

# Untersuchungen zum Emissionsschalldruckpegel, bestimmt durch eine Dreikomponentenintensitätsmessung

André Gerlach, Gerhard Hübner, Universität Stuttgart, ITSM

## 1 Einleitung

Nach der vor rund 10 Jahren in Kraft gesetzten Europäischen Maschinenrichtlinie 89/392/EC ist die Geräuschemission zahlreicher Maschinenarten vom Hersteller oder Importeur auch durch den Emissionsschalldruckpegel zu kennzeichnen, der als A-bewerteter Schalldruckpegel an genau festzulegenden Meßorten (Arbeitsplatz) im Freifeld über reflektierender Ebene definiert ist. Für Messungen dieser Größe in Umgebungen, in denen Maschinen und Geräte üblicherweise aufgestellt sind, werden damit Meßwert-Korrekturen erforderlich, um die durch Raumrückwirkung und gegebenenfalls durch Fremdgeräusch verursachte Verfälschung des Meßwertes zu beseitigen. Der Bestimmung dieser Korrekturen ist eine größere Zahl von Veröffentlichungen und basierend hierauf eine Reihe internationaler Standards (ISO 11200, 11201, 11202, 11203 und 11204) gewidmet, die sämtlich auf Messung des Schalldruckes beruhen. Seit einigen Jahren wird auch ein Meßverfahren diskutiert, bei dem der Betrag des Schallintensitätsvektors zu ermitteln ist, wobei davon ausgegangen wird, daß hiermit zumindest näherungsweise der Freifeldschalldruck bestimmt werden kann und so die aufwendigen und z. T. auch recht ungenauen Umgebungs- und Fremdgeräuschkorrekturen überflüssig werden. Die auf dieses Intensitätsverfahren bezogenen Publikationen befaßten sich bisher mit dem „Handling“ bei der Ermittlung des Betrages des Intensitätsvektors und mit der dem noch offenen Anwendungsbereich zugeordneten Meßunsicherheit.

Anläßlich der DAGA '98 Zürich [1] wurde hierzu der Vorschlag unterbreitet, die drei kartesischen Intensitätskomponenten  $L_{I,x}$ ,  $L_{I,y}$  und  $L_{I,z}$  durch sequentielle Messung mittels einer Zwei-Mikrofon-Intensitätssonde zu bestimmen und daraus den Pegel des Betrages des Schallintensitätsvektors zu berechnen:

$$L_{I,xyz} = 10 \lg \left[ \sqrt{\left( 10^{\left\{ \frac{L_{I,x}}{10\text{dB}} \right\}} \right)^2 + \left( 10^{\left\{ \frac{L_{I,y}}{10\text{dB}} \right\}} \right)^2 + \left( 10^{\left\{ \frac{L_{I,z}}{10\text{dB}} \right\}} \right)^2} \right] \text{dB} . \quad (1)$$

Dieses 3-Komponenten-Verfahren hat gegenüber anderen in [1] ebenfalls diskutierten Verfahren folgende Vorteile:

- die Bestimmung des Betrages des Intensitätsvektors kann sowohl für Frequenzbänder als auch für den A-Summenpegel aus einem einmalig gemessenen Satz kartesischer Komponenten erfolgen,
- die Komponenten können nacheinander eingestellt und danach ohne die störende Gegenwart einer Person gemessen werden und
- der Aufwand zur Ermittlung von  $L_{I,xyz}$  hängt nicht davon ab, ob das akustische Zentrum der Schallquelle offensichtlich ist.

In [1] wurde ferner gezeigt, daß im Vergleich zum 3-Komponenten-Verfahren  $L_{I,xyz}$  die anderen untersuchten Verfahren zur Bestimmung des Betrages des Intensitätsvektors bezüglich der unter praktischen Umgebungsbedingungen getesteten Meßunsicherheiten weder wesentliche Vor- noch Nachteile aufweisen.

Die weiteren Publikationen [2] [3] befaßten sich vorzugsweise mit dem 3-Komponenten-Verfahren und teilten Ergebnisse eines eingeschränkten Ringversuches mit, der durch eine größere Vielfalt von Schallquellen (Abmessungen von 0,3 m bis 4 m) und Umgebungen ( $K_{3A}$  - Bereich von 0 bis 12,8 dB) gekennzeichnet war. Alle Einzelheiten dieser Untersuchungen sind in einem Forschungsbericht [4] zusammengefaßt. Inzwischen ist im wesentlichen auf Grund dieser Erfahrungen der Entwurf eines internationalen Standards ISO 11205 [5] in Bearbeitung.

