

# Strömungsakustik: Geschichte, Stand, Perspektiven

Peter Költzsch

Technische Universität Dresden

Institut für Akustik und Sprachkommunikation

*Sir James Lighthill hat 1992 auf einem CAA-Workshop (Computational Aeroacoustics) bei der NASA festgestellt, dass mit den großen Möglichkeiten der modernen numerischen Verfahren in der Strömungsmechanik und in der Aeroakustik zuverlässig ein „zweites goldenes Zeitalter“ der Aeroakustik prophezeit werden kann.*

*Der Vortrag enthält einen kurzen historischen Rückblick auf das Entstehen der Strömungsakustik, damit auch auf die „ersten goldenen Jahrzehnte“ dieses Fachgebietes von den fünfziger bis zu den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts. Er schildert die physikalischen Phänomene der Strömungsakustik und gibt einen Überblick über Strömungslärmquellen.*

*Die durch Lighthill begründete Theorie der Strömungsakustik hat in den letzten fünfzig Jahren erhebliche Fortschritte erfahren. Neben der von ihm geschaffenen und durch zahlreiche Weiterentwicklungen ausgebauten aeroakustischen Analogie kennt man heute mehrere aussichtsreiche numerisch basierte Berechnungsverfahren (CAA Computational Aeroacoustics), die u. a. mit Begriffen wie DNS (Direct Numerical Simulation), LES (Large Eddy Simulation), RANSE (REYNOLDS Averaged NAVIER STOKES Equations, auch mit instationären Erweiterungen), LEE (Linearized EULER Equations), BEM und KIRCHHOFF-Verfahren verbunden sind. Der Vortrag bietet eine kurze, physikalisch begründete und strukturelle Übersicht über wichtige Verfahrensabläufe in der Theorie der Aeroakustik und in der CAA.*

*Anschließend werden typische Bearbeitungsgebiete der Aeroakustik, am Beispiel des Fluglärms, vorgestellt. Zum Abschluss wird der Frage nachgegangen, was - mit Bezug auf eine grundsätzliche Lösung des Lärmproblems (Verursacherprinzip) unter der akustischen Auslegung einer (Strömungs-) Maschine zu verstehen ist. Bietet das „zweite goldene Zeitalter“ der Strömungsakustik Chancen dafür, diese große Herausforderung (USA: Grand Challenge Program 1999) aufzugreifen und erfolgreich zu bewältigen?*

## Abschnitt 1.

### Geschichte der Strömungsakustik

Die Akustik, soweit sie die Schallvorgänge in Fluiden (das sind Gase und Flüssigkeiten) behandelt, und die Strömungsmechanik sind Wissenschaftsgebiete, die sich mit bewegten Fluiden befassen. In diesem Sinne ist die „Fluidschall“-Akustik (so benannt im Gegensatz zur „Körperschall“-Akustik) nichts anderes als eine Beschreibung instationärer Strömungsvorgänge (siehe auch [8]).

Beide Phänomene, Schall und Strömung, werden durch dieselben physikalischen Grundgleichungen beschrieben.

Die Wissenschaft der "Fluidschall"-Akustik hat sich im 18. und 19. Jahrhundert aus der Fluidmechanik entwickelt, verbunden mit den Namen von I. NEWTON, L. EULER, J. L. LAGRANGE, P. S. LAPLACE, G. KIRCHHOFF, H. HELMHOLTZ, J. W. STRUTT (Lord RAYLEIGH) u. a.

Nachdem sich dann die Akustik im 19. und 20. Jahrhundert auf vielen Teilgebieten rasant zu einem selbständigen Fachgebiet innerhalb der Physik entwickelt hat, sind seit den vierziger und fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts in der Akustik grundlagenorientierte Probleme erkannt und bearbeitet worden, die einen starken Bezug zur Fluidmechanik erkennen lassen bzw. direkt von strömungsmechanischer Seite aus als Grundlagenprobleme aufgedeckt und behandelt worden sind, das sind Probleme der Aeroakustik, Strömungsakustik, Hydroakustik.

Wenn man heute ein modernes Lehrbuch der Fluidmechanik oder der Akustik aufschlägt, dann sind jeweils umfangreiche Abschnitte zu den gemeinsa-

men 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; E. M. Lifschitz "Hydrodynamik" 1991

W. Greiner; H. Stock "Hydrodynamik" 1991

D. Pierce "Acoustics" 1991

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

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

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

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

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

M. E. Goldstein "Aeroacoustics" 1976

M. J. Lighthill "Waves in Fluids" 1978

G. Munin "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

### Das erste Goldene Zeitalter der Aeroakustik

Wie Lighthill 1992 schreibt (in [13]), begann das erste Goldene Zeitalter der Aeroakustik in den

späten vierziger Jahren des 20. Jahrhunderts. Ausgangspunkt war 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 (siehe auch [22]).

Die Grundlagen zur Lösung des Problems wurden von Lighthill 1952 und 1954 mit seinen beiden berühmten Veröffentlichungen zum Strahlärm [21]

### „On sound generated aerodynamically“

geschaffen, die das Verfahren der sog. akustischen Analogie begründeten.

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 Lösen 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.

Bedeutungsvolle Arbeiten zur Weiterentwicklung der akustischen Analogie sind die folgenden:

1955 CURLE, N.: The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound

1959 RIBNER, H. S.: Aerodynamic sound from fluid dilatations

1960 PHILLIPS, O. M.: On the generation of sound by supersonic turbulent shear layers

1963 FLOWERS WILLIAMS, J. E.: The noise from turbulence convected at high speed

1964 POWELL, A.: Theory of vortex sound

1969 FLOWERS WILLIAMS, J. E.; D. L. HAWKINGS: Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion.

1969 CRIGHTON, D. G. and J. E. FLOWERS WILLIAMS: Sound generation by turbulent two-phase flow

1973 LILLEY, G. M.: On the noise from air jets

1975 HOWE, M. S.: Contributions to the theory of aerodynamic sound, with application to excess jet noise and the theory of the flute

1978 MÖHRING, W.: On vortex sound at low Mach number

1998 DOAK, P. E.: Fluctuating total enthalpy as a generalized acoustic field

### Die 90er Jahre

Mit Beginn der 90er Jahre wurden auf mehreren, für die Aeroakustik relevanten Gebieten erhebliche Verbesserungen und Erkenntnisfortschritte erreicht.

