

Fragmente aus der Geschichte der Strömungsakustik

Peter Költzsch

Institut für Akustik und Sprachkommunikation, TU Dresden; Email: Peter.Koeltzsch@ias.et.tu-dresden.de

Einleitung

Die Akustik des Luftschalls hat sich als selbständige Wissenschaftsdisziplin im 18. und 19. Jahrhundert aus der Mechanik entwickelt. Das zeigt sich insbesondere an den Veröffentlichungen großer Wissenschaftler jener Zeit, die uns mit bahnbrechenden Arbeiten aus den Fachgebieten der Mathematik, Physik, Mechanik und Strömungsmechanik bekannt sind, wie z. B. NEWTON, EULER, LAGRANGE, POISSON, LAPLACE, STOKES, KIRCHHOFF, REYNOLDS, HELMHOLTZ u. a. m. Beginnend im 19. Jahrhundert und in starkem Maße im 20. Jahrhundert hat sich dann die Akustik in vielen ihrer Teilgebiete rasant entwickelt, z. B. die Physikalische Akustik, der Ultraschall, die Physiologische Akustik, die Psychoakustik, die Raum- und Bauakustik, die Elektroakustik, die Musikalische Akustik u. a. Seit den 1940er/1950er Jahren gibt es erneut starke grundlagenorientierte Verbindungen zwischen der Akustik und der Strömungsmechanik, z. B. die Schallerzeugung durch Strömungen, Wechselwirkungen zwischen Schall und Strömung, thermoakustische Phänomene. Die Entwicklungen in der Strömungsakustik in den 50er bis 80er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden von M. J. Lighthill als das „Goldene Zeitalter der Aeroakustik“ bezeichnet. 1992 prognostizierte Lighthill auf Grund der gewaltigen Fortschritte in der Computational Aeroacoustics (im Zusammenhang mit der Entwicklung der Computational Fluid Dynamics) ein beginnendes zweites goldenes Zeitalter der Aeroakustik.

Im Folgenden werden Fragmente aus der Geschichte der Strömungsakustik dargestellt, und zwar anhand biographischer und wissenschaftlicher Leistungen von Vincent Strouhal, Hermann von Helmholtz und Sir James Lighthill.

Vincent (Čeněk) Strouhal

(1850 Seč – 1922 Prag) Kurzbiographie:

- geb. am 10. April 1850 in Seč bei Chrudim (südlich von Hradec Králové/Königsgrätz)
- 1869 Abitur am Gymnasium in Hradec Králové
- 1869 – 1872 Studium der Physik an der philosophischen Fakultät der Prager Universität
- 1872 - 1875 Assistent am Prager Observatorium
- ab 1876 Universität Würzburg als Assistent bei dem Experimentalphysiker Prof. Friedrich Kohlrausch
- 1878 (16. Februar) Vortrag in der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft Würzburg „Über eine besondere Art der Tonerregung“, abgedruckt in: Annalen der Physik und Chemie, Leipzig 241 (5) (1878) 10, S. 216 – 251; („STROUHAL-Zahl“)
- Habilitation in Würzburg mit der o. g. Arbeit „Über eine besondere Art der Tonerregung“, Habilitationsschrift der Hohen Philosophischen Fakultät der Universität Würzburg
- 1878-1880 experimentelle Untersuchungen zu den elektrischen und magnetischen Eigenschaften von Stahl
- Teilung der Prager Universität:
der Leiter des physikalischen Instituts, der Physiker und Philosoph Ernst Mach (1838 – 1916), wurde Direktor des deutschen physikalischen Instituts; Vincent Strouhal wurde als Leiter des neuen tschechischen physikalischen Instituts berufen.
- 1882 Ordinariat für Experimentalphysik an der Tschechischen Universität Prag
- 1882 – 1908 Aufbau eines physikalischen Instituts

- 1896 Untersuchungen zur Röntgen-X-Strahlung X
- 1901 – 1919 Lehrbücher zur Experimentalphysik: 1901 Mechanik (670 Seiten), 1902 Akustik (462 Seiten), 1908 Thermodynamik (657 S.), 1919 Optik (mit V. Novák)
- Mitgliedschaften und akademische Ämter:
 - 1903/1904 Strouhal als Rektor der Prager Universität
 - seit 1881 Mitglied des Tschechischen Königlichen Vereins der Lehre
 - seit 1890 Mitglied der Tschechischen Akademie der Wissenschaften und Künste
 - seit 1899 Ehrenmitglied und 1908 Ehrenpräsident des Vereins der Tschechischen Mathematiker und Physiker
 - Ritter des österreichischen kaiserlichen Ordens der Eisenkrone dritter Klasse

Vincent Strouhal starb am 23. Januar 1922 in Prag

Beispiele zur Verwendung der STROUHAL-Zahl:

