

# Validierung eines energiebasierten Schallteilchenverfahrens bei der Berechnung der Schallausbreitung in Arbeitsräumen

Wolfgang Probst, Greifenberg

**Zusammenfassung** Die Richtlinie VDI 3760 beschreibt ein Spiegelquellenverfahren zur Berechnung der Schallausbreitung in Fabrikhallen und anderen Arbeitsstätten. Dieses Verfahren ist vor nunmehr 20 Jahren aus mehreren „Kandidaten“ ausgewählt worden, weil es zur geringsten Abweichung zwischen Rechnung und Messung bei den von einer Schallquelle auf einem geraden Pfad verursachten Schalldruckpegeln geführt hat. Diese auf der Untersuchung in 122 Industriehallen beruhenden und durch Messung und Beobachtung gewonnenen Daten wurden nunmehr verwendet, um die entsprechenden Abweichungen bei Anwendung eines zur Lärmprognose in maschinenbestückten Arbeitsstätten entwickelten energiebasierten Schallteilchen-Verfahrens (SERT) zu ermitteln. Die Untersuchung zeigt fast identische Abweichungen der mit dem VDI-3760-Verfahren und der mit dem SERT-Verfahren berechneten Schallpegel von den gemessenen Schalldruckpegeln und bildet somit eine auf solider Datenbasis beruhende Validierung des Verfahrens für diese Anwendung.

## Validation of an energy-based sound-particle-method calculating sound propagation in work rooms

**Summary** The German guideline VDI 3760 describes a mirror-image method to calculate sound propagation in industry halls and other work-rooms. This method has been chosen about 20 years ago from a set of proposed „candidates“, because it minimized the deviations of sound pressure levels calculated and measured levels along a straight path while a source at one end of this path was radiating. These data collected from measurement and observation in 122 industry halls were now applied to determine and qualify the corresponding deviations with calculations performed with an energy based sound particle method (SERT – Stochastic Energy Ray Tracing). The analysis shows nearly identical deviations of measured levels from the levels calculated with VDI 3760 and from those calculated with SERT. It is therefore a broad based validation of the method related to this application.

Zur Vorausberechnung der Schallausbreitung in Räumen, vorwiegend bezogen auf Werkhallen und andere Arbeitsstätten mit Maschinen, sind ab 1970 mehrere auf entsprechenden Untersuchungen basierende Vorschläge (beispielhaft [1 bis 7]) publiziert worden. Mit finanzieller Unterstützung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz war im Rahmen eines Verbundprojekts mit [8] eine umfangreiche und später mit [9] noch erweiterte Untersuchung durchgeführt worden, als deren Ergebnis ein Spiegelquellen-Verfahren mit einem Ansatz für Schallstreuung nach *Kuttruff* und *Jovicic* als das am besten geeignetste Standardverfahren ausgewählt und mit der Richtlinie VDI 3760 [10] quasi genormt worden ist. Eine Untersuchung [11] zur Erweiterung der Methodik des Verfahrens nach VDI 3760 befasste sich mit den praktischen Problemen in Maschinenhallen mit abschirmenden Strukturen, großen und nicht mehr als Punktquellen

darstellbaren Maschinen sowie mit aneinander anschließenden gekoppelten Räumen.

Die Richtlinie VDI 3760 ist nach wie vor das für die standardisierte schalltechnische Beschreibung der raumakustischen Verhältnisse in Arbeitsräumen mit technischen Schallquellen und Arbeitsplätzen zutreffende Verfahren. Allerdings hat es sich zur Berechnung der zu erwartenden Beurteilungspegel an den Arbeitsplätzen auf der Basis einer einheitlichen und richtungsunabhängigen Schallausbreitungskurve nicht bewährt, weil die aus Rechenzeitgründen notwendigen Vereinfachungen zu weitgehend sind, um eine auch nur halbwegs akzeptable Genauigkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Diese Einschränkungen des in VDI 3760 festgelegten Verfahrens seien im Folgenden zusammengefasst:

- Aufgrund des Spiegelquellenverfahrens werden Reflexionen so berechnet, als ob sie ausnahmslos an akustisch glatten Flächen nach dem Prinzip Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel erfolgen würden. Maschinen und technische Einrichtungen mit ihrer zerklüfteten Oberflächenstruktur reflektieren aber einen wesentlichen Teil des einfallenden Schalls diffus.