Über die Gründe für diesen Erkenntnissschub können folgende Aspekte aufgeführt werden (siehe auch A. D. PIERCE 1992 in [13]):

- Die Entwicklung in den drei Fachdisziplinen
  - Aeroakustik (physikalische Grundlagen, Theorie, experimentelle Ergebnisse),
  - Numerische Strömungsmechanik 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 nach neuen, interdisziplinären Forschungsanbindungen gesucht hat.
- Das gewaltige Anwachsen der Leistungsfähigkeit der Computer ließ die Schwelle überwinden, ab welcher numerische Simulationen für aeroakustische Vorgänge möglich wurden.
- Die Simulationen turbulenter Strömungen (LES u. a. m.) hatten zu beeindruckenden Erkenntnisfortschritten in der Turbulenz geführt.
- Numerische Verfahren standen in gut entwickelter, z. T. ausgereifter Form in der Numerischen Strömungsmechanik zur Verfügung.
- Schließlich wurden große Fortschritte in der Aufklärung der Instabilitätsmechanismen erreicht, die für die Schallerzeugung durch Strömungen eine bedeutungsvolle Rolle spielen.

Dieser gewaltige Aufschwung, den die Aeroakustik in den 90er Jahren genommen hat, veranlasste 1992 den Begründer des Fachgebietes Aeroakustik, Sir James Lighthill, von der Möglichkeit eines **zweiten Goldenen Zeitalters der Aeroakustik** zu sprechen (in [13], siehe dazu auch [11]).

## Abschnitt 2.

### Phänomene der Strömungsakustik, Strömungslärmquellen

Die Strömungs- oder auch Aeroakustik ist das Grenzgebiet zwischen der Strömungsmechanik und der Akustik (siehe z. B. [5], [12], [15], [20], [26]).

Von Seiten der Strömungsmechanik betrachtet werden strömende Fluide untersucht, in denen Druck-, Dichte- und Geschwindigkeitsschwankungen erzeugt werden oder bereits existieren.

Von Seiten der Akustik (und im Unterschied zu anderen Teilgebieten der Akustik) stellt sich der Gegenstand der Strömungsakustik so dar, dass Strömungen die Akustik „produzieren“ bzw. für die akustischen Erscheinungen von maßgebender Bedeutung sind.

Die Phänomene der Strömungsmechanik, der Strömungsakustik und der „Fluidschall-Akustik“ werden von denselben physikalischen Gleichungen beschrieben, und zwar durch die Erhaltungsgleichungen für die Masse, den Impuls und die Energie

sowie eine spezielle Zustandsgleichung aus der Thermodynamik.

Die physikalischen Erscheinungen, mit denen sich die Strömungsakustik befasst, sind die folgenden:

- Schallerzeugung durch Strömungen
- Erzeugung von Strömungen durch Schall, Schallbeeinflussung von Strömungen
- Wechselwirkungen zwischen Schall und Strömungen (ggf. und Strukturen)
- Schallausbreitung in Strömungen

#### **Schallerzeugung (aerodynamische Quellen)**

(mit starkem Bezug auf Luftfahrzeuge)

- **Strahlärm:** („Die Aeroakustik begann mit dem Strahlärm und wird wahrscheinlich mit dem Strahlärm enden.“ ZORUMSKI in [13])

Unterschallbereich, Überschallbereich:

Strahlmischungsärm, bestehend aus dem Ärm von großen Turbulenzstrukturen und dem Ärm von der feinskaligen Turbulenz, beim Überschallstrahl zusätzlich Kreischöne (screech tone) und breitbandiger Ärm von Stößen

- **Rotorärm:** Propeller, Hubschrauberrotor, Triebwerksfan, Turbomaschinen, Ventilatoren

Ärmquellen von Triebwerken:

Einlaufstörungen, Einlaufgrenzschichten, Stoßwellen am ersten Rotor (Fan), Potentialfeld von Streben, Rotor-Stator-Wechselwirkung, Rotor-nachlauf: Wirbelstrukturen, Turbulenz, Schaufelspitzenwirbel, Verdichtereinlauf, Turbinenaustritt

- **Umströmungsärm:** instationäre Zuströmung, Zuströmungsasymmetrien, Grenzschicht, Hinterkante, Nachlauf, abgelöste Strömungen; bei Flugzeugen: Fahrwerke, Vorflügel, Klappenseitenkante, Flügelspitze, Wechselwirkung: Fahrwerk/Klappe

- **Innenraum-Strömungsärm,** Ärm durch sog. „innere“ Strömungsprobleme

Rohrleitungen, Einbauten: Ventile, Armaturen, Blenden, Gitter, Kühler u. a. Kanalelemente; Durchströmte Schalldämpfer

- **Thermoakustische Phänomene:**

Verbrennungsinstabilitäten, Brennkammerärm, am Turbinenaustritt, an der Schubdüse, Nachbrenner, Thermoakustische Phänomene

Zur Kategorie „Schallausbreitung in Strömungen“ gehören folgende Problemfelder:

- Schallausbreitung in Wellenleitern, wie z. B. Triebwerkskanäle, Kanalakustik insgesamt, Modenstruktur, akustische Auskleidungen, inhomogene Medien, Strömungs- und Temperatureinfluss (insbesondere Gradienten) u. a. m.
- Schallausbreitung in der Atmosphäre, z. B. reale physikalische Bedingungen, nichtlineare Effekte, inhomogene Medien, Temperatur- und Windeinfluss, Turbulenz u. a. m.

- Fluid – Struktur – Wechselwirkung, mit Schall und Strömung

### **Abschnitt 3.**

#### **Theorie der Strömungsakustik (Schallerzeugung)**

Das allgemeine Charakteristikum für die Modellierung der strömungsmechanischen Schallerzeugung ist,

- dass im direkten Strömungsbereich die vollständigen Strömungsgleichungen gelten
- dass aber genügend weit entfernt vom instationären Strömungsgebiet die Schwankungsgrößen so weit abgefallen sind, dass sie durch linearisierte Strömungsgleichungen beschrieben werden können. Das ist dann der reine Schallfeldbereich, für den die normale Wellengleichung gilt.

