

## 1 Einleitung

Die von Schallquellen emittierte Luftschalleistung hängt auch von den meteorologischen Umgebungsbedingungen am Aufstellungsort, dem aktuell vorliegenden statischen Luftdruck  $B$ , der Temperatur  $\Theta$  und in geringem Maße von der relativen Luftfeuchte  $H$  ab. Für akustische Planungen sowie für den Vergleich von unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen gemessenen Schalleistungen benötigt man deshalb die Kenntnis der physikalischen Gesetzmäßigkeiten dieser Einflüsse und, für den Geräuschemissionsvergleich hierauf basierend, die Definition einer auf einen festgelegten meteorologischen Normalzustand bezogenen normalisierten Schalleistung

Das damit angeschnittene Problem ist seit längerem bekannt. Es gibt bereits mehrere Veröffentlichungen [1], [2], [3] und zugehörige Lösungsvorschläge fanden auch schon Eingang bei der Diskussion anlässlich der laufenden Revision der Standards ISO 3741, ISO 3745, ISO 9614-3 (Schalleistungsbestimmung nach Präzisionsklasse 1).

Wie aber insbesondere bereits in [3] herausgestellt, bestehen für unterschiedliche Schallerzeugungsmechanismen, so insbesondere für aerodynamische Schallquellen und Schall, der von schwingenden Festkörpern in die Luft abgestrahlt wird, verschiedene Abhängigkeiten des meteorologischen Einflusses auf die Schalleistungsgenerierung. Dies führt dann aber bei technischen Schallquellen, deren Schallemission sich aus aerodynamischen Geräuschen und abgestrahltem Körperschall zu verschiedenen Anteilen zusammensetzt, zu praktischen Problemen, die ISO durch Verwendung einer diesbezüglichen „mittleren Gesetzmäßigkeit“ lösen möchte. Danach wird z.Z. vorgeschlagen, für die unter unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen erhaltenen Schalleistungen  $P_1$  und  $P_2$  für sämtliche Arten der Schallerzeugung eine einheitliche Umrechnung nach der folgenden Beziehung zu verwenden:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left[ \frac{(\rho c)_1}{(\rho c)_2} \right]^{1,5} \quad (1)$$

wonach also dem Verhältnis dieser Schalleistungen  $P_1$  und  $P_2$  eine bestimmte Potenz des Verhältnisses der zugehörigen Schallkennimpedanzen zugeordnet ist.

Hiervon abgeleitet [3] hätte man damit den unter Bedingungen ( $B$ ,  $\Theta$ ,  $H$ ) vorhandenen Schalleistungspegel  $L_{W,act}$  in den zugehörigen normalisierten Schalleistungspegel  $L_{W,N}$  mit Hilfe einer Korrektur  $K_{0,ISO}$  zu überführen

$$L_{W,N} = L_{W,act} + K_{0,ISO} \quad (2)$$

$$K_{0,ISO} = -15 \lg \left[ \frac{(\rho c)_{act}}{(\rho c)_N} \right] \text{ dB} \quad (3)$$

Dabei ist die den meteorologischen Bezugsbedingungen zugeordnete Schallkennimpedanz  $(\rho c)_N$  derzeit mit

$$(\rho c)_N = 411,5 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^3} \quad (4)$$

in der Diskussion, was einer meteorologischen Normsituation mit  $B_N=101,325 \text{ kPa}$ ,  $\Theta_N=23^\circ\text{C}$  sowie einer relativen Luftfeuchte im Bereich von 0% bis 100% entspricht.<sup>1</sup>

Gegenstand der hier vorgelegten Arbeit ist die Ermittlung der zahlenmäßigen Unterschiede, die sich bei Verwendung der mittleren Beziehung (1) sowie der daraus folgenden Gleichung (2) mit (4) ergeben,

unter Bedingungen, bei denen tatsächlich rein aerodynamische oder allein körperschallabstrahlende Geräuschmechanismen vorliegen. Selbstverständlich sind diesen Abschätzungen praxisnahe Bereiche von statischem Luftdruck  $B$  und Temperatur  $\Theta$  zugrunde zu legen.

