

Berechnung der erforderlichen Schallabsorption für kubische Räume in Abhängigkeit der Raumhöhe

Vereinfachte Berechnungsmethode für die Praxisanwendung

Reinhard O. Neubauer

ING.-BÜRO NEUBAUER VDI
THERESIENSTRASSE 28
35049 INGOLSTADT
TEL. 08 41 / 3 41 73

1. Einleitung und Problemstellung

In [1] wurde eine einfache Methode vorgestellt, die eine schnelle und unkomplizierte Vorgehensweise wiedergibt um erforderliche raumakustische Maßnahmen in einem Raum mit Sprach- bzw. Musikknutzung festzulegen. In der Vielzahl der zu planenden Räume besteht eine Anforderung an eine ausreichende Hörsamkeit. Das hier ausführlich dargestellte Verfahren beschränkt sich deshalb auf die Auslegung für Räume mit Sprachnutzung. Für planende Architekten und Ingenieure stellt sich regelmäßig die Aufgabe bereits in den Leistungsphasen 1 bis 4 der HOAI eine bestmögliche Abschätzung raumakustischer Maßnahmen vorzunehmen. Schon aus Gründen der Kostenschätzung während der Grundlagenermittlung ist es wünschenswert pauschal diese Maßnahme so genau wie möglich angeben zu können. Vorkehrungen zur Sicherung einer ausreichenden Hörsamkeit, besonders der Sprachverständlichkeit, benötigen im wesentlichen die Kenntnis der Raumabmessungen als auch den diesen Flächen zugeordneten Schallabsorptionsgrade. Die allgemein für kleine bis mittelgroße Räume mit Anspruch auf Hörsamkeit anzuwendende Richtlinie: DIN 18041 [2] stellt dazu Richtwerte sowie eine ausführliche Rechenvorschrift bereit. Es stellt sich nun während der Vorplanung häufig das Problem, daß noch keine genauen Angaben der verwendeten Materialien getroffen werden können. Eine kostenintensive raumakustische Variationsberechnung wird deshalb regelmäßig umgangen. Nicht selten wird aus diesen Gründen die raumakustische Entwurfsplanung erst in der Ausführungsplanung vorgenommen. Es wird infolgedessen die Frage gestellt, ob raumakustische Maßnahmen nicht bereits im Vorfeld einer genauen Ausführungsplanung, ohne Kenntnis der verwendeten Materialien und des Raumvolumens, berücksichtigt werden können. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Raumhöhe bekannt ist und der Raum in erster Linie für Sprachdarbietungen genutzt werden soll.

2. Voraussetzungen und Vorgehensweisen bei der Entwicklung des Näherungsverfahrens

Das Berechnungsverfahren bezieht sich auf kubische Rechteckräume, Flach- und Langräume werden nicht behandelt. Als weitere Einschränkung werden weder Luft- noch Streukörperabsorptionen berücksichtigt, da diese für kleine Räume und mittlere Frequenzen sicher vernachlässigt werden können [3]. Um für kleine bis mittelgroße Räume im Zuge der Vorplanung eine raumakustische Beurteilung treffen zu können, vergleicht man in erster Näherung berechnete Nachhallzeiten mit „optimalen“ Nachhallzeiten. Damit lassen sich mit hinreichender Genauigkeit Räume für Sprachdarbietungen, zumindest bezüglich des raumakustischen Kriteriums der Nachhallzeit, beurteilen. In DIN 18041 bzw. in der Literatur werden für Räume mit raumakustischen Anforderungen an die Hörsamkeit „optimale“ Nachhallzeiten bereitgestellt (s. z. B. [4] bis [10]).

