

Zur Geschichte der Strömungsakustik

Peter Költzsch

Institut für Akustik und Sprachkommunikation, Fakultät Elektrotechnik, TU Dresden
01062 Dresden, Mommsenstraße 13

Zusammenfassung

Die Strömungsakustik ist das Grenzgebiet zwischen der Strömungsmechanik und der Akustik. Sie beruht deshalb, wie auch die Strömungsmechanik und die sog. Fluidschall-Akustik, auf den Grundgleichungen der Fluidmechanik. Die physikalischen Erscheinungen, mit denen sich die Strömungsakustik befasst, sind die Schallerzeugung durch Strömungen, die Erzeugung von Strömungen durch Schall, die Wechselwirkungen zwischen Schall und Strömungen sowie die Schallausbreitung in Strömungen.

Die Fluidschall-Akustik hat sich als selbständige Wissenschaftsdisziplin im 18. und 19. Jahrhundert aus der Strömungsmechanik entwickelt. Einen erheblichen Aufschwung nahm dieses Fachgebiet in den 50er bis 70er Jahren des 20. Jahrhunderts, dem ersten goldenen Zeitalter der Aeroakustik. Ausgangspunkt dafür war 1952 die bahnbrechende Arbeit des englischen Mathematikers M. J. Lighthill „On Sound Generated Aerodynamically“. Mit der inhomogenen Wellengleichung der Strömungsakustik, der sog. „Akustische Analogie“ und der Proportionalität zwischen der Schalleistung des Strahlärms und der 8. Potenz der Strömungsgeschwindigkeit schuf Lighthill Meilensteine in der Geschichte der Strömungsakustik. Die auf diesen Erkenntnissen in den letzten 50 Jahren geschaffenen Grundlagen der Strömungsakustik haben zu einer vielfältigen Ausgestaltung des Fachgebietes und zu umfangreichen interdisziplinären Verknüpfungen geführt. Mit der Entwicklung der numerischen Aeroakustik (Computational Aeroacoustics CAA), insbesondere auf der Grundlage und in Verbindung mit der numerischen Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics CFD) und mit der numerischen Akustik (Computational Acoustics CA), bahnt sich seit dem Beginn der 90er Jahre ein wissenschaftlich fruchtbares zweites goldenes Zeitalter der Aeroakustik an.

1 Abgrenzung des Gebietes Strömungsakustik

Die Strömungs- oder auch Aeroakustik ist das Grenzgebiet zwischen der Strömungsmechanik und der Akustik (siehe z. B. [2], [8], [10], [12], [13], [17]). Von Seiten der Strömungsmechanik betrachtet werden strömende Fluide untersucht, in denen Druck-, Dichte- und Geschwindigkeitsschwankungen erzeugt werden oder bereits existieren. Von Seiten der Akustik stellt sich der Gegenstand der Strömungsakustik so dar, dass Strömungen als Schallquelle wirken bzw. dass sie für die akustischen Erscheinungen (Schallabstrahlung, Schallausbreitung) von maßgebender Bedeutung sind. Die physikalischen Erscheinungen, mit denen sich die Strömungsakustik befasst, sind die Schallerzeugung durch Strömungen, die Erzeugung von Strömungen durch Schall (einschließlich der Schallbeeinflussung von Strömungen), die Wechselwirkungen zwischen Schall und Strömungen (ggf. und Strukturen) sowie die Schallausbreitung in Strömungen.

Die Phänomene der Strömungsmechanik, der Strömungsakustik und der „Fluidschall-Akustik“ (so benannt im Gegensatz zur „Körperschall-Akustik“) werden von denselben physikalischen Gleichungen beschrieben, und zwar durch die Erhaltungsgleichungen für die Masse (Kontinuitätsgleichung), den Impuls (Bewegungsgleichung) und die Energie (1. Hauptsatz der Thermodynamik, Wärmetransportgleichung) sowie eine spezielle Zustandsgleichung aus der Thermodynamik. In diesem Sinne ist die Fluidschall-Akustik nichts anderes als eine Beschreibung instationärer Strömungsvorgänge [8], da die genannten Grundgleichungen in ihrer „akustischen Form“ lediglich Spezialfälle der entsprechenden allgemeineren Grundgleichungen der Fluidmechanik bzw. der Thermodynamik sind.

Wenn man heute ein modernes Lehrbuch der Fluidmechanik oder der Akustik aufschlägt, dann sind jeweils umfangreiche Abschnitte zu den gemeinsamen Grundlagen enthalten; außerdem beschäftigen sich Teilabschnitte mit dem fluidmechanischen Phänomen "Schall" bzw. mit der Schallquelle "Strömung" und den Wechselwirkungen zwischen Schall und Strömung, z.B.

L. D. Landau und E. M. Lifschitz "Hydrodynamik" (5.Aufl.) 1991

W. Greiner und H. Stock "Hydrodynamik" (4.Aufl.) 1991

A. D. Pierce "Acoustics" 1991

D. G. Crighton, M. Heckl u.a. "Modern Methods in Analytical Acoustics" 1992

M. Heckl und W. Müller "Taschenbuch der Technischen Akustik" (2.Aufl.) 1993

V. A. Krasilnikov und V. V. Krylov "Einführung in die physikalische Akustik" 1984;

im Bereich der nichtlinearen Akustik (mit sehr starkem Bezug zur Strömungsmechanik):

L. K. Zarembo und V. A. Krasilnikov "Einführung in die nichtlineare Akustik" 1966

O. V. Rudenko und S. I. Solujan "Theoretische Grundlagen der nichtlinearen Akustik" 1975

M. F. Hamilton and D. T. Blackstock „Nonlinear Acoustics“ 1998;

schließlich Fachbücher direkt zum Grenzgebiet zwischen der Fluidmechanik und der Akustik, z.B.

M. E. Goldstein "Aeroacoustics" 1976

M. J. Lighthill "Waves in Fluids" 1978

A. G. Munin u.a. "Aerodynamische Lärmquellen" 1981

W. K. Blake "Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration" (Vol.1, 2) 1986

H. H. Hubbard „Aeroacoustics of Flight Vehicles: Theory and Practice" 1991

J. C. Hardin und M. Y. Hussaini (eds.) "Computational Aeroacoustics" 1993

M. S. Howe „Acoustics of Fluid-Structure Interactions“ 1998

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts sind in der Akustik viele Probleme erkannt und bearbeitet worden, die einen starken Bezug zur Fluidmechanik erkennen lassen bzw. sind sie direkt von strömungsmechanischer Seite aus als Grundlagenprobleme aufgedeckt und behandelt worden, das sind Probleme der Aeroakustik, Strömungsakustik, Hydroakustik, insbesondere:

- Erzeugung von Schall durch Strömungen
- Erzeugung von Strömungen durch Schall (akustische Strömungen)
- Wechselwirkungen zwischen Schall und Strömung, Schall und Turbulenz
- Kanal-Strömungsakustik
- Thermoakustische Phänomene
- Akustische Technologien (Beschallung von verfahrenstechnischen Prozessen)
- Stoßwellen, Nichtlineare akustische Phänomene, Grundlagen der nichtlinearen Akustik

2 Die Strömungsakustik vor 1900

Die Verbindung zwischen der Strömungsmechanik und der Akustik ist auch aus historischen Gründen von Interesse, denn die Wissenschaft der Fluidschall-Akustik hat sich im 18. und 19. Jahrhundert aus der Fluidmechanik entwickelt, verbunden mit den Namen von

- Newton "Principia" 1686 (Beginn der Theorie der Schallausbreitung)
- L. Euler "General Principles of the Motion of Fluids" 1755, "On the Propagation of Sound" 1759, "Continuation of the Researches on the Propagation of Sound" 1759
- J. L. Lagrange "New Researches on the Nature and Propagation of Sound" 1759
- S. D. Poisson "Memoir on the Theory of Sound" 1808
- P. S. Laplace "On the Velocity of Sound through Air and through Water" 1816
- G.G. Stokes "An Examination of the Possible Effect of Radiation of Heat on the Propagation of Sound" 1851
- G. Kirchhoff "On the Influence of Heat Conduction in a Gas on Sound Propagation" 1868
"Vorlesungen über mathematische Physik: Mechanik" (2d ed.) 1877
- O. Reynolds "On the Refraction of Sound by the Atmosphere" 1874
- H. Helmholtz "Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden" 1860, "On the Influence of Friction in the Air on Sound Motion" 1863, "On the Sensations of Tone" 1885
- H. Lamb "Hydrodynamics" 1879
- J. W. Strutt/Lord. Rayleigh "The Theory of Sound", Vol.1: 1877, Vol.2: 1878

Zu einigen Phänomenen seien noch ausführlichere Bemerkungen angeschlossen (siehe u. a. [1]):

Äolstöne: Bereits ATHANASIOS KIRCHER (1602 – 1680) berichtete 1650 über diese Töne, die bei der Umströmung dünner Drähte (bzw. Zylinder) entstehen. 1878 trug V. STROUHAL (1850 – 1922) vor der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft in Würzburg über eine empirische Beziehung zwischen dem Drahtdurchmesser d , der Windgeschwindigkeit v und der Frequenz des abgestrahlten Tons $f = 0,185 v / d$ vor ([20], siehe dazu auch im Anhang zu dieser Veröffentlichung). Die dimensionslose Größe $f d / v$ wurde später als die STROUHAL-Zahl eingeführt.

