

# Die Bestimmung des Absorptionsgrads im „virtuellen“ Hallraum

Eine Anwendung der Simulationsberechnung mit dem Schallteilchenverfahren

Wolfgang Probst, Greifenberg

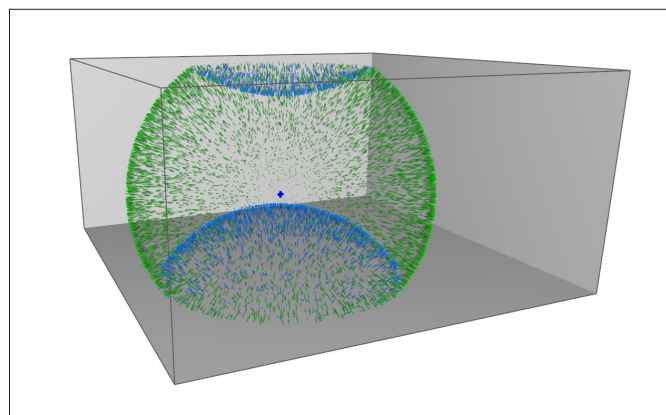
**Zusammenfassung** Im Beitrag wird eine Art „Fallstudie“ zur praktischen Anwendung der akustischen Simulationsberechnung vorgestellt. Auslöser war die Aufgabe, die zu erwartende Verbesserung der Lärmsituation für eine geplante Industriehalle bzw. die Verringerung von Nachhallzeiten und Beurteilungspegeln an Arbeitsplätzen durch den Einbau eines schallabsorbierenden Kulissen-Deckensystems zu prognostizieren. Vom Hersteller bzw. Lieferanten des Systems wurden für dieses Kulissensystem Absorptionsgrade mitgeteilt, die nach Einsicht des zugrunde liegenden Prüfberichts als nicht geeignet angesehen wurden, um in entsprechenden Schallberechnungen direkt angewendet zu werden. Diese Absorptionsgrade sind mit einem nicht der Norm DIN EN ISO 354 [1] entsprechenden Aufbau des Kulissensystems in einem Hallraum ermittelt worden. Der Fall ist exemplarisch und die Umrechnung der angegebenen auf die in der Planungsrechnung verwendbaren Absorptionsgrade mithilfe der akustischen Simulation soll deshalb als häufig nutzbare Strategie in den einzelnen Schritten beschrieben werden. Der Beitrag soll auch Defizite der Normung bei der Definition der akustischen Eigenschaften von Absorberkonstruktionen und Möglichkeiten zu ihrer Behebung aufzeigen.

## Determination of absorption coefficients in a “virtual” reverberation chamber – an application of acoustic simulation with the sound particle model.

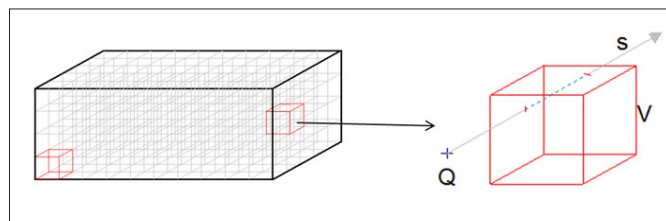
**Summary** The following is a case study for an application of acoustic simulation techniques. Starting point was the task to predict the possible noise reduction at the work places in an industrial production hall and the decrease of reverberation time if a planned baffle system would be installed as recommended by the supplier. After a thorough inspection of the test certificate for the baffle system it was decided that the declared absorption data could not directly be applied in acoustic calculations, e.g. to predict the reverberation time and reduction of noise levels. The measurements performed in the reverberation chamber and especially the measurement setup were not in agreement with the requirements of the cited standard DIN EN ISO 354 [1] and therefore the declared absorption data would result in an overestimation of the systems acoustic performance. The case is exemplary and therefore the steps to derive the absorption coefficients according to the standard from those measured with any other – but in detail documented – setup are presented as a method generally applicable in such cases. Further some shortcomings of standards concerning the definition of the acoustic properties of absorbing structures are shown up and strategies to solve them are presented.

Zur Berechnung der Schallausbreitung im Raum wird bei den im Folgenden beschriebenen Untersuchungen mit dem Softwaresystem CadnaR [2] das sog. Schallteilchenverfahren angewendet<sup>1)</sup>. Entsprechend **Bild 1** sendet eine gleichförmig abstrahlende Punktschallquelle Schallteilchen in statistisch verteilte Richtungen aus, wonach deren Weg bis zu einer von der Aufgabenstellung abhängigen Laufzeit berechnet wird. Für jedes eine bestimmte Schallenergie transportierende Teilchen wird nach Zufallsprinzip die Startrichtung bestimmt, wobei alle Richtungen gleich wahrscheinlich sind. Mit ausreichend großer Teilchenzahl wird so eine gleiche Belegung aller gleich großen Raumwinkelelemente erreicht.

Wie **Bild 2** zeigt, wird das Raumvolumen in kleine Zählvolumina – die Voxel – unterteilt und es werden in jedem Voxel die Teilchen mit einer Gewichtung entsprechend der Laufweglänge durch das Voxel als Beitrag zur Schallenergiedichte summiert. Die Größe der Voxel bestimmt das Auflösungsvermögen für die berechneten Immissionskenngrößen.

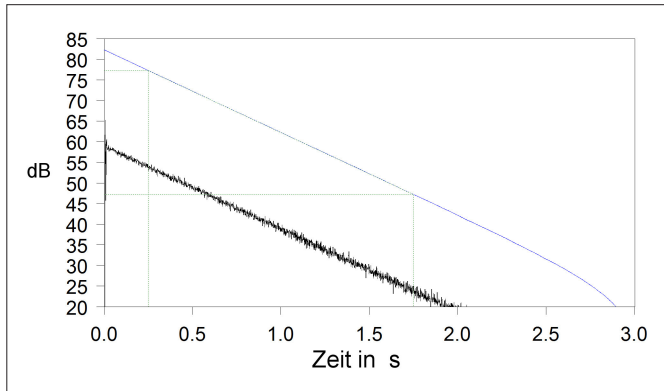


**Bild 1** Visualisierung der von einer Punktquelle gleichzeitig ausgesendeten Teilchen nach einer bestimmten Laufzeit mit bereits erfolgter erster Reflexion an Decke und Fußboden. Die Farbe kodiert in diesem Beispiel die Reflexionsordnung (0. Ordnung bzw. Direktschall grün, 1. Ordnung blau).

