

Ermittlung raumakustischer Parameter bei Einfluss verschiedener Störschallarten

Jan Selzer, Florian Schelle

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA),

53757 Sankt Augustin, Deutschland, Email: jan.selzer@dguv.de

Einleitung

Unterschiedliche Räume können in der Praxis häufig nicht auf ihre raumakustischen Eigenschaften und Parameter hin untersucht werden, da oft hohe Fremdgeräuschpegel vorliegen oder andere im Raum vorherrschende Signale die Ermittlung der Kenngrößen stören. Beispielsweise muss nach DIN EN ISO 3382-2 [1] für die Ermittlung der Nachhallzeit T_{20} mit abgeschaltetem Rauschen ein Signal-Rauschabstand (SNR) von 35 dB erreicht werden. Durch Korrelationsmesstechniken können auch bei geringeren Signal-Rauschabständen raumakustische Kenngrößen bestimmt werden [1][2]. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn einerseits die vorhandenen Schallquellen, die zur Ermittlung der Kenngrößen verwendet werden, keinen hohen Schalleistungspegel erreichen können. Andererseits können so Messungen durchgeführt werden, ohne eine zusätzliche Einschränkung oder erhöhte Belastung für die Beschäftigten darzustellen. Eine genaue Ermittlung der raumakustischen Kenngrößen als Einflussfaktor für die Arbeitsumgebung ist dann wichtig, wenn keine Abschätzung anhand von Erfahrungswerten oder Datenblättern durchgeführt werden kann. Die Kennwerte können anschließend mit dem Stand der Technik beispielsweise gemäß den Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (TRLV), Teil Lärm [3] oder der DIN 18041 [4] verglichen werden. Weiterhin können anhand von Simulationen mit den entsprechenden akustischen Kenngrößen mögliche Optimierungsmaßnahmen evaluiert werden.

In diesem Beitrag wird ein Versuch dargestellt, bei dem mit Hilfe von MLS-Messtechnik (*maximum length sequence*) die Raumimpulsantwort unter verschiedenen Störschallbedingungen mit einem kommerziellen Messsystem ermittelt wurde. Die aus der Raumimpulsantwort berechnete Nachhallzeit wird anschließend als eine der wichtigsten raumakustischen Kenngrößen evaluiert. Fünf verschiedene Signale wurden als Störsignale definiert. Zur korrekten Wiedergabe der Störsignale wurden diese vorab für die Störschallquelle entzerrt. Der Signal-Rauschabstand zwischen dem Nutzsignal (Messsignal) und den Störsignalen wurde zwischen -6 bis $+6$ dB in 3 dB-Schritten variiert. Die Messungen mit MLS-Signal wurden in einem Seminarraum des IFA in Sankt Augustin durchgeführt. Nachfolgend werden die theoretischen Hintergründe präsentiert. Anschließend werden die Messungen und die Messergebnisse vorgestellt.

Hintergründe

Die MLS-Technik ist seit den 60ern bekannt [5] und wurde bereits u. a. mit verschiedenen Methoden zur Ermittlung der Nachhallzeit verglichen [6]. Dabei wird die Messung mittels MLS-Technik als „Möglichkeit zur Messung der Nachhallzeit in lauten Umgebungen“ angepriesen [6]. Die Grundlagen der MLS-Messtechnik werden u. a. ausführlich in [7] und [8] behandelt. Für die vorliegende Anwendung liegt der maßgebliche Vorteil der Korrelationsmesstechnik darin, mehrere Perioden des MLS-Signals zu emittieren und dadurch bei der Berechnung der Raumimpulsantwort eine höhere sogenannte *peak to noise ratio* zu erreichen, während der tatsächliche Signal-Rauschabstand zwischen Mess- und Störsignal gleich bleibt [9]. Diesen Vorteil hat sich auch NIELSEN zu Nutze gemacht und u. a. bei klassischer Musik mittels MLS-Messtechnik und deutlich leiserem Messsignal (SNR = -10 dB) unter Inbezugnahme mehrerer MLS-Perioden die Raumimpulsantwort ermittelt [10]. In diesem Zuge werden in [10] verschiedene Möglichkeiten der SNR-Betrachtung theoretisch aufgezeigt und in praktischen Beispielen präsentiert. Dabei wird schließlich die Aussage getroffen, dass über genügend Mittelungen eine Bestimmung der Raumimpulsantwort möglich ist. Zu beachten ist jedoch, dass dies vor allem für stationäre Störsignale (wie beispielsweise Rauschen) gilt. Bei nichtstationären Signalen sind, aufgrund der Schwankung des SNR, Mittelungen über längere Zeiträume notwendig [10].