1877/1878 schreibt RAYLEIGH in [21], dass die STROUHAL-Zahl nur von der Größe $v \rho d / \eta$ abhängt (η Scherviskosität des Fluids, ρ Fluidichte, d Drahtdurchmesser, v Anströmgeschwindigkeit). Diese dimensionslose Kennzahl wurde später von OSBORNE REYNOLDS zur Beschreibung des Überganges von einer laminaren in eine turbulente Strömung verwendet. Die Bezeichnung REYNOLDS-Zahl wurde 1908 von A. SOMMERFELD eingeführt. (WERNER ALBRING wies in den sechziger Jahren darauf hin, dass HELMHOLTZ bereits 1873 eine Ähnlichkeitsbeziehung analog zur REYNOLDS-Zahl formuliert hat, also 10 Jahre vor REYNOLDS!). RAYLEIGH schrieb auch, dass die Strömung hinter dem Draht Schall abstrahlt, auch wenn der Draht selbst nicht schwingen konnte.

Schneidentöne: Diese Art der Strömungsschallerzeugung wurde 1854 durch SONDHAUSS und 1855 durch MASSON beschrieben. Trifft Luft, die aus einem schmalen Schlitz strömt, auf eine scharfe Kante, so wird ein energiereicher Ton erzeugt. Dieser entsteht durch Wirbelstrukturen, deren Auftreten auf die Kante und infolge der Rückwirkungen des Druckfeldes von der Kante bis zum Schlitz.

Ähnlichkeitskennzahlen: Die dimensionslosen Zahlen, die STOKES- (entspricht der HAGEN-Zahl), STROUHAL-, MACH- und REYNOLDS-Zahl, sind Teil der Geschichte der Aeroakustik. RAYLEIGH beschäftigte sich zwanzig Jahre seines Lebens mit Ähnlichkeit; er entwickelte die Dimensionsanalyse. Er zeigte zum Beispiel 1915, wie durch ihre Verwendung die Abhängigkeit der Frequenz der Äolstöne von der Strömungsgeschwindigkeit und dem Drahtdurchmesser gefunden werden kann.

3 Das erste Goldene Zeitalter der Aeroakustik – ein wissenschaftshistorischer Überblick

Wie LIGHTHILL 1992 schreibt ([9], siehe auch [7]), begann das erste Goldene Zeitalter der Aeroakustik in den späten vierziger Jahren des 20. Jahrhunderts (und reichte in etwa bis in die Mitte der siebziger Jahre). Ausgangspunkt war einerseits die Erkenntnis, dass die enorm großen Lärmpegel der kleinen militärischen Strahlflugzeuge stark reduziert werden müssen, wenn die Nutzung von viel größeren Strahlflugzeugen für den zivilen Luftverkehr von der Öffentlichkeit toleriert werden soll. Dies führte in England zu organisierten Forschungsaktivitäten an verschiedenen Universitäten (u. a. Manchester, Southampton) in Zusammenarbeit mit Rolls Royce und in Abstimmung mit parallel laufenden Aktivitäten in den USA.

Andererseits waren in diesem Zeitraum um die Mitte des 20. Jahrhunderts auf dem Gebiet der Aerodynamik und der Akustik, insbesondere in den Grundlagen, Erkenntnisse herangereift, die den Start tiefergreifender strömungsakustischer Forschungen stark begünstigten (auch wenn dieser Einfluss durch den Charakter militärisch orientierter Forschungen und die kriegsbedingten Verhältnisse in Europa und in der Welt historisch (bisher?) nicht nachgewiesen ist). Dazu zählen insbesondere die Arbeiten zum Propeller- und Ventilatorenlärm (GUTIN, DEMING, ERNSTHAUSEN, JUDIN, BLOCHINCEV u. a.), zur Theorie der Turbulenz (z. B. die Arbeiten zum Energiespektrum der Turbulenz von KOLMOGOROV und OBUKHOV im Jahre 1941 sowie von v. WEIZSÄCKER) und zur Schallausbreitung in inhomogenen, bewegten Medien (BLOCHINCEV 1945/46).

Die Grundlagen zur Lösung des Problems der Schallerzeugung durch Strömungen wurden von M. J. LIGHTHILL mit seinen beiden berühmten Veröffentlichungen zum Strahlärm „**On Sound Generated Aerodynamically**“ aus den Jahren 1952 und 1954 geschaffen, die das Verfahren der sog. akustischen Analogie begründeten [14]. Vielleicht war es - so wurde später dazu geschrieben - die glänzendste Idee bei der „akustischen Analogie“, das „neue“ Problem des aerodynamischen Lärms auf das „alte“ Problem des Lösens der klassischen Wellengleichung mit Quellen zu reduzieren, und zwar durch das Ersetzen der Strömung durch die klassischen akustischen Multipole und die Anwendung des klassischen KIRCHHOFF-Integrals auf die Lösung der Wellengleichung.

Die wesentlichen Erkenntnisse von Lighthill zum Strahlärm waren die folgenden Aspekte:

- der Quadrupolcharakter dieser Schallabstrahlung,
- die Proportionalität der abgestrahlten Schallleistung zu $U^8 D^2$ für Unterschallstrahlen,
- und bereits die Erkenntnis (auf dem Fakt aufbauend, dass die Vortriebsleistung des Triebwerks proportional zu $U^3 D^2$ ist), dass Fortschritte hinsichtlich der Lärmabstrahlung nur erreicht werden können, wenn Triebwerke mit größerem Bypass-Verhältnis und relativ niedriger Austrittsgeschwindigkeit eingesetzt werden.

(Diese Erkenntnis wurde in modernen Triebwerken umgesetzt und wird mit radikalen Änderungen im Triebwerksaufbau auch in den nächsten Jahrzehnten eine enorme Rolle spielen.)

In den Jahren nach der Veröffentlichung der Lighthill-Theorie sind zahlreiche Versuche gemacht worden, die Theorie der akustischen Analogie weiterzuentwickeln und zu verbessern, bezogen

- auf die Berücksichtigung weiterer Quellmechanismen, wie z. B. überströmte feste Oberflächen, Temperatur- und Dichteunterschiede im Medium u. a. m.,
- auf Modifizierungen des Wellenoperators auf der linken Seite der inhomogenen Wellengleichung, meist gleichzeitig mit dem Bezug
- auf Modifizierungen des Quellgliedes auf der rechten Seite der inhomogenen Wellengleichung.

Die beiden letztgenannten Aspekte bedeuten eine veränderte Formulierung der akustischen Analogie durch eine unterschiedliche Aufteilung der Gleichungsterme in lineare „Ausbreitungs“-terme und nichtlineare „Quell“-terme.