- Es werden grundsätzlich nur quaderförmige Räume mit sechs Raumbegrenzungsflächen berücksichtigt, um auch die in schwach absorbierenden Räumen erforderlichen hohen Reflexionsordnungen einbeziehen zu können. Andere Raumformen müssen durch Quaderräume angenähert werden.

- Jede dieser Raumbegrenzungsflächen ist durch einen die gesamte Fläche kennzeichnenden mittleren Absorptionsgrad in den Oktav-Frequenzbändern von 125 bis 4 000 Hz gekennzeichnet. Da lokal unterschiedliche akustische Eigenschaften innerhalb einer dieser Begrenzungsflächen nicht berücksichtigt werden, können auch lokal wirksame Maßnahmen wie die absorbierende Verkleidung der Wand hinter einer lauten Maschine nicht berücksichtigt und beurteilt werden.

- Maschinen und andere die Schallausbreitung beeinflussende Einrichtungsgegenstände werden über eine den gesamten Raum kennzeichnende Streukörperdichte erfasst – die lokal unterschiedliche Anordnung von reflektierenden und abschirmenden Objekten kann nicht berücksichtigt werden.

- Verfahrensbedingt wird vorausgesetzt, dass der von einer Punktquelle ohne Richtwirkung an einem Immissionsort verursachte Schalldruckpegel ausschließlich von deren Schallleistungspegel und von ihrem Abstand abhängt. Bei der Berechnung des Schallpegels an einem Arbeitsplatz wird der Anteil aller Schallquellen nur aufgrund ihrer Emission und ihres Abstands unter Zugrundelegung einer einheitlichen räumlichen Abklingkurve – der einmalig berechneten Schallausbreitungskurve SAK – unabhängig von der Ausbreitungsrichtung und der Möblierung auf dem Strahlweg berechnet.

Die genannten Einschränkungen sind unwesentlich, wenn die nach VDI 3760 für Arbeitsräume kennzeichnende mittlere Schallausbreitungskurve SAK bzw. die aus ihr abgeleiteten Kenngrößen DL2 und DLf (siehe VDI 3760) zur raumakustischen Beurteilung bestimmt werden sollen. Bei der planerischen Vorausberechnung von Schalldruckpegeln an Arbeitsplätzen oder bei der Abschätzung des Minderungspotenzials von Lärminderungsmaßnahmen bei der Lärmsanierung führen sie aber zu nicht akzeptablen Unsicherheiten.

Diese und andere Gründe haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass das Prinzip des Spiegelquellen-Verfahrens bei der Berechnung der Schallausbreitung in Räumen für die Lärmprognose durch das energiebasierte Schallteilchenverfahren (SERT – **S**tochastic **E**nergy **R**ay **T**racing) praktisch völlig verdrängt wurde.

Mit diesem Beitrag sollen die Grundzüge des Verfahrens in der mit dem Programmsystem CadnaR [12] realisierten Form sowie seine Validierung bei der Berechnung der Schallausbreitung in Fabrikhallen beschrieben werden.

## Grundzüge des energiebasierten Schallteilchenverfahrens SERT

### Schallabstrahlung und Schallausbreitung

Im Unterschied zu dem mit der Richtlinie VDI 3760 angewendeten Spiegelquellenverfahren erfolgt bei dem hier beschriebenen energiebasierten Teilchenverfahren keine streng deterministische Berechnung der möglichen Schallstrahlen. Jede Schallquelle sendet vielmehr Schallteilchen in zufällig gewürfelte Richtungen aus, wodurch sich eine auf alle Raumwinkel bezogene Gleichverteilung ergibt. Die Grundprinzipien des Teilchenverfahrens sind allgemein in [13] und speziell bezogen auf die Realisierung in CadnaR in [14] dargestellt.

Der gesamte Raum ist in quaderförmige Zählvolumina – die sog. Voxels – aufgeteilt. Für jedes dieser Voxel wird die stationäre Schallleistungsdichte aufgrund der Anzahl von auftreffenden Teilchen bestimmt. Die Größe der Voxel bestimmt das Auflösungsvermögen für die zu berechnenden Immissionskenngrößen.