Die Ergebnisse zur Meßunsicherheit des 3-Komponenten-Verfahrens sind in den genannten Untersuchungen durch absolute Abweichungen  $\Delta L_{I,xyz,i} = L_{I,xyz,i} - L_{p,i}$  der ermittelten Intensitäts-

pegel  $L_{I,xyz,i}$  gegenüber den unter Freifeldbedingungen als Bezug bestimmten Schalldruckpegeln  $L_{p,i}$  sowie durch Standardabweichungen  $\sigma_{R,\#i}$  der Intensitätspegel ausgedrückt. Diese Standardabweichungen wurden unter angenäherten Vergleichsbedingungen (siehe ISO 5725 [6]) ermittelt, indem die gleichen Schallquellen und Meßpunkten zugeordneten Meßwertstreuungen in insgesamt 8 verschiedenen Umgebungen bestimmt wurden, dabei aber der Meßgerätesatz sowie die messende Person unverändert blieb. Der Einfluß von künstlich erzeugtem breitbandigen - teils diffus, teils direkt einstrahlendem - Fremdschall mit Pegeln bis zum Gleichstand mit den „Nutz“-schallpegeln war Gegenstand einer weiteren Meßreihe.

Das umfangreiche, vorzugsweise unter praktischen Umgebungsbedingungen erhaltene Datenmaterial zeigte, daß das 3-Komponenten-Intensitätsverfahren für die Bestimmung des Emissionsschalldruckpegels sehr praktikabel ist und dieser mit der Präzision entsprechend einer Klasse-2-Messung bestimmt werden kann.

Eine eingehende Analyse der Ergebnisse deutete allerdings darauf hin, daß es durch

- Beachtung der Dynamik des Intensitätsmeßgerätes sowie
- Identifikation des am Meßort festzustellenden Schalleinfallswinkels und damit durch
- eine genauere Abgrenzung des Anwendungsbereiches des Meßverfahrens

möglich sein sollte, die Meßunsicherheitsgrenzen weiter herabzusetzen. Über diese weiterführenden Untersuchungen wird anschließend berichtet.

## 2 Abgrenzung des Anwendungsbereiches des 3-Komponenten-Intensitätsverfahrens

### 2.1 Dynamikanforderungen

Bei Schallintensitätsmessungen muß die zur Verfügung stehende Meßgerätedynamik  $L_D$  und die im Meßpunkt vorgefundene Feld-dynamik  $L_{p,i} - L_{I_n,i}$  grundsätzlich folgender Relation genügen:

$$L_D \geq L_{p,i} - L_{I_n,i} . \quad (2)$$

Dabei sind  $L_{p,i}$  bzw.  $L_{I_n,i}$  die im Meßpunkt  $i$  ermittelten Schalldruck- bzw. der in  $n$ -Richtung gemessene Schallintensitätspegel. Die Meßgerätedynamik ist bestimmt durch

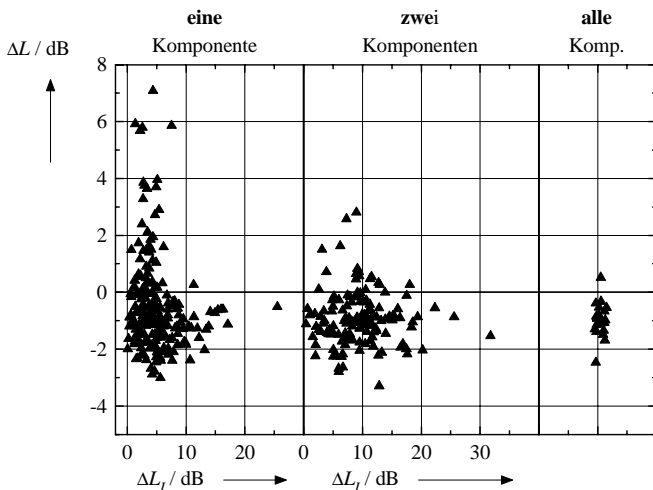
$$L_D = 10 \lg \left[ \frac{1}{|I_{\text{res}}|} \bar{p}^2 \right] \text{dB} - K ; \text{sgn}(I_{\text{res}}) , \quad (3)$$

wobei  $I_{\text{res}}$  die vom Gerät angezeigt Restintensität ist, die sich ergibt, wenn die beiden Mikrofone der Zwei-Mikrofon-Sonde dem gleichem Schalldruck  $p(t)$  ausgesetzt sind, die Intensität also gleich Null ist.  $K$  ist ein Abschlag zur Sicherstellung kleiner Meßfehler. Üblicherweise verwendet man für die Genauigkeitsklassen 1 und 2 ein  $K = 10$  dB und für die Klasse 3  $K = 7$  dB .

