

5

40. Jahrgang
Oktober 2018, 270–275
ISSN 0171-5445

Sonderdruck

Bauphysik

Wärme | Feuchte | Schall | Brand | Licht | Energie

Wirkung von Nachhall in Bildungsräumen

Noemi Martin
Andreas Liebl

Wirkung von Nachhall in Bildungsräumen

Menschen, welche bspw. aufgrund von Hörstörungen oder eingeschränkten Sprachkenntnissen ein erhöhtes Bedürfnis für gute Hörsamkeit haben, sollten in der Erfüllung dieses Bedürfnisses von der raumakustischen Umgebung unterstützt werden. In der Neufassung der DIN 18041 aus dem Jahr 2016 werden daher Anforderungen an die Nachhallzeit definiert, die je nach Nutzergruppe und Nutzungskontext eines Raumes das Hörverstehen optimal unterstützen sollen. Die in dieser Norm festgelegten Anforderungen basieren auf der Annahme, dass in den oben beschriebenen Fällen von Inklusion eine Verringerung der Nachhallzeit zu einem verbesserten Sprachverstehen führt. Das Projekt „Wirkungen von Nachhall in Bildungsräumen“ beschäftigt sich mit der Frage, ob empirisch nachgewiesen werden kann, dass die Anwendung der DIN 18041: 2016 diese Anforderung in der Praxis erfüllt, d. h. ob die definierten Zielwerte ausreichen, um dem Thema Inklusion aus raumakustischer Sicht gerecht zu werden. Die Forschungsfrage wurde sowohl in einer Literaturstudie als auch über die empirische Evaluation in einen Hörversuch adressiert. In diesem Artikel werden die Ergebnisse der Literaturrecherche berichtet.

Stichworte: Nachhallzeit, Sprachverständlichkeit, Schule, Raumakustik, Hörstörung

1 Hintergrund

Personen mit einem erhöhten Bedürfnis nach guter Hörsamkeit (bspw. aufgrund von Hörstörungen oder eingeschränkten Sprachkenntnissen) sollten durch die räumlichen Begebenheiten bei der Bewältigung ihrer Benachteiligung unterstützt werden. In der DIN 18041:2016 [1] werden hierfür Anforderungen an die Nachhallzeit definiert, welche je nach Nutzergruppe/Nutzungskontext und Raumvolumen eines Raumes die Hörsamkeit unterstützen sollen. Die in der DIN 18041:2016 [1] definierten Anforderungen basieren auf der Annahme, dass eine Verringerung der Nachhallzeit im Falle von Inklusion zu einer verbesserten Hörsamkeit führt. Die für die jeweiligen Nutzungsarten angegebenen Toleranzbereiche für die Nachhallzeit beschreiben eine Reduktion der Nachhallzeit je höher die Anforderung an die Hörsamkeit ist. Dies bedeutet auch einen unterschiedlich hohen baulichen Aufwand. Es ist somit anzunehmen, dass dieser Aufwand sich auch in einem nachweisbaren Nutzen manifestiert. Das heißt, dass

Effects of reverberation time in educational spaces

Individuals with an increased need for good hearing (e.g. due to hearing impairments or limited language skills) should be supported by the spatial situation to deal with their disadvantage. Therefore, in DIN 18041: 2016 requirements for the reverberation time are defined which should support audibility depending on the user group and context of use of a room. The requirements defined in DIN 18041: 2016 are based on the assumption that a reduction of the reverberation time leads to improved audibility when considering inclusion. The project "Effects of Reverberation time in Educational Spaces" deals with the question of whether it can be empirically proven that the application of DIN 18041: 2016 meets this requirement in practice, that is, whether the defined requirements are sufficient to meet the topic of inclusion from a room acoustical point of view. The research question was addressed by a literature review and a listening test. In this article the results of the literature review are reported.

Keywords: reverberation time, speech intelligibility, school, room acoustics, hearing disorder

die entsprechend DIN 18041:2016 [1] unterschiedlich konditionierten Räume eine für die jeweilig adressierte Nutzergruppe spürbar verschiedene Qualität hinsichtlich der Hörsamkeit aufweisen und sich insbesondere im Falle von Inklusion positiv auswirken.