Werden  $N$  Teilchen abgeschickt und ist  $L_w$  der Schallleistungspegel der Quelle, so beträgt die Schallleistung pro Teilchen

$$W_T = \frac{10^{0,1L_w}}{N} \quad (1)$$

Bei nicht kugelförmigen Voxeln muss zur Berechnung des Energiebeitrags eine Gewichtung nach der Lauflänge  $x$  innerhalb des Voxels erfolgen, um die Richtungsabhängigkeit des „Wirkungsquerschnitts“ zu eliminieren. Beträgt die „Lauflänge“ im Voxel  $x$ , so ergibt sich mit einem Volumen  $V$  des Voxels eine für das Teilchen relevante Querschnittsfläche von

$$S = \frac{V}{x} \quad (2)$$

und ein intensitätsproportionaler Beitrag von

$$I_T = \frac{x \cdot 10^{0,1L_w}}{N \cdot V} \quad (3)$$

Mit der kumulierten Absorption  $\alpha_i$  der am Laufweg beteiligten Reflektoren

$$(1 - \alpha_{\text{eff}}) = \prod (1 - \alpha_i) \quad (4)$$

und der Luftdämpfung in dB/m beträgt dieser intensitätsproportionale Beitrag

$$I_T = \frac{x \cdot 10^{0,1L_w}}{N \cdot V} \cdot 10^{-0,1d \cdot \alpha_L} \cdot \prod (1 - \alpha_i) \quad (5)$$

Diese Beiträge werden für alle Quellen und alle Strahlwege in jedem Voxel summiert und über

$$L = 10 \cdot \log(\sum I_T) \quad (6)$$

in den für das Voxel zutreffenden Schalldruckpegel umgerechnet.

In Anknüpfung an das Verfahren nach VDI 3760 erfolgt diese Berechnung getrennt für Oktav-Frequenzbänder. Wird auch der STI (Speech Transmission Index) bestimmt, so werden mindestens die Frequenzbänder von 125 bis 8 000 Hz einbezogen.

Ist die Abstrahlung der Punktschallquelle durch eine Richtwirkung gekennzeichnet, kann dies durch eine gleich wahrscheinliche Aussendung von Teilchen in alle Richtungen, aber mit entsprechend richtungsabhängiger Schallleistung pro Teilchen berücksichtigt werden. Oder aber die Teilchen-Schallleistung entspricht weiterhin Gl. (1) und die Wahrscheinlichkeit für jede Aussenderichtung wird durch die für diese Richtung geltende Richtwirkung bestimmt.

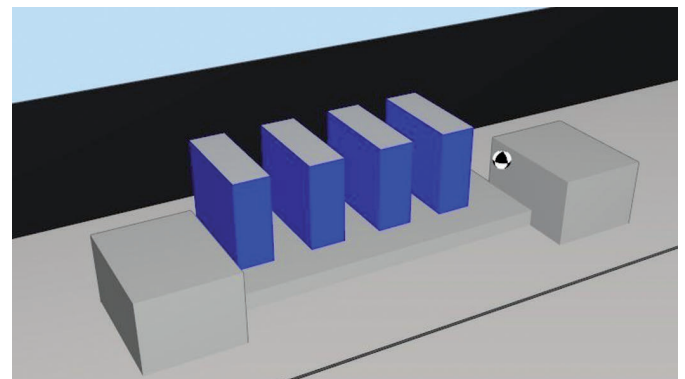
Ausgedehnte Quellen wie Linienschallquellen oder Flächenschallquellen werden für die Berechnung der Schallausbreitung in so kleine Elemente unterteilt, dass diese wiederum durch Punktschallquellen ersetzt werden können. Die obengenannte Beschreibungsweise gilt damit gleichermaßen.

### Objekte und Bauteile

Jedes Bauteil zur Modellierung des Raums, der Einbauten und der Einrichtungsgegenstände weist neben seiner Geometrie drei für jedes Frequenzband getrennt anzugebende Kenngrößen auf – den Absorptionsgrad  $\alpha$ , den Transmissionsgrad  $\tau$  sowie den Streugrad  $s$  (zur Festlegung der relativen Anteile von diffus zu spiegelnd reflektierter Schallenergie).

Mit den so beschreibbaren Quellen- und Strukturelementen können beliebig komplexe Räume und auch Schallquellen wie Maschinen und andere technische Einrichtungen modelliert werden. **Bild 1** zeigt als Beispiel das akustische Modell einer Tiefdruckmaschine mit vier Stationen.