## 2 Untersuchungen für körperschallabstrahlende Schallquellen

Ausgehend von der hierfür bekannten Beziehung

$$P = \rho c \left\langle v_n^2 \right\rangle S \sigma \quad (5)$$

nach der die von einem schwingenden Festkörper abgestrahlte Schalleistung  $P$  durch die Schallkennimpedanz der Luft  $\rho c$ , örtlich und zeitlich gemittelte flächennormales Oberflächenschnellequadrat  $v_n^2$ , Strahleroberflächeninhalt  $S$  und Schallabstrahlgrad  $\sigma$  ausgedrückt ist, erscheint der meteorologische Einfluss auf den ersten Blick durch eine Abhängigkeit mit

$$P \sim (\rho c)^1 \quad (6)$$

beschrieben. Neben der anzunehmenden Konstanz von  $v_n^2$  setzt Gl. (6) aber voraus, dass der Abstrahlgrad  $\sigma$  nicht durch Änderung der Meteorologie beeinflusst wird, was für einen typischen Verlauf (Bild 1) für höhere Frequenzen, bei denen die Luftschallwellenlänge  $\lambda$  kleiner als die Abmessung  $L_0$  des Strahlers ( $\lambda < L_0$ ) ist, (Bereich I) angenommen werden darf. Diesem Bereich ist dann eine Korrektur

$$K_{01}/\text{dB} = -10 \lg \frac{(\rho c)_{act}}{(\rho c)_N} \quad (7)$$

zuzuordnen.

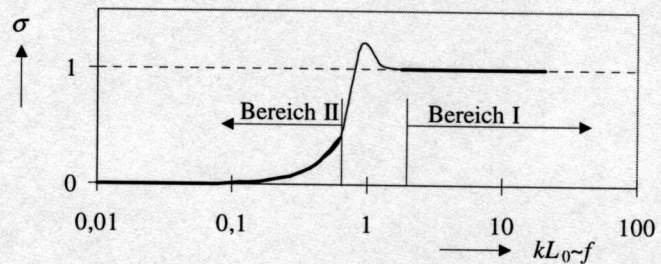


Bild 1 Prinzipverlauf des Abstrahlgrades

Im Bereich II hingegen ist das Abstrahlverhalten durch eine Monopolcharakteristik zu beschreiben, die bekanntlich durch eine Gesetzmäßigkeit

$$P \sim \left( \frac{\rho}{c} \right)^1 \quad (8)$$

gekennzeichnet ist [4], entsprechend einem

$$K_{02}/\text{dB} = -10 \lg \left[ \frac{\rho}{c} \left( \frac{c}{\rho} \right)_N \right] = -10 \lg \frac{\rho}{\rho_N} + 10 \lg \frac{c}{c_N} \quad (9)$$

Verwendet man für

$$\rho = \frac{B}{R_L T}, \quad c = \sqrt{\kappa R_L T}, \quad \rho c = B \sqrt{\frac{\kappa}{R_L T}} \quad (10)$$

wobei neben den bereits erklärten Größen  $R_L$  die Luft beschreibende Gaskonstante mit  $R_L=287,1 \text{ kJ/kg/K}$  und  $T$  die absolute Temperatur  $T/\text{K}=273,1+\Theta/^\circ\text{C}$  und  $\kappa=1,402$ , so lässt sich die Differenz der den physikalischen Mechanismen entsprechenden Korrekturdifferenzen  $\Delta K_{01/2} = K_{01/2} - K_{0,ISO}$  gegenüber der derzeitigen ISO-Korrektur bestimmen:

<sup>1</sup> In einem früheren Diskussionsstand war der Bezugswert zunächst  $(\rho c)_N = 400 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^3}$  gewählt worden (s. hierzu auch [3]), dem aber bei

$B=101,325 \text{ kPa}$  die für praktische Bedingungen ungewöhnlich hohe Temperatur von  $40,3^\circ\text{C}$  entsprochen hätte.

Für Bereich I:

$$\begin{aligned} \Delta K_{01}/\text{dB} &= -10 \lg \frac{(\rho c)}{(\rho c)_N} + 15 \lg \frac{(\rho c)}{(\rho c)_N} \\ &= 5 \lg \frac{(\rho c)}{(\rho c)_N} = 5 \lg \left( \frac{B}{B_N} \right) - 2,5 \lg \left( \frac{T}{T_N} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Für Bereich II:

$$\begin{aligned} \Delta K_{02}/\text{dB} &= -10 \lg \frac{\rho}{\rho_N} + 10 \lg \frac{c}{c_N} + 15 \lg \frac{(\rho c)}{(\rho c)_N} \\ &= 5 \lg \left( \frac{B}{B_N} \right) + 7,5 \lg \left( \frac{T}{T_N} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

mit  $B_N=101,3$  kPa;  $T_N=(273,15+23)$  K.