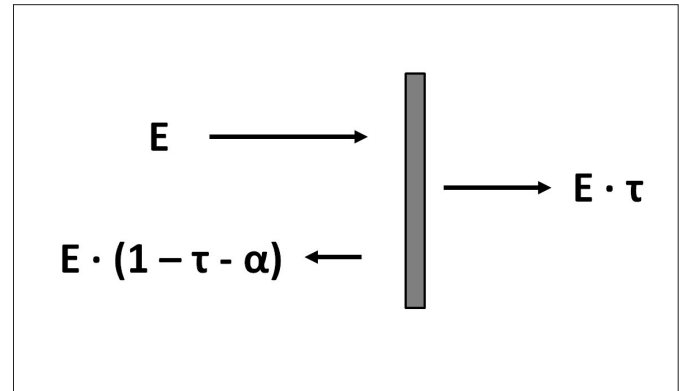


**Bild 2** Aufteilung des relevanten Raumvolumens in Voxel.

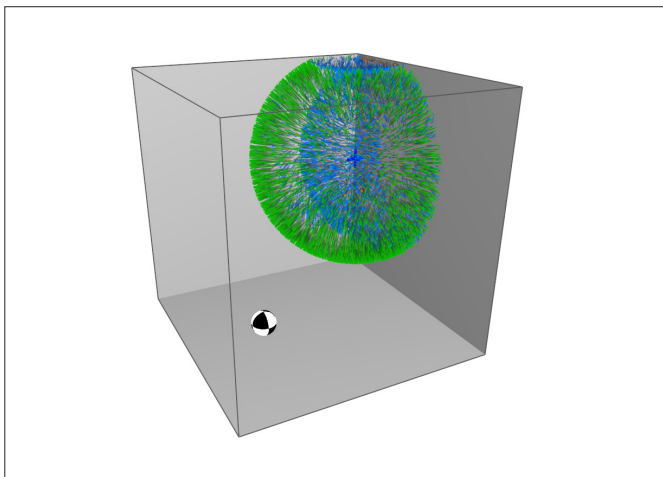
<sup>1)</sup> eine allgemeine Übersicht zu diesem Verfahren ist in [3], Abschn. 11.2, zu finden.



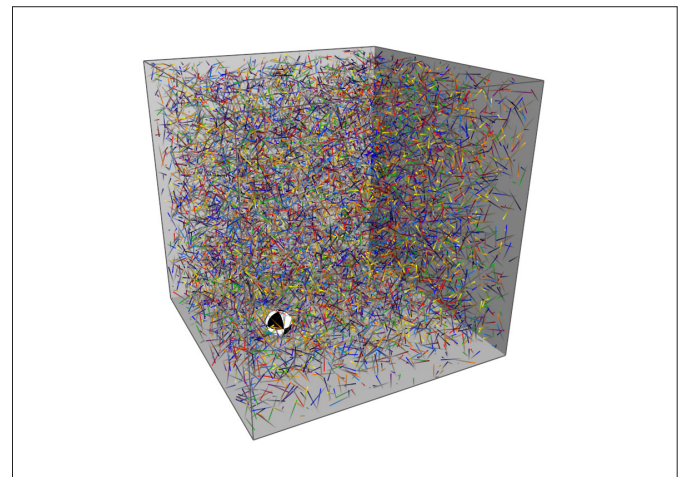
**Bild 3** Aus den zeitklassierten Energiedichten abgeleitetes Echoogramm (untere Kurve) und durch Rückwärtsintegration ermittelte Abklingkurve (obere Kurve) zur Bestimmung der Nachhallzeiten.



**Bild 4** Transmission, Absorption und Reflexion an einer Platte.



**Bild 5** Modell des Hallraums mit der sich ausbreitenden Schallteilchenwolke.



**Bild 6** Schallteilchen nach mehrfacher Reflexion und diffuser Durchmischung.

An den festgelegten Immissionspunkten werden die Schallpegel aus den für die Voxel-Mittelpunkte ermittelten Werten interpoliert. Da für jedes ein Voxel durchquerende Schallteilchen dessen Energiebeitrag und die Laufzeit seit Aussendung von der Quelle bekannt ist, kann die eingetragene Schallenergie in Zeitklassen unterteilt und gemäß **Bild 3** (untere Kurve) als Energie-Impulsantwort bzw. Echoogramm aufgetragen werden. Durch Rückwärtsintegration [4] ergibt sich hieraus die auf das Abschalten der konstant abstrahlenden Quelle bezogene Abklingkurve (obere Kurve) und daraus wiederum die Nachhallzeit sowie alle daraus ableitbaren raumakustischen Kennwerte für jedes Frequenzband.

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).

**Bild 4** zeigt den Zusammenhang der beiden erstgenannten Kenngrößen für eine Platte. Der Anteil  $\tau$  der von links einfallenden Schallenergie  $E$  wird zur rechten Seite transmittiert und unter Berücksichtigung eines die Dissipation beschreibenden Absorptionsgrads  $\alpha$  wird der Anteil  $(1 - \tau - \alpha)$  reflektiert.

Der Streugrad  $s$ , der das Verhältnis der nicht geometrisch reflektierten zur insgesamt reflektierten Schallenergie beschreibt, beeinflusst die Richtung des im Beispiel nach links reflektierten Schallstrahls.

### Modellierung eines Hallraums

Zur Modellierung eines Hallraums für Schallberechnungen wird ein würfelförmiger Raum mit einer Seitenlänge von 6 m und somit einem Volumen  $V$  von  $216 \text{ m}^3$  und einer Raumbegrenzungsfläche von  $216 \text{ m}^2$  angenommen. Den Raumbegrenzungsflächen wird in allen Frequenzbändern von 125 bis 4 000 Hz ein Absorptionsgrad von 0,05 und ein Streugrad von 1 zugewiesen. Wegen der aus dem Streugrad 1 resultierenden diffusen Reflexion entsprechend dem Lambertschen Gesetz müssen weder schräge Wände noch im Raum abgehängte Diffusoren modelliert werden, um die Diffusität des Schallfelds im stationären Zustand sicher zu stellen. In **Bild 5** ist der Modell-Hallraum mit der Schallquelle und einem Immissionspunkt sowie mit der sich ausbreitenden Schallteilchenwolke dargestellt. **Bild 6** zeigt den Zustand nach mehrfacher Reflexion und der Ausbildung eines diffusen Schallfelds.

