Verkürzung der Entwicklungszeiten von Schallabsorbermaterialien durch Nutzung eines Simulationsmodells

Raphael Rehmet, Armin Lohrengel

Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, 38678 Clausthal-Zellerfeld, E-Mail: rehmet@imw.tu-clausthal.de, lohrengel@imw.tu-clausthal.de

Einleitung

Im Büroumfeld spielt Schall eine wichtige Rolle, wenn es darum geht, dass Mitarbeiter konzentriert arbeiten können. Gleichzeitig soll an modernen Büroarbeitsplätzen eine Atmosphäre geschaffen werden, die zum Gespräch einlädt, um die betriebsinterne Kommunikation zu verbessern.

Um eine so spezifische Raumakustik zu erzeugen, werden neben textilen Bau- und Ausstattungsmaterialien wie Teppiche oder Gardinen häufig auch Büromöbel eingesetzt. Die eingesetzten Möbel werden mithilfe der EN ISO 11654 [2] in Schallabsorberklassen unterteilt, um am Markt verfügbare Produkte vergleichbar zu machen. Eine Qualifizierung möglicher Materialien und Absorber wird entsprechend der genannten Norm in einem Hallraumversuch durchgeführt, in dem Nachhallzeiten in Terz- und Oktavbänden gemessen werden.

Wird ein vollständig neues und akustisch unbekanntes Material verwendet, kommt häufig auch eine Erstqualifizierung in Impedanzrohren zum Einsatz. In diesen wird durch Messung des überlagerten Schallfelds die Reflexion des Schalls bestimmt und hieraus die Absorption ermittelt.

Die Frage, die im Rahmen dieses Forschungsansatzes untersucht wird, ist, inwieweit die akustischen Verhältnisse in einem Hallraum in einer Simulation vorhergesagt werden können. Basierend auf den Daten aus dem Impedanzrohr soll eine Aussage über die Wirksamkeit von Absorbern im Raum getroffen werden können.

Theoretischer Hintergrund

Simulationsansätze

Um Raumakustik zu simulieren, stehen verschiedenste Modelle, mathematische Ansätze und Abschätzformeln zur Verfügung, vgl [1]. Vor dem Hintergrund der Simulation eines Druckfeldes und dessen Ausbreitung im Raum kommen je nach Grad der geometrischen Abtastung zwei Verfahren in Frage:

Bei der Wellenakustik werden Wellen als geometrische Objekte betrachtet, deren Auslenkung im Raum an diskreten Punkten geschieht. Die Ausbreitung der Welle wird im Falle einer 3-dimensionalen Simulation auch in alle Raumrichtungen berechnet. Eine Welle, die nicht auf ein Hindernis trifft, wird daher bei korrekten Randbedingungen physikalisch-korrekt abgebildet. Moderne Formeln und Simulationsansätze berücksichtigen dabei sowohl die rheologischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Temperatur, als auch Effekte wie die innere Luftreibung.

Wird die Wellenakustik weiter geometrisch diskretisiert, gelangt man zur Betrachtung eines Druckfeldes entlang mehrerer Linien. Statt der vollständigen Abbildung des Druckfeldes wird dann entlang von Strahlen, sogenannten Rays, der Schalldruck bestimmt. Zwischen den einzelnen Strahlen kann der Schalldruck geometrisch im Postprocessing approximiert werden.