- Auslegung von Modellen und Rückübertragung der Modellerkenntnisse: $Sr = idem$
- Dimensionslose Kenngrößen mit festen Zahlenwerten zur Charakterisierung von „singulären“ physikalischen Erscheinungen (Aölstone, KÁRMÁN'sche Wirbelstraße):
 $Sr = fd/v \approx 0,185 \dots 0,22$ im Bereich der REYNOLDS-Zahlen von etwa $Re = 200 \dots 10^4$
- Trennung von physikalischen Wirkungsbereichen durch dimensionslose Kenngrößen, dimensionslose Darstellung von Gleichungen zur Abschätzung von Einflussbereichen: z. B. In den dimensionslos geschriebenen Gleichungen der instationären Strömungsmechanik kann die STROUHAL-Zahl zur Abgrenzung der folgenden Bereiche verwendet werden ($Ma \ll 1$):
 - $Sr \ll 1$: inkompressible, quasistationäre Strömung (niedrige Frequenzen, langsam pulsierende Strömung)
 - $Sr \gg 1$: akustische Schwingungsvorgänge, Wellenausbreitung, Wellengleichung
- Dimensionslose Kenngrößen als unabhängige, dimensionslose Variable bzw. als dimensionslose, laufende Koordinaten
- Verallgemeinerte Darstellung von Daten (Messwerte, Rechenwerte) mit Hilfe dimensionsloser Kenngrößen

Hermann von Helmholtz

(31.8.1821 Potsdam – 8.9.1894 Berlin) Kurzbiographie:

- Ab 1838 Studium der Medizin in Berlin, naturwissenschaftliche Grundausbildung u. a. bei dem Physiker Gustav Magnus
- 1842 Promotion zum Doktor der Medizin, Tätigkeit als Chirurg im Militärdienst
- 1848 Lehre in Anatomie an der Berlin Kunstakademie
- 1849 Professur für Physiologie und Pathologie an der Universität Königsberg
- 1855 Ruf an die Universität Bonn
- 1858 Ruf an die Universität Heidelberg, Professor für Physiologie
- 1871 Professor für Physik an der Berliner Universität (als Nachfolger seines Lehrers Gustav Magnus)
- 1877 – 1878 Rektor der Berliner Universität
- 1878 neues Physikalisches Institut am Reichstagsufer in Berlin
- 1888 – 1894 erster Präsident der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt

Akustische Forschungen von H. v. Helmholtz,

abgeleitet aus "nachträglichen" Namensverknüpfungen:

- HELMHOLTZ-Gleichung (Wellengleichung für harmonische Komponenten, mit Wellenzahl k);
- HELMHOLTZ-Integralgleichung

- HELMHOLTZ-Resonator
Von wissenschaftshistorischem Interesse: Veröffentlichung: Lord Rayleigh: The Theory of the Helmholtz Resonator. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Volume 92, Issue 638 (Feb. 1, 1916), 265 – 275
Berechnung des Helmholtz-Resonators: „The project of a stricter treatment of the problem, in the case of a spherical wall and an aperture of circular outline, has been in my mind more than 40 years, partly with the hope of reaching a closer approximation, and partly because some mathematicians have found the former method unsatisfactory, or, at any rate, difficult to follow.....“
- HELMHOLTZ-Resonanzabsorber
Anordnung von HELMHOLTZ-Resonatoren, z. B. in einer Wandauskleidung oder in einem Schalldämpfer
- HELMHOLTZ-Filter
In Rohrleitungen oder Kanälen: Tiefpassfilter als Aneinanderreihung von Helmholtz-Resonatoren
- HELMHOLTZsche Vokaltheorie
Helmholtz verwendete zur Ermittlung der Formantbereiche der Vokale Hohlraumschwinger, die „Helmholtz-Resonatoren“; er setzte nacheinander verschieden abgestimmte Resonatoren an das Ohr; damit stellte er fest, welcher Frequenzbereich (Formantbereich) bei einem Vokal in Erscheinung trat.
- HELMHOLTZsches Gesetz in der psychologischen Akustik
Die Klangfarbe eines Tongemisches ist unabhängig von den Phasenwinkeln der einzelnen Teiltöne.
- Reziprozitätsgesetz nach HELMHOLTZ
„Wenn in einem mit Luft gefüllten Raume, der theils von endlich ausgedehnten festen Körpern begrenzt, theils unbegrenzt ist, im Punkte a Schallwellen erregt werden, so ist das Geschwindigkeitspotential derselben in einem zweiten Punkt b ebenso gross, als es in a sein würde, wenn nicht in a, sondern in b Wellen von derselben Intensität erregt würden. Auch ist der Unterschied der Phasen des erregenden und erregten Punktes in beiden Fällen gleich.“
- KELVIN-HELMHOLTZ-Instabilität
Instabilität zweier Strömungen unterschiedlicher Geschwindigkeit und Dichte, die durch eine Grenzfläche getrennt sind. Beispiele: Luft über Wasser, Wirbelbildung (Rollen) von Wolken am Himmel, Scherströmungsinstabilität
- HELMHOLTZsche -Wirbelsätze
Für reibungsfreie Strömungen gelten die folgenden drei Sätze (nach Kneubühl):
Wirbelsatz 1: Im Inneren eines Fluids können keine Wirbel beginnen oder enden.
Wirbelsatz 2: Wirbel enthalten zu jeder Zeit die gleichen Teilchen.
Wirbelsatz 3: Die Zirkulation ist für jeden Wirbelquerschnitt senkrecht zum Wirbelfaden konstant.
- HELMHOLTZscher Hauptsatz der Vektoranalysis
Jedes, über einem einfach zusammenhängenden Gebiet mit glatter Randfläche definiertes Vektorfeld lässt sich stets additiv in einen wirbelfreien und einen quellenfreien Anteil zerlegen. Beweis durch Stokes 1849, vervollständigt von Helmholtz in seiner Wirbelarbeit 1859 (nach Großmann). HELMHOLTZ decomposition theorem (nach Howe, Morse/Feshbach)
- HELMHOLTZ-Gleichung
In russischen Publikationen und bei russ. Wissenschaftlern wird die Wirbeltransportgleichung in der Strömungsmechanik als HELMHOLTZ-Gleichung bezeichnet (nach Albring).
- HELMHOLTZ-Zahl
Die Bezeichnung HELMHOLTZ-Zahl als Ähnlichkeitskennzahl, als dimensionslose Größe in der Akustik, wurde erstmals von Lothar Cremer 1970 verwendet.

