

## Zum aktuellen Stand der Entwicklung primärer Schalleistungsquellen an der PTB

Kevin Picker, Volker Wittstock

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig  
kevin.picker@ptb.de, volker.wittstock@ptb.de*

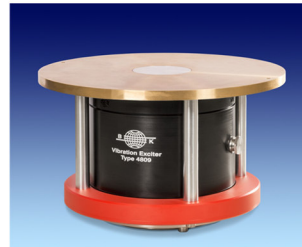
### Einleitung

Im Rahmen des European Metrology Research Programs (EMRP) nahm die PTB an der Entwicklung primärer Schallnormale für die Rückführung der Schalleistung teil. Die an der PTB entwickelten Primärquellen lieferten bereits vielversprechende Ergebnisse, dennoch müssen vor einem tatsächlichen Einsatz weitere Verbesserungen an den Quellen und in der Messtechnik erzielt werden. Dieser Artikel befasst sich mit den Messungen neuerer Primärquellen und den Verbesserungen des Messverfahrens.

### Hintergrund

Bei der Kennzeichnung der Emission einer Schallquelle stellt die Schalleistung eine wichtige Größe dar. Jedoch wird diese aus der Messung anderer akustischer Größen z.B. dem Schalldruck bestimmt. Diese messbaren Größen sind von der Messumgebung und dem verwendeten Messverfahren abhängig und somit verbleibt ein Einfluss dieser Parameter auf die ermittelte Schalleistung. Es stellte sich zudem heraus, dass verschiedene Verfahren voneinander abweichende Ergebnisse liefern. Zurzeit lassen sich diese Ergebnisse auch lediglich für einen eingeschränkten Frequenzbereich von meist 100 Hz bis 10 kHz bestimmen, da Messunsicherheiten für umfassendere Frequenzbereiche nicht vorhanden sind. Die Messunsicherheiten im von den Messverfahren abgedeckten Frequenzbereich werden derzeit durch die Vergleichs-Standardabweichungen aus Ringversuchen geschätzt [1][2][4].

Im Allgemeinen wird heute davon ausgegangen, dass die Schalleistung einer Schallquelle nicht vom äußerem Schallfeld abhängt. Neuere Untersuchungen haben jedoch gezeigt [6], dass bei tiefen Frequenzen und tonalen Schallquellen die von Quellen konstanter Quellstärke abgestrahlte Schalleistung auch vom äußeren Schallfeld abhängt. Daher wird hier vorgeschlagen eine Schallquelle zukünftig durch ihre im Halbfreifeld abgegebene Schalleistung zu charakterisieren. Im Prinzip wird dies bei der Verwendung von Vergleichsschallquellen bereits heute so gehandhabt. Lediglich die Kalibrierung der Vergleichsschallquellen müsste umgestellt werden. Anstatt, wie heute, bei der Kalibrierung auf das ideal diffuse oder ideal freie Schallfeld zurückzugreifen, würde eine Kalibrierung durch Vergleich mit einem Primärnormal erfolgen. Dies geschieht durch eine durch optische Messtechnik ermittelte Schalleistung eines Primärnormals (siehe hierzu auch Abbildung 1) [2][4][5].



Primärnormal



TransfERNormal



Prüfling

**Abbildung 1:** Rückführung der Schalleistung vom Primärnormal bis hin zum Prüfling.

### Quellen

Die von der PTB entwickelten Primärquellen haben gemeinsam, dass sie im Wesentlichen aus einem Shaker und einer mit dem Shaker gekoppelten Membran mit oder ohne Kolben bestehen. Während für das letzte Modell aus dem EMRP-Projekt ein üblicher Shaker eingesetzt wurde,

besitzen die neueren Modelle hauptsächlich einen Inertialshaker (siehe zum Vergleich Abbildung 2). Dieser benötigt keine Aufhängung und erleichtert dadurch die Montage und Wartung der jeweiligen Quelle. Zudem wird eine aufwendige Entkopplung zur Verhinderung der Körperschallübertragung vom Shaker über die Aufhängung zur Membran vermieden.

