

# Gedanken zur Qualifizierung reflexionsarmer Räume, Teil 1

Hans-Joachim Milz<sup>1</sup>, Thorsten Bombelka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Werner Genest und Partner Ingenieurgesellschaft mbH, 67061 Ludwigshafen, E-Mail: milz@genest.de

<sup>2</sup> Werner Genest und Partner Ingenieurgesellschaft mbH, 67061 Ludwigshafen, E-Mail: bombelka@genest.de

## Einleitung

Die Bestimmung des Schalleistungspegels nimmt in der akustischen Messtechnik einen breiten Raum ein. Die Verfahren zur Bestimmung des Schalleistungspegels im freien Schallfeld nach dem Hüllflächenverfahren sind in internationalen Normen [1, 2] festgelegt. Auch für andere Messaufgaben, wie zum Beispiel die Kalibrierung oder Bestimmung der Richtwirkung von Mikrofonen, Schallpegelmessern und Lautsprechern, sind Freifeldbedingungen von großer Wichtigkeit.

Dieser Beitrag beschäftigt sich ausschließlich mit der Qualifikation des freien Schallfelds nach den Verfahren, wie sie in den internationalen Normen [1,3] beschrieben werden.

## Grundlagen der Qualifizierung des freien Schallfelds

Prinzipiell ist zu prüfen, ob sich im Raum bei jeder beliebigen Position der Schallquelle ein freies Schallfeld ausbildet, d.h., ob der gemessene Schalldruckpegel dem aus bekannter Schalleistung der Quelle und bekanntem Abstand zwischen Quelle und Aufpunkt berechneten Intensitätspegel entspricht. Je nach Anforderung an die gewünschte /erforderliche Messgenauigkeit kann ein Toleranzbereich festgelegt werden, der die zulässigen Abweichungen vom idealen Freifeld begrenzt.

Formal bedeutet die Qualifizierung des freien Schallfelds eine Überprüfung aller Punkte im Raum bei allen Frequenzen und allen Quellpositionen. Da es beliebig viele Punkte im Raum, beliebig viele Frequenzen und beliebig viele Quellpositionen gibt, wäre das eine beliebig aufwändige Aufgabe. Es sind daher Strategien zu entwickeln, um den messtechnischen Aufwand zu begrenzen. So lässt sich z. B. die Anzahl der Quellpositionen beschränken. Üblicherweise kann eine typische Quellposition angenommen werden, die normalerweise mit dem Zentrum des Raums übereinstimmt. Um die Anzahl der zu überprüfenden Punkte einzuschränken, kann es sinnvoll sein, im Raum Bereiche auszuwählen, in denen die größten Fehler zu erwarten sind. Auch kann die Anzahl der einzelnen Messfrequenzen eingeschränkt werden, da im Normalfall keine schmalbandig begrenzten Störungen des freien Schallfelds zu erwarten sind. Letztendlich führen diese Einschränkungen zu einer eingeschränkten Aussagekraft in dem Sinne:

Wird eine Überschreitung der zulässigen Toleranzen festgestellt,

- ist der Raum nicht qualifiziert.

Wird keine Überschreitung der zulässigen Toleranzen festgestellt,

- wurde nicht intensiv genug gesucht,
- war die Messmethodik ungeeignet,
- besteht die Hoffnung, keinen Bereich zu finden, in dem die Toleranzen überschritten werden.

Fazit: Die Qualifikationsprozedur besteht aus dem Versuch, (gestörte) Stellen im Raum zu finden, die nicht den Qualifikationsanforderungen genügen. Sollten trotz intensiver Suche keine gestörten Stellen gefunden werden, wird angenommen, dass der Raum den Qualifikationsanforderungen entspricht.

## Struktur des gestörten freien Schallfelds

Der Einfachheit halber soll nur die Überlagerung einer primären mit einer sekundären Schallwelle betrachtet werden. Dabei ist unter primärer Schallwelle der Schallenergiefluss direkt von der Quelle zum Aufpunkt zu verstehen. Mit sekundärer Schallwelle ist der Schallenergiefluss gemeint, der nicht direkt von der Quelle zum Aufpunkt gelangt, z.B. einmal an einer Störstelle reflektiert wird.

