

Chladni und die Entwicklung der experimentellen Akustik um 1800

DIETER ULLMANN

Vorgelegt von C. TRUESDELL

1. Einleitung

Während die Entwicklung der Akustik im 17. Jahrhundert vorwiegend von der Musik her motiviert war, ist für die Jahrzehnte nach dem Erscheinen von ISAAC NEWTONS (1642–1727) Hauptwerk von 1687 die Akustik in erster Linie von theoretischem Interesse gewesen¹.

Nach 1750 erlebte in Europa die Musikkultur durch das Wirken einer großen Zahl von hervorragenden Komponisten einen beispiellosen Aufschwung. Parallel dazu war auch der Instrumentenbau zu hoher Blüte gelangt. Neue Erfindungen führten zu Verbesserungen an bewährten Musikinstrumenten und zur Konstruktion einer Vielzahl ganz neuer Instrumente. Im Instrumentenbau spielten Werkstattüberlieferung und lange praktische Erfahrung von jeher eine wichtige Rolle. Aber es ist schwer vorstellbar, wie auch auf diesem Gebiet eine Weiterentwicklung ohne genaue Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge bei der Tonerzeugung möglich ist.

Diese Entwicklungen begründen, weshalb in den Jahren nach 1750 das Interesse an akustischen Experimenten neu geweckt war. Dazu kam, daß die Bearbeitung der theoretischen Mechanik und der Elastizitätstheorie inzwischen so weit gediehen war, daß auch immer mehr Spezialfragen, die zur Akustik hinführen,

¹ CANNON, JOHN T., u. SIGALIA DOSTROVSKY: *The Evolution of Dynamics. Vibration Theory from 1687 to 1742 (Studies in the History of Mathematics and Physical Sciences 6)*, New York 1981. DOSTROVSKY, SIGALIA, JAMES F. BELL u. CLIFFORD TRUESDELL: *Physics of Music in SADIE, S.* (Hrsgb.): *The New Grove's Dictionary of Music and Musicians*, Bd. 14, London 1980, S. 664–677. DOSTROVSKY, SIGALIA: *Early Vibration Theory. Physics and Music in the Seventeenth Century*, Arch. History Exact Sci. **14** (1975) S. 169–218. TRUESDELL, CLIFFORD: *The Rational Mechanics of Flexible or Elastic Bodies, 1638–1788, Leonhardi Euleri Opera Omnia, Ser. 2, XI, part 2*, Zürich 1960. TRUESDELL, CLIFFORD: *The Theory of Aerial Sound, 1687–1788, Leonhardi Euleri Opera Omnia, Ser. 2, XIII*, Zürich 1956, S. XIX–LXXII.

in Angriff genommen werden konnten. Die folgenden Abschnitte zeigen darüber hinaus, daß die Entwicklung der experimentellen Akustik auch Lösungen spezieller elastizitätstheoretischer Probleme eingeleitet hat.

2. Wurzeln von Chladnis Beschäftigung mit Akustik

Leben und Werk von ERNST FLORENS FRIEDRICH CHLADNI (1756–1827) stellen für einen Physiker der GOETHEzeit in mancher Beziehung eine Besonderheit dar². Vom Vater zum Juristen bestimmt, hat er sich nach dessen Tod im Jahre 1782 ganz zur Naturwissenschaft gewendet. Schon als Kind beschäftigte sich CHLADNI mit Naturkunde und Musik. In den autobiographischen Notizen, die er einigen seiner Hauptwerke vorangestellt hat und in einer Autobiographie, die 1827 als Nekrolog verwendet wurde, hat er sich selbst zu diesen Fragen geäußert.

Meine Lieblingsbeschäftigung war, von der frühesten Zeit an, Naturkunde, und besonders Erd- und Himmelskunde. 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.³

Auch die große Reiselust, die sich später bei CHLADNI zeigt und für ihn geradezu charakteristisch ist, hat in Wünschen aus der Kindheit erste Wurzeln.

Ich hatte auch mehrmals die Idee, davon zu laufen, um dereinst als Arzt, Kaufmann oder Schiffer, fremde Weltgegenden zu sehen.⁴

Vom 8. Mai 1771 bis zum 21. März 1774 besuchte CHLADNI die damalige Fürstenschule in Grimma/Sachsen. Eine bisher in der biographischen CHLADNI-Literatur noch nicht beachtete Arbeit von WALTHER FISCHER⁵ geht u. a. diesen drei Lebensjahren des jungen CHLADNI nach. Rektor der Schule war von 1763 bis 1782 JOHANN TOBIAS KREBS (1716–1782), Bruder des BACHSchülers JOHANN LUDWIG KREBS (1713–1780). KREBS unterrichtete nur alte Sprachen, jedoch war unter den Schülern bekannt, daß er ein guter Musiker war. Nach JOHANN SEBASTIAN BACHS (1685–1750) Urteil hatte er „eine gute starke Stimme und feine profectus“⁶. Da KREBS sich durch viele Besonderheiten auszeichnete — er hatte mit der Jugend Geduld und durch seine vorbildliche pädagogische Arbeit genoß

² Zur Biographie vgl. ULLMANN, DIETER: Ernst Florens Friedrich Chladni, Biographien hervorragender Naturwissenschaftler, Techniker und Mediziner, Bd. 65, Leipzig 1983. Dort auch die ältere biographische Literatur.

³ E. F. F. Chladni†, *Caecilia* 6 (1827) S. 297–308, Zitat S. 298.

⁴ Ebenda, S. 298.

⁵ FISCHER, WALTHER: Erinnerungen einiger bekannter Fürstenschüler an ihre in Grimma verbrachte Schulzeit, *Augustiner-Blätter* 9 (1932) H. 2, S. 37–46.

⁶ ENGEL, HANS: Musik in Thüringen, *Mitteldeutsche Forschungen* Bd. 39, Köln/Graz 1966, S. 204.

die Grimmaer Schule damals einen guten Ruf – wird auch der Einfluß auf CHLADNIS musikalische Interessen nicht unbedeutend gewesen sein. 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 Colleague, ein väterlicher Freund, Führer und Rathgeber seiner Schüler ...⁷

Mathematiklehrer CHLADNI war übrigens der gebürtige Wittenberger GOTTLOB HEINRICH RICHTER (1718–1796). Dieser erteilte keinen Physikunterricht, obwohl eine Bibliographie⁸ von ihm auch Abhandlungen über Optik enthält. CHLADNI hat noch keinen Physikunterricht in Grimma gehabt, erst nach RICHTERS Tod gab der Mathematiklehrer auch Physik.