Die „optimale“, volumenabhängige Nachhallzeit wird dabei in der Regel für die Oktavmittenfrequenz von 500 Hz angegeben. Dem Raumvolumen kann aber nicht eindeutig eine konstante Nachhallzeit zugeordnet werden, so daß sich ein oberer und unterer Nachhallzeitwert ergibt. Damit wird dem „Streubereich“ einer optimalen Nachhallzeit Rechnung getragen. Der optimale Wert einer zu einem Raumvolumen gehörenden Nachhallzeit wird im nachstehenden „Soll-Nachhallzeit“ genannt und kann, als Mittelwert angegeben, nach oben bzw. nach unten schwanken. Mit der Bezeichnung Soll-Nachhallzeit wird deutlich, daß einem Volumen ein bestimmter Wert aus dem Bereich der optimalen Nachhallzeit zugeordnet wurde. Aufgrund unterschiedlicher Literaturangaben über „optimale“ Nachhallzeiten wurden nachstehend die in [6] angegebenen „optimalen“ Nachhallzeiten gewählt und sind als Unter- und Obergrenze der „optimalen“ Nachhallzeit bei 500 Hz wiedergegeben:

$$T_{\text{Opt.}} = 0,6 - 1,1 \text{ s}$$

2.1 Berechnungsgrundlagen

Die klassische Berechnung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche erfolgt mittels der Sabine'schen Gleichung. Die rechnerische Ermittlung der in dem Raum

vorhandenen äquivalenten Schallabsorptionsflächen ermöglicht die Vorhersage der Nachhallzeiten in dem Raum (T_{ist}). Die nachstehende Gleichung 1 zeigt den funktionalen Zusammenhang zwischen Nachhallzeit, Volumen und äquivalente Schallabsorptionsfläche:

Mittlere Nachhallzeit:

$$T_{\text{ist}} = \frac{0,163 \cdot V}{A} = \frac{0,163 \cdot V}{\bar{\alpha} \cdot S_{\text{ges.}} + A_{\text{Pers.}}} \quad (1)$$

V: Raumvolumen in m^3

$\bar{\alpha}$: Gemittelter Schallabsorptionsgrad

S: Fläche in m^2

T: Nachhallzeit in s

A: Äquivalente Schallabsorptionsfläche des Raumes in m^2

Durch Vorgabe einer Soll-Nachhallzeit ist damit die zusätzlich erforderliche äquivalente Schallabsorptionsfläche festgelegt:

$$\Delta A = 0,163 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{Soll}}} - \frac{1}{T_{\text{ist}}} \right) \quad (2)$$

Zur Abschätzung der volumenabhängigen Soll-Nachhallzeit wurde nachstehende Schätzfunktion mit Hilfe der Werte aus DIN 18041 gewonnen.

Soll-Nachhallzeit:

$$T_{\text{Soll}} = -0,12 + 0,34 \cdot \text{Log}_{10}(V) \quad (3)$$

Die volumenabhängig berechneten Soll-Nachhallzeiten nach Gl. (3) sind in *Bild 1* den Werten aus DIN 18041 grafisch gegenübergestellt.

Damit kann für jedes Raumvolumen im u. a. Bereichsintervall problemlos eine Soll-Nachhallzeit bestimmt werden. Mit Hilfe der Gl. (2) ist damit, für eine gegebene ebene Fläche, der erforderliche Schallabsorptionsgrad des zusätzlich benötigten Materials genau festgelegt.

Erforderlicher Schallabsorptionsgrad:

$$\alpha = \left(\frac{\Delta A}{S_{\text{Material}}} \right) \quad (4)$$

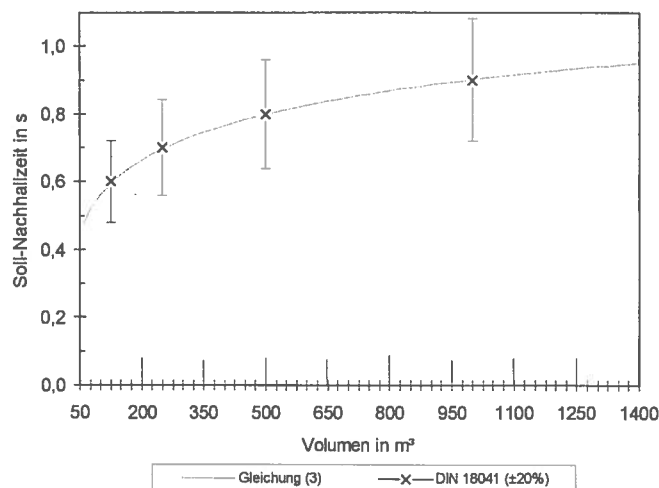


Bild 1. Vergleich der in DIN 18041 angegebenen und nach Gl. (3) berechneten Soll-Nachhallzeiten.

