

Zur Messung der Schalleistung in einem Hallraum unterhalb der unteren Grenzfrequenz

Gerhard Hübner¹, Jan Hupfeld²

¹ ITSM der Universität Stuttgart, 70569 Stuttgart, Deutschland

² ITSM der Universität Stuttgart, 70569 Stuttgart, Deutschland, Email: hupfeld@itsm.uni-stuttgart.de

Einleitung

Die Schalleistung von in Luft bewegten Kreiszyllindern wurde in unserem Institut im Rahmen einer 2002 abgeschlossenen Dissertation [1] eingehend in Abhängigkeit zahlreicher Parameter untersucht. Die Untersuchungen werden nun nach Austausch der Luft gegen Helium fortgeführt. Der Gasaustausch führt unter anderem zu einer Erhöhung der Schallgeschwindigkeit und damit auch zu einer Vergrößerung der zu einer bestimmten Frequenz zugeordneten Wellenlänge auf das Dreifache, wodurch das Verhältnis der unverändert gelassenen Objektabmessungen zur Wellenlänge, wie beabsichtigt, ein deutlich geändertes Abstrahlverhalten bei gleicher Frequenz erwarten lässt.

Zur Messung der Schalleistung wie auch zum Gasaustausch bietet sich wie in [1] der „Mini-Hallraum“ des ITSM mit einer mittleren Kantenlänge von $L_m = \sqrt[3]{V} = 1,49$ m an, dessen untere Grenzfrequenz, nach ISO 3741 [2] durch $L_m/\lambda = 3$ bestimmt, in Luft bei 685 Hz und in Helium bei 2056 Hz liegt. Die Beschneidung des Messbereichs auf Frequenzen > 2 kHz, $\lambda < 0,17$ m, schließt damit nun aber für Helium genau den Wellenlängenbereich aus, der - gegenüber den Untersuchungen in Luft - erweitert werden sollte, so dass die Möglichkeit einer Schalleistungsbestimmung für $L_m/\lambda < 3$ mindestens bis zu einem Verhältnis $L_m/\lambda = 1$ untersucht werden musste. Dies kann statt in Helium aber auch der Einfachheit halber in Luft für Frequenzen < 685 Hz erfolgen.

Die damit gestellte Aufgabe ist aber auch für Hallfeldmessungen in Hallräumen üblicher Abmessungen von z.B. $V=250$ m³ von Interesse, falls bei gleichem Kriterium $L_m/\lambda \geq 3$ Schalleistungen unter 162 Hz ermittelt werden sollen.

Grundlegende Gleichungen

In ihrem Anwendungsbereich bestimmt ISO 3741 [2] den Schalleistungspegel $L_{W,Hall}$ einer Schallquelle nach dem Hallfeldverfahren durch

$$L_{W,Hall} = L_{pm} + 10 \lg \frac{A}{1m^2} - 6dB + K_w + K_v + K_0 \quad (1)$$

Dabei ist L_{pm} der Pegel des räumlich gemittelten Effektivwert-Schalldruckquadrats, A die äquivalente Absorptionsfläche des Hallraumes, und

$$K_w = 10 \lg \left(1 + \frac{Sc}{8Vf_m} \right) \quad (2)$$

die sogenannte Waterhouse-Korrektur und

$$K_v = 4,34 \frac{A}{S} \quad \text{die Vorländer-Korrektur} \quad (3)$$

$$\text{sowie } K_0 = -10 \lg \left(\frac{p_{st}}{p_{st,0}} \right) + 15 \log \left(\frac{273 + \Theta}{273 + \Theta_0} \right) \quad (4)$$

die meteorologische Korrektur mit V und S dem Volumen und der Oberfläche des Hallraumes, c die Schallgeschwindigkeit und f_m die Mittenfrequenz des jeweiligen Frequenzbandes, p_{st} und Θ , der statische Druck und die Temperatur unter Messbedingungen, $p_{st,0}$ und Θ_0 die zugehörigen Bezugswerte.

