Systematische Fehler bei der Anwendung verschiedener Verfahren zur Ermittlung des Schallleistungspegels

Ilka Arendt, Anke Berger

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 44149 Dortmund, E-Mail: arendt.ilka@baua.bund.de, berger.anke@baua.bund.de

Einleitung

Die Verpflichtung der europäischen Maschinenrichtlinie an die Hersteller, Geräuschemissionsangaben zu liefern, ist ein Grundpfeiler für die Lärmminderung, da nur so Arbeitgeber ihrer gesetzlichen Verpflichtung zur Beschaffung von leisen Maschinen nachkommen können. Im Rahmen der europäischen Studie „NOMAD“ zur Überprüfung der Qualität von Geräuschemissionsangaben wurde allerdings deutlich, dass diese Angaben nur in 20% der Fälle belastbar sind. Einer der Gründe ist die Komplexität der existierenden Geräuschemissionsmessverfahren.

Ziel des Projektes „Vereinfachung von Geräuschemissionsmessverfahren für die Anwendung in der Praxis“ der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) ist die Erarbeitung von vereinfachten Messverfahren zur Schallleistungsermittlung von Maschinen, die besonders von kleinen und mittleren Unternehmen angewendet werden können. Dabei soll die vom Gesetzgeber geforderte Vergleichbarkeit von Messergebnissen durch eine für die Praxis ausreichende Genauigkeit sichergestellt werden.

Um die Auswirkungen einer Vereinfachung der Messverfahren beurteilen zu können, ist es erforderlich, die wahre Schallleistung einer Quelle als Bezugsgröße zu kennen. Das Projekt wird daher auf der Grundlage eines EMRP (European Metrology Research Program) Drittmittelprojektes mit dem Titel „SIB 56 – Realisation, dissemination and application of the unit Watt in airborne sound“ durchgeführt. Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer vollständig rückführbaren Referenzschallquelle konstanter Schallleistung. Weiterhin soll geprüft werden, wie eine Übertragbarkeit auf die bisher bekannten Referenzschallquellen (RSS) sichergestellt werden kann.

Die in der BAuA durchgeführten Untersuchungen konzentrieren sich auf die Ermittlung der Schallleistung nach den in DIN EN ISO 3744 und DIN EN ISO 9614 Teil 1 - 3 festgelegten Verfahren, wobei als Schallquelle eine RSS Typ 4204 von Brüel & Kjær verwendet wird. Neben den Eingangsgrößen Schalldruck und Schallintensität werden die Anzahl und Positionen der Messpunkte und die Hüllflächenform variiert, um die systematischen Abweichungen zu ermitteln. Erste Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

Systematische Abweichungen bei der Ermittlung des Schallleistungspegels

Bei der Ermittlung der Schallleistung unter Bestimmung der quadrierten Feldgröße Schalldruck ergeben sich im Gegensatz zur Bestimmung der Schallleistung aus Schallintensitätsmessungen, bisher üblicher Weise als Referenz gesetzt, systematische Abweichungen. Diese resultieren [1] aus dem lokalen Winkelfehler WF_i und dem lokalen Impedanzfehler IF_i mit

$$\boldsymbol{WF_i} = \frac{|\boldsymbol{I_i}|}{\boldsymbol{I_{n,i}}} = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{cos\beta_i}}$$

und $$\boldsymbol{IF_i} = \frac{\tilde{\boldsymbol{p}}_{\boldsymbol{i}}^{\boldsymbol{2}}/\boldsymbol{\rho c}}{|\boldsymbol{I_i}|}$$

Beide Fehler ergeben zusammen den lokaler Nahfeldfehler. Ein weiterer Fehler resultiert aus den Normvorgaben z. B. in ISO 3744, wo die Mittelung der Schalldruckpegel an Messpositionen mit zugeordneten gleich große Teilflächen der Hüllfläche physikalisch falsch auch für Messpositionen an den Ecken oder Kanten des Messquaders zugelassen wird. Die Größenordnung dieser Fehler wird durch die nachfolgenden Untersuchungsergebnisse deutlich.

Ermittlung der Schallleistung aus Schalldruckmessungen

Die DIN EN ISO 3744:2010 [2] ist die am häufigsten verwendete B-Norm zur Ermittlung des Schallleistungspegels. Sie beruht auf Schalldruckmessungen in einem im Wesentlichen freien Schallfeld auf einer die Schallfläche umschließenden Hüllfläche über einem reflektierenden Boden.