Zur Berechnung der Schalldruckpegel an festgelegten Immissionspunkten werden diese aus den für die Voxel-Mittelpunkte ermittelten Werten interpoliert.



**Bild 1** Akustisches Modell einer Tiefdruckmaschine mit vier Stationen (Flächenschallquellen blau).

## Validierung des SERT-Verfahrens für die Berechnung der Schallausbreitung

### Methodik

Zur Validierung des Verfahrens konnte auf die Daten zurückgegriffen werden, die vom Verfasser im Zuge der Entwicklung des Verfahrens der VDI 3760 teilweise mit finanzieller Unterstützung der BAuA über einen mehrjährigen Zeitraum erhoben worden sind. Jetzt wie damals bestand die Aufgabe, den von einer Punktschallquelle auf geraden von ihr wegführenden Pfaden verursachten Schalldruckpegel, der sich aus der Messung ergeben hat, mit den diesen Raum beschreibenden Eingangsdaten zu berechnen bzw. die Abweichungen Rechnung - Messung auf statistisch gesicherter Grundlage zu ermitteln und zu bewerten.

### Eingangsdaten

Die Messungen sind während mehrerer Jahre vorwiegend in Hallen der Getränkeabfüllungs- und Verpackungsindustrie durchgeführt worden. Insgesamt umfasst diese Untersuchung 122 unterschiedliche Industriehallen. **Bild 2** zeigt die Messung mit dem als Signalquelle verwendeten Dodekaeder-Lautsprecher in einem derartigen Abfüllbetrieb.

Ein Datensatz, wie er bei jeder einzelnen Messung in einer dieser Hallen erzeugt wurde, ist in **Bild 3** dargestellt. Er enthält die Hallenabmessungen, die aufgrund der Maschinenbelegung geschätzte Streukörperdichte, die Absorptionsgrade der Raumbegrenzungsflächen, die gemessenen Nachhallzeiten, den Schalleistungspegel der Quelle, die Lage des Messpfads und der Mikrofonpositionen sowie die gemessenen Schalldruckpegel.

Die frequenzabhängigen Absorptionsgrade für reflektierende Innenflächen sind vorher durch Messung der Nachhallzeiten in mehreren noch leeren Hallen der Getränkeabfüllung ermittelt worden.

Die Streukörperdichte war durch Schätzung der Oberfläche aller Einbauten und Anwendung von Gl. (7) aus VDI 3760 bestimmt worden. Berücksichtigt man die komplexe und „zerklüftete“ Struktur der Anlagen entsprechend Bild 2, so wird man allerdings keine allzu hohen Anforderungen an die Genauigkeit des so ermittelten Kennwerts stellen.

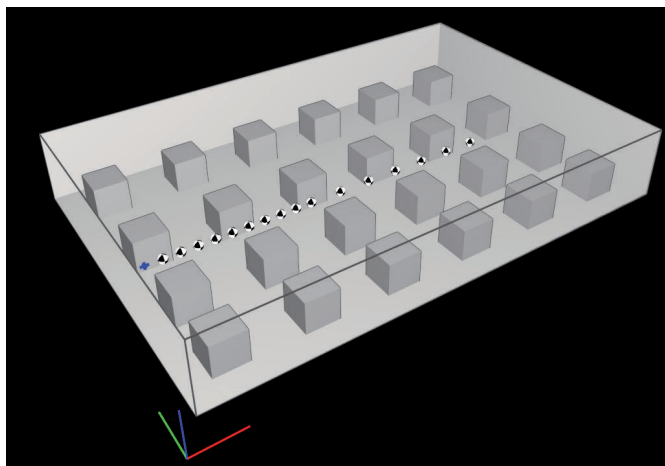
Nun wurden in einem automatisierten Ablauf aus jedem dieser Datensätze nach **Bild 4** ein dreidimensionales Modell generiert, eine Berechnung der von einer Punktschallquelle an den Immissionspunkten verursachten Schalldruckpegel durchgeführt und



