

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

# **Lärm in der schulischen Umwelt und kognitive Leistungen bei Grundschulkindern**

von

Philip Leistner  
Jürgen Hellbrück  
Maria Klatte  
Jochen Seidel  
Lutz Weber

Fraunhofer-Institut für Bauphysik  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt

Förderkennzeichen: ZO3W 23004 und ZO3W 23005

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des  
Landes Baden-Württemberg gefördert

Dezember 2006

ZO3W23004 und ZO3W23005

## **Lärm in der schulischen Umwelt und kognitive Leistungen bei Grundschulkindern**

Das Projekt wurde innerhalb des  
Programms Lebensgrundlage Umwelt  
und ihre Sicherung (BWPLUS)  
mit Mitteln des Landes  
Baden-Württemberg gefördert

Dr.-Ing. Philip Leistner  
Prof. Dr. Jürgen Hellbrück  
Dr. Maria Klatte  
Dipl. Phys. Jochen Seidel  
Dr. Lutz Weber

Stuttgart, Eichstätt, Oldenburg, 18. Dezember 2006

# Inhalt

<b>Einführung</b>	<b>5</b>
<b>1 Wirkungen von Hintergrundgeräuschen und Nachhall auf das Hörverstehen</b>	<b>6</b>
<b>2 Wirkungen von Hintergrundgeräuschen moderater Pegel auf nicht-auditive Aufgaben</b>	<b>8</b>
<b>3 Fragestellung und Ziele des Projekts</b>	<b>10</b>
<b>Methodik und Ergebnisse der Akustische Untersuchungen (Teilprojekt A)</b>	<b>12</b>
<b>4 Die akustischen Parameter und Ihre Bestimmung</b>	<b>12</b>
4.1 Raumakustik	12
4.1.1 Nachhallzeit	12
4.1.2 Sprachübertragungsindex STI	15
4.1.3 Frühe Reflexionen: Deutlichkeitsgrad und -maß	16
4.1.4 Ermittlung aus Abklingverlauf (Schulenauswahl)	17
4.1.5 Ermittlung aus Raumimpulsantworten (Hauptuntersuchung)	18
4.2 Bauakustik	22
4.2.1 Schalldämmung	22
4.2.2 Körperschall und Trittschallpegel	23
4.2.3 Bauakustische Anforderungen an den Schulbau	24
4.3 Schallpegel	25
4.3.1 Im unbesetzten Raum bei geschlossenen und offenen Fenstern	26
4.3.2 Außenschallpegel vor den Fenstern der Klassenräume	27
4.3.3 Im besetzten Raum während des Unterrichtes	28
<b>5 Auswahl der Schulen</b>	<b>29</b>
5.1 Zweck	29
5.2 Vorgehen	30
5.3 Ergebnisse der akustischen Voruntersuchungen	31
<b>6 Akustik der teilnehmenden Schulen</b>	<b>35</b>
6.1 Abmessungen der Klassenräume	35
6.2 Raumakustik	38
6.2.1 Nachhallzeit	38
6.2.2 Korrelation der raumakustischen Parameter	43
6.2.3 Sprachübertragungsindex STI	47
6.2.4 Frühe Reflexionen	48
6.2.5 Unterschiede zwischen vorderen und hinteren Sitzplätzen	48
6.2.6 Unterschiede zwischen den Übertragungswegen allgemein	52
6.3 Bauakustik	57

6.3.1	Schallübertragung vom Nachbarraum	57
6.3.2	Schallübertragung vom Flur	59
6.3.3	Schallübertragung vom darüber liegenden Raum	63
6.3.4	Schallübertragung von außen	67
6.4	Schallpegel	69
6.4.1	Vor den Schulen	69
6.4.2	Im unbesetzten Klassenzimmer	74
6.4.3	Während des Unterrichts	77
<b>7</b>	<b>Untersuchungsräume</b>	<b>78</b>
7.1	Zweck und Vorgehen	78
7.2	Nachhallzeiten	80
7.2.1	Erste Klassen	81
7.2.2	Zweite Klassen	82
7.3	Unterschiede zwischen den Sitzplätzen in den Untersuchungsräumen	84
<b>Methodik und Ergebnisse der kognitionspsychologischen Untersuchungen (Teilprojekt B)</b>		<b>86</b>
<b>8</b>	<b>Vorarbeiten</b>	<b>86</b>
<b>9</b>	<b>Methodik der Hauptuntersuchung</b>	<b>87</b>
9.1	Beschreibung der Testbatterie	87
9.2	Stichprobe	92
9.3	Ablauf der Hauptuntersuchung	94
<b>10</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>98</b>
10.1	Akute Wirkungen der Nachhallzeit auf das Hörverstehen	98
10.1.1	Erstklässler-Untersuchung	98
10.1.2	Zweitklässler-Untersuchung	100
10.1.3	Diskussion der Ergebnisse der Erst- und Zweitklässler- Untersuchung	104
10.2	Chronische Wirkungen der Nachhallzeit im Klassenraum	105
10.2.1	Einfluss und Kontrolle konfundierender Variablen	105
10.2.2	Einteilung der Stichprobe	107
10.2.3	Chronische Wirkungen der Nachhallzeit auf die Speicherung und Verarbeitung sprachlicher Information	108
10.2.4	Nachhallzeit und Lärmbelastung	111
10.2.5	Wohlbefinden und „Lernklima“ in Abhängigkeit von der Nachhallzeit im Klassenraum	115
10.3	Wirkungen bauakustischer Variablen	118
<b>Zusammenfassung</b>		<b>122</b>
<b>11</b>	<b>Hintergrund und Fragestellung des Projekts</b>	<b>122</b>
<b>12</b>	<b>Methodik</b>	<b>122</b>
12.1	Stichprobe	122
12.2	Leistungstests und Fragebögen	123
12.3	Design	123
12.4	Ablauf der psychologischen Untersuchung	123

<b>13</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>124</b>
13.1	Akustische Messungen	124
13.2	Akute Wirkungen der Nachhallzeit auf das Hörverstehen	126
13.3	Chronische Wirkungen der Nachhallzeit	127
13.3.1	Kognitive Leistungen	127
13.3.2	Lärmbelastung	128
13.3.3	Wohlbefinden und „Lernklima“	128
13.3.4	Wirkungen bauakustischer Variablen	129
	<b>Folgerungen</b>	<b>131</b>
	<b>Anhänge</b>	<b>132</b>
<b>14</b>	<b>Literatur</b>	<b>132</b>
<b>15</b>	<b>Projektbezogene Tagungsbeiträge</b>	<b>137</b>
<b>16</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>138</b>

## Einführung

Das Thema „Lärm in Bildungsstätten“ ist in den letzten Jahren zunehmend in den Blickpunkt des öffentlichen und wissenschaftlichen Interesses gerückt. Pädagogen, Psychologen und Akustiker, aber auch Schulbehörden und Unfallkassen beschäftigen sich mit den akustischen Bedingungen in Schulräumen und Kindertagesstätten und ihren Wirkungen auf Kinder, Lehrkräfte und ErzieherInnen. Anlass hierzu gab u.a. eine Studie des Instituts für Interdisziplinäre Schulforschung der Universität Bremen (Schönwälder 2001 [59]) in der sich der Lärm als einer der wesentlichsten Belastungsfaktoren im LehrerInnenberuf erwies. Mehr als 80 Prozent von über 1000 befragten Lehrkräften gaben an, sie fühlten sich durch den Lärm in der Schule belastet. Befragungen von Erzieherinnen zeigten ein ähnliches Bild. Auch in dieser Berufsgruppe ist der Lärm ein gravierender Belastungsfaktor. Akustische Messungen dokumentieren die Berechtigung dieser Klagen. In Kindertagesstätten wurden Lärmpegel gemessen, bei denen an industriellen Arbeitsplätzen Gehörschutz bereitzustellen ist (Buch & Frieling 2001). Die in Klassenräumen gemessenen Schallpegel sind nicht so hoch, dass physiologische Schädigungen des Gehörs befürchtet werden müssen; sie liegen aber oft weit über den Werten, die für Kommunikation und geistiges Arbeiten anzustreben sind (Schönwälder et al. 2004 [60]; Schick et al. 1999 [57]).

Bauliche Eigenschaften der Schulräume können maßgeblich zur Lärmentstehung beitragen. Die Raumakustik als Teilgebiet der Akustik befasst sich mit der Auswirkung der baulichen Gegebenheiten eines Raumes auf die in ihm stattfindenden Schallereignisse. Die traditionell wichtigste Kenngröße der Raumakustik ist die Nachhallzeit, ein Maß für die Halligkeit eines Raumes. Sie gibt die Zeitdauer (in Sekunden) an, wie lange ein Schallereignis „nachklingt“. Herrscht in einem Raum eine zu lange Nachhallzeit, so werden beim Sprechen nachfolgende Silben durch den zu langen Abklingvorgang verdeckt. Es kommt zu Verzerrungen des Sprachsignals, die die Sprachverständlichkeit verschlechtern. Zudem verbleiben bei zu langer Nachhallzeit alle, auch unvermeidliche Geräusche (Stühlerücken, Füßescharren, Husten, Blättern, Klappern mit Stiften) zu lange im Raum - der Lärmpegel steigt.

Schulisches Lernen basiert in hohem Maße auf mündlicher Kommunikation. Komplexe sprachliche Mitteilungen müssen aufgenommen, mental verarbeitet und im Gedächtnis gespeichert werden. Psychoakustische Studien belegen, dass Störgeräusche und Nachhall diese Prozesse auf vielfältige Weise beeinträchtigen. Kinder sind von diesen Störungen in besonderem Maße betroffen. Aufgrund dieser Zusammenhänge ist eine detaillierte Analyse der „Hörumwelt Schule“ und ihres Einflusses auf die Kinder erforderlich. Hier setzt die in diesem Bericht dargestellte Feldstudie an. In einem interdisziplinären Projekt wurden die Wirkungen der akustischen Bedingungen in Schulräumen auf Leistungen und Befinden der dort unterrichteten Grundschul Kinder analysiert. Die Studie wurde in enger Kooperation zwischen Akustikern (Teilprojekt A) und PsychologInnen (Teilprojekt B) geplant und durchgeführt.

Im Folgenden wird zunächst eine Übersicht über die wesentlichen Forschungsbefunde gegeben, die der Beantragung und inhaltlichen Ausgestaltung des Projekts zugrunde liegen. Anschließend wird über die Methoden und Ergebnis-

se der akustischen Messungen in den einbezogenen Schulräumen berichtet (Teilprojekt A). Im Teil 3 des Berichts werden Zusammenhänge zwischen den akustischen Bedingungen und den Leistungs- und Befindensmessungen dargestellt (Teilprojekt B). Der Bericht schließt mit einer Zusammenfassung der wesentlichsten Ergebnisse und den daraus abzuleitenden Konsequenzen für die akustische Gestaltung von Schulräumen.

Im Laufe des Projektes wurden einige Ergebnisse bereits veröffentlicht (s. Abschnitt Projektbezogene Tagungsbeiträge) sowie im Rahmen eines Projektforums am 28.06.2006 der Öffentlichkeit vorgestellt. Der vorliegende Abschlussbericht ist als Gesamtschau zu verstehen.

## 1 Wirkungen von Hintergrundgeräuschen und Nachhall auf das Hörverstehen

Leistungsstörungen durch Lärm und Nachhall zeigen sich auf verschiedenen Stufen der Informationsverarbeitung: bei der Informationsaufnahme (Wahrnehmungs- und Aufmerksamkeitsprozesse) und bei der weitergehenden Informationsverarbeitung (Gedächtnis- und Entscheidungsprozesse).

Ist der Störgeräuschpegel relativ zum Sprachsignal zu hoch, so werden Sprachlaute durch den Lärm maskiert, und die Information wird falsch oder gar nicht verstanden. Das gleiche gilt für Sprachsignale, die aufgrund zu langer Nachhallzeiten verzerrt beim Hörer ankommen. Kinder sind noch weniger in der Lage als Erwachsene, Sprache zu verstehen, wenn Hintergrundgeräusche vorhanden sind oder wenn die Klarheit der Sprache durch den Nachhall im Raum eingeschränkt wird. Erwachsene verfügen über robuste Sprachwahrnehmungskategorien, die auch unter schwierigen Hörbedingungen ein effizientes und schnelles Erkennen ermöglichen. Diese phonetischen Kategorien werden bereits im ersten Lebensjahr durch das Hören der Muttersprache erworben; die „Feinabstimmung“ dauert aber noch bis weit ins Schulalter hinein an (Hazan & Barrett 2000 [35]). Die Wahrnehmung von Sprachlauten ist daher bei Kindern aufwändiger und störanfälliger als bei Erwachsenen. In diesbezüglichen Studien wurden Kindern und Erwachsenen Silben oder Wörter vorgesprochen, die von den Probanden nachgesprochen werden sollen. Dies ist eine recht einfache Aufgabe, die man schon mit Kindern im Kindergartenalter durchführen kann. Werden die Sprachsignale ohne Störgeräusch und ohne Nachhall präsentiert, so gibt es kaum einen Unterschied zwischen den Altersgruppen. Selbst die jüngsten Probanden erreichen eine nahezu perfekte Leistung. Bei ungünstigeren Hörbedingungen zeigen sich jedoch erhebliche Leistungsunterschiede: Je jünger die Kinder sind, desto stärker werden sie durch Hintergrundgeräusche und / oder Nachhall beeinträchtigt. Erst im Alter von etwa 14 Jahren gleicht sich die Verstehensleistung der von Erwachsenen an (Papso & Blood 1989 [53], Neumann & Hochberg 1983 [52], Johnson 2000 [39]).

In diesen Studien wurde das Sprachverstehen durch das Nachsprechen einzelner Wörter oder Silben erfasst. In alltäglichen Situationen, insbesondere im Schulunterricht, werden jedoch viel höhere Anforderungen an die Zuhörkompetenz der Kinder gestellt. Sprachliche Informationen müssen nicht nur aufge-

nommen, sondern auch im Arbeitsgedächtnis gespeichert und verarbeitet werden. Auch diese „höheren“ Hörverstehensprozesse werden durch Störgeräusche und Nachhall beeinträchtigt. Die erhöhten Anforderungen bei der Informationsaufnahme führen zu schnellerer Ermüdung sowie zu einer Verringerung der Ressourcen, welche für das Behalten und Verarbeiten der gehörten Information zur Verfügung stehen. Ungünstige Hörbedingungen können daher zu Leistungsbeeinträchtigungen beim Behalten und Verarbeiten von sprachlicher Information führen, selbst dann, wenn das Verstehen einzelner Wörter und Laute noch fehlerfrei gelingt. Surprenant (1999) [63] untersuchte die Leistungen erwachsener Probanden beim Behalten von Silbenfolgen, die im Rauschen oder in Ruhe präsentiert wurden. Trotz gleicher Leistungen beim Identifizieren einzelner präsentierter Silben war die Wiedergabeleistung für die Silbenfolgen in der Rauschbedingung signifikant verschlechtert. In einer experimentellen Studie prüften Klatt et al. (2002) [42] den Einfluss der Sprachverständlichkeit in einem Klassenraum auf die Leistungen von Grundschulkindern. Das für die Testaufgaben erforderliche Sprachmaterial wurde in einem Klassenraum mit ungünstiger Raumakustik (lange Nachhallzeiten) aufgenommen und zwar einmal im unbehandelten Raum und einmal nachdem die Sprachverständlichkeit im Raum optimiert worden war. Bei einem einfachen Sprachverständnistest machten die Kinder in beiden Hörbedingungen kaum Fehler. Das bloße Verstehen einzelner Wörter war offensichtlich auch in der akustisch ungünstigeren Bedingung noch gut möglich. Bei komplexeren Testaufgaben, die nicht nur das Identifizieren, sondern auch das Behalten und Verarbeiten der gehörten Information erforderten, zeigten die Kinder jedoch signifikant bessere Leistungen, wenn das im optimierten Raum aufgenommene Material präsentiert wurde. Negative Wirkungen ungünstiger Hörbedingungen zeigen sich folglich insbesondere bei komplexen mentalen Anforderungen – im mündlichen Unterricht ist dies die normale Situation.

Das Verstehen von Sprache unter ungünstigen akustischen Bedingungen erfordert, dass Hintergrundgeräusche ausgeblendet und fehlende Informationen kontinuierlich ergänzt werden. Dies stellt erhebliche Anforderungen nicht nur an zentral-auditive und sprachliche Funktionen, sondern auch an die damit unmittelbar verbundenen Aufmerksamkeits- und Gedächtnisprozesse. Die Entwicklung in diesen Bereichen setzt sich bis ins Jugendalter hinein fort (Dempster 1993 [21], Gathercole et al. 2004 [29]).

Kinder mit Lernbehinderungen, Aufmerksamkeitsstörungen, Lese-/Rechtsschreibschwierigkeiten oder Sprachentwicklungsverzögerungen werden durch ungünstige Hörbedingungen noch stärker beeinträchtigt als unauffällige Kinder. In verschiedenen Studien zeigten die „Problemkinder“ eine signifikant stärkere Verschlechterung der Sprachverstehensleistung als unauffällige Kinder, wenn Störgeräusche vorhanden waren (Bradlow et al. 2003 [18]; Geffner et al. 1996 [30]; Godfrey et al. 1981 [31]; Cunningham et al. 2001 [20], Ziegler et al. 2005 [67]). Besonders stark wirken sich Störgeräusche auch auf das Verstehen der Zweitsprache aus, selbst dann, wenn diese sehr gut beherrscht wird (Mayo et al. 1997 [48]; Wijngaarden et al. 2003 [65]).



## 2 Wirkungen von Hintergrundgeräuschen moderater Pegel auf nicht-auditive Aufgaben

Lärm stört auch geistige Prozesse, bei denen es gar nicht um das Hören und Zuhören geht. Plötzlich eintretende, laute und / oder ungewohnte Geräusche ziehen die Aufmerksamkeit automatisch auf sich und lenken von der aktuellen Tätigkeit ab. Solche Geräusche zeigen Veränderungen in der Umgebung an, die bedeutend sein können – hierauf reagieren wir ganz automatisch. Das Unterdrücken von solchen Reaktionstendenzen ist schon für Erwachsene mühsam, Kindern fällt es noch weit schwerer. Sie sind weit weniger in der Lage als Erwachsene, ihre Aufmerksamkeit auf eine bestimmte Sache zu fokussieren und die Reaktion auf irrelevante Reize zu unterdrücken (Dempster 1993 [21]). Die hohe Ablenkbarkeit jüngerer Kinder durch akustische Reize wurde kürzlich mittels elektrophysiologischer Methoden bestätigt (Gumenyuk et al. 2004 [32]). Kindern zwischen 8 und 13 Jahren wurden Umweltgeräusche dargeboten, während sie mit einer visuellen Aufgabe beschäftigt waren. Bei den 8-jährigen Kindern zeigte sich eine signifikant stärkere Ausprägung derjenigen Komponente des akustisch evozierten Potentials, die als Korrelat einer unwillkürlichen Orientierungsreaktion angesehen wird. Weiterhin zeigten die 8-Jährigen größere Leistungsverlechterungen in der visuellen Aufgabe nach Auftreten eines Geräusches. Die Autoren folgern, dass die Fähigkeit zur Inhibition der Reaktion auf aufgabenirrelevante Hörreize erst mit etwa 13 Jahren der von Erwachsenen entspricht.

Neben diesen globalen, durch Aufmerksamkeitsdistraktionen vermittelten Lärmwirkungen gibt es auch spezifische Störeffekte von bestimmten Geräuscharten auf bestimmte kognitive Prozesse. Ganz besonders empfindlich für Störungen durch Hintergrundgeräusche ist das Kurzzeitgedächtnis. Dieses ermöglicht es, Informationen über einen kurzen Zeitraum verfügbar zu halten und zu verarbeiten. Beim Verstehen eines langen, komplexen Satzes muss der Satzanfang im Kurzzeitgedächtnis verfügbar gehalten werden, um ihn mit dem Satzende in Beziehung setzen zu können. Beim Lösen einer Kopfrechenaufgabe müssen die Operatoren und Teilergebnisse im Kurzzeitgedächtnis bereitgehalten werden, um damit die notwendigen Berechnungen durchführen zu können.

Unregelmäßige Hintergrundschaale wie Sprache oder flotte Instrumentalmusik führen schon bei geringen bis mittleren Lautstärken zu einer Störung des Kurzzeitgedächtnisses („Irrelevant Sound Effect“; vgl. Beaman 2005; Neath 2000, Klatte et al. 2002).

Die Störung der Behaltensleistung tritt auch dann auf, wenn eine für die Versuchspersonen völlig unverständliche Fremdsprache eingespielt wird – es kommt dabei nicht auf die Bedeutung an. Gleich laute kontinuierliche Schalle wie breitbandiges Rauschen, das Geräusch einer Autobahn oder auch sehr langsame, getragene Instrumentalmusik (wie etwa Meditationsmusik) beeinträchtigen solche Aufgaben dagegen nicht. Unregelmäßige, zeitlich strukturierte Schalle scheinen automatisch ins Kurzzeitgedächtnis einzudringen und die dort ablaufenden Behaltensprozesse zu beeinträchtigen.

Auch von dieser Störung sind Kinder wesentlich stärker betroffen als Erwachsene. In einer Studie von Elliott (2002) [24] zeigten Zweitklässler Leistungsver-schlechterungen beim Behalten von Ziffernfolgen um fast 30 Prozent, wenn im Hintergrund gesprochen wurde; die Erwachsenen verschlechterten sich nur um etwa 10 Prozent.

Nachfolgende Studien bestätigen die gravierenden Wirkungen auch bei anderen Aufgaben (Klatte et al. 2004 [43]). Erstklässler zeigten Leistungsver-schlechterungen um mehr als 20 Prozent beim Behalten von Silbenfolgen, wenn ein für sie unverständliches Hintergrundsprechen eingespielt wurde – obwohl die Silben mühelos zu verstehen waren. Zugeräusche gleichen Pegels beeinträch-tigten die Behaltensleistung dagegen nicht. Ähnliches zeigte sich in Aufgaben, die das Erkennen und Vergleichen der An- oder Endlaute vorgesprochener Wörter erfordern. Zweitklässler verschlechterten sich bei einer solchen Aufgabe um fast 25 Prozent, wenn ein Hintergrundsprechen präsentiert wurde. Auch hier hatten die Zugeräusche keinerlei Wirkung.

Diese Erkenntnisse sind für das Thema „Lärm in Schulen“ besonders wichtig, da die Fähigkeit, Lautinformationen zu speichern und zu verarbeiten beim Spracherwerb und beim Lesen- und Schreibenlernen eine maßgebliche Rolle spielt (Hasselhorn & Grube 2003 [34]). Die Kurzzeitgedächtnisleistung im Kin-dergartenalter – meist erfasst durch das Nachsprechen von „Zauberwörtern“ zunehmender Länge - erlaubt eine Vorhersage der weiteren Entwicklung des Wortschatzes und des sprachlichen Ausdrucksvermögens (Baddeley et al. 1998 [13]). Leseanfänger können die meisten Wörter noch nicht als Ganzheiten er-kennen - sie müssen sie Schritt für Schritt „erlesen“. Dabei müssen die einzel-nen Grapheme in Laute übersetzt, die einzelnen Laute müssen gespeichert und schließlich zusammengezogen werden. Dies stellt erhebliche Anforderungen an das Kurzzeitgedächtnis. Kinder mit Sprachentwicklungs- oder Lese-/Rechtschreibstörungen zeigen meistens erhebliche Defizite in der Kurzzeitge-dächtnisleistung. Die oben beschriebene Aufgabe zur Lautkategorisierung er-fasst neben der Speicherung noch eine weitere Vorläuferfertigkeit des Schrift-spracherwerbs, die man als „Phonologische Bewusstheit“ bezeichnet. Hierbei handelt es sich um die Fähigkeit, mit formalen Strukturen der Sprache, insbe-sondere mit Lauten, mental zu operieren. Die phonologische Bewusstheit wird als die wesentlichste Voraussetzung für den Schriftspracherwerb angesehen. Eine Förderung der phonologischen Bewusstheit im Vorschulalter verringert nachweislich das Risiko von Lese-/Rechtschreibschwierigkeiten (Schneider 2001 [58]).

*Festzuhalten ist: Lärm stört geistige Prozesse, die beim Laut- und Schriftsprach-erwerb von entscheidender Bedeutung sind.* Permanente Störungen dieser Pro-zesse durch Lärm können langfristig zu Beeinträchtigungen in diesen Entwick-lungsbereichen führen. Tatsächlich zeigen Kinder, die in unmittelbarer Nähe ei-ner Einflugschneise eines Flughafens oder einer stark befahrenen Straße auf-wachsen, Defizite in der Sprachwahrnehmung, der Lesefähigkeit und der Auf-merksamkeit. Es ist anzunehmen, dass auch eine weniger extreme Lärmbelas-tung zur Entstehung solcher Störungen beitragen bzw. bestehende Störungen verstärken kann. Kujala et al. (2004) [44] untersuchten die Sprachwahrneh-mungs- und Aufmerksamkeitsleistungen von gesunden, normal hörenden Er-wachsenen, die in ihrem Beruf unterschiedlich starker Lärmbelastung ausge-

setzt waren (in der Experimentalgruppe mit hoher Lärmbelastung befanden sich u.a. Erzieher aus Vorschuleinrichtungen). Die lärmbelasteten Probanden zeigten signifikant schlechtere Sprachwahrnehmungsleistungen und erwiesen sich als leichter ablenkbar durch Umweltgeräusche, die während der Bearbeitung einer visuellen Aufgabe in unvorhersehbaren Abständen präsentiert wurden. Diese Defizite zeigten sich sowohl im Verhalten als auch in elektrophysiologischen Parametern. Die Autoren folgern, dass dauerhafte Belastung durch Lärm zu chronischen Störungen der zentralen Hörverarbeitung und der Aufmerksamkeitskontrolle führt, und zwar auch dann, wenn der Lärm keine extremen, sondern nur mittlere Pegel aufweist.

### 3 Fragestellung und Ziele des Projekts

Das hier berichtete Projekt zielte darauf, (i) die akustischen Bedingungen in Grundschulklassenräumen der Region Stuttgart detailliert zu erfassen und (ii) sie zu den Leistungen und dem Befinden der dort lernenden Kinder in Beziehung zu setzen. Die oben berichteten Befunde zur Wirkung von Lärm und Nachhall basieren fast ausschließlich auf laborexperimentellen Untersuchungen. Durch die Konzentration auf das reale Lernumfeld der Kinder sollte die Bedeutung derartiger Befunde im Bezugsfeld Schule eingeschätzt und begründete Empfehlungen für die akustische Gestaltung von Klassenräumen abgeleitet werden.

Aufgrund der besonderen Anfälligkeit sprachlicher Funktionen für negative Lärmwirkungen und der maßgeblichen Bedeutung des Zuhörens im Schulunterricht wurden Testaufgaben eingesetzt, die das Verstehen, Speichern und Verarbeiten sprachlicher Informationen beinhalteten. In Studien zur Wirkung akustischer Umweltbedingungen auf Hörverstehensleistungen von Kindern konzentrierte man sich bislang sehr auf die Leistung beim Identifizieren von einzelnen Silben und Wörtern, d.h. auf die Informationsaufnahme. Wirkungen der Hörbedingungen auf die Speicherung und Verarbeitung der Information wurden dagegen kaum betrachtet. Gerade diese Prozesse sind jedoch für das verstehende Zuhören und den Schriftspracherwerb von maßgeblicher Bedeutung. In der hier berichteten Studie wurden daher neben einem einfachen Sprachverständnistest (Identifikation einzelner Wörter) Aufgaben zum auditiven Kurzzeitgedächtnis, zur Lautverarbeitung und zum Verstehen komplexer Anweisungen einbezogen.

