

Der Nahfeldfehler ebener Platten unterhalb der Koinzidenzfrequenz

Gerhard Hübner und David Kandelaki

ITSM der Universität Stuttgart, <http://itsm.uni-stuttgart.de>

Einleitung

Die von technischen Schallquellen – Maschinen, Geräten oder elektroakustischen Anlagen – abgestrahlte Schallleistung kann bekanntlich nach verschiedenen Verfahren gemessen werden, deren in Normen angebotene Vielfalt sich aus der Notwendigkeit einer Anpassung an die Bedingungen der Messumgebung – Laborräume oder "in-situ" – und auch aus dem Wunsch nach Unterschreitung einer bestimmten Messunsicherheitsgrenze ergibt. Seit mehreren Jahrzehnten wird die Messung unter praktischen Umgebungsbedingungen überwiegend durch Schalldruckquadrat-Bestimmungen auf einer die Schallquelle einhüllenden Fläche entsprechend DIN 45635, Teil 1 sowie ISO 3744 oder ISO 3746 ausgeführt. Diese Verfahren erfordern bedingt durch Umgebungs- oder Fremdgeräuscheinflüsse Korrekturen an der Messgröße, zu denen Zusatzmessungen ausgeführt werden müssen. Außerdem ist seit langem bekannt [1], dass die hiernach mit den üblichen Messabständen bestimmte Schallleistung nur eine Näherung für die schallquelleneigene "wahre" Schallleistung ist, die sich von dieser "wahren" Schallleistung um den sogenannten Nahfeldfehler systematisch unterscheidet.

Die durch GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement) festgelegten Grundsätze müssen auch in der Akustik allgemein umgesetzt werden. Unterschiede, die sich für die gleiche physikalische Größe bei Anwendung verschiedener Messverfahren ergeben, sollten ermittelt und über Korrekturen auf ein Referenzverfahren zurückgeführt werden. Nach einem kürzlich getroffenen Beschluss von ISO TC 43 "Acoustics" ist das Referenzverfahren zur Schallleistungsbestimmung technischer Schallquellen das Intensitäts-Hüllflächenverfahren nach ISO 9614. Damit besteht die Aufgabe, den im Schallleistungsergebnis eines Schalldruckquadrat-Hüllflächenverfahren, nicht aber im Intensitätsverfahren enthaltenen Nahfeldfehler zu bestimmen und als Korrektur in die Schalldruckquadrat-Messstandards einzuführen. Die nachfolgenden Ausführungen wollen hierzu einen Beitrag liefern.

Grundlagen

Der Nahfeldfehler ist definiert [1] durch das Verhältnis einer unter sonst idealen Umgebungsbedingungen – sehr kleiner Fremdgeräuschpegel relativ zum "Nutzpegel" sowie sehr geringer Raumerückwirkungen – nach dem Hüllflächenverfahren durch Schalldruckquadratmessungen nach ISO 3745 ermittelten angenäherten Schallleistung \bar{P} zu der "wahren", z. B. durch Intensitätsmessungen nach ISO 9614/1 bestimmten Schallleistung P einer stationären Geräusch abstrahlenden technischen Schallquelle.

$$NFF = \frac{\bar{P}}{P} = \frac{\frac{1}{\rho c} \iint_{S_1} \tilde{p}^2 \cdot dS_1}{\iint_{S_2} I_n \cdot dS_2} \approx \frac{\frac{1}{\rho c} \sum_{i=1}^N \tilde{p}_i^2 \cdot \Delta S_i}{\sum_{i=1}^M I_{n,i} \cdot \Delta S_i} \quad \text{eq. 1}$$

wobei das rechts angegebene Verhältnis den Nahfeldfehler näherungsweise für eine diskrete Messpunktanordnung mit einer Messpunktanzahl N bzw. M darstellt. Die sich daraus ergebende Diskre-

tisierungsdichte wird für eine "reine" Nahfelduntersuchung als hinreichend groß vorausgesetzt, so dass der sich daraus ergebende Endlichkeitsfehler [1] als vernachlässigbar klein gegenüber NFF angenommen werden kann.

Es ist ferner bekannt [1], [2], dass der Nahfeldfehler zweckmäßigerweise durch die beiden Teilfehler, Impedanzfehler ImF und Winkelfehler WF , dargestellt wird. Für einen einzelnen, i -ten Messpunkt auf der Messfläche stellt sich diese Aufteilung dar als

$$WF_i = \frac{|I_i|}{I_{n,i}} = \frac{1}{\cos \beta_i} \quad \text{lokaler Winkelfehler} \quad \text{eq. 2}$$

$$ImF_i = \frac{\tilde{p}_i^2 / \rho c}{|I_i|} \quad \text{lokaler Impedanzfehler} \quad \text{eq. 3}$$

$$NFF_i = \frac{\tilde{p}_i^2 / \rho c}{I_{n,i}} = WF_i \cdot ImF_i \quad \text{lokaler Nahfeldfehler} \quad \text{eq. 4}$$

Dabei sind $I_{n,i}$, I_i , \tilde{p}_i^2 die im Hüllflächen-Messpunkt i sich einstellenden resultierenden Schallfeldgrößen: I_i der zeitlich gemittelte Intensitätsvektor, $I_{n,i}$ dessen Messflächennormale Komponente und \tilde{p}_i^2 das Quadrat des Effektivwertes des Schalldrucks p_i sowie ρc die Schallkennimpedanz. Der Winkel β_i schließlich vollzieht in Gl. 2 über die Kosinusfunktion die Projektion des Intensitätsbetrages $|I_i|$ auf die im i -ten Messpunkt bestehende Normale der Messfläche.