Nach Beginn des vom Vater aufgezwungenen Jurastudiums 1776 in Wittenberg, wechselte CHLADNI 1778⁹ an die Universität Leipzig über, die er 1782 mit zwei Dissertationen (einer philosophischen und einer juristischen) verließ.

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.¹⁰

Zur aktiven und passiven Beschäftigung mit Akustik und Musik war der Boden Leipzigs geradezu ideal. Die Stadt besaß ein reiches Musikleben. 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 auseinander¹¹.

Bei CHLADNIS Rückkehr 1782 nach Wittenberg schlug er – wie bereits erwähnt – nicht die juristische Laufbahn ein, sondern folgte seinen Neigungen und entschloß sich – ohne eine feste Anstellung zu haben –, in seiner Wohnung umfangreiche akustische Experimente durchzuführen.

⁷ SCHLICHTEGROLL, FRIEDRICH: Nekrolog der Teutschen für das neunzehnte Jahrhundert, Bd. 1, Gotha 1802, LENZ, C. G.: M. Heinrich Gottfried Reichard, S. 167–176, Zitat S. 169. Übrigens war der bekannte Kartograph CHRISTIAN GOTTLIEB REICHARD (1758–1837) ein jüngerer Bruder. Er war ebenfalls sehr musikalisch.

⁸ MEUSEL, JOHANN GEORG: Lexikon der vom Jahre 1750 bis 1800 verstorbenen teutschen Schriftsteller, Bd. 11, Leipzig 1811, Artikel über G. H. RICHTER.

⁹ Auskunft des Archivs der Karl-Marx-Universität Leipzig.

¹⁰ Vgl. N. 3, S. 298.

¹¹ CHLADNI, E. F. F.: Entdeckungen über die Theorie des Klanges, Leipzig 1787, S. 14–15 u. S. 72–73.

Da die Lehre von den Schwingungen klingender Körper viel mangelhafter war bearbeitet worden, als viele andere Theile der Naturkunde, so glaubte ich, dass hierin sich viel Neues würde entdecken, und auch vielleicht auf Erfindung neuer Instrumente anwenden lassen.¹²

Es ist in der biographischen Literatur über CHLADNI oft beschrieben worden¹³, daß der junge Gelehrte aus familiären Gründen in Wittenberg bleiben wollte und nun versuchte, die durch den Tod des Mathematikers JOHANN ERNST ZEHER (1720–1784) frei gewordene Stelle der zweiten mathematischen Professur an der Universität Wittenberg zu erhalten. Diese Hoffnungen erfüllten sich aber nicht, da die Stelle nicht wieder besetzt wurde.

Um nicht ganz mittellos zu sein, kündigte CHLADNI vom Wintersemester 1783 bis zum Sommersemester 1789 unter den Dozenten der juristischen Fakultät und vom Wintersemester 1789 bis zum Sommersemester 1792 in der philosophischen Fakultät der Universität Wittenberg Vorlesungen an. Anfangs las er auch noch über juristische Gegenstände, später beschränkten sich seine Themen immer mehr auf sein eigentliches Forschungsgebiet. Neben mathematischer Geographie und botanischen Exkursionen lesen wir in den Vorlesungskatalogen¹⁴ für das Sommersemester 1786 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“.

1792 endet CHLADNIS Vorlesungstätigkeit in Wittenberg. Ein Jahr vorher begann er bereits mit kleinen Vorlesungsreisen in sächsische Städte und nach Berlin, die sich im Laufe der nächsten Jahre zu immer größeren Unternehmungen ausdehnten.

3. Chladnis akustische Hauptarbeiten

Die Jahre von 1782 bis 1791 waren für CHLADNI mit umfangreichen akustischen Arbeiten und Experimenten in seiner Wittenberger Wohnung ausgefüllt.

Ich sah es ... eine geraume Zeit hindurch als ein Hauptgeschäft an, solche klingenden 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 theo-

¹² Vgl. N. 3, S. 299.

¹³ Vgl. z.B. N. 2, S. 14.

¹⁴ Nach eigenen Forschungen im Archiv der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

retisch untersuchten Transversalschwingungen eines Stabes, Experimente an, und sodann über die, noch von Niemanden untersuchten Schwingungen einer Fläche.¹⁵

Zunächst begann also CHLADNI mit der Untersuchung der Biegeschwingungen von Stäben unter verschiedenen Randbedingungen. Hier hatten bereits LEONHARD EULER (1707–1783), DANIEL BERNOULLI (1700–1782) und GIORDANO RICCATI (1709–1790) theoretisch vorgearbeitet. CHLADNI studierte die zu diesem Thema publizierten Arbeiten genau; Literatur, die er in Wittenberg nicht bekam, besorgte er sich aus Leipzig¹⁶. Zur Erregung der Schwingungen bediente er sich nach verschiedenen Versuchen schließlich des Geigenbogens. Die Anregung dazu bekam er aus einer Schrift des BACHbiographen JOHANN NICOLAUS FORKEL (1749–1818).

Da man an der Harmonika des berühmten Hrn. Fränklin¹⁷ viele und große Unbequemlichkeiten gefunden hat, so hat ihr der Abt Mazzuchi eine ganz neue Einrichtung gegeben. Die Glocken sind in zwei Fuß langen Kästchen befestigt, dessen 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.¹⁸

Die Benutzung dieser Quelle verrät außerdem, daß sich CHLADNI von Anfang an mit der Anwendung seiner Forschungsergebnisse auf den Instrumentenbau auseinandergesetzt hat.

Die entscheidende Anregung zur Sichtbarmachung des Schwingungsverhaltens kam jedoch von Experimenten GEORG CHRISTOPH LICHTENBERGS (1742–1799).

Endlich kamen mir die Untersuchungen von Lichtenbergs über die durch aufgestreuten Harzstaub zu erhaltenden elektrischen Figuren zu Hilfe, und erregten bey mir die Idee, dass wohl auch auf klingenden Körpern sich nach Verschiedenheit der Schwingungsart verschiedene Erscheinungen zeigen würden, wenn man Etwas aufstrecte.¹⁹

Es ist sehr interessant, daß auch CHLADNIS zweite bedeutende wissenschaftliche Leistung, die Theorie des extraterrestrischen Ursprungs der Meteorite, auf Anregung von LICHTENBERG zurückging.²⁰

¹⁵ Vgl. N. 3, S. 299.

¹⁶ EBSTEIN, ERICH: Aus Chladnis Leben und Wirken, Mitteilungen zur Gesch. Med. u. Naturwiss. 4 (1905) S. 438–460.

¹⁷ BENJAMIN FRANKLIN (1706–1790) gilt als Erfinder der Glasharmonika (1763).