Wir betrachten außerdem die Beziehung, nach der der Schalldruckpegel $L_{p,DK}$ in einer Druckkammer des Volumens V_{DK} durch eine Kolbenmembran der Oberfläche S_K erzeugt wird:

$$L_{p,DK} = 20 \lg \left\{ \kappa \cdot p_{stat} \cdot \frac{S_K}{V_{DK}} \cdot \frac{\tilde{v}_k}{2\pi f_m} \cdot \frac{1}{p_0} \right\} \quad (5)$$

wobei ferner κ das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten 1,4 für Luft, p_{stat} der statische Luftdruck, sowie \tilde{v}_k die über die Kolbenmembranfläche gemittelte flächennormale Schnelle als Effektivwert ist.

Schließlich benutzen wir eine Kolbenmembran als Vergleichsschallquelle, deren Schalleistung nach ISO 9614, Teil 1 [3] nach dem Hüllflächen-Freifeld-Verfahren über einer reflektierenden Ebene ermittelt wurde und als Referenz dient:

$$L_{W,FF} = L_{I_n,m} + 10 \lg \frac{S}{1m^2} + K_0 \quad (6)$$

mit $L_{I_n,m}$ dem Pegel der über die Hüllfläche S gemittelten flächennormalen Schallintensität.

Experimentelle Untersuchungen

Für die mit Oktavrauschen angeregte Kolbenmembran mit einem Membrandurchmesser von 0,12 m und einem Schnellepegel in Terzbändern von 80 Hz bis 2 kHz zwischen 130 bis 90 dB re $5 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$ wurde zunächst unter Freifeldbedingungen die Schalleistung gemäß Gl.(6) gemessen und im Minihallraum im gleichen Frequenzbereich und zwar bei unveränderter Verwendung der Hallraumbeziehung (1) ermittelt. Durch die gegebene Messraumgeometrie mit $S/V = 3,9$ und dem kleinen hallraumspezifischen A ist die Vorländer-Korrektur vernachlässigbar. Die Waterhouse-

korrektur K_W dagegen erreicht mit zunehmender Wellenlänge numerisch relevante Werte von z.B. bei 80 Hz 5,3 dB. Ob diese Korrektur bei Gegebenheiten $L_m/\lambda < 3$ überhaupt sinnvoll ist, wird offen gelassen. Bild 1 zeigt die als Korrektur Δ_R ermittelte Differenz

$$\Delta_R = L_{W,Hall} - L_{W,FF} \quad (7)$$

die als Kalibrierung des Minihallraumes für den Bereich der gefragten tiefen Frequenzen gewertet werden kann. Für den Bereich $L_m/\lambda > 1$, entsprechend $f > 228$ Hz, liegt Δ_R bei ungünstigster Auswertung ohne Verwendung der Waterhouse-Korrektur zwischen -9 bis etwa 0 dB, und mit Verwendung dieser Korrektur zwischen -7 und 1 dB.

Damit wäre die Aufgabe für die späteren messtechnischen Untersuchungen der aerodynamischen Geräuscherzeugung grundsätzlich gelöst, indem die Δ_R -Werte den zu verwendenden Messraum bezüglich ISO 3741 kalibrieren.

Einige Messergebnisse sollen darüber hinaus im „Unter-Hallfeld-Bereich“ noch etwas eingehender diskutiert werden.

Auffällig sind in Bild 1 die größeren Abweichungen der Hallraummessungen in den Terzbereichen 200/250 Hz sowie 100/125 Hz, abgesehen von der unseren Interessenbereich nicht betreffenden Terz mit 80 Hz. Betrachtet man hierzu die nach ISO 3741 zu bestimmende Standardabweichung der an N Messpunkten erhaltenen Schalldruckpegelwerte $L_{p,i}$:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (L_{p,i} - \bar{L}_p)^2} \quad \text{in dB} \quad (8)$$

so besteht nach Bild 2 offensichtlich eine Korrelation zwischen großen s-Beträgen und den auffällig großen Δ_R -Werten unter Bedingungen, bei denen die mittlere Raumkantenlänge und Wellenlänge $L_m/\lambda=1$ und 0,5 beträgt, also für stehende Wellen. Dabei stellt sich ferner die Frage, ob eine Standardabweichung nach Gl.(8) für eine solche **systematische** Feldverteilung, wie hier außerhalb des Hallfeldbereichs, überhaupt sinnvoll ist. Dies ist zu verneinen. Für eine exakt ausgebildet stehende Welle besteht keine Korrelation zwischen s und der notwendigen Zahl N von Mikrofonpositionen, die zur Erreichung eines hinreichend guten Mittelwerts erforderlich ist. Der Mittelwert von 0,5 für $\cos^2(x)$ z.B. lässt sich für jedes äquidistant gewähltes $N \geq 3$ exakt bestimmen, unabhängig von s-Werten, die hierfür zwischen 0 dB und 30 dB, theoretisch bis ∞ dB schwanken. Eine zugehörige Grafik wurde beim mündlichen Vortrag gezeigt.