Bedeutungsvolle Arbeiten zur Weiterentwicklung der akustischen Analogie sind die folgenden:

- 1955 N. Curle: The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound
 1959 H. S. Ribner: Aerodynamic sound from fluid dilatations. New theory of jet noise generation, directionality, and spectra
 1960 O. M. Phillips: On the generation of sound by supersonic turbulent shear layers
 1963 J. E. Ffowcs Williams: The noise from turbulence convected at high speed
 1964 A. Powell: Theory of vortex sound
 1969 J. E. Ffowcs Williams and D. L. Hawkings: Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion
 1969 D. G. Crighton and J. E. Ffowcs Williams: Sound generation by turbulent two-phase flow
 1973 G. M. Lilley: On the noise from air jets
 1974 M. S. Howe: Contributions to the theory of aerodynamic sound, with application to excess jet noise and the theory of the flute
 1978 W. Möhring: On vortex sound at low Mach number
 1998 P. E. Doak: Fluctuating total enthalpy as a generalized acoustic field

Für alle diese Weiterentwicklungen gilt aber auch, dass das aerodynamische Quellfeld für den erzeugten Strömungslärm nicht bekannt war bzw. nur für sehr einfache Modellfälle berechnet werden konnte. Die Theorien auf der Basis der Lighthill'schen Analogie benötigen aber das detaillierte räumliche, zeitliche Strömungsfeld, d. h. genaue Informationen zur Turbulenz der Strömung.

Bisher wurden in die historische Übersicht vorrangig die Grundlagen der Aeroakustik und der Strahlärm einbezogen. Von großer Bedeutung ist aber auch der Rotorlärm. Darunter wird die Schallerzeugung durch Strömungsvorgänge an rotierenden Strukturen unterschiedlichster geometrischer Formen und Abmessungen verstanden, also z. B. Propeller, Ventilatoren, Turbomaschinen, Hubschrauberrotoren, Rotoren von Windenergieanlagen u. v. a. m. Bei diesen Rotoren gibt es zahlreiche strömungsbedingte physikalische Mechanismen der Schallerzeugung, die zu hohen Schallenergien bei diskreten Frequenzen oder in schmalbandigen Frequenzbereichen sowie zu energiereichen breitbandigen Spektralanteilen führen. Bedeutungsvolle Arbeiten auf dem Gebiet des Rotorlärms sind die folgenden (die genannte Jahreszahl bezieht sich jeweils auf die erstgenannte Veröffentlichung):

- 1936 L. Ja. Gutin: On the sound field of a rotating propeller
 1937 A. F. Deming: Noise from propellers Propeller rotation noise due to torque and thrust.
 1941 W. Ernsthausen: Der Einfluss aerodynamischer Eigenschaften auf Schallfeld und Strahlungsleistung einer Luftschaube. Der rotierende Tragflügel als Strahlungsproblem.
 1944 E. Ja. Judin: On the vortex sound from rotating rods. Issledovanie suma ventiljatornych ustanovok i metodov borby s nim. (CAGI-Bericht Nr. 713, Moskva 1953)

- 1948 H. H. Hubbard: Sound from dual-rotating and multiple single rotating propellers. Propeller noise charts for transport airplanes.
- 1961 J. M. Tyler, T. G. Sofrin: Axial flow compressor noise studies. Stop compressor noise before it starts. Noise abatement method and apparatus.
- 1964 I. J. Sharland: Sources of noise in axial flow fans.
- 1965 M. V. Lowson: The sound field for singularities in motion. Theoretical analysis of compressor noise.
- 1969 J. E. Ffowcs Williams, D. L. Hawkings: Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. Theory relating to the noise of rotating machinery.
- 1969 S. E. Wright: Sound radiation from a lifting rotor generated by asymmetric disk loading. Discrete radiation from rotating periodic sources.
- 1970 C. L. Morfey: Sound generation in subsonic turbomachinery.
- 1971 B. D. Mugridge: Sources of noise in axial flow fans.
- 1972 D. L. Hawkings, M. V. Lowson: Theory of open supersonic rotor noise. Tone noise of high-speed rotors.
- 1973 D. B. Hanson: Spectrum of rotor noise, propeller noise Influence of propeller design parameters on far-field harmonic noise in forward flight. Compressible theory for propeller aerodynamics and noise. Noise of counterrotation propellers.
- 1975 F. Farassat u. a.: Advanced theoretical treatment of propeller noise. the calculation of rotating blade noise. The prediction of helicopter rotor discrete frequency noise.
- 1989 D. G. Crighton u. a.: Asymptotic theory of propeller noise.
- 1997 K. S. Brentner: algorithms for acoustic integrals with examples for rotor noise prediction
- 1998 K. S. Brentner, F. Farassat: Analytical comparison of the acoustic analogy and Kirchhoff formulation for moving surfaces.

4 Die Strömungsakustik in den 90er Jahren

Ende der 80er und mit Beginn der 90er Jahre wurden auf mehreren, für die Aeroakustik relevanten Gebieten erhebliche Erkenntnisfortschritte erreicht, insbesondere im Bereich der Messverfahren, der Gerätetechnik und der Versuchsanlagen sowie im Bereich der Theorienentwicklung und der numerischen Verfahren. Über die Gründe für diesen Erkenntnis Schub können folgende Aspekte aufgeführt werden (siehe auch A. D. PIERCE 1992 in [9]):

- Die Entwicklung in den drei Fachdisziplinen
 - Aeroakustik (physikalische Grundlagen, Theorie, experimentelle Ergebnisse),
 - Numerische Strömungsmechanik, die Computational Fluid Dynamics CFD (einschließlich der Computational Physics, Computational Mechanics, Computational Acoustics) sowie
 - Turbulenz und Strömungsinstabilitäten
 hatte Anfang der 90er Jahre zu einem hohen disziplinären Niveau geführt, das im interdisziplinären Kontext nach neuen Anbindungen, Forschungsproblemen, Innovationen gesucht hat.
- Das gewaltige Anwachsen der Leistungsfähigkeit der Computer ließ die Schwelle überwinden, ab welcher numerische Simulationen für aeroakustische Vorgänge möglich wurden.
- Die Simulation turbulenter Strömungen (LES u. a. m.) hatten zu beeindruckenden Erkenntnisfortschritten in der Turbulenz geführt.
- Numerische Verfahren standen in gut entwickelter bis hin zu ausgereifter Form in der Computational Fluid Dynamics (CFD) zur Verfügung.
- Schließlich wurden erhebliche Fortschritte in der Aufklärung der Instabilitätsmechanismen erreicht, die für die Schallerzeugung durch Strömungen eine bedeutungsvolle Rolle spielen.

Durch diese Entwicklungen seit Anfang der 90er Jahre machte die Computational Aeroacoustics beeindruckende Fortschritte. Mehrere Forschergruppen in aller Welt (insbesondere USA, Frankreich, Großbritannien, Deutschland) haben zahlreiche, sehr unterschiedliche Bearbeitungsstrategien entwickelt, die insbesondere die Ankopplung der Akustik an die Fluidmechanik, d. h. des Schallfeldes an das Strömungsfeld, zum Ausdruck bringen.

In Realisierung der eingangs genannten These, dass die Fluidmechanik und die Fluidschall-Akustik von derselben physikalischen Qualität sind und von denselben Grundgleichungen beherrscht werden,

ist die aussichtsreichste, gegenwärtig aber noch visionäre Methode, das Verfahren der direkten numerischen Simulation (Direct Numerical Simulation DNS) des gemeinsamen Vorganges „Strömung und Schall“. Mit dem heutigen Entwicklungsstand der numerischen Aeroakustik muss eine, wie auch immer geartete Schnittstelle zwischen der Strömung und dem Schallfeld eingeführt werden, d. h. es werden hybride Berechnungsverfahren praktiziert. Das betrifft die akustischen Analogiemethoden, die Verfahren mit EULER-Volumen und angeschlossenen KIRCHHOFF- bzw. BEM-Flächen sowie andere Formen der Störungsgleichungen und Flächen-/Volumenintegrationen ins akustische Fernfeld. Dieser gewaltige Aufschwung, den die Aeroakustik in den 90er Jahren insbesondere durch die o. g. Aspekte genommen hat, veranlasste den Begründer des Fachgebietes Aeroakustik, Sir James LIGHTHILL, 1992 von der Möglichkeit eines zweiten goldenen Zeitalters der Aeroakustik zu sprechen.