Die Auswertung der Korrekturdifferenzen nach Gl. (11) und (12) ergibt für einen praktischen Temperaturbereich  $-20^\circ\text{C}$  bis  $+30^\circ\text{C}$  bei festem statischen Druck  $B=B_N$  eine Spanne von 0,2 dB für  $\Delta K_{01}$  und 0,6 dB für  $\Delta K_{02}$ .

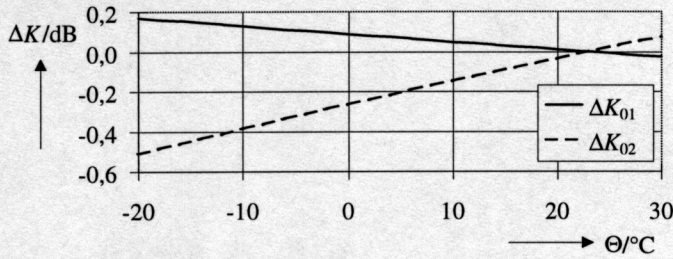


Bild 2 Korrekturdifferenzen  $\Delta K_{01}$  und  $\Delta K_{02}$ ,  $B=B_N$

Die bei fester Temperatur von  $23^\circ\text{C}$  dagegen durch Änderung des statischen Drucks  $B=80$  bis  $101,325$  kPa, entsprechend einer Änderung der geographischen Höhe von 0 auf 2000 m, zu erwartenden Unterschiede sind mit  $-0,5$  bis  $0$  dB ebenfalls vergleichsweise klein und für  $\Delta K_{01}$  und  $\Delta K_{02}$  gleich (Bild 4).

Für ISO-Präzisionsverfahren, die in Laborräumen auszuführen sind, kann ein wesentlich reduzierter Druck- und Temperaturbereich vorgegeben werden, z.B.  $\Theta=10$  bis  $25^\circ\text{C}$  und  $B=101$  bis  $80$  kPa, dem dann nur noch eine Korrekturdifferenzspanne für  $\Delta K_{01}$  und  $\Delta K_{02}$  von  $0,06$  dB bzw.  $0,17$  dB entspricht.

### 3 Untersuchungen über aerodynamische Schallquellen

Betrachtet man hier zunächst Schall, der durch in Luft bewegte Festkörperelemente wie Lüfterschaufeln, Rotoren, ..., erzeugt wird, wobei die im Maschinenbau hierbei üblichen charakteristischen Geschwindigkeiten meist unter  $Ma=0,5$  liegen, so kann man von einer Schallabstrahlung mit Dipolcharakteristik ausgehen, der bei gegebener Strömungsgeschwindigkeit eine Abhängigkeit der Schallleistung  $P$  von der Dichte  $\rho$  und Schallgeschwindigkeit  $c$  entsprechend:

$$P \sim \frac{\rho}{c^3} \quad (13)$$

zuzuordnen ist. Erste Schallleistungsmessungen, die an solchen Rotationskörpern in einem größeren Bereich statischer Drücke durchgeführt wurden [5] und bei denen allerdings zum gegenwärtigen Stand noch nicht der Temperatureinfluss und damit noch nicht der  $c$ -Einfluss gestestet werden konnte, bestätigen Gl. (13) bezüglich der  $\rho$ -Abhängigkeit, da eine  $\rho$ -Potenz 1,5 auch noch von der Messdatenstreuung mit umfasst wurde. Mit dem Ansatz nach Gl. (13) erhält man die zugeordnete meteorologische Korrektur mit

$$K_{03}/\text{dB} = -10 \lg \left( \frac{\rho}{\rho_N} \right) + 30 \lg \left( \frac{c}{c_N} \right) \quad (14)$$

und schließlich als Unterschied gegen die ISO-Korrektur  $K_{0,ISO}$  nach Gl. (3)

$$\Delta K_{03} = K_{03} - K_{0,ISO} \quad (15)$$

woraus dann nach Einführung der Gl. (10) folgt:

$$\Delta K_{03}/\text{dB} = 5 \lg \left( \frac{B}{B_N} \right) + 17,5 \lg \left( \frac{T}{T_N} \right) \quad (16)$$