Auf der Grundlage dieser Norm wurde in einer umfangreichen Messreihe im Halbfreifeldraum der BAuA der Einfluss verschiedener Messanordnungen auf den ermittelten Schalleistungspegel untersucht. Aufgrund der dort gegebenen Rahmenbedingungen war die Anwendung von Umgebungs-, Hintergrundgeräusch- und meteorologischer Korrektur nicht erforderlich. Für alle in diesem Abschnitt vorgestellten Messanordnungen betrug der Messabstand (Quader, Zylinder) bzw. der Radius (Halbkugel) 1 m. Die Messungen wurden für jede Anordnung mit gleichem Personal und unter Verwendung des gleichen Messequipments an fünf Tagen jeweils dreimal wiederholt. Tabelle 1 gibt die Messanordnungen und die Messergebnisse wieder. Abbildung 1 zeigt einen typischen Messaufbau. In Abbildung 2 sind die Messergebnisse grafisch dargestellt.

Tabelle 1: Messanordnungen nach DIN EN ISO 3744 und ermittelte Schallleistungen

	Hüllflächenform	Anzahl der Mess-punkte/-pfade	Anmerkungen zu den Mess-positionen in DIN EN ISO 3744	Schallleistungs-pegel in dB(A)
1	Quader	10	Bild C.4	92,0
2	Quader	9	Bild C.7	92,3
3	Quader	5	wie in Bild C.7 aber ohne Eckpositionen	93,5
4	Zylinder	5	Messpunktanordnung wie 3, jedoch geringeres Messflächenmaß	92,5
5	Halbkugel	20	nach Tabelle B.2	91,8
6	Halbkugel	10	wie 5, aber Anzahl der Messpunkte reduziert	91,8
7	Zylinder	6	Messpfade, wie in Bild D.1	92,4
8	Zylinder	9	Messpfade, Bild D.1	92,2
9	Halbkugel	5	Messpfade, Bild B.5	92,5

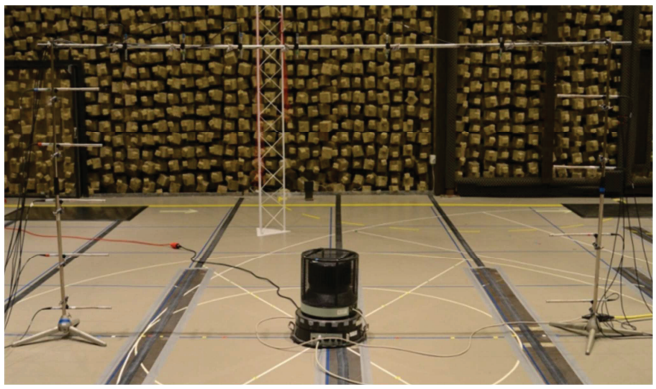

Abbildung 1: Messaufbau zur Ermittlung der Schallleistung nach DIN EN ISO 3744 auf Messpfaden auf einer zylinderförmigen Oberfläche.

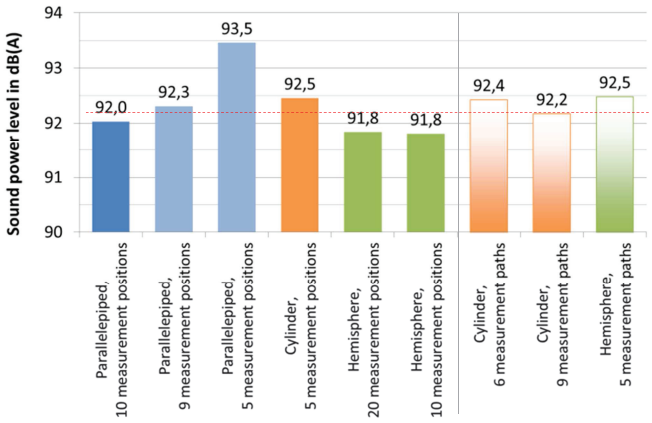

Abbildung 2: Schallleistungspegel einer RSS, ermittelt aus Schalldruckmessungen nach DIN EN ISO 3744; Anwendung unterschiedlicher Hüllflächenformen und Messpunktanordnungen. Rotgestrichelte Linie: Kalibrierwert.