Bei Anwendung des 3-Komponenten-Verfahrens könnte man zunächst verlangen, daß die Bedingung (2) für alle in Gleichung (1) einzusetzenden Intensitätskomponenten erfüllt sein muß, um auch den Betrag des Intensitätsvektors mit der entsprechenden Genauigkeit zu bestimmen. Geht man jedoch von üblicherweise unterschiedlich großen Intensitätskomponenten aus, so tritt auch der Fall ein, daß für die Messung einer sehr kleinen Komponente einerseits die Felddynamik  $L_{p,i} - L_{I_n,i}$  und somit auch die Anforderung nach Gleichung (2) sehr groß wird, andererseits eine kleine Komponente zum Betrag des resultierenden Intensitätsvektors nur einen kleinen Beitrag liefert. Größere Fehler bei der Bestimmung einer solchen Komponente könnten also in inkaufgenommen werden. Damit er-

scheint es möglich, abhängig vom Abstand zwischen den Beträgen der Intensitätskomponenten die Dynamikprüfung der Komponenten unter Verzicht auf die kleine(n) Komponente(n) und damit für weniger als alle 3 Komponenten durchzuführen.

Deshalb wurde der absolute Fehler des Intensitätsbetragspegels  $\Delta L = L_{I,xyz} - L_{p,ref}$  in Abhängigkeit von der Anzahl der Intensitätskomponenten untersucht, die die Dynamikanforderung (2) erfüllen. In Bild 1 ist  $\Delta L$  für alle untersuchten Meßpositionen und alle Kombinationen aus Schallquellen und Umgebungen in 3 zugeordneten Spalten eingetragen, die sich dadurch unterscheiden, daß das Dynamikkriterium nach Gleichung (2) für jeweils eine, zwei oder alle Komponenten erfüllt wurde. Abszisse ist dabei die Differenz  $\Delta L_I = L_{I,ok} - L_{I,not}$  der größten Komponente  $L_{I,ok}$ , die die Anforderung erfüllt, und der größten Komponente  $L_{I,not}$ , die diese nicht erfüllt.



**Bild 1:** Absoluter Fehler  $\Delta L$  des 3-Komponenten-Verfahrens; Ergebnisse sortiert in Abhängigkeit von der Anzahl der Intensitätskomponenten die den Dynamikanforderungen mit  $K = 10$  dB genügen

Bild 1 zeigt einen klaren Zusammenhang zwischen dem absoluten Fehler und der Anzahl der Komponenten, die der Dynamikanforderung (2) genügen. Erfüllen alle drei Komponenten Gleichung (2), so liegen die absoluten Abweichungen überwiegend zwischen 0 dB und -2 dB. Bei 2 qualifizierten Komponenten liegen die Abweichungen zwischen 3 dB und -3 dB - dies entspricht der Genauigkeit einer Klasse-2-Messung. Nach diesen Ergebnissen wird vorgeschlagen, daß mindestens 2 Intensitätskomponenten die Dynamikanforderung erfüllen müssen.

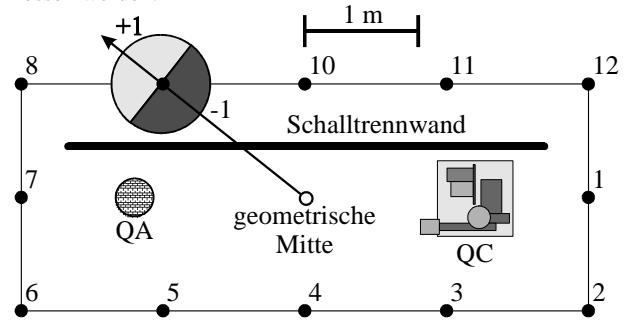
## 2.2 Meßpositionen im Schattenbereich einer Schallquelle

Es wurde im Weiterem eine Schallquelle bestehend aus 2 im Abstand von 3 m auf dem Fußboden stehenden Teilschallquellen untersucht, in deren unmittelbarer Nähe sich eine Schalltrennwand (Größe 4,2 m x 1,75 m) befindet. Die Meßpunkte sind sowohl auf der Seite der Teilschallquellen im Direkt(schall)bereich als auch abgewandt im (Schall)Schattenbereich festgelegt (Bild 2). Die Messungen wurden in 7 Umgebungen, den reflexionsarmen Raum eingeschlossen, durchgeführt. Mit dieser Anordnung sollte eine Situation nachgebildet werden, bei der von einer größeren Maschine der Schall vorwiegend nach einer Seite abgestrahlt wird, während sich Arbeitsplätze auf der anderen, nicht direkt eingestrahlten Seite befinden.

