLES AUGUSTIN (1736-1806) 62  
 CREMER, LOTHAR (1905-1990) 152  
 CUVIER, GEORGE (1769-1832) 96  
  
 DAVIES, MARIANNE (1744-1792) 34  
 DELAROCHE, F. (1775?-1813) 80  
 DIETZ, JOHANN CHRISTIAN (1773-1849) 85  
 DITTERS V. DITTERSDORF, KARL (1739-1799) 145

- DONDERS, FRANZ CORNELIUS (1818-1889) 197
- DOVE, HEINRICH WILHELM (1803-1879) 100, 157
- DU BOIS-REYMOND, FELIX HENRY (1782-1865) 198
- EBERT, JOHANN JAKOB (1737-1805) 13
- ERARD, SÉBASTIAN (1752-1831) 87, 135
- ERXLBEN, JOHANN CHRISTIAN POLYKARP (1744-1777) 53
- ESCHENBURG, JOHANN JOACHIM (1743-1820) 139
- EULER, LEONHARD (1707-1783) 5, 6, 14, 17, 18, 21, 29-30, 78, 92, 93, 103, 105, 129, 133
- EYRING, CARL F. (1889-1951) 155
- FARADAY, MICHAEL (1791-1867) 25-27
- FASCH, CARL FRIEDRICH (1736-1800) 148
- FORKEL, JOHANN NICOLAUS (1749-1818) 14
- FOURIER, JEAN BAPTISTE JOSEPH (1768-1830) 5, 173
- FRANKLIN, BENJAMIN (1706-1790) 14, 34
- FRAUNHOFER, JOSEPH v. (1787-1826) 140
- FRIEDERICI, CHRISTIAN ERNST (1709-1780) 35
- FRÖHLICH, C.W. (um 1805) 123-125
- FUNK, CHRISTLIEB BENEDIKT (1736-1786) 12
- GALILEI, GALILEO (1564-1642) 1
- GARBRECHT, ? (um 1795) 87
- GAUSS, CARL FRIEDRICH (1777-1855) 128
- GERBER, ERNST LUDWIG (1746-1819) 138
- GERMAIN, SOPHIE (1776-1831) 128-129, 131
- GILBERT, LUDWIG WILHELM (1769-1824) 77, 167
- GOETHE, AUGUST v. (1789-1830) 118
- GOETHE, JOHANN WOLFGANG v. (1749-1832) 115-118, 121, 138, 151
- GOSSEC, FRANÇOIS JOSEPH (1734-1829) 95
- GREN, FRIEDRICH ALBERT CARL (1760-1798) 92
- GRENIÉ, GABRIEL JOSEPH (1756-1837) 133-135
- GRÉTRY, ANDRÉ ERNEST MODESTE (1741-1813) 95
- GUARNERI, GIUSEPPE (1698-1744) 164-165
- GUERICKE, OTTO v. (1602-1686) 2
- HALLEY, EDMUND (1656-1742) 55
- HÄLLSTRÖM, GUSTAV GABRIEL (1775-1844) 184-185
- HAMPEL, ANTON JOSEPH (1710-1771) 35
- HARDING, KARL LUDWIG (1765-1834) 56
- HASE, CONRAD WILHELM (1818-1902) 153
- HAÜY, RENÉ-JUST (1743-1822) 95
- HAYDN, JOSEPH (1737-1806) 145
- HELMHOLTZ, HERMANN v. (1821-1894) 99, 100-101, 102, 104, 108-109, 113-114, 157, 163, 166, 170-171, 175, 178-179, 185, 191-202
- HENRY, JOSEPH (1797-1878) 153-155
- HERMANN, LUDIMAR (1838-1914) 199
- HINDENBURG, KARL FRIEDRICH (1741-1803) 14, 91, 131
- HÖLTERHOF, ? (um 1810) 77
- HOOKE, ROBERT (1635-1703) 169
- HORNPOSTEL, ERICH MORITZ v. (1877-1935) 39
- HUMBOLDT, WILHELM v. (1767-1835) 117
- HUTH, JOHANN SIGISMUND GOTTFRIED (1763-1818) 69
- JACQUIN, JOSEPH FRANZ v. (1766-1839) 51, 75
- KATHARINA I. (1684-1727) 30
- KEMPELEN, WOLFGANG Ritter v. (1734-1804) 112-113
- KERBY, FRANCIS (um 1810) 76, 77

- KIRCHER, ATHANASIAS (1602-1680) 2  
 KIRCHHOFF, GUSTAV ROBERT (1824-1887)  
 105, 129, 140  
 KOENIG, KARL RUDOLPH (1832-1901) 170,  
 200  
 KÖRNER, CHRISTIAN GOTTFRIED (1756-1831)  
 11  
 KÖRNER, THEODOR (1791-1813) 11  
 KRATZENSTEIN, CHRISTIAN GOTTLIEB (1723-  
 1795) 36, 111-112  
 KRAUS, GEORG MELCHIOR (1733-1806) 45  
 KREBS, JOHANN LUDWIG (1713-1780) 11  
 KREBS, JOHANN TOBIAS (1716-1782) 11  
 KUNDT, AUGUST ADOLPH (1839-1894) 77-78  
  