**Bild 2** In einer Abfüllanlage aufgestellte Schallquelle zur Messung der Schallausbreitung.

1	3					Objektnr., Zustandsnr.
Industriebetrieb XYZ						Name
mit RA-Massnahmen / mit Maschinen						Zustand
30	20	4.5				Länge / Breite / Höhe
0.045						Streukörperdichte
0.034	0.042	0.043	0.045	0.05	0.06	Streukörperabsorption
0.06	0.073	0.075	0.078	0.085	0.105	Absorptionsgrad Wand 1
0.06	0.073	0.075	0.078	0.085	0.105	Absorptionsgrad Wand 2
0.06	0.073	0.075	0.078	0.085	0.105	Absorptionsgrad Wand 3
0.06	0.073	0.075	0.078	0.085	0.105	Absorptionsgrad Wand 4
0.3	0.55	0.69	0.83	0.87	0.88	Absorptionsgrad Decke
0.06	0.073	0.075	0.078	0.085	0.105	Absorptionsgrad Boden
1.05	0.88	0.72	0.65	0.64	0.58	Nachhallzeiten
107.9	112.8	108.6	104.4	104.6	97.7	Schalleistungspegel Quelle
1.5	9	1.5	30	9	1.5	Pfadanfang und -ende X/Y/Z
1/2/3/4/5/6/7/8/9/10/12/14/16/18/20/22						Abstände Quelle-IP
100	101.7	97.9	95.5	94.8	89.7	IP 1
94.1	98.9	94.5	91.5	92.3	85	IP 2
92.3	94.3	89.9	87.2	86.7	80.8	IP 3
91.3	92.1	88.9	87.4	85.5	78.9	IP 4
:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:
84.6	85.2	76.5	73.8	76.2	68.9	IP 16

**Bild 3** Erhebungs- und Messdaten für eine Industriehalle (Beispiel-auszug).



**Bild 4** Aus dem Datensatz erzeugtes dreidimensionales Modell.

die Pegeldifferenzen Rechnung - Messung für jedes Oktav-Frequenzband ermittelt. Die Lage der Punktschallquelle und der Immissionsorte entspricht jener des Dodekaeder-Lautsprechers und der Aufstellungsorte des Mikrofons bei der Messung.

Bei der Generierung der Berechnungsmodelle mussten aus der im Datensatz jeweils angegebenen Streukörperdichte entsprechende Objekte im Modellraum platziert werden. Werden hierfür im gleichmäßigen Raster mit Abstand  $a$  angeordnete Quader mit der Höhe  $h$  vorausgesetzt, so ergibt sich mit der Raumgrundfläche  $l \times b$ , dem Raumvolumen  $V$  und der Streukörperdichte  $q$  der mittlere Abstand  $d$  für die regelmäßig angeordneten Objektquader zu

$$d = \sqrt{\frac{l \cdot b \cdot (4ah + a^2)}{4Vq}} - a \quad (7)$$

Bild 4 zeigt als Beispiel das mit dem Datensatz von Bild 3 erzeugte Modell, wobei die Quaderabmessungen mit 2 m x 2 m x 2 m vorausgesetzt wurden.

Die Oberfläche der „Maschinenquader“ im Modell wird als diffus reflektierend angenommen, was im Berechnungsmodell durch einen Streugrad von 1 realisiert wird. Aufgrund dieser Voraussetzung hat die detaillierte und hier als regelmäßig vorausgesetzte Anordnung der Maschinenquader keinen wesentlichen Einfluss auf die berechneten Schalldruckpegel. Der Absorptionsgrad dieser Quader entspricht dem von metallischen Oberflächen.

Bei dieser schalltechnischen Untersuchung bestand auch mehrfach die Möglichkeit, die Messung der Schallausbreitung mit demselben Pfad in unterschiedlichen Ausbauständen von ein und derselben Halle durchzuführen. Dies betrifft die Zustände Halle leer und unbehandelt (1), Halle leer aber mit schallabsorbierenden Verkleidungen von Decke und/oder Wänden (2), Halle mit eingebauter Maschinenanlage und mit absorbierenden Verkleidungen (3) sowie Halle mit Maschinenanlage, aber ohne absorbierende Verkleidungen (4).