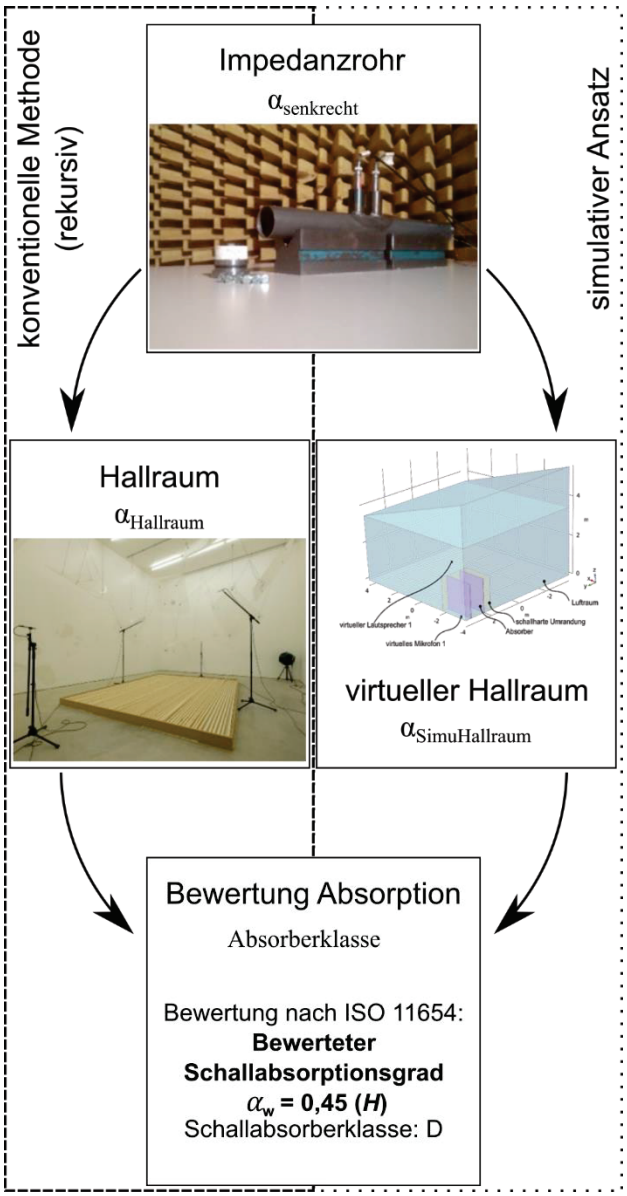

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Forschungsansatzes (eigene Darstellung, Bildquelle Hallraum: hft-stuttgart.de)

Ausgangspunkt und verfügbare Daten

Schallabsorptionskoeffizient $\alpha_{senkrecht}$

Als Ausgangspunkt für eine Vorhersage-Simulation dient der in zwei nach DIN EN ISO 10534-2 [3] ausgeführten Impedanzrohren mit unterschiedlichen Durchmessern gemessene Schallabsorptionskoeffizient $\alpha_{senkrecht}$. Die Rohre wurden für die Frequenzbereiche von 100 bis 1.500 Hz und von 1.500 Hz bis 4.500 Hz ausgelegt, sodass Daten in einem, für das Büroumfeld relevanten Bereich, erhoben werden können. Die Messdaten wurden kontinuierlich über den Frequenzbereich erhoben und werden für das Simulationsmodell als terzzusammengefasste Werte übergeben.

Schallabsorptionskoeffizient $\alpha_{Hallraum}$

Die Materialien, an denen eine Anpassung der Simulation erfolgt, wurden in einem Hallraumversuch durch ein akkreditiertes Prüflabor untersucht und eine Absorbtionskurve für den Aufbau E-200 und E-400 ermittelt. Die Daten wurden durch Bestimmung einer äquivalenten Schallabsorptionsfläche ermittelt und als Schallabsorptionskoeffizient $\alpha_{Hallraum}$ in Terzbändern gemessen und berechnet. Die Messung wurde entsprechend der Norm DIN EN ISO 354 [4] ausgeführt.

Schallabsorptionskoeffizient $\alpha_{SimuHallraum}$

Diese Größe gilt als Zielgröße, mit der die Simulation an das Ergebnis aus dem realen Hallraum angepasst werden soll. Dabei werden verschiedene Parameter der Simulation angepasst, um dem realen Versuch bestmöglich zu entsprechen.

Simulation und Modellaufbau

Als Simulationssoftware kommt COMSOL Multiphysics 5.6 zum Einsatz. Das zugrunde liegende Modell wird durch den oben beschriebenen Strahlenakustik-Ansatz aufgebaut. Der zu simulierende Luftraum wird in Form eines Luftraums mit Schräge beschrieben. Als Anregung wird ein Knoten definiert, von dem eine freuqenzdiskrete Schallanregung in Form von Strahlen ausgeht. Die Anzahl der Strahlen ist einstellbar und kontrolliert unter anderem, wie viel Schallenergie in den virtuellen Hallraum eingetragen wird. Die virtuelle Schallerzeugung wird abgeschaltet und entspricht so dem Vorgehen „abgeschaltetes Rauschen“.

Die Position des Schallerzeugers wird variiert und mit insgesamt drei Positionen berechnet, da die Norm zur Hallraummessung eine Variation des Messsettings mit 12 Kombinationen aus Sender und Empfänger vorgibt. Die Empfängerknoten werden ohne separate Berechnung im Postprocessing der Simulation an vier verschiedenen Stellen ausgewertet. Als Anordnung werden, wie auch in der zu vergleichenden Datenerhebung aus dem Hallraum die Anordnungen E-200 und E-400 gewählt. Dem virtuellen Absorber werden die Absorptionseigenschaften aus der Messung im Impedanzrohr zugewiesen.

$$10\ m^2 < A < 12\ m^2 \cdot \frac{V}{200m^3}^{2/3} = 14{,}7\ \mathrm{m}^2 \qquad [\mathrm{m}^2] \qquad (1)$$

mit V = 270m³

Die Fläche des Absorbers wird in Bezug zum Raumvolumen gesetzt, sodass die Gleichung (1) erfüllt ist.