Um die *akuten* Wirkungen der Klassenraumakustik auf die Hörverstehensleistungen zu bestimmen, bearbeiteten die Kinder die Testaufgaben einmal im Klassenraum und einmal in einem Untersuchungsraum mit einheitlicher Nachhallzeit von etwa 0,55 s. Negative Wirkungen einer ungünstigen Klassenraumakustik sollten sich durch eine Leistungsverbesserung im Untersuchungsraum nachweisen lassen. Zur Prüfung der *chronischen* Wirkungen der akustischen Bedingungen wurden die Leistungen unter konstanten akustischen Bedingungen erhoben und auf potenzielle Unterschiede zwischen Kindern aus akustisch unterschiedlichen Klassenräumen hin analysiert. Konfundierende Faktoren wie Muttersprache und soziales Umfeld der Kinder wurden mittels Eltern- und Lehrerfragebögen erfasst und bei der Analyse berücksichtigt. Neben der Erhebung

der Leistungsdaten wurden Befragungen der Kinder zur Lärmbelastung und zum allgemeinen Wohlbefinden in der Schule durchgeführt.

# Methodik und Ergebnisse der Akustische Untersuchungen (Teilprojekt A)

## 4 Die akustischen Parameter und Ihre Bestimmung

Zur Charakterisierung der akustischen Bedingungen der Schulen wurden verschiedene Parameter durch Messung bestimmt. Sie lassen sich einteilen in Raumakustik, Bauakustik und Schallpegel.

Im vorliegenden Kontext beschreibt die Raumakustik zum einen die unmittelbaren akustischen Voraussetzungen für die Übertragung von Sprache von einem Sprecher (z.B. Lehrer oder Schüler) in einem Raum zu Zuhörern (Schüler) im selben Raum und zum anderen, welche Schallpegel im Raum durch eine Schallquelle erzeugt werden. Sie wird bestimmt durch Oberflächenaufbau und Möblierung eines Raumes.

Die Bauakustik misst die Abschirmwirkung von Gebäude-Bauteilen (Wänden, Decken, Türen, etc.) gegen Schallquellen außerhalb eines Raumes. Diese können Luftschallquellen (z.B. Sprache, Flugzeuge) oder Körperschallquellen (z.B. Gehen, Tischrücken) sein.

Mit Schallpegeln ist in diesem Zusammenhang der tatsächlich unter gegebenen Bedingungen anzutreffende Schalldruckpegel gemeint. Schallpegel außerhalb des Klassenraumes beeinflussen im Kontext mit der Bauakustik die Schallpegel im Klassenraum. Schallpegel im Klassenraum charakterisieren im Kontext mit der Raumakustik die Sprachübertragung im Klassenraum.

### 4.1 Raumakustik

Die raumakustischen Parameter lassen sich einteilen in Nachhallzeit, Sprachübertragungsindex und Maße für frühe Reflexionen.

#### 4.1.1 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit  $T$  ist definiert als die Zeitspanne, in der der Schallpegel nach Abschalten aller Schallquellen um 60 dB fällt. Durch die schallabsorbierende Wirkung aller Materialien die sich im Raum befinden oder ihn begrenzen, wird dem Schallfeld Energie entzogen, wodurch der Schallpegel fällt. Umgekehrt stellt sich bei Zufuhr von Schallenergie durch Schallquellen (z.B. Lehrer, Schüler, Straßenverkehr) ein Schallpegel ein, der umso höher ist, je geringer die Absorption im Raum ist. Längere Nachhallzeiten führen daher bei gleicher Leistung der Schallquellen zu höheren Schallpegeln (s. Gleichung (9)).

Das Symbol für die Nachhallzeit  $T$  kann um eine Zahl als Index ergänzt sein. Häufig sind  $T_{15}$ ,  $T_{20}$  und  $T_{30}$ . Diese Zahl im Index gibt Auskunft über die Ermittlung.  $T_x$  wurde durch Extrapolation auf 60 dB der Zeit für den Abfall des Schallpegels um  $x$  dB ermittelt. Im Idealfall sind die Werte für alle  $x$  gleich und in der Praxis sind die Unterschiede gering.

Die Early Decay Time EDT (dt. frühe Abklingzeit) ist ähnlich definiert. Im Unterschied zur Nachhallzeit beginnt die Auswertung des Nachhalls unmittelbar mit dem Abfallen des Pegels und nicht erst nachdem der Pegel um 5 dB gefallen ist. Auch wird nur der Abfall um die ersten 10 dB ausgewertet.

Schüler und Lehrer haben selbst schallabsorbierende Wirkung. Bei der Nachhallzeit eines Raumes ist deshalb zwischen besetztem und unbesetztem Zustand zu unterscheiden. Im unbesetzten Zustand ist die Nachhallzeit des gleichen Klassenraumes länger als im besetzten Zustand, wenn die Schüler anwesend sind. Die schallabsorbierende Wirkung einer Person oder eines Gegenstandes wird durch deren äquivalente Absorptionsfläche  $A$  ausgedrückt. Nachhallzeit  $T$ , die gesamte äquivalente Absorptionsfläche  $A$  im Raum und das Volumen  $V$  eines Raumes stehen in einem Zusammenhang der für die Betrachtung hier ausreichend durch die Sabinesche Formel (1) wiedergegeben wird.

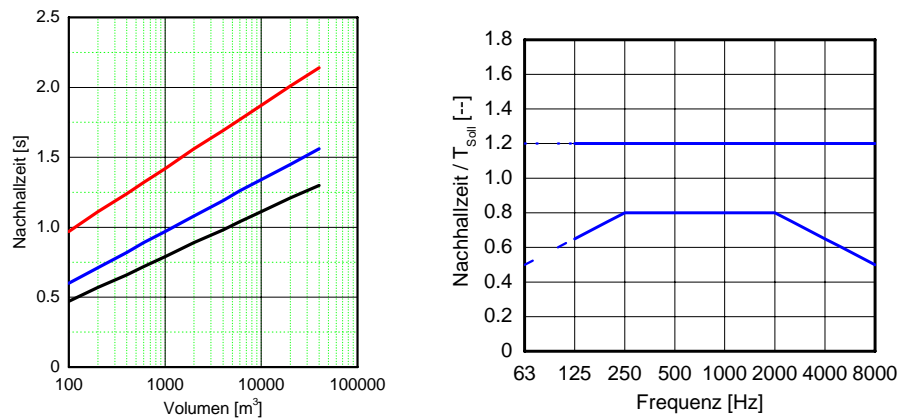
$$(1) \text{ Sabinesche Formel } A = 0,163 \cdot \frac{V}{T} \frac{\text{s}}{\text{m}}$$

Zannin [66] berichtet von Messungen in einem brasilianischen Klassenraum mit 1,58 s Nachhallzeit, gemittelt aus den Oktavbändern 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz. Mit 20 Schülern beträgt die Nachhallzeit dort 0,98 s und mit 40 Schülern (maximale Besetzung) 0,68 s. Aus dem Klassenraumvolumen von 150 m<sup>3</sup> ergibt sich mittels der Sabineschen Formel (1) eine äquivalente Absorptionsfläche von ca. 0,5 m<sup>2</sup> pro Schüler. Für einen Raum mit dem selbem Volumen und Nachhallzeit  $T = 0,6$  s im unbesetzten Zustand errechnet sich daraus eine Nachhallzeit von 0,48 s mit 20 Schülern. 20 Schüler zusätzlich im Raum reduzieren also die Nachhallzeit je nach Ausgangs-Nachhallzeit um 0,6 s, 0,3 s oder 0,12 s. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass die Differenz der Nachhallzeiten in besetztem und unbesetztem Zustand keine Konstante ist und zeigt zugleich die Größenordnung dieser Differenz auf.

Anhang B der DIN 18041 [3] liefert weitere Beispiele aus Literaturquellen für die äquivalente Schallabsorptionsfläche von Personen. Dort finden sich unterschiedliche Angaben für Erwachsene, Schüler und Vorschulkinder, wobei die äquivalente Absorptionsfläche mit dem Alter zunimmt und der in obigem Beispiel errechnete Wert von 0,5 m<sup>2</sup> zwischen den Werten von Erwachsenen und Schülern aus DIN 18041 [3] liegt.

Die Messungen der Nachhallzeit im Rahmen dieser Studie wurden sämtlich in unbesetzten Räumen durchgeführt. Auf die Umrechnung der Nachhallzeiten auf besetzten Zustand wurde verzichtet, weil dies den Messergebnissen eine nur aus der Abschätzung der äquivalenten Absorptionsfläche resultierende Ungenauigkeit hinzugefügt hätte. Die Ergebnisse dieser Studie sind zum großen Teil Aussagen über die chronische Wirkung der akustischen Bedingungen in Klassenräumen. Die Studie erfasst dabei die Wirkung der ersten beiden Schuljahre. In diesem Zeitraum wachsen die Kinder und mit den Jahreszeiten wechselt die Bekleidung mehrmals. Im Gegensatz zu den Nachhallzeiten in den unbesetzten Räumen ist die Nachhallzeit der besetzten Räume in diesem Maßstab zeitlich nicht konstant. Ungleich höherer Aufwand bei der Messung der Nachhallzeit im besetzten Zustand trifft also mit dem Verlust eines eindeutigen Ergebnisses zusammen.

Abbildung 1:  
Sollwert (links) für Musik, Sprache und Unterricht (v.o.n.u.) und anzustrebender Toleranzbereich (rechts) der Nachhallzeit nach DIN 18041 [3].



Die 2004 aktualisierte Norm DIN 18041 [3] empfiehlt für Unterricht in Abhängigkeit vom Raumvolumen  $V$  eine Nachhallzeit  $T_{Soll}$  im besetzten Zustand von

$$(2) T_{Soll} = \left( 0,32 \lg \frac{V}{\text{m}^3} - 0,17 \right) \text{s}.$$

Mit dem mittleren Volumen der untersuchten Klassenräume von rund  $230 \text{ m}^3$  (s. Tabelle 6) ergibt sich ein Sollwert von  $0,59 \text{ s}$  im besetzten Zustand. Für Kommunikation in einer Sprache, die nicht als Muttersprache gelernt wurde, sollte nach DIN 18041 [1] die Nachhallzeit im Frequenzbereich  $250 \text{ Hz}$  bis  $2000 \text{ Hz}$  wiederum um bis zu  $20\%$  unter dem Wert nach Gleichung (2) liegen. Da etwa  $1/3$  der Zweitklässler und  $2/3$  der Erstklässler in dieser Studie Deutsch als zweite Sprache erlernt haben (siehe Abschnitt 9.2 Stichprobe) ist von dieser strengeren Anforderung von  $T_{Soll, \text{besetzt}} = 0,47 \text{ s}$  im besetzten Zustand auszugehen. „Im unbesetzten Zustand sollte die Nachhallzeit des Raumes im Allgemeinen nicht mehr als  $0,2 \text{ s}$  über dem Sollwert liegen.“ (Zitat DIN 18041 [1], s. 13). Es resultiert also eine Anforderung von  $T_{Soll, \text{unbesetzt}} \approx 0,7 \text{ s}$  ( $0,67 \text{ s}$  bei  $230 \text{ m}^3$ ) an die Nachhallzeit im unbesetzten Klassenraum.

Der anzustrebende Toleranzbereich ist mit erstaunlich hohen  $\pm 20\%$  im Frequenzbereich  $250 \text{ Hz}$  bis  $2000 \text{ Hz}$  angegeben, zugleich aber auch die Anwendung bei fremdsprachlicher Kommunikation in Frage gestellt ([1] S. 15). Zu höheren und niedrigeren Frequenzen erweitert sich der Toleranzbereich zu kürzeren Nachhallzeiten (s. Abbildung 1 und Abbildung 10).

Karabiber [40] gibt einen Überblick über die Anforderungen einiger anderer Industrienationen (Tabelle 1). In diesen liegen die Anforderungen an die Nachhallzeit in Klassenräumen im unbesetzten Zustand sage und schreibe zwischen  $0,4 \text{ s}$  und  $1,3 \text{ s}$ .

Tabelle 1:  
Anforderungen an die Nachhallzeit von unbesetzten möblierten Klassenräumen  
in einigen Ländern nach Karabiber [40].

<b>Land</b>	<b>Nachhallzeit T</b> in Abhängigkeit vom Raumvolumen V und Frequenz f
Belgien	V = 100 m <sup>3</sup> : 0,9 s < T < 1,3 s; V = 1000 m <sup>3</sup> : 1,1 s < T < 1,5 s
Frankreich	V < 250 m <sup>3</sup> : 0,4 s < T < 0,8 s; V > 250 m <sup>3</sup> : 0,6 s < T < 1,2 s (für 500-1000-2000 Hz)
Japan	0,5 s < T < 0,7 s (mittlerer Bereich)
Portugal	125 Hz ≤ f ≤ 250 Hz: T = 1 s; 500 Hz ≤ f ≤ 4000 Hz: 0,6 s ≤ T ≤ 0,8 s
Schweden	0,5 s / 0,6 s / 0,8 s (für Anforderungsklassen A/B,C/D)
Schweiz	0,6 s – 1,0 s 0,5 s – 0,7 s (verschiedene Dokumente)
Groß Britanien	72 m <sup>3</sup> < V < 210 m <sup>3</sup> : 0,4 s < T < 0,8 s
USA	V < 283 m <sup>3</sup> : T = 0,6 s; 283 m <sup>3</sup> < V < 566 m <sup>3</sup> : T = 0,7 s (für 500-1000-2000 Hz)

#### 4.1.2 Sprachübertragungsindex STI

Der Beurteilung der Sprachübertragungsqualität durch den Sprachübertragungsindex STI liegt die Betrachtung von Sprache als amplitudenmodulierter Schall zugrunde, deren Information in der aufmodulierten Hüllkurve enthalten ist. Die Abfolge von Phonemen, Silben, Wörtern ergibt das Signal im Frequenzbereich von 0,63 Hz bis 12,5 Hz, das auf Trägerschallwellen im Frequenzbereich der menschlichen Stimme von 125 Hz bis 8 kHz aufmoduliert ist. Für die aufmodulierten Hüllkurven lässt sich nun die Übertragungsfunktionen (Modulationsübertragungsfunktionen) ermitteln. Aus der Übertragungsfunktion wird unter Berücksichtigung von Verdeckung und Hörschwelle der Index gebildet [7][11].

Der STI ist dimensionslos und nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, wobei ein höherer Wert bessere Sprachübertragung bedeutet. ISO 9921 [12] teilt den Wertebereich in 5 Abschnitte und ordnet diesen Wertungen der Verständlichkeit zu, die in Tabelle 2 im englischen Original und in der deutschen Übersetzung wiedergegeben sind. Die missverständliche deutsche Bezeichnung „angemessen“ ist zwischen „schwach“ und „gut“ im Sinn von „befriedigend“ oder „ausreichend“ zu verstehen.

In diesem Bericht wird unterschieden zwischen STI ohne Störgeräusche und STI unter Unterrichtsbedingungen (mit Störgeräusch). Siehe dazu Abschnitt 4.1.5.



Tabelle 2:  
Einstufung des Sprachübertragungsindex STI nach ISO 9921 Anhang F .

STI	< 0,30	0,30 bis 0,45	0,45 bis 0,60	0,60 bis 0,75	>0,75
Englisch ISO 9921 Annex F [12]	bad	poor	fair	good	excellent
Deutsch DIN EN ISO 9921 Anhang F [11]	schlecht	schwach	angemessen	gut	ausgezeichnet

#### 4.1.3 Frühe Reflexionen: Deutlichkeitsgrad und -maß

Die Parameter Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  und Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  sind Maßzahlen für den Anteil früher Reflexionen an der einfallenden Schall-Energie. Betrachtet wird hier die Laufzeit des Schalls vom Sprecher zum Zuhörer. Da sich der Schall nicht nur auf direktem Weg sondern auch über Reflexion an Oberflächen ausbreitet, wird ein Laut auf dem Weg vom Sprecher zum Hörer zeitlich in die Länge gezogen. Der Anteil, der dabei mehr als ca. 50 ms nach dem Direktschall eintrifft, wird vom menschlichen Gehör als getrenntes Ereignis wahrgenommen und stört somit die Verständlichkeit. Verständlichkeitsfördernd sind dagegen die frühen Reflexionen, die innerhalb der ersten ca. 50 ms nach dem Direktschall eintreffen. Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  und -maß  $C_{50}$  bilden das Verhältnis beider Anteile.

In den Definitionsgleichungen ist  $p^2(t)$  das Quadrat des Schalldruckes zur Zeit  $t$ .

$$(3) \text{ Deutlichkeitsgrad } D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad \%$$

$$(4) \text{ Deutlichkeitsmaß } C_{50} = 10 \log \left( \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad \text{dB}$$

Während der Deutlichkeitsgrad in Prozent angegeben wird und zwischen 0 und 100 liegt, ist der Wertebereich des in Dezibel angegebenen Deutlichkeitsmaßes prinzipiell unbeschränkt. Bei beiden Größen steht ein höherer Wert für höhere Verständlichkeit. Da beide Angaben ineinander umgerechnet werden können, reicht die Angabe einer Größe.

Ein Deutlichkeitsgrad von 50 % ist gleich einem Deutlichkeitsmaß von 0 dB. Bei diesem Wert wird nach von Fasold [27] zitierten Quellen eine Silbenverständlichkeit von 80 % und eine Satzverständlichkeit von 100 % erreicht. Wie nicht

zuletzt diese Studie zeigt, ist das jedoch ein recht pauschaler Richtwert, der keine Hintergrundgeräusche berücksichtigt.

Ein anderes Maß für den Anteil der frühen Reflexionen ist die Schwerpunktzeit  $T_s$  bzw. englisch Centre Time  $T_c$ .

$$(5) \text{ Schwerpunktzeit } t_s \equiv \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) t dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Parameter, die Hintergrundgeräusche mit einbeziehen, sind die bei Bradley [15] erläuterten Useful-to-detrimental-ratios. Späte Reflexionen und Hintergrundgeräusche werden dabei zusammengefasst und die frühen Reflexionen dazu ins Verhältnis gesetzt. Solche Parameter beschreiben die Gesamtsituation, gegeben durch Raumakustik, Nutzerverhalten und nutzungs-fremden Schallquellen. Diese Parameter fanden in der Studie keine Anwendung.

#### 4.1.4 Ermittlung aus Abklingverlauf (Schulwahl)

Abbildung 2:  
Batteriebetriebener Analysator und Mikrofon bei der Schulwahl im Einsatz.



Im Rahmen der Vorauswahl wurden vereinfachte akustische Messungen durchgeführt. Ziel war es dabei, mit vertretbarem Aufwand eine Einschätzung der Akustik zu erhalten um darauf die Auswahl der Schulen zu begründen.

Von den raumakustischen Parametern wurde die Nachhallzeit in den Oktaven 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz bestimmt. Verwendet wurde dazu ein Akustik-Analysator Typ NOR 110. Es wurde auf räumliche Mittelung verzichtet und nur an einer Position je Raum gemessen.

Die Messungen erfolgten im unbesetzten Klassenraum.

#### 4.1.5 Ermittlung aus Raumimpulsantworten (Hauptuntersuchung)

Im Rahmen der Hauptuntersuchung an den 8 teilnehmenden Schulen wurden die vorgestellten raumakustischen Parameter durch Auswertung der Raumimpulsantworten mit der PC-Software Nor-RA 1031 gewonnen.

Die Impulsantwort eines Übertragungsweges enthält die vollständige Information über die Veränderung eines Signales auf dem Übertragungsweg. Zum Beispiel enthält die Raumimpulsantwort die Information über die Veränderung der Sprache auf dem Übertragungsweg vom Lehrer zum Schüler. Durch Faltung (eine mathematische Operation) des Eingangssignals als Funktion der Zeit (z.B. Schalldruck am Munde des Lehrers) mit der Raumimpulsantwort erhält man das Ausgangssignal als Funktion der Zeit (z.B. Schalldruck am Schüler-Ohr). Der Umweg über die Messung der Raumimpulsantwort erlaubt also eine komplexere Erfassung der Raumakustik mit weiteren nachträglichen Auswertemöglichkeiten, als es direkte Messungen z.B. der Nachhallzeit oder des STI erlauben würden.

Das Signal wurde von einem einzelnen 80 mm Breitband-Lautsprecher, Typ TPC 80 RW/4, in geschlossenem Gehäuse gerichtet abgestrahlt. Die Bandbreite dieses Lautsprechers ist mit 80 Hz bis 8000 Hz angegeben (Abbildung 3). Am Empfangsort wurde der Schalldruck mit einem Kondensator-Freifeldmikrofon, B&K Typ 4165, am Eingang des Analysators aufgenommen (Abbildung 4). Die Schnittstelle zwischen Analysator 840 und Software Nor-RA waren Dateien mit der 2 Sekunden langen Impulsantwort mit einer Samplingfrequenz von 64 kHz ( $2^{17}-1$  Samples) bei 16 Bit Auflösung.

Abbildung 3:  
Lautsprecher zur Messung der Raumimpulsantwort auf Position 1.



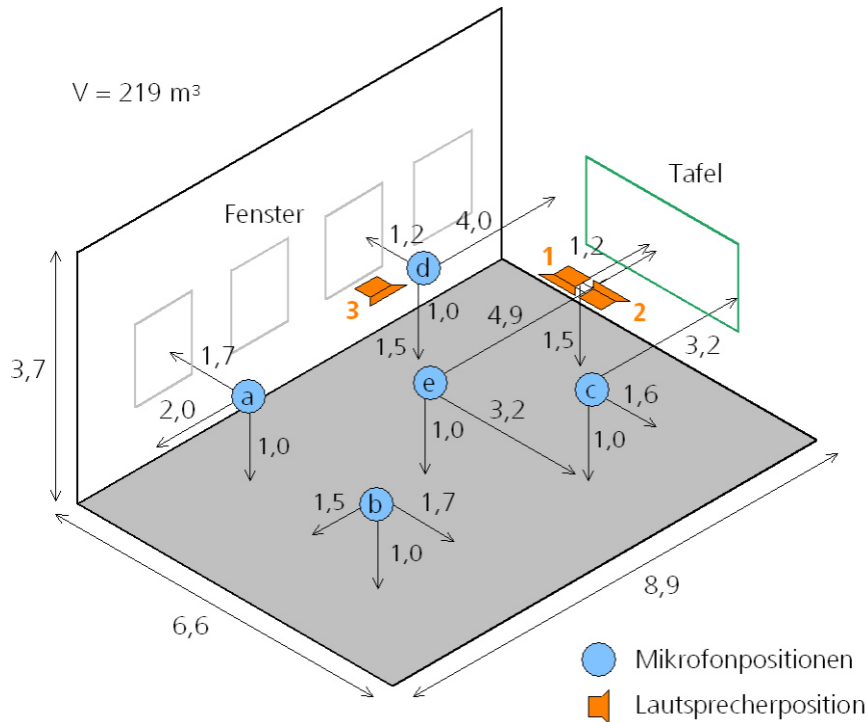
Abbildung 4:  
Mikrofonposition relativ zum Tisch bei den raumakustischen Messungen.



Erwartungsgemäß unterscheiden sich die raumakustischen Parameter in Abhängigkeit vom Übertragungsweg, also der Position von Lautsprecher und Mikrofon auch innerhalb eines Raumes. Um Aussagen über verschiedene Sitzpositionen treffen zu können oder aber einen für den Raum gültigen Mittelwert bilden zu können, ist es erforderlich, mehrere Übertragungswege je Raum zu messen. In der Studie wurden je Raum die 10 gleichen Übertragungswege untersucht, um Vergleiche zwischen den Räumen zu ermöglichen. Die Positionen sind in Abbildung 5 am Beispiel von Raum 12 der Schule 1 angegeben. Die Abstände zu den nächstliegenden Raumbegrenzungen sind in allen Räumen gleich. Durch die Variation von Raumtiefe und –breite ergeben sich unterschiedliche Abstände zwischen den Positionen. Da Raumtiefe und –Breite jedoch relativ wenig (Standardabweichung < 10%) um die schultypischen Werte schwanken (s. Abschnitt 6.1) und andererseits die Raumbegrenzungen durch die Reflexionen die Akustik beeinflussen, fiel die Entscheidung zum Bezug auf die Raumbegrenzungen statt auf ein Koordinatensystem.

Da die Sitzordnungen in den Klassen sehr vielfältig sind, befand sich an den Mikrofonpositionen häufig keine Schulbank. In diesem Fall wurde der nächststehende Tisch mit Stühlen so zum Mikrofonstandort verschoben, dass das Mikrofon etwa mittig über der Tischkante in der Kopfposition eines sitzenden Zweitklässlers war (Abbildung 4).

Abbildung 5:  
Lautsprecher und Mikrofonpositionen bei der Messung der Raumimpulsantworten. Abmessungen in Metern.



Die 10 Übertragungswege ergeben sich aus den drei Lautsprecherpositionen 1-3 und den Mikrofonpositionen a-e durch folgende Kombinationen: 1a, 1b, 1c, 1d, 1e, 2a, 2c, 2e, 3b und 3c. Die Lautsprecherposition 1 entspricht einem Lehrer der vor der Tafel stehend zur Klasse spricht. Position 2 unterscheidet sich von Position 1 nur durch die Ausrichtung des Lautsprechers zur Tafel (Lehrer spricht während Tafelanschrieb). Während die Positionen 1 und 2 den klassischen Frontalunterricht simulieren, steht die Position 3 exemplarisch für eine Lehrerposition inmitten der Klasse während heute weit verbreiteter Unterrichtsformen wie Teamarbeit, Freiarbeit, etc.

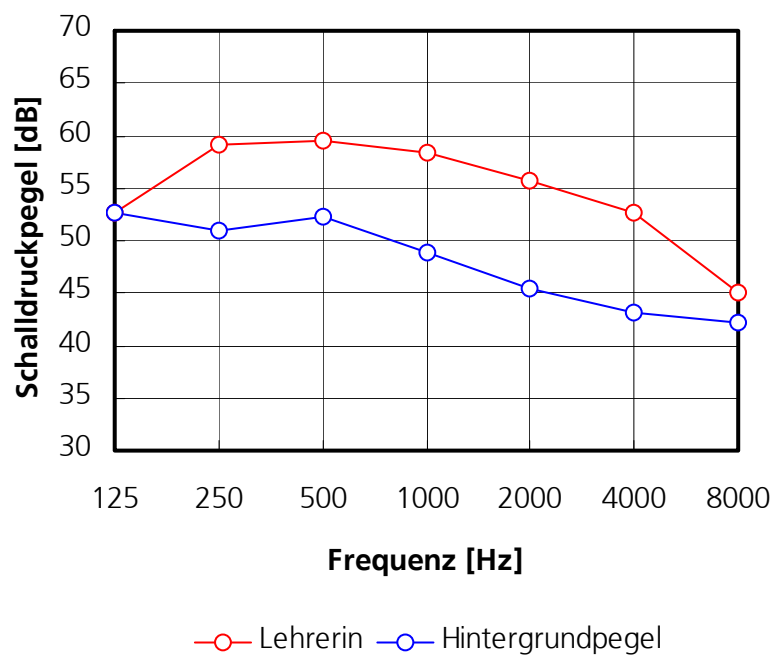
Die Raumimpulsantworten wurden im unbesetzten Raum gemessen. Die abgeleiteten Parameter gelten daher auch für den unbesetzten Raum. Für die Berechnung des Sprachübertragungsindex STI besteht jedoch auch die Möglichkeit das Schalldruckpegel-Spektrum des Sprechers und der Hintergrundgeräusche vorzugeben. Die STI-Werte wurden einmal mit einem exemplarischen Satz von Sprecher- und Hintergrundspektrum und zum zweiten ohne Störgeräusche ermittelt.