 LACÉPÈDE, BERNARD GERMAIN ÉTIENNE DE  
 (1756-1825) 95, 96  
 LAGRANGE, JOSEPH LOUIS (1736-1813) 5, 6,  
 78, 92, 93, 105, 128, 183  
 LAMBERT, JOHANN HEINRICH (1728-1777) 69,  
 92, 105  
 LANGGUTH, CHRISTIAN AUGUST (1754-1814)  
 48  
 LANGHANS, CARL FERDINAND (1782-1869)  
 147-148  
 LAPLACE, PIERRE SIMON DE (1749-1827) 78,  
 80-81, 95, 96, 187  
 LASSAULX, JOHANN CLAUDIUS V. (1781-1848)  
 139  
 LEGERAN, ? (um 1820) 88  
 LEIBNIZ, GOTTFRIED WILHELM (1646-1716) 3  
 LEINS, CHRISTIAN V. (1814-1892) 153  
 LEOPOLD I. (1640-1705) 7  
 LICHTENBERG, GEORG CHRISTOPH (1742-  
 1799) 15, 16, 48-49, 53, 56-57  
 LISCOVIUS, KARL FRIEDRICH SALOMO (1780-  
 1844) 109-110, 168  
 LOT, GILLES (um 1770) 35  
 LUPOT D. Ä., FRANÇOIS (1725-1804) 35  
 LUTHER, MARTIN (1483-1546) 7  
  
 MAELZEL, JOHANN NEPOMUK (1772-1838) 36,  
 135  
 MALUS, ÉTIENNE LOUIS (1775-1812) 73  
 MARTIN, ? (um 1800) 73  
 MAXIMILIAN I. (1459-1519) 54  
 MAZZUCHI (um 1780) 14  
 MEDWEDEFF, JAKOB (um 1750) 54  
 MÉHUL, ÉTIENNE NICOLAS (1763-1817) 95  
 MELANCHTHON, PHILIPP (1497-1560) 7  
 MENDELSSOHN-BARTHOLDY, FELIX (1809-  
 1847) 152  
 MERRICK, A. (um 1810) 76, 77  
 MERSENNE, MARIN (1588-1648) 1, 2, 196  
 MEYER, ERWIN (1899-1972) 152  
 MOSEWIUS, JOHANN THEODOR (1788-1858)  
 161  
 MOZART, WOLFGANG AMADIUS (1756-1791)  
 34, 107, 146  
 MÜCKE, JOHANN HEINRICH (1735-1799) 11  
 MÜLLER, JOHANNES PETER (1801-1858) 191  
 MUNKE, GEORG WILHELM (1772-1847) 187  
  
 NAETER, ? (um 1850) 85  
 NÄGELI, HANS GEORG (1773-1836) 119  
 NAPOLÉON BONAPARTE (1769-1821) 96-97,  
 121, 123  
 NAUMANN, JOHANN GOTTLIEB (1741-1801) 34  
 NAVIER, CLAUDE LOUIS MARIE HENRI (1785-  
 1836) 104, 105  
 NEWTON, ISAAC (1643-1727) 3, 78, 105  
 NICOLAI, DAVID TRAUOGOTT (1733-1799) 35  
 NOBLE, WILLIAM (?-1681) 2  
  
 OHM, GEORG SIMON (1789-1854) 175-179,  
 184-185, 195  
 OKEN. LORENZ (1779-1851) 91-92  
 OLBERS, HEINRICH WILHELM MATTHIAS  
 (1758-1840) 49, 139  
 OTTMER, CARL THEODOR (1800-1843) 141,  
 149-151

- VITRUVIUS (um 20 v. Chr.) 143, 158-159  
VOGEL, BARTHOLOMÄUS (?-1569) 9  
VOGLER, GEORG JOSEPH (Abbé VOGLER)  
(1749-1814) 36  
VOIGT, CHRISTIAN GOTTLÖB (1743-1819) 138  
VUILLAUME, JEAN BAPTISTE (1798-1875) 164
- WACHSMUTH, RICHARD (1868-1941) 201  
WAETZMANN, ERICH (1882-1938) 155, 194  
WEBER, CARL MARIA v. (1786-1826) 141  
WEBER, ERNST HEINRICH (1795-1878) 48,  
153, 160  
WEBER, JACOB GOTTFRIED (1779-1839) 161  
WEBER, MICHAEL (1754-1833) 48  
WEBER, WILHELM E. (1804-1891) 48, 60,  
107-108, 111, 153, 160
- WEGENER, ALFRED (1880-1930) 125  
WERTHEIM, GUILLAUME (1815-1861) 74, 108,  
189  
WHEATSTONE, CHARLES (1802-1875) 31-32,  
72, 88, 113, 197  
WHIPPLE, FRANCIS JOHN W. (1876-1943) 125  
WÜNSCH, CHRISTIAN ERNST (1744-1828) 69-  
70
- YOUNG, THOMAS (1773-1829) 183-184
- ZAMMINER, FRIEDRICH (1817-1858) 108  
ZEIHER, JOHANN ERNST (1720-1784) 13  
ZELTER, CARL FRIEDRICH (1758-1832) 116,  
137, 149, 151

