

SCHALL UND RAUCH

Titelbild

«Ohne Titel» (Piezo-Lautsprecher, 2011) des Schweizerers Alexandre Joly am 5. Shift Festival der elektronischen Künste auf dem Dreispitzareal in Basel vom 27.-30. Oktober 2011 mit dem Titel «Of Birds And Wires. Stimmen Unter Strom» (KEYSTONE/Georgios Kefalas)

AKUEIN

Akustik (akuein = griech. hören) ist die Lehre vom Schall und seiner Ausbreitung. Im Bauwesen lässt sie sich in Raumakustik (vgl. «Schall und Rauch») und Bauakustik gliedern. In der Raumakustik geht es um die akustische Qualität eines Innen- oder auch Aussenraumes (Nachhall, Absorption, Reflexion). Die Bauakustik hingegen befasst sich hauptsächlich mit der Übertragung von Schall (Luft- und Körperschall) zwischen zwei Räumen bzw. zwischen Aussen und Innen und entsprechend mit Luft- und Trittschallschutz.

Im Zuge des gestiegenen Wohlstandes und der damit einhergehenden höheren Komfortansprüchen im Wohnungsbau wurde vor allem im mitteleuropäischen Raum die Bauakustik (Schallschutz im Gebäude) ein breites Thema. Diese Disziplin entwickelte sich mit den Arbeiten von Forschern wie Lothar Cremer und Karl Gösele aus Deutschland oder Leo Beranek aus den USA vor allem in der Nachkriegszeit rasch. Bald waren die grundlegenden Prinzipien, Konstruktionen und Messmethoden der Bauakustik bekannt und in der Praxis eingeführt.

Video still aus: «Schallschutz im Wohnungsbau – ein Unterrichtsfilm gefördert durch den Bundesminister für Wohnungsbau», Drehbuch Prof. Dr. Lothar Cremer, EKA-Film, Teil 1, 1950er-Jahre (Video: www.youtube.com/watch?v=MC1IIT_s-Y7o)



«Sound, that noble accident of the air...»¹ – diese Umschreibung des Phänomens Klang, gibt einen Eindruck davon, wie «unbeschrieben» die wissenschaftliche Akustik noch im Barock war. Selbst die führenden Naturgelehrten wussten bis gegen das Ende des 19. Jahrhunderts wenig über die wissenschaftlichen Grundlagen der Entstehung und Ausbreitung von Schall, was ihm eine mysteriöse Aura verlieh. Auf dem Gebiet der Bauakustik – der Lärmbekämpfung – hat er diese inzwischen verloren. Die Raumakustik hingegen ist nach wie vor von einem Nebel umwoben. Dieser wird in diesem Beitrag gelüftet.

Die Akustik ist ein interdisziplinäres Fachgebiet, das auf Erkenntnissen aus zahlreichen anderen Fachgebieten aufbaut, unter anderen der Physik, der Psychologie, der Nachrichtentechnik und der Materialwissenschaft. Bevor also Joseph Louis Gay-Lussac (1778–1850) und John Dalton (1766–1844) nicht ihre Gesetze zum Verhalten von Gasen formuliert hatten, war z. B. eine exakte Berechnung der Schallgeschwindigkeit nicht möglich. Selbst Isaac Newton (1642–1726) «fälschte» 1713 seine Formel zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit, indem er eine Konstante einfügte, die das Resultat erstaunlicherweise exakt mit den Werten der einige Jahre zuvor durchgeführten Feldmessungen der Royal Society zur Übereinstimmung brachte.

Die Wissenschaftler und Baumeister der Antike und des Mittelalters verfügten noch nicht über genaue Kenntnisse von den Eigenschaften des Schalls. Es existierten keine klaren Vorstellungen, geschweige denn Theorien davon, wie Schall entsteht oder sich ausbreitet. Man konnte also nur auf empirische Erkenntnisse zurückgreifen. Noch lange Zeit herrschte z. B. die Meinung vor, dass sich hohe Töne schneller ausbreiten als tiefe. Die Einsicht ist relativ jung, dass die Schallgeschwindigkeit für alle Frequenzen gleich ist.

In dasselbe Kapitel gehört das Klischee der ausgezeichneten Akustik in griechischen Theatern oder in mittelalterlichen Kirchen, war doch die gute Sprachverständlichkeit in den antiken Theatern ein erfreuliches Nebenprodukt der optimalen Bauform im Hinblick auf die Zuschauerkapazität und dem visuellen Kontakt des Publikums zur Szene (konzentrische, stark ansteigende Ränge, um möglichst viele Personen bei optimalen Sichtbedingungen nahe an die Szene heranzubringen).