Die in den Gleichungen 1 bis 4 auftretenden resultierenden Schallfeldgrößen können nach dem Superponierbarkeitsprinzip dargestellt werden als Zusammenwirken von Anteilen einzelner Schallquellen, die am i -ten Messflächenpunkt von verschiedenen Abschnitten einer Schallquellenoberfläche eintreffen. Wird dabei der allgemeine Fall korrelierter Schallfeldgrößen-Anteile angenommen, so ist in den Gln. 2 bis 4 und entsprechend auch in der Gl. 1 anzusetzen:

$$I_i = \overline{\sum_j p_{i,j} \cdot \sum_l v_{i,l}} = \overline{\sum_l p_{i,l} v_{i,l}} + \kappa_1 \sum_{j \neq l} \overline{p_{i,j} v_{i,l}} \quad \text{eq. 5}$$

$$I_{n,i} = |I_i| \cdot \cos \beta_i \quad \text{eq. 6}$$

$$\tilde{p}_i^2 = \overline{\sum_j p_{i,j} \sum_l p_{i,l}} = \sum_j \overline{p_{i,j}^2} + \kappa_2 \sum_{j \neq l} \overline{p_{i,j} p_{i,l}} \quad \text{eq. 7}$$

Durch die in Gln. 5 bis 7 künstlich eingefügten Faktoren κ_1 , κ_2 soll der Übergang zu dem Zusammenwirken nicht korrelierter Schallfeldgrößen-Anteile mit $\kappa_1 = \kappa_2 = 0$ vereinfacht verdeutlicht werden.

Zwischen dem Nahfeldfehler NFF_{\max} , der durch Messungen unmittelbar vor der Strahleroberfläche ermittelt wird, und des

Schallabstrahlgrad σ des Strahlers besteht ein enger Zusammenhang. Gl. 1 kann auch dargestellt werden durch

$$NFF_{\max} = \frac{\frac{1}{\rho c} \langle \langle p_{ob}^2 \rangle \rangle \cdot S_{ob}}{\sigma \cdot \rho c \langle \langle v_{n,ob}^2 \rangle \rangle \cdot S_{ob}} = \frac{1}{\sigma} \cdot Q_{ob} \quad \text{eq. 8}$$

wobei die $\langle \langle \rangle \rangle$ -Zeichen die zeitliche und örtliche Mittelung hier über die Strahleroberfläche symbolisieren und

$$Q_{ob} = \frac{\langle \langle (p_{ob} / \rho c)^2 \rangle \rangle}{\langle \langle v_{n,ob}^2 \rangle \rangle} \quad \text{eq. 9}$$

verwendet ist. Die p_{ob} und $v_{n,ob}$ sind dabei die Strahleroberflächen relevanten Größen. Sieht man zunächst von der hierbei ausgleichenden Wirkung des Quotienten Q_{ob} , der das dimensionslose Verhältnis von zeitlich/räumlich gemittelten $(p/\rho c)^2$ und $v_{n,ob}^2$ und der so eine Art Impedanzquadrat darstellt, ab, so ist der maximale Nahfeldfehler, gleichzeitig identisch mit dem maximalen Impedanzfehler, um so größer je kleiner der Schallabstrahlgrad σ ist. Auf diesem Wege ist die grundsätzlich wohl bekannte Tatsache der großen Nahfeldfehler bei kleinen Messabständen allgemein hergeleitet aber insbesondere auch für den "Kurzschlussbereich" $\sigma \rightarrow 0$ die hierfür zu erwartenden sehr hohen NFF -Werte angezeigt.

Nahfeldfehler der eingebettet schwingenden ebenen Platte im Bereich unterhalb der Koizidenz-frequenz