## 11. Sachregister

- Aerophon 39  
 Antikes Theater 143, 158-159  
  
 Basilmembran 104, 197  
 Baßbalken 165-166  
 Bassetthorn 35  
 Baßklarinette 35  
 Becken 38  
 Biegeschwingung von Platten 14, 16, 21-32, 38-39, 127-129, 131-133  
 Biegeschwingung von Stäben 6, 14, 17-21, 37-39, 42  
 Blasinstrument 14, 38-39, 93, 105-110, 167-168  
 Bogenklavier 38, 87-88  
 Burgtheater Wien 146  
  
 Carillon 19  
 Celesta 39  
 CHLADNISCHE Klangfiguren 16, 17-32, 49, 95, 96-97, 116-117, 131-133, 138, 139, 161, 163, 169  
 Chordophon 39  
 Clavicylinder 38, 83-86, 95, 118, 119, 133-135  
 COULOMBSche Drehwaage 62  
  
 Dehnungsschwingung von Saiten 59-60  
 Dehnungsschwingung von Stäben 42, 45, 50-51, 59-61, 166-167  
 Deutsche Mechanik 35  
  
 Differenzton 101, 181-185, 191-195  
 Differentialgleichung schwingender Platten 129  
 Dissonanz 6, 196-197, 201  
 Doppelsirene 100-101, 157  
  
 Eisenacher Regulativ 152-153  
 Eisenvioline 38  
 Elektrophon 39  
 Euphon 38, 41-45, 49, 118  
 Expressivorgel 133-135  
  
 Farbenlehre 117  
 Farbfiguren, entoptische 116  
 Feuerkugel 53, 54, 55, 56  
 Flageoletton 2  
 Flötenuhr 36  
 Formant 199  
 Frequenz 66  
 Frequenzmessung 3, 99-101  
  
 GAUSSSche Krümmung 129  
 Geige 38, 39, 163-166  
 Geräusch 65, 99, 197  
 Gesichtsmasken 159  
 Gewandhaus Leipzig 145  
 Glasharmonika 14, 28, 34-35, 38, 43, 83-84  
 Glockenschwingung 21, 38-39, 93  
 Glockenspiel 38  
 GOETHES Naturschau 116-118

- Querflöte 35, 88-89  
  
 Rassel 39  
 Rauigkeit 196-197  
 Raumakustik 93, 143-155  
 Reduzierte Pfeifenlänge 108-109  
 Resonanz 1, 160-161  
 Resonanztheorie des Hörens 104, 114  
  
 Saitenschwingung 1, 2, 3-6, 14, 37, 38, 39, 173  
 Schallabsorption 104-105, 154-155  
 Schallausbreitung in der Atmosphäre 123-125  
 Schallgeschwindigkeit in Eisen 73-74, 93  
 Schallgeschwindigkeit in Festkörpern 69-74, 93  
 Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten 93, 187-189  
 Schallgeschwindigkeit in Gasen 1, 2, 3, 75-81, 93  
 Schallgeschwindigkeit in Holz 70, 93  
 Schallgeschwindigkeit nach LAPLACE 78-81, 93  
 Schlacht bei Jena und Auerstedt 123-125  
 Schlaginstrumente ohne Fell 39  
 Schlösser in Eisenstadt und Esterháza 145  
 Schneideton 105-106  
 Schwebung 2-3, 101, 183, 192, 193-194, 196-197, 201  
 Schwingung von Kreisscheiben 21-27, 31, 93  
 Schwingung von Scheiben quadratischer Form 27-28, 31-32, 93  
 Schwingungsbauch 2, 3  
 Schwingungsknoten 2, 3  
 Simplifikationssystem 36  
  
 Singakademie Berlin 141, 149-152  
 Singende Flamme 49  
 Slide trumpet 88  
 Spektralanalyse 140-141  
 Spinett 38  
 Sprechmaschine von KEMPELEN 112-113  
 Sternschnuppe 53  
 Stimme, menschliche 110-111, 157  
 Stimmgabel 38, 93, 101-102, 141  
 Stimmstock 165-166  
 Stoßtheorie 183, 194  
 Streichgabelklavier 34  
 Streichinstrument, holographische Aufnahmen 32  
 Strohfidel 38  
 Summationston 192, 194  
 Systematik der Musikinstrumente 37-39  
  