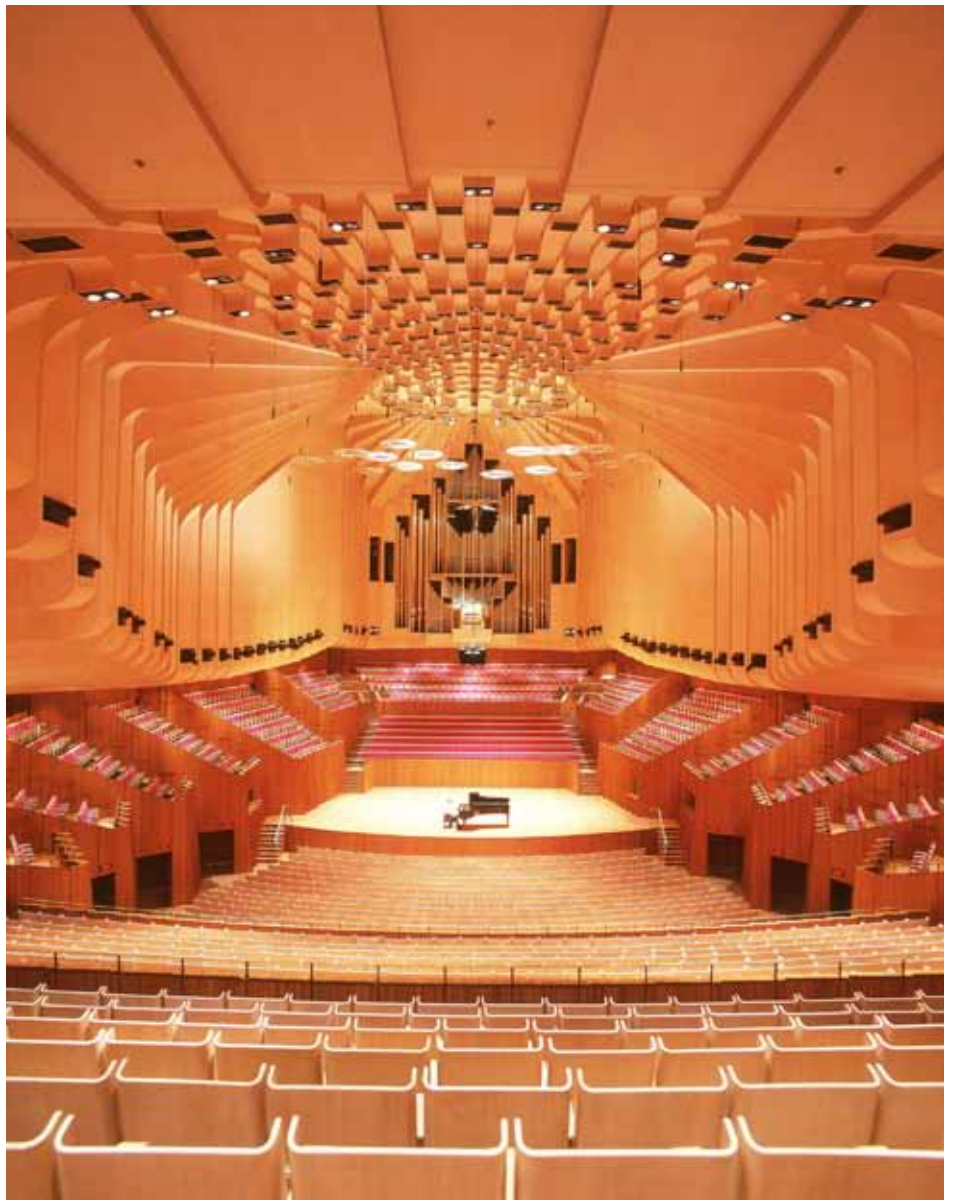
In vielen Kirchen ist die Akustik (ausser für spezifische musikalische Werke) sogar oft ausgesprochen schlecht. Entsprechend bemühen sich ganze Heerscharen von Elektroakustikern, die Sprachverständlichkeit in Kirchen mit technischen Mitteln einigermaßen zu gewährleisten. In den umfangreichen Kirchenaufzeichnungen über alle Epochen ist kein Hinweis zu finden, dass man zu irgendeinem Zeitpunkt die Akustik in Kirchen zu einem bestimmten (theologischen) Zweck «gestaltet» hätte.² Die Akustik ist in vielen historischen Bauwerken, so spektakulär und beeindruckend sie oft sein mag, in vielen Fällen ein «Zufallsprodukt» des Baustils.