Sprecher- und Hintergrundpegel haben zwar großen Einfluss auf die Sprachverständlichkeit, variieren aber auch sehr u.a. zwischen den Unterrichtsphasen einer Schulstunde, über einen Schultag und mit den Lehrern und Klassen [60]. Eine Unterscheidung zwischen den unterschiedlichen Situationen scheitert nicht nur an der fehlenden Klassifizierung und der schier Zahl der Unterrichtssituationen, sondern würde zu einer unübersichtlichen, kaum zu interpretierenden

Datenflut führen. Die Untersuchungen beschränken sich deshalb hier auf die beiden Fälle ohne Störgeräusche und mit den in Abbildung 6 wiedergegebenen Spektren.

Die STI-Ergebnisse ohne Störgeräusch stellen eine obere Idealgrenze dar, die erreicht wird, wenn die Hintergrundgeräusche im Klassenraum vernachlässigbar gering sind.

Abbildung 6:  
Sprecher und Hintergrundpegel, die der STI-Ermittlung "Unter Unterrichtsbedingungen" zugrunde liegen.



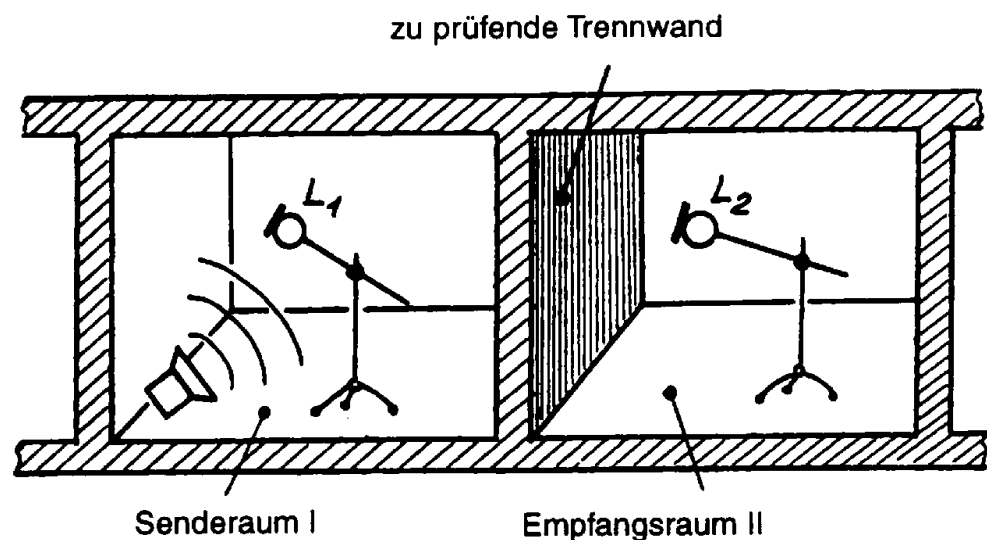
Die in Abbildung 6 angegebenen Sprecher und Hintergrundpegel wurden während des Unterrichts einer ersten Klasse an Schule 1 gemessen. Dafür wurde der äquivalente unbewertete Schallpegel einer geeigneten, wenige Sekunden langen Sequenz mit angehobener Sprache der Lehrerin bei aufmerksamen Schülern und der darauf folgenden Redepause gebildet. Das Messmikrofon stand dabei nahe der hinteren Sitzplätze. Der A-bewertete Schallpegel des Sprechersignals beträgt 63 dB(A) und der des Hintergrundgeräusches 54 dB. Der Vergleich mit [60] zeigt, dass es sich dabei durchaus noch um moderate Sprecherpegel handelt. Auch das Sprecher-zu-Störgeräusch-Verhältnis ist mit 9 dB(A) für Schulbedingungen eher mittelmäßig bis günstig. Die mit den Spektren aus Abbildung 6 ermittelten STI-Werte können somit als beispielhaft für den Unterricht betrachtet werden, wobei ungünstigere Verhältnisse und damit niedrigere Sprachübertragungsindices in der Praxis nicht ungewöhnlich sind.

## 4.2 Bauakustik

### 4.2.1 Schalldämmung

Als Schalldämmung interessiert in diesem Zusammenhang das Maß, in dem Luftschall gehindert wird, von außen in einen Klassenraum einzudringen. Dem entspricht die Schallpegeldifferenz  $D$  zwischen zwei Räumen (s. Abbildung 7). Anforderungen an die Schalldämmung sind dagegen derzeit in Deutschland als Schalldämm-Maß  $R'_w$  formuliert.

Abbildung 7:  
Messung der Schalldämmung im Schema.



Der Empfangsraum bei den Messungen ist stets der Klassenraum. Der Senderraum die horizontal oder vertikal angrenzenden Klassenräume oder der Flur bzw. das Treppenhaus. Im Senderraum wird mit einem rundum abstrahlenden Lautsprecher ein Schallpegel  $L_1$  erzeugt, der so hoch ist, dass auch im Empfangsraum der Schallpegel  $L_2$  ausreichend über dem Hintergrundpegel liegt. In beiden Räumen wird räumlich gemittelt der Schalldruckpegel  $L$  gemessen. Die Schallpegeldifferenz  $D$  ergibt sich zu

$$(6) \quad D = L_1 - L_2.$$

Aus dem Schallpegel im Senderraum lässt sich nun durch Subtraktion der Schallpegeldifferenz  $D$  der Schallpegel im Empfangsraum bei Abwesenheit weiterer Schallquellen errechnen. Damit ist die Schallpegeldifferenz  $D$  die geeignete Größe zur Beurteilung der akustischen Belastung in dieser Studie. Implizit enthalten ist der Einfluß der Trennbauteilfläche  $S$ , der Nachhallzeit im Empfangsraum  $T$  und des Empfangsraumvolumens  $V$  auf den Schallpegel  $L_2$  im Empfangsraum.

Die Anforderungen an die Schalldämmung in DIN 4109 [5] (Tabelle 3) sind jedoch als Schalldämm-Maß  $R'$  formuliert. Beim Schalldämm-Maß  $R'$  werden

Trennbauteilfläche  $S$ , die Nachhallzeit im Empfangsraum  $T$  und des Empfangsraumvolumens  $V$  gemäß

$$(7) R' = D + 10 \lg \left( \frac{S \cdot T}{0,16V} \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

herausgerechnet, so dass  $R'$  ein Maß für das Verhältnis von im Empfangsraum abgestrahlter Schall-Leistung zur auf das Trennbauteil treffenden Schall-Leistung ist.

Schallpegeldifferenz und Schalldämm-Maß sind frequenzabhängige Angaben. DIN EN ISO 717 [9] definiert die Ermittlung von Einzahlangaben. Das Verfahren berücksichtigt näherungsweise den Frequenzgang des menschlichen Gehöres. Daraus ergeben sich die bewerteten und durch ein tiefgestelltes  $_w$  gekennzeichneten Einzahlangaben  $D_w$  und  $R'_w$ .

Die Messung erfolgte nach DIN EN ISO 140-4 [1] mit der Ausnahme, dass die Nachhallzeiten wie im Abschnitt 4.1.5 beschrieben ermittelt wurden. Der Vergleich beider Methoden an einem Klassenraum zeigte keinen nennenswerten Unterschied im Ergebnis.

Zur Messung wurden ein Akustik-Analysator, kalibrierte eichfähige Kondensator-Freifeldmikrofone auf einer Mikrofonschwenkanlage zur räumlichen Mittelung während der Messung und ein Bauakustik-Lautsprecher mit kugelförmiger Abstrahlcharakteristik verwendet.

#### 4.2.2 Körperschall und Trittschallpegel

Im Gegensatz zu den Luftschallquellen regen Körperschallquellen die Bauteile eines Gebäudes direkt zu Schwingungen an. Diese Schwingungen verursachen eine im Empfangsraum hörbare Luftschallabstrahlung.

Häufige Körperschallquellen sind Installationsgeräusche von Sanitärinstalltionen, haustechnische Anlagen wie z.B. Fahrstühle und Trittschall, verursacht durch Gehen, Hüpfen, Tischerücken.

Fahrstühle oder andere haustechnische Anlagen sind in Schulen kaum anzutreffen und spielen weder bei den im Auswahlprozess besuchten noch bei den teilnehmenden Schulen eine Rolle. Dasselbe trifft auf Geräusche von WCs und Wasserleitungen zu. In den wenigen Fällen, in denen Klassenräume angrenzend lagen, war keine Beeinträchtigung wahrzunehmen oder berichtet worden. Akustische Messungen erfolgten deshalb nicht.

Ganz im Gegensatz dazu prägt der Trittschall den bauakustischen Gesamteindruck einiger Schulen. Zur Messung wurde das in ISO 140 [2] festgelegte Verfahren mit dem ebenda definierten Normtrittschallhammerwerk verwendet. Dieses Hammerwerk wird auf dem Boden des Senderraumes aufgestellt und hämmert bei einem zeitlichen Abstand von 0,1 s mit 0,5 kg schweren Hämmerchen, die aus 40 mm Höhe fallen. Dadurch soll die Körperschallanregung durch Gehen simuliert werden.



Die Messgröße Norm-Trittschallpegel  $L'_n$  ist im wesentlichen der mittlere Schallpegel im Empfangsraum  $L_i$  bei laufendem Trittschallhammerwerk. Gemäß

$$(8) \quad L'_n = L_i + 10 \log \left( \frac{0,16 V}{T \cdot 10 \text{m}^2} \frac{\text{s}}{\text{m}} \right)$$

ist der Schallpegel ähnlich wie beim Schalldämm-Maß  $R'$  um Empfangsraumvolumen  $V$  und Nachhallzeit  $T$  korrigiert.

Der Normtrittschallpegel ist ebenfalls frequenzabhängig. Die Bildung der Einzahlangebe  $L'_{n,w}$  ist durch ISO 717-2 [10] festgelegt. Beim Trittschallpegel stehen höhere Werte für ungünstigere akustische Bedingungen, während eine höhere Luftschalldämmung besseren Schallschutz bedeutet.

Die Trittschallpegel wurden nur für die Anregung im darüber liegenden Raum gemessen. Trittschallprobleme können zwar auch zwischen nebeneinanderliegenden Räumen oder diagonal übereinander angeordneten Räumen auftreten, in der Regel jedoch ist die Trittschallbelastung vom direkt darüber liegenden Raum höher.

### 4.2.3 Bauakustische Anforderungen an den Schulbau

Die wichtigsten deutschen Anforderungen an Schulgebäude aus DIN 4109 [5] sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Zu Fluren hin wird zwischen Anforderungen an das bewertete Schalldämm-Maß  $R'_w$  von Wänden und von Türen unterschieden. Daran wird der starke Bauteilbezug dieser Norm sichtbar. Die sich für die Schallpegeldifferenz  $D$  zum Flur nach Gleichung (7) ergebenden Anforderungen sind nicht für alle Schüler einheitlich sondern abhängig von den Abmessungen der Bauteile und damit von Schule zu Schule unterschiedlich. Für einen Klassenraum mit den durchschnittlichen Abmessungen nach Tabelle 6 und einer Tür mit  $2 \text{ m}^2$  Fläche ergibt sich eine Anforderung an das gesamte bewertete Schalldämm-Maß  $R_{w,ges}$  von Wand und Tür zusammen von  $R_{w,ges} \geq 42 \text{ dB}$  bzw. für die bewertete Schallpegeldifferenz  $D_w$  von  $D_w \geq 45 \text{ dB}$  bei einer DIN 18041[3] entsprechenden Nachhallzeit von  $0,6 \text{ s}$ .

Bezüglich der Anforderungen an Wände unterscheidet DIN 4109 [5] auch zwischen Wänden zu Fluren und solchen zu Treppenhäusern. Das trägt dem Umstand Rechnung, dass die Schallpegel in Treppenhäusern meist höher und der Verkehr stärker und häufiger als auf den Fluren ist. Anforderungen an Türen zu Treppenhäusern sind nicht formuliert.

Tabelle 3:  
Anforderung an den Schallschutz nach DIN 4109 [5].

Bauteil	zwischen Unterrichtsräumen und...	erforderliches $R'_w$ in dB	erforderliches $L'_{n,w}$ in dB
Decken	Unterrichtsräumen	55	53
Wände	Unterrichtsräumen	47	-
Türen	Fluren	32 ( $R_w$ )	-
Wände	Fluren	47	-
Wände	Treppenhäusern	52	-

Einen Überblick über die Anforderungen in einigen anderen Ländern gibt Karabiber [40]. Die Zusammenfassung in Tabelle 4 enthält neben dem jeweiligen Zahlenwert auch die Beurteilungsgröße, denn auch die Beurteilungsgrößen unterscheiden sich zwischen den Ländern. Beispielsweise beziehen sich Schweden und Italien wie Deutschland auf  $R'_w$  und  $L'_{n,w}$ . Großbritannien formuliert die Anforderung als bewertete Schallpegeldifferenz  $D_w$ , also in der Größe, in der auch in diesem Bericht die Messergebnisse (Abschnitt 6.3) angegeben sind (vgl. Abschnitt 4.2.1).

Tabelle 4:  
Anforderungen an Schalldämmung und Trittschallschutz von Klassenräumen in einigen Ländern nach Karabiber [40].

Land	zu anderen Klassenräumen		zu Treppenhäusern, Fluren	
	Luftschall	Körperschall	Luftschall	Körperschall
Belgien	$D_{nT,w}$ 30-35		$D_{nT,w}$ 30-35	
Frankreich	dB 41-44	$L_{nAT}$ 67	dB 44	
Italien	$R'_{w, D}$ 50	$L'_{n,w}$ 58	$R'_{w, D}$ 42	
Japan	D 40	L 50-55-60-65	D 20	L 55
Schweden	$R'_w$ 48/44 Klasse A 44/40 Klasse B/C 44/35 Klasse D	$L'_{n,w}$ 56 Klasse A 60 Klasse B/C 65 Klasse D	$R'_w$ 44/30 Klasse A	
Groß Britannien	$D_w$ 45	$L'_{nT,w}$ 55-60	$D_w$ 45	$L'_{nT,w}$ 65
USA	STC 50	IIC 45-50	STC 45	

### 4.3 Schallpegel

Bei bau- und raumakustischen Messungen wird der Schalldruckpegel, verursacht durch gezielt eingesetzte Schallquellen und als Zwischenergebnis zu den interessierenden Größen wie z.B. Schalldämm-Maß oder Nachhallzeit, ausge-

wertet. In diesem Abschnitt geht es jedoch um die Schallpegel, die unter normalen Bedingungen in den Klassenräumen und vor den Schulen herrschen.

Der Schallpegel ist in zweierlei Hinsicht für diese Studie von Belang. Der absolute Schallpegel kann als Anhaltspunkt für den dadurch ausgelösten gesundheitlichen Streß, Gefahr für das Gehör im Extremfall oder die Arbeitsbedingungen allgemein betrachtet werden. Das Verhältnis vom Schallpegel der gehörten Sprache zum Hintergrundschallpegel beeinflusst direkt die Kommunikation und die Sprachverarbeitung. Der einzelne Sprecher und erst recht eine ganze Schulklasse reagiert äußerst dynamisch und komplex auf ansteigenden Schallpegel, wodurch der Schallpegel weiter steigt (Lombard Effekt), sofern dieser Zusammenhang nicht durch andere Maßnahmen durchbrochen wird.

Der Luftschallpegel ist proportional der Dichte der Luftschallenergie. Luftschallenergie wird durch Absorption vernichtet. Die Absorption steht in Zusammenhang mit der Nachhallzeit  $T$ . Je kürzer die Nachhallzeit, desto höher die Schallabsorption. Schallquellen führen Schallenergie zu. Befinden sie sich außerhalb des Klassenraumes, wird der Zufluss an Schallenergie (die Schall-Leistung) durch die Trennbauteile um deren Schalldämm-Maß verringert. Die Schallquellen im Klassenraum sind die Schüler und Lehrer selbst durch Sprache und Geräusche.

Von A-Bewertung spricht man, wenn das Mikrofonsignal vor der Auswertung frequenzabhängig gefiltert wird. Die Filterung ist genormt [8] und bildet die mittlere frequenzabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs nach. Die so gewonnenen Werte werden durch ein „A“ gekennzeichnet. Vor allem bei tiefen Frequenzen sind die A-bewerteten Pegel niedriger als die ohne Bewertung.

Der äquivalente Schallpegel  $L_{eq}$  ist das zeitliche Mittel des Schallpegels (genauer: Quadrat des Schalldrucks) über einen anzugebenden Zeitraum und unterscheidet sich dadurch vom Schallpegel, der eine Funktion der Zeit ist.

Schallpegel wurden in vier unterschiedlichen Situationen gemessen.

#### **4.3.1 Im unbesetzten Raum bei geschlossenen und offenen Fenstern**

Die so ermittelten Pegel stellen den minimalen erreichbaren Hintergrundpegel im Klassenraum dar. Die Bedingung geschlossener Fenster trifft für den Großteil des Schuljahres zu. Im Sommer wird jedoch häufig bei offenen Fenstern unterrichtet. Sofern eine Außenlärmbelastung vorhanden ist, erhöht sich durch das Öffnen der Fenster der Pegel deutlich. Zur Messung steht das Messmikrofon an einer Position im mittleren Bereich des Klassenraumes. Die Mittelungsdauer der äquivalenten Schallpegel betrug 1 bis 5 Minuten.

In Deutschland gibt die DIN 18041 [1] Anforderungen an den Gesamtstör-schallpegel an. Der Gesamtstör-schallpegel setzt sich zusammen aus den Geräuschen im unbesetzten Zustand (bauseitige und Betriebsgeräusche) und den Geräuschen von Schülern und Lehrer (Nutzergeräusche). Für bauseitige und Betriebsgeräusche gilt eine Grenze von 40 dB(A) und von 30 dB(A) für Personen mit Hörverlusten oder bei der Wahrnehmung schwieriger oder fremdsprachlicher Texte. Aus Sicht der Norm, die dieser Planung von Gebäuden dient, sind

Nutzergeräusche nicht beeinflussbar. Deshalb werden dieselben Grenzwerte nur empfohlen. Maßnahmen zur Verminderung von Trittschallgeräuschen wie Teppichböden und Gummiunterlagen oder Filzgleiter unter Tischen und Stühlen werden empfohlen.

In anderen Ländern liegt die Anforderung an den Hintergrundpegel in unbesetzten Klassenräumen in den meisten Fällen ebenfalls zwischen 30 und 40 dB(A). In wenigen Ländern sind in bestimmten Fällen bis zu 45 dB(A), in Schweden und Brasilien bis zu 50 dB(A) [40].

#### 4.3.2 Außenschallpegel vor den Fenstern der Klassenräume

Diese Messungen geben Aufschluss über die Lärmbelastung der Schule von außen. Das Messmikrofon befand sich 2-3 m vor dem Fenster des Klassenraumes einer teilnehmenden Klasse. Lagen die Räume einer Schule in verschiedenen Gebäudeteilen oder waren sie durch eine andere Ausrichtung unterschiedlich dem Außenlärm ausgesetzt, wurde jede typische Lage mit einer Messung erfasst.

Bei untypischen Ereignissen wurde die Messung unterbrochen, durch Rückwärtslöschen das Ereignis aus der Erfassung genommen und nach dem Ereignis die Messung fortgesetzt. Untypische Ereignisse in diesem Sinne waren vor allem Schallquellen wie Autos, Vögel oder Passanten, die dem Mikrofon zu nahe kamen. Auf diese Weise wurden auch vorbeigehende Schüler auf dem Pausenhof aus der Wertung genommen. Die Messungen erfolgten grundsätzlich außerhalb der Unterrichtszeit bei leeren Pausenhöfen. Bei Aktivitäten auf dem Pausenhof entstehen erhebliche Schallpegel, die auch die Außenlärmbelastung übersteigen. Es bestehen jedoch hier dieselben Schwierigkeiten diese unregelmäßigen Vorgänge zu erfassen wie bezüglich der Schallpegel im Unterricht.

Bei Messungen über ca. 1 Stunde Dauer wurden die Pegelhäufigkeitsverteilung, verschiedene Summenhäufigkeitspegel und der äquivalente Schalldruckpegel A-bewertet über die gesamte Messdauer erfasst. Die wichtigsten Summenhäufigkeitspegel sind  $L_{95,A,F}$  und  $L_{5,A,F}$ . Der  $L_{95,A,F}$  wird häufig als Hintergrundpegel interpretiert. Es ist der Schallpegel, der zu 95 % der Zeit überschritten wird. Der  $L_{5,A,F}$  wird zu 5 % der Zeit überschritten. Er ist daher ein Maß für die höchsten auftretenden Pegel. Der mittlere Maximalpegel  $L_{max,A,F}$  der zu 1 % überschritten wird, wurde ebenfalls ermittelt.

Die Häufigkeitsverteilung bildet Peaks mit mehr oder weniger schmaler und idealer Glockenform. Bei schmalen Verteilungen wird der Wert mit der höchsten Häufigkeit und bei breiten Verteilungen die Mitte der Glocke als häufigster Pegel  $L_{A,Peak}$  bezeichnet. Diese sind nicht zu verwechseln mit dem Maximalpegel  $L_{max,A,F}$  oder Spitzenpegel.

Während der einstündigen Messung wurde parallel mit einem zweiten Analysator gleichen Typs über einen Zeitraum von 300 s sekundlich der äquivalente Schallpegel über 1 s aufgezeichnet. Der so gewonnene Pegel-Zeit-Verlauf gibt Aufschluß über die Gleichmäßigkeit oder ständiges Wechseln des Schallpegels.

Schließlich wurde auch mit Mittelungszeiten von einigen Minuten der Schallpegel vor den Fenstern frequenzabhängig mit Terzauflösung erfasst.

Abbildung 8: Messung der Außenschallpegel.



#### 4.3.3 Im besetzten Raum während des Unterrichtes

Kurzzeitige Messungen des Schallpegels im Unterricht ergeben für sich nur Momentaufnahmen, die in ihrer Bedeutung nicht einzuordnen sind. Um Werte aus weitgehend unbeeinflusstem Unterricht zu erhalten, ist es notwendig, Messungen während ganzer Unterrichtseinheiten durchzuführen. Dabei ist die Protokollierung des Unterrichtsgeschehens während der Messung aus vielen Gründen unerlässlich: Neben kurzen Einzelereignissen wie polternden Stühlen spielt die Unterrichtsform eine entscheidende Rolle. Die Unterrichtsform wechselt üblicherweise gerade bei den Erst- und Zeitklässlern mehrmals während einer Unterrichtsstunde. Auch wenn die Anwesenheit von Beobachtern in dieser Altersstufe die Kinder kaum beeinflusst, mussten doch Zeiträume aus der Wertung genommen werden, die der Beantwortung von Fragen zur Messung gewidmet waren oder in denen z.B. das Mikrofon angestoßen wurde. Protokolliert wurde parallel von Hand in vorbereiteten Tabellen, in denen Kategorien von Ereignissen und Unterrichtsphasen minutengenau markiert werden konnten und mit einem PC-Programm, das es erlaubte, auf Knopfdruck sekundengenaue Notizen zu speichern.

Messungen während des Unterrichts wurden zusätzlich in den experimentellen Projektumfang aufgenommen und daher nur exemplarisch bei einigen Klassen durchgeführt. Zweifelsfrei wären Schallpegelangaben aus vergleichbaren Unterrichtsphasen aller beteiligten Klassen sehr aussagekräftige Parameter auch für die Auswertung der Tests aus Teilprojekt B. Dem stehen jedoch unüberwindbare Hindernisse gegenüber: Wegen individueller Unterschiede im Unterrichtsstil gibt es keine vergleichbaren Unterrichtsphasen, die sich nur akustisch, aber nicht im Verhalten der Lehrer unterscheiden. Die notwendige Mittelung einiger gleichartiger Unterrichtsphasen zum Ausgleich tagesabhängiger Einflüsse würde zudem eine unbeherrschbar große Zahl protokollierter Unterrichtsstunden erfordern. Die Auswertung eines Unterrichtsprotokolls erfordert ein vielfaches

der protokollierten Zeit. Neben prinzipiellen Problemen wäre also der Aufwand enorm.

Aber auch die tatsächlich durchgeführten unterrichtsbegleitenden Messungen von 15 Unterrichtsstunden mit 6 beteiligten Klassen können einige Fragen beantworten. Sie geben Anhaltspunkte für typische Hintergrund-, Maximal- und Sprecherschallpegel. Sie zeigen die zeitliche Schwankungsbreite auf und verdeutlichen die akustischen Unterschiede zwischen verschiedenen Unterrichtsformen. Außerdem wurden exemplarische Sprecher- und Hintergrundpegel zur Bestimmung des Sprachübertragungsindex STI (s. Abschnitt 4.1.5) gewonnen. Zwei Methoden kommen dafür in Betracht. Bei der Methode nach Hodgson et. al. 1999 [38] werden Häufigkeitsverteilungen gebildet und Normalverteilungen für Sprecher und Hintergrund gefittet. Das setzt natürlich voraus, dass die Häufigkeitsverteilung genau zwei Maxima aufweist. Dies dürfte zwar auf Vorlesungen, nicht jedoch auf sehr viel abwechslungsreicheren Grundschulunterricht zutreffen. Soweit ist das Verfahren gänzlich objektiv. Um jedoch die unterschiedlichen Phasen einer Unterrichtsstunde nicht zu vermischen, muss zuvor eine in sich homogene, vergleichbare Phase ausgewählt werden [16]. Die verwendete alternative Methode sieht vor, typische Abschnitte mit Sprecher bzw. Hintergrund auszuwählen und den äquivalenten Schallpegel je Abschnitt zu ermitteln.

## 5 Auswahl der Schulen

### 5.1 Zweck

Ein wesentlicher Teil der Projektarbeit war die Auswahl der acht letztlich an den Untersuchungen teilnehmenden Schulen. Das Augenmerk lag in diesem Prozess vor allem darauf, eine Stichprobe (s. Abschnitt 9.2) für die kognitionspsychologischen Untersuchungen zu gewinnen, die möglichst aussagekräftige und statistisch belastbare Aussagen ermöglicht. Daher flossen in die Auswahl akustische und nicht-akustische Eigenschaften ein.

Die akustischen Eigenschaften, von denen ein Einfluss auf die getesteten Sprachverarbeitungs- und anderen Fähigkeiten der Schüler erwartet wurde, sollten in der Stichprobe mit großer Varianz vertreten sein. Hier ist die Nachhallzeit zu nennen, deren Bedeutung schon aus anderen Veröffentlichungen bekannt war (s. Abschnitt 1). Es wurde insgesamt angestrebt, bei allen akustischen Parametern sowohl extreme Verhältnisse als auch eine repräsentative Gesamtschau der akustischen Umgebung in den Grundschulen abzubilden. Im Ergebnis waren die Unterschiede allemal groß genug, um von den Kindern wahrgenommen zu werden, wie die Fragebogen-Ergebnisse zeigen (s. Abschnitt 10.3).