Gegenwärtig sind folgende Verfahren der exakten wissenschaftlichen Behandlung für den physikalischen Vorgang der Schallerzeugung durch Strömungen bekannt (dabei werden hier empirische und halbempirische Methoden grundsätzlich ausgeschlossen) (siehe z. B. [13], [7]):

- **Verfahren der direkten Berechnung des strömungsverursachten Schallfeldes**

Das Problem wird durch numerische Simulation der instationären, kompressiblen Strömungsgleichungen im Quellbereich (Strömung) und gleichzeitig im akustischen Fernfeld gelöst. Das ist bisher weitestgehend eine Vision.

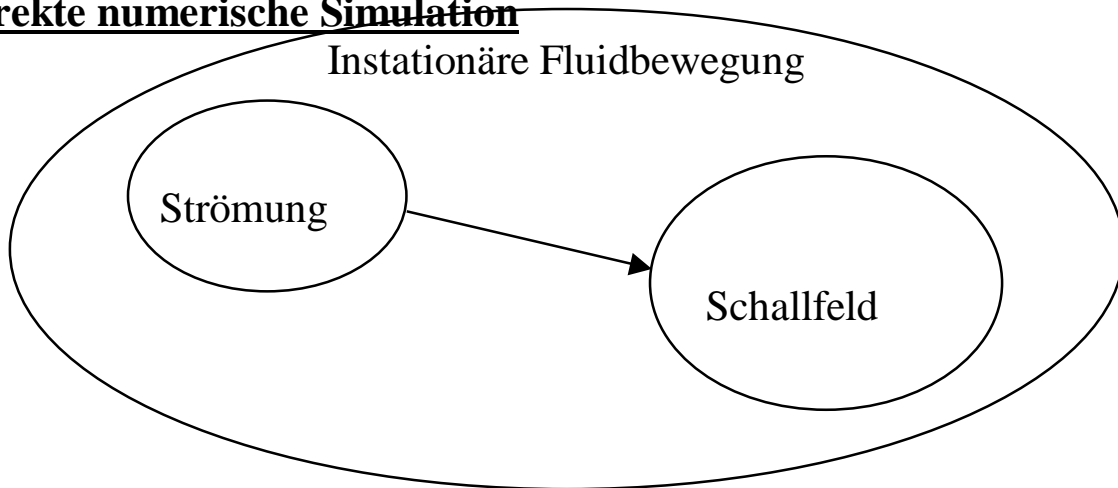
Deshalb werden gegenwärtig vor allem **Hybridverfahren** praktiziert. Bei diesen werden zur Berechnung des Schallfeldes Kombinationen und Adaptationen mehrerer physikalisch-analytischer Modelle der Strömung und des Schallfeldes einbezogen. Einige dieser Hybridverfahren werden im folgenden aufgeführt:

- **Berechnung des Fernfeldschalls mit einer aeroakustischen Analogie**

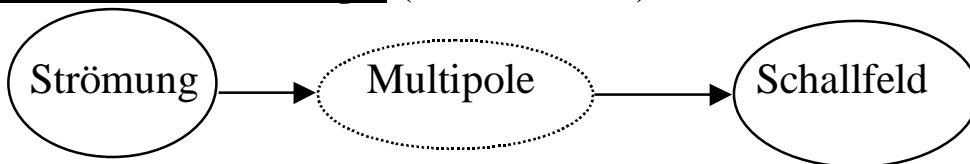
Ausgangspunkt dafür ist eine inhomogene Wellengleichung, z. B. für die Dichteschwankungen. Der Quellterm der Wellengleichung enthält alle Glieder, die für die Schallerzeugung relevant sind.

Die bekannteste Darstellung des Quellterms ist die Quadrupolformulierung nach Lighthill, der das gesamte Strömungsfeld durch Multipole in einem ruhenden akustischen Fluid ersetzt und über ein Kirchhoff-Integral den Fernfeldschalldruck berechnet.

## Direkte numerische Simulation



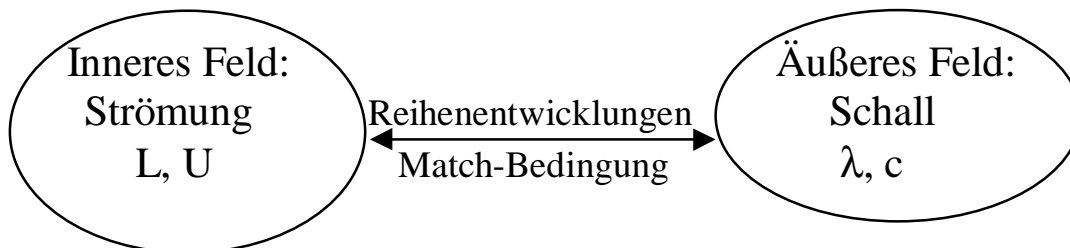
## Aeroakustische Analogie (Lighthill)



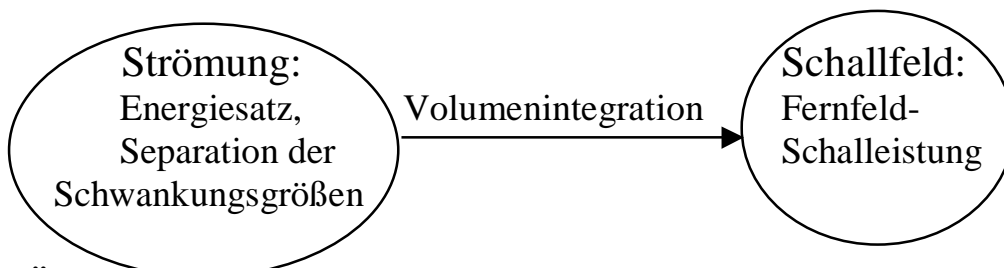
## Adaptive EULER-Gleichungen, Kirchhoff-Integralmethode



## Matching-Verfahren, z. B. MAE



## Energiekonzept



## Übersicht:

Methoden zur Modellierung und Berechnung des physikalischen Vorganges der Schallerzeugung durch Strömungen  
(Grundlage für die Computational Aeroacoustics)

- **Adaptive EULER-Gleichungen**

Es wird zunächst die mittlere turbulente Strömung mit Hilfe zeitgemittelter Strömungsgleichungen berechnet. Dann wird das schallproduzierende aerodynamische Schwankungsfeld durch eine geeignete Modellierung „wiedergewonnen“. Damit werden die kompressiblen, linearisierten EULER-Gleichungen für Schwankungsgrößen mit einem Quellterm gelöst, und zwar im sog. „EULER-Volumen“, das ist der Bereich bis ins ferne Nahfeld.