VON DER BERECHENBARKEIT DES NACHHALLS...

Ein Meilenstein in der wissenschaftlichen Akustik – insbesondere der Raumakustik – waren die Arbeiten von Wallace Clement Sabine (1868–1919) im ausgehenden 19. Jahrhundert. 1895 veröffentlichte er eine Formel zur Berechnung der Nachhallzeit, einer der nach wie vor wichtigsten Kenngrößen der Raumakustik (vgl. Kasten «physikalische Grundlagen» S. 18).



01



02

01 Lluís Domènech i Montaner, Palau de la Musica Catalana, Barcelona, 1905–1908: Der ursprünglich für den 1891 von Lluís Millet i Pagès und Amadeu Vives gegründete Volkschor Orfeó Català errichtete Bau ist akustisch auf die Aufführung von Chormusik ausgerichtet (Foto: KEYSTONE/Tino Soriano)

02 Jørn Utzon, Konzerthalle der Oper von Sydney, 1959–1973: Das dänische Büro Jordan Akustik, das im Wettbewerbsteam als Akustikfachplaner fungierte, realisierte bei der Ausführung, dass sich eine sowohl für Opern- als auch für Konzertaufführungen exzellente Akustik nicht bewerkstelligen liess. Die Lösung bot sich mit dem Entscheid, die Oper im kleinen Saal unterzubringen und den grossen Saal für Konzerte zu reservieren, sodass eine je spezifische akustische Qualität resultierte: 1.3 s Nachhallzeit für den Opern-, 2.1 s für den Konzertsaal (Foto: KEYSTONE/Photolibary.com/David Messent)

PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

(ar/red) Bei der Ausbreitung von Schall treten Druckschwankungen der Luft auf (Schallwellen). Diese werden vom Trommelfell in Bewegungen zur Hörempfindung umgesetzt. Der Wechseldruck p , der dem statischen Luftdruck p_0 überlagert ist, wird als Schalldruck bezeichnet. Er ist um viele Grössenordnungen kleiner als der statische Luftdruck. Wie der Luftdruck wird er in der Einheit Pa (Pascal) angegeben (vgl. Tab. 3). Bei den sinusförmigen Schallwellen ist die Angabe des Schalldrucks als Effektivwert üblich:

$$p_{\text{eff}} = \frac{p}{\sqrt{2}}$$

Der Scheitelwert (Spitzenwert) des Schalldrucks ist die Schalldruckamplitude.

Wegen der grossen Bandbreite der Werte ist der Schalldruck als Rechengrösse ungeeignet. Der Schalldruckpegel L_p ist ein logarithmisches Mass zur Beschreibung von Schallereignissen, das die akustischen Berechnungen vereinfacht. Er beschreibt in logarithmierter Form das Verhältnis des quadrierten Effektivwerts des Schalldrucks eines Schallereignisses zum Quadrat eines Bezugswerts p_0 . Was etwas kompliziert klingt, ergibt die bekannte einfach zu handhabende Hilfsmasseinheit dB (Dezibel, vgl. Tab. 3):

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \right) \text{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{\tilde{p}}{p_0} \right) \text{dB}$$

Der Bezugswert für Luftschall, auf dem die Dezibelskala beruht, ist auf $p_0 = 20 \cdot 10^{-5} \text{Pa}$ festgelegt, was etwa der Hörschwelle des menschlichen Gehörs entspricht.

Mit der Schallintensität I kann der Energiefluss in einem Schallfeld beschrieben werden. Sie ist das Produkt von Schalldruck p und Schallschnelle v (letztere gibt an, mit welcher Geschwindigkeit die Luftteilchen um ihre Ruhelage schwingen). Analog zum Schalldruck wird auch die Schallintensität meist in logarithmischer Form als Schallintensitätspegel L_I in dB angegeben (der Bezugswert für Luftschall ist als $I_0 = 10^{-12} \text{W/m}^2$ genormt):

$$L_I = 10 \log \left(\frac{|I|}{I_0} \right) \text{dB}$$

Anhand der Veränderung des Schalldruckpegels p bzw. der Schallintensität I wird die Nachhallzeit nach Sabine berechnet. Sie ist definiert als die Zeitdauer des Absinkens des Schalldruckpegels nach Abschalten der Schallquelle um 60 dB bzw. die Abnahme der Schallintensität auf den 10^{-6} ten Teil:

$$T = 0.163 \cdot \frac{V}{A}$$

0.163 : Sabinesche Konstante [s/m]