## Messprogramm

Alle Primärquellen durchlaufen das gleiche Messprogramm. Dieses wird in einem Halbfreifeldraum und zum Vergleich in einem Hallraum durchgeführt. Beide Räume der PTB besitzen eine Bodenöffnung, in welcher die jeweilige Quelle eingesetzt wird. Die Quellen sind so konstruiert, dass die Membran der Quelle mit dem Boden des Prüfraumes eben abschließt. Dies ist für die spätere Berechnung der Schalleistung aus der Schallschnelle wichtig.

Die Schallschnelle wird auf der Oberfläche der Membran mit Hilfe eines Scanning-Vibrometers optisch erfasst. Neben der Schalleistung aus der Schallschnelle wird auch die Luftschalleistung bestimmt. Hierfür wird der Schalldruckpegel der Quelle nach einem für den Prüfraum vorgesehenen Messverfahren gemessen. Im Halbfreifeldraum kommt ein Bogen mit 24 montierten Mikrofonen zur Abtastung der Hüllfläche zum Einsatz, während im Hallraum Einzelpositionen aufgestellt wurden (Näheres zum Bogen in [3]).

Neben diesen physikalischen Messgrößen, werden noch die Eingangsspannung und der Eingangsstrom gemessen. Aus diesen beiden elektrischen Größen wird der Wirkanteil der Kreuzleistung zur Korrektur bestimmt. Die Korrektur soll Schwankungen des Eingangssignals oder des Betriebszustandes der Quellen über die Messdauer ausgleichen.

Das Eingangssignal besteht für alle Quellen aus einem Multi-Sinus, welcher in zwei Frequenzbereiche aufgeteilt wird. Es gibt einen tieffrequenten Bereich von 12,5 Hz bis 1 kHz und einen hochfrequenten Bereich von 500 Hz bis 20 kHz. Dies wurde aus Gründen der Leistungsverteilung beschlossen. Wenn der Multi-Sinus ein schmaleres Frequenzband abdeckt, wird die Leistung des Signals zu

größeren Teilen auf die einzelnen Töne verteilt, wodurch sich der Signal-Rauschabstand vergrößert.

Um das Störgeräusch während der Messungen im Anschluss beurteilen zu können, durchlaufen die einzelnen Messsignale eine FFT-Analyse mit mehr FFT-Linien als Töne im Multi-Sinus enthalten sind. Dadurch entsteht ein Spektrum wie es beispielweise in Abbildung 3 zu sehen ist. Diese Methode gibt besonders bei der Messung der Schallschnelle Auskunft darüber, wie hoch der Störgeräuscheinfluss ist. Wird beim Scan mit dem Vibrometer keine Schwingung erfasst, wird von dem Gerät ein hoher Rauschpegel angegeben, dessen Größe u.a. von der Reflexion im konkreten Punkt abhängt. Daher ist eine Störgeräuschmessung im klassischen Stil nicht möglich. Mit Hilfe der zusätzlichen Frequenzlinien (siehe Abbildung 3) lässt sich nun durch eine lineare Interpolation der Störgeräuschpegel bei dem jeweiligen Ton bestimmen und gegebenenfalls eine Korrektur anwenden.

Für jede Quelle entstehen somit pro Raum vier Spektren, aus denen nach der Störgeräuschkorrektur die Töne aussortiert werden. Diese sortierten Spektren werden anschließend für die Bestimmung der Schalleistung weiterverwendet.