Nicht-akustische Eigenschaften, die eine bekannte Wirkung auf die getesteten Merkmale haben (konfundierenden Variablen), wurden soweit verfügbar, bei der Auswahl berücksichtigt, um die Kontrolle der konfundierenden Variablen mit statistischen Methoden (s. Abschnitt 10.2.1) zu unterstützen.

Zu beachten ist auch, dass die Auswahl vor allem den Randbedingungen für die zum Teil eigens entwickelten Tests (s. Abschnitt 8) entsprechen musste. Dazu gehört die Zahl von acht Schulen und die Beschränkung auf zweite Klassen, die erst im Zuge der fortgeschrittenen Auswahl auf erste Klassen ausgedehnt wurde. Räume mit deutlich erkennbaren akustischen Mängeln etwa konnten nicht verwertet werden, wenn sie höhere Klassen beheimateten.

## 5.2 Vorgehen

Die Auswahl der Klassen ist ein zirkuläres Problem: Im Idealfall erfolgt die Auswahl nach allen Eigenschaften, die erst mit hohem Aufwand an den ausgewählten Schulen bestimmt werden sollen. Die Auswahl musste daher auf Basis der mit vertretbarem Aufwand zu beschaffenden Daten erfolgen.

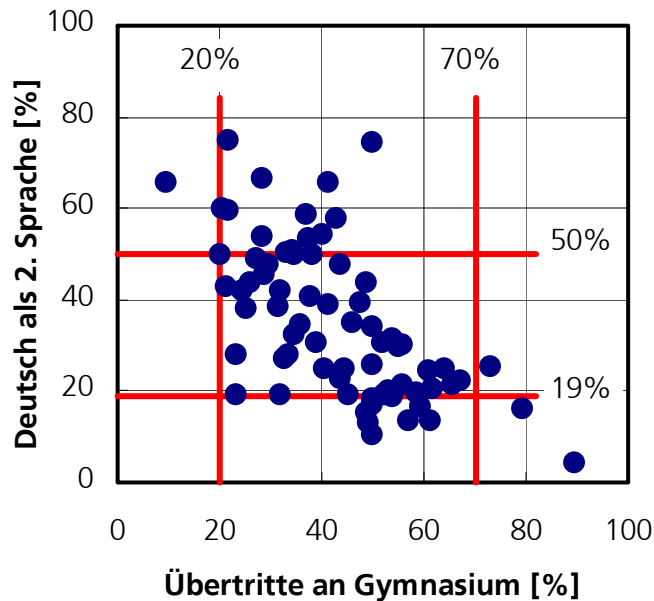
Zunächst wurde der Ansatz verfolgt, die teilnehmenden Schulen aus dem Bereich der Beobachtungsgesundheitsämter in den Städten Stuttgart und Mannheim und den Landkreisen Ortenau und Ravensburg zu rekrutieren. Von diesen 15 Schulen liegen bereits diverse gesundheitsrelevante Informationen vor und die Studie hätte von der etablierten Kooperation von Schulen und Gesundheitsämtern profitiert.

An den Schulen fanden Begehungen der Art statt, wie sie später auch an den Stuttgarter Schulen durchgeführt wurden. Es erfolgten vereinfachte Messungen der Nachhallzeit in den Klassenräumen (s. Abschnitt 4.1.4) und der Schallpegel bei geöffnetem und geschlossenem Fenster. Weiterhin wurde der visuelle und der Höreindruck eines erfahrenen Akustikers notiert, die Abmessungen der Räume und die Lage der Gebäudeteile festgehalten, sowie fotografiert.

Es stellte sich heraus, dass aus diesen Schulen keine zufriedenstellende Stichprobe zusammengestellt werden konnte. Die Varianz der akustischen Eigenschaften sprach für eine Ausdehnung der Vorauswahl auf die 75 Stuttgarter Grundschulen. Allerdings variiert auch unter den Stuttgarter Grundschulen und den letztlich ausgewählten 8 Schulen die Lage zwischen urban und dörflich.

Der erste Auswahlschritt gründete sich auf sozialen Daten. Vom Schulamt Stuttgart lagen von jeder Schule der Anteil der Schüler mit Deutsch als Zweitsprache (DaZ) und der Anteil der an ein Gymnasium übertretenden Schüler vor. Abbildung 9 zeigt die große Bandbreite, den diese Werte einnehmen. Für die Auswahl wurden im Weiteren nur die Schulen mit DaZ zwischen 19 % und 50 % und Anteil der Übertritte an Gymnasien zwischen 20 % und 70 % berücksichtigt. Diese beiden Variablen sollten damit zumindest begrenzt werden. Durch das Ausschließen einzigartiger Konstellationen können auch innerhalb der Stichprobe Vergleichsgruppen mit vergleichbaren Werten dieser konfundierenden Variablen gebildet werden. Der Anteil DaZ in den ersten Klassen stand zu dem Zeitpunkt nicht zur Verfügung. So ist zu erklären, dass in der Stichprobe der Anteil DaZ bei den Erstklässlern dann doch bei 61,8 % lag (s. Abschnitt 9.2)

Abbildung 9:  
Schulübertritte und Muttersprachlichkeit der Stuttgarter Grundschulen.



Der nächste Schritt war die telefonische Kontaktaufnahme mit den Schulleitern der verbleibenden ca. 50 Schulen. Wenn die Schulleiter bereit waren, an der Studie teilzunehmen, wurden Sie zur Akustik der Schulen befragt. Die größte Bedeutung fanden dabei die von Laien objektiv erfassbaren Eigenschaften. Dazu gehört die Verkehrslage und die Beschaffenheit der Wand- und Deckenoberflächen in den Klassenzimmern. Soziale Randbedingungen wurden ebenfalls erörtert.

Auf dieser Basis wurden 14 Schulen für Begehungen ausgewählt. Zusammen mit den 4 bereits zuvor besuchten Beobachtungsschulen lagen damit von 18 Stuttgarter Grundschulen Nachhallzeiten und Schallpegel aus den Räumen der zweiten Klassen vor. Die 8 teilnehmenden Schulen wurden in den meisten Fällen wegen besonders hoher oder niedriger Nachhallzeiten ausgewählt. In einigen Fällen fiel dies mit einer höheren Außenlärmbelastung zusammen.

### 5.3 Ergebnisse der akustischen Voruntersuchungen

Bei den Begehungen zur Schulauswahl wurden häufig Messungen in mehreren Räumen der besuchten Schulen durchgeführt. Auf diese Weise entstand eine Datenbasis von je ca. 60 Messwerten der Nachhallzeit und der A-bewerteten Schallpegel bei geöffnetem und geschlossenem Fenster, die in diesem Abschnitt vorgestellt werden soll. Darin sind auch die besuchten Schulen außerhalb Stuttgarts eingeschlossen.



Tabelle 5:  
Extremwerte der ca. 60 Kurz-Messungen zur Schulauswahl.

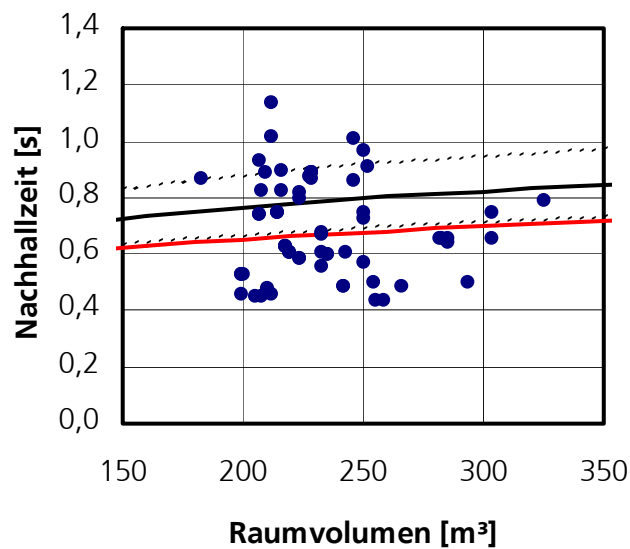
	<b>Nachhallzeit T</b> (Mittelwert 250 Hz bis 2000 Hz)	<b>L<sub>A,eq</sub></b> bei geschlossenem Fenster	<b>L<sub>A,eq</sub></b> bei geöffnetem Fenster
Minimum	0,44 s	20 dB	28 dB
Maximum	1,14 s	39 dB	58 dB

Die Nachhallzeiten variierten im Bereich von 0,44 s bis 1,14 s im unbesetzten Zustand. Der Vergleich mit den Anforderungen nach DIN 18041 [3] (s. auch Abschnitt 4.1.1) für normalhörende mit deutscher Muttersprache in Abbildung 10 zeigt, dass in wenigen Fällen der Toleranzbereich in geringem Maß überschritten wird. Der Schwerpunkt liegt etwa bei der Anforderung und ein nennenswerter Teil der Nachhallzeiten liegt sogar unter dem Toleranzbereich. Nimmt man die strengere Anforderung für Kinder mit Deutsch als Zweitsprache zum Maßstab, so überschreitet in der Hälfte der Fälle die Nachhallzeit diese Anforderung. Die Überschreitung erreicht dabei mit 0,5 s ein Maß, für das in der vorliegenden Studie signifikante und deutliche Leistungsveränderungen nachgewiesen wurden (s. Abschnitt 10.1).

Unter Fachleuten sind die Ansichten über ideale Nachhallzeiten geteilt. Verbreitet werden auch kürzere Nachhallzeiten als nach DIN 18041 empfohlen. Einigkeit besteht auch weitgehend darin, dass zu kurze Nachhallzeiten die Kommunikation wieder beeinträchtigen.

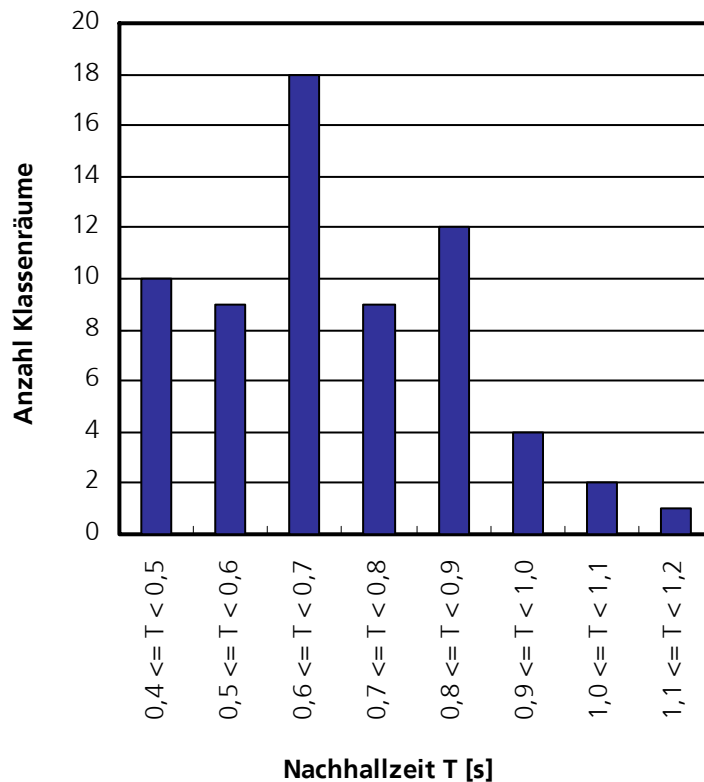
Es stellt sich die Frage, inwiefern die angetroffenen Nachhallzeiten die Spannweite aller Klassenräume wiedergeben. Märtens [45] ist bei 145 Messungen an Grundschulen in Niedersachsen zu ähnlichen Ergebnissen gekommen. Schönwälder et. al [60] stellten in 16 Klassenräumen in 4 Grundschulen Nachhallzeiten in leeren Räumen von 0,42 s bis 1,17 s fest. In Darmstädter Schulen, die wegen bekannt schlechter Raumakustik ausgewählt wurden, haben Rickes et. al. [55] in mehreren Fällen Nachhallzeiten um 2 s in Klassenräumen festgestellt. Ruhe [56] wertet das Archiv eines Beratungsbüros aus und findet maximale Nachhallzeiten von knapp 2 s. Es liegt nahe, dass sich diese Stichprobe zu einem größeren Teil aus Schadensfällen rekrutiert. Zusammenfassend ist festzustellen, dass Nachhallzeiten in unbesetzten Grundschulklassenräumen typisch in einem Bereich von 0,4 s und 1,2 s liegen und in besonders ungünstigen Fällen bis zu 2 s betragen.

Abbildung 10:  
 Nachhallzeiten der unbesetzten Klassenräume ermittelt im Rahmen der Schulauswahl. Der Sollwert für besetzte Räume nach DIN 18041 [3] ist in der Grafik bereits um 0,2 s erhöht. Die Norm empfiehlt für nicht muttersprachliche Kommunikation bis 20 % kürzere Nachhallzeiten ohne Toleranzbereich.



- (a) Messung, Mittelwert 250Hz-2000Hz
- ..... Toleranzgrenze zu (b)
- (b) Sollwert bei Muttersprache und gesundem Gehör
- ..... Toleranzgrenze zu (b)
- (c) Min. Sollwert für Hörgeschädigte und Fremdsprache

Abbildung 11:  
Häufigkeitsverteilung der im Zuge der Schulauswahl gemessenen Nachhallzeiten T.



Die Schallpegel bei geschlossenem Fenster sind in allen Fällen kleiner als 40 dB(A) (Abbildung 12). Sie entsprechen damit den Anforderungen der DIN 18041. Immerhin in der Hälfte der Fälle beträgt der Schallpegel jedoch über 30 dB(A) und entspricht daher nicht den Anforderungen für Hörgeschädigte sowie zur Wahrnehmung schwieriger oder fremdsprachlicher Texte.

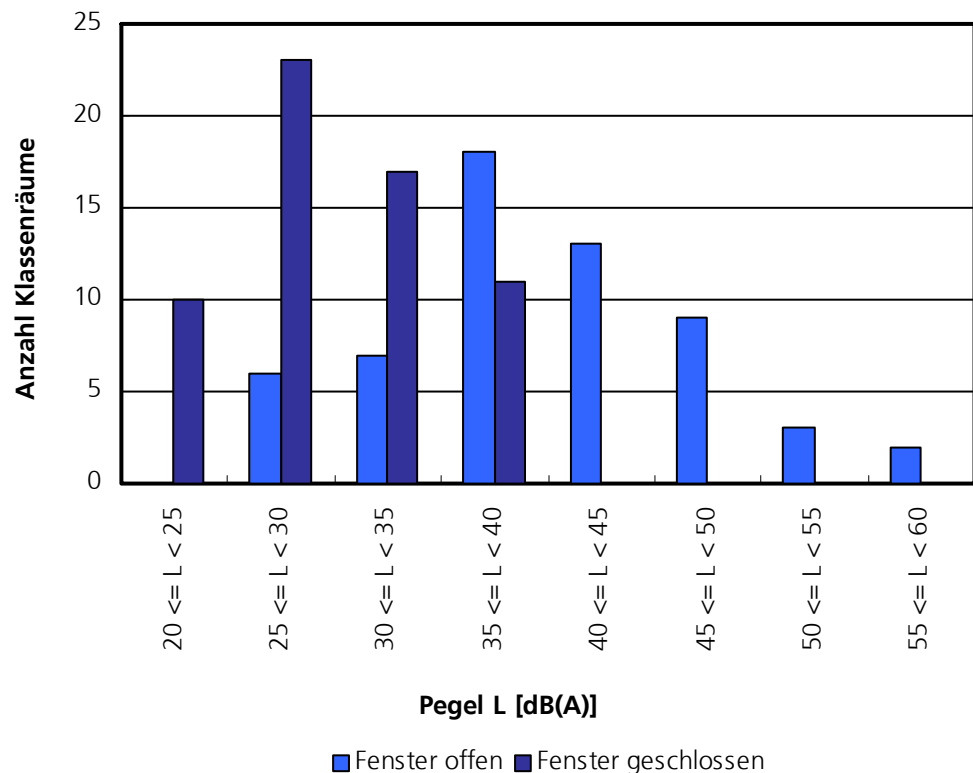
Typische Hintergrundschallpegel in besetzten Klassenräumen liegen über 50 dB(A). Daraus leitet sich ab, dass der physikalische Beitrag der im unbesetzten Zustand gemessenen Hintergrundgeräusche vernachlässigbar gering ist.

Bei zeitgemäßen Unterrichtstechniken wie Gruppenarbeit wird der Hintergrundpegel hauptsächlich durch Kommunikation verursacht. In diesem Fall addieren sich nicht einfach die Schalldrücke unabhängiger Quellen wie Straßenlärm und Stühle-Rücken, sondern die Sprecher heben Ihre Stimme über den Hintergrundpegel an, um besser verstanden zu werden. Die im unbesetzten Zustand gemessenen Schallpegel geben in diesem Fall den Startpunkt der Lärmspirale vor und werden zwangsläufig erhöht.

Die Hälfte der Messungen bei geöffnetem Fenster ergab Schallpegel über 40 dB(A). Die Spitzenwerte lagen über 55 dB(A). Entsprechend der Bandbreite der Außenlärmbelastung gab es aber auch bei geöffnetem Fenster Schallpegel unter 30 dB(A). Die hohen Pegel wirken sich negativ auf die Kommunikation im Unterricht aus. Werden aus diesem Grund die Fenster geschlossen gehalten,

verringert sich an heißen Tagen die Behaglichkeit im Vergleich zu Schulen, an denen durch Öffnen der Fenster Temperatur und Luftqualität geregelt werden können. Konzentrationsfähigkeit der Schüler und Effektivität des Unterrichts sind während einiger Wochen des Schuljahres herabgesetzt. Das kann ungleiche Ausgangsbedingungen für die Schulen bei der Bewältigung der Lehrpläne bedeuten. In Bezug auf die Entwicklung der Sprachverarbeitung sind jedoch eher keine chronischen Wirkungen zu erwarten, da während des größten Teils des Schuljahres bei geschlossenen Fenstern unterrichtet wird (s. Abschnitt 10.3).

Abbildung 12:  
Häufigkeitsverteilung der Schallpegel gemessen im Zuge der Schul-Auswahl.



## 6 Akustik der teilnehmenden Schulen

### 6.1 Abmessungen der Klassenräume

Die geometrischen Abmessungen der Räume stehen in engem Zusammenhang mit der Akustik.

Nach der Sabinsche Formel (1) ist bei gegebener äquivalente Absorptionsfläche  $A$  (Maß für die Schallabsorption im Raum) die Nachhallzeit  $T$  proportional zum Volumen  $V$  eines Raumes. Weiter ist der Schallpegel  $L$ , der sich in einem Raum bei gegebener Absorption einstellt, näherungsweise nach Gleichung (9)

(Gleichung (6) aus [4]) von der Schallleistung der Schallquellen  $L_W$  und vom Volumen  $V$  abhängig.

$$(9) L = L_W + 10 \log\left(\frac{4}{A} \text{ m}^2\right) \approx L_W + 14 + 10 \log\left(\frac{T}{V} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$$

Größeres Volumen bedeutet somit längere Nachhallzeiten und höhere Schallleistung (höherer Stimmufwand), um z.B. den Sprecherschallpegel auf gleichem Niveau zu halten.

Der Zusammenhang von Hintergrundpegel und Volumen ist dagegen komplexer. Bei der Raumplanung bewegt sich das Verhältnis von Volumen zur Anzahl der Plätze in beschränktem Rahmen, weshalb größeres Volumen durch mehr Hintergrundschallquellen (Nutzer, Schüler) kompensiert wird. DIN 18041 [1] empfiehlt eine Volumenkenzahl  $k$  von 3-6  $\text{m}^3/\text{Platz}$  für Sprachdarbietungen. Größeres Volumen bedingt auch größer Wand- oder Deckenflächen. Die Schalldämmung, genauer die Schallpegeldifferenz  $D$  eines Bauteiles nimmt mit zunehmender Fläche bei gleicher Konstruktion (gleichem Schalldämm-Maß  $R$ , vgl. Abschnitt 4.2.1) ab. Größeres Volumen kann daher auch durch höhere Schallleistung aus angrenzenden lauten Räumen kompensiert sein. Zusammenfassend ist zunehmendes Raumvolumen ungünstig für das Verstehen eines einzelnen Sprechers.

Neben dem Volumen haben vor allem Höhe und Tiefe eines Raumes Einfluss auf die Raumakustik, insbesondere auf den Anteil der frühen Reflexionen. Diese Abmessungen bestimmen die Laufzeit des Schalls zwischen Sprecher und Zuhörer. Die Reflexionen einer Decke in der richtigen Höhe unterstützen das Sprachverstehen an den hinteren Plätzen. In einem sehr tiefen Raum ist nicht nur der Abstand zwischen Sprecher und den hinteren Plätzen groß, auch die Laufzeiten der Reflexionen von der Rückwand werden so lang, dass sie ungünstig wirken. An diesem Punkt greift raumakustische Planung durch die Gestaltung der Schallabsorption dieser Flächen ein. Nach DIN 18041 [3] sollte der Wegunterschied zwischen Direktschall (Sichtverbindung zur Schallquelle) und den ersten Schallreflexionen an Wand oder Decke nicht mehr als 17 m betragen. Das ist auch in keinem der Klassenräume der Fall.

Die Abmessungen der Heimatklassenräume aus der Studie variieren in einem engen Rahmen. Im Mittel haben die Räume ein Volumen von 231  $\text{m}^3$ , eine Höhe von 3,5 m und die Raumtiefe ist mit ca. 9 m in den meisten Fällen um 2 m länger als die Raumbreite von 7 m.

Tabelle 6:  
Mittlere Abmessungen der Klassenräume.

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
Tiere [m]	9,0 m	8%	8,1 m	11,6 m
Breite [m]	7,2 m	7%	6,5 m	8,3 m
Höhe [m]	3,5 m	10%	3,0 m	4,1 m
Volumen [ $\text{m}^3$ ]	231 $\text{m}^3$	13%	195 $\text{m}^3$	321 $\text{m}^3$

Die Räume aus Schule 2 und der zweiten Klassen von Schule 8 haben etwa quadratischen Grundriss mit ca. 8 m Seitenlänge. Sie sind derselben Bauzeit um 1970 zuzuordnen.

Die tiefsten Räume sind die von Schule 4. Der Raum Nr. 8 der 2a übertrifft mit 11,6 m noch einmal deutlich den Nachbarraum Nr. 10 der 2c mit 10 m Tiefe. Zusammen mit der etwas überdurchschnittlich hohen Decke von 3,90 m ergibt sich das in der Stichprobe einzigartige Volumen von 320 m<sup>3</sup>. Die übrigen Räume inklusive dem Nachbarraum der 2c haben Volumina bis maximal 270 m<sup>3</sup>. Das große Volumen von Raum Nr. 8 bewirkt zusammen mit einer bei höheren Frequenzen schallhart reflektierende Rückwand (einziger Raum mit Fenstern auch in der Rückwand) und den allenfalls bei tiefen Frequenzen schallabsorbierenden Decken (geschlossene Unterdecken) die mit zu den längsten der Untersuchung zählende Nachhallzeit von 1,06 s. Der Klassenraum der 2a an Schule 4 weist also einige geometrische Besonderheiten auf. Sie finden sich in der Raumakustik wieder und werden durch Außenlärm und Lärm vom Treppenhaus fortgesetzt (s. Abschnitte 6.2.1 und 6.3.2).

In anderer Weise sind die Räume der Schule 7 innerhalb der Stichprobe einzigartig: Während Raumbreite und -tiefe durchschnittlich sind, beträgt die Raumhöhe im linken Drittel 4,50 m und fällt in den beiden rechten Dritteln zu den Fenstern hin auf 2,95 m ab (s. Abbildung 13). In Tabelle 6 ist der volumeneffektive Mittelwert von 4,1 m Höhe berücksichtigt. Alle übrigen Räume haben die Form eines Quaders.

Abbildung 13:

In den Klassenräumen der Schule 7 ist die Decke teilweise schräg, im höchsten Teil 4,5 m hoch und nur im tieferen Teil mit absorbierenden Flächen ausgestattet.



## 6.2 Raumakustik

### 6.2.1 Nachhallzeit

Die aus den Frequenzbändern 250 Hz bis 2000 Hz gemittelten Nachhallzeiten der unbesetzten Klassenräume nehmen Werte zwischen 0,5 s und 1,1 s an. In den Räumen der ersten Klassen von Schule 1 betrug dieser Wert rund 0,7 s und in denen von Schule 8 rund 1,1 s. Die Werte der Räume der zweiten Klassen können Abbildung 14 entnommen werden. Tabelle 20 listet die Werte aller Klassenräume auf.

Um die Frequenzabhängigkeit besser darstellen zu können, sind die Nachhallspektren der 2. Klassen auf drei Diagramme verteilt. Zur besseren Vergleichbarkeit umfasst die vertikale Achse jeweils 0,7 s. Die Nachhallzeiten der unbehandelten Untersuchungsräume sind hier ebenfalls dargestellt. Abbildung 15 zeigt die Gruppe mit den kürzesten Nachhallzeiten. Hier ist die Nachhallzeit in den Oktavbändern im wesentlichen gleich. Die Unterschiede liegen im Bereich von 0,1 s.

In Abbildung 16 sind Spektren mit unterschiedlicher Charakteristik versammelt. An Schule 5 fallen die Nachhallzeiten im niedrigsten und höchsten Oktavband ab. In Schule 1 ist der Verlauf zu hohen Frequenzen schwach fallend mit deutlich erhöhten Werten bei 125 Hz. An Schule 3 ist ein leichter Anstieg zu höheren Frequenzen zu erkennen.

An Schule 4 fallen die sehr unterschiedlichen Spektren auf. Während der Raum der Klasse 2c ein annähernd flaches Spektrum hat, fallen die Nachhallzeiten im Raum der 2a vom Maximum bei 1 kHz zu hohen und niedrigen Frequenzen hin ab. Das steht im Einklang mit den in Abschnitt 6.1 beschriebenen Aufbau des Raumes. Der Nachhallzeit-Mittelwert von 250 Hz bis 2 kHz ist 0,71 s bei Klasse 2c und 1,06 s bei Klasse 2a.

Die größte Dynamik zeigt das Nachhallspektrum des unbehandelten Untersuchungsraumes an Schule 6 auf (s. Abbildung 17). Es handelt sich dabei nicht um einen Klassenraum sondern um einen Musiksaal. Der Saal ist etwa um ein Drittel länger als ein Klassenraum, wobei der zusätzliche Platz durch eine Bühne belegt ist. Bei der Messung war der Vorhang der Bühne, der den Raum in seiner ganzen Breite teilt, geschlossen. Die Nachhallzeiten bei den tiefen Frequenzen 125 Hz und 250 Hz stehen mit 1,2 s in einem unausgeglichenes Verhältnis zur erheblich kürzeren Nachhallzeit bei 500 Hz (0,9 s) und den gemäßigten Nachhallzeiten bei den hohen Frequenzen (<0,8 s ab 1 kHz). erwachsene, männliche Sprecher können mit Ihrer Stimme Räume mit solchen Nachhallzeitverhältnissen leicht zum Dröhnen anregen, was als störend oder belästigend empfunden wird.