Die Überprüfung der Ergebnisstreuung für die berechnete Nachhallzeit bei wiederholter Rechnung mit unterschiedlichen

**Tabelle 1** Vergleich der mit Simulation ermittelten mit den nach Eyring berechneten Nachhallzeiten.

	Frequenz in Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
T aus Simulation	3,15	3,10	3,02	2,92	2,71	2,17
m (20°, 60 %) * 1000	0,09	0,28	0,64	1,11	2,13	5,86
T nach Eyring Gl. (1)	3,16	3,10	3,02	2,92	2,71	2,17

Teilchenzahlen und -laufzeiten hat gezeigt, dass für die Simulationsrechnung mit dem beschriebenen Hallraum-Modell die Berechnung mit 1 Mio. Teilchen bzw. von Strahlwegen bis zu einer Laufzeit von 4 s ausreichend ist. Dies führt bei dem gewählten Absorptionsgrad der Raumbegrenzungsflächen zu dem gewünschten stationären Schallfeld – eine Erhöhung der Teilchenzahl oder die Wahl einer längeren Laufzeit würde die Ergebnisse nicht ändern.

### Validierung des Verfahrens

Absorptionsgrade von Produkten werden beim Hallraumverfahren über die Bestimmung von Nachhallzeiten ermittelt. Aufgrund des diffusen Schallfeldes kann die zu erwartende Nachhallzeit nach Eyring mit Gl. (1) berechnet werden:

$$T = \frac{V}{4mV - S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (1)$$

- mit
- T: Nachhallzeit in s
- V: Raumvolumen in m<sup>3</sup>
- S: Raumbegrenzungsflächen in m<sup>2</sup>
- m: Luftdämpfungsindex
- $\bar{\alpha}$ : mittlerer Absorptionsgrad

Die mit Simulation an sechs verschiedenen im Modell-Hallraum verteilten Immissionspunkten berechneten Nachhallzeiten sind im Rahmen der betrachteten Nachkommastellen identisch. Wie **Tabelle 1** zeigt, stimmen diese mit Simulation berechneten mit den nach Gl. (1) bestimmten Nachhallzeiten überein.

Weiter soll zur Validierung die Bestimmung des Absorptionsgrads einer am Hallraumboden ausgelegten Prüffläche verwendet werden. Hierzu wird im Modell des Hallraums gemäß **Bild 7** eine auf den Boden aufgelegte rechteckige Prüffläche mit der – im Zuge der Validierung dann zu ermittelnden – abweichenden Absorption berücksichtigt.

Die Größe der Prüffläche entspricht jener, die im Prüflabor und auch in der Simulation für die unten beschriebene Kulissenanordnung verwendet wurde. Dieser Prüffläche wird in jedem Frequenzband von 125 bis 4 000 Hz ein Absorptionsgrad von 0,5 zugewiesen. Mit der Nachhallzeit  $T_{\text{vor}}$  ohne und  $T_{\text{nach}}$  mit installierter Prüffläche ergibt sich der Absorptionsgrad nach der Norm DIN EN ISO 354 zu

$$\alpha_p = 0,165 \cdot \frac{V}{S_p} \cdot \left( \frac{1}{T_{\text{nach}}} - \frac{1}{T_{\text{vor}}} \right) \quad (2)$$

- mit
- $\alpha_p$ : Absorptionsgrad der Prüffläche
- $S_p$ : Prüffläche in m<sup>2</sup>

Die im simulierten Hallraum mit Prüffläche ermittelten Nachhallzeiten  $T_{\text{nach}}$  sind in Zeile 1 von **Tabelle 2** aufgelistet. Mit den für den leeren Hallraum zutreffenden Nachhallzeiten  $T_{\text{vor}}$  aus **Tabelle 1** ergeben sich mit Gl. (2) die aus der Simulation bestimmten Absorptionsgrade der Prüffläche entsprechend der

letzten Zeile von **Tabelle 2**. Die Übereinstimmung mit dem zugewiesenen Absorptionsgrad von 0,5 ergibt auch für diesen zweiten Teil der Validierung ein positives Ergebnis.

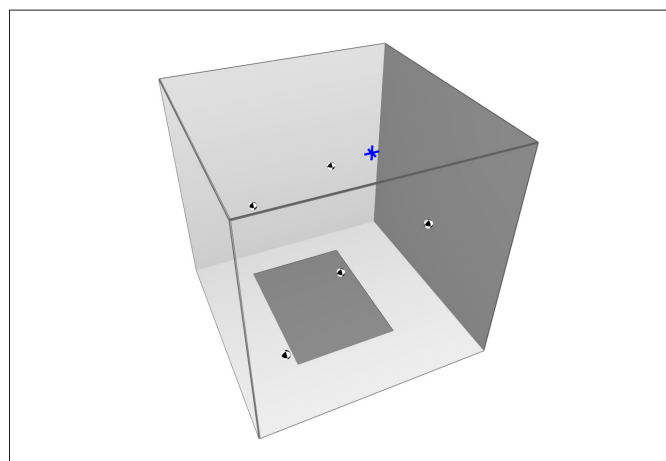
Damit ist gezeigt, dass der „virtuelle“ Hallraum geeignet ist, die akustische Wirksamkeit geometrisch unterschiedlicher Anordnungen von schallabsorbierenden Strukturen zu untersuchen.

### Absorption von Kulissensystemen und ihre Modellierung zur Simulationsrechnung

Wie einleitend erwähnt, war der Ausgangspunkt dieser Untersuchung die von einem Prüfinstitut ermittelten und in Produktunterlagen veröffentlichten Absorptionsgrade einer Konstruktion aus schallabsorbierenden Kulissen – einem Thema, das schon in [5] ausführlich behandelt worden ist. Die dort eingeführte Bezeichnung von Absorptionsgraden soll im Folgenden beibehalten werden.