Für die Anordnung von fünf Messpunkten auf einer Quaderhüllfläche hat der ermittelte Schallleistungspegel aufgrund des Winkelfehlers und der ungünstigen Verteilung der Messpunkte auf der Hüllfläche erwartungsgemäß den höchsten Wert und weicht um 1,3 dB nach oben vom A-bewerteten Schallleistungspegel im Prüfzeugnis der RSS (Kalibrierwert) ab. Wird bei gleicher Messpunktanordnung eine zylinderförmige Hüllfläche vorausgesetzt, verbessert sich das Ergebnis aufgrund des um 1 dB verringerten Messflächenmaßes. Beim Vergleich mit dem Kalibrierwert ist zu beachten, dass im Rahmen der Kalibrierung die Schallleistung aus Messungen auf einer spiralförmigen Abtastung der Hüllfläche (Halbkugel, Radius 2 m) ermittelt wurde. Damit ergibt sich eine gleichmäßigere Abtastung als die in Tabelle B.2 der ISO 3744 beschriebene.

Im Allgemeinen betragen die Abweichungen zum Kalibrierwert weniger als 0,5 dB. Einzige Ausnahme ist die 5 Messpunkte-Anordnung auf dem Quader.

Ermittlung der Schallleistung aus Schallintensitätsmessungen

Die DIN EN ISO 9614 „Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen“ [3] stellt mit ihren Teilen

- DIN EN ISO 9614-1:2009: Messungen an diskreten Punkten
- DIN EN ISO 9614-2:1996: Messung mit kontinuierlicher Abtastung
- DIN EN ISO 9614-3:2009: Scanning-Verfahren der Genauigkeitsklasse 1

drei Verfahren unterschiedlicher Genauigkeitsklassen bereit. Die Normen enthalten Vormessverfahren zur Beschreibung des Schallfeldes durch Feldindikatoren. Anhand dieser Indikatoren werden Kriterien und Vorgehensweisen abgeleitet, um eine gewünschte Genauigkeitsklasse zu erreichen.

Im Rahmen des Projektes wurde das Verfahren nach DIN EN ISO 9614-1 auf einer halbkugelförmigen Messfläche (Radius r = 2 m) mit 20 Messpunkten nach DIN EN ISO 3744 Tabelle B.2 sowie auf einer zylinderförmigen Messfläche (Messabstand d = 1,85 m) mit 24 Messpunkten (16 auf der Mantelfläche, 8 auf der Deckfläche) angewendet. Der ermittelte Schallleistungspegel ist in Relation zum Kalibrierwert der RSS in Abbildung 6 dargestellt.

In weiteren Messreihen wurde die Schallleistung der RSS auf einer quaderförmigen Hüllfläche nach den in den Normen DIN EN ISO 9614-2 und DIN EN ISO 9614-3 beschriebenen Scanningverfahren ermittelt. Die Messungen wurden an fünf Tagen jeweils einmal durchgeführt. Alle weiteren Messbedingungen entsprechen denen für die Schalldruckmessungen.

Abbildung 3 zeigt die Spektren des Schallleistungspegels nach den beiden Scanningverfahren auf der Quaderhüllfläche unter Verwendung zweier unterschiedlicher Abstandshalter (Spacer). Zusätzlich zur Schallintensität wurde der Mittelwert des Schalldrucks der beiden Sondenmikrofone aufgezeichnet und der entsprechende Schallleistungspegel berechnet.

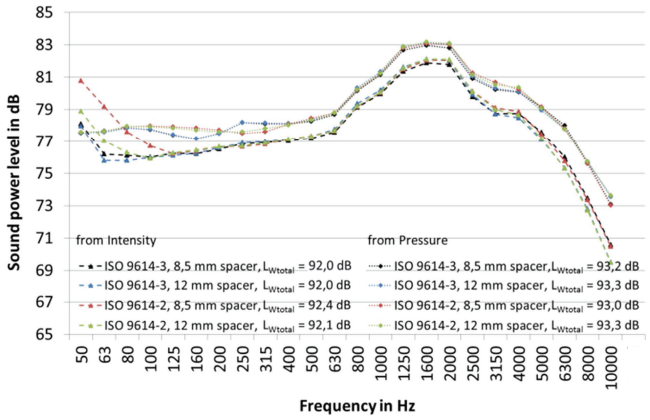

Abbildung 3: Spektren des Schallleistungspegels einer RSS, ermittelt aus Schalldruck- und Schallintensitätsmessungen; Scanningverfahren auf einer Quaderhüllfläche.