¹⁸ FORKEL, JOHANN NICOLAUS: Musikalisch-kritische Bibliothek, 3. Bd., Gotha 1779, S. 321.

¹⁹ Vgl. N. 3, S. 300.

²⁰ Vgl. dazu besonders CHLADNI, E. F. F.: Über den kosmischen Ursprung der Meteorite und Feuerkugeln, mit Erläuterungen von GÜNTHER HOPPE, Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 258, ¹Leipzig 1979, ²Leipzig 1982.

Mit dem Hinweis auf die LICHTENBERG'schen Figuren war zugleich die Idee der CHLADN'schen Klangfiguren (ein Ausdruck, der auf CHLADNI selbst zurückgeht²¹) geboren.

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.²²

Das Zitat verrät, daß CHLADNI die Linien, auf denen der Sand liegen blieb, von Anfang an als Knotenlinien interpretiert hat. Diese Thematik erfährt später — wie beschrieben werden wird — noch eingehendere Untersuchungen.

CHLADNI konnte nun mit seiner Methode die bereits bekannte Formel für die Eigenfrequenzen der Biegeschwingungen bestätigen. Dazu muß noch gesagt werden, daß der Forscher ein gutes Gehör hatte und selbst schrieb, daß sein Fehler in der Tonhöhenbestimmung nicht größer als ein Halbton sei²³.

Wenn m die jeder Art des Kluges zukommende Zahl, D den Durchmesser, r die Steifigkeit der Materie, L die Länge, und g die spezifische Schwere be-

deutet, so ist der Klang S eines Stabes $= \frac{m^2 D}{L^2} \sqrt{\frac{r}{g}}$.²⁴

CHLADNI blieb nun mit seiner Methode bei diesen schon theoretisch untersuchten Schwingungen nicht stehen sondern eröffnete durch Versuche mit schwingenden biegesteifen Platten — das zweidimensionale Gegenstück zu den Stäben — ein Feld, das experimentell und theoretisch noch unbekannt war.

Bey allen den Arten des Kluges, von welchen bisher die Rede war, kommt es nur auf elastische Krümmungen einzelner Linien an, weit mehreren Schwierigkeiten aber ist die Beurtheilung solcher Klänge unterworfen, bey denen ganze Flächen nach mehreren Dimensionen zugleich elastische Krümmungen annehmen, wofür man bisher weder die gehörigen Berechnungsarten ausfindig gemacht, noch brauchbare Versuche darüber angestellt hat. Das wenige, was von einigen darüber gesagt ist, stimmt größtentheils mit der Erfahrung gar nicht überein; da ich also bey meinen Beobachtungen über diese zusammengesetzten schwingenden Bewegungen einen ganz ungebahnten Weg betreten muß, verdiene ich desto mehr Nachsicht, wenn ich bisweilen irren sollte.²⁵

²¹ Vgl. N. 11, S. 19, erstes Auftreten des Begriffs „Klangfigur“.

²² Vgl. N. 11, S. 4.

²³ Vgl. N. 11, S. 47.

²⁴ Vgl. N. 11, S. 12.

²⁵ Vgl. N. 11, S. 18.

Systematisch untersuchte nun CHLADNI die Klangfiguren von Kreis-, Quadrat- und Rechteckscheiben (später auch von Scheiben komplizierterer Gestalt). C. TRUESDELL hat die Ergebnisse dieser Experimente und ihre Bedeutung für die Elastomechanik bereits ausführlich dargestellt²⁶.

Die mathematische Behandlung der Biegeschwingungen von Platten hat sich in der Folgezeit als ein äußerst kompliziertes mathematisches Problem herausgestellt. Die Entwicklung ist häufig dargestellt worden²⁷, so daß dieser Hinweis auf den Einfluß der Experimente CHLADNIS auf die Entwicklung eines speziellen Problems der Elastodynamik hier genügen möge.

Die Klangfiguren haben CHLADNI ein Leben lang beschäftigt. In vielen Einzeluntersuchungen, in seinem Hauptwerk „Die Akustik“, besonders intensiv in „Neue Beyträge zur Akustik“ und schließlich in seinem Kompendium „Kurze Übersicht der Schall- und Klanglehre“ kam er auf dieses Thema zurück. Bei einem Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit denen einer zukünftigen Theorie konnte es jetzt darauf an — so CHLADNI —

... jeden irgend einer Schwingungsart zukommenden Ton mit den Tönen anderer Schwingungsarten an derselben Scheibe zu vergleichen, um genau zu erforschen, ob mancher Ton mit einem gewissen andern im Einklange stand, oder ob er die einfache, oder doppelte, oder dreyfache Octave des andern u.s.w., oder ob er vielleicht nur um ein kleines Comma höher, oder tiefer war ...²⁸

Die CHLADNISCHEN Experimente sind von einer Vielzahl von Forschern weitergeführt worden. Dabei spielte immer mehr die Frage eine Rolle, ob die Klangfiguren einfach mit den Knotenlinien gleichgesetzt werden können. Bereits in der Schrift von 1787 wird von CHLADNI die Beobachtung mitgeteilt, daß in dem Fall, wenn unter dem aufgestreuten Sand ganz feiner Staub war, sich dieser gerade an den Stellen der größten Schwingungsamplitude sammelte und nicht im Bereich der Knotenlinien²⁹. An der Frage, was mit den Sandkörnern nach Erregung der Platte zu Biegeschwingungen wirklich passiert, haben in der Folgezeit eine große Anzahl von Wissenschaftlern gearbeitet. Dazu zählen FÉLIX SAVART (1791–1841)³⁰ und auch MICHAEL FARADAY (1791–1867), der zu diesem Thema eine umfangreiche Arbeit³¹ veröffentlicht hat, die auf den Ergebnissen einer großen

²⁶ TRUESDELL, CLIFFORD: *The Rational Mechanics of Flexible or Elastic Bodies*, 1638–1788. Vgl. N. 1, S. 335–341.

²⁷ Vgl. besonders SZABO, ISTVÁN: *Geschichte der mechanischen Prinzipien und ihrer wichtigsten Anwendungen*, Wissenschaft und Kultur Bd. 32, Basel 1977, S. 403–424; auch DOSTROVSKY, SIGALIA: *Ernst Florens Friedrich Chladni* in GILLISPIE, CH. C. (Hrsg.): *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 3, New York 1971, S. 258–259.

²⁸ CHLADNI, E. F. F.: *Neue Beyträge zur Akustik*, Leipzig 1817, S. 4.

²⁹ Vgl. N. 11, S. 31.

³⁰ SAVART, FÉLIX: *Sur la communication des mouvemens vibratoires entre les corps solides*, *Annales de chimie et de physique* 14 (1820) S. 113–172, deutsche Übersetzung in *Ann. Physik* 68 (1821) S. 113–159.