$\alpha_B$  ist der bauteilbezogene Absorptionsgrad. Er beschreibt das Verhältnis von absorbiertes zu auftreffender Schallenergie, wenn das Bauteil „Kulisse“ allseitig einem diffusen Schallfeld ausgesetzt ist. Er könnte im Hallraum nach DIN EN ISO 354 gemessen werden, wenn einzelne Platten des Kulissenmaterials in so großem Abstand voneinander installiert würden, dass dieses an einer Platte allseitig anliegende diffuse Schallfeld nicht durch benachbarte Platten gestört wäre (in der Praxis sind die dann möglichen Plattenzahlen oft zu gering, um eine ausreichende Genauigkeit der Ergebnisse sicher zu stellen). Der bauteilbezogene Absorptionsgrad  $\alpha_B$  – bzw. die durch Multiplikation mit der Gesamtoberfläche sich ergebende bauteilbezogene äquivalente Absorptionsfläche  $A_B$  – ist eine Basiskenngröße zur Kennzeichnung eines aus Einzelementen bestehenden Produkts, die nicht von einer bestimmten Anordnung oder Abhängedichte abhängt. Sie ist somit zum Kosten-Nutzen-Vergleich derartiger Einzelemente geeignet.

$\alpha_K$  ist der auf eine bestimmte Konstruktion bezogene Absorptionsgrad. Die Konstruktion ist im vorliegenden Fall eine Reihen-anordnung der Kulissen, die bei einer Kulissenhöhe  $h$  und



**Bild 7** Hallraum mit auf dem Boden installierter Prüffläche.



**Tabelle 2** Mit Simulationsberechnung ermittelte Absorptionsgrade.

	Frequenz in Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
$T$ aus Simulation mit Prüffläche $\alpha = 0,5$	2,17	2,15	2,11	2,06	1,96	1,66
Hieraus $\alpha$ berechnet mit Gl. (2)	0,52	0,52	0,52	0,52	0,51	0,51

einem Reihenmittenabstand  $a$  durch den bezogenen Reihenmittenabstand  $a' = a/h$  gekennzeichnet ist. Er kann im Hallraum nach DIN EN ISO 354 gemessen werden, wenn ein Ausschnitt der gesamten Konstruktion so mit einem reflektierenden Rahmen umgrenzt ist, dass der von ihm umschlossene Teil durch Spiegelung an der Innenseite des Rahmens periodisch auf die unbegrenzte Fläche erweitert wird. Die Konstruktion ist so aufgestellt oder abgehängt, dass sie wiederum allseitig dem diffusen Schallfeld des Raums ausgesetzt ist. Der konstruktionsbezogene Absorptionsgrad  $\alpha_k$  ergibt sich als der Quotient aus der festgestellten äquivalenten Absorptionsfläche  $A$  und der – wegen des beidseitigen Schalldurchgangs – doppelten vom Rahmen umschlossenen Fläche  $S$ .

$\alpha_{KW}$  ist der bei den meisten Planungsfällen letztlich interessierende Absorptionsgrad der Kulissenkonstruktion, wenn diese vor einer reflektierenden Fläche installiert ist. Er trifft auch dann zu, wenn sich die Schallquellen und die interessierenden Immissionsorte auf einer Seite der Kulissenkonstruktion befinden und der an der anderen Seite anschließende Raum nur vernachlässigbare Absorption aufweist. Er kann im Hallraum entsprechend DIN EN ISO 354, Anhang B.6 wie mit Aufbau J beschrieben gemessen werden. Der Aufbau erfolgt direkt auf dem Boden des Hallraums mit einem umschließenden reflektierenden Rahmen.

Bei der Simulationsrechnung nach dem Teilchenverfahren gibt es drei unterschiedliche Methoden, um derartige Kulissendecken in schalltechnische Planungsrechnungen einzubeziehen. **Bild 8** zeigt als Beispiel das Modell einer Getränkeabfüllanlage mit einem derartigen Kulissen-Deckensystem.

Die erste und flexibelste Methode besteht darin, jede einzelne Kulisse als vertikale Platte entsprechend den Bildern 4 und 8 zu modellieren. Den Kulissen wird der Streugrad 0 (spiegelnde Reflexion) sowie der o. g. bauteilbezogene Absorptionsgrad  $\alpha_B$  zugewiesen. Dies ist die einzige erforderliche Kenngröße – der Einfluss unterschiedlicher Anordnungen ergibt sich von selbst aus der detaillierten Modellierung gemäß Bild 8. Wird der Transmissionsgrad der Kulissen zu Null gesetzt, werden die auf eine

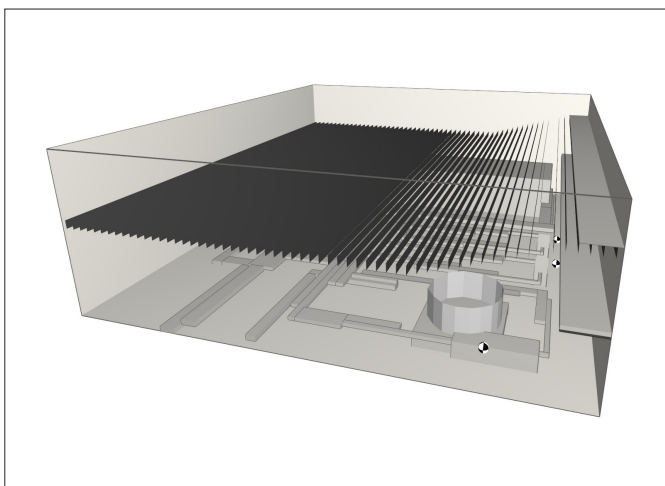
Kulisse auftreffenden und nicht absorbierten Schallanteile spiegelnd reflektiert und gelangen so in den darüber liegenden Deckenhohlraum. **Bild 9** zeigt die Durchstrahlung der Kulissen-Decke bzw. die sie durchdringenden Schallteilchen für diesen Fall. Wird der nicht absorbierte Schallanteil transmittiert, so ergibt dies einen Schalldurchgang entsprechend **Bild 10**.