Das im Folgenden in Auszügen dargestellte Forschungsprojekt widmet sich der Frage, ob empirisch nachgewiesen werden kann, dass die Anwendung der DIN 18041:2016 [1] diesem Anspruch in der Praxis genügt, d. h. ob die definierten Anforderungen hinreichend sind, um dem Thema Inklusion aus raumakustischer Sicht in ausreichendem Maße zu begegnen. Zur Beantwortung der Forschungsfrage lassen sich unterschiedliche Methoden heranziehen. Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Literaturstudie dargestellt, die den aktuellen Forschungsstand in Bezug auf den Einfluss raumakustischer Konditionierungen auf die Hörsamkeit und Leistungsfähigkeit untersucht. Im zweiten Teil des Projekts wurden die Anforderungen der DIN 1841:2016 [1] im Hörversuch evaluiert. Der Hörversuch ist nicht Inhalt dieser Publikation.

2 Literaturstudie

Ziel der Studie war die Erstellung einer Literaturübersicht zum Einfluss der Ausprägung raumakustischer Parameter (insbesondere der Nachhallzeit) auf die Sprachverständlichkeit, Höranstrengung und Leistung von Personen, insbesondere Heranwachsenden in Bildungsräumen. Die Recherche erfolgte in der wissenschaftlichen Literaturdatenbank Scopus.

Manuskripte, welche den wissenschaftlichen Standards entsprechen, eine ausreichend hohe Relevanz zur Beantwortung der Fragestellung sowie eine hinreichende wissenschaftliche Aktualität aufweisen, wurden als Teil der Endauswahl aufbereitet und in einer Zusammenschau in den wissenschaftlichen Kontext eingeordnet. Aufgrund des hohen Umfangs an Ergebnissen wurden graue Literatur sowie Konferenzbeiträge und Artikel die vor dem Jahr 2000 publiziert wurden aus der Ergebnissichtung ausgeschlossen. Auf diesem Weg konnten 33 relevante wissenschaftliche Arbeiten identifiziert werden, welche in die Analyse einfließen.

Die thematischen Schwerpunkte der identifizierten Arbeiten (N=33) bildeten Untersuchungen zur Variation von Nachhallzeiten und Signal-Rausch-Abstand (SNR) sowie zu den Unterschieden der Anforderungen an gute Hörsamkeit in Abhängigkeit von Fähigkeiten, Entwicklungsstand und Lebensalter. Neu in den Forschungsfokus rückt in Bezug auf Nachhallzeiten und Sprachverstehen die Betrachtung des Verhältnisses von frühen zu späten Reflektionen.

2.1 Nachhallzeit & SNR

Die Untersuchungsergebnisse zum Zusammenhang von Nachhallzeit und den verschiedenen abhängigen Variablen wie Sprachverständlichkeit, Gedächtnisleistung und Höranstrengung sind vielfältig und lassen sich anhand der analysierten Literatur in den folgenden Kernaussagen zusammenfassen.

- Bei konstantem SNR verbessert sich die Sprachverständlichkeit mit abnehmender Nachhallzeit [2–7]. Lernprozesse, welche Gedächtnisleistung erfordern, werden auch bei hoher Sprachverständlichkeit durch die Zunahme der Nachhallzeit oder die Zunahme von Hintergrundgeräusch negativ beeinträchtigt [8–10]. Weiterhin reduzieren kurze Nachhallzeiten das durch die anwesenden Personen verursachte Hintergrundgeräusch [11–14].
- Lange Nachhallzeiten können die Sprachverständlichkeit beeinträchtigen, sie können die Sprachverständlichkeit jedoch auch erhöhen, da der Anteil an frühen und damit für das Sprachverstehen förderlichen Reflektionen erhöht wird [11, 15]. Sowohl Kinder als auch Erwachsene profitieren vom Hinzufügen früher Reflektionen [2]. Lange Nachhallzeiten wirken sich weiterhin bei Nichtmuttersprachlern je nach Sprachkompetenzlevel unterschiedlich und teilweise auch positiv aus. Personen mit geringen Sprachkompetenzlevel können von verlängerten Nachhallzeiten aufgrund der minimal verlängerten zur Verfügung stehenden Verarbeitungsdauer profitieren [16].

Ob die Nachhallzeit einen positiven oder negativen Einfluss auf die Sprachverständlichkeit von Nutzsignalen

hat, hängt weiterhin von der Art der Störquelle und der Positionierung der Störquelle im Raum ab [3, 7, 17].

- Kritische Überdämpfung muss vermieden werden, damit auch in den weiter vom Sprecher entfernten Hörerplätzen ausreichend Schallenergie ankommt. Das heißt, dass sowohl Minimal- als auch Maximalwerte für die Nachhallzeit definiert werden müssen, wenn gute Sprachverständlichkeit erreicht werden soll [14, 18].
- Nachhallzeit ist eines der wichtigsten Kriterien für gute akustische Qualität in Klassenräumen. Allerdings spielen viele weitere Faktoren eine Rolle, so dass auch bei Nachhallzeiten > 1 Sekunde eine gute akustische Qualität erreicht werden kann [19].