Gelingt es mit dieser Methode, die Verteilung des Druckes auf einer Hüllfläche, die das aerodynamische Quellgebiet umschließt, zu bestimmen, so kann der Schalldruck im Fernfeld durch die Integration über diese Fläche berechnet werden (KIRCHHOFF-Verfahren).

- **Matching-Verfahren,**

**z. B. „Matched Asymptotic Expansion“ (MAE)**

Für die Beschreibung der Strömungsvorgänge, die zur Erzeugung des Schalls führen, werden die Strömungsgleichungen verwendet, für die Schallausbreitungsvorgänge dagegen die homogene Wellengleichung. Das Fernfeld der Strömung wird mit dem Schallnahfeld asymptotisch in Übereinstimmung gebracht (Match-Bedingung).

- **Energiekonzept der Strömungsakustik**

Das Verfahren versucht, mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes für Schwankungsgrößen in einer Strömung die akustische Energiedichte und die Schallintensität von den anderen Strömungsgrößen zu separieren. Zeitmittelung und Volumenintegration liefern die Fernfeldschalleistung in Abhängigkeit von der Turbulenz und den Wechselwirkungen zwischen der Turbulenz und der Scherströmung.

**Berechnung des Fernfeldes mit einer akustischen Analogie**

Die Grundzüge dieses Verfahrens sind 1952 in der Publikation „**On sound generated aerodynamically**“ von M. J. Lighthill dargestellt worden.

**Drei Zitate:**

„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 [13])

„Die Arbeit von Lighthill 1952 ist unzweifelhaft eine der bestbeschriebenen wissenschaftlichen Arbeiten überhaupt.“  
(nach FARASSAT/BRENTNER 1998 [10])

„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 [23])

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. Mit der thermodynamischen Zustandsgleichung ergibt sich eine inhomogene Wellengleichung für die 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

$$q = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad \text{mit: } T_{ij} = \rho v_i v_j + p_{ij} - c_0^2 \rho \delta_{ij}$$

(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.

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 POWELL (1964) und HOWE (1975) mit der klassischen Dipolformulierung und
- die akustische Analogie nach RIBNER (1959) mit einem klassischen Monopol als äquivalenter akustischer Quelle.

Die inhomogene Wellengleichung von Lighthill 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 durch Monopol-, Dipol- und Quadrupolquellen verursacht, dargestellt in der ersten, zweiten bzw. dritten Zeile der rechten Seite dieser Gleichung.

Physikalisch interpretiert stehen in der o. g. Integralbeziehung fünf grundlegende Mechanismen der Schallerzeugung:

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

Obwohl die Lighthill-Gleichung für beliebige Strömungen tatsächlich eine exakte Beziehung ist, werden in ihrem „Quellterm“ auf der rechten Seite der Gleichung Quelleffekte und Ausbreitungseffekte vermischt.

Deshalb sind Wellengleichungen mit einem Wellenoperator in konvektiver Form entwickelt worden.

Von DOAK wurde 1998 geschrieben [9], 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.

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

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

(Indizes:  $s$  Strahl,  $D$  Düsenaustrittsquerschnitt)

Aus dem Verhältnis der abgestrahlten Schallleistung zur mechanischen Strömungsleistung des Strahls (kinetischer Energiefluss) folgt der Umsetzungsgrad  $\eta_{ak}$

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

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

Die vom Freistrahls insgesamt ins Fernfeld abgestrahlte Schalleistung ist also nur ein Bruchteil des mechanischen Energieflusses der Strömung.

Für die numerische Vorausberechnung des aerodynamischen Lärms des Freistrahls ist erkennbar, dass bei einer Strömung mit  $Ma = 0,1$  eine Genauigkeit von mindestens  $10^{-9}$  benötigt wird. Wird diese nicht erreicht, so äußern sich die Ungenauigkeiten der numerischen Berechnung als „numerischer Lärm“ (CRIGHTON in [13], [7] u. a.).

### Zur Theorie der Strömungsakustik: Rotorlärm

Auch zur Vorausberechnung des aerodynamischen Lärms von Rotoren ist das Verfahren der akustischen Analogie zu einem effektiven und leistungsfähigen Werkzeug entwickelt worden. Die für dieses Problem angepasste Analogiedarstellung ist die von FLOWCS WILLIAMS und HAWKINGS geschaffene Verallgemeinerung der Lighthill-Gleichung.

Diese Gleichung bezieht das akustische Fernfeld auf die Quellbeiträge der Blattbelastung (Dipol-Kraftterm), der Blattdicke (Monopolterm) und der Volumen-Quadrupol-Quellen. Als Eingangsgrößen sind die Blattgeometrie, die kinematischen Größen, das Strömungsfeld und die zeitabhängigen Blattoberflächenbelastungen erforderlich.

Eine zweite Berechnungsmöglichkeit für den Rotorlärm ist das Verfahren mit der Kirchhoff-Oberfläche.

Dabei gibt es die Varianten,

- dass der gesamte Rotor in der „Rechenbox“ steckt und diese durch eine stationäre Kirchhoff-Fläche eingehüllt wird,
- dass zweitens nur das Schaufelblatt mit anliegendem Strömungsbereich in der „Rechenbox“ liegt und diese durch eine bewegte (rotierende) Kirchhoff-Fläche eingeschlossen wird,
- und dass drittens eine noch engere Kirchhoff-Oberfläche um das Schaufelblatt gelegt wird, die bereits im nichtlinearen Strömungsbereich liegt, so dass dann eine Nahfeldkorrektur zur Kompensation der scheinbaren Schallquellen des durchströmten Bereiches der Kirchhoff-Oberfläche erfolgen muss.