³¹ FARADAY, MICHAEL: *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* 1831 S. 299–318.

Zahl von Experimenten aufbaut. Insbesondere beschäftigte sich FARADAY mit dem Problem der Anhäufung von Staub im Bereich großer Schwingungsamplituden. Mit den CHLADNISCHEN Klangfiguren haben aber auch CHARLES WHEATSTONE (1802–1875)³² und Lord RAYLEIGH (JOHN WILLIAM STRUTT) (1842–1919)³³ experimentiert. 1931 fand die Frage nach der Gleichsetzung der Sandfiguren mit den Knotenlinien eine vorläufige Antwort durch Experimente von E. N. DA C. ANDRADE und D. H. SMITH. Sie verwendeten dünne Stahlplatten und erregten sie auf elektromagnetische Weise zu Biegeschwingungen. Man erkannte, daß die Maximalbeschleunigung der Knotenlinien bis zu Kurven erstrecken, an denen die Maximalbeschleunigung der Platte gerade gleich der Fallbeschleunigung g ist. Ist die Erregung der Platte sehr stark, so sind die Klangfiguren schmal, bei schwacher Erregung liegen die Begrenzungen der Klangfiguren weit weg von den Knotenlinien. Für ein Teilchen außerhalb der Figuren beginnt nach Erregung der Platte eine Bewegung

... until it reaches, not a nodal line, but a line at which the maximum acceleration of the plate is just g .³⁴

Die Theorie der Klangfiguren muß heute als noch nicht ganz geklärt gelten.

Wie schon früher betont, hat sich CHLADNI neben seinen Plattenexperimenten auch mit der Erfindung eines neuen Musikinstruments beschäftigt. Sein Ziel war u. a., mit diesem Instrument auf Vortragsreisen zu gehen und damit die praktische Verwendbarkeit der von ihm untersuchten physikalischen Gesetze bei der Tonerzeugung zu demonstrieren. Ausgangspunkt seiner Experimente war die Glasharmonika.

Ueber die Anbringung einer Tastatur an die Harmonica, und über die Mittel, um einigen dabey sich zeigenden Schwierigkeiten abzuhelfen, werde ich vielleicht zu einer andern Zeit einige Bemerkungen liefern ...³⁵

An gleicher Stelle etwas später äußert er sich über seine Absichten noch etwas vage so:

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

³² WHEATSTONE, CHARLES: On the Figures obtained by strewing Sand on Vibrating Surfaces, commonly called Acoustic Figures, Philos. Trans. Roy. Soc. London 1833 S. 593–633.

³³ Lord RAYLEIGH (STRUTT, JOHN WILLIAM): Theory of Sound, Bd. 1, London 1877, London 1894, Dover Publ. New York 1945, § 222.

³⁴ ANDRADE, E. N. DA C., u. D. H. SMITH: The Method of Formation of Sand Figures on a Vibrating Plate, Proc. Phys. Soc. London 43 (1931) S. 405–411, Zitat S. 406.

³⁵ Vgl. N. 11, S. 27, Fußnote.

vielleicht eines noch weiteren Umfanges, und besonders in den höhern Tönen einer größern Stärke fähig seyn würde; worüber ich ein andermal mehr zu sagen gedenke.³⁶

Schließlich kam CHLADNI auf eine ganz andere Idee — nämlich das Streichen von Stäben in Längsrichtung mit den Fingern — und 1790 war das erste Instrument, Euphon³⁷ genannt, fertig. 1800 gesellte sich noch ein zweites dazu, der Clavicylinder, der mittels Tastatur gespielt wurde³⁸.

CHARLES WHEATSTONE, der sich zu Beginn seiner Laufbahn mit Akustik beschäftigt hat und auch ein neues Musikinstrument erfand, beschrieb eine Methode, die Schwingungen tönender Körper direkt sichtbar zu machen³⁹, während mit der Methode der Klangfiguren ja nur der Bereich von ausgezeichneten Linien gesehen werden kann. Nach einem Vorschlag von THOMAS YOUNG (1773–1829) aus dem Jahre 1800 ließ er bei Biegeschwingungen von Stäben einen schmalen Lichtstrahl auf die an den Stabenden angebrachten Stahlknöpfe fallen und untersuchte die Reflexionen (sog. Kaleidophon). Von hier aus führte dann der Weg direkt zum Vibrationsmikroskop von HERMANN VON HELMHOLTZ (1821–1894)⁴⁰. Daß man heute Eigenschwingungen mittels Holographie darstellen kann, sei nur am Rande vermerkt.

Am Schluß seines Buches von 1787 teilt CHLADNI eine Beobachtung mit, die er in den Folgejahren genauer untersuchte, und die nach WILHELM WEBER (1804–1891) „vielleicht die wichtigste akustische Entdeckung Chladni's“⁴¹ ist. Sie erfährt sofort auch eine Verwendung bei der Erfindung des Euphons. CHLADNI schreibt:

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 spitzigen 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. Wird die Mitte der Saite durch gelinde Berührung mit dem Finger, oder auf andere Art gedämpft, und

³⁶ Vgl. N. 11, S. 65.

³⁷ Zuerst erwähnt in CHLADNI, E. F. F.: Von dem Euphon, einem neuerfundnen musikalischen Instrumente, Journal von und für Deutschland 7 (1790) H. 3, S. 201–202, ebenfalls in Journal des Luxus und der Moden 5 (1790) S. 539–543.

³⁸ Die Instrumente werden erstmals ausführlich beschrieben in CHLADNI, E. F. F.: Beyträge zur praktischen Akustik und zur Lehre vom Instrumentbau, enthaltend die Theorie und Anleitung zum Bau des Clavicylinders und damit verwandter Instrumente, Leipzig 1821.

³⁹ WHEATSTONE, CHARLES: Description of the Kaleidophon, or Phonic Kaleidoscope, Quart. J. Science I (1827) S. 344–351, deutsche Übersetzung in Ann. Physik u. Chemie 10 (1827) S. 470–480 (dem Autor war nur die Übersetzung zugänglich).

⁴⁰ HELMHOLTZ, HERMANN VON: Die Lehre von den Tonempfindungen, 1. Aufl., Braunschweig 1863, S. 138–139.

