

# Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Gaseigenschaften auf aerodynamisch erzeugte Schalleistungen von umlaufenden Kreiszyklindern ergänzt durch eine Übersicht zum Stand der Vorausbestimmung aerodynamischer Geräuschemission bewegter Maschinenbauelemente (Rotoren, Lüfter, ...)

Jan Hupfeld

ITSM, 70569 Stuttgart, Deutschland, Email: hupfeld@itsm.uni-stuttgart.de

## Einleitung

Der Beitrag ist eine Fortsetzung der Untersuchungen von V. Wittstock [1] über die experimentelle Ermittlung einer Berechnungsformel für die von umlaufenden Zylinderstäben erzeugte Schalleistung, wobei hier nun aber über die Schallgenerierung in geänderten Gasen, für Helium und Helium/Luftgemische, berichtet wird.

Im zunächst folgenden Kapitel wird hierzu aber außerdem die Entwicklung derartiger Berechnungsformeln für in Luft bewegten, realen Maschinen-/Gerätebauelemente rückblickend aufgezeigt.

## Rückblick auf die Entwicklung der Emissions-Vorausbestimmung aerodynamischer Schallquellen des Maschinenbaus

Ansätze zur quantitativen Beschreibung der Schall-Emission von Lüftern, Rotoren, frei ausblasend oder eingebaut sowie von einzelnen in Luft bewegten Konstruktionselementen können mindest bis in die 30er Jahre des vergangenen Jahrhunderts zurückverfolgt werden. Wichtige bis 1960 hierzu publizierte Arbeiten können dem Schrifttum der Veröffentlichung [2] und [3] entnommen werden. Die im folgenden angesprochenen Publikationen nach 1960 basieren vorwiegend auf experimentellen Untersuchungen, die auch teilweise an theoretischen Ansätzen reflektiert wurden. Bei dieser Auswahl steht die ingenieurmäßige Anwendbarkeit im Vordergrund. Den heutigen Regelungen und Erkenntnissen entsprechend werden nur Arbeiten herangezogen, deren Messungen sich zu Schalleistungen verarbeiten lassen.

Die am Ende der 50er Jahre für den Einsatz als **Eigenlüfter** von Bahnmotoren an Radialrädern durchgeführten Untersuchungen, bei denen diese Räder sowohl frei ausblasend als auch ummantelt sowie bei verschiedenen Drosselungen im Freifeld an einzelnen Messpunkten in 1m Abstand spektral und als Gesamtschalldruckpegel gemessen wurden [3] führten zu einem Ansatz

$$\bar{I}^* = \gamma_0 \cdot S_M \cdot \left( \frac{U}{U_0} \right)^\beta \quad (1)$$

wobei  $\bar{I}^*$  die über die Messpositionen im 1m-Abstand gemittelte, angenäherte Schallintensität  $I^* = \frac{1}{\rho c} \bar{p}^2$ ,  $\rho c$  die

Schallkennimpedanz,  $\bar{p}^2$  das Effektivwertquadrat des Schalldruckes,  $U$  die Umfangsgeschwindigkeit,  $S_M$  der Mantelflächeninhalt des Radialrades und  $\gamma_0$  die für eine Bezugs-

geschwindigkeit  $U_0$  verstandene  $S_M$ -spezifische Intensität ist. Es zeigt sich ferner, dass die mantelflächenspezifische Intensität zweckmäßigerweise aufgesplittet wird in einen Rotationsanteil  $\gamma_{01}$ , der für  $\gamma_0$  bei vollständiger Drosselung wirksam ist, und einen Fördermengen proportionalen Zuschlag  $\gamma_{02}$ :  $\gamma_0 = \gamma_{01} \cdot \gamma_{02}$  (2)

Mit einem  $U_0 = c_0 = 340 \text{ms}^{-1}$  erhielt man als Näherungen der Gesamtwerte für die Radialräder  $\gamma_{01} = 1 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$  und für  $10 \lg(\gamma_{01})$  einen mit wachsender Fördermenge stetig zunehmenden Wert bis 6,5 dB. Der Exponent  $\beta$  stieg mit wachsender Oktavmittenfrequenz von  $\beta = 3,8$  bis 7,3.

