



Chladnis Beiträge zur Raumakustik

Zum 250. Geburtstag des Gelehrten

Dieter Ullmann

A lot of publications on the acoustics of theatres and churches were published around the turn of the 18th to the 19th century. The authors were architects who were interested in acoustical problems. Chladni was the first physicist who published on the acoustics of rooms, he introduced the term “reverberation” into this field. His publications on this subject are reviewed. They have been the basis for the great progress of room acoustics since 1900.

Während um 1750 die mathematische Behandlung von Schwingungsproblemen bereits weit fortgeschritten war, fehlten für das Gebiet der Akustik systematische experimentelle Untersuchungen. Chladnis Erstlingswerk „Entdeckungen über die Theorie des Kluges“ (Leipzig 1787) brachte die Wende, und seine bahnbrechende Monographie „Die Akustik“ (Leipzig 1802) beeinflusste diese Wissenschaft bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts. Chladnis Geburtstag am 30. November 1756 jährt sich im Jahre 2006 zum 250. Male. Einzelne Untersuchungen über verschiedene Aspekte der Schallausbreitung in geschlossenen Räumen, wie sie vom Jubilar beschrieben wurden, liegen bereits vor [Ullmann 1989, 1990, 1996]. Chladnis Arbeiten sind die ersten Betrachtungen wissenschaftlicher Art über dieses Thema. Der Wittenberger Physiker führte als erster den für die Raumakustik wichtigen Begriff „Nachhall“ ein. Nachdem Chladni erstmals ein Kapitel über Raumakustik in seine bahnbrechende Monographie *Die Akustik* aufgenommen hatte [Chladni 1802], begann eine – zunächst zögerliche – Beschäftigung der Physiker mit diesem Thema, die einhundert Jahre später mit der Sabineschen Nachhallformel zur ersten quantitativen Beziehung für die Berechnung dieser wichtigen Größe Nachhallzeit führte [Ullmann 1989].

Chladnis Beiträge

Chladnis Monographie aus dem Jahre 1802, *Die Akustik*, umfasst 310 Seiten. Auf nur sieben Seiten (S. 249–256) widmete er sich der Schallausbreitung in geschlossenen Räumen. Darin drückte sich der damalige niedrige Kenntnisstand über die Raumakustik aus. 1802 waren die Werte der Schallgeschwindigkeit in Luft und einigen anderen Medien sowie die Tatsache bekannt, daß die Schallintensität mit dem Quadrat der Entfernung von der Schallquelle abnimmt; man kannte ferner die Erscheinung der Resonanz und die Fähigkeit des Ohres, pro Sekunde höchstens neun verschiedene Schalleindrücke unterscheiden zu können:



Abb. 1. Ernst Florens Friedrich Chladni. Titelvignette aus *Allgemeine musikalische Zeitung* (Leipzig)“ Bd. 10 (1808), nach einem Kupferstich von Friedrich Wilhelm Bollinger (1777–1825).

„Wenn solche Wiederholungen so schnell auf einander erfolgen, daß die Zeiträume, in welchen dieses geschieht, sich nicht durch das Gehör unterscheiden lassen, und also diese Wiederholungen als ein fort dauernder Schall empfunden werden, so nennt man es eine Resonanz, oder einen Nachhall.“ [Chladni 1802, S. 242]

Hier tauchte zum ersten Male der für die Raumakustik äußerst wichtige Begriff „Nachhall“ auf. Was den Begriff der „Resonanz“ in diesem Zitat betrifft, so ist zu bemerken, daß Chladni hier noch nicht zwischen Resonanz und Mitschwingen unterschied [Chladni 1802, §228]. In den für die weitere Entwicklung dieses Wissenschaftszweiges wichtigen §§ 214–217 (S. 249–256) dieser Monographie wurde die Bedeutung des Nachhalls für die gute Hörsamkeit (oder Akustik) näher untersucht. Wie folgendes Zitat dokumentiert, führte Chladni den Begriff „Nachhall“ so ein, wie er heute noch üblich ist:

„Hingegen scheint einiger Nachhall für die Würckung der Musik mehr vorteilhaft, als schädlich zu seyn, vorausgesetzt, daß er nicht so stark, und nicht so anhaltend ist, daß die Töne dadurch unrein oder undeutlich werden.“ [Chladni 1802, S. 251]

Ein ausreichend langer Nachhall ist also für eine musikalische (oder rednerische) Darbietung wichtig. Chladni erkannte deutlich die Aufgabe der Raumakustik:

„Es wäre sehr zu wünschen, daß man in allen Fällen unfehlbar angeben könnte, wie ein zum Hören bestimmtes Gebäude, z.B. ein Musiksaal, oder ein Schauspielhaus, oder ein Versammlungsort, wo man einen Redner hören will ... so einzurichten sey, daß man die Musik oder die Stimme überall gleich stark und deutlich hören könne.“ [Chladni 1802, S. 249]

Um nun dieses Ziel zu erreichen, muß man, so Chladni, für das Gebäude folgende zwei Forderungen erfüllen:

- „I) ... Beförderung einer gleichförmigen und ungehinderten natürlichen Verbreitung des Schalles,
- II) ... künstliche Verstärkung desselben, welche entweder durch Mitklingen anderer Körper, oder durch Brechungen des Schalles geschehen kann.“ [Chladni 1802, S. 249]

Unter „Brechung des Schalles“ verstand der Autor eine bestimmte Schallführung durch reflektierende Wände. Das Problem der akustisch günstigen Grundrißlösungen für die Zuschauerräume von Opern- und Schauspielhäusern wurde um die Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert in der Literatur häufig diskutiert [Hartmann 1990]. Neben der Schrift „Essai sur l’architecture théâtrale“ von Pierre Patté (1723–1814) aus dem Jahre 1782 und der von George Saunders (1762–1839) aus dem Jahre 1790 mit dem Titel „Treatise on theatres“, war es insbesondere das Buch des Rigaer Dramaturgen Johann Gottlieb Rhode (1762–1827) „Theorie der Verbreitung des Schalles für Baukünstler“ (Berlin 1800), das für Chladni beim Abfassen der Paragraphen über Raumakustik in *Die Akustik* wichtig war. Rhode ging von der grundsätzlichen Erfüllbarkeit der Forderung nach einer guten Theaterakustik aus. Da jedoch in vielen Theatern diesbezüglich das Gegenteil festgestellt worden war, konnte dieses Missfallen nur auf der falschen Anwendung der Gesetze der Schallausbreitung beruhen [Rhode 1800, S. 6].

Die von Chladni zitierten zwei Forderungen zum Erreichen einer guten Hörbarkeit gingen auf Rhode zurück und wurden vom Physiker näher betrachtet. Eine gleichförmige und ungehinderte Verbreitung des Schalles sei am besten in Theatern mit halbkreisförmigem Grundriß gewährleistet, wobei die Anordnung der Sitzplätze amphitheatralisch sein müßten. Eine künstliche Verstärkung des Schalles, so die zweite Forderung, die etwa durch dünne Bretterwände hervorgerufen werden könnte, lehnte Chladni der Deutlichkeit wegen ab. Über die ganze Problematik der Schallabsorption und verwandter Fragen bestanden zu dieser Zeit insgesamt noch große Unklarheiten; die Bedeutung schwingungsfähiger Holzverkleidungen als Tiefenschlucker war völlig unbekannt. Es ist daher nicht verwunderlich, daß Chladni als das „... vorzüglichste Mittel, um in einem zum Hören bestimmten Gebäude den Schall zu verstärken, ... die Brechung desselben“ anführte [Chladni 1802, S. 252]. Dabei ging es ihm um eine Schallführung mittels reflektierender Wände, die am Ort des Zuhörers keine bemerkenswerte Zeitdifferenz zwischen Direktschall und reflektiertem Schall aufkommen lassen sollte. Alle diese Überlegungen führten zu einer

Ablehnung runder und elliptischer Räume im Grundriß. Chladni betrachtete – gemäß seiner ersten Forderung für gute Hörsamkeit – die halbkreisförmig angeordneten Zuschauerreihen in einem Raum mit parallelen oder zur Bühne divergent angeordneten Seitenwänden als günstig. Das zeigten auch die Erfahrungen mit den damals vorhandenen Ränge-Theatern.