5 Die LIGHTHILLSche Analogie in der Strömungsakustik

Die Grundzüge dieses Verfahrens sind 1952 in der Publikation „**On Sound Generated Aerodynamically**“ von M. J. LIGHTHILL dargestellt worden. Die Bedeutung dieser Publikation und des Verfahrens seien durch drei Zitate belegt:

„Die Publikation von LIGHTHILL im Jahre 1952 muss retrospektiv als ein epochales Ereignis betrachtet werden. Keine andere Veröffentlichung in der Geschichte der Akustik ist so umfassend zitiert worden. Sie initiierte eine Periode kreativer Bemühungen mit herausragenden wissenschaftlichen Arbeiten.“ (nach PIERCE 1992, in [9])

„Die Arbeit von LIGHTHILL 1952 ist unzweifelhaft eine der bestbeschriebenen wissenschaftlichen Arbeiten überhaupt.“ (nach FARASSAT/BRENTNER 1998 [6])

„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.“
(nach LILLEY 1999 [16])

Die LIGHTHILLSche Theorie der aerodynamischen Schallerzeugung folgt aus den Grundgleichungen der Strömungsmechanik, und zwar der Kontinuitätsgleichung und der Bewegungsgleichung in der Form der NAVIER-STOKES-Gleichungen (bzw. der REYNOLDSschen Gleichungen). Mit der thermodynamischen Zustandsgleichung ergibt sich eine inhomogene Wellengleichung für die akustischen Dichteschwankungen in der Form

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \right) \rho = q$$

mit dem Quellterm $q = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$ und $T_{ij} = \rho v_i v_j + p_{ij} - c_0^2 \rho \delta_{ij}$ (LIGHTHILL-Tensor).

Die instationäre Strömung wird durch eine Volumenverteilung von äquivalenten akustischen Quellen (Quadrupolquellen) ersetzt. Diese werden in ein gleichförmiges Medium eingebettet, das selbst ruht, in dem sich aber die Quellen bewegen können. Damit ist das Problem der Schallerzeugung durch Strömungen auf ein klassisches Problem der Akustik zurückgeführt; diese Vorgehensweise wird deshalb als akustische Analogie, heute meist als die LIGHTHILLSche Analogie, bezeichnet.

Die inhomogene Wellengleichung zeigt, dass das Quellglied die reale Strömung, einschließlich der Erzeugung von Schall und der Wechselwirkung des Schalls mit der Strömung, enthält. Die LIGHTHILLSche Theorie braucht keine Voraussetzungen bei ihrer Ableitung; sie ist eine exakte Theorie. Sie benötigt allerdings für konkrete Vorausberechnungen des Schallfeldes die Details der Strömung, das heißt das der Strömung äquivalente akustische Quellfeld, mindestens in einer guten Näherung.

Werden bei der Ableitung der inhomogenen Wellengleichung in der zugrundeliegenden Kontinuitätsgleichung äußere Massequellen (oder –senken) und in der Bewegungsgleichung von außen auf das Medium aufgeprägte Kräfte berücksichtigt, so folgt für das Quellglied

$$q = \frac{\partial \dot{m}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} (f_i + \dot{m} v_i) + \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

Diese drei Terme des Quellgliedes unterscheiden sich prinzipiell voneinander:

$\partial \dot{m} / \partial t$	Die zeitliche Änderung des Massenflusses (je Volumen) ist einer Monopolquelle der klassischen Akustik äquivalent.
$-\partial(f_i + \dot{m}v_i) / \partial x_i$	Ein Feld von Wechselkräften (je Volumen) ist einer Dipolquelle der klassischen Akustik äquivalent.
$\partial^2 T_{ij} / \partial x_i \partial x_j$	Ein Feld von Wechsellspannungen und Druckschwankungen (je Volumen) ist in freien Strömungen einer Quadrupolquelle der klassischen Akustik äquivalent.

Die inhomogene Wellengleichung kann mit Hilfe der erweiterten KIRCHHOFFSchen Beziehung in folgende Integralgleichung für den Schalldruck am Aufpunkt umgeformt werden:

$$\begin{aligned}
 p(x_i, t) = & \int_V \frac{1}{4\pi r} \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} \right)_\tau dV - \int_S \frac{1}{4\pi r} \left(\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} \right)_\tau n_i dS \\
 & - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_V \frac{1}{4\pi r} (f_i + \dot{m}v_i)_\tau dV + \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{1}{4\pi r} (\rho v_i v_j + p_{ij})_\tau n_j dS \\
 & + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{1}{4\pi r} (T_{ij})_\tau dV
 \end{aligned}$$

Der Schalldruck am Aufpunkt wird

- erstens durch Monopolquellen verursacht, die durch die zeitliche Änderung des äußeren Massenflusses in ein Volumen V und durch die zeitliche Änderung des Massenflusses durch eine in V eingebettete Oberfläche S bzw. durch die Normalbewegung von S gegeben sind;
- zweitens durch Dipolquellen verursacht, die durch Wechselkräfte (äußere Kräfte und Reaktionskräfte durch den Massenfluss) in einem Volumen V und durch Wechselkräfte an einer inneren Berandung S gegeben sind;
- drittens durch Quadrupolquellen verursacht, die durch Wechsellspannungen und Druckschwankungen in einem Volumen V gegeben sind.

Physikalisch interpretiert enthält die Integralbeziehung folgende Mechanismen der Schallerzeugung:

- die äußeren Masseflussschwankungen und
- das äußere, ungleichförmige Kraftfeld,
- Schwankungen im konvektiven Impulstransfer (Impulsstromdichteschwankungen)
- Schwankungen der viskosen Spannungen und
- Entropieschwankungen in der Strömung (Verbrennung, Wärmeübergang, Kondensation u. a.).

In der akustischen Analogie werden diese Mechanismen durch die genannten klassischen akustischen Multipole ersetzt.

LIGHTHILLS Quellterm schließt alle instationären Strömungseffekte ein, d. h. sowohl Schallerzeugung durch die Strömung als auch die Wechselwirkung zwischen der Strömung und dem Schallfeld.

Die rechte Seite der inhomogenen Wellengleichung beinhaltet im Detail

- die Quellstärke für die auf der linken Seite stehende Schallfeldgröße,
- die Schallausbreitung in der Strömung, einschließlich der konvektiven Verstärkung des abgestrahlten Schalls in Strömungsrichtung und auch die Doppler-Verschiebungen in der Frequenz des Abstrahlungsfeldes gegenüber dem Quellenfeld,
- Brechungseffekte durch Gradienten der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und durch Temperaturfelder,
- Reflexionen an Inhomogenitäten und an festen Berandungen,
- die Streuung der Schallwellen durch turbulente Wirbel und Inhomogenitäten der Temperatur,
- die nichtlinearen Verzerrungen der sich ausbreitenden Schallwellen u. a. m.

Diese Vermischung von Quell- und Ausbreitungseffekten im Inhomogenitätsglied auf der rechten Seite der inhomogenen Wellengleichung bringt, wie die Erfahrung zeigt, Verständnisschwierigkeiten mit sich. Deshalb sind für viele praktische Anwendungen, z. B. die Schallerzeugung von einer turbulenten Scherströmung, Modifizierungen der LIGHTHILL-Formulierung wünschenswert, um die Erzeugung von Schall von den Vorgängen der Schallausbreitung zu trennen. Damit könnten dann z. B. die Brechung der abgestrahlten Schallwellen bei der Ausbreitung quer durch die Scherströmung dargestellt werden.

Die entsprechenden Gleichungen gehen gleichfalls von den exakten Grundgleichungen der Strömungsmechanik (für die instationäre, viskose, kompressible Strömung) aus. Die z. B. von LILLEY abgeleitete, linearisierte, konvektive, inhomogene Wellengleichung zeigt jedoch nunmehr auf der linken Seite einen Wellenoperator in konvektiver Form

$$L \equiv \frac{\partial^2}{\partial t^2} + 2v_i \frac{\partial^2}{\partial t \partial x_i} + (v_i v_j - c^2 \delta_{ij}) \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j}.$$

Die äquivalenten akustischen Quellen, die sich relativ zur realen Strömung bewegen können, sind nicht mehr in ein gleichförmiges, ruhendes Medium eingebettet. Bei LILLEY enthält z. B. diese konvektive, inhomogene Wellengleichung im Quellglied auf der rechten Seite nichtlineare, in den Schwankungsgrößen quadratische Terme, die die Wirbelstärke (vorticity), das Druckfeld und die kinetische Energie als die Hauptquellen des aerodynamisch erzeugten Lärms darstellen.