Die Schallerzeugung einer mit Umfangsgeschwindigkeiten bis  $250 \text{ms}^{-1}$  rotierenden **zylindrischen Scheibe** ließ sich ebenfalls durch eine Beziehung (1) beschreiben [3] mit  $\beta = 5,2 \dots 5,5$  und  $\gamma_0 = 5 \cdot 10^{-1} \text{ Wm}^2$ . In nachfolgenden Publikationen liesen sich die Ergebnisse nach Gl. (1) von Radialrädern, Scheiben, Rotoren, umlaufenden Profilen in Angaben über die Schalleistung  $P$  durch Hinzunahme des zugehörigen Messflächeninhalts  $S$  überführen:

$$P = \gamma_0 \cdot S_M \cdot \left( \frac{U}{U_0} \right)^\beta \cdot S \quad \text{und mit} \quad \gamma_0 \cdot S = P_0$$

$$L_W = 10 \lg P_0 + 10 \lg \left( \frac{U}{U_0} \right)^\beta + 10 \lg \frac{S_M}{1 \text{m}^2} dS \quad (3)$$

Die auf Einladung der ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) in New York vorgetragenen Ergebnissen [3] lassen sich zusammen mit der dazu dort abgedruckten Diskussion als Zusammenfassung des diesbezüglichen damaligen Erkenntnisstandes werten. Gln. (1) und (3) geben **Hinweise auf Lärm-minderungsmöglichkeiten** durch **geändertes Design**. So bringt eine Halbierung der Parameter z.B für  $D$ : 20 dB,  $L$ : 3 dB,  $n$ : 17 dB; Änderungen der „Rauigkeit“  $P_0$  bis zu 30 dB.

## Schalleistung von in Helium und Helium-Luft-Gemischen umlaufenden Zylinderstäben

Diese Untersuchungen wurden für die gleichen Anordnungen von zwischen zwei Deckscheiben nach Länge, Dicke und Anzahl variierten Stäben des gleichen Umfangsgeschwindigkeitsbereich wie bei [1] durchgeführt. Auch das Hallraummessverfahren. (ISO3744, DIN45635, Teil 1) wurde übernommen, nun allerdings mit einer Füllung der Messkammer mit Helium sowie für verschiedene

Mischungen von reiner Luft bis zu reinem Helium. Bei Verwendung von Helium ändert sich unter anderen die Schallgeschwindigkeit und damit die einer Frequenz zugeordneten Wellenlänge auf das Dreifache, so dass neben den geänderten Strömungsverhältnissen insbesondere das neue Verhältnis von Objekt-Abmessungen zu Wellenlänge ein deutlich unterschiedliches Abstrahlverhalten bei gleicher Frequenz erwarten lässt. Ferner erweitert sich durch das geänderte Gas auch der früher untersuchte Wertebereich der maßgebenden Ähnlichkeitskennziffern wie Helmholtz-, Reynolds-, Strouhalzahl (Tabelle 1).

**Tabelle 1:** direkter Vergleich der Fluideigenschaften von Helium und Luft

	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$\kappa$ -	$c$ m/s	$\mu$ 10 <sup>-3</sup> Pa s	$\rho c$ kg/(m <sup>2</sup> s)
Luft	1,2	1,4	346	1,83	404
Helium	0,16	1,66	1016	1,98	164
Helium/ Luft	0,14	1,2	2,94	1,08	2,46

Für die Messungen stand der aus [1] bekannte, von G. A. Sehrndt konstruierte Mini-Hallraum, mit einem Volumen von 3,3 m<sup>3</sup> und einer mittleren Kantenlänge  $L_m$  von 1,5 m, zur Verfügung. Der durch Helium hin zu kleinen Helmholtzzahlen, größeren Wellenlängen  $\lambda$ , erweiterte Untersuchungsbereich unterschritt dabei aber die in ISO 3741 für die Hallraumabmessung  $L_m$  zulässige untere Grenzfrequenz, bestimmt durch  $L_m/\lambda > 3$ . Der verwendete Hallraum mit  $L_m=1,5$  m musste deshalb, wie bei DAGA05 berichtet [4], bis  $L_m/\lambda=0,25$ , also bis in den Druckkammerbereich zur Schallleistungsbestimmung kalibriert werden.