Aus der quadrierten, gefilterten Raumimpulsantwort kann anschließend über eine Rückwärtsintegration für jedes Oktavband eine Abklingkurve erzeugt werden, die zur Auswertung der Nachhallzeit herangezogen werden [1]. Zur Messung mit Maximalfolgen wird in DIN EN ISO 18233 [2, Anhang A] ein normativer Hintergrund gegeben. Die Länge der Maximalfolge t_{MLS} muss gleich oder größer der tatsächlichen Nachhallzeit T sein und lässt sich durch

$$t_{\text{MLS}} = \frac{2^N - 1}{f_s} \geq T \quad (1)$$

bestimmen (nach [2] und [9]). N ist die ganzzahlige Ordnung der Maximalfolge und f_s beschreibt die Abtastfrequenz des Systems. Eine Ermittlung der Nachhallzeit mit MLS-Technik sollte dabei nach DIN EN ISO 18233 in einem Pegelbereich durchgeführt werden, der dem „*betreffenden klassischen Verfahren* [entspricht]“ [2, Anhang A.3.3]. Es wird jedoch erwartet, dass „*ein verbesserter Störabstand erreicht werden* [kann]“ [1, Absatz 5.3.2].

Durch die Einführung des Parameters Δ kann die Verbesserung der *peak to noise ratio* gegenüber dem klassischen Verfahren angegeben werden [2][9]:

$$\Delta \approx 10 \lg \left(\frac{13,8 \cdot n \cdot t_{\text{MLS}}}{T} \right) \text{dB} \quad (2)$$

Δ ist abhängig von der Länge der Maximalfolge t_{MLS} (Gleichung 1) und der tatsächlichen Nachhallzeit T sowie der Periodenanzahl n . Mit Verdoppelung der Periodenanzahl wird eine Vergrößerung des effektiven Störspannungsabstandes (*peak to noise ratio*) um 3 dB erreicht, während sich der tatsächliche SNR nicht verändert.

Somit sind Maximalfolgen zur Ermittlung der Raumimpulsantwort in lauten Arbeitsumgebungen bestens geeignet.

Messungen

Die Messungen mit MLS-Signal wurden in einem Seminarraum des IFA in Sankt Augustin mit Abmessungen von $8,2 \times 7,4 \times 3 \text{ m}^3$ durchgeführt. Zur Ermittlung der raumakustischen Parameter wurden unter einer Ruhebedingung, die als Referenzbedingung gilt, sowie mit fünf verschiedenen Störsignalen Messungen an vier Messpunkten durchgeführt. Der Störsignallautsprecher befand sich während der Messungen in einem definierten Abstand von 2 m seitlich zum Messmikrofon, um so an jedem Punkt ein konstant bleibendes Störsignal zu emittieren. Die äquivalenten A-bewerteten Schalldruckpegel des MLS-Signals wurden in 3 dB-Schritten von -6 bis $+6$ dB zum konstant bleibenden Schalldruckpegel des jeweiligen Störsignals verändert, sodass bei fünf verschiedenen Pegeldifferenzen ΔL zwischen Stör- und Nutzsignal gemessen wurde. Die Abstände zwischen der MLS-Signalschallquelle und der Messposition betragen $\{2,08; 3,20; 4,15$ und $4,99\}$ m. Der Raum ist mit 12 Tischen in hufenförmiger Anordnung, 17 gepolsterten Stühlen, einer Akustikdecke, einer Fensterfront mit Lamellenstores und holzvertäfelten Wänden ausgestattet. Es wurden insgesamt $4 \cdot 5 \cdot 5 + 4 = 104$ Impulsantworten aufgezeichnet (Messpunkte \cdot Störsignalabstände \cdot Störsignalarten + Referenzmessungen). Der für die Auswertung interessante Frequenzbereich liegt in den Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz, sodass auch Aussagen über die Parameter nach DIN EN ISO 3382-3 [11] möglich sind.