Der Anstieg der Werte in den unteren Terzen der Schallleistungspegelspektren aus den Schallintensitätsmessungen ist vermutlich auf die Phasenfehlanpassung der beiden Messkanäle zurückzuführen.

Wesentliche Unterschiede zwischen den beiden Schallintensitätsverfahren sind nicht erkennbar. Erwartungsgemäß wurden jedoch mit den Schalldruckmessungen im mittleren Frequenzband etwa 1 – 2 dB höhere Schallleistungspegel ermittelt. Die Unterschiede zwischen Schalldruck- und Schallintensitätsscanning (Abbildung 4) nehmen bei hohen und niedrigen Frequenzen zu. Bei den hohen Frequenzen ist dies zurückzuführen auf die nicht ausreichende Nachbildung des Differenzenquotienten (zu großer Mikrofonabstand durch die verwendeten Spacer) zur Ermittlung des Schalldruckgradienten.

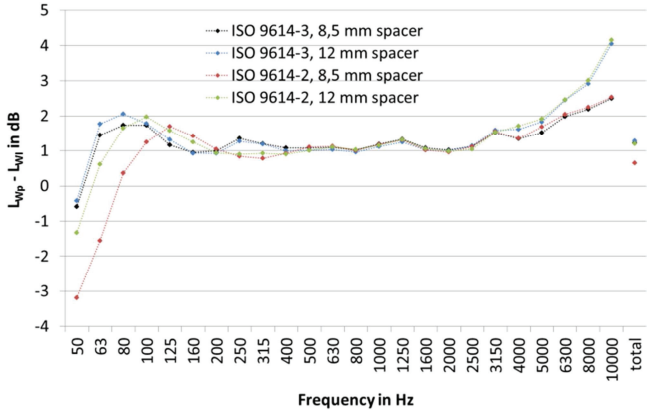

Abbildung 4: Differenzen des Schallleistungspegels ermittelt aus Schallintensitäts- und Schalldruckmessungen; Scanningverfahren auf einer Quaderhüllfläche.

Abbildung 5 zeigt die Standardabweichungen der durchgeführten Messungen. Mit Werten kleiner 0,25 dB für den Frequenzbereich 100 Hz – 10 kHz ist eine sehr gute Wiederholbarkeit gegeben. Lediglich für die Schallintensität in den Terzbändern 50, 63 und 80 Hz ist ein signifikanter Anstieg der Standardabweichungen zu beobachten.

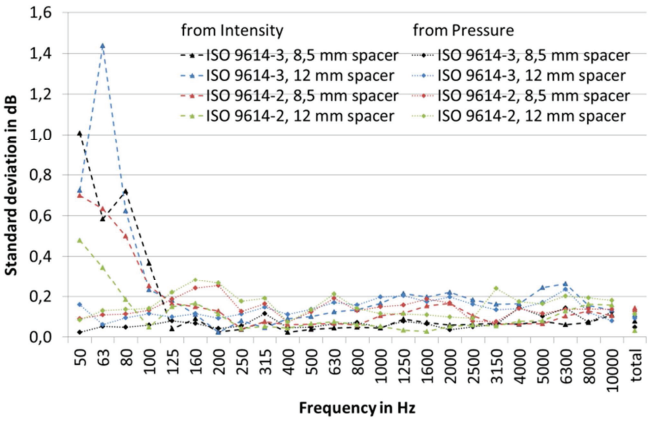

Abbildung 5: Standardabweichungen der Schallleistungsspektren, ermittelt aus 5 Messungen der Schallintensität bzw. des Schalldrucks; Scanningverfahren auf einer Quaderhüllfläche.

Abbildung 6 zeigt die unbewerteten Summenpegel der Schallleistungen für alle Intensitätsmessungen. Die Ergebnisse liegen unter dem Kalibrierwert, der aus Schalldruckmessungen ermittelt wurde. Die Abweichungen zwischen den verschiedenen Verfahren betragen bis zu 0,6 dB.