Die Gl. (4) stellt in diesem Zusammenhang die gesuchte Größe dar, mit deren Hilfe das erforderliche schallabsorbierende Material bestimmt wird. Die bestmögliche Abschätzung der notwendigen äquivalenten Schallabsorptionsfläche ΔA ist dabei Grundvoraussetzung einer Kostenabschätzung der raumakustischen Maßnahmen. Der gemittelte Schallabsorptionsgrad der Raumbofläche mit verschiedenartigen nebeneinanderliegenden Bereichen schallabsorbierender Materialien wird dabei durch flächenanteilmäßige Addition der einzelnen äquivalenten Schallabsorptionsflächen ermittelt:

Gemittelter Schallabsorptionsgrad des Raumes:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S_{\text{ges.}}} \quad (5)$$

Man kann sich in der Praxis leicht überzeugen, daß bei der Planung von Räumen immer wieder die gleichen Bauteilkonstruktionen bzw. -materialien zur Anwendung gelangen. Werden gängige Bauteilkonstruktionen bzw. -materialien herangezogen, kann α als Mittelwert dargestellt werden. Ist α örtlich konstant, kann S gekürzt werden und es wird:

$$\bar{\alpha} = \alpha_m$$

Zur Abschätzung der Schallabsorption der Bauteilkonstruktionen (z. B. Mauerwerk verputzt, Gipskartonständerwände, Fenster, Parkett etc.) wurden 48 Materialien und deren Schallabsorptionsgrade aus Literaturangaben [3; 4; 6; 7; 12 bis 19] entnommen und ausgewertet. Der Mittelwert der Schallabsorptionsgrade der Materialien beträgt:

$$\alpha_m \approx 0,05$$

(Mittelung der Oktavwerte 250–4000 Hz und Rundung auf ein Zwanzigstel).

Zur raumakustischen Projektierung ist es meist ausreichend, nur eine Teilfläche festzulegen die als schallabsorbierende Fläche auszubilden ist. Weist man der restlichen Raumbegrenzungsfläche bestimmte schallabsorbierende Eigenschaften zu, läßt sich so der gesuchte Schallabsorptionsgrad der vorgegebenen Teilfläche in Abhängigkeit der Raumhöhe angeben. Für die nachstehenden Berechnungen wird die Deckenfläche (S_D) als Hauptnutzungsfläche festgelegt, welche in der Praxis auch als bevorzugte Fläche zur Bekleidung mit Schallabsorbieren verwendet wird. Der gesuchte Schallabsorptionsgrad (ohne Personenabsorption) ergibt sich dann zu:

$$\alpha_D = \frac{0,163 \cdot h}{T_{\text{Soll}}} - \frac{\sum_n \alpha_n S_n}{S_D} \quad (6)$$

$\sum_n \alpha_n S_n$ = Äquivalente Schallabsorptionsfläche der „restlichen Raumbegrenzungsfläche“, d. h. der Wände (incl. Fenster) und des Fußbodens ($n = 1$ bis 5).

Bei Kenntnis der Soll-Nachhallzeit und der „Restflächen-

schallabsorption“: $\frac{\sum \alpha_n S_n}{S_D}$ ist die Raumhöhe zur Festlegung des erforderlichen Schallabsorptionsgrades der Decke hinreichend.