Mit diesen schrittweisen Verengungen der Kirchhoff-Oberfläche können das Rechenvolumen (Quellbereich) und der Rechenaufwand entscheidend verringert werden.

Vergleiche zwischen der FW-H-Gleichung und der KIRCHHOFF-Formulierung für bewegte Oberflächen (nach BRENTNER/FARASSAT 1998 [4] und PRIEUR/RAHIER 1998 [27]) haben gezeigt, dass beide Verfahren unter bestimmten Voraussetzungen ineinander übergeführt werden können.

Abschließend in diesem Abschnitt zur Theorie der Strömungsakustik nunmehr die kurze Erwähnung der **Vorausberechnung des Turbomaschinenlärms**, siehe z. B. auch [14], [6]:

Dabei gibt es zwei Hauptprobleme:

- Vorausberechnung der **tonalen Komponenten**, erzeugt durch die Wechselwirkung rotierender und feststehender umströmter Schaufeln
- Vorausberechnungsverfahren für den **Breitbandlärm**

Zum Beispiel wird eine hybride aerodynamisch-aeroakustische Methode vorgeschlagen, um die tonalen Komponenten vorauszuberechnen:

- Berechnung des 3d-Strömungsfeldes
- Zerlegung des rotierenden Druckfeldes in akustische Moden in einer Bezugsebene stromauf vom Rotor, Berücksichtigung der Umfangs- und Radialmoden
- Berechnung der Schallausbreitung im Kanal und der Schallabstrahlung vom Eintrittsquerschnitt

#### Abschnitt 4.

##### Numerische Aeroakustik (CAA)

Zunächst eine Vorbemerkung zur Numerischen Fluidmechanik (Computational Fluid Dynamics CFD) (nach: „Partielle Differentialgleichungen, Numerik und Anwendungen“ 1996, Herausgeber W. E. Nagel, FZ Jülich, Band 18/1996)

„Als die Geburtsstunde der Numerischen Fluidmechanik wird der Vortrag von John von NEUMANN im Juni 1945 zum Thema „High-Speed Computing Devices and Mathematical Analysis“ betrachtet, in welchem er erstmalig von der numerischen Hydrodynamik als einem Schwerpunktgebiet zukünftiger Forschung sprach, auszuführen auf elektronischen Digitalrechnern.“

John v. Neumann rechnete die damals für Strömungsexperimente gebrauchten Windkanäle zu den Analogrechnern. Das Ziel J. v. Neumanns war der digitale, der numerische Windkanal.

[Nachbemerkung: Der numerische Windkanal ist auch heute noch eine Vision. Er bedeutet faktisch die vollständige, für alle praktischen Strömungsprobleme anwendbare Lösung der NAVIER-STOKES-Gleichungen in allgemeiner Form, auch bei Strömungen mit hoher REYNOLDS-Zahl.]

##### Definition der Numerischen Aeroakustik CAA:

Die CAA ist die direkte Simulation des strömungs-

erzeugten Schallfeldes und der Wechselwirkung von Schallfeldern mit Strömungen (nach: PIERCE 1992 in [13]).

Der Ausdruck „direkte Simulation“ umfasst dabei sowohl die Behandlung des gemeinsamen instationären Feldes (Strömung und Schall) sowie die Ankopplung beider Felder über eine geeignete Schnittstelle. Auf der Grundlage physikalischer Prinzipien werden Methodik, Lösungen und Ergebnisse erarbeitet, ohne Einbeziehen empirischer Resultate oder heuristischer Vermutungen.

##### Was sind die Probleme und die Schwierigkeiten der numerischen Aeroakustik?

(u. a.: CRIGHTON/HARDIN 1992, z. B. in [13]):

Das Hauptproblem besteht darin, dass alle numerischen Verfahren – im akustischen Sinne – laut sind. Die Diskretisierungen in Form von Maschen oder finiten Elementen, spektrale Grenzen, Beschränkungen auf eine Box, die Erzwingung von Periodizität, alle diese Verfahrensbedingungen werden auf eine Fluidströmung angewandt und entsprechen deshalb gewissen akustischen Quellmechanismen. Diese können in ihrer Quellstärke - bei sehr genauen numerischen Verfahren – sehr schwach sein, aber trotzdem sind sie akustisch sehr effizient.

**In bestimmten Fällen kann sogar die numerische Methode in der Tat „lauter“ sein als die Strömung selbst!**

##### Probleme und Hauptschwierigkeiten der CAA

(CRIGHTON in [13], COLONIUS [5] u. a.)

###### • Erhaltung der Multipolstruktur:

Die numerische Berechnung muss die Multipolstruktur der akustischen Quellen erhalten. Dies betrifft sowohl die Volumenquellen (Turbulenz, Wirbel) als auch die Quellen auf den begrenzenden Oberflächen der Strömung.

Die zeitliche und örtliche Diskretisierung muss die Auflösung der kleinsten retardierten Zeitdifferenzen ermöglichen, die zur Berechnung der exakten Quellstärke von entscheidender Bedeutung sind.

###### • Disparität der Längenskalen (Wirbelgröße/Schallwellenlänge):

Es gibt große Disparitäten der Längenskalen zwischen dem Wirbelmaßstab  $l$  und der Wellenlänge  $\lambda \sim c_0 / (u/l) \sim lMa^{-1}$  des durch die Wirbel erzeugten Schalls. ( $u$  ist die Geschwindigkeit der Wirbel,  $l/u$  ihre Lebenszeit).

###### • Disparität der Energien (Strömung, Schall):

Es gibt erhebliche Disparitäten der Energiedichte zwischen dem hydrodynamischen Nahfeld und dem akustischen Fernfeld. Auch wenn der sphärische Abnahmeeffekt herausgerechnet wird, sind die Energien im Fernfeld um die Größenordnung  $O(Ma^5)$  geringer als die Energien direkt in der Strömung.