Einen ähnlichen Frequenzgang zeigen abgemildert die Räume der Schule 7 (Abbildung 17), deren besonderen Aufbau Abschnitt 6.1 behandelt. Das Spektrum der Klassenräume in Schule 6 gleicht dem vom Raum der 2a in Schule 4: Maximum bei 1 kHz mit fallenden Werten zu tiefen und hohen Frequenzen. Die Frequenzgänge in den Räumen der ersten Klassen an Schule 8 sind auf hohem Niveau (>1 s) ausgeglichen. Die Räume der zweiten Klassen derselben Schule

liegen in einem anderen Bau und haben mustergültige Nachhallzeiten bei ebenfalls ausgeglichenem Frequenzgang (Abbildung 15).

Die Frequenzabhängigkeit in den ersten Klassen ist gering. Lediglich im 125 Hz Oktavband der Schule 1 ist die Nachhallzeit um 0,2 s länger als in den übrigen Oktaven (Abbildung 18).

Abbildung 14:  
Mittelwert der Nachhallzeit von 250 Hz bis 2000 Hz in den unbehandelten, unbesetzten Räumen der zweiten Klassen. Die unterschiedlichen Farben entsprechen der Einteilung der Stichprobe in drei Gruppen zur Auswertung chronischer Einflüsse (s. Abschnitt 10.2.2).

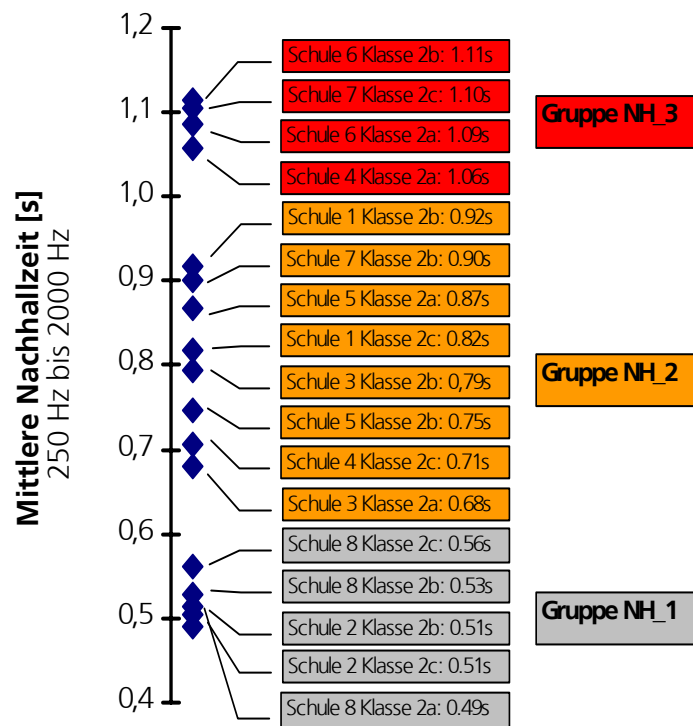




Abbildung 15:  
 Frequenzabhängige Nachhallzeiten in den unbehandelten, unbesetzten  
 Räumen, Bereich 0,0 s-0,7 s.

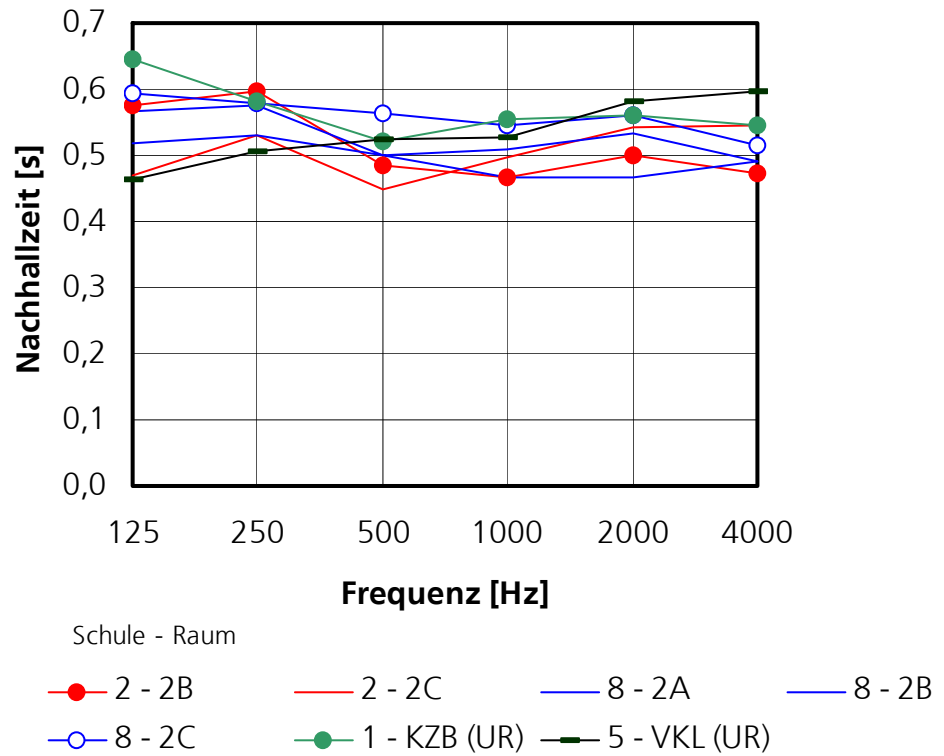


Abbildung 16:  
 Frequenzabhängige Nachhallzeiten in den unbehandelten, unbesetzten  
 Räumen, Bereich 0,6 s-1,3 s.

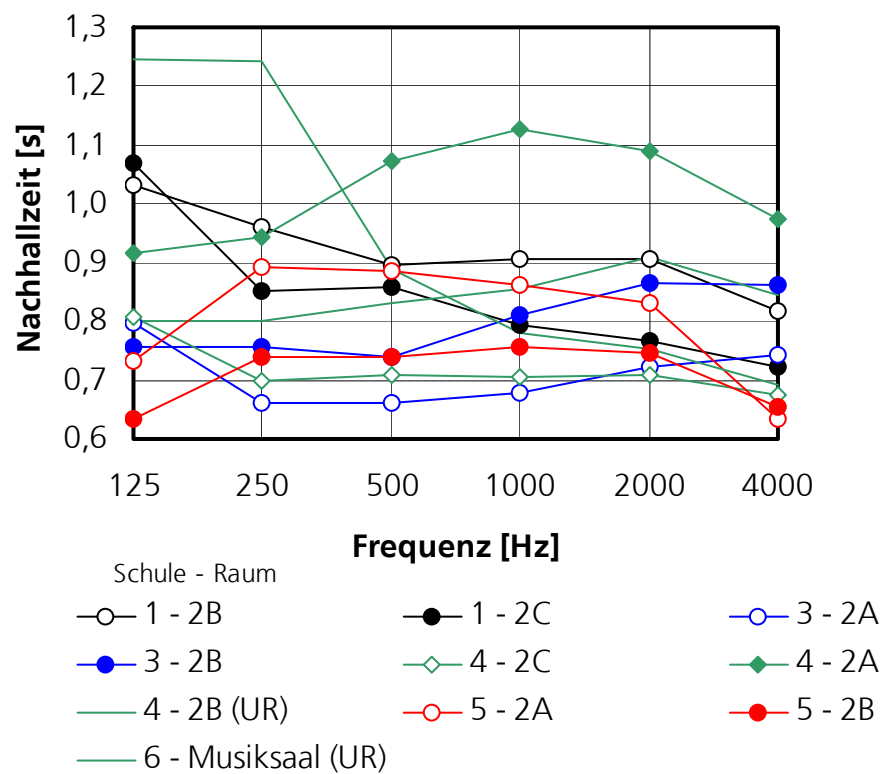


Abbildung 17:  
 Frequenzabhängige Nachhallzeiten in den unbehandelten, unbesetzten  
 Räumen, Bereich 0,8 s-1,5 s.

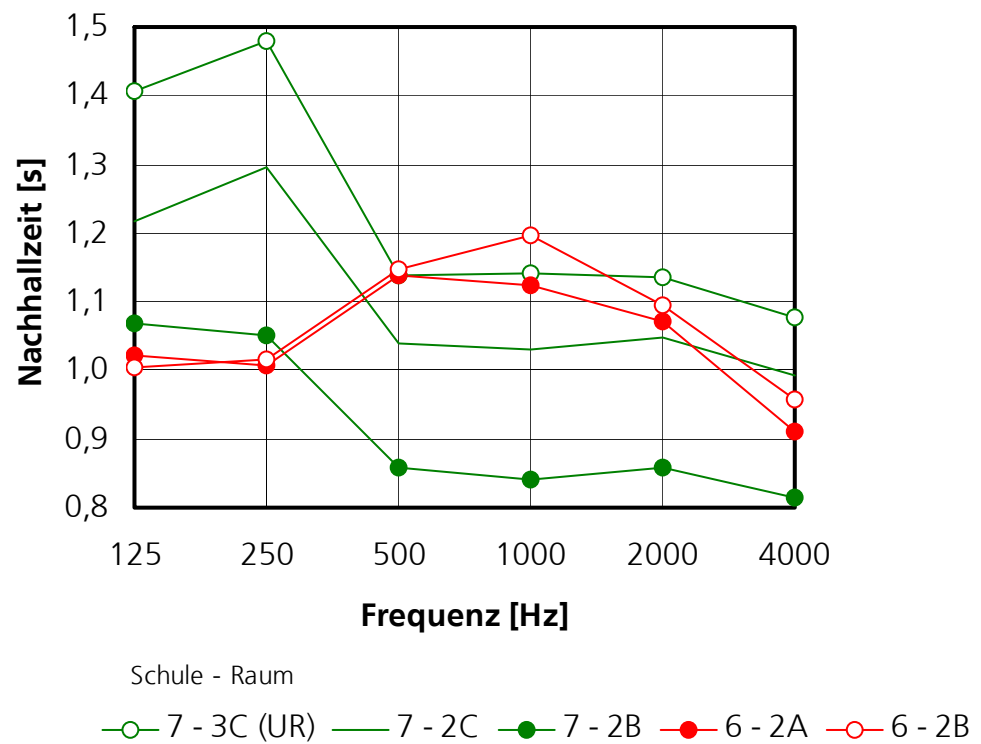
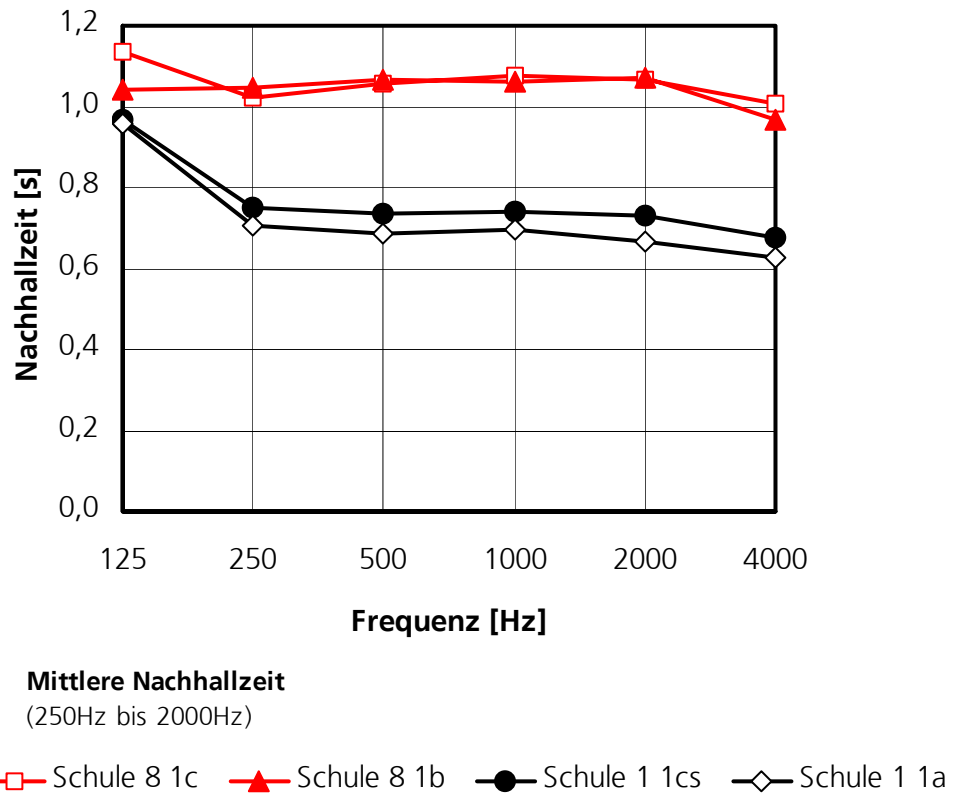


Abbildung 18:  
Gemittelte und frequenzabhängige Nachhallzeit in den unbehandelten, unbesetzten Klassenräumen der ersten Klassen.



## 6.2.2 Korrelation der raumakustischen Parameter

Im Abschnitt 4.1 wurden die verschiedenen raumakustischen Parameter eingeführt. In diesem Abschnitt wird gezeigt, dass sie in der vorliegenden Stichprobe sehr stark miteinander korreliert sind. In der statistischen Auswertung der Tests mit den Schülern können die verbleibenden Abweichungen zwischen den akustischen Parametern nicht mehr nachgewiesen werden. Für die statistischen Auswertungen wurden die Schüler in zwei oder drei Gruppen eingeteilt, die sich durch die Nachhallzeit oder Nachhallzeitdifferenzen unterscheiden. In Tabelle 20 ist die Einteilung der Klassen in die Nachhallzeitgruppen NH\_1 bis NH\_3 zusammen mit den Messwerten der raumakustischen Parameter Nachhallzeit, Deutlichkeitsgrad und STI unter Unterrichtsbedingungen angegeben. Für keinen der raumakustischen Parameter überlappen sich die Wertebereiche der Gruppen. Gleich nach welchem Parameter also die Einteilung der Gruppen erfolgt ergeben sich dieselben Gruppen. Lediglich innerhalb der Gruppen variiert die Reihenfolge, was hier aber keine Rolle spielt. In die nachgeschaltete statistische Auswertung geht als Variable nur die Zugehörigkeit zu einer der Gruppen ein. Folglich steht die Nachhallzeit in Abschnitt 10 als bekanntester raum-

akustischer Parameter stellvertretend auch für Sprachübertragungsindex, Deutlichkeitsgrad und verwandte Parameter.

In [64] konnte ein linearer Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von 0,91 zwischen Sprachübertragungsindex und Nachhallzeit bei Messungen aus 29 Klassenräumen in 4 Grundschulen und einer Schule der Sekundarstufe I festgestellt werden. In [50] wurden Sprachübertragungsindex und Early Decay Time gegenüber gestellt und zeigten bei linearer Regression ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,99$ . Weiter berichtet er von hoher Korrelation des STI zur Early Decay Time (EDT) und Nachhallzeit  $T_{15}$ . Seine Daten stammen aus Raumsimulationen per Software.

Vollzieht man dies für die Messergebnisse dieser Studie nach, so erhält man ebenfalls hohe quadratische Korrelationskoeffizienten  $R^2$  von 0,96 für die Nachhallzeit (Abbildung 19) und 0,97 für die Early Decay Time (EDT) (Abbildung 20). Auch die gefundenen linearen Zusammenhänge, verdeutlicht durch die Regressionsgeraden, stimmen gut überein.

Führt man nun systematisch von allen in dieser Studie ermittelten raumakustischen Parametern und für jedes Frequenzband eine lineare Regression zur Nachhallzeit  $T_{20}$  des selben Frequenzbandes durch, stellt man fest, dass in allen Fällen das Quadrat des Korrelationskoeffizienten  $R$  größer oder gleich 0,8 und im Frequenzbereich 500 Hz bis 4 kHz größer als 0,9 ist. Die Ergebnisse für  $R^2$  sind in Abbildung 21 grafisch dargestellt. Zur Kontrolle wurde auch die Korrelation von  $T_{20}$  und  $T_{30}$  errechnet. Das Bestimmtheitsmaß von größer 0,98 und gerundet 1,00 bei 500 Hz und höheren Frequenzen bestätigt Rechnung und Auswertung der Messung.  $T_C$  ist die Schwerpunktzeit. MTI sind die Modulationstransferindices. Das sind frequenzabhängige Zwischenergebnisse bei der Ermittlung des STI, wobei in diesem Zusammenhang der ohne Störgeräusch ermittelte STI gemeint ist.

Abbildung 19:  
Korrelation von STI (ohne Störgeräusche) und mittlerer Nachhallzeit.  
Literaturquelle: Schönwälder et. al. 2004 [60].

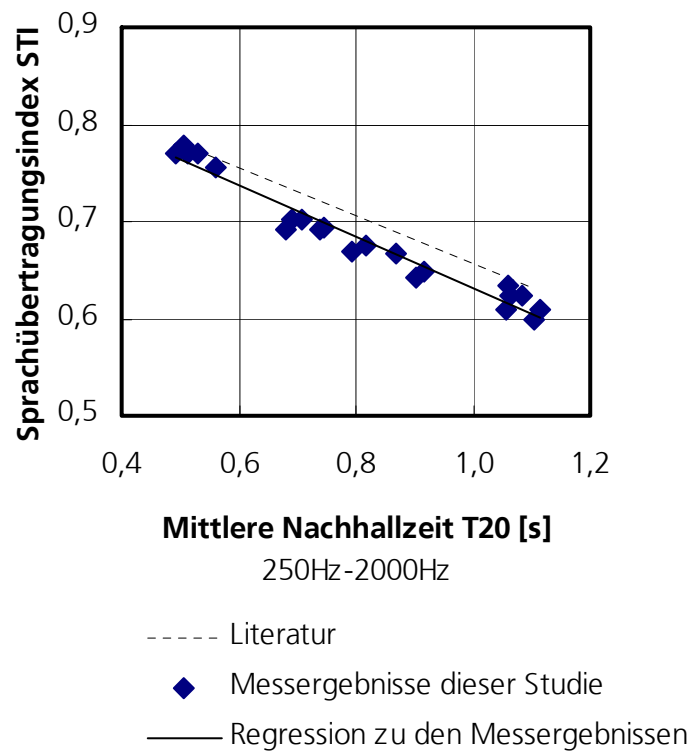


Abbildung 20:  
 Korrelation von STI (ohne Störgeräusche) und mittlerer EDT.  
 Literaturquelle: Mommertz et. al. 2002 [50].

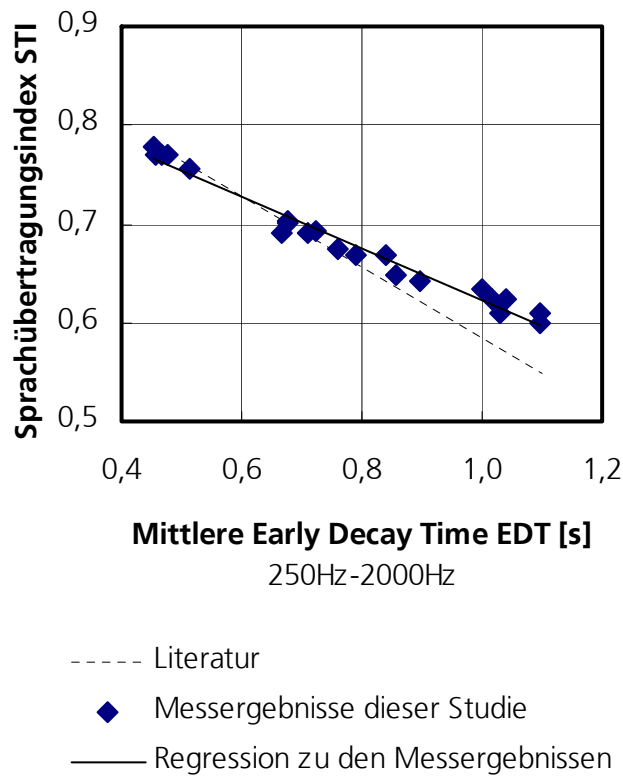
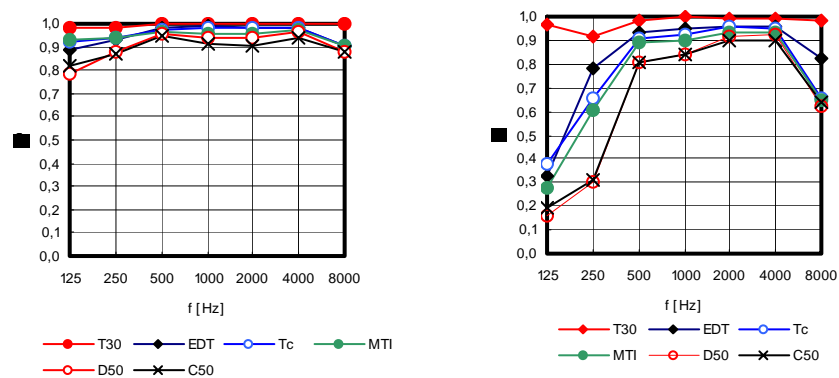


Abbildung 21:  
 Quadrat des Korrelationskoeffizienten R verschiedener raumakustischer Parameter mit der Nachhallzeit  $T_{20}$ . Links Mittelwert der Übertragungswege je Raum, rechts exemplarisch für den einzelnen Übertragungsweg 1b je Raum.



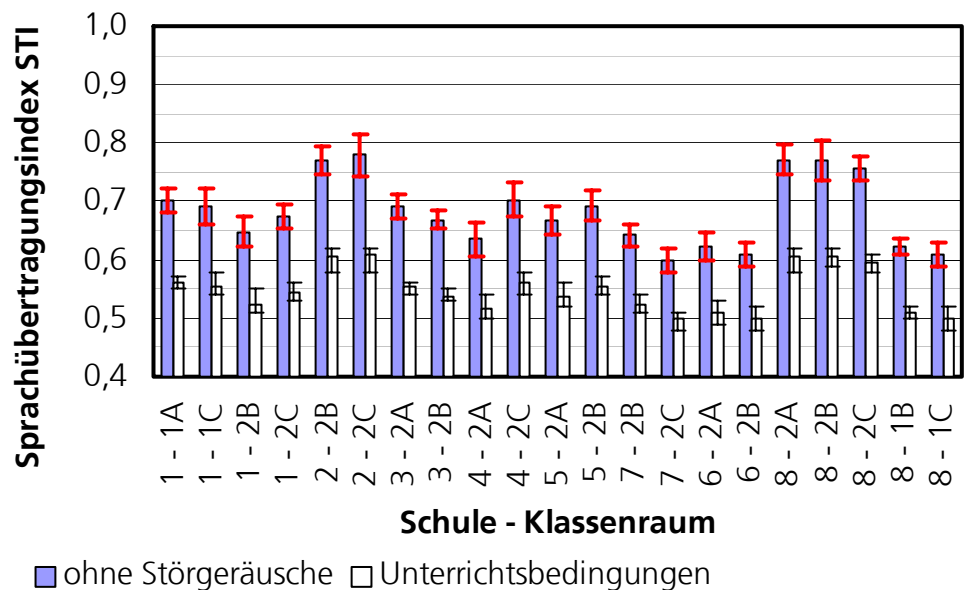
Von der Nachhallzeit wird zumindest in üblichen Klassenräumen eine geringe Ortsabhängigkeit im Raum erwartet. Für Deutlichkeitsgrad und Sprachübertragungsindex wäre dagegen eine gewisse Abhängigkeit vom Übertragungsweg zu erwarten. Wie können diese Größen trotzdem eng miteinander korreliert sein? Eine mögliche Erklärung ist, dass die Auswertung an den Mittelwerten über die gemessenen Übertragungswege durchgeführt wurde. Führt man die

selbe Auswertung an den Messergebnissen eines einzelnen Übertragungsweges durch, ist das Bestimmtheitsmaß kleiner. In Abbildung 21 rechts sind exemplarisch die Ergebnisse der Auswertung kleiner für den Übertragungsweg 1b dargestellt. Weitere Betrachtungen zur Abhängigkeit vom Übertragungsweg sind im Abschnitt 6.2.5 zu finden.

### 6.2.3 Sprachübertragungsindex STI

Der Sprachübertragungsindex STI nimmt ohne Störgeräuschkorrektur (s. Abschnitt 4.1.5) in den Klassenräumen Werte zwischen 0,62 und 0,78 an. In der Klassifizierung nach DIN EN ISO 9921 fallen damit die meisten Räume in die Kategorie „gut“ und Räume der zweiten Klassen an Schule 2 und 8 knapp in die Kategorie „ausgezeichnet“. Mit der in Abschnitt 4.1.5 näher beschriebenen Störgeräuschkorrektur, die reale Sprecher und Hintergrundpegel während des Unterrichts annimmt, fallen die Ergebnisse um eine Kategorie schlechter aus. Mit Hintergrundgeräuschen liegt der räumlich gemittelte STI zwischen 0,50 und 0,61 und damit mehrheitlich in der Kategorie „angemessen“. Nur die Räume der Zweiten Klassen an Schule 2 und 8 erreichen nun die Kategorie „gut“.

Abbildung 22:  
Räumlich gemittelter Sprachübertragungsindex in den Klassenräumen sowie Minimum und Maximum im Klassenraum.



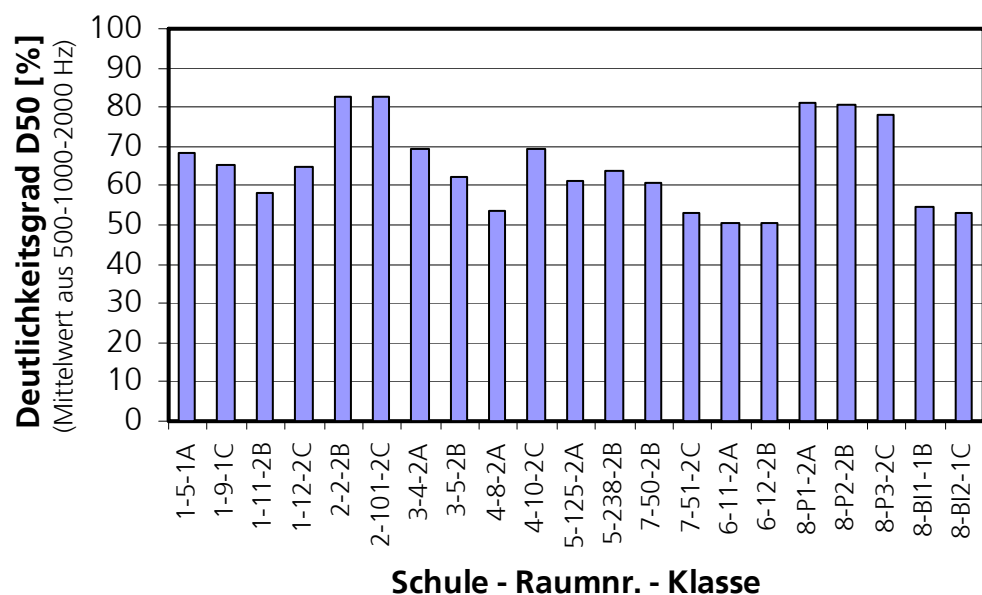
Die Daten sind für alle Räume der beteiligten Klassen in Abbildung 22 dargestellt. Die Fehlerbalken geben einen Anhaltspunkt für kleinsten und größten auf den 10 Übertragungswegen (s. Abbildung 5) gemessenen Wert. Im Fall „Unterrichtsbedingungen“ sind die Balkenenden gleich dem größten bzw. kleinsten Wert. Im Fall ohne Störgeräusche ist die Länge der Fehlerbalken gleich der halben Differenz von Maximum und Minimum. Die Unterschiede innerhalb eines Raumes sind kleiner als die Unterschiede zwischen den Räumen.