Eine etwas bessere Korrelation im betrachteten Übergangsbereich lässt dagegen der mit ISO 9614 eingeführte und auf Schalldruckquadratmessungen angewandte Indikator

$$F_{4,p} = \frac{1}{\bar{p}^2} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (\tilde{p}_i^2 - \bar{p}^2)^2} \quad (9)$$

erwarten, der mit den physikalischen Größen \tilde{p}_i^2 und nicht mit deren Pegelwerten arbeitet.

Interessant ist ferner ein Vergleich des nach der Druckkammergesetzmäßigkeit berechneten Schalldruckpegels entsprechend Gl.(5) mit dem im Hallraum gemessenen mittleren L_{pm} -Werten. Wie Bild 3 zeigt, nähern sich die Schalldruckpegel-Werte mit abnehmender Frequenz gut aneinander an, sofern $f \leq 67$ Hz, also $L_m/\lambda \leq 1/4$ ist, womit die für Pistonfone allgemeine angegebene diesbezügliche Relation bestätigt ist. Schließlich wäre zu prüfen, ob das Schallintensitätshüllflächenverfahren im problematischen Frequenzbereich des Hallraumes anwendbar ist.

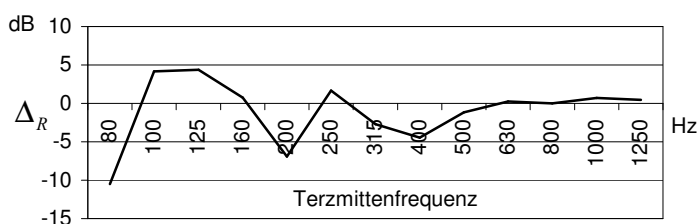


Abbildung 1: Differenz des Schalleistungspegels aus Freifeldmessung mit Hallraummessung nach ISO3741

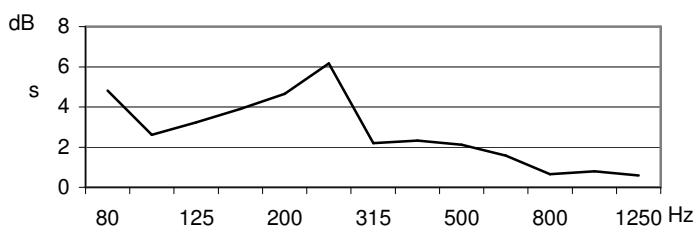


Abbildung 2: Standardabweichung nach ISO3741, Gl.(8)

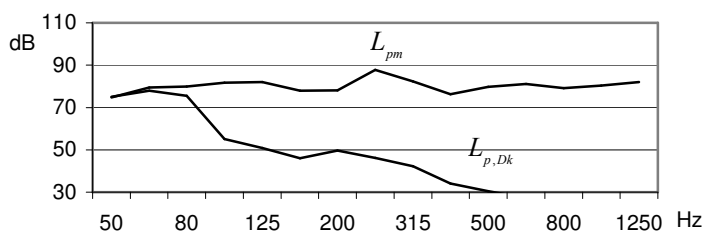


Abbildung 3: Im Hallraum gemessener mittlerer Schalldruckpegel L_{pm} im Vergleich zum berechneten Schalldruckpegel $L_{p,Dk}$ nach Druckkammergesetzmäßigkeit

Literatur

- [1] V. Wittstock: Experimentelle Bestimmung der Schalleistung quer angeströmter Kreiszyylinder in einem weiten Bereich von Ähnlichkeitskennzahlen; Dissertation, Uni Stuttgart (2002)
- [2] ISO 3741, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for reverberation test rooms, 1999
- [3] ISO 9614, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity, 1993