Die für wiederum  $B_N=101,3$  kPa und  $T_N=(273,15+23)$  K im gleichen wie zuvor betrachteten großen Temperaturbereich durchgeführten Auswertungen sind im Bild 3 zusammen mit der einer hochturbulenten Quelle aerodynamischen Schalls mit Quadrupolcharakter, entsprechenden Gesetzmäßigkeit

$$P \sim \frac{\rho}{c^5} \quad (17)$$

dort als  $\Delta K_{04}$  bezeichnet, dargestellt. Für das  $\Delta K_{04}$  ergibt sich dann analog zur vorangegangenen Herleitung

$$\Delta K_{04}/\text{dB} = 5 \lg \left( \frac{B}{B_N} \right) + 27,5 \lg \left( \frac{T}{T_N} \right) \quad (18)$$

Betrachtet man auch für diese Quelle den z.B. für Schallleistungsmessungen in Laborräumen reduzierten Temperaturbereich von  $\Theta=10^\circ\text{C}$  bis  $25^\circ\text{C}$ , so ergeben sich bei  $B=B_N$  für die Abweichungen  $\Delta K_{03}$  und  $\Delta K_{04}$  ein Bereich von nur  $-0,34$  bis  $0,05$  bzw.  $-0,54$  bis  $0,08$  dB.

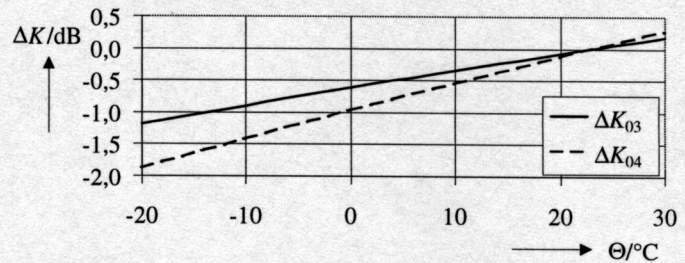


Bild 3 Korrekturdifferenzen  $\Delta K_{03}$  und  $\Delta K_{04}$  für  $B=B_N$

Die allein durch Veränderungen des statischen Druckes verursachten Unterschiede  $\Delta K_{01}$  bis  $\Delta K_{04}$  sind in allen betrachteten Fällen gleich

$$\Delta K_{0i}^B/\text{dB} = 5 \lg \left( \frac{B}{B_N} \right) \quad (19)$$

und damit übergreifend durch das Bild 4 dargestellt.

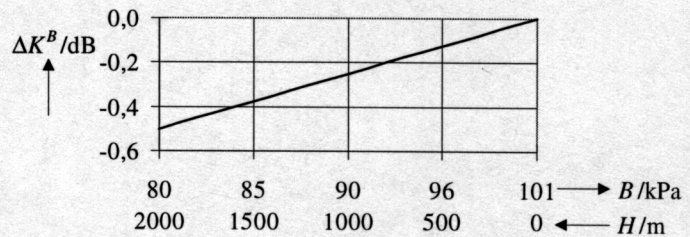


Bild 4 Korrekturdifferenzen  $\Delta K_{0i}^B$

### 4 Zusammenfassung

Die ISO-Umrechnungsformel kann einheitlich für verschiedene Schallerzeugungsmechanismen mit einem Fehlerbetrag von meist  $<0,5$  dB verwendet werden, so lange bei der aktuellen Schallleistungsmessung  $90 \leq B \leq 110$  kPa und  $10^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 40^\circ\text{C}$  vorlag.

### Literatur

- [1] Hübner G.: *Is the sound power defined by ISO/TC43 independent of specific environmental measurement conditions?* Proc. Of the 8<sup>th</sup> ICA, Sydney, paper M 6.5, 1980 [2] Hübner, G.: *Experimentelle Untersuchungen zur Abhängigkeit der Schallleistung aerodynamischer Schallquellen von den Gaseigenschaften*. DAGA 78, S. 359 - 365 [3] Hübner, G.: *Sound power related to normalized meteorological conditions*. Proc. of InterNoise, Ft. Lauderdale, USA, 1999 [4] Skript zur Vorlesung „Maschinenakustik A, Schallabstrahlung“, Universität Stuttgart [5] Wittstock, V.; Hübner G.; *Zur Bestimmung der Schallleistung quer angeströmter Kreiszyylinder*. DAGA 2000, in Druck