## 6.2.4 Frühe Reflexionen

Der über die Übertragungswege und die Oktaven 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz gemittelte Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  (s. Abschnitt 4.1.3) variiert zwischen den Klassenräumen von 50 % bis 83 %. Im einzelnen sind die Ergebnisse in Abbildung 23 dargestellt. Auf die Darstellung der Frequenzgänge wird hier wegen der starken Korrelation mit den Nachhallzeiten verzichtet.

Abbildung 23:  
Räumlich gemittelter Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  in den Klassenräumen.



## 6.2.5 Unterschiede zwischen vorderen und hinteren Sitzplätzen

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die raumakustischen Eigenschaften der Klassenräume verglichen. Die angegebenen Werte waren dabei die Mittelwerte der Messwerte auf den in allen Räumen gleichen 10 Übertragungsweegen (s. Abschnitt 4.1.5). In diesem Abschnitt wird der Frage nachgegangen, ob es innerhalb der Klassenräume Unterschiede zwischen den Sitzpositionen vorn und hinten in der Klasse gibt.

Die Aufstellung der Tische und Bänke in den Klassenräumen ist höchst unterschiedlich und unterliegt ständiger Veränderung. Beispiele zeigt Abbildung 24. Folglich treffen die für die Messungen gewählten Positionen a bis e (Abbildung 5) eher zufällig exakt mit realen Sitzpositionen zusammen. Allerdings gibt es immer Sitzplätze in der Nähe der Messpositionen.

Abbildung 24:  
Beispiele für in den Klassenräumen angetroffene Sitzordnungen.



Für diesen Abschnitt wurden nur die Übertragungswege mit Sprecher vor der Tafel ausgewertet (Lautsprecherpositionen 1 und 2). Die Sprecherposition 3 seitlich in der Klasse und die Sitzposition e in der Mitte des Raumes geht nicht ein. Für die vorderen Sitzplätze (c, d) und die hinteren Sitzplätze (a,b) wurde jeweils der Mittelwert über die drei Übertragungswege 1c, 1d und 2c bzw. 1a, 1b und 2a gebildet. Von den mit \* gekennzeichneten Räumen liegen von den Wegen 1b und 1d keine Daten vor. Eine Betrachtung aller gemessenen Übertragungswege folgt in Abschnitt 6.2.6.

Die Ergebnisse für den Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  sind in Abbildung 25 dargestellt. Alle vier Diagramme beziehen sich auf die Abszisse des untersten Diagramms. Auf diese Weise können bei den unterschiedlichen Frequenzen die Differenzen zwischen vorderen und hinteren Plätzen besser verglichen werden. Die Räume wurden zunächst sortiert nach der Differenz zwischen vorderen und hinteren Plätzen bei 125 Hz. Anschließend wurden einzelne Räume noch etwas verschoben, so dass gleichartige Räume (Räume aus dem selben Gebäude) nun nebeneinander liegen. Links in den Diagrammen liegen nun die Räume, in denen die hinteren Plätze bei 125 Hz höheren Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  als die vorderen Plätze haben und rechts die Räume, in denen die Verhältnisse genau umgekehrt sind. Die hinteren Plätze sind durch volle Symbole und die vorderen durch weiß gefüllte Symbole repräsentiert. Das unterste Diagramm in Abbildung 25 zeigt den für Sprache wichtigen Mittelwert aus dem Frequenzbereich 500-2000 Hz der auch häufig als Einzulangabe des Deutlichkeitsgrades verwendet wird. Es ist ein geringfügig aber systematisch höherer Deutlichkeitsgrad an den vorderen Plätzen in den meisten Räumen festzustellen. Die größte Differenz von ca. 10 % tritt an Schule 4 auf, an den anderen Schulen ist die Differenz nahe der Auflösungsgrenze der verwendeten Messmethode (1 %). Im Diagramm

darüber sind die Mittelwerte aus den niedrigen Frequenzen 125 Hz und 250 Hz dargestellt. Hier variiert die Differenz zwischen vordern und hinteren Plätzen zwischen -15 % und +17 %. Mehr als die Hälfte der Räume weist Differenzen mit Betrag größer als 5 % auf. Die größten Differenzen von -25 % bis +24 % treten bei 125 Hz auf (oberstes Diagramm). Bei 250 Hz sind die Differenzen etwas kleiner und in den meisten Fällen vom selben Vorzeichen wie bei 125 Hz. In den Diagrammen heben sich deutlich die unterschiedlichen Gebäude voneinander ab. Gleichartige Räume aus demselben Gebäude haben vergleichbare Differenzen und absolute Werte.

Tabelle 7

Differenz des Deutlichkeitsgrades  $D_{50}$  zwischen vorderen und hinteren Sitzplätzen in den unbehandelten, unbesetzten Klassenräumen.

$D_{50}$ vorne-hinten	125 Hz	250 Hz	Mittelwert 125 – 250 Hz	Mittelwert 500 – 2000 Hz
Minimum	-25 %	-10 %	-15 %	-1 %
Maximum	+24 %	+18 %	+17 %	+11 %
Mittelwert	-1 %	+4 %	+2 %	+3 %
Standardabw.	13 %	7 %	9 %	3 %

Dieselbe Auswertung für den Sprachübertragungsindex STI (Abbildung 26) zeigte nur minimale Differenzen zwischen vorderen und hinteren Sitzplätzen mit maximalen Beträgen der Differenz von 0,02 und einem Mittelwert von -0,01, die in Anbetracht einer Auflösungsgrenze des Messverfahrens von 0,01 zu vernachlässigen sind. Märtens [45] hat im Mittel über 249 Klassenräume an Schulen aller Schularten (sowohl mit als auch ohne Störgeräusch) eine ähnlich geringe Differenz festgestellt.

Sowohl bezüglich des Mittelwertes der sprachwichtigen Frequenzen 500 Hz bis 2000 Hz des Deutlichkeitsgrades  $D_{50}$  als auch bezüglich des Sprachübertragungsindex STI sind keine nennenswerten Unterschiede zwischen den vorderen und hinteren Sitzplätzen festzustellen. In den Frequenzbändern um 125 Hz und 250 Hz sind jedoch deutliche Unterschiede zwischen den vorderen und hinteren Sitzplätzen bezüglich des Deutlichkeitsgrades vorhanden. Der Gruppe der Klassenräume, in denen die hinteren Plätze benachteiligt sind, steht eine etwa ebenso große Gruppe von Klassenräumen mit umgekehrtem Verhältnis gegenüber, in denen die vorderen Plätze niedrigere Deutlichkeitsgrade aufweisen, als die hinteren Plätze.

Dieses Ergebnis aus den Klassenräumen dieser Studie sollte jedoch nicht auf Klassenräume allgemein unbesehen übertragen werden. Eine Ortsabhängigkeit der Sprachverständlichkeit, auch in den sprachwichtigen Frequenzen im Klassenraum, ist begründbar und wurde in anderen Untersuchungen auch festgestellt.

Abbildung 25  
 Deutlichkeitsgrade  $D_{50}$  an vorderen und hinteren Sitzplätzen bei verschiedenen Frequenzen.

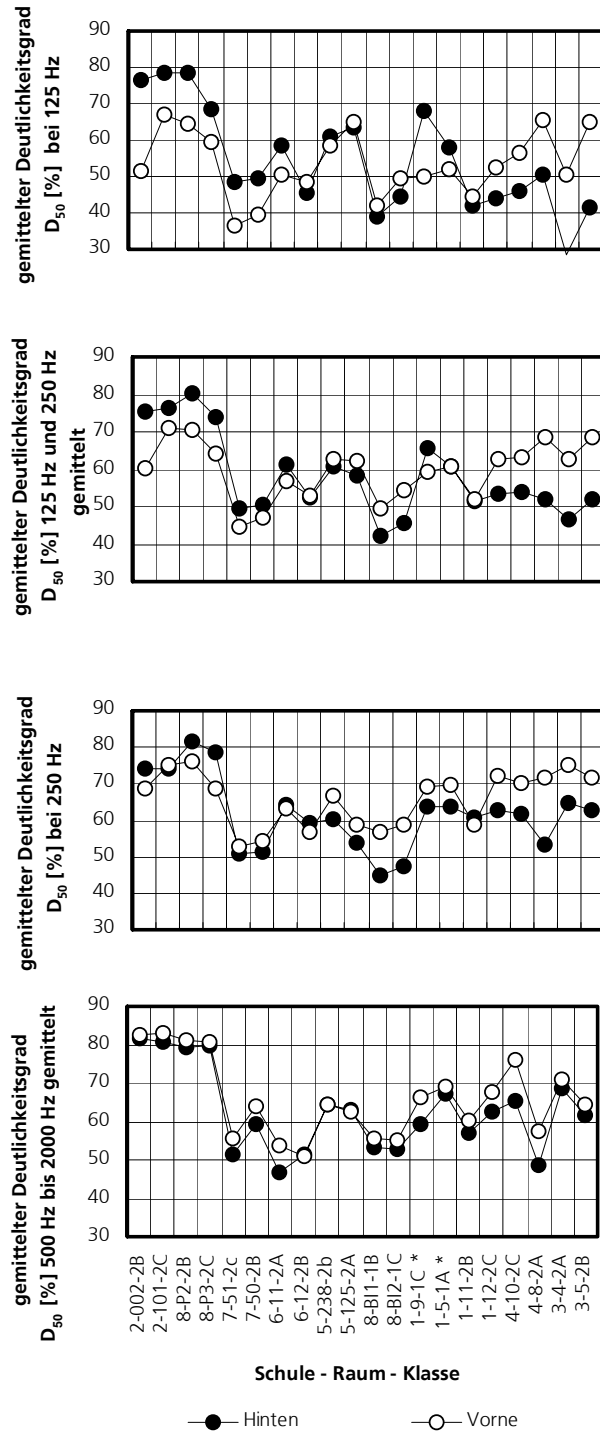
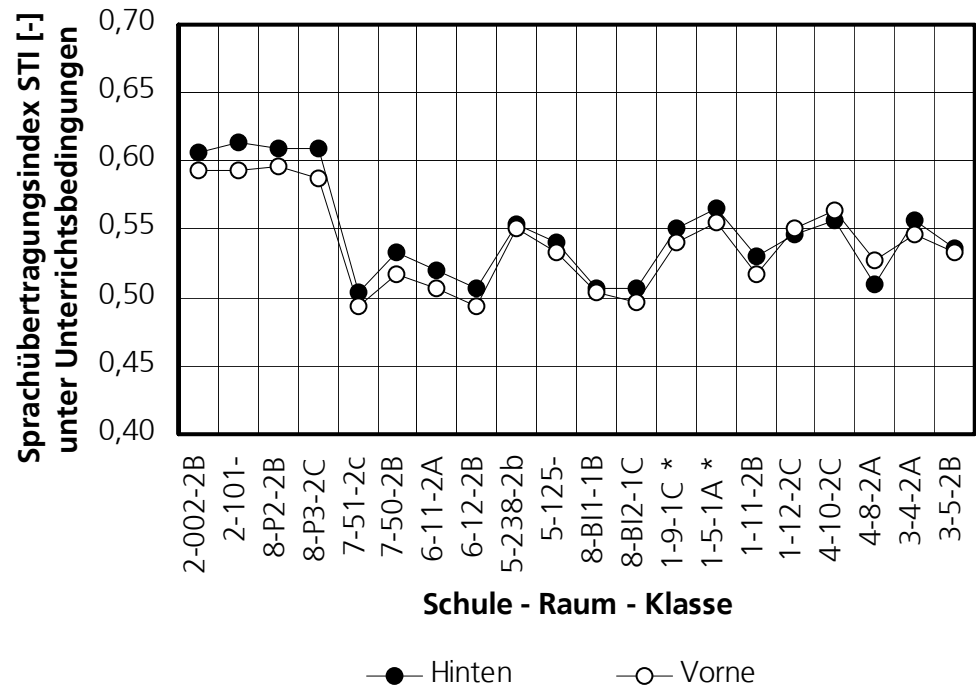


Abbildung 26:  
Mittlerer Sprachübertragungsindex STI unter Unterrichtsbedingungen an vorderen und hinteren Plätzen. Die Differenzen liegen an der Auflösungsgrenze von 0,01.



### 6.2.6 Unterschiede zwischen den Übertragungswegen allgemein

Während der Abschnitt 6.2.5 detailliert die Unterschiede zwischen vorderen und hinteren Plätzen eingeschränkt auf Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  und Sprachübertragungsindex STI bei bestimmten Frequenzen und Sprecherposition vor der Tafel beleuchtet, werden in diesem Abschnitt alle ermittelten raumakustischen Parameter frequenzabhängig auf allen in Abschnitt 4.1.5 vorgestellten Übertragungswegen betrachtet. Da dies wegen der Vielzahl der Daten nicht mehr im direkten Vergleich der Messwerte erfolgen kann, werden geeignete zusammenfassende Betrachtungsgrößen definiert und bestimmt.

Als erster Schritt wird die Standardabweichung der Messwerte aller Übertragungswege eines Raumes betrachtet. Sie wird hier absolute Wegabhängigkeit  $G$  genannt und ist die Basis für weitere abgeleitete Größen.

$$(10) \text{ Absolute Wegabhängigkeit } G_r \equiv \sigma_{w=1 \dots N_w} (P_{w,r})$$

In der Definitionsgleichung (10) und nachfolgenden Gleichungen bezeichnet  $N_r$  die Anzahl der Klassenräume und  $N_w=10$  die Anzahl der Übertragungswege 1a, 1b, ..., 3c. Die Indices  $r=1 \dots N_r$  und  $w=1 \dots N_w$  bezeichnen die einzelnen Räume und Übertragungswege.  $P_{w,r}$  steht für einen raumakustischen Parameter gemessen auf dem Übertragungsweg  $w$  im Raum  $r$ , z.B. Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  bei 125 Hz auf dem Weg 2c im Klassenraum der 2a an Schule 8.  $\langle x_i \rangle$  und  $\sigma(x)$  stehen entsprechend den Definitionsgleichungen (11) (12) für Mittelwert und Standardabweichung, gebildet über die im Index angegebene Menge von Größen.

$$(11) \text{ Mittelwert } \langle x_i \rangle_{i=1 \dots N} \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$(12) \text{ Standardabweichung } \sigma_{i=1 \dots N}(x) \equiv \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \langle x_i \rangle_{i=1 \dots N})^2}{N - 1}}$$

Die Standardabweichung wird in der Definition (10) als Maß für die Unterschiedlichkeit angewendet. Statt der Standardabweichung könnte z. B. auch die Differenz von Maximum und Minimum verwendet werden, wäre aber anfälliger gegen Ausreißer.  $G_r$  ist ein direktes Maß in den Maßeinheiten des raumakustischen Parameters  $P$  für die Unterschiede von  $P$  auf den verschiedenen Übertragungswegen im Raum  $r$ . Um den Überblick über alle Räume zu erhalten, wird  $G_r$  über alle Räume zu  $\langle G \rangle$  gemittelt (13). Die Standardabweichung  $\sigma G$  von  $G_r$  gibt dann einen Eindruck von den Unterschieden zwischen den Räumen.

$$(13) \text{ Mittlere absolute Wegabhängigkeit } \langle G \rangle \equiv \langle G_r \rangle_{r=1 \dots N_r}$$

$$(14) \text{ Standardabweichung der } G_r \quad \sigma G \equiv \sigma_{r=1 \dots N_r}(G_r)$$

Beim Parameter Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  liegt  $\langle G \rangle$  zwischen 12 % bei 125 Hz und 4 % bei 1 bis 4 kHz (Abbildung 27). Die Modulationstransferindices MTI sind dimensionslose frequenzabhängige Zwischenergebnisse bei der Bildung des STI und nehmen wie der STI Werte von 0 bis 1 an.  $\langle G \rangle$  der MTI hat bei 125 Hz den höchsten Wert um 0,05 und fällt zu höheren Frequenzen auf ca. 0,016 ab 1 kHz (Abbildung 28). Auch bei den Nachhallzeiten  $T_{20}$  und  $T_{30}$  fällt  $\langle G \rangle$  von tiefen Frequenzen zu hohen Frequenzen ab: ca. 0,1s bei 125 Hz und 0,02 s ab 1 kHz. Ähnlich ist der Verlauf bei der EDT zwischen 0,15 s und 0,04 s (Abbildung 29).  $\sigma G$  ist jeweils als Fehlerbalken in den Abbildungen eingezeichnet.

Abbildung 27:

$\langle G \rangle$  und  $\sigma G$  der  $D_{50}$ : Mittelwert und Standardabweichung der absoluten Wegabhängigkeit. Datenbasis: Unbesetzte, unbehandelte Klassenräume der beteiligten zweiten Klassen.

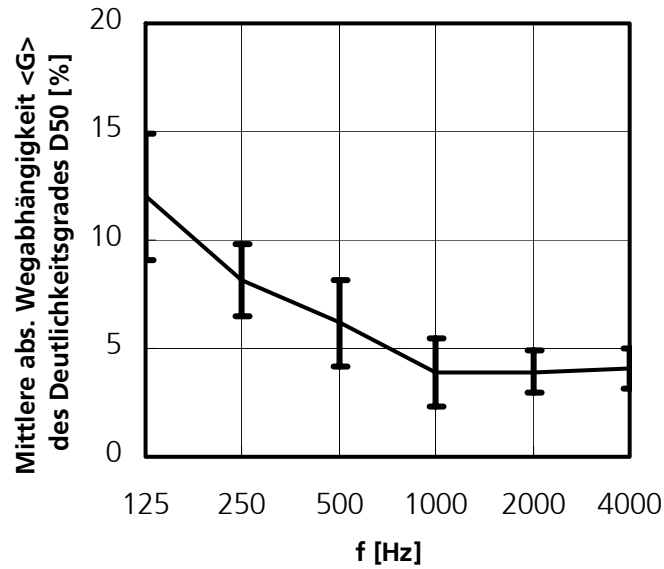


Abbildung 28

$\langle G \rangle$  und  $\sigma G$  der MTI: Mittelwert und Standardabweichung der absoluten Wegabhängigkeit. Datenbasis: Unbesetzte, unbehandelte Klassenräume der beteiligten zweiten Klassen.

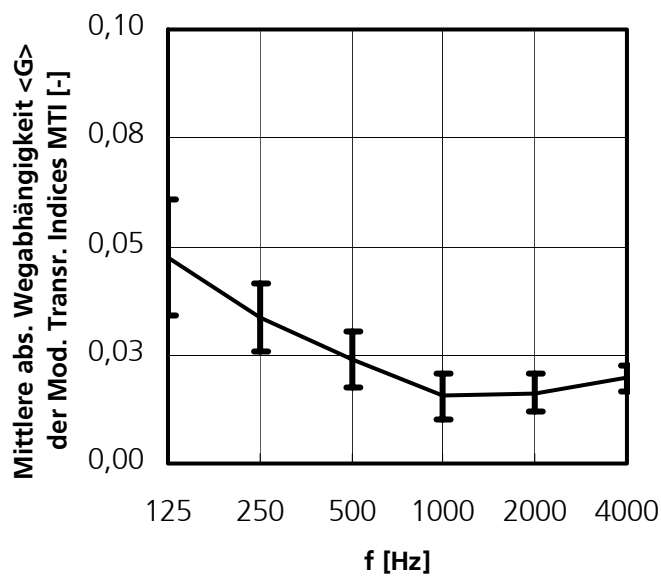
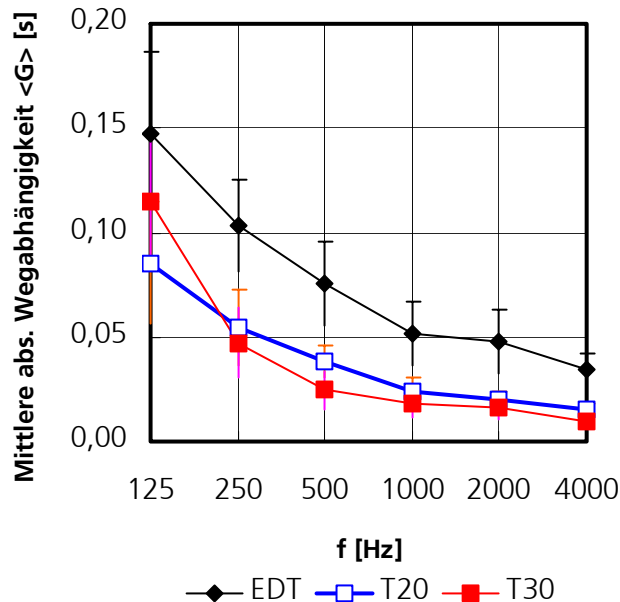


Abbildung 29

$\langle G \rangle$  und  $\sigma G$  der  $T_{20}$ ,  $T_{30}$  und EDT: Mittelwert und Standardabweichung der absoluten Wegabhängigkeit. Datenbasis: Unbesetzte, unbehandelte Klassenräume der beteiligten zweiten Klassen.



Als zweiter Schritt wird die „Relative Wegabhängigkeit  $H_r$ “ eines raumakustischen Parameters in Gleichung (15) definiert.  $H_r$  ist in etwa das Verhältnis der Variation des Parameters innerhalb eines Raumes  $r$  zur Variation zwischen den Räumen und als solches dimensionslos.

$$(15) \text{ Relative Wegabhängigkeit } H_r \equiv \frac{G_r}{\sigma_{r=1 \dots N_r} \left( \langle P_{w,r} \rangle_{w=1 \dots N_w} \right)}$$

Mit der Definitionsgleichung von  $G_r$  (10) ergibt sich

$$(16) H_r \equiv \frac{\sigma_{w=1 \dots N_w} (P_{w,r})}{\sigma_{r=1 \dots N_r} \left( \langle P_{w,r} \rangle_{w=1 \dots N_w} \right)}$$

Der Zähler von  $H_r$  ist umso größer, je unterschiedlicher der raumakustische Parameter  $P$  innerhalb des Raumes  $r$  auf den verschiedenen Wegen  $w$  ausfällt. Der Nenner ist um so größer, je unterschiedlicher die räumlichen Mittelwerte von  $P$  in den verschiedenen Räumen  $r$  ausfallen. Hat  $H_r$  etwa einen Wert sehr viel kleiner als 1, so streuen die Messwerte im Raum  $r$  sehr viel weniger als die räumlichen Mittelwerte aller Räume. In diesem Fall kann der räumliche Mittelwert als repräsentativ für alle Sitzplätze und Sprecherpositionen des Raumes  $r$  betrachtet werden. Zugleich sind die Unterschiede zwischen den Sitzplätzen des Raumes sehr viel kleiner als die Unterschiede zwischen den Räumen. Auf



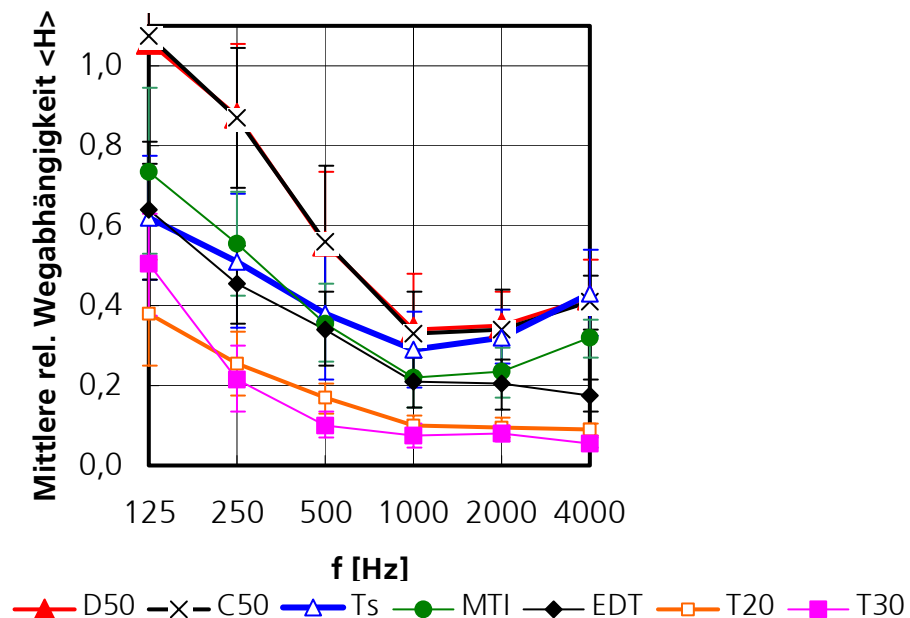
dieser begründeten Annahme beruht die Auswertung der psychologischen Tests. Ist  $H_r$  dagegen von der Größenordnung 1 oder größer, so sind die Unterschiede innerhalb eines Klassenraumes von derselben Größe wie die Unterschiede der Klassenräume. In diesem Fall darf der Übertragungsweg (Sitzplatz + Sprecherposition) nicht mehr vernachlässigt werden und es ist nicht zulässig die Klassenraum-Mittelwerte den Leistungen der Schüler zuzuordnen. Mehrere Ursachen für ein großes  $H_r$  sind denkbar. Nur eine davon sind starke Unterschiede des gemessenen raumakustischen Parameters in Abhängigkeit vom Übertragungsweg. Die Variationsbreite kann aus realen akustischen Verhältnissen oder unsystematischen Messfehlern resultieren. Die Wiederholgenauigkeit des Messsystems wurde vor den Messungen getestet und liegt unter der Auflösungsgrenze.  $H_r$  wird jedoch auch groß, wenn der Nenner klein wird, sprich, die Unterschiede zwischen den Räumen gering sind. Das ist natürlich von der betrachteten Menge von Messwerten bzw. Räumen abhängig. In den vorangegangenen Abschnitten 6.2.1, 6.2.3 und 6.2.4 wurden die räumlichen Mittelwerte  $\langle P_{w,r} \rangle_{w=1 \dots N_w}$ , die in den Nenner eingehen, bereits ausführlich vorgestellt. Um einen Überblick über alle Räume zu erhalten werden auch hier wie im Fall der  $G_r$  Mittelwert  $\langle H \rangle$  (17) und Standardabweichung  $\sigma H$  (18) gebildet.

$$(17) \text{ Mittlere relative Wegabhängigkeit } \langle H \rangle \equiv \langle H_r \rangle_{r=1 \dots N_r}$$

$$(18) \text{ Standardabweichung der } H_r \text{ } \sigma H \equiv \sigma_{r=1 \dots N_r} (H_r)$$

Abbildung 30:

$\langle H \rangle$  und  $\sigma H$ : Verhältnis von Standardabweichung innerhalb des Raumes zur Standardabweichung der Raummittelwerte. Datenbasis: Unbesetzte, unbehandelte Klassenräume der beteiligten zweiten Klassen.



In Abbildung 30 sind  $\langle H \rangle$  und  $\sigma H$  der beteiligten zweiten Klassen dargestellt. Bei den meisten Parametern ist das Ergebnis  $< 0,5$ . Insbesondere bei der Nachhallzeit ist der Wert erwartungsgemäß niedrig. Werte von der Größenordnung 1 finden sich nur bei Deutlichkeitsgrad und  $-$ maß in den Frequenzen 125 Hz und 250 Hz. Der Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  bei diesen Frequenzen wurde im Abschnitt 6.2.5 bereits bezüglich Differenzen zwischen vorderen und hinteren Sitzplätzen ausgewertet und die Wegabhängigkeit bestätigt. Vergleichbare Ergebnisse aus benachbarten Räumen lassen dort dagegen unsystematische Messfehler als Ursache der hohen  $\langle H \rangle$  ausscheiden.