Für bestimmte Anwendungsfälle können auch andere thermodynamische Größen, wie Entropie und Enthalpie, in das Quellglied eingeführt werden, z. B. bei der Schallerzeugung von heißen Strahlen. (Es kann aus dieser konvektiven, inhomogenen Wellengleichung gezeigt werden, dass bei gleicher Geschwindigkeit heiße Strahlen bei niedrigen MACH-Zahlen lauter sind als kalte und dass bei hohen MACH-Zahlen der umgekehrte Fall eintritt.)

Von DOAK wurde 1998 geschrieben [5], dass keines von diesen alternativen Modellen der akustischen Analogie die physikalischen Prozesse mathematisch zufriedenstellend dargestellt. DOAK formulierte Kriterien für ein Konzept eines verallgemeinerten akustischen Feldes; diese werden allein von der physikalischen Größe „Schwankungen der Gesamtenthalpie“ und der zugehörigen inhomogenen, konvektiven Wellengleichung erfüllt.

Neben der Lighthillschen Darstellung der inhomogenen Wellengleichung sind weitere Quellgliedformulierungen entwickelt worden, die jeweils interessante physikalische Aspekte betonen, mehr oder weniger starke Näherungen beinhalten und häufig für jeweils bestimmte Anwendungsfälle geeigneter als der Quadrupolausdruck sind. Dazu gehören zum Beispiel

- die akustische Analogie nach RIBNER (1962) mit einem klassischen Monopol als äquivalenter akustischer Quelle

$$q = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p^{(0)}}{\partial t^2} \quad \text{mit} \quad \nabla^2 p^{(0)} = -\frac{\partial^2 \rho_0 u_i u_j}{\partial x_i \partial x_j}$$

- die akustische Analogie nach POWELL (1964) und HOWE (1975) mit der klassischen Dipolformulierung:

$$q = -\rho_0 \frac{\partial L_i}{\partial x_i} \quad \text{mit} \quad L_i = (\boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{u})_i$$

RIBNERs Monopolausdruck auf der Grundlage eines inkompressiblen Nahfelddruckes muss die größere örtlichen Ausdehnung des Quellfeldes im Vergleich mit der Lighthillschen Quadrupoldarstellung berücksichtigen. Das äquivalente Monopolfeld ist nur schwach lokalisiert, so dass die Volumenintegrale über einen relativ großen Bereich, von der Größe der akustischen Wellenlänge, erstreckt werden müssen. Das bedeutet dann, dass auch die entsprechenden Veränderungen in den retardierten Zeiten erfasst werden müssen.

Die akustische Analogie nach POWELL und HOWE bezieht sich mit ihrem Wirbeldipol auf die Verwirbelung (vorticity) in der Strömung. Diese Analogie ist für die Untersuchung von aeroakustischen Modellproblemen häufig angewendet worden, z. B. für die Schallabstrahlung von Linien- und Ringwirbeln und ihre Wechselwirkung mit festen Körpern.

Von besonderem Interesse ist auch die Theorie von MÖHRING zum Wirbelschall. Ausgehend von der POWELL-HOWE-Theorie, mit Verwendung einer vektoriellen GREENschen Funktion und des HELMHOLTZschen Wirbelsatzes, hat MÖHRING die Fernfeld-Schallgröße allein auf die Verwirbelung im Strömungsbereich zurückgeführt.

Von Bedeutung sind des Weiteren auch die Analogien, die die Enthalpie h bzw. die Gesamtenthalpie H

$$\text{Gesamtenthalpie: } H = h + \frac{1}{2} v_i^2 \quad \text{Enthalpie: } h = u + \frac{p}{\rho}$$

(mit: u innere Energie je Volumen) als abhängige Variable in die linke Seite der inhomogenen Wellengleichung einführen, siehe dazu die Arbeiten von HOWE, MÖHRING, DOAK u. a.

6 Praktische Aussagen aus der Lighthill-Theorie, die von historischer Bedeutung sind

Aus der Lighthill'schen Analogie in der Form der Integraldarstellung des Strahl lärms kann, auch wenn die Details des instationären Quellfeldes (turbulente Strahlströmung) nicht bekannt sind, durch Dimensionsanalyse die Proportionalität der Schalleistung zur 8. Potenz der mittleren Strahlgeschwindigkeit im Düsenaustrittsquerschnitt

$$P = K \frac{\rho_s^2}{\rho_\infty} S_D \left(\frac{U_D}{c_\infty} \right)^8$$

(Indizes: s Strahl, D Düsenaustrittsquerschnitt) ermittelt werden.

Aus dem Verhältnis der abgestrahlten Schalleistung P_{schall} zur mechanischen Strömungsleistung P_{mech} des Strahls (kinetischer Energiefluss) folgt der Umsetzungsgrad η_{ak}

$$\eta_{ak} = \frac{P_{schall}}{P_{mech}} = K \left(\frac{\rho_s}{\rho_\infty} \right) \left(\frac{U_D}{c_\infty} \right)^5 \approx K Ma^5$$

($K \approx 10^{-4}$, Ma MACH-Zahl), siehe dazu Bild 1.

Die vom Freistrahls insgesamt ins Fernfeld abgestrahlte Schalleistung ist also nur ein Bruchteil des mechanischen Energieflusses der Strömung. Aus dieser Unterschiedlichkeit der Energien beider Felder (Strömungsfeld, Schallfeld) ist eines der wesentlichen Probleme der numerischen Vorausberechnung des aerodynamischen Lärms des Freistrahls (von freier Turbulenz), insbesondere bei kleinen MACH-Zahlen, erkennbar. Bei einer Strömung mit $Ma = 0,1$ wird eine Genauigkeit von mindestens 10^{-9} benötigt. Wird diese nicht erreicht, so äußern sich die Ungenauigkeiten der numerischen Berechnung als „numerischer Lärm“ („The numerical procedure may actually be „noisier“ than the flow!“ CRIGHTON in [3], [9] u. a.).

Von besonderer Bedeutung für die Minderung des Fluglärms erwies sich das o. g. Lighthill'sche U^8 -Gesetz für den Strahl lärms. Während also die Schalleistung proportional zu $U^8 S$ ist, wächst der Strahl schub des Flugtriebwerkes nur mit $U^2 S$. Das bedeutet, dass sich bei konstantem Strahl schub die abgestrahlte Schalleistung des Strahls mit der 6. Potenz der Strahlgeschwindigkeit ändert! Es ist also eine Lärm milderungsmaßnahme von überragender Bedeutung, den Strahl schub mit größerer Strahlquerschnittsfläche bei verminderter Strahlgeschwindigkeit zu erreichen.

Diese Entwicklung hat sich in der Luftfahrt in den letzten 40 Jahren deutlich gezeigt. In diesem Zeitraum wurden fortschreitend Triebwerke mit immer größerem Bypass-Verhältnis entwickelt und eingeführt. (Das Bypass- oder Nebenstromverhältnis ist das Verhältnis des äußeren Massendurchsatzes zum inneren Massendurchsatz bei einem Flugzeugtriebwerk. Es ist äußerlich durch den großen Fan am Triebwerkeintritt und durch den kleinen inneren Schubdüsendurchmesser am Triebwerksaustritt erkennbar.) Während ein Strahltriebwerk der 60er Jahre ohne Bypass zwangsläufig ein Nebenstromverhältnis von 1:1 hatte, werden heute Triebwerke der Firma Rolls Royce Deutschland mit einem Nebenstromverhältnis 5:1 eingesetzt. Damit wird eine wesentlich verringerte mittlere Strahlgeschwindigkeit bei stark vergrößerter Strahlquerschnittsfläche realisiert. Der neueste Stand der technischen Entwicklung wird durch das Triebwerk PW 8000 von Pratt & Whitney charakterisiert, das erste kommerzielle Triebwerk mit einem Getriebefan, gekennzeichnet durch den besonders großen und besonders langsamlaufenden Rotor, die Umfangsgeschwindigkeit des Fans ist etwa 340 m/s gegenüber den sonst üblichen 440 m/s (Überschall!), das Übersetzungsverhältnis des Getriebes beträgt 1:3, d. h. die Antriebswelle mit der Niederdruckturbine läuft dreimal schneller als der Fan, das Nebenstromverhältnis ist > 10 ; schließlich: neben der Minderung des Strahl lärms wird auch die tonale Schallenergie des Fan deutlich reduziert [18], [19].