2.2 Raumformen und Raumabmessungen

Die Form des Raumes hat auf die akustische Qualität einen bedeutenden Einfluß. Mit Hilfe der Gesetzmäßigkeiten zur Ausbildung diffuser Schallfelder in geschlossenen Räumen leitete *Gruhl* [11] zulässige Abmessungen der Raumachsen für kubische Rechteckräume ab. Nach *Gruhl* gelten nachstehende Bedingungen für die Raumachsen l , b , h des kubischen Raumes:

$$l/h < 3$$

$$\text{bzw. für } l/h > 3: b/h < 3, l/b < 2$$

In der Praxis werden Räume nicht willkürlich groß gebaut. Schon deshalb nicht, da die Baukosten proportional mit dem Bauvolumen, d. h. mit der Kubikmeterzahl des umbauten Raumes wächst. Für die nachstehenden Betrachtungen werden infolgedessen die Raumabmessungen auf „durchschnittliche“ Bereichsgrößen kleiner bis mittelgroßer Räume beschränkt:

Raumhöhe: $h = 2,5$ bis 7 m

Raumbreite: $b = 4$ bis 10 m

Raumlänge: $l = 5$ bis 20 m

Damit ergeben sich die Grenzen der betrachteten Volumina zu: $50 \leq V \leq 1400 \text{ m}^3$.

Bei Ausdehnung der Raumachsen (l , b , h) mit einer konstanten Schrittweite, ergibt sich eine bestimmte Volumenhäufigkeit. Werden die berechneten Volumina über der Raumhöhe aufgetragen zeigt sich erwartungsgemäß, daß zu einer bestimmten Raumhöhe unterschiedliche Raumvolumina möglich sind. Das unten dargestellte *Bild 2* verdeutlicht diesen Zusammenhang für eine Schrittweite von $0,5$ m.

Mit dem oben angegebenen mittleren Schallabsorptionsgrad (α_m) läßt sich näherungsweise der Restflächenschallabsorptionsgrad in Abhängigkeit der Teilflächen: $S_D =$ Deckenflächen und $\Sigma S_n =$ Restoberfläche, für jeden Raum berechnen. Zur grafischen Darstellung der Häufigkeit der auftretenden Restflächenschallabsorptionsgrade wird das kombinierte Bereichsintervall für kubische Räume: $l/h < 3$ und $l/b < 2$ mit einer gewählten Schrittweite von $0,5$ m herangezogen.

In *Bild 3* ist die relative Häufigkeit des berechneten Restflächenschallabsorptionsgrades wiedergegeben. Die dargestellte Datenmenge zeigt sich als eingipflige, rechtsschiefe Verteilung. Der arithmetische Mittelwert beträgt

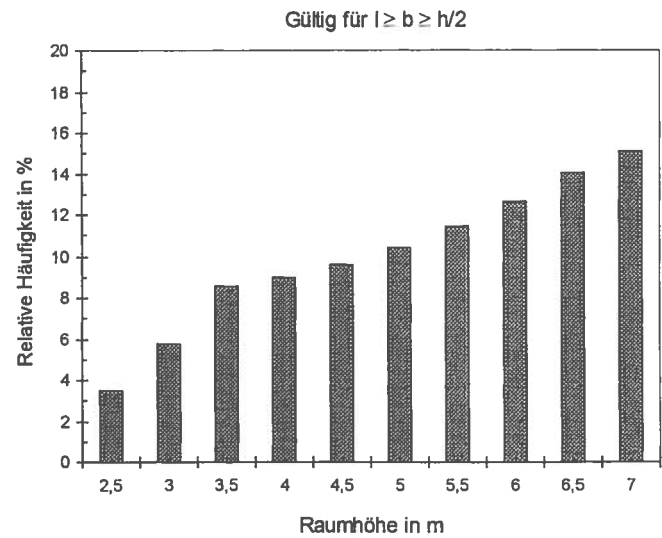


Bild 2. Relative Häufigkeit in % der Raumhöhen in m für kubische Räume.

gerundet $0,17$. Die Streuung des Durchschnitts, d. h. der Variationskoeffizient beträgt rd. 20% .