Die hier durchgeführten Messungen wurden mit einer Abtastrate von $f_s = 48 \text{ kHz}$ mit einer MLS-Ordnung von $N = 19$ durchgeführt. Es wurde explizit keine Mittelung durchgeführt ($n = 1$), um die Ergebnisse im *worst case* Szenario betrachten zu können. Die erwartete Verbesserung des SNR lag bei $\Delta \approx 25 \text{ dB}$ (vgl. Gleichung 2). Die hier gezeigten SNR-Szenarien zeigen daher Werte, die über die Verbesserung Δ hinausgehen.

Störsignale

Übliche Geräusche bei betrieblichen Messungen sind Maschinengeräusche, Sprache oder auch Musik als Hintergrundbeschallung in Verkaufsräumen oder Werkstätten.

Um einen Querschnitt der verschiedenen Geräuscharten darzustellen, wurden folgende Störsignale ausgesucht:

- Rosa Rauschen
- STIPA-Testsignal
- Musik (Ausschnitt *Kings of Leon - Use Somebody*)
- Sprachsignal (Professioneller Sprecher: "*Dies ist ein Testsignal ...*")
- Sprachgeformtes Rauschen nach [11, Tabelle 1]

Diesen Signalen können verschiedene Eigenschaften, wie beispielsweise *rauschhaft* oder *moduliert* zugeordnet werden. Die Signale *Rosa Rauschen* und *sprachgeformtes Rauschen* wurden selbst erstellt. Das *Sprach-* und *STIPA-*Signal wurde einer Testsignal-CD entnommen. Um eine determinierte Wiedergabe der Störsignale zu gewährleisten, wurde der Lautsprecher, wie folgt beschrieben, entzerrt.

Entzerrung

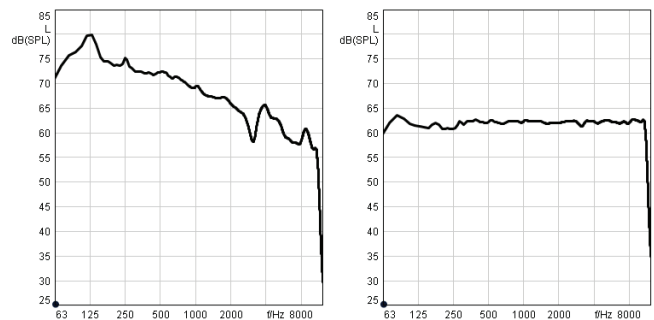


Abbildung 1: Links: FFT mit 1/12-Oktavglättung des logarithmischen Sweeps, abgespielt über den Störsignallautsprecher; rechts: FFT mit 1/12-Oktavglättung des erneut aufgezeichneten, aber des nun entzerrten logarithmischen Sweeps.

Zur Entzerrung der Signale für den Störsignallautsprecher wurde dieser im reflexionsarmen Raum in einer Entfernung von 2 m zum Messmikrofon aufgestellt. Die Entzerrung wurde mit einem logarithmischen Sweep-Signal mit einer unteren Grenzfrequenz von $f_u = \frac{f_{m,1}}{\sqrt[6]{2}} = 90 \text{ Hz}$ und der oberen Grenzfrequenz $f_o = \sqrt[6]{2} \cdot f_{m,2} \approx 11225 \text{ Hz}$ durchgeführt. Für $f_{m,1}$ und $f_{m,2}$ werden folgende Werte angegeben: $f_{m,1} = 100 \text{ Hz}$ als unteres Terzband des 125 Hz Oktavbands und $f_{m,2} = 10 \text{ kHz}$ als oberes Terzband der 8 kHz-Oktave (Gleichungen nach [12]). Das Messergebnis wurde invertiert, der Punkt seines Maximums als 0 dB-Punkt gewählt und anschließend diese Kurve als Filter für alle Signale außer *Musik* verwendet. Da für die Musikwiedergabe keine spektralen Anforderungen gestellt wurden, wurde dieses Signal nicht entzerrt. In Abbildung 1 wird links das geglättete Schmalbandspektrum des aufgezeichneten logarithmischen Sweeps gezeigt, welches zur Entzerrung genutzt wurde. Rechts ist das Schmalbandspektrum des mit dem daraus resultierenden Filter entzerrten und erneut aufgezeichneten logarithmischen Sweeps zu sehen. Durch die Linearisierung der Störgeräusche können diese nun determiniert wiedergegeben werden.