V : Raumvolumen [m³]

A : Äquivalente Schallabsorptionsfläche [m²]

Die Äquivalente Schallabsorptionsfläche A ist die Summe aller Oberflächen S_i , multipliziert mit ihrem Schallabsorptionsgrad α_i

$$A = \sum_{i=1}^N S_i \cdot \alpha_i$$

S_i : Oberflächen im Raum [m²]

α_i : Schallabsorptionsgrade der Materialien [-]

Es dauerte aber weitere 30 Jahre, bis die wissenschaftliche Raumakustik Eingang in das praktische Bauwesen fand. Vor allem bekannte nordische Architekten der Moderne, allen voran Alvar Aalto und Vilhelm Lauritzen, beschäftigten sich intensiv mit den neuen Erkenntnissen und arbeiteten sie mit grossem Aufwand und Leidenschaft in ihre Bauten ein. Der schwedische Architekt Sven Markelius, ein enger Freund Aaltos, erwähnte in seinem berühmten Vortrag 1928 im finnischen Abo die neue Wissenschaft der Raumakustik sogar als exemplarisches Beispiel für die in der Moderne so bedeutende Verbindung von Form und Funktion.³ Das von ihm entworfene und 1932 eingeweihte Konzerthaus in Helsingborg wird denn auch bis heute für seine hervorragende Akustik gepriesen.

Die Entwicklung der wissenschaftlichen Akustik im 20. Jahrhundert war aber auch immer wieder von Rückschlägen geprägt, welche die Akzeptanz und Glaubwürdigkeit der noch jungen Wissenschaft in der Bauwelt ebenso wie in der Gesellschaft schwächten. So wurden immer wieder Konzertsäle entworfen, die sich als akustisch unbefriedigend herausstellten. In einigen Fällen schien es fast, als seien elementare Grundlagen der Raumgestaltung und der Akustik vergessen worden. Solche Diskontinuitäten in der Wissensentwicklung respektive in der Anwendung der Akustik im gebauten Raum sind selbst in der jüngeren Geschichte zu beobachten.

Problematisch waren vor allem Konzertsaalbauten in Amerika in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, wie das «Eastman Theatre» in New York (1923; Architekt: William G. Kaelber) oder die «Kleinhaus Music Hall» in Buffalo (1938–1940; Architekt: Eliel Saarinen). Problem war unter anderem die Grösse der Säle; sie wurden für zu viele Zuhörer gebaut, was zu viel Absorption zur Folge hatte. Ein weiteres Problem war der fächerförmige Grundriss, der dazu führte, dass die Reflexionen von den Wänden alle an die Rückwand gelenkt und die zentral im Raum befindlichen Plätze mangelhaft mit Schallenergie versorgt wurden, weshalb sich kein «umhüllender» Klang für die Zuhörer einstellte. Positive Beispiele sind noch immer eher die Ausnahme als die Regel (vgl. TEC21, Nr. 22/2008, Nr. 27-28/2010 und «... Ohren, die nicht hören...» S. 20).

... ZUR DARSTELLBARKEIT VON ZEIT, FREQUENZ UND AMPLITUDE

Dies ist umso erstaunlicher, als die wissenschaftliche Akustik ab Mitte der 1920er-Jahre im Zusammenwirken mit der sich im gleichen Zeitraum entwickelnden Elektronik und Audio-technik rasche Fortschritte machte. Die Tonaufnahmetechnik ermöglichte erstmals die Trennung eines Klanges von seiner Quelle – ein revolutionärer Fortschritt. Insbesondere die in den 1940er- und 1950er-Jahren entwickelte Magnetbandtechnik ermöglichte erstmals das exakte Speichern von Schallereignissen und deren spätere Auswertung – eine wichtige Grundlage für akustische Messungen und das Verständnis der Akustik generell. Ein neues Zeitalter in der Entwicklung der akustischen Messtechnik brach Ende der 1970er-Jahre an, als in der Elektronik und Audiotechnik die Digitaltechnik Einzug hielt. Damit wurde es erstmals möglich, Schallsignale «verlustfrei» – d. h. ohne Störgeräusche wie z. B. Bandrauschen etc. – aufzuzeichnen und zu speichern. Die nun digitalisierten Signale konnten in Rechenmodelle eingespeist werden. Damit liess sich zum ersten Mal die Dreidimensionalität der akustischen Signale – entlang der Achsen Zeit, Frequenz und Amplitude – umfassend visualisieren. Die anschauliche Darstellung von grossen Datenmengen ist zentral für das Verständnis komplizierter physikalischer Vorgänge.