2.3 Grafische Darstellung des erforderlichen Schallabsorptionsgrades mit Fallbeispiel

In [20] wurde gezeigt, daß die Bewertungsmethode nach ISO 11654 [21], besonders die Klassenbildung, geeignet ist schnell und effizient ein bestimmtes schallabsorbierendes Material festzulegen. Die Klasseneinteilung nach ISO 11654 wird deshalb auch für das hier vorgestellte vereinfachte Verfahren angewendet, wobei näherungsweise der berechnete Schallabsorptionsgrad dem gewichteten Schallabsorptionsgrad nach ISO 11654 gleichgesetzt wird. Diese Vereinfachung ist zulässig, denn der gewichtete Schallabsorptionsgrad steht für Breitbandabsorber in guter Übereinstimmung mit dem arithmetisch gemittelten Schallabsorptionsgrad [22]. Der Vorteil der Klassenein-

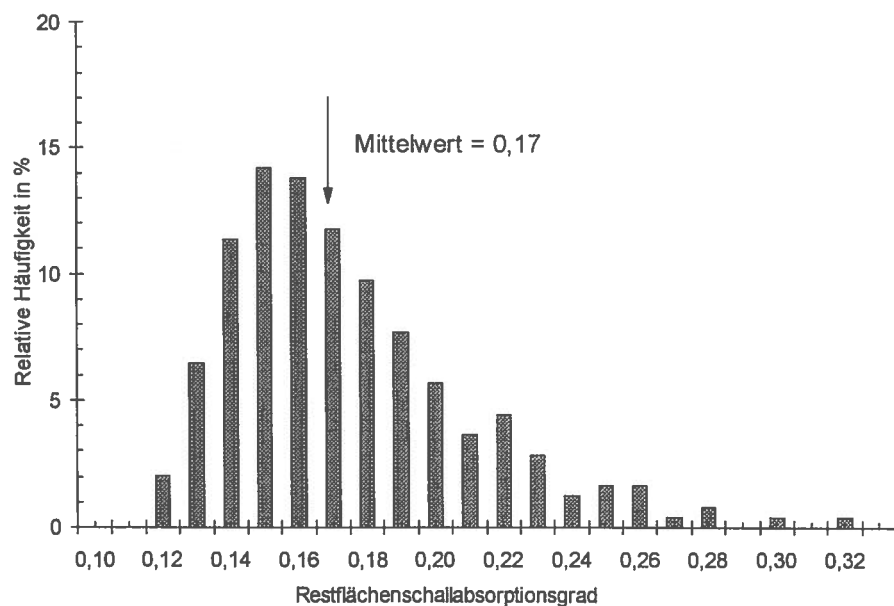


Bild 3. Relative Häufigkeit in % des Restflächenschallabsorptionsgrades für kubische Räume.

teilung liegt nun darin, daß einem bestimmten Schallabsorptionsgrad direkt eine bestimmte Gruppe schallabsorbierender Materialien zugeordnet werden kann und dadurch eine optimale Auswahlmöglichkeit besteht.

Zur grafischen Darstellung der Gl. (6) wird über alle Raumkombinationen der erforderliche Schallabsorptionsgrad einer Deckenbekleidung berechnet und der Klasseneinteilung nach ISO 11654 gegenübergestellt. In dem *Bild 4* sind die Ergebnisse wiedergegeben. Der zulässige Schwankungsbereich um den Optimalwert des volumenabhängig berechneten Schallabsorptionsgrades, stellt dabei die volumenunabhängige Ober- und Untergrenze der optimalen Nachhallzeit dar.

In *Bild 4* ist der notwendige Schallabsorptionsgrad einer vorzusehenden Deckenbekleidung in Abhängigkeit der Raumhöhe für Räume mit Anforderungen an eine ausreichende Hörsamkeit dargestellt. An einem Beispiel soll der Einfluß der Restflächenschallabsorption bei der Berechnung des erforderlichen Schallabsorptionsgrades mittels *Bild 4* verdeutlicht werden:

Ein Raum der Höhe $h = 3,0$ m soll für Sprache (mittlere Soll-Nachhallzeit $0,5$ s– $0,8$ s) ausgelegt werden. Die Frage, ob die Deckenfläche schallabsorbierend bekleidet werden muß, kann durch *Bild 4* einfach abgelesen werden.

Aus *Bild 4* folgt: Es ist ein Schallabsorber gem. ISO 11654 der Klasse D zu verwenden. Würde der Schallabsorptionsgrad mit Hilfe der Gl. (6) ohne „Restflächenabsorption“ berechnet, wäre ein Material der Klasse A-C erforderlich.