Die Bedeutung dieser praktischen Ergebnisse aus der Lighthill'schen Theorie lässt sich an der erreichten Fluglärmminderung zeigen. Die Geräuschemission von Flugzeugen, vorrangig der Trieb-

werkslärm, wurde in den letzten 40 Jahren um etwa 25 dB, in den letzten 10 Jahren geschätzt um etwa 6 dB reduziert. Die Zielstellung der Luftfahrtindustrie weist eine Pegelminderung von zukünftigen Flugzeugen um etwa 10 dB innerhalb von 10 Jahren aus und um 20 dB innerhalb von 25 Jahren, jeweils gegenüber Flugzeugen, die 1997 in Betrieb genommen worden sind. Dabei werden sich infolge der immer leiser werdenden Flugtriebwerke zukünftige Anstrengungen gleichartig auf die Teillärmquellen Triebwerksstrahl, Fan und Umströmung der äußeren Flugzeugkomponenten (Fahrwerke, Klappen, Flügelspitzen, u. a. m.), letzteres insbesondere beim Landeanflug, beziehen müssen.

7 Dimensionslose Größen in der Strömungsakustik

Dimensionslose Größen, auch als Ähnlichkeitskennzahlen verwendet, spielen in vielen Bereichen der Technik und Naturwissenschaften, insbesondere auch in historischer Sicht, eine große Rolle. In der Strömungsakustik sind die folgenden dimensionslosen Größenkombinationen von Bedeutung [11]:

die HELMHOLTZ-Zahl	$He = \frac{l}{\lambda} = \frac{lf}{c}$	die STROUHAL-Zahl	$Sr = \frac{fl}{v}$
die REYNOLDS-Zahl	$Re = \frac{v l}{\nu}$	die MACH-Zahl	$Ma = \frac{v}{c}$
die EULER-Zahl	$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2}$		

Einige dieser dimensionslosen Größen werden auch mit akustischen Größen geschrieben, z. B. die akustische Mach-Zahl Ma_{ak} und die akustische Reynolds-Zahl Re_{ak} mit der Schallschnelle v .

Der Anwendungsbereich dieser Ähnlichkeitskennzahlen wird meist in der Auslegung gegenständlicher Modelle gesehen, im Fachgebiet der Akustik in der gegenständlichen, physikalisch ähnlichen, raumakustischen Modellierung, im Fachgebiet der Strömungsakustik z. B. bei Modellen von Schalldämpfern für Kraftwerksanlagen, bei Strömungsmaschinen, bei umströmten Schaufeln und Tragflügeln, bei Hubschrauberrotoren u. a. m.. In der Modelltechnik werden dann - unter Nutzung dieser Ähnlichkeitskennzahlen - die Verfahren behandelt, unter denen gegenständliche Modelle im Experiment betrieben werden können, und schließlich erfolgt - mit Anwendung wiederum dieser Ähnlichkeitskennzahlen - die Rückübertragung von Modellmesswerten auf das noch nicht gegenständlich existierende Original. Des weiteren werden die genannten Ähnlichkeitskennzahlen und andere dimensionslose Kombinationen physikalischer Größen in der Strömungsakustik häufig zur verallgemeinerten Darstellung von Messwerten benutzt. Wichtig ist dabei eine Normierung, die den physikalischen Hintergrund der entsprechenden Vorgänge kennzeichnet. Das heißt, die Kompression der Messdaten gelingt um so besser, und dies ist geradezu ein Gütekennzeichen für den Kenntnisstand, je treffsicherer der physikalische Zusammenhang zwischen Wirkung und Ursache erkannt worden ist.

Ein nahezu klassisches Beispiel dafür ist das dimensionslose Diagramm für den strömungsmechanisch-akustischen Umsetzungsgrad für den Strahlärm, siehe dazu Bild 1, sowie das dimensionslose Spektrum für den breitbandigen Strahlärm, siehe Bild 2. Die von ARNO LENK (gemeinsam mit E. LOTZE) Anfang der 60er Jahre erarbeiteten, sehr genauen Messwerte zeigten eine hervorragende Übereinstimmung mit den Grundaussagen der Lighthillschen Theorie.

8 Lighthills Prognose (1992) für das „zweite goldene Zeitalter“ der Strömungsakustik

Sir James Lighthill hat in der Abschlussdiskussion des Workshops zur Computational Aeroacoustics", im April 1992, Hampton, VA, USA folgende Prognose gewagt (in [9]):

„Wenn die gewaltigen neuen Forderungen zur Lärminderung in der Luftfahrt mit den großen Möglichkeiten der vollen Nutzung der modernen CFD-Verfahren in Verbindung gebracht werden, ist es berechtigt, mit Zuversicht ein zweites goldenes Zeitalter der Aeroakustik vorausszusagen, das dem ersten goldenen Zeitalter etwa vier Jahrzehnte später folgt.“

Dieser Aussage kann sicher uneingeschränkt zugestimmt werden, wenn man dabei folgende Aspekte deutlich heraushebt:

- Die numerischen Verfahren, also die CFD-Verfahren gekoppelt mit den CAA-Verfahren, müssen generell zur Vorausberechnung der Schallabstrahlung von Strömungslärmquellen umfassend genutzt werden. Damit stehen exzellente Werkzeuge zur akustische Auslegung von Strömungslärmquellen und damit zur akustische Optimierung zur Verfügung.
- Die computertechnischen Lösungen für physikalisch-mathematische Modellierungen, einschließlich der zugehörigen Verifizierungen und Validierungen, schaffen Ergebnisse, die zur weiteren und schnelleren physikalischen Aufklärung der strömungsakustischen Vorgänge in starkem Maße beitragen. In den letzten Jahren ist bei der sich ständig erweiternden Nutzung der numerischen Verfahren deutlich ein beschleunigter Erkenntnisgewinn auf dem Gebiet der Strömungsakustik festzustellen (und nicht nur auf diesem Gebiet).
- Außerdem lassen sich aus den computertechnischen Lösungen ständig neue und qualitativ hochwertigere Fragestellungen an das Experiment ableiten, die der Klärung der Phänomene und der Schaffung von numerischen Werkzeugen förderlich sind.

Literatur

- [1] R. T. Beyer: Sounds of Our Times. New York etc.: Springer-Verlag 1999
- [2] T. Colonius: Lectures on computational aeroacoustics. California Inst. of Techn., Internet 1999
- [3] D. G. Crighton: Computation of wave generation in acoustics and structural acoustics. International Workshop Manchester 1995
- [4] D. G. Crighton: Acoustics as a branch of fluid mechanics. J. of Fluid Mech. 106 (1981) pp.261-291
- [5] P. E. Doak: Fluctuating total enthalpy as the basic generalized acoustic field. Theoret. Comput. Fluid Dynamics (1998) 10, pp. 115-133
- [6] F. Farassat, K. S. Brentner: The acoustic analogy and the prediction of the noise of rotating blades. Theoret. Comput. Fluid Dynamics (1998) 10, pp. 155-170
- [7] S. A. L. Glegg: Recent advances in aeroacoustics: the influence of computational fluid dynamics. 6th ICSV Copenhagen 1999
- [8] M. E. Goldstein: Aeroacoustics. New York: McGraw-Hill Book Company Inc. 1976
- [9] J. C. Hardin, M. Y. Hussaini (Eds.): Computational aeroacoustics. New York: Springer 1993
- [10] P. Költzsch: Strömungsmechanisch erzeugter Lärm. Diss. B (Habil.schrift) TU Dresden 1974
- [11] P. Költzsch: Über die Anwendung von Ähnlichkeitskennzahlen in der Akustik, basierend auf den Erfahrungen aus der Strömungsmechanik. Vortrag zum Ehrenkolloquium, 85. Geburtstag von Prof. em. Dr.-Ing. Dr.h.c. mult. Werner Albring, TU Dresden 11. Oktober 1999, Festschrift
- [12] P. Költzsch: Strömungsakustik: Geschichte, Stand, Perspektiven. Plenarvortrag 26. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Akustik, DAGA 2000, Universität Oldenburg März 2000
- [13] G. C. Lauchle: Fundamentals of flow-induced noise. Penn State University 1996
- [14] M. J. Lighthill: On sound generated aerodynamically. Proc. Roy. Soc., London (A) Part I: 211 (1952) 564-587; Part II: 222 (1954) 1-31
- [15] M. J. Lighthill. Early development of an „acoustic analogy“ approach to aeroacoustic theory. AIAA Journal 20 (1982) 4, pp. 449-450
- [16] G. M. Lilley: On the refraction of aerodynamic noise. 6th ICSV Copenhagen 1999, pp. 3581-3588
- [17] Ph. J. Morris: Aircraft noise: theory and practice. Penn State University 1997
- [18] U. Michel: persönliche Mitteilung März 2000
- [19] Pratt & Whitney: Internet März 2000
- [20] V. Strouhal: Über eine besondere Art der Tonerregung. Annalen der Physik und Chemie, Leipzig 241 (5) (1878) 10, S. 216 - 251
- [21] J. W. Strutt (Lord. Rayleigh): The Theory of Sound. New York: Dover Publications 1945