Mit diesen Bemerkungen sind Chladnis raumakustische Betrachtungen in *Die Akustik* erschöpft. Erst in seiner Schrift *Neue Beyträge zur Akustik* [Chladni 1817] äußerte er sich wieder zu dem Thema. Dieses Buch, dessen Manuskript 1816 abgeschlossen worden war, stellt eine Erweiterung und Aktualisierung von *Die Akustik* dar. In der neuen Version wurde eine interessante raumakustische Beobachtung mitgeteilt:

„Eine auffallende Wirkung der Musik habe ich zu Ludwigslust in der Hofkirche des Großherzogs von Meklenburg=Schwerin bemerkt. Die Kirche hat nur ein Schiff, und die ganze Seite, wo sich der Altar befindet, bildet ein Gemählde, welches die Erscheinung der Engel vorstellt, wie sie den Hirten die Geburt Christi verkündigen. Zwischen den obern Bretwänden, welche die Wolken bilden, befindet sich das Orchester, welches weder das Publikum sieht, noch von ihm gesehen wird, und aller Schall verbreitet sich erst aufwärts und gelangt zum Publikum durch Brechung an der Decke. Die Wirkung ist sehr gut und deutlich ... [Chladni 1817, S. 83]

Johann Joachim Busch errichtete die Schlosskirche in Ludwigslust als einen einschiffigen Saal in den Jahren von 1765 bis 1770. Dietrich Findorff und Johann H. Suhrlandt vollendeten das in der Kirche befindliche Kolossalgemälde, Anbetung der Hirten, in den Jahren 1772 bis 1803 [Dehio 1968, S. 206]. Die Orgel ist dadurch nicht sichtbar; und akustisch drängt sich ein Vergleich mit dem verdeckten Orchestergraben im Bayreuther Festspielhaus auf.

Im Jahre 1826 begann Chladni schließlich seine Arbeit an einem Akustik-Kompendium, das nach seinem Tod unter dem Titel *Kurze Uebersicht der Schall- und Klanglehre, nebst einem Anhang, die Entwicklung und Anordnung der Tonverhältnisse betreffend* (1827) erschien. Auch in dieser Monographie behandelte er raumakustische Fragen. Das folgende Zitat dokumentiert eine Weiterentwicklung seiner Ansichten:

„In einem beträchtlich grossen Local ... wird der Schall durch vortheilhafte Brechungen oder Zurückwerfungen der Schallwellen müssen verstärkt werden. Diese dürfen aber nicht etwa ... darin bestehen, dass der vorwärts gehende Schall wieder rückwärts wirke, welches nur ein Echo, oder einen der Deutlichkeit hinderlichen späten Nachhall geben würde, und am besten durch eine amphitheatralische Einrichtung der Sitze vermieden werden kann. Vielmehr können Brechungen und Rückwirkungen der Schallwellen nur dann vortheilhaft seyn, wenn die nach den Seiten, nach hinten und nach oben gehenden Schallwellen, deren Wirkung ohne eine Zurückwerfung verloren gehen würde, gegen die Zuhörer hin gebrochen werden, und wenn die den Schall zurückwerfenden Wände dem Ort der Erregung des Schalles so nahe sind, dass die ursprünglichen in geraden Richtungen ausgehenden und die zurückgeworfenen Schallwellen so kurz nach einander anlangen, dass man zwischen beiden keinen oder fast keinen Zeitunterschied bemerkt. [Chladni 1827a, S. 64–65]

Aus diesen Überlegungen folgerte Chladni, daß Räumlichkeiten mit runden und elliptischen Grundrissen zu vermeiden sind, desgleichen eine sehr hohe und gleichförmige Wölbung des Raumes. Dagegen sei ein länglich viereckiger Raum ohne gar zu hohe Decke für die Hörsamkeit sehr günstig. Chladni sah diese für einen Kon-

zertsaal ideale Gestalt im Entwurf des jungen Architekten Carl Theodor Ottmer (1800–1843) für den Neubau der Berliner Singakademie¹ verwirklicht. 1825 zeigte der Architekt dem Physiker die Baupläne für den nahezu 1200 Zuhörer fassenden Konzertsaal und bat ihn um seine Meinung hinsichtlich der akustischen Wirkung. Chladni Antwort fiel positiv aus. Der Zufall wollte es, daß der Wittenberger Physiker beim ersten Probekonzert im fast vollendeten Gebäude am 2. Januar 1827 anwesend sein konnte [Ullmann 1990]. Seine Vorhersage der guten Akustik bestätigte sich. Chladni schrieb darüber einen Bericht für die in Leipzig erscheinende *Allgemeine musikalische Zeitung* [Chladni 1827b]. Damit dokumentierte er eine erste fruchtbare Zusammenarbeit zwischen Architekt und Akustiker, eine Zusammenarbeit, wie sie in ähnlichen Fällen für das 20. Jahrhundert fast zur Selbstverständlichkeit wurde.