Eine störende Hintergrundgeräuschkulisse und damit ein geringer SNR stellt sich in den identifizierten Arbeiten häufig als starker Beeinträchtigungsfaktor für die Sprachverständlichkeit dar. Je höher der SNR, desto besser ist die Leistung im Hörverstehen und damit die Sprachverständlichkeit [4–7, 20]. Um bei unterschiedlichen SNR identisch gute Sprachverständlichkeit zu erreichen, müssen unterschiedliche Anforderungen an Nachhallzeitzielwerte gestellt werden [20, 21].

Insgesamt sind die Effekte auf die Sprachverständlichkeit durch Variation des SNR sehr viel höher als Effekte durch Variation der Nachhallzeit. Demnach ist es in Klassenräumen zunächst essentiell, dass der Hintergrundgeräuschpegel und Störgeräusche reduziert werden [2, 8, 15, 22].

2.2 Positive Effekte verlängerter Nachhallzeiten und das Verhältnis von frühen zu späten Reflektionen

Mehrere der im Rahmen der vorliegenden Literaturstudie identifizierten Arbeiten legen dar, dass bei einer bestehenden Beeinträchtigung (wie bspw. Fremdsprache, Hörschädigung oder geringem SNR) eine Verbesserung der Leistung durch eine Anhebung der Nachhallzeit erreicht werden kann. Dies kommt dadurch zustande, dass die durch die Beeinträchtigung reduzierte Verarbeitungskapazität durch die geringfügig längeren Verarbeitungszeiten besser ausgeglichen werden kann [16, 23–24].

Ein besonderer Fokus liegt diesbezüglich weiterhin auf der Betrachtung des Verhältnisses von frühen zu späten Reflektionen bzw. von nützlichen und schädlichen Schallanteilen. Siebein, Gold und Ermann [25] definieren hierfür, wie diese Schallanteile im Verhältnis betrachtet werden können:

$$\frac{\text{useful energy}}{\text{detrimental energy}} = \frac{\text{direct sound} + \text{early reflections}}{\text{reverberant energy} + \text{background noise}}$$

Als Parameter für die Identifikation der optimalen Nachhallzeit wird hierbei der Parameter U_t herangezogen (*useful-to-detrimental energy ratio concept*). Hierbei wird die Schallenergie, die zeitlich betrachtet nach dem Direkt-schall am Ohr des Hörers ankommt, in nützliche und schädliche Anteile aufgeteilt. Dabei gilt es, den Zeitpunkt t zu identifizieren, zu dem die Berechnung von U_t die beste Vorhersage über die resultierende Sprachverständlichkeit macht. Bei normalhörenden Personen erlaubt laut Yang und Hodgson [24] der Wert U_{50} eine gute Abschätzung

über die Sprachverständlichkeit. D.h. Schallenergie, die später als 50ms nach dem Direktschall am Ohr eintrifft, ist für normalhörende Personen schädliche Schallenergie. Bei hörgeschädigten Personen liegt der optimale Berechnungszeitpunkt für die Abschätzung von guter Sprachverständlichkeit 20–40 ms höher (U_{70}). Das bedeutet, dass bei einer vorliegenden Beeinträchtigung auch die später als 50 ms nach dem Direktschall eintreffenden Reflektionen noch als für das Sprachverstehen nützliche Schallenergie und damit auch verlängerte Nachhallzeiten als positiv zu werten sind [24].

Yang und Bradley [2] bemängeln, dass in einem Großteil der Studien zur Klassenraumakustik keine realistischen raumakustischen Setups zugrunde gelegt werden. Bezieht man die realistische Anhebung der Sprecherlautstärke, welche durch eine Verlängerung der Nachhallzeit entsteht, in das Versuchsssetup ein, hat die Nachhallzeit laut Autoren über eine weite Spanne keinen Einfluss auf die Sprachverständlichkeit. Yang und Bradley [2] kommen weiterhin zu dem Schluss, dass eine Nachhallzeit im Bereich von 0.3–0.9 s akzeptabel ist, da sich die positiven Effekte der hinzukommenden frühen Reflektionen und die negativen Effekte der hinzukommenden späten Reflektionen gegenseitig aufheben. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass sowohl Kinder als auch Erwachsene durch das Hinzufügen früher Reflektionen profitieren [2].