OBJEKTIVE PARAMETER VERSUS SUBJEKTIVER KLANGEINDRUCK

Die Entwicklung der akustischen Messtechnik, gerade im raumakustischen Bereich, ist längst nicht abgeschlossen. Man versucht neue, «objektiv» messbare Parameter zu finden, die – zusammen mit den bereits bekannten Kenngrössen – den subjektiven Klangeindruck in Räumen möglichst gut abbilden sollen. Denn dies ist der Kern der Akustik: Sie besteht nur zur Hälfte aus objektiver Physik – der andere Teil ist der subjektive Höreindruck. Die Qualität eines akustischen Ereignisses, sei dies nun Raumklang oder Umgebungslärm, wird von jeder Person individuell auf Grund persönlicher Erfahrungen, Vorlieben etc. beurteilt und

Situation und Schallquelle	Schalldruck p (Effektivwert) Pascal	Schalldruck- pegel L_p dB re 20 μ Pa
Schmerzschwelle	100	134
Gehörschäden bei kurzfristiger Einwirkung	20	ab 120
Düsenflugzeug 100 m entfernt	6.3–200	110–140
Presslufthammer, 1 m entfernt / Diskothek	2	100
Gehörschäden bei langfristiger Einwirkung >8 h/d	0.63	ab 90
Hauptverkehrsstrasse, 10 m entfernt	0.2–0.63	80–90
Normale Unterhaltung, 1 m entfernt	$2 \cdot 10^{-3}$ – $6.3 \cdot 10^{-3}$	40–50
Sehr ruhiges Zimmer	$2 \cdot 10^{-4}$ – $6.3 \cdot 10^{-4}$	20–30
Blätterrauschen, ruhiges Atmen	$6.3 \cdot 10^{-5}$	10
Hörschwelle bei 1 kHz	$2 \cdot 10^{-5}$	0

03

03 Emissionen diverser Schallquellen in Luft

04 Richard Strauss' Oper «Elektra» im Zürcher Opernhaus 2010: Der gewellte Filzboden und die gepolsterten Türen in Rolf Glittenbergs Bühnenbild wirken nicht nur optisch, sondern auch akustisch absorbierend – eine Herausforderung für die Sängerin Eva Johansson (KEYSTONE/Patrick B. Kraemer)

05 Giuseppe Verdis Oper «Il Trovatore» im Zürcher Opernhaus 2007: Auch hier spielen der optische Eindruck der verräumlichten Akustik und die akustische Qualität zusammen: doch hier schluckt das Kanalisationsrohr des von Peter Sykora gebauten Bühnenbildes den Klang nicht, sondern reflektiert ihn (KEYSTONE/Steffen Schmidt)

Anmerkungen

1 «Il suono accidente nobilissimo dell'aria osserva un tenore così invariabile di velocità ne' suoi movimenti, che l'impeto [...], con cui lo produce il corpo sonoro, non può alterarlo.» Vgl. Saggi di Naturali Esperienze fatte nell'Accademia del Cimento, Firenze 1667, S. CCXXXI; zit. n.: Frederick Hunt, Origins in Acoustics, Yale, 1978, S. 101

2 «Within the vast literature of the church, [...]. [...] there is no mention of intentionally creating reverberation for its theological relevance. Instead, evidence suggests that long reverberation was simply an unintentional consequence of the spatial grandeur of God's earthly home.» Vgl. Barry Blesser, Linda-Ruth Salter, Spaces speak – are you listening?, Cambridge/London, 2007, S. 93

3 Bo Mortensen, «Wood and Modern Movement – Wood and Acoustics in the Scandinavian Concert Halls of the Modern Movement», in: Preservation Technology Dossier 4, Docomomo, Helsinki, 2000, S. 61–66



04



05

entzieht sich grundsätzlich einer objektiven Bewertung. Die Akustik rückt damit in die Nähe von gestaltenden Disziplinen wie der Architektur oder dem Produktdesign. In allen diesen Bereichen ergibt sich die Qualität eines Werks aus einer Mischung von funktional-objektiven und gestalterisch-subjektiven Aspekten. Das bedeutet, dass sich Akustiker bei ihrer Arbeit nicht allein auf physikalisches Wissen stützen können. Vielmehr müssen sie sich den noch nicht gebauten Raum hörend vorstellen können – wie es Architekten auf der visuellen Ebene tun.

Martin Lachmann, Dipl. Akustiker SGA/SIA/MIOA, martin.lachmann@appliedacoustics.ch