### Auswertung und Ergebnisdarstellung

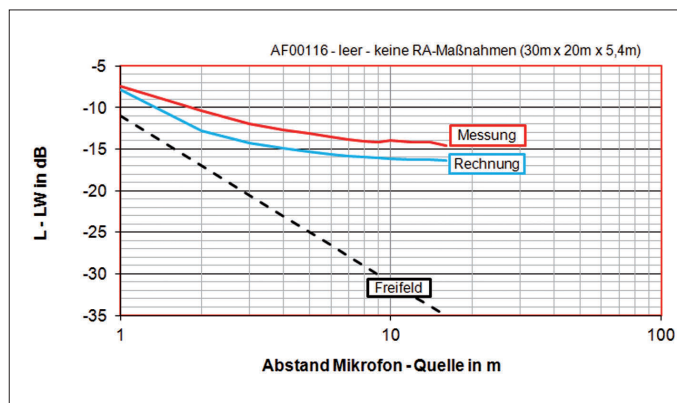
Mit den Bezeichnungen  $L_{W,f}$  für den Schalleistungspegel im Frequenzband  $f$ , mit  $L_{\text{mess},f}$  für den gemessenen Schalldruckpegel im Frequenzband  $f$  und mit  $L_{\text{calc},f}$  für den im Frequenzband  $f$  mit derselben Quellschalleistung berechneten Schalldruckpegel ergeben sich die normierten und der Auswertung zugrunde zu legenden normierten Pegelwerte  $D_{\text{mess},f} = L_{\text{mess},f} - L_{W,f}$  bzw.  $D_{\text{calc},f} = L_{\text{calc},f} - L_{W,f}$ .

In der praktischen Anwendung interessiert i. d. R. die auf ein typisches Frequenzspektrum des Quellen-Schalleistungspegels  $L_{W,f}^*$  bezogene Genauigkeit der Berechnung. Hierzu wird der auf dieses Spektrum bezogene normierte A-Schalldruckpegel  $D_A$  aus den für die Oktavbänder zutreffenden Werten  $D_f$  mit Gl. (8) ermittelt.

$$D_A = 10 \cdot \log \frac{\sum 10^{0,1(D_f + L_{W,f}^*)}}{\sum 10^{0,1L_{W,f}^*}} \text{ dB} \quad (8)$$

Zum Vergleich der mit dem Teilchenverfahren berechneten mit den gemessenen Werten sind in den Diagrammen in den **Bildern 5 bis 7** die normierten Pegelwerte in Abhängigkeit vom Abstand für drei Zustände ein und derselben Halle (Abmessungen 30 m x 20 m x 5,4 m) getrennt dargestellt. Sie beziehen sich auf das genannte typische Spektrum  $L_{W,f}^*$  – ein A-bewertetes Rosa-Rauschen.

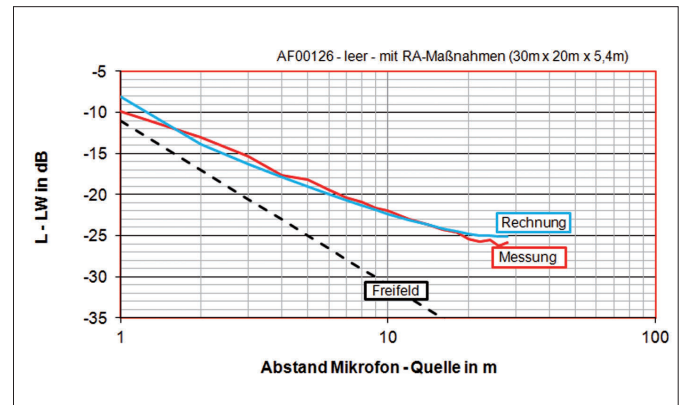
Wie die Messung zeigt auch die Berechnung den Einfluss der absorbierenden Akustikdecke sowie der Maschinenanlage, die den resultierenden Streugrad der Bodenfläche und damit die Diffusität des Schallfelds erhöht. Die Diagramme zeigen eine



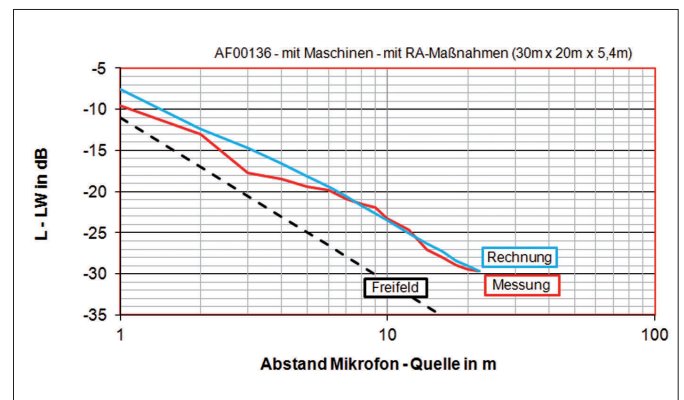
**Bild 5** Berechnete und gemessene Schallausbreitungskurven für eine Halle im Zustand 1.

gute Übereinstimmung der gemessenen Schallausbreitung mit der nach SERT-Verfahren berechneten für diese Halle.