2.3 Positionseffekte

Es wurde in der Forschung zur Klassenraumakustik bereits vielfach diskutiert, inwiefern sich die Sitzposition eines Schülers im Klassenraum auf dessen Lernleistung auswirkt. Hurtig und Kollegen [16] zeigten, dass sich die Sitzposition im Klassenzimmer auf das Hörverstehen von Fremdsprachen auswirkt – die Leistung sank, je weiter die Schüler von der Schallquelle entfernt saßen. Dieser Effekt stellte sich unabhängig von der Nachhallzeit im Raum ein.

Hodgson zeigte in mehreren Untersuchungen, dass der Zielwert für eine „optimale Nachhallzeit“ in Abhängigkeit von der Position der Lärmquelle im Klassenraum festgelegt werden muss [17, 24]. Wenn die Sprachquelle näher am Hörer ist als die Lärmquelle, gilt laut Hodgson das Minimierungsgebot, d.h. die Nachhallzeit ist dann optimal wenn sie so gering wie möglich ausfällt. Verhält es sich dagegen so, dass sich die Lärmquelle näher am Hörer befindet als die Sprachquelle, ist die optimale Nachhallzeit mit einem höheren Zielwert anzusetzen [17]. Dieses Ergebnis kommt laut Yang und Hodgson [24] dadurch zustande, dass die längere Nachhallzeit als Verstärkung des Nutzsignals benötigt wird, wenn die Störquelle zwischen Hörer und Nutzsignal positioniert ist.

2.4 Lebensalter und Entwicklung

Die auditorischen Funktionen sind erst zwischen dem 13. und 15. Lebensjahr voll entwickelt. Jüngere Kinder haben noch begrenzte Fähigkeiten in der Dekodierung undeutlicher Sprachsignale [5]. Das Lebensalter und der Entwicklungsstand sind somit im Kontext der Klassenraumakustik hochrelevant. Dies zeigt sich auch im hohen Anteil der Literatur, welche sich mit der Thematik auseinandersetzt. Ein Drittel der als relevant identifizierten Arbeiten be-

schäftigt sich mit der Frage nach dem Einfluss von Raumakustik und Störgeräuschen in verschiedenen Alters- und Entwicklungsphasen.

Häufig wurden dabei Kinder mit Erwachsenen verglichen. Dabei wiesen alle Untersuchungen einen Haupteffekt des Lebensalters nach. Kinder schnitten in den verwendeten Testaufgaben meist schlechter ab als Erwachsene [2, 8–9, 22]. Weiterhin ist die Beeinträchtigung durch lange Nachhallzeiten und Hintergrundgeräusche bei Kindern stärker ausgeprägt als bei Erwachsenen [11, 15, 22]. Wobei sowohl Erwachsene als auch Kinder bei der Sprachverständlichkeit von frühen Reflektionen profitieren können [2].

Nicht nur der Vergleich zwischen Kindern und Erwachsenen, sondern auch Vergleiche von Kindern verschiedener Altersgruppen führen im Kontext der Klassenraumakustik zu differenzierenden Ergebnissen. Astolfi, Bottalico und Barbato [3] untersuchten die Sprachverständlichkeit in 3 Grundschulen. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass für Klassenstufe 2 (jüngste Altersgruppe) ein STI (Speech Transmission Index) von mindestens 0.82 benötigt wird, um gute Sprachverständlichkeit zu erreichen, während bei Schülern der Klassenstufen 3–5 ein STI von 0.77 ausreichend ist. Um über alle Klassenstufen eine Sprachverständlichkeit in Höhe von 97% zu erreichen, muss der STI laut Astolfi und Kollegen [3] mindestens 0.9 betragen. Eine ähnliche Studie von Peng und Jiang [5] kommt zu dem Ergebnis, dass um eine Sprachverständlichkeit von 99% zu erreichen bei Kindern der Klassenstufe 3 ein STI von mindestens 0.71, bei Kindern der Klasse 5 ein STI von mindestens 0.61 sowie bei Erwachsenen ein STI von mindestens 0.51 notwendig ist. Der hier berichtete Anstieg der Sprachverständlichkeit mit zunehmendem Kindesalter ist das Ergebnis einiger weiterer Studien, die im Kontext dieses Forschungsprojektes aufgearbeitet wurden [2–3, 5, 7].

Yang und Bradley [2] zeigten weiterhin, dass in einem realistischen Versuchsssetup die Sprachverständlichkeit bei Kindern stärker durch eine Anhebung des Hintergrundgeräusches beeinträchtigt wird als durch einen Anstieg der Nachhallzeit. In dieser Studie deutete sich ebenfalls an, dass jüngere Kinder anfälliger für die negativen Effekte langer Nachhallzeiten sind – laut Autoren ist dieser Effekt jedoch so gering, dass er in der Praxis kaum relevant wird [2].