Da der von den Kulissen nicht absorbierte Schall in beiden Fällen in den oberen Deckenhohlraum eingestrahlt wird, sind die beiden Fälle im Hinblick auf die akustische Wirksamkeit im Bereich unter der Kulissendecke meist identisch (Ausnahme: inhomogene Verteilung von Absorption im Deckenhohlraum über den Kulissen)

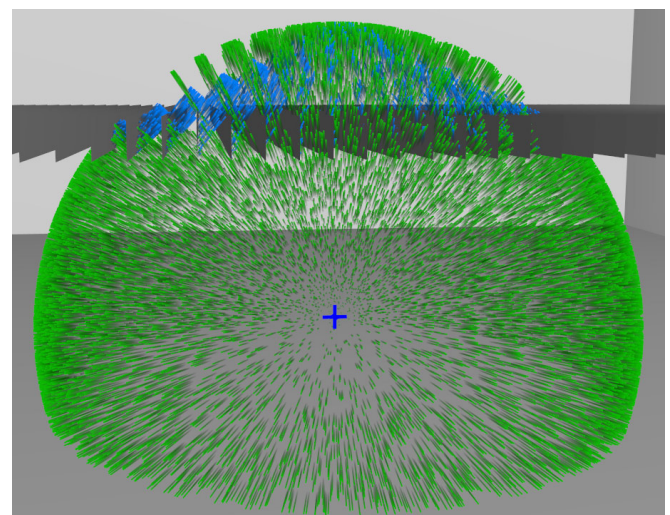
Mit der zweiten Methode wird die Kulissendecke durch eine Deckenplatte ersetzt, die beidseitig den konstruktionsbezogenen Absorptionsgrad  $\alpha_k$  und einen Transmissionsgrad  $1 - \alpha_k$  aufweist (**Bild 11**). Damit wird der mit  $\alpha_k$  beschriebene Anteil der auf die Konstruktion auftreffenden Schallenergie beim einfachen Durchgang absorbiert und der verbleibende Schallanteil auf die andere Seite transmittiert.

Bei den beiden bisher beschriebenen Methoden gelangt der nicht absorbierte Schallanteil in den Deckenhohlraum und wird von dort – nach nochmaligem Durchlaufen der Kulissenkonstruktion – in den Senderaum zurückgestrahlt. Damit wird auch eine eventuell vorhandene Absorption im Deckenhohlraum oder auch der Absorptionsgrad der Rohdecke darüber in das Modell einbezogen und korrekt berücksichtigt.

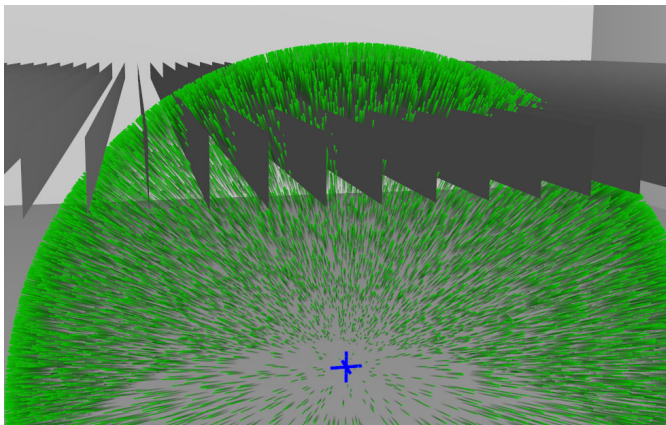
Mit der dritten Methode wird der die Kulissendecke ersetzende Platte der Absorptionsgrad  $\alpha_{KW}$  und ein Transmissionsgrad von 0 zugewiesen. Da  $\alpha_{KW}$  bereits die Absorption der Kulissenkonstruktion bei Anordnung vor einer reflektierenden Fläche und somit bezogen auf zweimaligem Schalldurchgang beschreibt, ist der verbleibende Schallanteil  $1 - \alpha_{KW}$  genau jener, der wieder in den Senderaum eingestrahlt wird. Hier ist anzumerken, dass  $\alpha_{KW}$  der Absorptionsgrad ist, der vom Hersteller gemäß DIN EN ISO 354 mit einer Anordnung der von einem Rahmen umschlossenen Kulissenanordnung auf dem Hallraum-



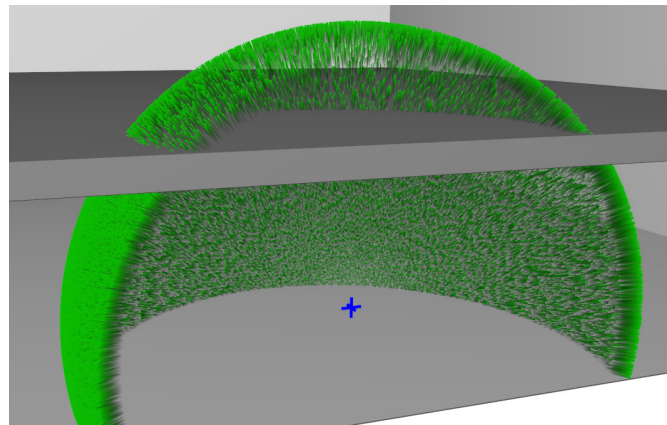
**Bild 8** Modell einer Getränkeabfüllanlage mit Kulissendecke zur schalltechnischen Berechnung.



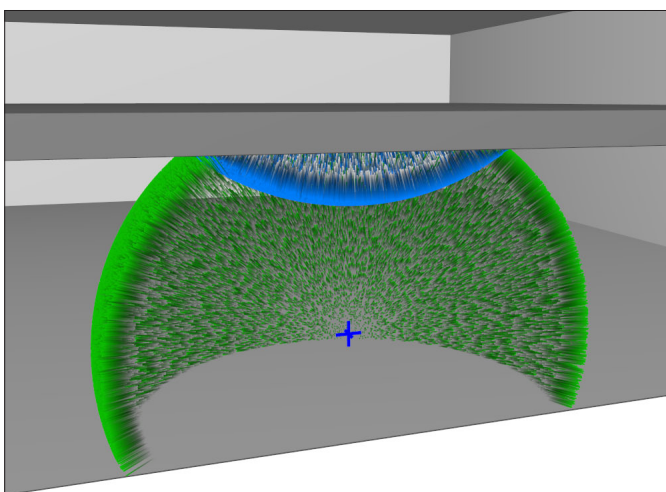
**Bild 9** Die Kulissendecke durchdringende Schallteilchen mit  $\tau = 0$ .