Die raumakustischen Bedingungen innerhalb eines Klassenraumes unterscheiden sich - wenn überhaupt - deutlich weniger als zwischen den Räumen. Daraus sind zwei Folgerungen für die hier betrachteten Klassenräume zu ziehen: Erstens ist es zulässig für die Auswertung der psychologischen Tests die Klassenmittelwerte zu verwenden. Zweitens gibt es in den Heimatklassenräumen dieser Untersuchung keinen einheitlichen akustischen Vorteil eines Übertragungsweges, also einer Sprecherposition oder Sitzposition gegenüber einer anderen.

## 6.3 Bauakustik

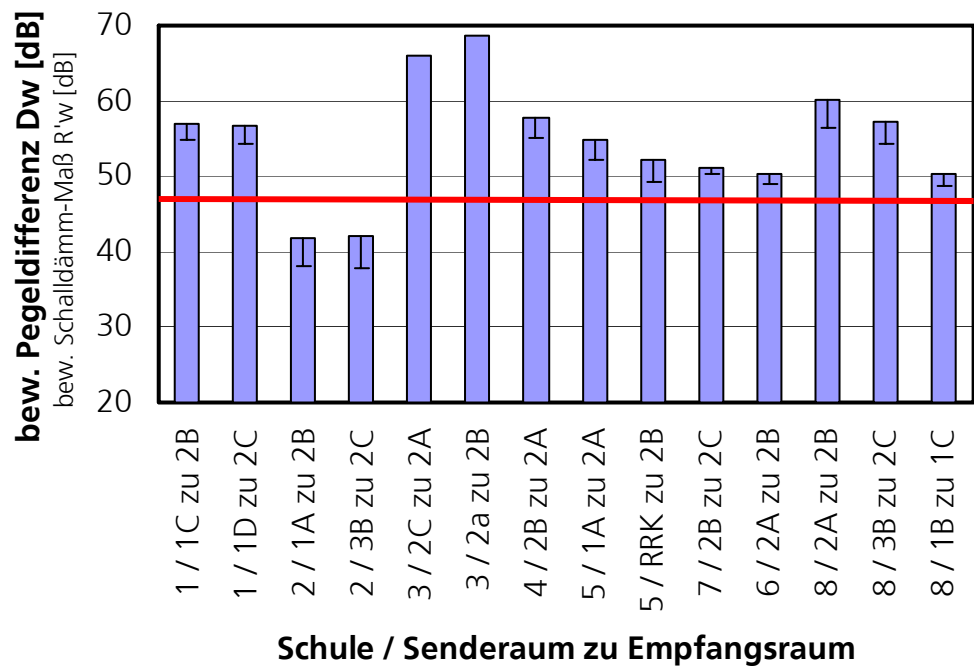
### 6.3.1 Schallübertragung vom Nachbarraum

Die Messergebnisse der Schalldämmung vom Nachbarraum zum Klassenraum sind in Abbildung 39 dargestellt. Die Balken geben die bewertete Schallpegeldifferenz  $D_w$  wieder. Die Enden der Fehlerbalken zeigen das bewertete Schalldämm-Maß  $R'_w$  an, sofern es gebildet werden kann. Die Anforderung nach DIN 4109 von  $R'_w$  größer oder gleich 47 dB wird mit Ausnahme von Schule 2 ( $R'_w = 38/37$  dB) in allen Fällen eingehalten und zum Teil erheblich übertroffen.

Die Unterschreitung an Schule 2 ist mit 10 dB zwar deutlich, aber für diese Studie von geringerer Bedeutung als die gute Raumakustik an dieser Schule. Ergibt sich zum Beispiel aufgrund unterschiedlichen Unterrichtsgeschehens eine Differenz der Schallpegel von 20 dB zwischen benachbarten Räumen, so ist der Anteil des vom lauten Raum eindringenden Schalls im leiseren Raum trotzdem noch etwa 20 dB unter dem Gesamtschallpegel im leiseren Raum. Allerdings wäre bei dieser doch eher niedrigen Schalldämmung Gesprochenes aus dem Nachbarraum in einem unbesetzten (also stillen) Klassenraum verstehbar.

Eine bauliche Besonderheit führt an Schule 3 zu den außerordentlich hohen Schallpegeldifferenzen  $D_w$  (66/68 dB) und zugleich dazu, dass das Schalldämm-Maß  $R$  zwischen den Klassenräumen nicht definiert ist: Zwischen den Klassenräumen sind Garderoben angeordnet (Abbildung 36). Der Schall muss zwei Wände statt sonst einer Wand überwinden.

Abbildung 31:  
Bewertete Schallpegeldifferenz  $D_w$  und bewertetes Schalldämm-Maß  $R'_w$  (Ende der Fehlerbalken) zum Nachbar-Klassenraum und Anforderung von  $R'_w \geq 47$  dB.



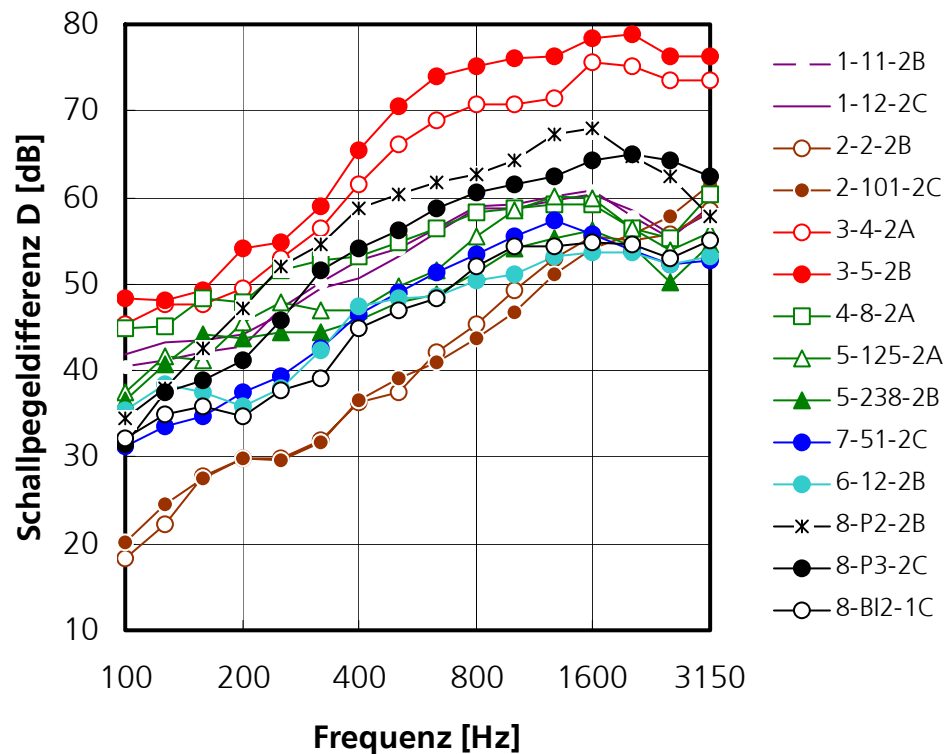
Für die Auswertung der Kinderfragebögen (s. Abbildung 74) wurden die Klassen anhand der bewerteten Pegeldifferenz  $D_w$  in drei Gruppen wie in Tabelle 1 angegeben eingeteilt.

Tabelle 8:  
Gruppeneinteilung Dämmung\_NR zur Abbildung 74.

Gruppe	zugehörige Klassen	Wertebereich Dämmung zum Nachbarraum $D_w$
Dämmung_NR_1	Schule 3: alle Schule 4: 2c Schule 8: 2a, 2c	58 – 69 dB
Dämmung_NR_2	Schule 1: alle Schule 4: 2a Schule 5: 2a Schule 8: 2c	54 – 58 dB
Dämmung_NR_3	Schule 2: alle Schule 5: 2b Schule 6: alle Schule 7: alle Schule 8: 1. Klassen	41 – 53 dB

Die Abhängigkeit der Schallpegeldifferenz von der Frequenz ist in Abbildung 32 aufgetragen. Alle Wände weisen den typischen Anstieg der Schalldämmung zu hohen Frequenzen auf. Die Ausreißer Schule 2 und Schule 3 heben sich im gesamten Frequenzbereich von den übrigen ab. Verbreitete Einbrüche um 2500 Hz können verschiedene Ursachen haben, sind aber in diesem Kontext nicht weiter von Bedeutung.

Abbildung 32:  
Frequenzabhängige Pegeldifferenz zum Nachbar-Klassenraum.



Zusammenfassend ist von der Schalldämmung zum Nachbarraum in der Stichprobe keine Auswirkung auf die Tests mit den Schülern zu erwarten. Die Unterschiede in der Schalldämmung werden jedoch von den Schülern registriert (s. Abschnitt 10.3).

### 6.3.2 Schallübertragung vom Flur

Die an den Schulen vorgefundenen Türen zu den Klassenräumen fallen durch aus Undichtigkeit resultierender geringer Schalldämmung auf. Nicht nur an den acht ausgewählten Schulen, sondern auch an den im Rahmen der Auswahl besuchten Schulen fehlen Dichtungen meist gänzlich (Abbildung 33) und die Spalte unter den Türen sind beträchtlich (Abbildung 34). In der Folge erreichen die bewerteten Schallpegeldifferenzen  $D_w$  vom Flur zum Klassenraum häufig kaum mehr als 30 dB (Abbildung 35). Die sich unübersehbar abhebenden Ausnahmen mit ca. 20 dB höheren Werten kommen durch zweite Türen zustande.

An Schule 3 werden die Klassenräume vom Flur durch eine Tür, die schon erwähnten Garderoben und eine zweite Tür betreten (Abbildung 36). Die dargestellte Pegeldifferenz zum Raum der Klasse 2a an Schule 5 wurde vom Treppenhaus als Senderaum gemessen. Treppenhaus und Flur sowie Flur und Klassenraum sind je durch eine Tür verbunden (s. Grundrisskizze Abbildung 37). Auch an Schule 3 und 5 wiesen die einzelnen Türen die selben leicht durch Augenschein feststellbaren Mängel wie an den anderen Schulen auf.

Es lässt sich abschätzen, dass das Schalldämm-Maß der Türen rund 10 dB unter den gemessenen Pegeldifferenzen liegt und somit die Anforderung der DIN 4109 [5] von 32 dB (Tabelle 3) an keiner Schule eingehalten wird.

Abbildung 33:

Türen ohne Dichtungen und mit großen Fugen zum Boden sind die Regel.



Abbildung 34:

Lichtspalt unter einer geschlossenen Klassenraumtür (Schule 7).



Abbildung 35:  
Pegeldifferenz zwischen Flur und Klassenraum.

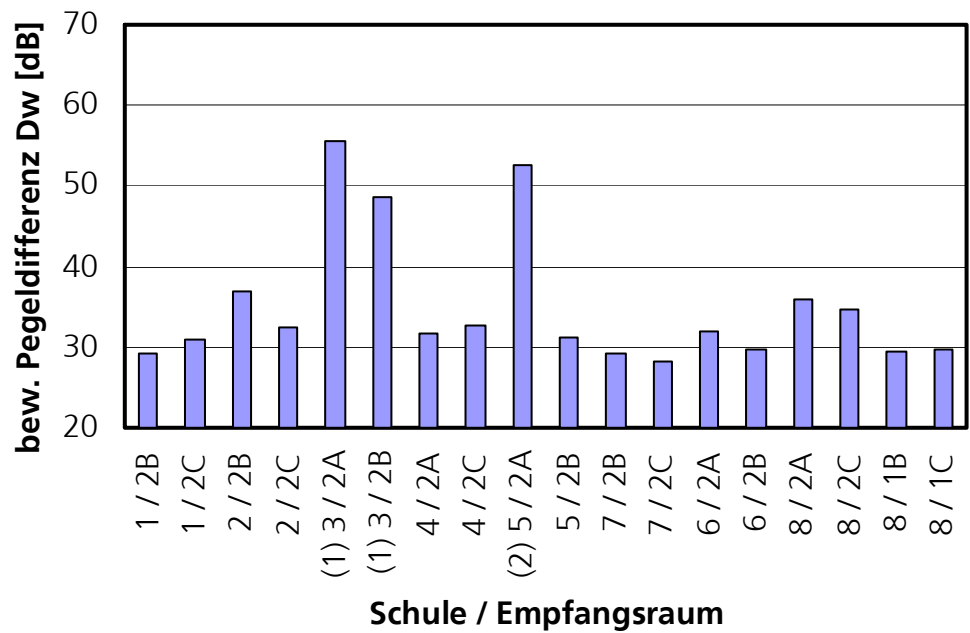
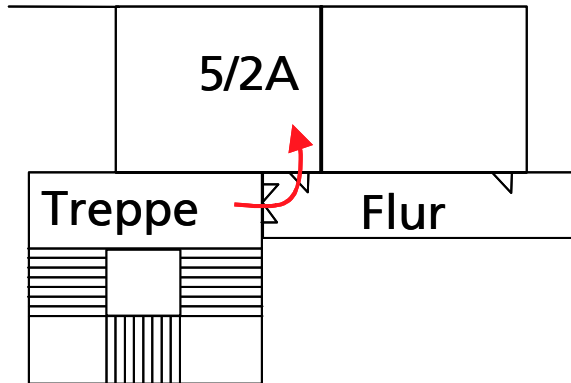


Abbildung 36:  
Zwischen den Klassenräumen der Schule 3 befinden sich Garderoben, durch die auch der Zugang vom Flur erfolgt.

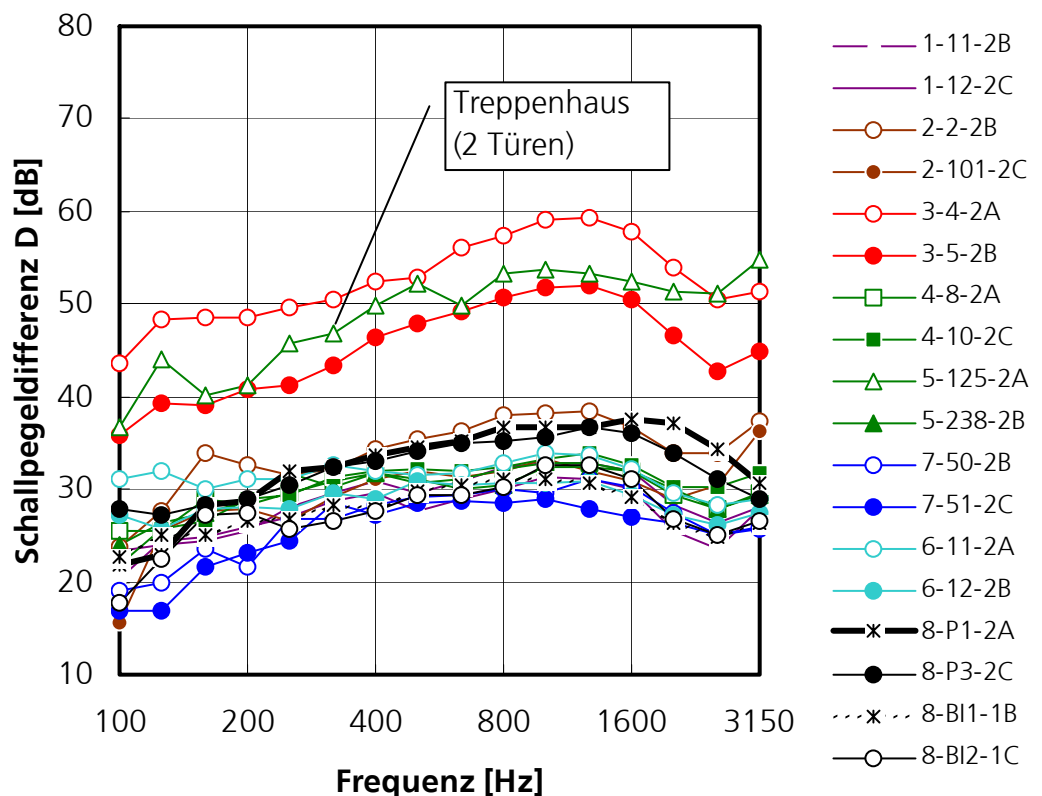


Abbildung 37:  
Bei vom Flur durch eine Tür abgetrenntem Treppenhaus wie hier an Schule 5 ergibt sich eine deutlich höhere Schalldämmung zum Treppenhaus.



Der Frequenzgang der Schallpegeldifferenzen weist kaum einen Anstieg zu hohen Frequenzen auf und ist annähernd flach (Abbildung 38). Das ist eine Folge der dominierenden Schalltransmission durch die Öffnungen an den Türen. Die drei Fälle mit doppelten Türen heben sich im gesamten bauakustischen Frequenzbereich von 100 Hz bis 3150 Hz von den übrigen Messergebnissen ab.

Abbildung 38:  
Frequenzabhängige Pegeldifferenz zwischen Flur und Klassenraum.



Zur Einschätzung der Lärmbelastung vom Flur muss neben der Dämmung auch der Schallpegel vor der Klassenraurtür herangezogen werden. Und der ist häu-

fig niedrig. Störungen durch kurze Lärmphasen auf dem Flur (dazu zählen wegen der geringen Dämmung auch schon zwei Personen im Gespräch) wirken nicht dauerhaft ein. Eine chronische Auswirkung auf die getesteten kognitiven Leistungen dürfte daher, falls vorhanden, durch die ständig einwirkenden raumakustischen Einflüsse verdeckt sein. Wahrgenommen werden Geräusche vom Flur jedoch sehr wohl, wie die Ergebnisse der Kinderfragebogen zeigen (s. Abschnitt 10.3). Die der Auswertung zu Abbildung 75 zugrundeliegende Einteilung in Gruppen nach Tabelle 10 basiert auf dem Messwert der Schallpegeldifferenz zum Flur in Summe mit einem Malus nach Tabelle 9 für die Lärmbelastung vor der Tür.

Tabelle 9:  
Malussystem zur Bewertung der Lärmbelastung am Flur.

Malus	Lärmbelastung vor der Tür
+6 dB	Ruhiger Flur, kein Durchgang
+3 dB	Flur durch Tür vom Treppenhaus getrennt
0 dB	Durchschnittlich
-6 dB	Lautes Treppenhaus

Tabelle 10:  
Gruppeneinteilung Dämmung\_Flur.

Gruppe	zugehörige Schulen	Wertebereich $D_w + \text{Malus Flur}$
Dämmung_Flur_1	3, 8 (2. Klassen)	23 – 32 dB
Dämmung_Flur_2	1, 2, 7	34 – 40 dB
Dämmung_Flur_3	4, 5, 6, 8 (1. Klassen)	40 – 59 dB

Für den Schulbau leiten sich einige, zum Teil mit geringem Aufwand realisierbare Maßnahmen zur Vermeidung von Störungen vom Gang ab. Zunächst sollte auf Türen mit Dichtungen geachtet werden. Anschlagdichtungen seitlich und oben an den Türen, kombiniert mit Absenk dichtungen unten schließen die Lücken rund um die Tür auch bei schwellenlosen Türen. Bei Absenk dichtungen ist allerdings der Zustand und die Justierung gelegentlich zu überprüfen. An Schule 2 waren zwar Absenk dichtungen vorhanden, sie waren jedoch in schlechtem Zustand.

Die Verkehrswege in den Schulen sollten so geplant werden, dass häufig benutzte Verbindungsgänge nicht vor Klassenzimmern vorbeiführen und die Klassenzimmer nicht direkt von den Treppenhäusern betreten werden. Treppenhäuser und Verbindungsgänge sollten durch Türen von den Fluren vor den Klassenzimmern getrennt sein. Gerade Treppenhäuser sind häufig sehr hallig und können durch schallabsorbierende Flächen wirksam beruhigt werden.

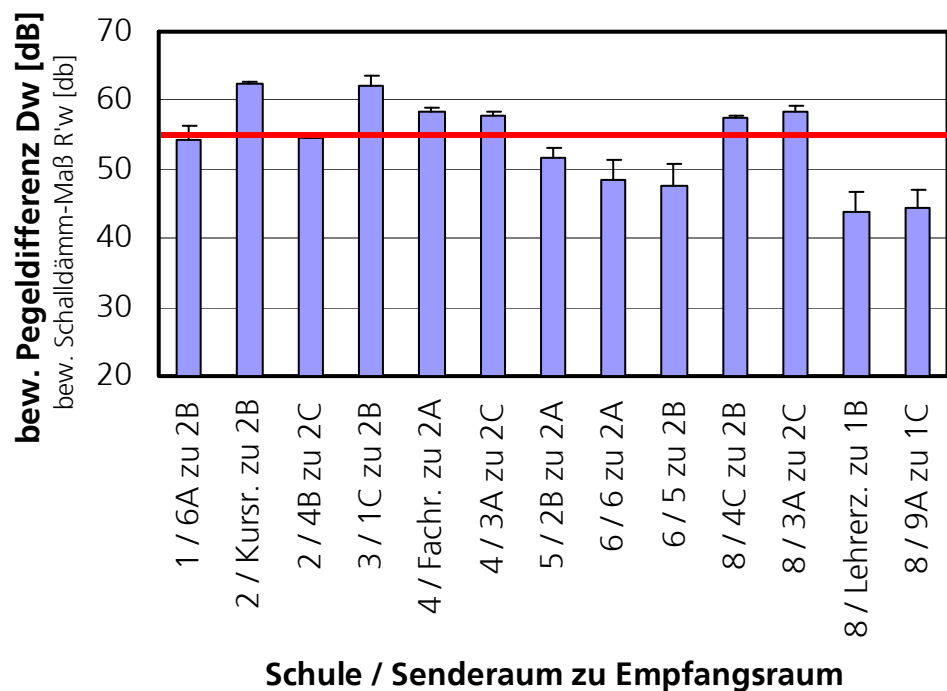
### 6.3.3 Schallübertragung vom darüber liegenden Raum

Besonders bei übereinander liegenden Räumen interessiert neben der Luftschalldämmung (s. Abschnitt 4.2.1) auch der Schutz gegen Gehgeräusche, Stühle-Rücken, etc. aus dem oben liegenden Raum (s. Abschnitt 4.2.2).



Nicht alle Räume der teilnehmenden Klassen liegen unter einem anderen Klassenraum. Über dem Raum der Klasse 2b an Schule 5 befindet sich ein Lager- raum, der selten begangen wird. In den Schulen 3 und 7 sind die betrachteten Klassenräume in eingeschossigen Gebäuden, sogenannten Pavillons, unterge- bracht. Durch Lärmvermeidung ist in diesen Fällen der Schallschutz am besten. Vergleichswerte für Schalldämmung und Trittschallpegel gibt es jedoch definiti- onsbedingt nicht, weshalb diese Räume nicht in den vergleichenden Abbildun- gen dieses Abschnittes erscheinen. Zum Raum der Klasse 2B an Schule 3 gibt es dann doch eine Angabe zur Schalldämmung, nämlich für Schallübertragung von einem darunter liegenden Klassenraum im Souterrain des Gebäudes in Hanglage.

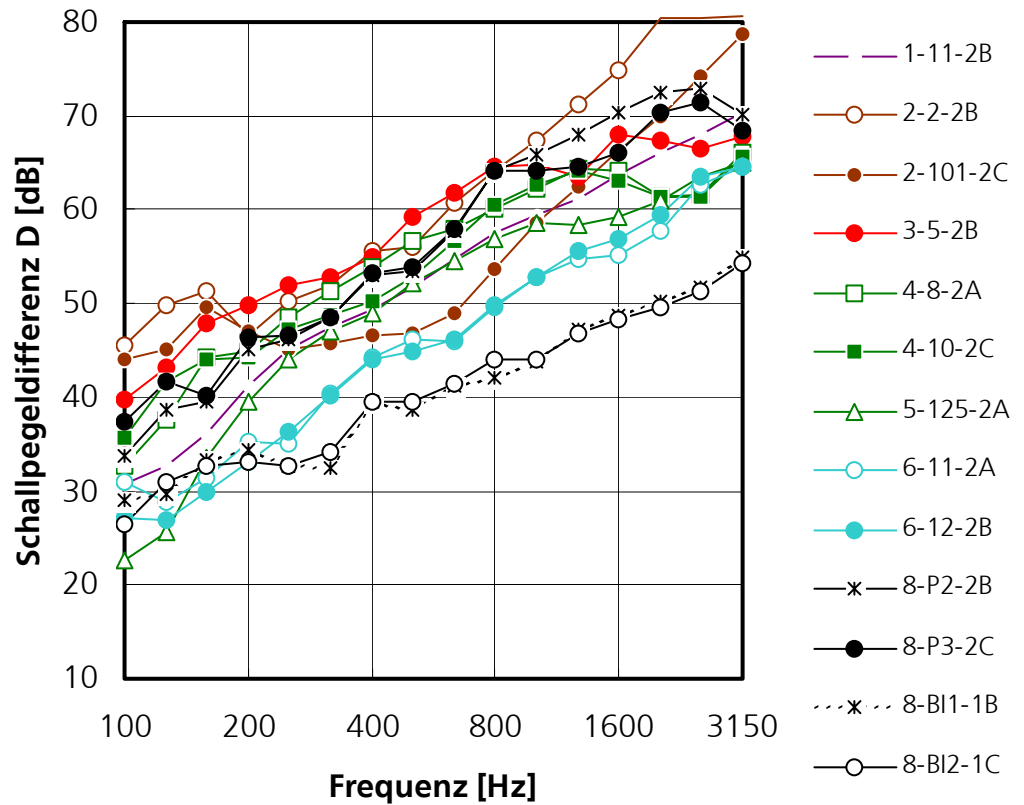
Abbildung 39:  
Bewertete Schallpegeldifferenz  $D_w$  und bewertetes Schalldämm-Maß  $R'_w$  (En- den der Fehlerbalken) zum darüberliegenden Klassenraum und Anforderung von  $R'_w \geq 55$  dB.



In den verbleibenden Räumen nimmt die bewertete Schallpegeldifferenz  $D_w$  Werte von 43 dB bis 62 dB und das bewertete Schalldämm-Maß  $R'_w$  Werte von 46 dB bis 63 dB an. Die Anforderung von  $R'_w \geq 55$  dB aus DIN 4109 [5] (s. Tabelle 3) wird von 6 Räumen an 4 Schulen nicht eingehalten. In den ersten Klassen der Schule 8 ist die Unterschreitung mit 8 dB ernsthaft. An Schule 6 ist die Unterschreitung mit 4 dB immer noch deutlich. An je einem Raum der Schulen 5 und 2 tritt mit 1-2 dB eine geringfügige Unterschreitung nahe der Messgenauigkeit auf. Die bewerteten Ergebnisse der Luftschalldämmung im einzelnen sind grafisch in Abbildung 39 dargestellt. Nach Frequenzen aufge- schlüsselt ist Abbildung 40. Im gesamten bauakustischen Frequenzbereich fällt

die Schallpegeldifferenz an Schule 6 und zu den ersten Klassen an Schule 8 hinter die übrigen Räume zurück.

Abbildung 40:  
Frequenzabhängige Schallpegeldifferenz zum darüberliegenden Klassenraum.