Die Gesamtschau der Ergebnisse der Alterseffekte zeigt, dass Klassenraumakustik auf den Bedürfnissen und Fähigkeiten von Kindern aufbauen muss. Diese unterscheiden sich hinsichtlich einiger Parameter stark von den Bedürfnissen und Fähigkeiten Erwachsener. Weiterhin werden Kinder auch bei guter Klassenraumakustik stark durch Hintergrundgeräusch beeinträchtigt, weshalb es wichtig ist, dass Lehrkräfte in Lernphasen für Ruhe sorgen [22].

2.5 Inklusion

Der Anteil der Studien, welche den Zusammenhang zwischen Raumakustik und Verstehens-/Lernleistung vor dem Hintergrund der Inklusion betrachten, ist gering.

Der Vergleich von Normalhörenden und moderat hörgeschädigten Personen zeigte in einer Studie von Yang und Hodgson [24] ähnliche Trends und Effekte für beide Grup-

pen wobei die hörgeschädigten Personen generell etwas stärker durch ungünstige Umweltfaktoren beeinträchtigt werden und stärker in der Sprachverständlichkeitsleistung differenzieren.

Cui und Peng [4] fanden, dass bei Nichtmuttersprachlern bei gleichbleibendem Sprecherpegel die Sprachverständlichkeit durch eine Reduktion der Nachhallzeit steigt. Außerdem steigt die Sprachverständlichkeit mit zunehmender Sprecherlautstärke bis zu einem gewissen Punkt an. Wird dieser Pegel überschritten, sinkt die Sprachverständlichkeit wieder. Die Autoren empfehlen für Nichtmuttersprachler einen Sprecherpegel von 62–74 dB(A) sowie eine geringe Nachhallzeit.

Hurtig und Kollegen [16] konnten hinsichtlich des Einflusses der Nachhallzeit bei Nichtmuttersprachlern einen differenzierteren Effekt identifizieren. Bei Schülern mit hoher Fremdsprachenkompetenz wirken sich kurze Nachhallzeiten positiv auf das Hörverstehen aus, wohingegen sich bei Schülern mit schlechter Fremdsprachenkompetenz verlängerte Nachhallzeiten positiv auf das Hörverstehen auswirken. Die Autoren argumentieren, dass bei längeren Nachhallzeiten mehr Zeit für die Verarbeitung der Sprache zur Verfügung steht. Somit bleiben bei Schülern mit geringer Fremdsprachenkompetenz mehr Ressourcen für weitere kognitive Verarbeitungsprozesse (Codierung, Speicherung und Abruf) verfügbar und die Leistung steigt insgesamt an. Haben die Schüler hingegen eine gute Fremdsprachenkompetenz, wird die Leistung durch die unnötige Verzerrung des Signals durch die längeren Nachhallzeiten negativ beeinflusst. Bei der Verarbeitung von Fremdsprachen besteht also ein zeitliches Verarbeitungsdefizit, welches durch die verlängerte Darstellung der Sprachinhalte bei langen Nachhallzeiten ausgeglichen werden kann [16, 23]. Fazit dieser Studien ist somit, dass in Fällen, in denen die Sprachwahrnehmung (durch persönliche oder umweltbedingte Faktoren) beeinträchtigt ist, eine geringfügig längere Präsentationsdauer dazu führen kann, dass Worte leichter verstanden und besser erinnert werden können [16, 23].

Weiterhin gilt es im Blick zu behalten, dass bei zu geringen Nachhallzeiten und Frontalunterricht potentiell zu wenig Schallenergie des Sprachsignals in der letzten Reihe bei den Schülern ankommt [14].

2.6 Sprechanstrengung, Höranstrengung und akustischer Komfort

Die Schwierigkeiten, welche eine akustische Umgebungsbedingung mit sich bringt, lassen sich häufig nicht oder nicht allein über die Leistung beurteilen. Das heißt, dass zwei Situationen, in denen die Leistung der Sprachverständlichkeit gleich gut ist, trotzdem unterschiedlich anspruchsvoll für den Zuhörer sein können, da sich der Hörer je nach Komplexität der Situation unterschiedlich stark anstrengen muss, um dieselbe Leistung zu erbringen. Ist diese Höranstrengung dauerhaft sehr hoch, gelingt es dem Zuhörer zwar (zeitweise) eine gute Leistung in Sprachverständlichkeitsanalysen zu erbringen. Er ermüdet aber schneller und durch die erhöhte benötigte kognitive Kapazität für diesen Prozess können andere kognitive Funktionen (wie bspw. Lernen und Gedächtnis) leiden [9, 26].