Anhang 1

STROUHALs Untersuchungen zu den Äolstönen 1878, dargestellt in den Annalen der Physik und Chemie 1878 [20]

(Textstellen in Anführungszeichen: Originalversion)

Strouhal geht einleitend auf die beiden bisher bekannten Möglichkeiten der Tonbildung ein, und zwar durch mechanische Erregung und durch Eigenschwingungen elastischer Körper. Er schreibt dann:

„Den Gegenstand der vorliegenden Arbeit bildet nun eine dritte Art der Tonerregung, und zwar von allen die einfachste, eine Art, welche zwar im Principe nicht unbekannt, jedoch einer Untersuchung bis jetzt nicht unterzogen wurde. Es ist bekannt, daß durch rasches Schwingen eines Stabes, einer Klinge, einer Peitsche u. a. in der Luft ein Ton entsteht; nicht weniger bekannt sind auch die hierher gehörigen Töne, die durch Luftströmungen an ausgespannten Drähten, scharfen Kanten, Spalten u. dergl. entstehen. Töne dieser Art, die aus später anzuführenden Gründen am passendsten als Reibungstöne zu bezeichnen sind, bilden den Gegenstand vorliegender Untersuchungen.“

Schon die einfachsten hierher gehörigen Versuche führen zur Kenntnis der Bedingungen, welche erfüllt werden müssen, wenn der in oben erwähnter Weise entstehende Ton ein reiner sein soll. Schwingt man einen Stab durch die Luft, so entsteht ein Ton; seine Höhe ist jedoch keine bestimmte, sondern durch die Geschwindigkeit bedingt, mit welcher der Stab durch die Luft geführt wurde. Daraus ergibt sich aber sofort, daß der so erhaltene Ton kein reiner sein kann, wenn nicht alle Theile des Stabes mit gleicher Geschwindigkeit durch die Luft geführt werden. Mit anderen Worten: Die Bewegung des Stabes muß eine Translationsbewegung sein. Diese Bedingung für die Reinheit des Tones ist jedoch keine hinreichende. Wiederholt man den Versuch mit Stäben verschiedenen Querschnitts, so überzeugt man sich ebenso, daß unter sonst gleichen Umständen der Ton mit dem Querschnitt des Stabes sich ändert. Welchen Einfluß also die äußere Formbeschaffenheit des Körpers auf den bei seiner Translationsbewegung in der Luft entstehenden Ton auch sonst haben mag, so viel steht fest, daß der Ton nur dann ein reiner, ein einfacher sein kann, wenn bezüglich der Bewegungsrichtung der Querschnitt des Körpers überall derselbe ist. Mit anderen Worten: Der Körper muß ein cylindrischer sein“

Als Versuchseinrichtung benutzte STROUHAL zwei durch eine drehbare Säule fest verbundene Scheiben, zwischen den achsenparallel unterschiedlicher Drähte gespannt wurden. Wichtig war die Konstanz der Drehzahl. Dazu schreibt STROUHAL:

„In Ermanglung eines geräuschlos, gleichmäßig und mit willkürlich abzuändernder Geschwindigkeit arbeitenden Motors wurde die Drehung mit der Hand ausgeführt; durch längere Uebung gelang es, die Drehung des Schwungrades so gleichmäßig zu führen, dass der Ton bis auf sehr geringer Schwankungen auf bestimmter Höhe durch längere Zeitdauer erhalten blieb.“

In der That schien es vortheilhafter eine Tonhöhe bestimmt und den Verhältnissen angemessen zu wählen und für diese die entsprechende Drehungsgeschwindigkeit zu bestimmen als umgekehrt für eine bestimmte gewählte Drehungsgeschwindigkeit die entsprechende Tonhöhe festzustellen. Die Bestimmungen der Tonhöhe wurden mittelst eines Monochords ausgeführt.“

Die Ergebnisse der Untersuchungen von STROUHAL sind (Es bedeuten: D Drahtdurchmesser, V Anströmgeschwindigkeit, N Frequenz):

„Die Höhe des Reibungstones ist von der Spannung des denselben erzeugenden Drahtes unabhängig. Ebenso wie die Spannung ist auch die Länge des Drahtes nicht von Einfluss auf die Höhe des Reibungstones, wohl aber auf dessen Intensität. Je länger der ausgespannte Draht, desto stärker ist unter sonst gleichen Umständen der Reibungston.“

Es ist ersichtlich, dass zunächst die Substanz des cylindrischen Körpers ohne Einfluss auf den Reibungston ist, sowie ferner, dass man in der That mit grosser Wahrscheinlichkeit das Gesetz der umgekehrten Proportionalität zwischen D und N/V annehmen und somit $D \cdot N/V = C$ setzen darf. Wenn auch einzelne Werthe des Productes $D \cdot N/V$ etwas mehr von dem Mittelwerthe $C = 0,185$ abweichen, so zeigt sich doch in den Abweichungen sämtlicher Werthe im ganzen kein entschiedener Gang, so dass die obige Annahme gewiss nicht unberechtigt ist. Und so gelangen wir schliesslich mit großer Annäherung zu dem einfachen Gesetze: $N = C \cdot V/D$.

Bei einer Translationsbewegung eines kreisförmig cylindrischen Körpers von beliebiger Substanz mit einer zu seiner Achse senkrechten Richtung in der Luft entsteht ein Ton, dessen Höhe der Bewegungsgeschwindigkeit direct und seinem Durchmesser umgekehrt proportional ist.“

Die Konstante C in der obigen Gleichung wurde später zu Ehren STROUHALs als STROUHAL-Zahl S_r (auch S, St, Sh) bezeichnet. Interessant ist, daß STROUHAL in der Umkehrung der aufgeführten Gleichung $V = D N / C$ eine Möglichkeit für die Ermittlung der momentanen Strömungsgeschwindigkeit aus einer Frequenzmessung vorschlägt:

„In dieser Form gibt die Gleichung ein einfaches Mittel an, die relative Geschwindigkeit eines cylindrischen Körpers bei seiner Translationsbewegung in der Luft auf akustischem Wege zu bestimmen, sei es, dass der Körper in ruhender Luft sich bewegt, oder dass die Luft gegen den ruhenden Körper strömt. Der Reibungston, der dann z. B. an den frei ausgespannten Telegraphendrähten vorzüglich zu beobachten ist, gibt durch seine momentane Tonhöhe zugleich die momentane Geschwindigkeit der Luftströmung an und durch sein Auf- und Abschweben auch die gleichzeitige Geschwindigkeitsänderung derselben. ...“

Die Entstehung der Töne konnte STROUHAL nicht klären:

„Eine erschöpfende Theorie der Reibungstöne zu geben bin ich bis jetzt nicht im Stande. Soviel erscheint jedoch ausser allem Zweifel zu stehen, dass die Entstehung periodischer Luftbewegung bei gleichförmiger Bewegung eines festen Körpers in der Luft auf Reibung zurückzuführen ist, sowohl auf die äußere, welche zwischen dem festen Körper und den Luftschichten, als auch auf die innere, welche zwischen den einzelnen Luftschichten selbst stattfindet.“

Anhang 2

LIGHTHILLs persönliche Erinnerungen zur Entwicklung der „Akustischen Analogie“ 1949 bis 1952, dargestellt im AIAA-Journal von 1982 [15]

(übersetzt, gekürzt und leicht bearbeitet vom Autor)

„Ich erinnere mich, Irving (H. B. IRVING, Assistant Director of Scientific Research) kam in mein Mansardenzimmer herauf, in dem tiefschwarzen alten Owens College Gebäude an der Universität von Manchester. Im Jahre 1949 war ich ein 25-jähriger Senior Lecturer in angewandter Mathematik, bereits intensiv mit der Theorie kompressibler Strömungen befasst, insbesondere mit der Hochgeschwindigkeitsaero- und Stoßwellendynamik. Irgendwie überzeugte mich Irving, dass Strahlärm eine außergewöhnlich spannende theoretische Herausforderung sei. Wir diskutierten, dass ein Strahl eine der klassischen turbulenten Strömungen ist, der durch eine sehr komplexe Verwirbelung (vorticity) charakterisiert ist, aber nicht durch irgendeine Dilatation. Kompressibilität ist bisher nicht als ein signifikanter Faktor in der Wirbelbewegung oder in Turbulenz betrachtet worden; doch sie musste eine Rolle spielen, wenn von ihr Schall abgestrahlt wird.