- **Bedeutung des Spektralbereiches hoher Frequenzen:**

Für den Strahlärm liegt der Bereich maximaler Schallenergie bei tiefen Frequenzen. Angepasst an die menschliche Wahrnehmung wichtet jedoch die Fluglärm-Bewertung (EPNdB) besonders stark die Schallanteile und besonders die tonalen Komponenten im Frequenzbereich zwischen 1 bis 4 kHz. Deshalb sind neben den tieffrequenten, energiereichen Turbulenzballen auch die kleinsten Turbulenzskalen im höherfrequenten Bereich von großer Bedeutung, auch wenn deren Energiepegel mehr als 10 dB niedriger als die maximalen Spektrumsanteile liegen können. Der zu berücksichtigende Frequenzbereich liegt damit wesentlich höher und ist wesentlich breiter als derjenige, der bei den typischen instationären aerodynamischen Berechnungen betrachtet wird. Das hat Auswirkungen hinsichtlich der Forderungen an die numerischen Algorithmen und an die Gitter.

- **Verminderung der numerisch bedingten Dämpfung und Dispersion der Schwingungen:**

Die numerisch verursachte Dämpfung sowie die Dispersion bei hochfrequenten Schwingungen müssen reduziert werden.

- **Realisierung von reflexionsfreien Randbedingungen:**

Das wird u. a. durch asymptotische Randbedingungen und absorbierende Randschichten erreicht.

- **Schwierigkeiten bei nichtlinearen Wellenphänomenen:**

Bei Strahlströmungen mit hoher Geschwindigkeit können nichtlineare Phänomene auftreten. Dann muss der Rechenbereich sehr weit ausgedehnt werden, um den Schall im akustischen Fernfeld genau berechnen zu können.

- **Strömungen mit hoher Re-Zahl und hoher Ma-Zahl:**

Die meisten Anwendungen der numerischen Aeroakustik in der Luftfahrt schließen sowohl hohe Re als auch hohe Ma-Zahlen ein. Dies bedingt erhebliche Schwierigkeiten, z. B. durch Konvektionseffekte, nichtlineare Quellmechanismen, hohe Disparität der Skalen von Schallwellenlänge und Wirbelgröße.

- **Große Ausbreitungsentfernungen:**

Für die Schallausbreitung ins Fernfeld interessieren auch große Entfernungen vom schallproduzierenden Strömungsgebiet, d. h. das weite Fernfeld des Strömungsfeldes. Dieses gemeinsam mit dem eigentlichen Strömungsbereich im Rahmen einer DNS zu erfassen, ist naturgemäß eine Illusion. Deshalb sind die hybriden Verfahren mit der klaren Trennung zwischen dem Strömungs- und dem Strahlungsbereich für aeroakustische Berechnungen sehr viel zweckmäßiger.

Einige grundsätzliche Berechnungsschemata sind die folgenden (z. B. [13], [1], [5]), siehe die Übersicht im Anhang zum Vortrag:

- DNS: vom Strömungsfeld bis ins akustische Fernfeld, gegenwärtig Illusion
- LES (mit Turbulenzmodell, mit Quellfilter)
  - ➔ CAA-Code (LEE)
- RANSE (mit Turbulenzmodell) + SNGR
  - ➔ CAA-Code (LEE)
- LES bzw. RANSE/SNGR
  - ➔ AA (LIGHTHILL, FW-H-E, unterschiedliche Quelltermformen)
- Fernfeldberechnung: LIGHTHILL-Integral, FW-H-E, EULER-Volumen (LEE) bis nahes Fernfeld, mit BEM bzw. KIRCHHOFF-Oberflächenintegral ins Fernfeld

**SNGR-Verfahren (Stochastic Noise Generation and Radiation):** (LONGATTE / LAFON / CANDEL / BAILLY u. a., z. B. [2], [3], [19], [25], auch in [1])

Das stochastische Näherungsverfahren (SNGR) gehört zu den hybriden Verfahren:

- Zunächst wird das mittlere Strömungsfeld mit den REYNOLDSgemittelten NAVIER-STOKES-Gleichungen berechnet, verbunden mit einem Turbulenzmodell ( $k - \varepsilon$ -Modell).
  - Infolge dieser Mittelung ist das akustische Quellfeld mit „geglättet“ worden. Deshalb wird nunmehr ein räumlich-zeitlich abhängiges turbulentes Strömungsfeld stochastisch synthetisiert, und zwar als eine Summe von statistisch verteilten FOURIER-Moden. Dabei werden die statistischen Gesetze und die charakteristischen Eigenschaften der Turbulenz aus der KOLMOGOROV-Theorie abgeleitet. Damit folgen die lokalen turbulenten Schwankungsgrößen und die damit verbundenen Schallquellen (Quellstärken).
- Dieser Teil ist das Kernstück der stochastischen Modellierungstechnik.
- Mit Hilfe des synthetisierten Turbulenzfeldes als akustischer Quellterm wird dann das abgestrahlte Schallfeld numerisch durch Lösung der EULER-Gleichungen berechnet, und zwar bis ins nahe Fernfeld.

## Abschnitt 5.

### Bearbeitungsgebiete (allgemein),

### Maßnahmen Fluglärm

#### Bearbeitungsgebiete:

- Physikalische Effekte
- Theorie, Berechnungen (numerisch, analytisch)
- Messungen, Messverfahren
- Definition von Benchmark-Problemen; Testung: analytische und numerische Verfahren, rechnerische und experimentelle Ergebnisse



- Verifizierung, Validierung, Verbesserung der Berechnungsverfahren, Optimierung
- Lärminderung: primäre, sekundäre, passive, aktive Maßnahmen; Auslegung, Berechnung, Entwicklung, Erprobung technisch realisierbarer Lärminderungsmaßnahmen

**Bearbeitungsgebiete im Hinblick auf den Fluglärm** (als ein besonders bedeutungsvolles Kapitel der Strömungsakustik)

Strömungslärmquellen am Flugzeug:

- Strahlärm
- Rotorlärm: Propeller, Hubschrauberrotor, Triebwerksfan, Turbomaschinen
- Umströmungslärm

Zur Wichtung der Lärmquellen

beim Start vorrangig:

- Strahlärm: breitbandig, Maximum: tief- und mittelfrequenter Bereich
- Fanlärm: tonal und breitbandig

bei der Landung vorrangig:

- Umströmungslärm (airframe noise)  
Klappenseitenkantenlärm, Tragflächen-  
Vorflügelärm, Fahrwerkslärm u. a.

**Maßnahmen, Aktivitäten**

In den letzten Jahren sind zahlreiche Ergebnisse in der aeroakustischen Lärminderungsforschung erreicht worden (siehe u. a. [24]).