Um das Konstrukt der Höranstrengung ganzheitlich zu fassen, schlagen Ljung und Kjellberg [9] das Konstrukt der „listening efficiency“ vor. „Listening efficiency“ erlaubt es, zwischen Bedingungen mit identisch guter Sprachverständlichkeit zu differenzieren. Die Raumakustik kann somit speziell auf bestimmte Zielgruppen zugeschnitten werden. Definiert wird sie über die korrekt erkannten Wörter innerhalb einer definierten Zeitdauer. Ist der Wert für „listening efficiency“ gering, ist der Prozess ineffektiv – es ist somit davon auszugehen, dass keine dauerhaft gute Lernsituation besteht.

2.7 Intervention/Lehrmethode

Ein weiterer Ansatz, welcher die akustische Qualität in Klassenräumen nicht allein über die Raumakustik definiert, ist der Einbezug unterschiedlicher Lehrmethoden und Unterrichtsformen in die Betrachtung, sowie die Untersuchung der Wirksamkeit von Interventionsmaßnahmen zur Lärmreduktion. Unterschiedliche Unterrichtsformen bringen verschiedene akustische Herausforderungen mit sich, was bei der Planung von Unterrichtsräumen für spezifische Nutzungsszenarien wie bspw. Gruppenarbeit mit betrachtet werden muss [8, 11–13].

2.8 Ganzheitliche Modelle zur Bewertung von Klassenraumakustik

Innerhalb der analysierten Literatur wurde in den beiden Arbeiten von Madbouley und Kollegen [27] und Radosz [19] jeweils ein ganzheitliches Modell zur Beschreibung und Bewertung von (guter) Klassenraumakustik vorgestellt. Beide Modelle integrieren verschiedene (raumakustische) Parameter. Der von Radosz [19] vorgeschlagene *Global Index of Acoustic Quality* integriert viele der Parameter, welche auch aufgrund der Ergebnisse dieser Literaturstudie als relevant für Klassenraumakustik erachtet werden müssen (Speech Intelligibility Index, Schallübertragung, Hintergrundgeräusch, Sprechanstrengung, SNR und Nachhallzeit) und gewichtet diese, um einen Einzelwert für die Bewertung von Klassenraumakustik zu berechnen. Mit einer Gewichtung von 0.8 ist die Nachhallzeit einer der Parameter, die bei der Berechnung des Index stark zum Tragen kommen. Da der Index mehrere verschiedene Parameter integriert, können jedoch auch Räume mit einer Nachhallzeit von > 1 s im *Global Index of Acoustic Quality* eine gute Gesamtbewertung erreichen. Das Hintergrundgeräusch geht mit einer Gewichtung von 1 noch stärker in die Wertung des Index ein als die Nachhallzeit. Mit der geringsten Gewichtung geht die Sprechanstrengung ein. Das Modell wurde derzeit noch nicht in Wirkungsuntersuchungen evaluiert. Ein weiteres Modell, welches im Vergleich zum vorhergehenden Modell jedoch nicht den Output eines Einzahlwertes leisten kann, dafür in einigen Punkten jedoch stärker differenziert, stellt das *Classroom Acoustic Assessment Model* von Madbouley und Kollegen dar [27]. Beiden Modellen fehlt bislang der Einbezug von Alters- und Entwicklungsstufen im Kindesalter und auch Fälle von Inklusion sind derzeit nicht in den Modellen integriert.

3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Literaturstudie zeigen auf, dass die Fragestellung nach optimalen raumakustischen Bedingungen in Klassenräumen im Allgemeinen und insbesondere für Personen mit beeinträchtigter Hörsamkeit nur unter Berücksichtigung mehrerer Faktoren (Kindes-/Lebensalter, kognitive Fähigkeit, Raumvolumen, Sprecherlautstärke, Sprecherposition, Anzahl der Personen im Raum, Lehrmethode, vorhandene Störgeräusche, etc.) hinreichend bedient werden kann.

Demnach ist es wichtig, Klassenraumakustik nicht ausschließlich anhand von Nachhallzeiten zu bewerten, sondern eine ganzheitliche Betrachtungsweise einzunehmen, um einen tatsächlichen und nachweisbaren Mehrwert der akustischen Eigenschaften von Lernumgebungen schaffen zu können. Darüber hinaus ist es relevant, in die empirische Betrachtung nicht allein die Beeinträchtigung der Sprachverständlichkeit sondern auch die Beeinträchtigung anderer kognitiver Prozesse und deren Effizienz mit einzubeziehen.