Ausgehend von der theoretischen Schallleistungsbeschreibung  $P$  des Hiebtonbereiches

$$P = \frac{1}{12\pi} \frac{\rho}{c^3} C_L^2 \cdot \frac{U^4 D^2 L^2}{4} \varpi^2 \quad (3)$$

mit  $\rho$  = Dichte des Mediums;  $c$  = Schallgeschwindigkeit;  $C_L$  = Auftriebskoeffizient;  $U$  = Anströmgeschwindigkeit;  $\varpi$  = Kreisfrequenz;  $D$  = Zylinderdurchmesser,  $L$  = Zylinderlänge und den variierten Versuchsparametern wurde zur Ermittlung eines einheitlichen Leistungsdichtespektrums,  $B$  = Frequenzbandbreite,  $Z$  = Zylinderzahl, der Ansatz

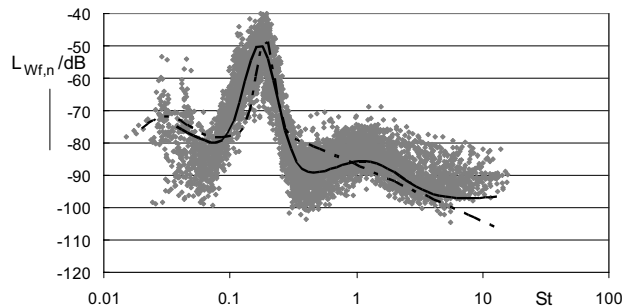
$$L_{Wf,n} = L_{Wf,1/3} - 10 \lg \left( \frac{B}{1\text{Hz}} \right) - 10 \lg(Z) - 10ex_v \lg \left( \frac{U}{U_0} \right) + 10ex_\rho \lg \left( \frac{c}{c_0} \right) + 10ex_D \lg \left( \frac{D}{D_0} \right) + 10ex_L \lg \left( \frac{L}{L_0} \right) \text{ [dB]} \quad (4)$$

gewählt. Die Beträge der Exponenten  $ex_v$ ;  $ex_c$ ;  $ex_D$ ;  $ex_L$  ergeben sich als Steigung einer Geraden in logarithmischer Skalierung nach

$$L_{Wf} / \text{dB} = 10ex_G \lg(G) + C_1 \quad (5)$$

Die Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Gleichung (5) ist, dass jeweils nur eine Einflussgröße – als  $G$  bezeichnet – geändert wird.

Im resultierenden Leistungsdichtespektrum in Abbildung 1 ist neben der aus der Punktwolke resultierenden numerischen Näherung (durchgezogene Linie) auch die von V. Wittstock in [1] ermittelte dargestellt (gestrichelte Linie).



**Abbildung 1:** Normierte spektrale Leistungsdichte nach Gl. (4) mit zugehöriger Näherung (durchgezogene Linie) und Näherung nach [1] (gestrichelte Linie)

Abweichungen im Verlauf sind nur außerhalb des Bereichs von  $St=0,2$  festzustellen.

### Zusammenfassung

Die emittierte Schallleistung umlaufender Kreiszyylinder ist zusammen mit den Ergebnissen [1] nun auch für verschiedene Gase und Gaskonzentrationen mit bekannten Streuungen quantifiziert. Zur Schallleistungsberechnung bewegter Konstruktionselemente des Maschinenbaus liegen Näherungsformeln vor, die durch experimentelle und theoretische Untersuchungen weiter zu Verfeinern sind.

Der DFG wird für die Förderung der Untersuchungen **gedankt**.

### Literatur

- [1] (1) Wittstock, V.: Zur Schallleistung quer angeströmter Kreiszyylinder in einem weiten Bereich von Ähnlichkeitskennzahlen, DAGA, Stuttgart, 2007 (2) Wittstock, V.: Experimentelle Bestimmung der Schallleistung quer angeströmter Kreiszyylinder in einem weiten Bereich von Ähnlichkeitskennzahlen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2002
- [2] Zeller, W.; Lübcke, E.: Lüftungstechnik 11, 1937
- [3] (1) Hübner, G.: Geräuschbildung an Radiallüftern. Siemens-Z, Bd. 33 S.499-505, 1959 (2) Hübner, G.: Noise of centrifugal fans and rotating cylinders. ASHARE, Semi-annual Meeting, February 11-14, 1963, New York (3) Hübner, G.: Noise of centrifugal fans and rotating cylinders. ASHARE JOURNAL November 1963, p. 87-94 (4) Hübner, G.: Geräuschbildung an rotierenden Zylindern und Radiallüftern. Aus Proceedings of the 3rd International Congress on Acoustics, Stuttgart 1959, Verlag Elsevier, Amsterdam 1961, Vol. II, S. 1171-1174 (5) Hübner, G.: Aerodynamische Geräusche umlaufender Maschinenteile, VDI-Berichte Bd. 48 (1961) S. 113-117
- [4] Hupfeld, J; Hübner, G.: Zur Messung der Schallleistung in einem „Hallraum“ unterhalb der unteren Grenzfrequenz, DAGA, München, 2005