Aus der Literatur sind im folgenden einige Untersuchungen und Ergebnisse zusammengestellt.

**Technische Lärminderungsmaßnahmen**

Schubdüse, Strahlaustritt

Mischungsvorgang und Lärmerzeugung im Strahl sind stark von der Strahlaustrittsgeschwindigkeit abhängig. Deshalb sieht die Lärmierungsstrategie für den Düsenstrahl der Flugtriebwerke eine weitere Absenkung der Düsenaustrittsgeschwindigkeiten vor, außerdem die optimale Auslegung der Bypass- und Kernströmung zur Verbesserung des Mischungsvorganges zwischen beiden Strömungen und mit der Atmosphäre. Das führte zur Optimierung des Mischungsejektors der Schubdüse: Minimaler Schubverlust, Verminderung der Schalleistung.

Einfluss des Bypass-Verhältnisses auf die Schallabstrahlung

Das Bypass-Verhältnis (Nebenstromverhältnis) ist das Verhältnis des äußeren Massendurchsatzes zum inneren Massendurchsatz bei einem Flugzeugtriebwerk.

Schalleistung: proportional zu  $U^8 S$

Strahlschub: proportional zu  $U^2 S$

das heißt: bei konstantem Strahlschub verändert

sich die abgestrahlte Schalleistung mit der 6. Potenz der Strahlgeschwindigkeit!

Es ist also eine Lärmierungsmaßnahme von überragender Bedeutung, den Strahlschub mit größerer Strahlquerschnittsfläche bei verminderter Strahlgeschwindigkeit zu erreichen.

Speziell geformtes Einlaufgehäuse für das Triebwerk

Ein Triebwerk mit einem asymmetrischen Einlaufgehäuse hat eine ungleichförmige Richtcharakteristik der Schallabstrahlung: zur Lärmierungs nach unten wird eine stärkere Reflexion der Abstrahlung nach oben realisiert.

Zur akustischen Auskleidung der Triebwerkskanäle  
Bearbeitungsgebiete:

- Auslegung und Messung der akustischen Charakteristiken der Gehäuseauskleidung bei hohen Unterschallgeschwindigkeiten, Verwendung instationärer Codes der numerischen Strömungsmechanik, Berücksichtigung der Grenzschichten und der Perforationsströmung bei der Vorausberechnung der Absorptionseigenschaften

- Konzepte für die adaptive Einstellung der akustischen Eigenschaften der Auskleidung von Triebwerkskanälen im Flug, maximale Lärmierungs an unterschiedlichen Betriebspunkten, Konstruktionen für hohe Breitbandleistungsfähigkeit von passiven Auskleidungen

Zur Schallquellenortung und zum Lärm des Klappenseitenkantenwirbels

Weitere Fortschritte der Multimikrofonmethode

(Mikrofonarray) zur Schallquellenlokalisierung:

Diese Methode kann nunmehr den Lärm der zahlreichen Schallquellen am Flugzeug gut identifizieren:

z. B. Klappenseitenkantenwirbel, Flügelspitzenwirbel, Schallerzeugung durch Tragflächenvorflügel, Fahrwerks-Umströmungslärm

Zur aktiven Lärmierungsstechnologie an Flugzeugtriebwerken

Erste Versuche zur aktiven Beeinflussung der Druckmoden des Triebwerksfan wurden im Modell wurden durchgeführt.

Zielstellungen für die Lärmierungs

- Verringerung der Geräuschemission von Flugzeugen in den letzten 40 Jahren um etwa 25 dB, in den letzten 10 Jahren geschätzt etwa 6 dB
- Ziel: Pegelminderung von zukünftigen Flugzeugen um etwa 10 dB innerhalb von 10 Jahren und um 20 dB innerhalb von 25 Jahren, jeweils gegenüber Flugzeugen, die 1997 in Betrieb genommen worden sind.
- Zukünftige Anstrengungen werden gleichartige Lärmierungs für die Teilquellen Strahlärm, Fanlärm und Umströmungslärm erfordern.

Zur Verminderung der Lärmbelastung sind nicht nur durch die (erst langfristig wirkenden) technischen Maßnahmen am Flugzeug und an den Triebwerken erforderlich, sondern insbesondere auch kurz- und mittelfristig zu realisierende Maßnahmen mit folgender Zielrichtung:

- Operationelle Maßnahmen:  
z. B. lärmarme An- und Abflugverfahren
- Verkehrspolitische Lärminderungskonzepte:  
lärmabhängige Landeentgelte, Nachtflugbeschränkungen bzw. Nachtflugverbote, Bewegungskontingierungen, Flugfrequenzbegrenzungen, Flugzeugbezogene Lärmpegelbegrenzungen, Flugzeuggrößenbeeinflussungen, Flughafenkooperationen, Administrative Verkehrsverlagerungen u. a. m.

## Abschnitt 6.

### Die große Herausforderung:

#### Akustische Auslegung einer Strömungsmaschine

Es steht das Ziel, Methoden und Verfahren zu entwickeln, die es gestatten, eine Maschine akustisch auszulegen. Das bedeutet, dass bereits im Entwurfs- und Konstruktionsprozess die akustischen Eigenschaften der Maschine beeinflusst werden können. Das Lärmproblem wird vollständig in den Prozess der Auslegung und Konstruktion einer Maschine integriert. Dabei wird also die Maschine anhand der Schallübertragungskette von den instationären Quellgrößen über die Anregung, Übertragung, Abstrahlung, Ausbreitung und Bewertung durchgängig akustisch behandelt [18].

**Vision: Akustische Auslegung einer Strömungsmaschine** (siehe das Schema im Anhang zum Vortrag):

Für das Beispiel der Strömungsmaschine bedeutet diese akustische Auslegung im Detail, dass das Berechnungsverfahren folgende Phänomene physikalisch-mathematisch modelliert (z. B. [16], [17]):

- das zeitveränderliche Strömungsfeld (Geschwindigkeit, Druck, Wirbelstärke u. a.) als Schallquelle,
- die physikalischen Mechanismen der Schallerzeugung (Schwankungen der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, Turbulenz, Wanddruckschwankungen, Wechselkräfte, Schwankungen der Wirbelstärke, Schwankungen des Impulsstromes, Schwankungen der Normal- und Schubspannungen u. a.),
- die Schallabstrahlung/-ausbreitung von den Quellgebieten, in der Strömung und in der Maschine,
- die Schallabstrahlung/-ausbreitung ins akustische Fernfeld (von offenen Flächen, vom Gehäuse, von Rohrleitungen und Kanälen).