Es ist demnach sinnvoll, während der Planungsphase zur Kostenabschätzung die Schallabsorption der nicht mit schallabsorbierenden Materialien bekleideten Raumbegrenzungsflächen bestmöglich abzuschätzen. Im obigen Beispiel drückt sich der Unterschied der Ergebnisse vereinfachend in der Klasse des Schallabsorbers nach ISO 11654 aus, der zu wählen wäre. Ohne Berücksichtigung der Restflächenschallabsorption ist es denkbar, daß pauschal gesehen ein ungeeignetes schallabsorbierendes Material gewählt wird. Dies könnte zur Folge haben, daß Mehrkosten bei Änderung des Deckenabsorbers, bzw. bei Verwendung eines unnötig hoch schallabsorbierenden Materials, welches im ungünstigsten Fall zur Überdämpfung des Raumes führt, entstünden.

Die hier vorgestellte vereinfachte Bestimmung des erforderlichen Schallabsorptionsgrades der Deckenfläche wird nachstehend anhand einer Beispielberechnung mit den Ergebnissen gemäß DIN 18041 und mit den Ergebnissen der frequenzabhängigen Berechnung für die mittleren Frequenzen von 500 Hz bis 1000 Hz verglichen.

Der untersuchte Raum soll für Sprachdarbietungen dienen (Beratungs- und Konferenzraum). Das Raumvolu-

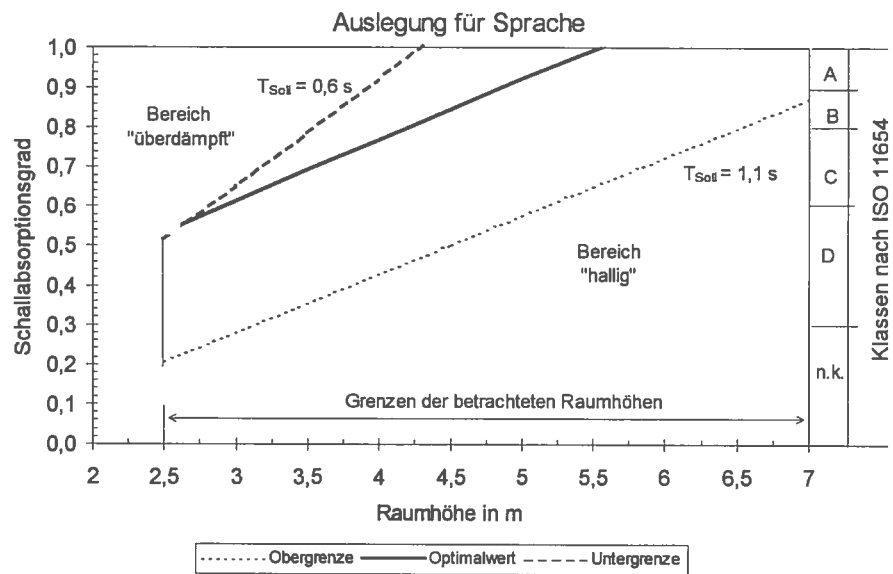


Bild 4. Erforderlicher Schallabsorptionsgrad einer Deckenfläche in Abhängigkeit der Raumhöhe, nach Gl. (6).

men beträgt 181 m^3 . Die Auslegung soll für 15 Personen erfolgen.

Nachstehende Bauteilkonstruktionen sollen vorgesehen werden:

- Decke: Stahlbeton.
- Fußboden: Harter Gehbelag (z. B. Linoleum o. ä.).
- Es sollen Fenster mit Isolierglasscheiben (4/12/4) und Türen in Holz eingebaut werden.
- Die massiven Wände sollen verputzt und tapeziert werden.
- Die Raumhöhe beträgt $h = 3,5$ m, die Deckenfläche beträgt $S = 51,7 \text{ m}^2$.

Das Verhältnis von Raumvolumen zur Personenzahl berechnet sich zu: $V/n = 12 \text{ m}^3/\text{Pers.}$

Die Soll-Nachhallzeit nach Gl. (3) beträgt $0,65$ s.