Darstellung der HELMHOLTZ-Zahl als dimensionslose Größe in der Form:

- Verhältnis von Längen, von Zeiten, von Kräften
- Verhältnis von Wellenlängen bei gekoppelten Wellenleitern, z. B. Schallabstrahlung von Platten mit freien Biegeflächen, Schallabstrahlung von Druckmoden eines rotierenden Schaufelgitters bei Strömungsmaschinen
- Bekannte dimensionslose Größe in der Akustik: $He = kr, kR, kx$ (nach L. Cremer)

- Helmholtz und das Problem der physikalischen Ähnlichkeit:
„Schallschwingungen einer compressiblen Flüssigkeit werden in weiteren Räumen mechanisch ähnlich verlaufen können, wie schnellere Oscillationen einer weniger compressiblen Flüssigkeit in engeren Räumen.“

Michael James Lighthill (Sir James Lighthill)

(23. Januar 1924 Paris – 17. Juli 1998 Sark/Channel Islands)

- 1941 - 1943 Trinity College Cambridge, B.A. Mathematics
- 1945 Research Fellowship Trinity College, Universität Cambridge
- 1946 – 1950 Senior Lecturer für Mathematik (mit 22 Jahren), Universität Manchester
- 1950 – 1959 Beyer Professor of Applied Mathematics an der Universität Manchester
- 1959 – 1964 Direktor des Royal Aircraft Establishment
- 1964 – 1969 Royal Society Research Professor at the Imperial College of Science and Technology at London
- 1965 – 1969 Physical Secretary of the Royal Society
- 1969 Berufung als Lucasian Professor of Applied Mathematics an die Universität Cambridge (Lehrstuhl von Newton, vor bzw. nach Lighthill: Paul Dirac bzw. Stephen Hawking)
- 1971 Queen Elizabeth: Sir James Lighthill
- 1979 – 1989 Rektor of University College London, bis zum Eintritt in den Ruhestand 1989
- 1998 Tod beim Schwimmen, Umrundung der Kanalinsel Sark

Anstoß zu neuen Forschungsfeldern:

Aeroakustik

1952/1954 „On sound generated aerodynamically“, Part I "General theory", Part II "Turbulence as a source of sound"

"Die Arbeit von Lighthill über die Theorie des aerodynamisch erzeugten Lärms (1952) ist der wichtigste Fortschritt in der Akustik seit den Arbeiten von Lord RAYLEIGH." (Lilley, G. M. 1999)

Nichtlineare Akustik

1956 Publikation zum 70. Geburtstag Sir Geoffrey Taylor

Biofluidodynamik

1975 Mathematical biofluidynamics, Gebiete: Schwimmen und Fliegen von Tieren bei hohen Reynolds-Zahlen, Fortbewegung von Fischen, Flug der Vögel und Insekten; Atmungsströmung, Pulsausbreitung, Blutströmung, Arterienkrankheiten, Mikrozirkulation

Publikationen zur Akustik:

1952/1954 On sound generated aerodynamically

1956 Viscosity effects in sound waves of finite amplitude

1961 Sound generated aerodynamically

1963 Jet noise

1972 The propagation of sound through moving fluids

1978 Waves in Fluids

1978 Acoustic streaming

1981 Energy flow in the cochlea

1991 Biomechanics of hearing sensitivity

1992 Acoustic streaming in the ear itself

1993 A general introduction to aeroacoustics and atmospheric sound. The final panel discussion

1994 Some aspects of the aeroacoustics of high-speed jets

(Die verwendete Literatur kann vom Autor nachgereicht werden.)