⁴¹ WEBER, WILHELM: Lebensbild E. F. F. Chladni's, Allgemeine Encyclopädie der Wissenschaften und Künste (Hrsgb.: J. S. ERSCH u. J. G. GRUBER), Bd. 21, Artikel Chladni, Leipzig 1830, Wiederabdruck in Wilhelm Weber's Werke (Hrsgb.: Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen), Bd. 1, Berlin 1892, S. 168–197, Zitat S. 178.

die Mitte einer von den beyden Hälften auf die vorhererwähnte Art gestrichen, so erhält man einen Ton, der um eine Octave höher ist, als der vorige. Eben so kann man, wenn die Saite durch Berührung eines Schwingungsknotens in 3, 4 oder mehrere Theile eingetheilt, und in der Mitte eines schwingenden Theiles gestrichen wird, soweit es deren Länge zuläßt, noch mehrere Töne erhalten, die in den nämlichen Verhältnissen gegen den ersterwähnten Ton stehen, wie die bey gleicher Abtheilung der Saite durch rechtwinkliches Streichen zu erhaltenden harmonischen Töne gegen den Grundton. 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.⁴²

Damit waren von CHLADNI die Longitudinalschwingungen begrenzter Festkörper (heute sprechen wir von Dehnschwingungen, weil auch kleine Querverschiebungen der Mediumteilchen auftreten) entdeckt worden. Er untersuchte die Gesetzmäßigkeiten zunächst an gespannten Saiten genauer⁴³, ging dann auch zu Stäben aus verschiedenem Material über, die er durch Reiben mit einem feuchten Tuch in Längsrichtung zu Schwingungen anregte. Von jetzt ab unterschied CHLADNI streng zwischen Longitudinal- und Transversalschwingungen, genau in dem Sinne, wie wir das auch heute noch tun. Ein Blick in CHLADNIS letzte Schrift von 1827⁴⁴ verrät, wie verworren die Begriffsbildung um diese Zeit bei anderen Forschern noch war.

Am 3. 8. 1795 wurde CHLADNI Korrespondierendes Mitglied der 1754 gegründeten Kurfürstlich Mainzischen Akademie nützlicher Wissenschaften zu Erfurt⁴⁵, und am 2. 1. 1796 hielt er in Erfurt einen Vortrag über die Longitudinalschwingungen fester Körper, der im gleichen Jahr auch in Buchform erschien⁴⁶. Dort wird das Thema systematisch abgehandelt. CHLADNI konnte zeigen, daß sich die verschiedenen Longitudinalschwingungen bei Saiten und Stäben wie 1:2:3:4... und die Tonhöhen umgekehrt wie die Saiten- bzw. Stablängen verhalten. Bei Veränderungen der Dicke oder der Spannkraft der Saiten ergaben sich nur äußerst geringe Frequenzänderungen. In einer Tabelle 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. Durch weitere Untersuchungen korrigierte er 1802 diesen Punkt, indem er schreibt, daß die Frequenz der Longitudinalschwingungen

... wahrscheinlich auch umgekehrt wie die Quadratwurzel der Schwere⁴⁷

⁴² Vgl. N. 11, S. 76.

⁴³ CHLADNI, E. F. F.: Über die Längentöne einer Saite. Musikalische Monatschrift (Berlin), 2. Stück, August 1792, S. 33–35.

⁴⁴ CHLADNI, E. F. F.: Kurze Übersicht der Schall- und Klanglehre, Mainz 1827, S. 19 Fußnote.

⁴⁵ Mitteilung von Frau Bibliotheksrätin BEHNERT, Wiss. Allgemeinbibliothek Erfurt.

⁴⁶ CHLADNI, E. F. F.: Über die Longitudinalschwingungen der Saiten und Stäben, Erfurt 1796.

⁴⁷ CHLADNI, E. F. F.: Die Akustik, Leipzig 1802, S. 109.

sei. Auch in der Schrift von 1827 ist sich CHLADNI über die Abhängigkeit der Longitudinaltonfrequenz 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.⁴⁸

Der Franzose FÉLIX SAVART hat ebenfalls seine Schwierigkeiten bei der Untersuchung der Longitudinalschwingungen von Stäben gehabt. Er behauptete sogar, daß CHLADNI

... qui 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.⁴⁹

Und als SAVART schließlich noch behauptete, daß nur Stäbe, die an beiden Enden frei sind, in Longitudinalschwingungen versetzt werden könnten⁵⁰, aber nicht unter anderen Randbedingungen, antwortete CHLADNI tief verletzt an den Herausgeber der „Annalen der Physik“ LUDWIG WILHELM GILBERT (1769–1824):

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.⁵¹

Nachdem aber CHLADNI auf SAVARTS Behauptungen ausführlich eingegangen war⁵², hat der französische Physiker seine früheren Äußerungen zurückgenommen⁵³.

SAVART hatte die Stäbe, die einen rechteckigen Querschnitt besaßen, bei den Versuchen mit Sand bestreut. 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. Das deutete SAVART so, daß der Stab auch ein wenig in die Quere schwingt, also keine reinen Longitudinalschwingungen ausführt.

⁴⁸ Vgl. N. 44, S. 31.

⁴⁹ Vgl. N. 30, S. 115 bzw. 121.

⁵⁰ Ebenda, S. 119 bzw. S. 121.

⁵¹ CHLADNI, E. F. F.: Erläuterung und Berichtigung einiger Aeusserungen in dem vorstehenden Aufsätze des Herrn Dr. Felix Savart, Ann. Physik 68 (1821) S. 160–164, Zitat S. 161.

⁵² CHLADNI, E. F. F.: Remarques concernant le Mémoire de M. Savart sur la Communication des mouvements vibratoires entre les corps solides, Annales de chimie et de physique 20 (1822) S. 74–78 u. N. 51.

⁵³ SAVART, FÉLIX: Du Mémoire sur les Vibrations des corps solides, considérées en général, Ebenda 25 (1824) S. 12–50, 138–178, 225–269, bes. S. 247.

WILHELM WEBER und sein älterer Bruder ERNST HEINRICH WEBER (1795–1878) haben nach einer Idee von SAVART die Längentöne auf eine Art sichtbar gemacht, die bereits zur Methode der Staubfiguren von AUGUST KUNDT (1839–1894) aus dem Jahre 1866 hinführt. Die beiden Brüder verwendeten Glasröhren, in deren Inneren trockener Sand gleichmäßig verteilt wurde. Wurde die Röhre in waagerechter Lage gehalten und durch Reiben in Longitudinalschwingungen versetzt, so gerieten die Sandkörner in Bewegung und lagerten sich in Form kleiner, spitz zulaufender Häufchen ab⁵⁴.