Der erforderliche Schallabsorptionsgrad ergibt sich mit *Bild 4*, als Optimalwert abgelesen, zu: $\alpha = 0,70$. Als Näherung entspricht dies einem Material der Klasse C. Die Berücksichtigung der Personenabsorption bei 500 Hz bis 1000 Hz kann dabei problemlos mit $(A_{\text{Pers.}}/S_D)$ als Subtraktionsglied in Gl. (6) eingerechnet werden. Nach [6] kann der frequenzabhängige Schallabsorptionsgrad für o.g. Frequenzbereich mit $\alpha_{\text{Pers.}} = 0,45$ angesetzt werden. Die Berechnung für Vollbesetzung liefert $A_{\text{Pers.}} = 7 \text{ m}^2$. Damit reduziert sich der erforderliche Schallabsorptionsgrad auf: $\alpha = 0,56$ (Klasse D).

Nach DIN 18041 ist: $A_0 = 10 \text{ m}^2$, $A_{\text{Soll}} = 45 \text{ m}^2$, $\Delta A = 35 \text{ m}^2$, damit folgt: $\alpha = 0,68$ (Klasse C).

Gemäß DIN 18041 ist eine frequenzunabhängige Personenabsorption mit $A_{\text{Pers.}} = 7,5 \text{ m}^2$ anzusetzen. Damit ergibt sich ein erforderlicher Schallabsorptionsgrad von $\alpha = 0,54$ (Klasse D).

Die frequenzabhängige Berechnung liefert für den leeren unbehandelten Raum im o.g. Frequenzbereich $A_{\text{ohne}} = 8,5 \text{ m}^2$, $A_{\text{Soll}} = 46 \text{ m}^2$, $\Delta A = 36,5 \text{ m}^2$, und damit $\alpha = 0,71$ (Klasse C).

Die Berücksichtigung der Personenabsorption bei 500–1000 Hz nach [6] mit $\alpha_{\text{Pers.}} = 0,45$ liefert für Vollbesetzung eine erforderliche äquivalente Schallabsorptionsfläche von $\Delta A = 30,5 \text{ m}^2$. Damit wird der erforderliche Schallabsorptionsgrad gleich $\alpha = 0,59$ (Klasse D).

Als Projektierungshilfe wäre für diesen Raum in den Kalkulationskosten ein Absorber der Klasse D nach ISO 11654 aufzunehmen.

Mit dem obigen Beispiel wurde gezeigt, daß die Übereinstimmungen der Berechnungsergebnisse befriedigend ist. Eine gute Übereinstimmung besteht bei den Schallabsorberklassen.

Mit Hilfe einer Tabelle von schallabsorbierenden Materialien und den zugehörigen Schallabsorberklassen gemäß ISO 11654 können so projektierende Architekten, Ingenieure und Planer schnell und zielgerichtet Angaben für zusätzliche Kosten raumakustischer Mindestmaßnahmen hinreichend genau abschätzen.

3. Zusammenfassung

Durch Auswertung der in der Literatur angegebenen frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade üblicher Materialien wurde ein mittlerer Schallabsorptionsgrad gefunden. Unter der Annahme der Raumgeometrien, die den von *Gruhl* angegebenen Definitionen „kubischer“ Räume entsprechen, wurde ein „Restflächenschallabsorptionsgrad“ definiert und berechnet. Unter den genannten Voraussetzungen wurde mittels Gl. (6) das *Bild 4* entwickelt, aus dem sehr bequem der für ΔA benötigte Schallabsorptionsgrad der Decke in Abhängigkeit der Raumhöhe entnommen werden kann. Mit Hilfe der in ISO 11654 vorgeschlagenen Klasseneinteilung schallabsorbierender Materialien kann, in erster Näherung, der gefundene Schallabsorptionsgrad als „Schallabsorberklasse“ abgelesen werden. Durch Katalogisierung schallabsorbierender Materialien kann so schnell und effizient das notwendige in einen Raum einzubringende schallabsorbierende Material ausgewählt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich das vorgestellte Verfahren gegenüber der Berechnung nach DIN 18041 sehr effizient und zeitsparend erwies. Dem planenden Architekten bzw. Ingenieur wird damit ein Hilfsmittel zur Hand gegeben, mit dem bereits während der Vorplanung kostenabschätzend raumakustische Mindestmaßnahmen festgelegt werden können.