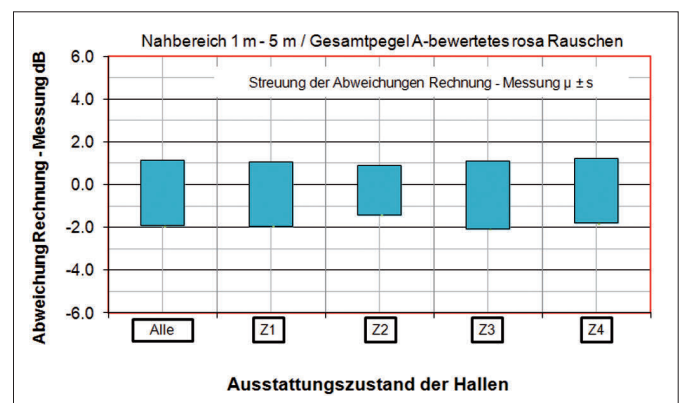
Im Weiteren wurden für alle 122 Hallen zusammen und dann für jeden Zustand getrennt die Differenzen  $D_{A,\text{calc}} - D_{A,\text{mess}}$  für bestimmte Abstandsbereiche hinsichtlich Mittelwert und Standardabweichung untersucht. **Bild 8** zeigt die sich ergebenden Streuungen (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung) für die ersten fünf Punkte im Abstandsbereich bis 5 m, **Bild 9** für den Abstandsbereich 5 bis 16 m. Diese Streuungen sind fast identisch



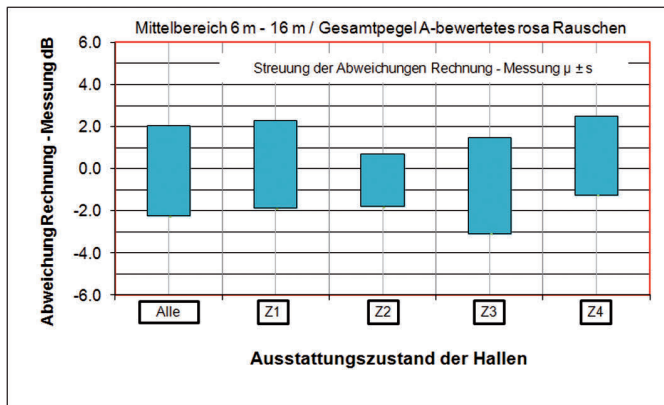
**Bild 6** Berechnete und gemessene Schallausbreitungskurven für dieselbe Halle im Zustand 2.



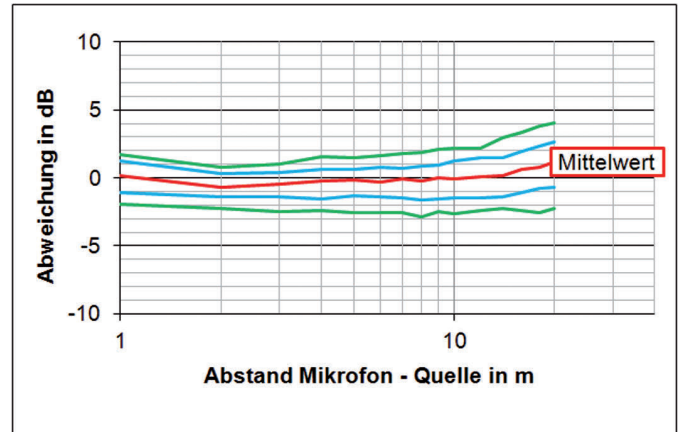
**Bild 7** Berechnete und gemessene Schallausbreitungskurven für dieselbe Halle im Zustand 3.