Chladni beschäftigte sich gegen Ende seines Lebens mit dem vieldiskutierten Problem der Hörsamkeit eines antiken Theaters in einem besonderen Aufsatz [Chladni 1827c]. Schon der Römer Vitruv (um 20 v. Chr.) beschrieb im 5. Buch seines Werkes *De architectura libri X* [Vitruv 1964] das Prinzip des antiken Amphitheaters mit gestuften Sitzreihen und Fragen der Hörsamkeit. Unter den Zuschauerplätzen befanden sich nach Vitruv Hohlräume, in denen sog. Schallgefäße – aus Metall oder Ton – aufgestellt waren, die eine schallverstärkende Wirkung besitzen sollten. Dieser Überlegung liegt die Tatsache zugrunde, daß solche Gefäße als Resonatoren wirken, die, wenn sie von einer auf sie abgestimmten Schallquelle erregt werden, ihrerseits Schall abstrahlen. Bringt man in diese Hohlräume nun Schallgefäße verschiedener Größe, die auf Töne verschiedener Höhe abgestimmt sind, so stellte sich Vitruv vor, daß damit jeder von der Bühne des Theaters ausgehende Ton irgendwo ein Gefäß findet, durch dessen Resonanz er verstärkt wird. Chladni bezweifelte allerdings in seinem erwähnten Aufsatz, daß bei der Größe der Theater und bei der sich ständig wechselnden Sprechrichtung der Schauspieler dieser Effekt eine Rolle spielen konnte:

„Die Wirkung muss nach unsern Begriffen schlecht genug gewesen seyn, da doch nur einzelne Töne haben mehr oder weniger resoniren können, da auch die Richtung, in welcher die Resonanz hat können bey einzelnen Tönen statt finden, sehr verschieden gewesen ist, und da auch der Klang selbst dadurch muß hohl und unangenehm gewesen seyn...“ [Chladni 1827c, S. 124]

Zu Chladni Zeiten konnten bei raumakustischen Problemen die Fragen der Schallabsorption noch nicht richtig beantwortet werden. Damit mag es zusammenhängen, daß sich die Vorstellung von der schallverstärkenden Wirkung der Schallgefäße so lange erhalten konnte. Die antiken „Schallvasen“ wirkten in Wirklichkeit wie die heutigen Helmholtz-Resonatoren. Im stationären Zustand werden die Resonanzfrequenzen nicht etwa besonders stark zurückgeworfen, sondern sie werden besonders stark absorbiert. Die Gefäße besitzen außerdem einen eigenen Anhall und Nachhall. Trifft auf einen unerregten Resonator ein Schallimpuls, so entzieht dieser der ankommenden Welle zunächst mehr Energie als im stationären Zustand, 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 [Cremer 1976, S. 179]. Schallgefäße in Freilufttheatern sind also in Wirklichkeit Schallschlucker und wirken nachhallverlängernd. Das ist aber ein Effekt, der bei den antiken Theatern mit ihrer extrem kur-

zen Nachhallzeit sehr erwünscht war. Diese ganze Problematik wurde erst im Laufe des 20. Jahrhunderts einer Lösung zugeführt [Ullmann 2006].

Die Schrift des Vitruv war über die Klosterbibliotheken den Baumeistern aus den Bauhütten des Mittelalters bekannt [Alscher usw. 1978, Bd. 5, S.453; Harrison 1967/68, S.55]. Deshalb können die in mittelalterlichen Kirchen in Deutschland, in der Schweiz, in Frankreich, England, Dänemark, Schweden, Norwegen, Russland und den Balkanländern gefundenen Schallgefäße in ihrer beabsichtigten Wirkung so gedeutet werden, wie es Vitruv beschrieben hat. Zur Größe der gefundenen Gefäße gehören Resonanzgrundfrequenzen von 90–350 Hz [Pedersen 1940]. Die Situation in den Kirchen des Mittelalters war jedoch akustisch eine grundsätzlich andere als in den Freilufttheatern der Antike. Fehlte in den Freilufttheatern der Nachhall, so waren die Nachhallzeiten in den Gotteshäusern eher zu lang. Die Nachhallzeiten der Schallgefäße übersteigen bei Frequenzen über 200 Hz nicht den Bereich 0,5–1,0 s. Verwendet man einen solchen Resonator in einem geschlossenen Raum, der selbst eine Nachhallzeit hat, die 1,0 s nicht unterschreiten dürfte (wie das in Kirchen der Fall ist), so wirkt er ganz anders als bei der Verwendung in Freilufttheatern. In den Kirchen des Mittelalters mit ihren relativ langen Nachhallzeiten trugen die Resonatoren mithin zur Verkürzung derselben bei [Thielscher 1953, S. 368-371].