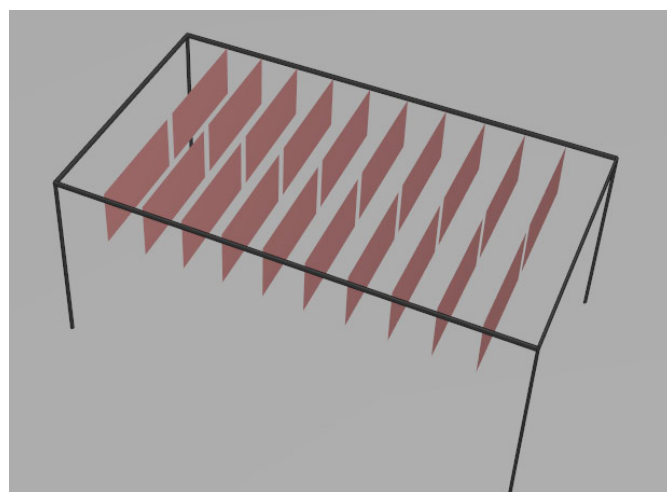
**Bild 10** Die Kullisendecke durchdringende Schallteilchen mit  $\tau = 1 - \alpha_B$ .



**Bild 11** Die Kullisendecke wird als Platte mit Absorptionsgrad  $\alpha_K$  und Transmissionsgrad  $1 - \alpha_K$  modelliert.



**Bild 12** Die Kullisendecke wird als Platte mit Absorptionsgrad  $\alpha_{KW}$  und Transmissionsgrad 0 modelliert.



**Bild 13** Der Aufbau zur Messung der Schallabsorption nach Prüfbericht.

boden bestimmt werden soll – eine reflektierend Rückwand ist somit bereits einbezogen.

Ist die Kullissenkonstruktion direkt unter der Rohdecke angebracht, so braucht auch keine zusätzliche Platte mit Transmissionsgrad 0 entsprechend **Bild 12** vorgesehen werden. Vielmehr kann der Absorptionsgrad  $\alpha_{KW}$  direkt der Rohdecke zugewiesen werden.

Die erstgenannte Methode mit der Detailmodellierung jedes einzelnen Kullisenelements ist immer dann von Vorteil, wenn raumseitig nicht von einem diffusen Schallfeld ausgegangen werden kann, weil nur so die konstruktionsbedingt stark vom Einfallswinkel abhängige Absorption der Kullisendecke berücksichtigt wird.

### Anwendung der Simulationsrechnung zur Bestimmung der erforderlichen aus den gemessenen Absorptionsgraden

Durch die Möglichkeit der detaillierten Modellierung einer beliebigen Kullissenanordnung und der validierten Simulation einer Hallraummessung können die gewünschten und für eine schalltechnische Planung erforderlichen Absorptionsgrade auch aus Werten, die mit einer anderen, aber eindeutig definierten Anordnung gemessen worden sind, nachträglich bestimmt werden.

So wurde von einem Hersteller von schallabsorbierenden Kullissen (Abmessung 1,2 m x 0,6 m) für eine Reihenanordnung mit 0,4 m Reihenmittenabstand und mit jeweils 0,1 m Lücke zwischen den Kullissen in einer Reihe die Messung der Schallabsorption durch ein Prüfinstitut beauftragt. Bei der gewählten Anordnung gemäß **Bild 13** sind zehn Reihen mit je zwei Kullissen im Hallraum in einem Gestell so abgehängt, dass praktisch an allen Seiten der Reihenkonstruktion ein diffuses Schallfeld anliegt. Ein umschließender Rahmen ist nicht vorhanden.

Da insgesamt 20 Kullissen installiert sind, wurde die Absorptionsfläche pro Kullisse als die durch 20 geteilte insgesamt festgestellte Absorptionsfläche bestimmt. Der Absorptionsgrad – im Folgenden mit  $\alpha^*$  bezeichnet – wurde durch Bezug dieser gesamten Absorptionsfläche auf eine Projektionsfläche von  $10 \text{ m}^2$  – also etwa der Deckfläche der Anordnung – bestimmt. **Tabelle 3** zeigt diese Ergebnisse nach Herstellerangabe.

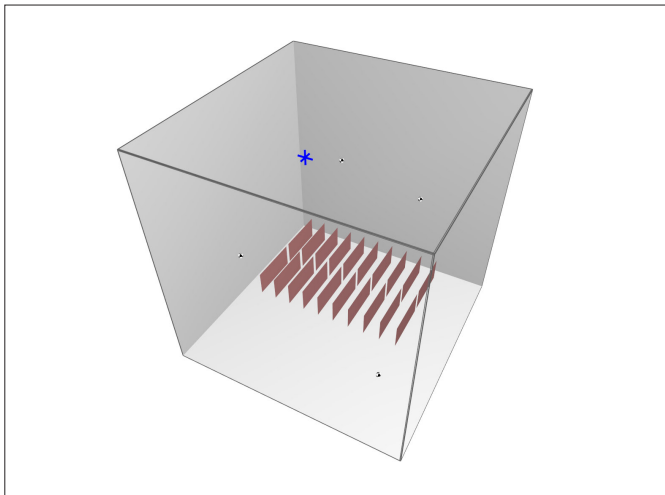
Für schalltechnische Berechnungen sind diese Werte nicht geeignet, da die Anordnung allseitig von einem diffusen Schallfeld umgeben und somit Schalleinfall von allen Seiten gegeben war. Die dem – nicht vorhandenen – reflektierenden Rahmen entsprechende Seitenfläche ist ebenfalls dem diffusen Schallfeld ausgesetzt, wodurch die über diesen Weg erfolgende Schallabsorption auch der genannten Bezugsfläche zugeschlagen wird.