Dass die akustische Auslegung von Maschinen einen Schwerpunkt akustischer Forschung auch in Deutschland darstellen sollte, wurde uns noch einmal deutlich bewusst durch eine Initiative in den USA:

Zeitgleich mit Aktivitäten in Deutschland wurde im Rahmen der Tagung SD 2000 in Los Alamos in den USA ein „Grand Challenge“ Programm „Minimization of noise emission for engineering structures“ vorgestellt mit der Feststellung

“The ability to minimize the noise produced by engineering structures **at the earliest possible design state** is a major requirement throughout the aerospace, civil, mechanical and marines engineering communities.” (Challenge Statement. Structural dynamics 2000, National Lab, Los Alamos April 1999).]

## Abschnitt 7.

### Kommt das „zweite goldene Zeitalter“ der Strömungsakustik?

(Prognose M. J. LIGHTHILLS 1992)

Sir James LIGHTHILL hat in der Abschlussdiskussion des Workshops zur „Computational Aeroacoustics“, im April 1992, Hampton, VA, USA folgendes gesagt (in [13]):

*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 vorauszusagen, 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.

Wenn wir die gegenwärtigen Entwicklungen auf dem Gebiet der Strömungsakustik beobachten, mitgestalten bzw. mit eigenen neuen Aktivitäten bereichern, dann kann festgestellt werden, dass die Lighthill'sche Prophezeiung eines zweiten goldenen Zeitalters der Strömungsakustik nicht unbeeinträchtigt ist.

#### **Literatur:**

[1] Aeroacoustic Workshop zum Projekt SWING (Simulation of Wing Noise Generation) TU Dresden, Vortragsband 1999

[2] Bailly, Ch. and D. Juvé: Aeroacoustic simulations and stochastic approach using linearized Euler's equations. Joint Meeting ASA/EAA Berlin 1999

[3] Bailly, Ch. and D. Juvé: A stochastic approach to compute subsonic noise using linearized Euler's equations. AIAA-Paper 99-1872, 1999

[4] Brentner, K. S. and F. Farassat: Analytical comparison of the acoustic analogy and Kirchhoff formulation for moving surfaces. AIAA Journal 36 (1998) 8, pp. 1379-1386

[5] Colonius, T.: Lectures on computational aeroacoustics. California Institute of Technology, Internet 1999

[6] Crighton, D. G.: Asymptotic methods for turbomachinery noise prediction. CEAS/AIAA-95-002 München 1995

[7] Crighton, D. G.: Computation of wave generation in acoustics and structural acoustics. International Workshop Manchester 1995

[8] Crighton, D. G.: Acoustics as a branch of fluid mechanics. Journal of Fluid Mechanics 106 (1981) pp. 261-291

[9] Doak, P. E.: Fluctuating total enthalpy as the basic generalized acoustic field. Theoret. Comput. Fluid Dynamics (1998) 10, pp. 115-133

[10] Farassat, F. and K. S. Brentner: The acoustic analogy and the prediction of the noise of rotating blades. Theoret. Comput. Fluid Dynamics (1998) 10, pp. 155-170

[11] Glegg, S. A. L.: Recent advances in aeroacoustics: the influence of computational fluid dynamics. 6<sup>th</sup> ICSV Copenhagen 1999

[12] Goldstein, M. E.: Aeroacoustics. New York: McGraw-Hill Book Company Inc. 1976

[13] Hardin, J. C. and M. Y. Hussaini (Eds.): Computational aeroacoustics. New York etc.: Springer-Verlag 1993

[14] Hsu, C.-H.; P. L. Spence and F. Farassat: Ducted fan noise prediction based on a hybrid aerodynamic-aeroacoustic technique. CEAS/AIAA-95-075 München 1995

[15] Költzsch, P.: Strömungsmechanisch erzeugter Lärm. Dissertation B (Habilitationsschrift) TU Dresden 1974

[16] Költzsch, P.: Strömungsakustik von Maschinen – Entwicklungen und Probleme. Plenarvortrag DAGA 1994 Dresden, Vortragsband „Fortschritte der Akustik“ S. 65-82

[17] Költzsch, P.: Akustische und strömungsakustische Forschungen – Ein Beitrag zur Verminderung der Schallemission technischer Aggregate. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Berichte und Abhandlungen, Band 2, S. 37 – 88. Berlin: Akademie Verlag 1996

[18] Költzsch, P.: Einige Bemerkungen zur akustischen Auslegung von Maschinen. VDI-Berichte 1491, Düsseldorf: VDI-Verlag 1999, S. 83-98

[19] Lafon, Ph.: Use of linearized Euler equations for subsonic flow noise prediction. Joint Meeting ASA/EAA Berlin 1999

[20] Lauchle, G. C.: Fundamentals of flow-induced noise. Penn State University 1996

[21] Lighthill, M. J.: On sound generated aerodynamically. Proc. Roy. Soc., London (A) Part I: 211 (1952) 564-587; Part II: 222 (1954) 1-31

[22] Lighthill, M. J.: Early development of an „acoustic analogy“ approach to aeroacoustic theory. AIAA Journal 20 (1982) 4, pp. 449-450

[23] Lilley, G. M.: On the refraction of aerodynamic noise. 6<sup>th</sup> ICSV Copenhagen 1999, pp. 3581-3588

[24] Lips, W.: Strömungsakustik in Theorie und Praxis. Renningen-Malmsheim: Expert Verlag 1997

[25] Longatte, E.; Ph. Lafon and S. Candel: Computation of noise generation by turbulence in internal flows. AIAA Paper 98-2332

[26] Morris, Ph. J.: Aircraft noise: theory and practice. Penn State University 1997

[27] Prieur, J. and G. Rahier: Comparison of Ffowcs Williams – Hawkings and Kirchhoff rotor noise calculations. AIAA Paper 98-2376, 1998