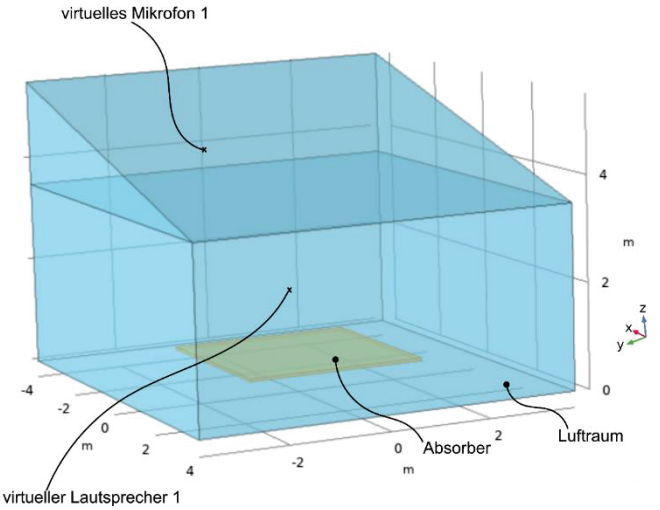

Abbildung 2: Modellaufbau in COMSOL Multiphysics 5.6

Verglichene Materialien

Für die Untersuchung wurden Materialien verwendet, die als Schallabsorbern im Innenraum als Standardmaterialien verwendet werden:

- Mineralfaser mit Bespannstoff mit einer Gesamtdicke von 30mm
- Melaminharzschaum mit einer Dicke von 50mm
- Polyurethan-Formschaum mit einer Dicke von 40mm

Die untersuchten Proben wurden nach der Messung im Hallraum in den Impedanzrohren gemessen, sodass ein Einfluss durch unterschiedliche Produktionschargen ausgeschlossen werden kann. Die untersuchten Schäume sind in ihrer Oberflächenbeschaffenheit sowie mechanischen Stabilität ähnlich, die Mineralfaser weicht unter diesen Gesichtspunkten ab.

Auswertung und Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in Terzbändern angegeben. Weiterhin werden Fehlerindikatoren bestimmt, um zu prüfen, in wie weit das Simulationsergebnis in einzelnen Frequenzbändern mit den Ergebnissen aus dem Hallraum übereinstimmt.

Die Simulation wurde an das Material „Melaminharzschaum“ angepasst. Hierzu wurden folgende Parameter der Simulation als Konstanten für den jeweiligen Simulationslauf variiert:

- Anzahl der ausgesendeten Strahlen
- Energiegehalt der ausgesendeten Strahlen
- Verhalten der Wände als ideal reflektierend oder real reflektierend

Für die Variation wurde das Ziel gesetzt, in den den Oktavbereichen

I. 250-500 Hz
II. 500-1000 Hz
III. 1000-2000 Hz
IV. 2000-4000 Hz

die geringstmögliche Abweichung zwischen dem im Hallraum gemessenen und den virtuell berechneten Schallabsorptionswerten zu erreichen. Werden die o.g. Parameter konstant angenommen, kann für die berechnete Abweichung eine Frequenzabhängigkeit festgestellt werden.

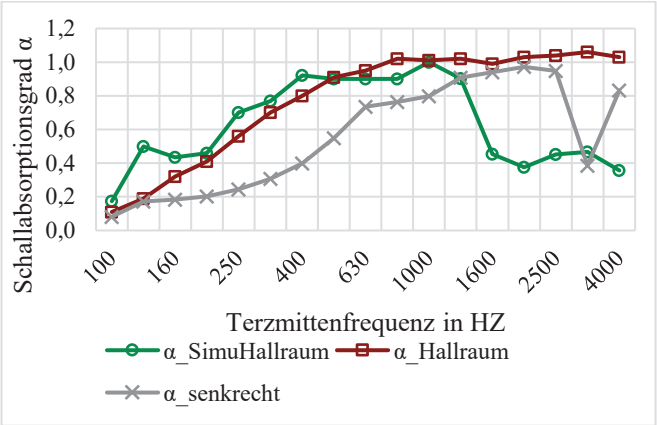

Abbildung 3: Ergebnisse für Melaminharzschaum

Aus Abbildung 3 kann man erkennen, dass nach der ersten Anpassung durch Variation der Parameter in den Oktavbereichen I und II eine Abweichung von circa einem Zehntel im Absorptionsgrad erreicht wird. In den oberen Oktaven III und IV treffen die Prognosen deutlich schlechter mit Abweichungen bis 0,6.

Für das strukturell ähnliche Material aus Polyurethan-Formschaum lassen sich ein vergleichbarer Trend und geringfügig größere Abweichungen feststellen, vgl Abbildung 4.