 TARTINISCHE Töne 181-182  
 Theaterakustik 143-152  
 Theatergrundriß 143-144, 146-148  
 Ton 1, 65-66, 97, 99, 157-158, 175-179  
 Tonometer 99  
 Tonverschmelzungstheorie 197  
 Torsionsschwingung 66  
 Torsionsschwingung von Stäben 61-63, 66  
 Transversalschwingung 66-67  
 Trapezgeige 163-164  
 Triangel 38-39  
 Trommel 38-39  
 Trommelfell 37, 193-194  
  
 Uranion 85  
  
 Verzauberte Lyra 71-72, 88  
 Vibrationsmikroskop 166  
 Violine s. Geige

### **Abbildungsnachweis**

Folgenden Personen, Institutionen und Verlagen wird für die freundliche Bereitstellung von Vorlagen und die Genehmigung zum Abdruck gedankt:

American Institute of Physics, 500 Sunnyside Blvd., Woodbury, NY 11797: Abb. 8.1.1; Abb. 8.1.2

Prof. Dr. V. ASCHOFF: Abb. 5.3.3; Abb. 5.3.4

G. BELL & Sons, London, an imprint of HARPERCOLLINS Publishers Limited: Abb. 3.2.7

Deutsches Museum, München, Bildstelle: Abb. 4.1.2

Dr. CARLEEN M. HUTCHINS, Montclair, NJ: Abb. 8.1.1; Abb.: 8.1.2

Landesamt für Denkmalpflege Sachsen-Anhalt, Halle/Saale: Abb. 4.1.1

ORPHEUS-Verlag GmbH, Verlag für systematische Musikwissenschaft, Bonn: Abb. 8.3.1

SPRINGER-Verlag GmbH & Co. KG, Heidelberg: Abb. 5.3.3; Abb. 5.3.4

Staatsbibliothek zu Berlin. Preußischer Kulturbesitz: Abb. 2.1; Abb. 3.1.1; Abb. 3.4.2; Abb. 4.6.1

Universität Leipzig, Musikinstrumentenmuseum: Abb. 6.1.1

Alle übrigen Abbildungen stammen aus der Sammlung des Autors

## Science Networks • Historical Studies

Edited by

**Erwin Hiebert**, Harvard University, Cambridge MA, USA

**Hans Wussing**, Universität Leipzig, Germany

in cooperation with an international editorial board

*The publications in this series are limited to the fields of mathematics, physics, astronomy, physical chemistry, and their applications. The publication languages are English preferentially, German, and in exceptional cases also French. The series is primarily designed to publish monographs. However, special editions featuring collected letters as well as thematic groupings of smaller individual works or proceedings can be taken into consideration. Annotated sources and exceptional biographies might be accepted in rare cases. The series is aimed primarily at historians of science and libraries; it should also appeal to interested specialists, students, and diploma and doctoral candidates. In cooperation with their international editorial board, the editors hope to place a unique publication at the disposal of science historians throughout the world.*

- SN 10 Benoit, P., Chemla, K., Ritter, J.: Histoire de fractions, fractions d'histoire, 1992 (ISBN 7643-2693-X)
- SN 11 Reich, K.: Die Entwicklung des Tensorkalküls. Vom absoluten Differentialkalkül zur Relativitätstheorie, 1992 (ISBN 3-7643-2814-2)
- SN 12 Gorelik, G.E /Frenkel, V.Ya.: Matvei P. Bronstein and the Soviet Theoretical Physics in the Thirties, 1994 (ISBN 3-7643-2752-9)
- SN 13 Vizgin, V.P.: Unified Field Theories in the first third of the 20th century  
Translated from the Russian by Julian B. Barbour, 1994 (ISBN 3-7643-2679-4)
- SN 14 Klein, U.: Verbindung und Affinität, Die Grundlegung der neuzeitlichen Chemie an der Wende vom 17. zum 18. Jahrhundert, 1994 (ISBN 3-7643-5003-2)
- SN 15 Sasaki, Ch. / Sugiura, M. / Dauben, J.W. (Eds): The Intersection of History and Mathematics, 1994 (ISBN 3-7643-5029-6)
- SN 16 Yavetz, I.: From Obscurity to Enigma, The Work of Oliver Heaviside, 1872–1891, 1995 (ISBN 3-7643-5180-2)
- SN 17 Corry, L.: Modern Algebra and the Rise of Mathematical Structures, 1996 (ISBN 3-7643- 5311-2)
- SN 18 Hentschel, K.: Physics and National Socialism. An Anthology of Primary Sources, 1996 (ISBN 3-7643-5312-0)