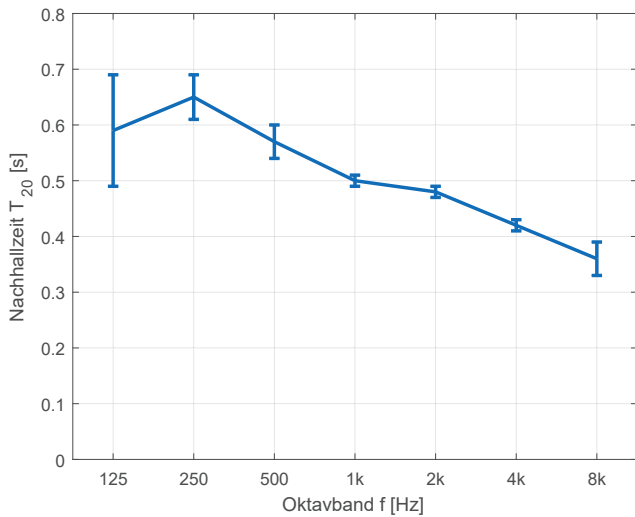


Abbildung 2: Nachhallzeit aus integrierter Impulsantwort unter Referenzbedingung (Ruhe) mit Angabe der Standardabweichung.

Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der aus der Impulsantwort berechneten Nachhallzeit dargestellt. Dabei gilt die unter der Ruhebedingung ermittelte Nachhallzeit (vgl. Abbildung 2) als Referenz für die unter den verschiedenen Störschallbedingung ermittelten Nachhallzeiten. In Abbildung 3 werden die prozentualen Abweichungen der über die Oktavbänder 125 Hz bis 8 kHz gemittelten Nachhallzeiten unter den verschiedenen Störschallbedingungen mit unterschiedlichen Signal-Rauschabständen ΔL gegenüber der unter Referenzbedingung gemessenen gemittelten Nachhallzeit dargestellt. Ein negatives ΔL zeigt dabei an, dass das Nutzsignal leiser als das Störsignal ist. Bis zu einem Störabstand von -3 dB ist die Abweichung der rauschhaften Signale *Rosa Rauschen* und *Sprachrauschen* gering gegenüber der absoluten Nachhallzeit. Die modulierten Geräusche *STIPA* und *Sprache* weichen hingegen bereits ab einem Störabstand von $+3$ dB sichtbar ab. Diese Ergebnisse wurden auch in vorangehenden Studien beobachtet [10]. Bei den Störgeräuschen *STIPA* und *Sprache* liegen Schwankungen des Pegels im Zeitverlauf vor und somit zu unterschiedlichen Zeitpunkten stark schwankende momentane Störabstände. So kann insbesondere bei diesen Geräuschen nicht auf Basis des mittleren SNR, der nur als Pegelabstand zwischen Nutz- und Störsignal gesehen werden kann, auf den tatsächlichen Störspannungsabstand (*peak to noise ratio*) rückgeschlossen werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Messungen raumakustischer Parameter in der betrieblichen Praxis sind bei vorhandenem Fremdgeräusch häufig schwierig durchzuführen. Insbesondere dann, wenn hohe Fremdgeräuschpegel vorherrschen. Mittels des MLS-Messverfahrens können speziell bei rauschhaften Störgeräuschen - wie bereits in [6] beschrieben - Messsignale „unterhalb des Hintergrundgeräuschs zur Nachhallzeitmessung“ [6] genutzt werden. Diese Eignung für Messun-