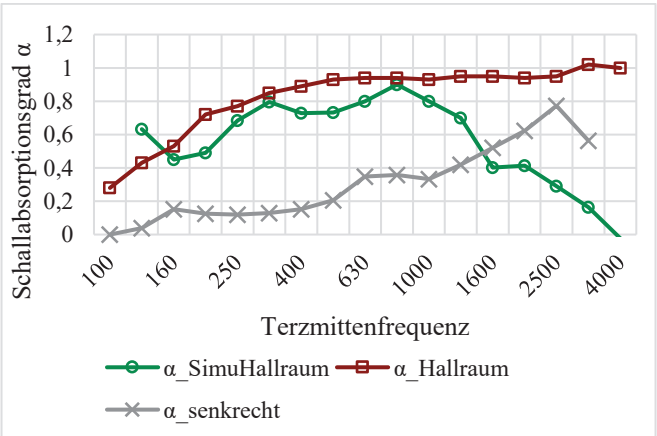

Abbildung 4: Ergebnisse für Polyurethan-Formschaum

Für das strukturell unterschiedliche Material Mineralfaser ergeben sich mit dem auf Melaminharzschaum angepasstem Simulationsmodell Werte mit größeren Abweichungen und nicht konsistentem Verlauf der Kurve bezüglich der real gemessenen Werte aus dem Hallraum, Vgl. Abbildung 5.

Der untersuchte Forschungsansatz sieht auch die Bewertung mit einem weiteren genormten nach EN ISO 11654 [2] Verfahren vor, das in Abhängigkeit von den im Hallraum gemessenen Werten eine Klassifizierung des Werkstoffs in die Schallabsorberklassen A bis E vorsieht. Die Klasse A ist hierbei die Klasse mit den höchsten Schallabsorptionswerten (nahe 1) im genannten Frequenzbereich.

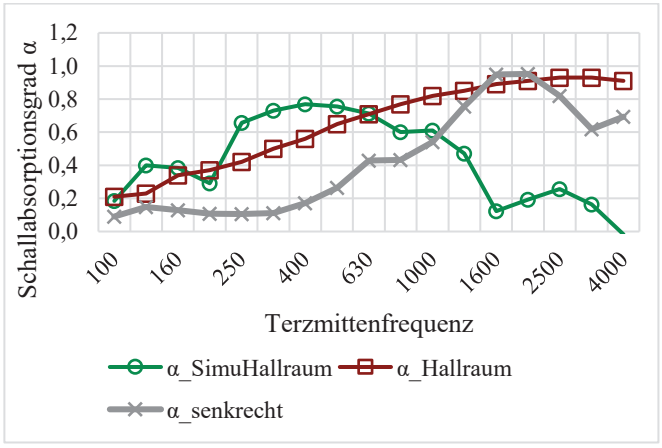

Abbildung 5: Ergebnisse für Mineralfaser

Wird diese Bewertung für die untersuchten Materialien im Hallraum und im virtuellen Hallraum ausgeführt, ergibt sich ein Ergebnis wie in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Bewertung nach ISO 11654

Material	Bewertung nach ISO 11654 auf Datenbasis aus…	
	Hallraum	virtueller Hallraum
Melamin-harzschum	A	C
Polyurethan-Formschaum	A	C
Mineralfaser	B	D

Die dargestellten Bewertungen aus dem virtuellen Hallraum liegen im Allgemeinen deutlich schlechter. Dies liegt darin begründet, dass die Absorptionskurven oberhalb vom III. Oktavbereich massiv abweichen und die Bewertungsnorm die schlechtmöglichsten Ergebnisse im relevanten Frequenzbereich berücksichtigt.

Fazit und Ausblick

Durch die beschriebene Vorgehensweise konnte gezeigt werden, dass durch die Ergänzung eines Simulationsansatzes Vorhersagen für vergleichbare Materialien getroffen werden können. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt bildet die Simulation die Realität nicht ausreichend ab, da speziell die Aussendung der virtuellen Schallwellen nicht realitätsnah ist, weil Effekte wie die Frequenzcharakteristik oder Richtcharakteristik des realen Lautsprechers nicht berücksichtigt werden. Weiterhin stellen die durch Strahlenacoustics dargestellten Wellen eine starke Diskretisierung des Akustischen Wellenfeldes dar, weshalb die Ergebnisse nur für eine Bewertung innerhalb der Entwicklung eines neuen Schallabsorbermaterials verwendet werden sollten.

Durch eine weitergehende Anpassung der bisher als Konstant angenommenen Werte wird eine weitere Annäherung an die Messwerte aus dem Hallraum angestrebt.

Literatur

[1] Vorländer, M.: Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties, The Journal of the Acoustical Society of America 133 (2012), Pages 1203-1213

[2] Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: EN ISO 11654: Akustik – Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden (1997)

[3] Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN ISO 10534-2: Akustik – Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion (2001)

[4] Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: EN ISO 354: Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen (2003)