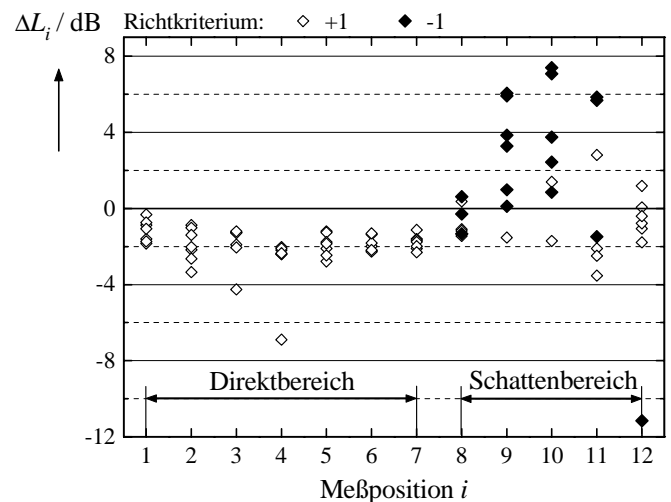
Wie Bild 3 zeigt, sind im Schattenbereich die absoluten Abweichungen  $\Delta L$  überwiegend deutlich größer als die im Direkt-schallbereich. Um eine Meßsituation mit einem Meßpunkt im Schattenbereich einer Schallquelle zu erkennen und gegebenenfalls vom Anwendungsbereich des Meßverfahrens ausschließen zu können, müßte man bei einem auf Schalldruckmessungen beruhenden Verfahren zusätzlich die Richtwirkung der Schallquelle durch Messung auf einer die Quelle einschließenden Hüllfläche oder einer

Umfangslinie bestimmen. Bei dem hier untersuchten Intensitätsverfahren ist dies nicht erforderlich, da sich die Richtung des Intensitätsvektors im Meßpunkt aus den 3 gemessenen Komponenten berechnen läßt. Die bei den Messungen ermittelten Vektor-Richtungen kann man in zwei Gruppen einteilen (Bild 2), wobei der Vektor der Intensität im Meßpunkt bei der einen Gruppe von der Schallquelle weg- (hellgraue Halbkugel, mit +1 bezeichnet) und bei der anderen zur Quelle hinzeigt (dunkelgraue Halbkugel, -1).

Meßpositionen, in denen der Intensitätsvektor auf die Schallquelle hinzeigt und die zu großen Abweichungen führen (Bild 3), können damit durch dieses Kriterium vom Anwendungsbereich der ISO 11205 zur Vermeidung der größeren Abweichungen ausgeschlossen werden.



**Bild 2:** Zusammengesetzte Schallquelle QY; Anordnung der Schallquellen, der 1,75 m hohen Schalltrennwand und der Meßpositionen in 1,5 m Höhe



**Bild 3:** Schallquelle QY: absolute Abweichungen  $\Delta L_i$  für alle Umgebungen; Richtung des Schallintensitätsvektors jeweils gekennzeichnet

## 3 Literatur

- [1] HÜBNER, G. ; GERLACH, A.: *Bestimmung des Emissionsschalldruckpegels am Arbeitsplatz mit Hilfe von Schallintensitätsmessungen - Grundlagen und erste Ergebnisse*. 24. Jahrestagung für Akustik DAGA '98, Zürich, 1998, 180 - 181
- [2] HÜBNER, G. ; GERLACH, A.: *Determination of emission sound pressure levels using three-component sound intensity measurements*. European Conference on Noise Control Euro-Noise 98 München, 1998, Volume II, 807 - 812
- [3] HÜBNER, G. ; GERLACH, A.: *Determination of emission sound pressure levels using sound intensity measurements - comparison of different intensity methods*. International Congress on Noise Control Engineering Inter-Noise '98, Christchurch, New Zealand, 1998, CD-ROM
- [4] HÜBNER, G. ; GERLACH, A.: *Bestimmung des Emissionsschalldruckpegels am Arbeitsplatz mit Hilfe der Schallintensitätsmessung*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin BAuA, Dortmund: Wirtschaftsverlag NW, 2000, im Druck.
- [5] ISO/2<sup>nd</sup> CD 11205: 1999-05-11 *Acoustics - Determination of emission sound pressure levels in situ using sound intensity*.
- [6] ISO 5725: 1994 *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results*.