**Tabelle 3** Die kennzeichnenden Absorptionsdaten nach Herstellerangabe.

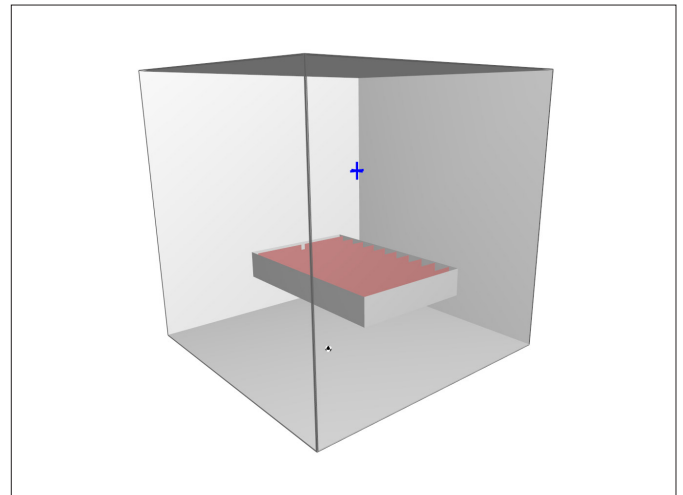
Kenngrößen nach Prüfbericht	Frequenz in Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
$A^*$ m <sup>2</sup> pro Element	0,14	0,35	0,62	0,77	0,70	0,47
$\alpha^*$	0,28	0,69	1,23	1,53	1,4	0,94

**Tabelle 4** Bauteil- und konstruktionsbezogene Absorptionsgrade der untersuchten Kulissen.

Kenngrößen	Frequenz in Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha_B$	0,10	0,29	0,60	0,81	0,72	0,43
$\alpha_K$	0,12	0,30	0,52	0,63	0,58	0,40
$\alpha_{KW}$	0,21	0,46	0,72	0,83	0,78	0,60



**Bild 14** Simulation der Messung mit dem „virtuellen“ Hallraum.



**Bild 15** Kulissenanordnung schwebend mit Rahmen zur Bestimmung von  $\alpha_K$ .

Die angegebenen und hier als  $\alpha^*$  bezeichneten Absorptionsgrade beschreiben somit nicht den absorbierten Anteil der auf die Bezugsfläche auftreffenden Schallenergie.

Hier kann die Simulation des Hallraumverfahrens als eine Art Vergleichsmethode angewendet werden, um auf die gewünschten der Norm entsprechenden Absorptionsdaten zu schließen.

Im ersten Schritt wird die der Messung zugrunde liegende Anordnung entsprechend **Bild 14** im Modell „nachgebaut“.

Nun wird der bauteilbezogene Absorptionsgrad der Kulissen  $\alpha_B$  in jedem Frequenzband so bestimmt, dass die mit der Simulation ermittelte Absorptionsfläche mit jener der Messung übereinstimmt. Dies erfolgt in der Praxis, indem den Kulissen programmgesteuert ein Absorptionsgrad von 0 bis 1 in 0,1 Schritten variierend zugewiesen wird und der zugewiesene Absorptionsgrad  $\alpha_B$  als Funktion der mit der Simulation sich ergebenden Absorptionsfläche  $A^*$  bestimmt wird. Dies führt für diese Anordnung auf eine Beziehung nach Gl. (3).

$$\alpha_B = 0,511 \cdot (A^*)^2 + 0,668 \cdot A^* \quad (3)$$

Die ermittelten Werte zeigt die erste Zeile von **Tabelle 4**.

Die bauteilbezogenen Absorptionsgrade  $\alpha_B$ , die mithilfe der Simulation aus den im realen Hallraum ermittelten äquivalenten Absorptionsflächen abgeleitet sind, werden nun den beiden Seiten jeder Kulissenplatte zugewiesen. Da die Einzelkulissen nunmehr in akustischer Hinsicht „stimmen“, können sie der Norm entsprechend korrekt angeordnet werden, um die

resultierende Absorption  $\alpha_K$  oder  $\alpha_{KW}$  der gewählten Anordnung zu bestimmen.

Mit der Anordnung in **Bild 15** sind die 20 Kulissen – nach wie vor schwebend im „virtuellen“ Hallraum – von einem reflektierenden Rahmen umgeben, der den o. g. Anforderungen entspricht. Dieser Rahmen besteht aus vertikalen Platten mit dem Wert 0 für Absorptionsgrad, Transmissionsgrad und Streugrad. Hieraus ergibt sich der auf die Konstruktion bezogene Absorptionsgrad  $\alpha_K$  in der zweiten Zeile von Tabelle 4 durch Bezug der ermittelten äquivalenten Absorptionsfläche auf die doppelte vom Rahmen umschlossene Fläche.

Weiter wird noch die gesamte Anordnung entsprechend **Bild 16** direkt auf dem Hallraumboden angeordnet und die so durch Simulation ermittelte äquivalente Absorptionsfläche auf die einfache, vom Rahmen eingeschlossene Fläche bezogen, um den Absorptionsgrad  $\alpha_{KW}$  dieser Kulissenanordnung vor reflektierender Fläche zu bestimmen. Dies ist auch der nach der Norm DIN EN ISO 354 – Aufbau J – zur normentsprechenden Angabe vorgesehene Wert.

Der Absorptionsgrad  $\alpha_{KW}$  kann zur schalltechnischen Berechnung direkt der Rohdecke zugewiesen werden, wenn diese Kulissenanordnung unter einer in Realität reflektierenden Decke abgehängt wird.

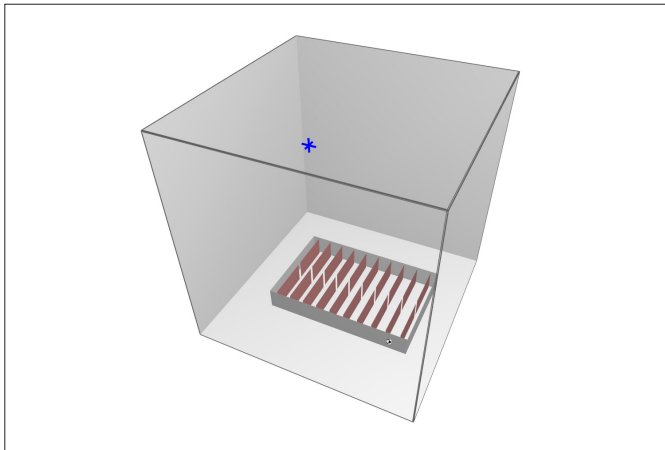
### Anwendung für die schalltechnische Planung

Diese und andere Untersuchungen haben gezeigt, dass mit der Technik der akustischen Simulation eine Detailmodellierung



**Tabelle 5** Vergleich der mit den unterschiedlichen Aufbauten ermittelten Absorptionskenngrößen dieser Anordnung.\*) Für Werte  $> 1$  ist bei der Einbeziehung in schalltechnische Berechnungen 1 zu verwenden