CHLADNI erkannte sehr schnell, wie er mit Hilfe der Longitudinalwellen bei Stäben ein bisher noch ungelöstes Problem in Angriff nehmen konnte: die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Festkörpern. Bis in die Zeit CHLADNIS konnte man nur den Wert dieser Geschwindigkeit für Luft⁵⁵. Wohl gab es Versuche von CHRISTIAN ERNST WÜNSCH (1744–1828) in Frankfurt/Oder mit Holzlaternen⁵⁶. Sie hatten das Ergebnis, daß die Schallgeschwindigkeit in Holz so hoch ist, daß sie mit der von WÜNSCH angegebenen Methode nicht mehr gemessen werden konnte. Die CHLADNISCHE 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 wurde in der Mitte gehalten, so daß bei der Grundschiwingung die Stablänge gleich der halben Wellenlänge des Tones ist. Dieser Ton wurde mit dem Grundton einer gleichlangen offenen Pfeife verglichen, die dasselbe Schwingungsverhalten wie der Stab zeigt. Die Experimente und die erhaltenen Werte für die Schallgeschwindigkeit (genauer: für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Dehnwellen) in Zinn, Silber, Kupfer, Eisen, Glas und in verschiedenen Holzarten sind von JAMES F. BELL schon an anderer Stelle genau beschrieben worden⁵⁷. BELL betont die Bedeutung der CHLADNISCHEM Versuche für die Messung des Elastizitätsmoduls und geht auch auf die Differenz des von CHLADNI gemessenen Wertes der Schallgeschwindigkeit in Eisen zu dem von JEAN BAPTISTE BIOT (1774–1862)

⁵⁴ WEBER, ERNST HEINRICH, u. WILHELM WEBER: *Wellenlehre auf Experimente gegründet oder über die Wellen tropfbarer Flüssigkeiten mit Anwendung auf die Schall- und Lichtwellen*, Leipzig 1825, S. 555–558, Wiederabdruck in *Wilhelm Weber's Werke*, Hrsgb.: Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Bd. 5, Berlin 1893, S. 414–415.

⁵⁵ TRUESDELL, CIFFORD: *The Theory of Aerial Sound*, N. 1, S. XIX–XXI und ULLMANN, DIETER: *Die ersten Messungen der Schallgeschwindigkeit in Luft und das Schallortungsverfahren von Jonas Meldercreutz*, *Centaurus* 26 (1982) S. 25–37.

⁵⁶ WÜNSCH, CHRISTIAN ERNST: *Nachricht von einem Versuche, welcher lehrt, 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. Akademie der Wiss. zu Berlin vorgelesen wurden in den Jahren 1788 u. 1789*, Berlin 1793, S. 187–188. Nach ASCHOFF, V.: *Drei Vorschläge für nichtelektrisches Fernsprechen aus der Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert*, *Deutsches Museum, Abh. u. Berichte*, 49. Jahrgang (1981) H. 3, S. 21, Fußnote, hat WÜNSCH die Versuche 1789 durchgeführt.

⁵⁷ BELL, JAMES F.: *The Experimental Foundations of Solid Mechanics in FLÜGGE, S.* (Hrsgb.): *Handbuch der Physik*, Bd. VIa/1 (Bandhrsgb. C. TRUESDELL), Berlin/Heidelberg/New York 1973, S. 182–184.

1808 an Wasserleitungsröhren in der Kanalisation von Paris gemessenen Wertes und die anschließende Kontroverse ein⁵⁸.

CHLADNI hatte sehr schnell erkannt, daß mit Hilfe desselben Grundgedankens wie bei Festkörpern auch die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen bestimmt werden kann. Hier gab es ebenfalls noch keinerlei Messungen, und CHLADNI betrat wiederum Neuland.

Es ist ein Zeichen für die schlechte finanzielle Lage der Universität Wittenberg, die um 1800 auf dem Gebiet der Naturwissenschaft – und nicht nur hier – keinen Vergleich mit vielen anderen deutschen Universitäten aushalten konnte, wenn CHLADNI sich für die Durchführung entsprechender Experimente dort nicht die erforderlichen Apparate zusammenleihen konnte. So hatte er während eines Aufenthaltes in Wien (wahrscheinlich 1796) die Versuche bei JOSEPH FRANZ VON JACQUIN (1766–1839) ausführen⁵⁹ können. Die Grundidee des Experimentes ist der Vergleich des Tones 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 zur Vermeidung aller Beymischungen 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.⁶⁰

Die Versuche, so schrieb CHLADNI, wurden bei einer Raumtemperatur von 10–12°R (= 13–15°C) durchgeführt.

Zunächst wurde Sauerstoff durch Erhitzen von Braunstein gebildet und damit die Glocke und Blase gefüllt. Der Ton war über einem 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 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 Fäl-

⁵⁸ Ebenda, S. 191–196 u. S. 404.

⁵⁹ CHLADNI, E. F. F.: Bemerkungen über die Töne einer Pfeife in verschiedenen Gasarten, Magazin für den neuesten Zustand der Naturkunde I (1798), 3. Stück, S. 65–79.

⁶⁰ Ebenda, S. 69–70.

len 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 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 eiserne Röhre leitete. Der Ton der Pfeife war jedesmal weit höher als bei Luft und die Ergebnisse für die Schallgeschwindigkeit streuten zwischen 2100–2500 Pariser Fuß/s (= 683–813 m/s) je nach Herstellungsart⁶¹.

Der CHLADNISCHE Versuch ist in der Folgezeit mit kleinen experimentellen Abweichungen oft wiederholt worden, zunächst von FRANCIS KERBY und A. MERRICK⁶² und besonders ausführlich von JOHANN FRIEDRICH BENZENBERG (1777–1846)⁶³. Die große Diskrepanz bei Wasserstoff ließ sich auch bei diesen Forschern nicht beseitigen. L. W. GILBERT hat in seiner Zeitschrift „Annalen der Physik“ darauf hingewiesen, daß vermutlich der Reinheit, besonders der des Wasserstoffs, nicht genug Beachtung geschenkt wurde⁶⁴. Später sind dann genauere Werte für die Schallgeschwindigkeit in Gasen mit Hilfe der schon erwähnten KUNDTSCHEN Röhre gemessen worden.

In Wasser wurde die Schallgeschwindigkeit das erste Mal im November 1826 durch den Physiker JEAN DANIEL COLLADON (1802–1893) durch Messungen im Genfer See über eine Strecke von ca. 13,5 km zwischen den Orten Rolle und Thonon ermittelt, und die Ergebnisse hat er dann zusammen mit dem Mathematiker JACQUES CHARLES FRANÇOIS STURM (1803–1855) publiziert⁶⁵. Man erhielt für Wasser der mittleren Temperatur von 8,1 °C eine Geschwindigkeit von 1435 m/s. Als CHLADNI 1826 das Manuskript zu seinem Kompendium „Kurze Übersicht der Schall- und Klanglehre, nebst einem Anhang, die Entwicklung und Anordnung der Tonverhältnisse betreffend“ abschloß, das dann im März 1827 erschien, hatte er von diesen Messungen noch nichts gewußt.