Die aktuell in der DIN 18041: 2016 ausschließlich über Nachhallzeiten definierten Anforderungen müssen somit entsprechend dem aktuellen Forschungsstand als nicht hinreichend erachtet werden. Es wird empfohlen, die Anforderungen zu überarbeiten, um eine Raumakustik zu schaffen, welche den Problematiken von im Hörverstehen beeinträchtigten Menschen gerecht wird und somit maßgeblich zu einer nachweisbaren Verbesserung beiträgt. Ein besonderer Fokus kann dabei bspw. auf die Nutzbarmachung eines maximal förderlichen Verhältnisses von frühen und späten Reflektionen sowie auf die spezifischen Anforderungen in verschiedenen Alters- und Entwicklungsstufen gelegt werden. Weiterhin sollten die Störung durch Hintergrundgeräusch, d.h. der SNR und Nachhallzeiten nicht getrennt voneinander, sondern insbesondere deren Interaktion betrachtet werden.

Danksagung

Das hier vorgestellte Forschungsprojekt wurde unterstützt und begleitet von der Knauf Gips KG.

Literatur

- [1] DIN 18041: 2016: *Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung*.
- [2] Yang, W., Bradley, J.S.: Effects of room acoustics on the intelligibility of speech in classrooms for young children [online]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, **125**(2), 922–933. ISSN 00014966. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1121/1.3058900>
- [3] Astolfi, A., Bottalico, P., Barbato, G.: Subjective and objective speech intelligibility investigations in primary school classrooms [online]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, **131**(1), 247–257. ISSN 00014966. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1121/1.3662060>
- [4] Cui, S.-H., Peng, J.-X.: Effect of speech sound pressure level and reverberation on Chinese speech recognition for foreign students [online]. *Huanan Ligong Daxue Xuebao/Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 2015, **43**(4), 133–137. ISSN 1000565X. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-565X.2015.04.019>
- [5] Peng, J., Jiang, P.: Chinese word identification and sentence intelligibility in primary school classrooms [online]. *Archives of Acoustics*, 2016, **41**(2), 213–219. ISSN 01375075. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1515/aoa-2016-0021>
- [6] Rabelo, A.T.V., Santos, J.N., Oliveira, R.C., Magalhães, M.C.: Effect of classroom acoustics on the speech intelligibility of students [online]. *CODAS*, 2014, **26**(5), 360–366. ISSN 23171782. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1590/2317-1782/20142014026>
- [7] Peng, J., Zhang, H., Yan, N.: Effect of different types of noises on Chinese speech intelligibility of children in elementary school classrooms [online]. *Acta Acustica united with Acustica*, 2016, **102**(5), 938–944. ISSN 16101928. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3813/AAA.919008>
- [8] Valente, D.L., Plevinsky, H.M., Franco, J.M., Heinrichs-Graham, E.C., Lewis, D.E.: Experimental investigation of the effects of the acoustical conditions in a simulated classroom on speech recognition and learning in children [online]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, **131**(1), 232–246. ISSN 00014966. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1121/1.3662059>
- [9] Ljung, R., Kjellberg, A.: Long Reverberation Time Decreases Recall of Spoken Information [online]. *Building Acoustics*, 2009, **16**(4), 301–311. ISSN 1351-010X. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1260/135101009790291273>
- [10] Ljung, R., Sörqvist, P., Kjellberg, A., Green, A.-M.: Poor Listening Conditions Impair Memory for Intelligible Lectures [online]. Implications for Acoustic Classroom Standards. *Building Acoustics*, 2009, **16**(3), 257–265. ISSN 1351-010X. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1260/135101009789877031>
- [11] Whitlock, J.A.T., Dodd, G.: Speech intelligibility in classrooms: Specific acoustical needs for primary school children [online]. *Building Acoustics*, 2008, **15**(1), 35–47. ISSN 1351-010X. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1260/135101008784050223>
- [12] Tiesler, G.: Noise in schools – An avoidable stressor? [Lärm in der Schule – Ein vermeidbarer Stressor?] [online]. *Umweltmedizin in Forschung und Praxis*, 2008, **13**(4), 235–244. Verfügbar unter: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-52249107125&partnerID=40&md5=14d8777ff1e1e909f7e36c3c41e12f7d6>
- [13] Oberdörster, M., Tiesler, G.: Modern teaching“ needs modern conditions – Communication behaviour of pupils and teachers in highly absorbent classrooms [online]. *Building Acoustics*, 2008, **15**(4), 315–324. ISSN 1351-010X. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1260/135101008786939982>
- [14] Pelegrín-García, D., Brunskog, J., Rasmussen, B.: Speaker-oriented classroom acoustics design guidelines in the context of current regulations in European countries [online]. *Acta Acustica united with Acustica*, 2014, **100**(6), 1073–1089. ISSN 16101928. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3813/AAA.918787>
- [15] Shams, S., Ramakrishnan, R.: Acoustic metrics for classroom performance- A literature review [online]. *Canadian Acoustics – Acoustique Canadienne*, 2012, **40**(3), 100–102. Verfügbar unter: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84866980365&partnerID=40&md5=67e4b12a3f29319f5d8093fcd060299a>
- [16] Hurtig, A., Sörqvist, P., Ljung, R., Hygge, S., Rönnberg, J.: Student’s Second-Language Grade May Depend on Classroom Listening Position [online]. *PloS one*, 2016, **11**(6), e0156533. ISSN 1932-6203. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156533>
- [17] Hodgson, M., Nosal, E.-M.: Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms [online]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, **111**(2), 931–939. ISSN 00014966. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1121/1.1428264>