Am nächsten Morgen musste ich nach London fahren, das war 1949 eine vierstündige Zugfahrt. Im Zug dachte ich wiederum an den rätselhaften Strahlärm. Es ist tatsächlich wahr, dass das einzige Stück Papier, das ich hatte, die sprichwörtliche „Rückseite eines Umschlages“ war. Wie glücklich empfand ich diese Situation: in dem unpersönlichen Abteil eines Eisenbahnwaggons sitzend, war mir nach dem Aufwachen an jenem Morgen klar bewusst, welches außergewöhnlich erregende theoretische Problem der Fluidmechanik vor mir lag. Ich hatte vier Stunden Zeit, um darüber nachzudenken; der Theoretiker erlag seinem Schwachpunkt: nämlich, es füllten sich Blätter von Papier mit endlosen Gleichungen

Die wesentliche Idee des Ansatzes der akustischen Analogie kam mir, bevor meine Reise zu Ende war. Ich erinnere mich, dass der erste Teil der Reise vollständig der Betrachtung gewidmet war, welches die geeignete *abhängige Variable* in einem Gleichungssystem zur Beschreibung des Strahlärms sein würde. Ich hatte bei vielen Problemen der kompressiblen Strömung gefunden, dass der Schlüssel zum Erhalt handhabbarer Gleichungen die korrekte Wahl der abhängigen Variablen ist. Häufig war der Druck eine optimale Wahl. Jedoch entschied ich mich bald, den Druck hier nicht zu verwenden, weil ich die Kompliziertheit der Beziehung zwischen den Geschwindigkeits- und den Druckschwankungen in einer turbulenten Strömung kannte; und ich spürte, dass Gleichungen, die notwendigerweise diese Kompliziertheit reflektierten, auch schwierig zu handhaben seien.

Schließlich beschloss ich, die Dichte als die abhängige Variable zu verwenden. Meine Argumentation dafür war im wesentlichen, dass die Dichteänderungen in einer turbulenten Strömung als nicht besonders wichtig betrachtet wurden. Wenn andererseits turbulente Strömungen Schallfelder erzeugten und diese abstrahlten, dann würden solche Felder bestimmt wichtige Dichteschwankungen enthalten. Kurz, die Verwendung der Dichte als die abhängige Variable erschien mir für die theoretische Behandlung des Problems richtig, das dem abgestrahlten Schallfeld gewidmet war. Die lokale Dichteänderung wurde natürlich durch die Gleichung der Kontinuität bestimmt. Was aber könnte zur Veränderung des Massenflusses ausgesagt werden?

Bei dieser Frage war die Überlegung von Bedeutung, dass dazu die Impulsgleichung notwendigerweise verwendet werden musste, aber nicht in der Standard-EULER-Form, sondern in der wenig gebräuchlichen Form von REYNOLDS. Er hatte diese Gleichung in die Turbulenztheorie mit dem Ziel eingeführt, eine Zeitmittelung durchzuführen (so wie die Bedeutung der REYNOLDSschen Spannungen darzustellen). Ich war durch Bemerkungen von Th. v. KÁRMÁN auf dem Internationalen Kongress über Angewandte Mechanik in London 1948 beeinflusst worden, zu erkennen, dass die REYNOLDSsche Form der Impulsgleichung auch in einem breiteren Kontext nützlich sein kann.

Hier war genau das, was als die zweite Säule der Ableitungen bei meinem Schreiben auf der Rückseite des Umschlags gebraucht wurde. Viel später erinnerte ich mich, wie glücklich ich damals gewesen bin: ich erkannte, dass der Massenfluss in der Kontinuitätsgleichung identisch mit der Dichte des Impulses in der REYNOLDSsche Form der Impulsgleichung ist. Folglich konnte diese Größe unmittelbar aus beiden Gleichungen eliminiert werden, so dass sich die zweifache Zeitableitung der Dichte gleich der zweifachen Divergenz der Impulsflussdichte ergab.

Es war für mich erregend, die Form der resultierenden Gleichung zu sehen: sie war vor allem linear! Die Dichteschwankungen (die ich eingangs als ein Nebenprodukt der turbulenten Strömung betrachtet hatte) genügte einer klassischen nichthomogenen Wellengleichung, bei der die rechte Seite (der Erzeugungsterm) die doppelte Divergenz des Impulstransportensors war. Dieser quadratische Term würde im Schallfeld selbst vernachlässigt werden können, er war nur im Hauptbereich der turbulenten Strömung von Bedeutung. Ich erkannte deshalb, dass die KIRCHHOFFsche Standardlösung der inhomogenen Wellengleichung als ein Integral über jenen Bereich niedergeschrieben werden konnte und dass sie in ihrer vereinfachten Fernfeldform den abgestrahlten Schall ergab.

Obwohl ich im Rückblick froh bin, dass der ungestörte morgendliche Zeitraum mit der Möglichkeit des konzentrierten Nachdenkens diese Forschungen auslöste und gewiss die „rechte Spur zur rechten Zeit war“, ich bin gleichermaßen froh, dass ich nichts über diesen Gegenstand in den nächsten drei Jahren publizierte. Dieser lange Zeitraum ergab sich zum ausgedehnten sorgfältigen Nachdenken über die Grundlagen der Theorie, zu detaillierten Untersuchungen ihrer Auswirkungen, zur Dimensionsanalyse, zu progressiven Vergleichen mit einem umfangreichen Material von experimentellen Daten und zum Versuch, meine Ideen in den Kontext einer sorgfältigen Untersuchung der Arbeiten der großen früheren Meister der akustischen Theorie, insbesondere STOKES und RAYLEIGH, zu stellen.

In der Zwischenzeit lernte ich, wie verschiedene Aspekte der Darstellung der Theorie durch Ausprobieren verbessert werden konnten, eine lange Folge alternativer Entwürfe der Theorie.

Nach und nach wurde mir deutlich bewusst, welche Merkmale der Theorie wahrscheinlich von dauerhafter Bedeutung sind; und ich formulierte diese in „On Sound Generated Aerodynamically“ (Proc. of the Royal Society A, 1952). Ich muss gestehen, dass ich, wenn ich diese Veröffentlichung drei Jahrzehnte später lese, wünsche, dass ich die gleichen Anstrengungen in den Gestaltungsprozess aller meiner anderen publizierten Arbeiten gesteckt hätte. Die Arbeit wurde in der Hoffnung geschrieben, dass sie als eine gute Einführung zu einem Thema studiert werden könnte, das vorher noch nicht behandelt worden war, und ich glaube, dass dieses Kriterium noch heute zutrifft.

In der langen Zeit seither wurden Triebwerke mit immer größerem Schub für den zivilen Transport entwickelt, die ganz wesentlich durch die Dimensionsanalyse, die aus der „akustischen Analogie“ abgeleitet wurde, beeinflusst worden sind. Das fundamentale Gesetz der 8. Potenz für die Abhängigkeit der Schallenergie von der Strahlgeschwindigkeit, verglichen mit dem bekannten quadratischen Gesetz für die Abhängigkeit des Strahlschubes, war ein Hauptfaktor für die Entwicklungsrichtung, dass die Triebwerkshersteller für zivile Transportzwecke in den 60er Jahren jene Entwicklungstendenz einleiteten, dass der Schub mit Turbofantriebwerken von sehr großem Durchmesser und relativ niedrigen Strahlgeschwindigkeiten erreicht wurde.“