Für die Entwicklung der Akustik im 19. Jahrhundert von größter Bedeutung wurde CHLADNIS Monographie „Die Akustik“, die 1802 in Leipzig in 1. Auflage

⁶¹ Für die numerischen Werte vgl. man N. 47, S. 230.

⁶² KERBY, FRANCIS, u. A. MERRICK: The results of some experiments on the sonorous properties of gases, *Journal of Nat. Philosophy, Chemistry and the Arts* 27 (1810) S. 269–271, deutsche Übersetzung in *Ann. Physik* 39 (1811) S. 438–441 (dem Autor war nur die Übersetzung zugänglich).

⁶³ BENZENBERG, JOHANN FRIEDRICH: Versuche über die Geschwindigkeit des Schalls in verschiedenen Luftarten, *Ann. Physik* 42 (1812) S. 12–29.

⁶⁴ Ebenda, S. 25, Fußnote von GILBERT.

⁶⁵ COLLADON, JEAN DANIEL u. JACQUES CHARLES FRANÇOIS STURM: Mémoire sur la Compression des Liquides, *Ann. de chimie et de physique* 36 (1827) S. 113–159 u. S. 225–257, deutsche Übersetzung in *Ann. Physik u. Chemie* 12 (1828) S. 39–76 u. S. 161–197.

erschien⁶⁶. In diesem Buch wird dieser Wissenszweig der Physik das erste Mal systematisch als Lehre von den Schwingungen elastischer Körper beschrieben. CHLADNI sammelte alles akustische Material früherer Zeiten, zitierte es genau und verband es mit seinen eigenen Forschungsergebnissen. Dabei kommen Theorie und Experiment gleichermaßen zu Wort. Bereits seine Zeitgenossen erkannten die Bedeutung dieser Monographie. Als sich CHLADNI 1808–1810 in Paris aufhielt, gab NAPOLEON I. (1769–1821) nach einer Audienz, auf der der Wittenberger Physiker seine Klangfiguren vorführte und den Clavicylinder hören ließ, den Auftrag zur Übersetzung ins Französische⁶⁷. Das Buch erschien 1809 in Paris unter dem Titel „Traité d'Acoustique“. 1812 kam es bereits zur zweiten Auflage.

LORENZ OKEN (1779–1851) schrieb anlässlich einer Rezension der „Akustik“ in der Zeitschrift „Isis“ (1817)

Das ist, wir wissen was wir sagen, das einzige Werk der deutschen Physiker, das Epoche gemacht, das einen ganzen Zweig in die Physik eingeführt hat ...⁶⁸

Das Buch gliedert sich in vier Teile: 1. einen arithmetischen Teil, in dem die Töne und ihre Beziehungen untereinander behandelt werden, 2. einen Teil, der über die Ursachen der Schallentstehung berichtet, 3. einen Teil, der die Schallausbreitung und 4. den Schlußteil, der den Schallempfang im Ohr behandelt. Dieser klare Aufbau führt zu einer Übersichtlichkeit des ganzen Lehrgebäudes, wie es bisher noch nie so dargestellt wurde. Bereits früher war die Begabung und der Hang CHLADNIS nach systematischem Aufbau deutlich geworden⁶⁹. Die Monographie wies zugleich die Forschungsschwerpunkte der nächsten Jahrzehnte aus. Zwei Beispiele mögen das verdeutlichen. Völlig unklar war um 1800 die Ursache für die unterschiedliche Qualität eines Tones, der von verschiedenen Instrumenten hervorgebracht wird. Heute sprechen wir in diesem Zusammenhang von der Klangfarbe. In der „Akustik“ glaubte CHLADNI, daß die Klangfarbe von „einiger Beymischung eines Geräusches“⁷⁰ herrühre, die mit jedem Klang verbunden sei. Auch in der Schrift von 1827 schreibt er noch:

Von der qualitativen Verschiedenheit der Klänge (im Französischen timbre, wofür man wohl im Deutschen das Wort: Laut brauchen könnte) ist das Wesentliche noch unbekannt.⁷¹

Es ist interessant, das CHLADNI in einer Arbeit aus dem gleichen Jahr, seinem Todesjahr, eine mögliche Erklärung für die Verschiedenheit der Klangfarben (oder der „Laute“, wie er schreibt) gibt, die der späteren Definition schon nahekomm.

⁶⁶ 2. Aufl. Leipzig 1830. Unveränderter Nachdruck der 1. Aufl.

⁶⁷ CHLADNI, E. F. F.: Ueber meine Aufnahme bey Napoleon und sonst in Paris, *Caecilia* 5 (1826) S. 137–144.

⁶⁸ Zitiert nach: Geschichte der Universität Jena 1548/58–1958, Bd. 2, Jena 1958, S. 544.

⁶⁹ CHLADNI, E. F. F.: Brief an den Herausgeber, *Archiv d. reinen u. angew. Mathematik* 1 (1795) S. 126–128, wo eine Klassifikation von verschiedenen Schallquellen gegeben wird.

⁷⁰ Vgl. N. 47, S. 60.

⁷¹ Vgl. N. 44, S. 5–6.

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 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.⁷²

16 Jahre später erschien dann GEORG SIMON OHMS (1789–1854) grundlegende Arbeit zu dieser Frage⁷³.

Das andere Beispiel betrifft die Natur der von dem Organisten GEORG ANDREAS SORGE (1703–1778) im Jahre 1744 das erste Mal beschriebenen Differenztöne, die man auch TARTINISCHE Töne nennt. Hier vertritt CHLADNI noch die traditionelle Ansicht, daß Differenztöne (bzw. allgemein Kombinationstöne) und Schwebungen keinen grundsätzlichen Unterschied aufweisen. Schwebungen würden dann als Differenztöne hörbar werden, sobald die Schwebungsfrequenz in den Hörbarkeitsbereich des Ohres fällt⁷⁴. In der Folgezeit entstanden viele Arbeiten mehrerer Forscher zu diesem Problem, von denen die von HELMHOLTZ aus dem Jahre 1856 die bedeutendste ist und Kombinationstöne durch nichtlineare Effekte erklärt⁷⁵.

4. Schlußbetrachtung

Die Breite und Vielfalt der akustischen Arbeiten CHLADNIS haben den Wittenberger Physiker zum Initiator einer experimentellen akustischen Forschung der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts werden lassen. Es wurde in dem vorstehenden Abschnitt versucht, die Hauptansatzpunkte dieser Entwicklung aufzuzeigen. Wie stark aber war der Einfluß auf Musikwissenschaft und Instrumentenbau?