## Auswertung

Zunächst soll auf die Auswertung der Schallschnelle-Spektren eingegangen werden. Diese basiert auf dem Rayleigh-Integral und beruht auf der Annahme das ein schwingender Festkörper innerhalb einer unendlichen reflektierenden Ebene als Ansammlung vieler Monopole beschrieben werden kann [2]. Daher ist der ebene Abschluss der Membran mit dem Prüfraumboden wesentlich. Die Formel (1) beschreibt die Berechnung der Schalleistung aus der Schallschnelle, während die Berechnung der Schalleistung aus dem Schalldruck auf der Auswertung in dem jeweilig im Prüfraum verwendeten Messverfahren beruht. Aus der Kreuzleistung aus Spannung und Strom wird mit einem Bezug von 1 mW frequenzabhängig ein Leistungspegel berechnet. Dies ist die eigentliche elektrische Korrektur und wird auf die jeweiligen Schalleistungspegel addiert. Neben dem Ausgleich von Schwankungen der elektrischen Eingangsleistung werden durch diese Korrektur die in der Gesamtleistung eigentlich unterschiedlich gewichteten Anteile des Spektrums auf ein Niveau gebracht. Dadurch kann der tieffrequente und der hochfrequente



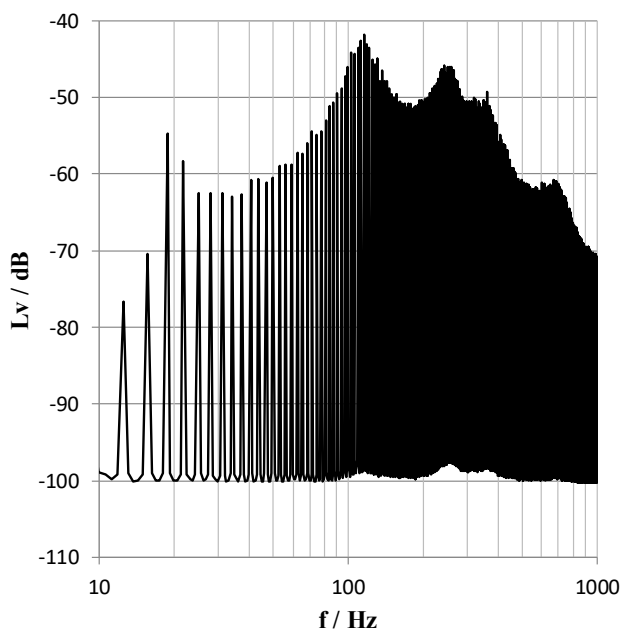
**Abbildung 2:** Verschiedene Modelle eines Primärquellens:

- a) Ein üblicher Shaker ist über eine Aufhängung mit der Membran verbunden. Innerhalb einer starren Messingplatte ist ein beweglicher Aluminiumkolben eingelassen, welcher vom Shaker darunter angeregt wird. Diese Quelle entstand während des EMRP-Projekts.
- b) Die Membran besteht wie bei a) aus einer starren Messingplatte mit Aluminiumkolben, jedoch wird der Kolben hier von einem Inertialshaker angeregt.
- c) Diese Quelle besteht lediglich aus einem Inertialshaker auf den eine Membran geschraubt wird. Diese Membran ist wiederum aus zwei aufeinander geklebten Federstahlplatten entstanden.

Anteil bei 1 kHz zusammengefügt werden.

$$P = \frac{\rho c}{2\pi} k^2 \left[ \sum_{i=1}^N v_i^2 S_i^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N v_i v_j S_i S_j \frac{\sin(kd_{ij})}{kd_{ij}} \cos(\Phi_i - \Phi_j) \right] \quad [\text{W}] \quad (1)$$

- $N$  Anzahl an Monopole (bzw. Anzahl der Scanpunkte)
- $v_i; v_j$  Die gemessene Schallschnelle im i-ten bzw. j-ten Scanpunkt
- $S_i; S_j$  Die zugewiesene Fläche am i-ten bzw. j-ten Scanpunkt
- $d_{ij}$  Die Distanz zwischen zwei Scanpunkten
- $\Phi_i; \Phi_j$  Die gemessene Phase im i-ten bzw. j-ten Scanpunkt