Maschinen und Geräte bestehen vielfach abschnittsweise aus homogenen ebenen Metallplatten mit Dicken zwischen 0,5 bis 5,0mm, deren Koizidenzfrequenz für Stahl zwischen 24kHz und 2,4kHz liegt [3]. Der unterhalb dieser Frequenz liegende Bereich deckt sich damit aber gleichzeitig auch mit den für das menschliche Hören relevanten Frequenzen, so dass einer Untersuchung der Schallabstrahlung für Verhältnisse von Körperschallwellenlänge λ_K zur Luftschallwellenlänge λ_L mit $\lambda_K/\lambda_L < 1$ besondere Bedeutung zukommt. Betrachtet wird hierzu eine 2mm dicke homogene Stahlplatte von Abmessungen $L_x=L_y=L$ mit $1m \times 1m$, die in der Rayleigh-üblichen großen Platte eingebettet schwingt entsprechend

$$v(x, t) = v_0 \sin k_K x \cdot \sin k_K y \cdot e^{j\omega t}$$

$$\text{und} \quad k_K = 2\pi/\lambda_K^* \quad \text{eq. 10}$$

mit verschiedenen Körperschallwellenlängen $\lambda_K^* = L/n$ die Ordnungszahlen $n = 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,75; 2,0; 2,5; 2,75; 3,0; 3,5; 3,75; 4,0$ zugeordnet sind. Die Integrationen der Gl. 1 werden dabei über eine quaderförmige Fläche S im Abstand D entsprechend Bild 1 durchgeführt.

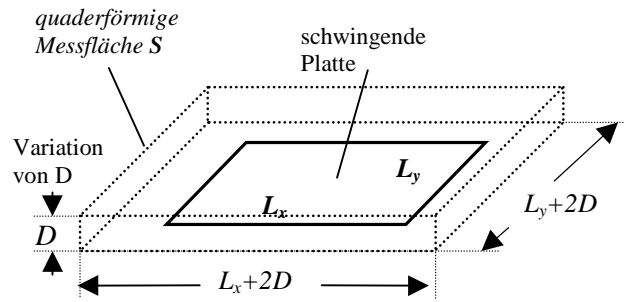


Bild 1

Nach Cremer [3] generiert sich die Schallabstrahlung der betrachteten Platten im Bereich $\lambda_K/\lambda_L < 1$ im Wesentlichen an den Plattenrändern und ist dementsprechend auch stark abhängig von den Randbedingungen. Die untersuchten Wellenlängen bzw. Ordnungszahlen n wurden deshalb auch so gewählt, dass an den Plattenrändern sowohl $v_n=0$, wie $v_n \neq 0$ betrachtet wird. Die Bilder 2 und 3 verdeutlichen den mit Gl. 8 beschriebenen Zusammenhang zwischen Schallabstrahlgrad und größtem Nahfeldfehler NFF_{\max} in Abhängigkeit vom Wellenlängenverhältnis λ_K/λ_L für den Beispielfall mit $\lambda_K = \lambda_K^*/\sqrt{2}$. Im Vortrag, so wie auch in einem im Druck befindlichen Forschungsbericht [4], wird der Nahfeldfehler in Abhängigkeit des Messabstands $D > 0$ und auch für den damit abnehmenden Impedanzfehler, aber mit dem zusätzlich auftretende

Winkelfehler betrachtet.

$10 \lg \sigma^{-1}$

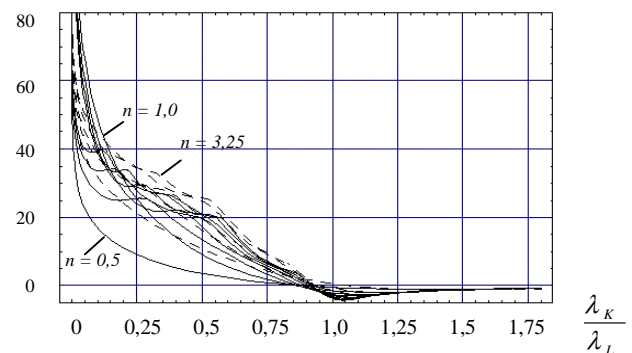


Bild 2

$10 \lg NFF_{\max}$

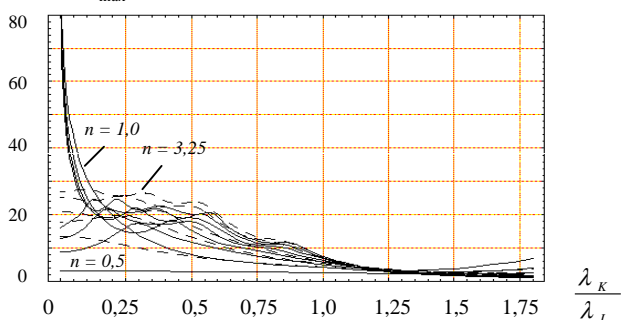


Bild 3

- ¹ Hübner, G.: *Analysis of errors in the measurement of machine noise*, JASA, Vol. 54., No. 4 (1974), S.967-977
- ² Wittstock, V. und Bethke, Ch.: *Winkel- und Impedanzfehler an einer Modellanordnung aus zwei Monopolen*. DAGA 2002, CD-ROM
- ³ Cremer, L. und Heckl, M.: *Körperschall*, Springer Verlag, 2. Auflage 1995, S. 496
- ⁴ Hübner, G., Kandelaki, D. und Kraus, M.: *Analyse der systematischen Fehler bei der Bestimmung der Schallleistung von Maschinen – Bestandsaufnahme*. Forschungsbericht der BAuA, im Druck