Chladni erwähnte in seinem Aufsatz von 1827 noch ein zweites Mittel der Schallverstärkung bei den Theaterleuten der Antike. Sie trugen bei den Tragödien- und Komödienaufführungen Gesichtsmasken, die mit sprachrohrartigen Mündungen versehen waren. Auch da war 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 1827c, S. 127]

Chladni beendete den Artikel über die Hörsamkeit des antiken Theaters mit einer Aufzählung seiner raumakustischen Grundsätze für die gute Wirkung einer solchen Aufführungsstätte. Diese Erkenntnisse hatte der Wittenberger Physiker in einem Aufsatz aus dem Jahre 1826 noch einmal prägnant zusammengefaßt. Sie finden sich bereits in dem erwähnten Akustik-Kompendium. Am Ende des Aufsatzes äußerte sich Chladni zu den Möglichkeiten, die schlechte Hörsamkeit eines Raumes zu verbessern:

„Bisweilen werden sich die übeln Folgen einer fehlerhaften Gestalt durch mancherley Hervorragungen und Vertiefungen, die unter andern Umständen und bey einer bessern Gestalt nachtheilig seyn würden, wegschaffen oder vermindern lassen, manches aber nicht anders, als durch gänzliche Veränderung der Gestalt, z.B. bey einen langen und hohen Tonnengewölbe durch einen Unterzug, wodurch die Decke niedriger und flach wird.“ [Chladni 1826, S. 569]

Der Saal mit rechteckigem Grundriß und Querschnitt sei eine akustisch prinzipiell gute Lösung für einen Konzert- oder Theatersaal – wie es bei Ottmer und der Berliner Singakademie verwirklicht worden war –, und für die Anordnung der Zuschauerplätze galt nach Chladni:

„Eine schädliche Rückwirkung des Schalles von der Seite, wo die Zuhörer sind, wird in jedem Falle am besten ... durch amphitheatralische Einrichtung der Sitze können verhindert werden,

wie auch durch Unterbrechungen der Gleichförmigkeit an der Seite, welche der Schallhervorbringung gegenüber ist, etwa durch Logen, Tribüne, offene Thüren u.s.w.“ [Chladni 1826, S. 570]

Derartige Sätze klingen ganz modern.

Schlußbetrachtung

Mit den Fragen nach der Hörsamkeit eines geschlossenen Raumes waren natürlich in erster Linie die Architekten angesprochen. Diese waren es auch, die sich in großer Zahl im 19. Jahrhundert dazu äußerten [Ullmann 1989]. Nur wenige Physiker beschäftigten sich in diesem Zeitraum damit. Chladni war zunächst eine Ausnahme. Noch zu seinen Lebzeiten griffen jedoch die Gebrüder Wilhelm (1804–1891) und Ernst Heinrich Weber (1785–1878) das Thema auf. Sie untersuchten den Nachhall in großen Räumen und kamen in ihrer *Wellenlehre auf Experimente gegründet* [Weber 1825] zu dem Schluß, daß die Nachhallzeit nicht von der Gestalt des untersuchten Raumes abhängt, sondern von seinem Volumen und von den akustischen Eigenschaften seiner Begrenzung, zu denen wir heute Schallabsorptionseigenschaften sagen würden [Weber 1825, S. 543]. Hier setzen dann auch die Untersuchungen des Amerikaners Joseph Henry (1797–1878) ein, der im Jahre 1854 beauftragt wurde, die Hörsamkeit eines geplanten Hörsaals für die Smithsonian Institution in Washington – in Zusammenarbeit mit dem Architekten – zu untersuchen [Henry 1857]. Seine Ergebnisse waren die qualitative Vorstufe zu den Arbeiten von Wallace Clement Sabine (1868–1919), die den Aufschwung der Raumakustik als Wissenschaftsdisziplin im 20. Jahrhundert einleiteten [Sabine 1923].

Anmerkung

- 1 Das Gebäude der Berliner Singakademie wurde 1943 zerstört und 1952 als Maxim Gorki Theater – im Inneren völlig verändert – wieder aufgebaut.