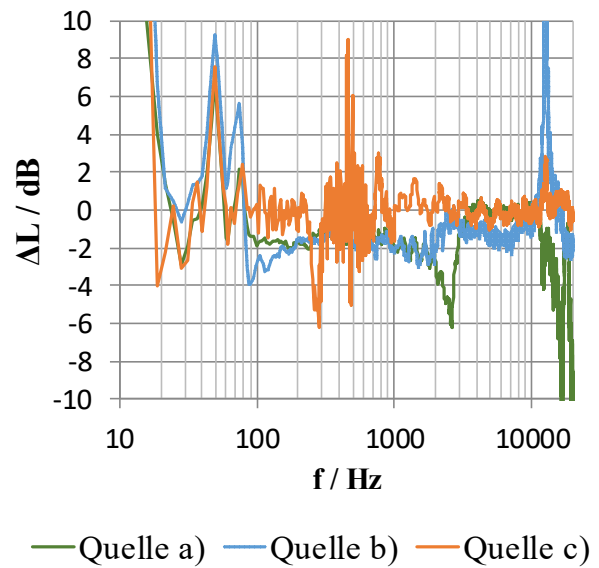


**Abbildung 3:** Beispiel eines unsortierten Schallschnelle-Spektrums für den tieffrequenten Anteil. Durch die Abtastung mit mehr FFT-Linien als Tönen im Multi-Sinus lässt sich das Störgeräusch (hier bei ca. -100 dB) gut ermitteln.

## Ergebnisse

Aus dem zusammengeführten Schalleistungsspektren lässt sich nun eine Differenz zwischen der Schalleistung aus dem Schalldruck und derjenigen aus der Schallschnelle für die jeweilige Quelle berechnen. Diese Differenz wurde sowohl schmalbandig, als auch für Terzbänder bestimmt. Die

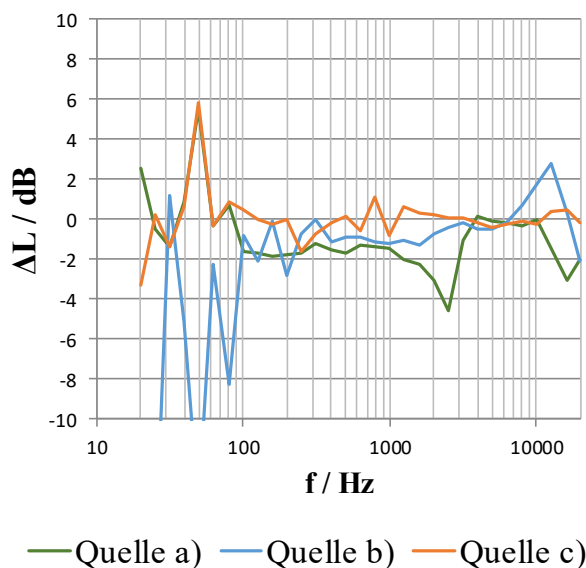
Ergebnisse für den Halbfreifeldraum werden in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt.



**Abbildung 4:** Differenzen zwischen Schalleistung aus Schalldruck und Schalleistung aus Schallschnelle für die in Abbildung 2 dargestellten Quellen für Schmalband-Spektren.

In Abbildung 4 ist zu sehen das für die Quelle aus Inertialshaker und Federstahlplatte (Quelle c)), abgesehen von der Diskrepanz um ca. 460 Hz, eine gute Übereinstimmung der Schalleistungen aus Schalldruck und Schallschnelle besteht. Dies spiegelt sich auch in den Terzen in Abbildung 5 wieder, wobei hier die auffälligen Diskrepanzen nicht mehr zu sehen sind. Für die beiden anderen Quellen, diejenigen mit dem Aluminiumkolben in starrer Messingplatte, zeigt sich eine systematische Abweichung bis ca. 4 kHz, darüber hinaus gibt es wieder eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Unter 100 Hz sind bei allen Quellen die Raumeinflüsse und oberhalb von 10 kHz Effekte wie Störgeräuscheinfluss oder Richtcharakteristik in beiden Frequenzbändern zu erkennen. Die Messungen im Hallraum ergaben qualitativ gleichwertige Ergebnisse.