Abhängig vom Prüfsignal ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften des überlagerten Schallfelds.

Bei einem tonalen Signal mit unendlicher Periodizität überlagern sich primäre und sekundäre Schallwelle wegen der unendlichen Kohärenzlänge an allen Punkten im Raum jeweils mit fester Phasenbeziehung zu einem dreidimensionalen Stehwellenfeld. Die Struktur dieses Stehwellenfelds lässt sich über die Eigenschaften der beiden Schallwellen abschätzen. So wird es im Raum Punkte geben, an denen sich die Druckmaxima beider Wellen überlagern. Unter der Maximal-Annahme einer vollständigen Reflexion und einer vernachlässigbaren Umweglänge der Sekundärwelle sind beide Schalldrücke gleich, was zu einer Verdoppelung des Schalldrucks und damit zu einer Schalldruckpegelerhöhung von 6 dB führt. Unter der ähnlichen Maximal-Annahme einer Phasendifferenz von 180° überlagern sich ein Maximum und ein Minimum. Daraus ergäbe sich eine Auslöschung mit einem Schalldruck von 0 Pa, bzw. mit einem Schalldruckpegel von  $-\infty$  dB. Auf einem Pfad entlang der primären Schallwelle stellt sich dann eine (Pegel-)Stehwelligkeit ein, die breite Maxima und sehr schmale, tiefe Minima zeigt. Die Stehwellenlänge ist abhängig vom Winkel zwischen primärer und sekundärer Schallwelle, theoretisch ergeben sich Stehwellenlängen von einer halben Schallwellenlänge bei gegeneinander laufenden Wellen (Winkel 180°) und unendlich bei mit-einander laufenden Wellen (Winkel 0°). Typischerweise liegt sie in

reflexionsarmen Räumen zwischen der halben und etwa der doppelten Schallwellenlänge.

Im Gegensatz zu einem tonalen Signal mit unendlicher Periodizität besteht Rauschen aus kurzen Schallsequenzen mit stochastischer Verteilung von Frequenz und Amplitude. Diese Sequenzen haben aufgrund ihrer kurzen Dauer nur eine eingeschränkte Kohärenzlänge. Nur bei geringen Wegdifferenzen von wenigen Schallwellenlängen zwischen primärer und sekundärer Schallwelle können Interferenzen auftreten und ähnliche Stehwellenfelder erzeugen, wie sie bei tonalen Signalen entstehen. Bei größeren Wegdifferenzen erfolgt eine energetische Überlagerung der beiden Schallwellen. Unter der Maximal-Annahme gleicher Amplituden wird der Schalldruckpegel um 3 dB erhöht. Eine Auslöschung kann wegen der fehlenden Kohärenz nicht stattfinden. Ebenso ist keine Stehwellenbildung möglich.

### Idee der Qualifizierung des freien Schallfelds

Sinnvoll erscheint der Einsatz einer Schallquelle mit kugelförmiger Richtcharakteristik, die selbst das Schallfeld im Raum nicht stört. Sie sollte an einer für die geplante Anwendung des reflexionsarmen Raums typischen Stelle positioniert werden.

Der Auswahl der zu überprüfenden Punkte im Raum kommt eine große Bedeutung bei. Neben optisch auffälligen möglichen Störstellen, wie z. B. Türeinfassungen, Durchbrüchen oder Einbauten, können auch nicht sichtbare/offensichtliche Objekte das freie Schallfeld beeinflussen. Insbesondere sollte auch die Funktionstüchtigkeit der Verkleidung der Raumbegrenzungsflächen betrachtet werden. So sollten Bereiche näher untersucht werden, in denen Störungen des freien Schallfelds vermutet/erwartet werden könnten.

Zur Überprüfung der Qualität des freien Schallfelds ist es zwingend notwendig, die Schallleistung der Quelle und den Abstand zwischen Quelle und Aufpunkt zu kennen, um den gemessenen Schalldruckpegel mit dem theoretisch berechneten Schallintensitätspegel zu vergleichen. Etabliert hat sich ein Verfahren, bei dem auf einem graden von der Schallquelle wegführenden Pfad die ortsabhängigen Schalldruckpegel erfasst werden. Die Pfade sollten zu den möglichen Störstellen oder an ihnen vorbei führen. Zur Überprüfung der Innenauskleidung kann der Pfad senkrecht zu einer Raumbegrenzungsfläche führen.

Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass Störstellen nicht schmalbandig wirken. Insofern genügt es bei einzelnen Frequenzen zu messen. In der Nähe der unteren und der oberen Grenzfrequenz des Raums sollte eine höhere Frequenzdichte gewählt werden, im mittleren Frequenzbereich kann eine geringere Frequenzdichte ausreichend sein.

### Qualifizierung mit tonalem Signal

Wegen der unendlichen Kohärenz des tonalen Prüfsignals stellt sich im Raum ein dreidimensionales Stehwellenfeld ein, das im Normalfall breite Maxima und schmale tiefe Minima aufweist. Diese Struktur lässt sich beispielsweise auf einem gradlinigen Pfad bei kontinuierlicher Erfassung der ortsabhängigen Schalldruckpegel erfassen.

Bei analoger Messtechnik (Pegelschreiber) müssen Mikrofon-Zuggeschwindigkeit, analoge Verarbeitung und grafische Darstellung (Pegelschrieb) derart aufeinander abgestimmt sein, dass der tatsächliche ortsabhängige Pegel korrekt erfasst wird. Insbesondere müssen die Minima korrekt wiedergegeben werden. Der Startpunkt des Mikrofons kann auf dem Pegelschrieb gut abgebildet werden, wenn der Zugvorgang des Mikrofons gestartet wird nachdem Prüfsignal und Schreibvorgang aktiviert wurden. Der Startpunkt zeigt sich am Übergang vom konstanten Pegel zum Beginn der abfallenden Kurve.

Digitale Messtechnik ist im Gegensatz zur analogen Messtechnik nicht in der Lage kontinuierlich zu messen. Der Messpfad muss daher in quasistationäre Abschnitte aufgeteilt werden. Pro Abschnitt muss genügend Messdauer zur Verfügung stehen, um einen stabilen Messwert zu erhalten (mindestens die erste Dezimale muss stabil sein, 0,1 dB können bereits 10% des Toleranzbandes sein). Andererseits müssen die Abschnitte genügend kurz sein, um insbesondere die Minima korrekt zu erfassen. Letztendlich ergibt sich aus minimaler Messdauer und maximaler Abschnittlänge die maximale Zuggeschwindigkeit. Jedem Messabschnitt kann über die Zuggeschwindigkeit und dem Messzeitpunkt der geometrische Ort zugeordnet werden. Aus der Beziehung zwischen Ort und Ortspegel lassen sich sowohl die Schallleistung der Quelle als auch der Startabstand der akustischen Zentren zwischen Schallquelle und Mikrofon ermitteln.

### Qualifizierung mit breitbandigem Signal

Wegen des stochastischen Charakters des Rauschens sind lange Integrationszeiten notwendig, um stabile Schalldruckpegel in den einzelnen Frequenzbändern zu erhalten. Das ist nur an festen Mikrofonpositionen möglich. Beim kontinuierlichen Ziehen oder zu kurzen Integrationszeiten wird die eigentliche Messung durch die Dynamik des Rauschens überlagert, was zu rauen Kurven führt, deren Rauigkeit den zulässigen Toleranzbereich überschreiten kann.

In den Frequenz- und Ortsbereichen mit inkohärenten primären und sekundären Schallwellen ist kein feines Messraster (bezogen auf die Wellenlänge) notwendig, da es wegen der energetischen Überlagerung nur strukturell breite Pegelerhöhungen aber keine schmalen Minima gibt. Insofern kann gegenüber der tonalen Anregung ein wesentlich gröberes Messraster verwendet werden.

In den Bereichen mit (teil-)kohärenten primären und sekundären Schallwellen sind feinere Messraster notwendig, die insbesondere die Minima korrekt abbilden.

### Literatur

- [1] DIN EN ISO 3744, Bestimmung der Schallleistung im reflexionsarmen Halbraum, Klasse 2
- [2] DIN EN ISO 3745, Bestimmung der Schallleistung im reflexionsarmen Raum, Klasse 1
- [3] ISO 26101, Test methods for the qualification of free-field environments