CHLADNI hat auf seinen zahlreichen Vortragsreisen eine sehr große Zahl berühmter Persönlichkeiten kennengelernt. Auf diese Weise sorgte er auch für das Bekanntwerden der Grundgesetze der Akustik in den Kreisen von Komponisten und Instrumentenbauern. Bei den Komponisten war es in erster Linie CARL FRIEDRICH ZELTER (1758–1832), der ein freundschaftliches Verhältnis zu CHLADNI

⁷² CHLADNI, E. F. F.: Über die verschiedene Beschaffenheit des Klanges eines Instruments, nachdem es von verschiedenen Spielern behandelt wird; auch über das Zerbrechen der Claviersaiten, *Caecilia* 6 (1827) S. 183–192, Zitat S. 190–191.

⁷³ OHM, GEORG SIMON: Ueber die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene und ähnlicher tonbildender Vorrichtungen, *Ann. Physik u. Chemie* 61 (1843) S. 497–565. Vgl. zur Geschichte auch TURNER, R. STEVEN: *The Ohm-Seebeck Dispute, Hermann von Helmholtz, and the Origins of Physiological Acoustics*, *British J. History Sci.* 10 (1977) S. 1–24.

⁷⁴ Vgl. N. 47, S. 207–210.

⁷⁵ HELMHOLTZ, HERMANN VON: Ueber Combinationstöne. *Ann. Physik u. Chemie* 99 (1856) S. 497–540. Für die geschichtliche Entwicklung vgl. auch hier TURNER, N. 73.

fund. Unter den weniger bekannten Tonsetzern, mit denen CHLADNI korrespondierte und die er besuchte, mögen noch HANS GEORG NÄGELI⁷⁶ (1773–1836) und JOHANN PAUL SCHULTHESIUS⁷⁷ (1748–1816) genannt werden. Besonders erwähnt werden soll der Musiktheoretiker, Komponist und Herausgeber der Zeitschrift „Caecilia“ JACOB GOTTFRIED WEBER (1779–1839), den CHLADNI zu denen zählte,

... die seine akustischen Arbeiten bei Herausgabe neuer Werke über die Theorie ... benutzt haben.⁷⁸

Die Kenntnisse über CHLADNIS Beziehungen zu den berühmten Zeitgenossen und seine Einflüsse auf sie sind noch immer recht lückenhaft. Hier liegt ein noch weit- hin unbekanntes Gebiet für die Forschung.

Der Instrumentenbauer LUIGI CONCONE in Turin baute in Winter 1810/11 bei CHLADNIS Aufenthalt in dieser Stadt nach Angaben des Physikers Clavicylinder⁷⁹, von denen sich ein Exemplar im Musikinstrumentenmuseum der Karl-Marx-Universität Leipzig befindet. Aus Bemerkungen CHLADNIS in der Schrift von 1817⁸⁰ geht hervor, daß sich auch JOHANN NEPOMUK MÄLZEL (1772–1838) und der Wittenberger Physiker persönlich gekannt haben.

Durch seine Reise- und Vortragstätigkeit legte CHLADNI selbst den Grundstein für ein Zusammenwirken von Akustik und Instrumentenbau, wie es in der Folgezeit immer deutlicher zu registrieren ist. Ein Werk wie „Lehrbuch der Orgelbaukunst, nach den besten Methoden älterer und neuerer, in ihrem Fache ausgezeichnete Orgelbaumeister und begründet auf mathematische und physicalische Gesetze“⁸¹ des Weimarer Stadtorganisten und Orgelexperten JOHANN GOTTLIB TÖPFER (1791–1870) wäre ohne CHLADNI und seinen Einfluß auf die akustische Forschung und schließlich auch auf den Instrumentenbau nicht denkbar gewesen. Besonders bekannt wurde die Zusammenarbeit des Flötisten THOEBALD BOEHM (1794–1881) mit dem Physiker und Geologen CARL EMIL VON SCHAFFHÜTTL (1803–1890), aus der die sog. Boehmflöte hervorging, bei der die Grifflöcher nach akustischen Gesetzen angeordnet sind und die Spielbarkeit durch ein bestimmtes Klappensystem erreicht wird⁸².

CHLADNIS eigenen Instrumenten Euphon und Clavicylinder war auf die Dauer kein Erfolg beschieden. Sie waren — wie die Glasharmonika — eine ausgesprochene Moderscheinung des Zeitalters der Empfindsamkeit.

⁷⁶ Unpublizierter Brief CHLADNIS vom 8. Mai 1810 aus Basel, aufbewahrt in der Universitäts- und Landesbibliothek Sachsen-Anhalt in Halle/S.

⁷⁷ ULLMANN, DIETER: Chladni Italienreise nach Briefen an J. P. Schulthesius, NTM-Schriftenreihe Gesch. Naturwiss., Technik, Med., Leipzig 19 (1982) 2, S. 51–57.

⁷⁸ HIENTZSCH, JOHANN GOTTFRIED: Ernst Florens Friedrich Chladni (Nachruf), *Eutonia* I (1829) S. 167–182, Zitat S. 180.

⁷⁹ Vgl. N. 38, S. 120.

⁸⁰ Vgl. N. 28, S. 66.

⁸¹ 5 Bände, Weimar 1855. Viele Nachauflagen (5. Aufl., Mainz 1955–60 unter dem Titel: „Lehrbuch der Orgelbaukunst“, bearb. von PAUL SMENTS).

⁸² VENTZKE, KARL: Die Boehmflöte, Fachbuchreihe „Das Musikinstrument“, Bd. 15, Frankfurt/M. 1966.

Über die Verwendung der Methode der Klangfiguren im Geigenbau schreibt ein Akustiker unserer Tage zwar:

Es ist ... erstaunlich, daß der Geigenbau ... keinen systematischen Gebrauch davon macht.⁸³

Aber er schreibt auch gleichzeitig:

Dabei bekommt man, wenn man die Frequenz der Anregung ... langsam gleiten läßt, eine Eigenschwingung nach der anderen zu sehen.⁸⁴

Ungeachtet der Reserviertheit mancher Musiker gegenüber der Arbeit der Akustiker und ihren Ergebnissen, gilt noch immer das Wort SCHAFFHÄUTLS aus dem Jahre 1882:

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.⁸⁵

Akademie der Wissenschaften der DDR
Institut für Mechanik
DDR-1199 Berlin
Rudower Chaussee 5

(Eingegangen am 16. November 1983)

⁸³ CREMER, LOTHAR: Physik der Geige, Stuttgart 1981, S. 277.

⁸⁴ Ebenda, S. 277.

⁸⁵ Vgl. N. 82, S. 48.