- [18] Nijs, L., Rychtáriková, M.: Calculating the optimum reverberation time and absorption coefficient for good speech intelligibility in classroom design using U50 [online]. *Acta Acustica united with Acustica*, 2011, **97**(1), 93–102. ISSN 16101928. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3813/AAA.918390>
- [19] Radosz, J.: Global index of the acoustic quality of classrooms [online]. *Archives of Acoustics*, 2013, **38**(2), 159–168. ISSN 01375075. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.2478/aoa-2013-0018>
- [20] Jianxin, P.: Chinese speech intelligibility at different speech sound pressure levels and signal-to-noise ratios in simulated classrooms [online]. *Applied Acoustics*, 2010, **71**(4), 386–390. ISSN 0003682X. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.10.004>
- [21] Bistafa, S.R., Bradley, J.S.: Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics [online]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, **107**(2), 861–875. ISSN 00014966. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1121/1.428268>
- [22] Klätte, M., Lachmann, T., Meis, M.: Effects of noise and reverberation on speech perception and listening comprehension of children and adults in a classroom-like setting [online]. *Noise & health*, 2010, **12**(49), 270–282. ISSN 1463-1741. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.4103/1463-1741.70506>
- [23] Hurtig, A., van de Keus Poll, M., Pekkola, E.P., Hygge, S., Ljung, R., Sörqvist, P.: Children's Recall of Words Spoken in Their First and Second Language: Effects of Signal-to-Noise Ratio and Reverberation Time [online]. *Frontiers in psychology*, 2015, **6**, 2029. ISSN 1664-1078. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.02029>
- [24] Yang, W., Hodgson, M.: Auralization study of optimum reverberation times for speech intelligibility for normal and hearing-impaired listeners in classrooms with diffuse sound fields [online]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, **120**(2), 801–807. ISSN 00014966. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1121/1.2216768>
- [25] Siebein, G.W., Gold, M.A., Ermann, M.G.: Ten ways to provide a high-quality acoustical environment in schools [online]. *Language, Speech, and Hearing Services in Schools*, 2000, **31**(4), 376–384. Verfügbar unter: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0034337764&partnerID=40&md5=ac5df5cec6253b4dde8489f550ce3d38>
- [26] Picou, E.M., Gordon, J., Ricketts, T.A.: The effects of noise and reverberation on listening effort in adults with normal hearing [online]. *Ear and Hearing*, 2016, **37**(1), 1–13. ISSN 01960202. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000222>
- [27] Madbouly, A.I., Noaman, A.Y., Ragab, A.H.M., Khedra, A.M., Fayoumi, A.G.: Assessment model of classroom acoustics criteria for enhancing speech intelligibility and learning quality [online]. *Applied Acoustics*, 2016, **114**, 147–158. ISSN 0003682X. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.07.018>

Autoren diesen Beitrages:

Noemi Martin, noemi.martin@ibp.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
 Nobelstr. 12
 70569 Stuttgart

Dr. Andreas Liebl, a.liebl@hs-doeper.de
 HSD Hochschule
 Lehrgebiet Allgemeine Psychologie & Methodenlehre
 Waidmarkt 3 und 9
 50676 Köln



Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Stuttgart

Postfach 80 04 69 – 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 – 70569 Stuttgart

Holzkirchen

Postfach 11 52 – 83601 Holzkirchen

Fraunhoferstraße 10 – 83626 Valley

www.ibp.fraunhofer.de