Abschließend soll nochmals betont werden, daß das vorgestellte Näherungsverfahren eine Projektierungshilfe im Zuge der Vorplanung darstellt und die tatsächlichen

raumakustischen Verhältnisse nicht exakt wiedergeben kann. Es ist besonders geeignet zur Festlegung raumakustischer Mindestmaßnahmen und kann bevorzugt von Architekten und Planern im Stadium der Entwurfsplanung angewendet werden.

Literatur

- [1] *Neubauer, R.O.*: Berechnung des notwendigen Schallabsorptionsgrades einer Deckenbekleidung in Abhängigkeit der Raumhöhe. Vereinfachte Berechnungsmethode für die Praxisanwendung. DAGA: Kurzvorträge und Kurzreferate. Bonn, 1996.
- [2] DIN 18041: Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen. Berlin: Beuth, 1968.
- [3] *Kuttruff, H.*: Room Acoustics. 3rd ed. London: Elsevier APPLIED SCIENCE, 1991.
- [4] *Fasold, W., Sonntag, E. und Winkler, W.*: Bauphysikalische Entwurfslehre: Bau- und Raumakustik. Köln: Müller, 1987.
- [5] *Cremer, L.*: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band I+II. Stuttgart: S. Hirzel, 1978.
- [6] *Hartmann, G.*: Praktische Akustik. Bd. 2: Raum- und Bauakustik. München: Oldenbourg, 1968.
- [7] *Baron, M.*: Auditorium Acoustics and Architectural Design. London: E & FN Spon, 1993.
- [8] TGL-Richtlinie Nr. 10687, Teil 4, Schallabsorption in Räumen, Ausgabe 1982.
- [9] *Ahnert, W. und Steffen, F.*: Beschallungstechnik: Grundlagen und Praxis. Stuttgart: S. Hirzel, 1993.
- [10] ÖNorm B 8115, T 3. Schallschutz und Raumakustik im Hochbau: Raumakustik.
- [11] *Gruhl, S.*: Richtlinie zur Berechnung der Lärmimmission in Räumen. Dresden: ZIAS, 1981.
- [12] *Beranek, L.L.*: Acoustics. 3rd. ed. New York: Acoustical Society of America, 1990.
- [13] *Wendehorst, O.W.*: Bautechnische Zahlentafeln. Stuttgart: B.G. Teubner, 1994.
- [14] *Schneider, K.-J.*: Bautabellen für Architekten. 11. Auflage. Düsseldorf: Werner, 1994.
- [15] *Gösele, K. und Schüle, W.*: Schall – Wärme – Feuchte. 9. Auflage. Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GmbH, 1989.
- [16] *Lutz, P., Jenisch, R. und Klopfer, H.* et al.: Lehrbuch der Bauphysik. 3. Auflage. Stuttgart: B.G. Teubner, 1994.
- [17] *Bobran, H.W.*: Handbuch der Bauphysik. 6. Auflage: Braunschweig: Vieweg, 1990.
- [18] *Heckl, H. und Müller, H.A.*: Taschenbuch der Technischen Akustik. Berlin: Springer, 1975.
- [19] *Schulz, P.*: Schallschutz – Wärmeschutz – Feuchteschutz – Brandschutz im Innenbau. 3. Auflage. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1980.
- [20] *Neubauer, R.O.*: Anwendung der ISO 11654 in der Praxis. Bauphysik 17 (1995) H. 6, S.185–188.
- [21] International Standard ISO 11654: Acoustics-Sound absorbers for use in buildings. Rating of sound absorption. 3rd Draft, September 1994.
- [22] *Neubauer, R.O.*: Beurteilung und Klassifizierung von Schallabsorptionsmaterialien. Unveröffentlichte Untersuchung zur Beurteilungsmethode nach ISO 11654. April 1994.