Literatur

- Alscher, Ludger et al. (Hrsg.): *Lexikon der Kunst*. Bd. 5. VEB E.A. Seemann Verlag: Leipzig 1978.
- Chladni, Ernst Florens Friedrich: *Die Akustik*. Breitkopf & Härtel: Leipzig 1802.
- Chladni, Ernst Florens Friedrich: *Neue Beyträge zur Akustik*. Breitkopf & Härtel: Leipzig 1817.
- Chladni, Ernst Florens Friedrich: „Ueber vortheilhafte Einrichtung eines Locals für gute Wirkung des Schalles“. *Allgemeine musikalische Zeitung* (Leipzig) 28 (1826) S. 565–570.
- Chladni, Ernst Florens Friedrich: *Kurze Uebersicht der Schall- und Klanglehre, nebst einem Anhang, die Entwicklung und Anordnung der Tonverhältnisse betreffend*. Schott: Mainz 1827a.
- Chladni, Ernst Florens Friedrich: „Aus einem Briefe des Hrn. Dr. Chladni, den neuen Saal der Berliner Sing-Akademie betreffend“. *Allgemeine musikalische Zeitung* (Leipzig) 29 (1827b) S. 44–45.
- Chladni, Ernst Florens Friedrich: „Über Schallverstärkungen in den Theatern der Alten“. *Caecilia* 6 (1827c) S. 117–128.
- Cremer, Lothar: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Bd.II: Wellentheoretische Raumakustik*. S. Hirzel: Stuttgart 1976.
- Dehio, Georg: *Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler. Die Bezirke Neubrandenburg, Rostock, Schwerin*. Akademie-Verlag: Berlin 1968.
- Harrison, Kenneth: „Vitruvius and acoustic jars in England during the middle ages“. *Transactions of the Ancient Monuments Society, new Ser.* 15 (1967/68) S. 49–58.

- Hartmann, Günther: „Aus der Frühgeschichte der Raumakustik“. *Acustica* 72(1990) S. 247–257.
- Henry, Joseph: „On acoustics applied to public buildings“. *Proc. American Association for the Advancement of Science* 10 (1857) S. 119–135.
- Patté, Pierre: *Essai sur l'architecture théâtrale*. Paris 1782.
- Pedersen, P.O.: „Lydtekniske Undersøgelser i Aarene 1935-40 i Den polytekniske Læreanstalts Laboratorium for Telegrafi og Telefon“. *Ingeniørvidenskabelige Skrifter* 1940 Nr. 5.
- Rhode, Johann Gottlieb: *Theorie der Verbreitung des Schalles für Baukünstler*. Heinrich Frölich: Berlin 1800.
- Sabine, Wallace Clement: *Collected papers in acoustics*. Harvard University Press: Cambridge, Mass. 1923.
- Saunders, George: *Treatise on theatres*. London 1790.
- Thielscher, Paul: „Die Schallgefäße des antiken Theaters“. *Festschrift Franz Dornseiff zum 65. Geburtstag*, hrsg. v Horst Kusch. Leipzig 1953, S. 334–371.
- Ullmann, Dieter. „Die Entwicklung der Raumakustik im 19. Jahrhundert“. *Sudhoffs Archiv. Zeitschrift für Wissenschaftsgeschichte* 73 (1989) S. 208–215.
- Ullmann, Dieter: „Chladni und Ottmer – ein frühes Beispiel für die Zusammenarbeit von Akustiker und Architekt“. *Acustica* 71 (1990) S. 58–63.
- Ullmann, Dieter: *Chladni und die Entwicklung der Akustik von 1750–1860* (Science Networks. Historical Studies, 19). Birkhäuser: Basel usw. 1996.
- Ullmann, Dieter: „Zur Geschichte der Raumakustik im 20. Jahrhundert (1900–1970)“. *Sudhoffs Archiv, Zeitschrift für Wissenschaftsgeschichte* (2006) (i.Dr.).
- Weber, Ernst Heinrich; Weber, Wilhelm: *Wellenlehre auf Experimente gegründet oder über die Wellen tropfbarer Flüssigkeiten mit Anwendung auf die Schall- und Lichtwellen*. Fleischer: Leipzig 1825.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Dieter Ullmann
Franz-Mehring-Str. 16
D-99510 Apolda
E-mail: ullmann.apolda@t-online.de