**Bild 8** Statistische Analyse der Abweichungen Rechnung - naher Abstandsbereich (1 bis 5 m).



**Bild 9** Statistische Analyse der Abweichungen Rechnung – mittlerer Abstandsbereich (5 bis 16 m).



**Bild 10** Abweichung der A-bewerteten Gesamtpegel – 50 % (blau) und 80 % (grün) Bereich.

mit denen, die nach [9] bei Anwendung des Verfahrens nach VDI 3760 ermittelt worden sind.

**Bild 10** schließlich zeigt die Intervalle der Abweichungen Rechnung - Messung, die von 50 % (blau) sowie von 80 % (grün) aller Messwerte nicht überschritten werden. Die Mittelwertkurve (rot) zeigt an, dass die systematische Abweichung Rechnung - Messung in keinem Teilbereich 1 dB übersteigt. Eine bessere Übereinstimmung kann unter Berücksichtigung der nach Einschätzung klassierten Eingangswerte für Absorptionsgrade und Streukörperdichte auch nicht erwartet werden.

Damit ist das beschriebene SERT-Verfahren auch für die Berechnung der Schallausbreitung in Fabrikhallen unterschiedlicher Geometrie und Ausstattung validiert. Allerdings ist es nicht mehr den für das Verfahren nach VDI 3760 geltenden Ein-

schränkungen unterworfen und erlaubt insbesondere eine weitgehend detailliertere Berücksichtigung von beliebigen Raumformen und lokal unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen.



**Dr. Wolfgang Probst,**  
DataKustik GmbH,  
Greifenberg.

## Literatur

- [1] Jovicic, S.: Untersuchungen zur Vorausbestimmung des Schallpegels in Betriebsgebäuden. Müller-BBN-Bericht Nr. 2151. Planegg 1971.
- [2] Jovicic, S.: Anleitung zur Vorausbestimmung des Schallpegels in Betriebsgebäuden. Bericht des Ministers für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes NRW. Düsseldorf 1979.
- [3] Kuttruff, H.: Schallausbreitung in Flachräumen. ACUSTICA 57 (1985), S. 62-70.
- [4] Kurze, U.: Scattering of sound in industrial spaces. J Sound Vibr. 98 (1985) Nr. 3, S. 349-364.
- [5] Schmidt, H.: Schallausbreitung und Schalldämpfung in Flachräumen. ACUSTICA 62 (1986), S. 84-90.
- [6] Schmidt, H.: Praktikables Verfahren zur Vorberechnung der Schallausbreitung sowie zur Ermittlung der Schallabsorption in Werkhallen. VDI-Bericht 629. Düsseldorf: VDI Verlag 1987.
- [7] Probst, W.: Schallabstrahlung und Schallausbreitung – Berechnungsmodelle und Schallleistungsbestimmung. Forschungsbericht Fb 556 der Bundesanstalt für Arbeitsschutz. Dortmund 1988.
- [8] Probst, W.; Neugebauer, G.; Kurze, U.; Jovicic, S.; Stephenson U.: Schallausbreitung in Arbeitsräumen – Einfluß der Raumparameter, Vergleich von Berechnungs- und Meßergebnissen. Forschungsbericht Fb 621 der Bundesanstalt für Arbeitsschutz. Dortmund 1990.
- [9] Probst, W.: Schallausbreitung in Arbeitsräumen II – Einfluß der Raumparameter, Vergleich von Berechnungs- und Meßergebnissen. Forschungsbericht Fb 673 der Bundesanstalt für Arbeitsschutz. Dortmund 1993.
- [10] VDI 3760: Berechnung und Messung der Schallausbreitung in Arbeitsräumen. Berlin: Beuth Verlag 1996.
- [11] Probst, W.: Schallausbreitung in Arbeitsräumen III – Einbeziehung von Richtwirkung, Abschirmung, großen Maschinen und gekoppelten Räumen. Forschungsbericht Fb 841 der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund 1999.
- [12] CadnaR, Software for the calculation and assessment of sound in rooms. www.datakustik.com/produkte/cadnar
- [13] Vorländer, M.: Auralization. Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality. Berlin: Springer Verlag 2008.
- [14] Probst, W.: Die Bestimmung des Absorptionsgrads im „virtuellen“ Hallraum. Eine Anwendung der Simulationsberechnung mit dem Schallteilchenverfahren. Lärmbekämpf. 10 (2015) Nr. 5, S. 204-211.