	Frequenz in Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
A (m <sup>2</sup> ) pro Element nach Herstellerangabe	0,14	0,35	0,62	0,77	0,70	0,47
$\alpha$ der Anordnung nach Herstellerangabe	0,28	0,69	1,23 *)	1,53 *)	1,4 *)	0,94
A (m <sup>2</sup> ) pro Element entsprechend DIN EN ISO 354	0,11	0,24	0,37	0,43	0,40	0,31
$\alpha$ der Anordnung entsprechend DIN EN ISO 354	0,21	0,46	0,72	0,83	0,78	0,60

**Bild 16** Kulissenanordnung auf dem Hallraumboden mit Rahmen zur Bestimmung von  $\alpha_{KW}$ 

von Kulissensystemen möglich ist und dass der dabei notwendige bauteilbezogene Absorptionsgrad  $\alpha_B$  aus der für eine bestimmte Anordnung im Hallraum ermittelten Absorptionsfläche bestimmt werden kann. Die von den Herstellern derartiger Systeme für bestimmte Anordnungsichten angegebenen Absorptionsgrade beschreiben die akustische Wirksamkeit unter der Annahme eines diffusen Schallfelds – eine Annahme, die speziell beim Einsatz in Arbeitsstätten wie Produktionshallen und Bürolandschaften oft nicht zutrifft. Hier kann die geometriebedingte Winkelabhängigkeit der Absorption von Kulissendecken für die letztlich erzielte Lärminderung entscheidend sein.

Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn der von einer Maschine über die Reflexion an der Decke an den zugeordneten Bedienerplatz gelangende Schall den Pegel dort bestimmt, weil der Direktschall durch eine an dieser Seite angebrachte abschirmende Scheibe gemindert ist. Eine Kulissenkonstruktion über der Maschine zur Minderung dieses Anteils ist wesentlich weniger effektiv als eine Beurteilung aufgrund ihrer vom Hersteller mitgeteilten Absorption ergibt. Der über die Decke von der Maschine zum zugeordneten Arbeitsplatz gelangende Schall durchstrahlt die Kulissendecke nahezu senkrecht und wird deshalb wesentlich weniger geschwächt, als dies in dem auf diffusen Schalleinfall bezogenen und vom Hersteller angegebenen Absorptionsgrad zum Ausdruck kommt. Mit der Detailmodellierung werden derartige Effekte verfahrensbedingt berücksichtigt.

Aber auch bei einer aufgrund der Gesamtanordnung richtigen Verwendung dieser auf diffusen Schalleinfall bezogenen Absorptionsgrade ist Vorsicht geboten. Die Angabe von Absorptionsgraden, die den Wert 1 auffällig übersteigen, sollte stets Anlass zur Nachprüfung des Messberichts und des verwendeten Messaufbaus sein. Selbstverständlich können sich durch Nebeneffekte auch bei korrekter Bestimmung im Hallraum für hochab-

sorbierende Flächen Werte geringfügig über 1 ergeben und es ist in diesen Fällen auch richtig, diesen Wert bei Berechnungen als 1 anzunehmen. Im hier beschriebenen Beispiel sind aber die vom Hersteller angegebenen Werte aufgrund der fehlenden Rahmenabdeckung bei der Bestimmung regelrecht irreführend (**Tabelle 5**).

Auch wenn der bei Berechnungen mit diesen Werten resultierende Fehler durch die Begrenzung der Werte auf 1 in manchen Fällen nicht sehr groß ist, geben die angegebenen Werte nicht die tatsächliche akustische Wirksamkeit wieder und verwischen bei der schalltechnischen Berechnung durch das „Kappen“ dieser hohen Werte auf 1 die unterschiedliche Wirksamkeit in den einzelnen Frequenzbändern.

Ein ähnliches Problem ergibt sich aufgrund der Definition des Absorptionsgrads für Deckensegel  $\alpha_{\text{Segel}}$  in der Richtlinie über die Schallabsorption abgehängter Unterdecken [6]. Dort wird die gesamte Absorption der anteiligen Deckenfläche inklusive Randspalt und absorbierender Rückseite auf die Plattenvorderseite bezogen und der so bestimmte, den Wert 1 typischerweise übersteigende Absorptionsgrad als  $\alpha_{\text{Segel}}$  weiterverwendet. Als Eingangsgröße für eine Simulationsberechnung ist ein Absorptionsgrad  $> 1$  aber nicht verwendbar und wird auf 1 gekappt. Damit können aber die Ergebnisse einer schalltechnischen Berechnung die tatsächliche Wirkung nicht abbilden. Richtig wäre die genannte bauteilbezogene Beschreibung des einzelnen Deckensegels – zur Detailmodellierung wie in Bild 8 für Kulissen gezeigt – oder aber der auf die gesamte Deckenfläche bezogene Absorptionsgrad (mit der zugrundeliegenden Anordnung als Parameter) zur Grobmodellierung als abgehängte Platte – wie in den Bildern 11 und 12 für das Kulissensystem dargestellt.

Die beschriebene Simulationstechnik eröffnet ein weites Feld zur Integration von geometrisch komplexeren Strukturen wie unterschiedliche Lay-Outs von Kulissensystemen oder Deckensegeln in die schalltechnische Planungspraxis. Sie ermöglicht es in vielen Fällen, die Messung im Schalllabor auf die Bestimmung der bauteilbezogenen Kennwerte zu beschränken und die resultierende akustische Wirksamkeit unterschiedlicher Anordnungen dieser Bauteile dann mit einer Simulationsberechnung zu bestimmen. Diesen Möglichkeiten sollte zukünftig auch im Zuge der Normung in erhöhtem Maße Rechnung getragen werden.

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

**Literatur**

- [1] DIN EN ISO 354: Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen. Berlin: Beuth Verlag 2003.
- [2] CadnaR, Software for the calculation and assessment of sound in rooms, [www.datakustik.com/produkte/cadnar](http://www.datakustik.com/produkte/cadnar)
- [3] *Vorländer, M.*: Auralization. Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality. Berlin: Springer Verlag 2008.
- [4] *Schroeder, M. R.*: New method of measuring reverberation time. J. Acoust. Soc. Am. 37 (1965), S. 409-412.
- [5] *Probst W.*: Die Schallabsorption von Kulissendecken. Lärmbekämpf. 3 (2008) Nr. 2, S. 79-84.
- [6] VDI 3755: Schalldämmung und Schallabsorption abgehängter Unterdecken. Berlin: Beuth Verlag 2013.