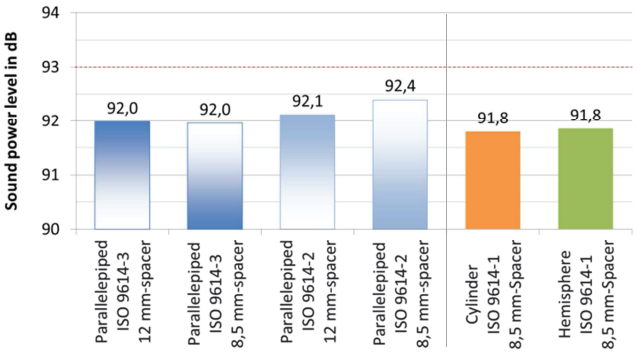

Abbildung 6: Schallleistungspegel einer RSS, ermittelt aus Schallintensitätsmessungen nach DIN EN ISO 9614; Anwendung unterschiedlicher Hüllflächenformen und Messpunktanordnungen/Messpfade sowie Spacer. Rotgestrichelte Linie: Kalibrierwert.

Vergleich von Schalldruck- und Schallintensitätsverfahren

Tabelle 2 stellt die unbewerteten Schallleistungspegel aus den in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Messanordnungen gegenüber. Zusätzlich wurde das Ergebnis der Schalldruckmessungen auf einer halbkugelförmigen Messfläche mit 2 m Radius aufgenommen.

Die Messergebnisse zeigen tendenziell eine Überschätzung der Schallleistung bei Schalldruckmessungen und kleinen Messabständen. Bei Erhöhung des Messabstandes liegt die ermittelte Schallleistung unter dem Kalibrierwert. Bei Anwendung der Schallintensitätsverfahren ist der ermittelte Schallleistungspegel unabhängig vom Messabstand etwas niedriger. Besonders hervorzuheben sind hier die geringen Unterschiede für die beiden Scanningverfahren der Genauigkeitsklassen 1 (DIN EN ISO 9614-3) und 2 (DIN EN ISO 9614-2). Bei Umsetzung der Messverfahren unter Laborbedingungen wurde deutlich, dass das Verfahren der

Klasse 1 für eine Abtastung durch eine handgeführte Sonde zu aufwändig ist und deshalb eher den Einsatz eines Abtastroboters voraussetzt. Der Mehraufwand spiegelte sich bei den hier vorherrschenden idealen Umgebungsbedingungen nicht in den Messergebnissen wieder.

Tabelle 2: Schallleistungspegel, ermittelt aus Schalldruck- (p) und Schallintensitätsmessungen (I) unter Anwendung unterschiedlicher Hüllflächenformen und Messpunktanordnungen bzw. Messpfade

Messgröße	Hüllfläche	Messabstand (Quader, Zylinder)/Radius (Halbkugel) in m	Anzahl Messpunkte/ Messpfade	unbewertete Schallleistungspegel, Differenz zum Kalibrierwert in dB (-1,5 -1,0 -0,5 0,0 0,5 1,0 1,5)
p	Quader	1	10	
p	Quader	1	9	
p	Quader	1	5	
p	Zylinder	1	5	
p	Halbkugel	1	20	
p	Halbkugel	1	10	
p	Halbkugel	2	20	
p	Zylinder	1	6	
p	Zylinder	1	9	
p	Halbkugel	1	5	
I	Quader	1	6	
I	Quader	1	6	
I	Quader	1	64	
I	Quader	1	64	
I	Zylinder	1,85	24	
I	Halbkugel	2	20	

Die weitere Interpretation setzt die Kenntnis der tatsächlichen Schallleistung der RSS und damit letztlich die im Rahmen des EMRP-Projektes zu erstellende primäre Referenzschallquelle voraus.

Danksagung

Frau Kyra Stannek und Herrn Sven Becker danken wir für die engagierte Durchführung der Messungen.

The EMRP is jointly funded by the EMRP participating countries within Euramet and the European Union.

Literatur

[1] G. Hübner, D. Kandelaki, M. Kraus: Bestimmung der Schallleistung von Maschinen – systematische Fehler. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, FB 1015, Dortmund/Berlin/Dresden 2004, Verlag für neue Wissenschaft GmbH Bremerhaven

[2] DIN EN ISO 3744:2010 Akustik – Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer refreflektierenden Ebene

[3] DIN EN ISO 9614 Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen

- DIN EN ISO 9614-1:2009: Messungen an diskreten Punkten
- DIN EN ISO 9614-2:1996: Messung mit kontinuierlicher Abtastung
- DIN EN ISO 9614-3:2009: Scanning-Verfahren der Genauigkeitsklasse 1