Obwohl die Quelle c) vielversprechende Ergebnisse liefert, stellte sich heraus, dass sie aufgrund ihrer hohen Tonalität und ihrer für ein Primärnormal eher ungünstigen Dominanz in tiefen Frequenzbereich nicht zu verwenden ist. Die Quellen a) und b) besitzen hingegen einen glatteren Frequenzverlauf, haben jedoch ebenfalls ihre Schwächen. Bei Quelle a) befindet sich bei 2,5 kHz eine starke Abweichung. Diese ist aus bisher ungeklärten Gründen auf gemessene Schalldruck-Spektren zurückzuführen. Quelle b) besitzt im Bereich von 100 Hz und 8 kHz ausgeprägte Resonanzen. Was bei beiden Quellen bisher noch ungeklärt ist, sind die Abweichungen zwischen den Schalleistungen. Eine Möglichkeit zu diesem Phänomen könnte eventueller Störschall durch die Spalte zwischen Aluminiumkolben und Messingplatte sein. Untersuchungen zu dieser Möglichkeit sind geplant.



**Abbildung 5:** Differenzen zwischen Schalleistung aus Schalldruck und Schalleistung aus Schallschnelle für die in Abbildung 2 dargestellten Quellen in Terzbändern.

## Zusammenfassung und Ausblick

Das weiterentwickelte Messverfahren ermöglicht eine Korrektur des Störgeräuscheinflusses, der tatsächlich während der Messungen vorlag. Auch ist ein Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Quellen im Halbfreifeldraum und im Hallraum möglich. Die neueren Quellen liefern abermals vielversprechende Ergebnisse, obwohl keine zum aktuellen Stand einwandfrei als Primärnormal zu verwenden ist. Für die Zukunft sind weitere Untersuchungen an den aktuellen Modellen geplant, um eventuelle Verbesserungen dieser durchzuführen oder neue Primärnormal-Modelle zu entwerfen. Es wurde auch überlegt zwei unterschiedliche Schallquellen für die beiden gemessenen Frequenzbereiche einzusetzen. Ebenfalls ist ein Ringvergleich der Primärnormale unter allen ehemaligen Teilnehmern des EMRP-Projektes geplant.

## Literatur

- [1] Wittstock, W.; Bethke C.: „Voruntersuchungen zur Durchführung eines Schalleistungs-Ringversuchs“; Proceedings DAGA (2017) Kiel, Deutschland
- [2] Voelkel, K.; Bethke C.; Brezas S.; Wittstock V.: „First results in the realization of the unit Watt in airborne sound“; Proceedings Inter-noise (2014) Melbourne, Australien
- [3] Brezas, S.; Wittstock, V.: „A new scanning apparatus for the dissemination of the unit Watt in airborne sound“; Proceedings DAGA (2016) Aachen, Deutschland

- [4] Kirbas, C.; Andersson, H.; Guglielmono, C.; Wittstock, V.; Bilgic E.: „Primary sound power for the realization of the unit watt in airborne sound“; Proceedings Inter-noise (2016) Hamburg, Deutschland
- [5] Guglielmono, C.; Wittstock, V.; Kirbas, C.; Andersson, H.: „Main achievements of the EMRP sound power project and future prospects“; Proceedings Inter-noise (2016) Hamburg, Deutschland
- [6] Wittstock, V.: „Sound power and sound insulation at low frequencies“; 3rd Polish-German Structured Conference on Acoustics, Ustka, 11-14, September 2018, Polen