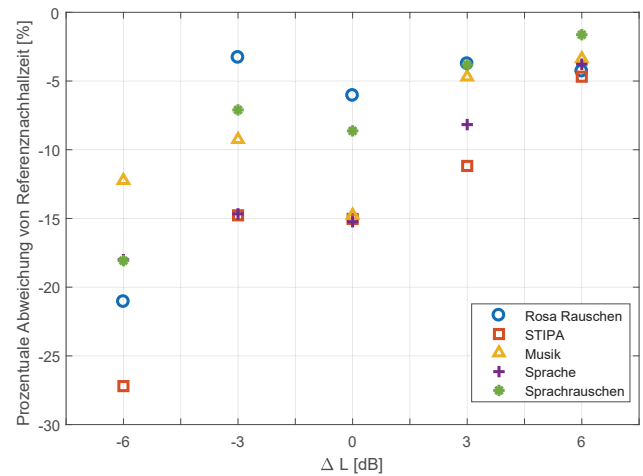


Abbildung 3: Prozentuale Abweichung der Nachhallzeiten unter verschiedenen Störschallbedingungen bei unterschiedlichen Signal-Rauschabständen ΔL gegenüber der Referenznachhallzeit unter Ruhebedingung (Abbildung 2).

gen in Betrieben mit hohen Fremdgeräuschpegeln stellt keine zusätzliche Einschränkung oder Belastung für die Beschäftigten dar. So kann sichergestellt werden, dass auch während der Messungen eine Gefährdung der Beschäftigten gering gehalten wird, sei es durch zusätzlichen Lärm oder durch die dadurch hervorgerufene Störwirkung.

Eine Ermittlung der Raumimpulsantwort aus der Mittelung mehrerer Perioden führt zu einer weiter steigenden *peak to noise ratio* bei gleichbleibendem stationärem SNR [9]. So kann dies insbesondere für Arbeitsumgebungen genutzt werden, in denen äußerst laute stationäre Fremdgeräuschpegel herrschen und eine Ermittlung raumakustischer Parameter mit klassischen Methoden nicht umsetzbar wäre. Weiterhin können mittels der Mittelung modulierte oder schwankende Fremdgeräusche vernachlässigbar gemacht werden. Zur weiteren Stabilisierung der Messergebnisse kann eine Verringerung der Maximalfolgenordnung N auf eine der Nachhallzeit angepasste Maximalfolgenlänge t_{MLS} durchgeführt werden, sodass sich die Gesamtmessdauer mit steigender Periode n nicht außerhalb praktikabler Messdauern befindet.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 3382-2:2008-09, Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen (ISO 3382-2:2008); Deutsche Fassung EN ISO 3382-2:2008.
- [2] DIN EN ISO 18233:2006-08, Akustik - Anwendung neuer Messverfahren in der Bau- und Raumakustik (ISO 18233:2006); Deutsche Fassung EN ISO 18233:2006.
- [3] Technische Regel zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung - TRLV Lärm. Ausgabe: August 2017.

- [4] DIN 18041:2016-03, Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung.
- [5] Schroeder, M. R.: New Method of Measuring Reverberation Time. *J. Acoust. Soc. Am.* 37 (1965), 409-412.
- [6] Vorländer, M. und Bietz, H.: Comparison of Methods for Measuring Reverberation Time. *Acustica* 80 (1994), 205-215.
- [7] Müller, S.: Messtechnik. In: *Handbuch der Audiotechnik*, Kapitel 21, Weinzierl, S. (Hrsg.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [8] Ahnert, W. und Feistel, S.: Einmessung und Verifizierung raumakustischer Gegebenheiten und von Beschallungsanlagen. In: *Messtechnik der Akustik*, Kapitel 3, Möser, M. (Hrsg.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [9] Vorländer, M. und Kob, M.: Practical Aspects of MLS Measurements in Building Acoustics. *Applied Acoustics* Vol. 52, No. 3/4 (1997), 239-258.
- [10] Nielsen, J. L.: Maximum-length sequence measurement of room impulse responses with high level disturbances. 100th AES Convention Copenhagen (1996).
- [11] DIN EN ISO 3382-3:2012-05, Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 3: Großraumbüros (ISO 3382-3:2012); Deutsche Fassung EN ISO 3382-3:2012.
- [12] Möser, M.: *Technische Akustik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 10. Auflage, 2015.