Mit Hinblick auf die Normtrittschallpegel sind erhebliche Mängel zu berichten. Während Schule 2 als einziges mehrgeschossiges Gebäude mit 48 dB und 50 dB bewerteten Normtrittschallpegeln  $L_{n,w}$  die Anforderung von  $L_{n,w} \leq 53$  dB aus DIN 4109 [5] (s. Tabelle 3) deutlich übertrifft, liegt der Trittschallschutz mit bewerteten Normtrittschallpegeln  $L_{n,w}$  von 56 dB bis 81 dB in 15 von 17 Klassenräumen meist erheblich, immer jedoch deutlich außerhalb der Anforderung. Bemerkenswert ist dieses Ergebnis auch deshalb, weil die Trittschallpegel bei der Auswahl der Schulen nicht berücksichtigt wurden und deshalb die 8 Schulen betreffs der Trittschallpegel einer zufälligen, repräsentativen Stichprobe nahe kommen.

Die bewerteten Normtrittschallpegel  $L_{n,w}$  sind im einzelnen in Abbildung 41 eingezeichnet. Die frequenzabhängige Darstellung in Abbildung 42 verdeutlicht die enorme Bandbreite der Trittschallpegel. Auffallend ist der flache Frequenzgang ohne den typischen Abfall des Trittschallpegels bei hohen Frequenzen in beiden beteiligten Gebäuden der Schule 8.

Über den Deckenaufbau der Schulen liegen keine Informationen vor. Da Schule 2 in Sichtbeton-Bauweise erstellt wurde, ist von Stahlbetondecken auszugehen. Aus den geringen Trittschallpegeln kann auf einen angemessenen dimension-

nierten schwimmenden Estrich geschlossen werden. Bei den übrigen mehrgeschossigen Schulgebäuden sind nach Klang, Messergebnissen und Baustil Holzbalkendecken oder ähnliche Bauweisen zu vermuten. Zur Sanierung könnten entweder ein (verbessertes) schwimmender Estrich oder aber - günstig auch zur Optimierung der Raumakustik - (verbesserte) Unterdecken eingesetzt werden.

Abbildung 41:  
 Normtrittschallpegel  $L_{n,w}$  bei Anregung im darüber liegenden Raum und Anforderung von  $L_{n,w} \leq 53$  dB.

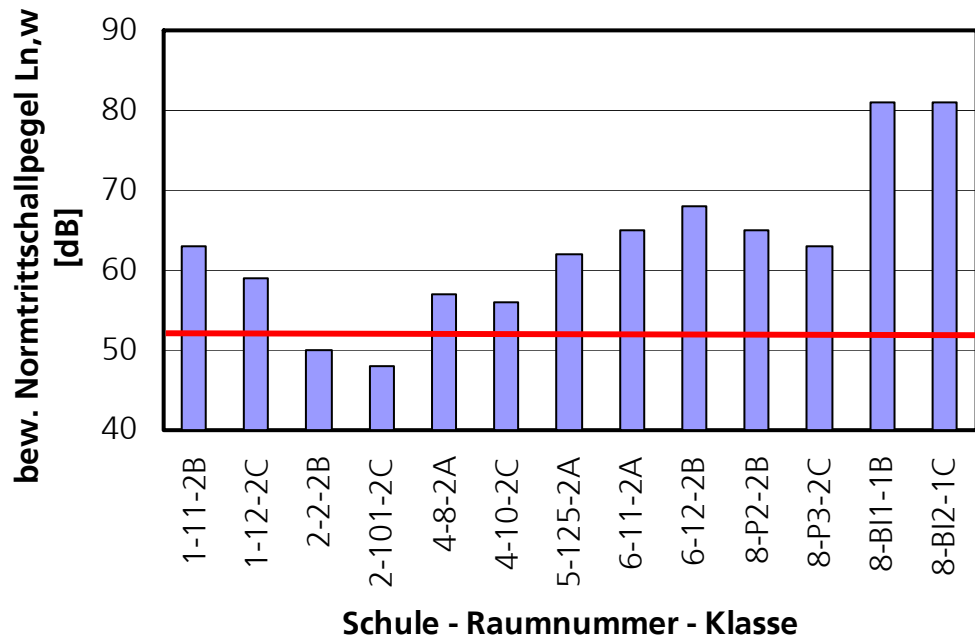
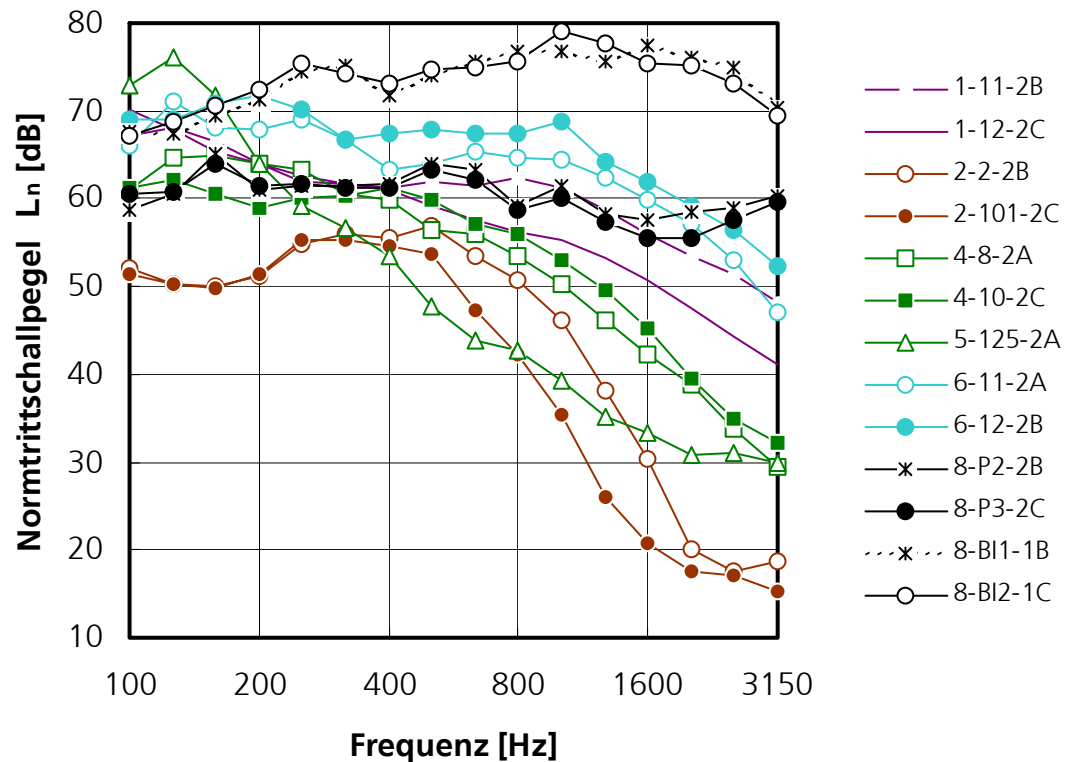


Abbildung 42:  
 Normtrittschallpegel bei Anregung im Raum über dem Klassenraum.



Zusammenfassend ist rein aus Sicht des vertikalen Schallschutzes eine eingeschossige Bauweise zu empfehlen. Eine mehrgeschossige Bauweise erreicht mit Stahlbetondecken und schwimmendem Estrich einen guten Schallschutz. Im Bestand verbreitet anzutreffende Bauweisen weisen einen unzureichenden Schallschutz auf, entsprechen nicht dem Stand der Technik und sollten saniert werden.

### 6.3.4 Schallübertragung von außen

Die Belastung im Klassenzimmer durch Lärm von außerhalb der Schule erschließt sich durch direkte Messung der Schallpegel im Raum oder indirekt aus dem Schallpegel vor der Fassade im Freien in Kombination mit der Schalldämmung der Fassade.

Im Fall des Außenlärms war die direkte Messung realisierbar (s. Abschnitt 4.3.1). Während die Schallpegel in angrenzenden Räumen beim Unterrichts- oder auf dem Flur stark von der momentanen Nutzung abhängen und sehr individuell sind, variiert die Kulisse des Außenlärms kaum oder gut erfassbar. Während es *den einen* Schallpegel im Nachbarraum nicht gibt, durchläuft der Außenlärmpegel zum Beispiel innerhalb von Ampelphasen oder Auto-Vorbeifahrten

seine Schwankungsbreite und kann daher in akzeptablen Beobachtungszeiträumen gemessen werden.

Aus diesem Grund wurde auf vollständige Schalldämm-Messungen der Fassaden mit einer künstlichen Messschallquelle im Freien verzichtet. Statt dessen wurde ergänzend in einigen Fällen die Differenz zwischen Pegel im Klassenraum und vor den Fenstern gemessen. Dies ergibt eine untere Grenze für die Schalldämmung der Fassaden bzw. Fenster. Die Messungen erfolgten außerhalb der Unterrichtszeit. Der Abstand des Außen-Mikrofones zur Fensterscheibe betrug 0,03 – 1,5 m in Abhängigkeit von den Möglichkeiten zur Positionierung des Mikrofons. Es wurden über 1-3 Mikrofon-Positionen gemittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 43 und Abbildung 44 dargestellt.

Abbildung 43:  
Bewertete Differenz von Schallpegel vor dem Fenster zum Schallpegel im Klassenraum (unbesetzter Klassenraum, Umgebungslärm ohne Messschallquelle).

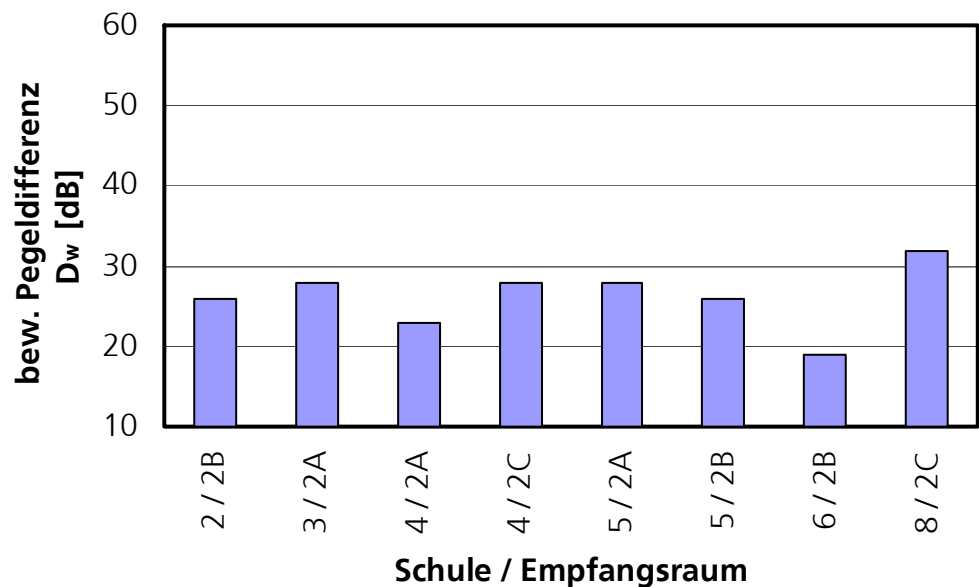
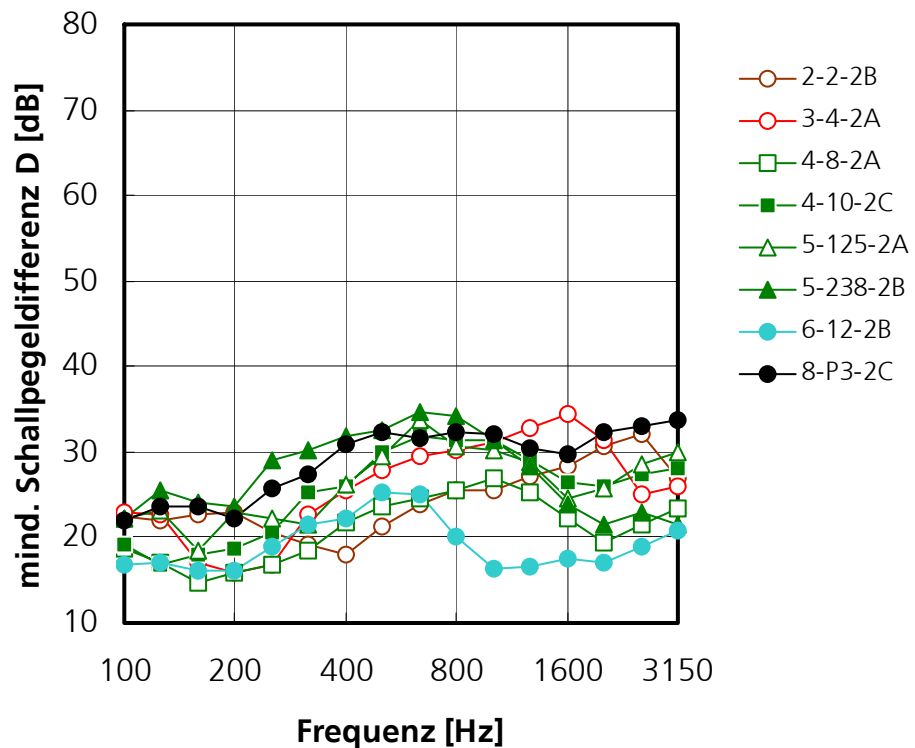


Abbildung 44:  
Differenz von Schallpegel vor dem Fenster zum Schallpegel im Klassenraum  
(unbesetzter Klassenraum, Umgebungslärm ohne Messschallquelle).



## 6.4 Schallpegel

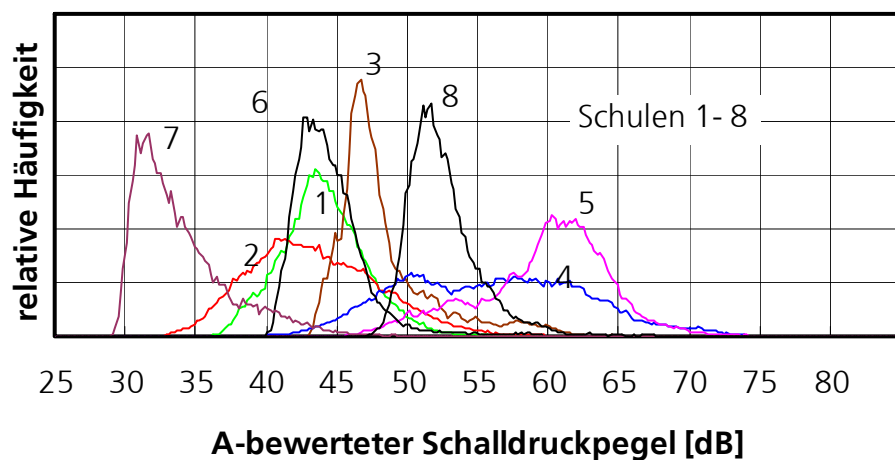
### 6.4.1 Vor den Schulen

Das akustische Umfeld im Außenbereich der Schulen wird durch die Lage der Schulen geprägt. Die Lage der teilnehmenden Schulen variiert vom ländlichen Ortsteil mit Dorfcharakter bis zur Innenstadtlage. Sofern die Schulen nennenswert mit Lärm belastet sind, ist Straßenverkehr die Ursache. Extreme Situationen, wie etwa eine Lage in einer Einflugschneise oder Fenster zu einer Hauptverkehrsstraße sind nicht vertreten. Gleichwohl haben die Schulen 4, 5 und 8 eine deutlich belastete Außenlärmsituation. Schule 3 nimmt eine Mittelstellung ein und die Schulen 1, 2, 6 und 7 zeichnen sich durch eine ruhige Lage aus.

Tabelle 11:  
Lage der Schulen, Ausrichtung der Klassenraumfenster und Charakter der Außengeräusche.

Schule	Lage	Ausrichtung der Fenster	Beschreibung Außengeräusche
1	Seitenstraße, Stadtrand	Klassen 2b, 1a, 1c: Über Schulhof zur Straße Klasse 2c: zu Friedhof	gelegentliche Fahrzeuge, diffus leise
2	Seitenstraße, Stadtrand	abgewandt von der Straße	diffus leise
3	Hanglage über Stuttgart, Seitenstraße abgeschirmt, Stadtrand	abgewandt von der Straße	entferntes Verkehrsruschen
4	Erschließungsstraße, Stadtrand	zur Straße gerichtet	häufige einzelne Fahrzeuge
5	An Hauptverkehrsstraße (Ampelgeregelt), Innenstadt	zu Schulhof	fließender Verkehr mit Pausen
6	Seitenstraße, dörflich	zum Schulhof	diffus still
7	Seitenstraße, dörflich	zum Schulhof	diffus still
8	Hauptverkehrsstraße, nahe Stadt-Autobahn, angrenzend an LKW-Rasthof	Klasse 2c, 2b: zum Rasthof Klassen 2a, 2b, 1b, 1c: zum Schulhof	Verkehr: Rauschen, Vorbei-, An- und Abfahrten

Abbildung 45:  
Häufigkeitsverteilung der Schallpegel vor den Schulen.

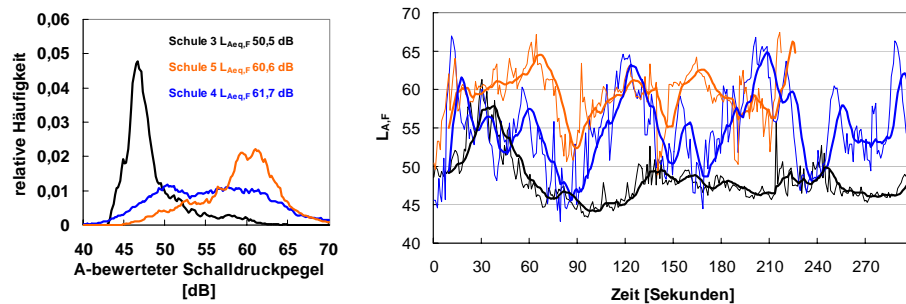


Die Qualität des akustischen Umfeldes zeichnet sich neben der Lautstärke auch durch Kontinuität oder Schwankungen aus. Die Unterschiede werden an den Häufigkeitsverteilungen der Schallpegel bei den einstündigen Messungen deutlich (Abbildung 45).

Zur Erläuterung der Unterschiede seien beispielhaft die Schulen 3, 4 und 5 betrachtet. Häufigkeitsverteilung der Schallpegel und typische Pegel-Zeit-Verläufe dieser drei Schulen sind in Abbildung 46 gegenübergestellt.

Abbildung 46:

Beispiele für den Pegelzeitverlauf im Vergleich zur Häufigkeitsverteilung. Die Charakteristik des Pegel-Zeit-Verlaufes wird im gleitenden Durchschnitt deutlicher.

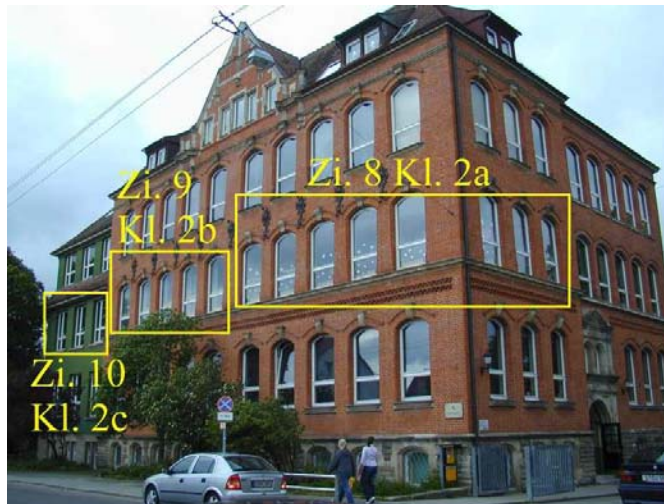


Die Schallpegel vor Schule 3 rangieren in meist in einem engen Bereich. Gelegentliche hebt sich ein Zug etwas aus dem allgemeinen Rauschen von Verkehr, Hafen und Industrie, das aus dem Neckartal heraufdringt, ab. Entsprechend ergibt sich die schmalste Häufigkeitsverteilung der teilnehmenden Schulen. Subjektiv wird die Lage als ruhig empfunden. Psychologische Wechselwirkungen mit der optisch reizvollen Lage sind nicht auszuschließen.

Am breitesten sind die Schallpegel vor den 2ten Klassen der Schule 4 verteilt. Typisch ist eine Verkehrsdichte von etwa 3 Fahrzeugen pro Minute, die unmittelbar unter den Fenstern im 1. Obergeschoß vorbeifahren (Abbildung 47). Dadurch ergibt sich ein ständig mit derselben Frequenz um 15-20 dB schwankender Schalldruckpegel mit hohen Spitzenwerten. Die einzelnen Fahrzeuge sind auch bei geschlossenem Fenster deutlich im Unterricht wahrzunehmen.



Abbildung 47:  
Schule 3: Ausrichtung direkt zu einer Durchgangsstraße. Besonders große Fensterflächen im Raum der 2a.



Schule 5 liegt dagegen an einer Straße mit dichtem, fließendem Verkehr. Dadurch, und weil die Räume nicht direkt zur Straße sondern zum Schulhof ohne Sichtverbindung zum Verkehr gerichtet sind, verstetigt sich der Verkehrslärm. Es kommt zu einer relativ schmalen Verteilung bei hohen Pegeln mit einem Ausläufer zu niedrigen Pegeln, verursacht durch die anteilig kurzen Phasen, in denen die verkehrsregelnde Ampel umschaltet. Der äquivalente Schallpegel vor den Fenstern von Schule 5 und 4 ist etwa gleich ( $L_{A,eq,F,1h} = 61$  dB). Der häufigste Pegel  $L_{A,Peak}$  (Definition siehe Abschnitt 4.3.2) vor Schule 4 ist jedoch mit 56 dB 5 dB niedriger als vor Schule 5.

Kennzeichnend für die Pegelverteilungen sind auch die Summenhäufigkeitspegel  $L_{95,A,F}$  und  $L_{5,A,F}$  sowie natürlich der Äquivalente Schallpegel  $L_{A,eq,F}$ , die in Abbildung 48 dargestellt sind. An Schule 2 sind im Diagramm unterschiedliche  $L_{A,eq}$  und  $L_{5,A,F}$  zu erkennen. Die höheren Werte wurden durch Glockenläuten während der Messphase verursacht. Die Hintergrundpegel  $L_{95,A,F}$  sind von diesem zeitweiligen Ereignis unbeeinflusst und daher etwa gleich. Ob das Glockenläuten zur typischen Schallkulisse der Schule zu zählen ist oder als seltenes kurzzeitiges Ereignis zu werten ist, bleibt strittig. Allerdings läuten die Glocken nicht jede Stunde. Somit ist das Glockenläuten im Messergebnis vor Klasse 2c überbewertet.

Die Frequenzabhängigkeit des äquivalenten Schallpegels über den Messzeitraum von einer Stunde ist in Abbildung 49 dargestellt. Trotz A-Bewertung steigen die Pegel bei Frequenzen unter 200 Hz deutlich zu tiefen Frequenzen hin an. Im mittleren Frequenzbereich von 200 Hz bis 1600 Hz variieren vor vielen Schulen die Pegel wenig mit der Frequenz. Zu höheren Frequenzen fallen die Pegel dann weiter ab.

Abbildung 48:  
Schallpegel vor den Fenstern über eine Stunde. Äquivalenter Schallpegel  $L_{A,eq,F}$  (Balken), Hintergrundpegel  $L_{95,A,F}$  und höchste Pegel  $L_{5,A,F}$  (Enden der Fehlerbalken).

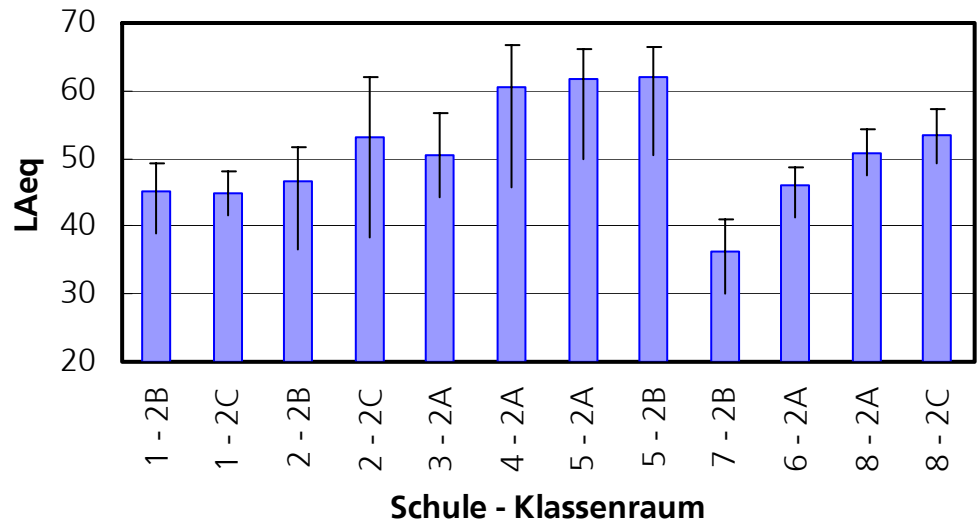
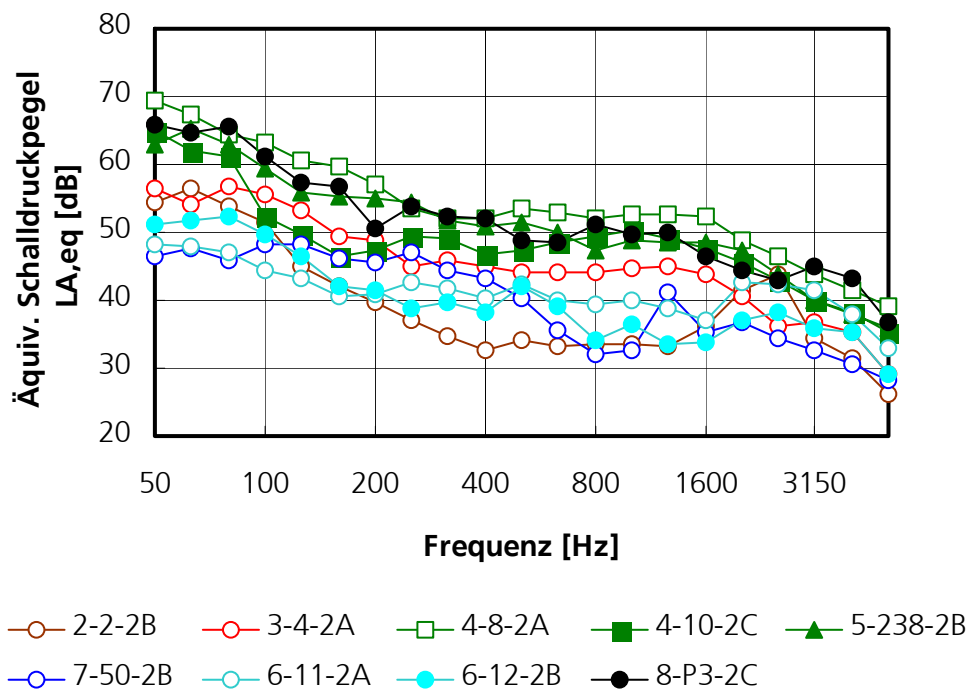


Abbildung 49:  
Frequenzabhängiger Schallpegel vor den Fenstern über eine Stunde.



Im Teil B dieser Studie wurde die Wahrnehmung der Außenlärmsituation durch die Schüler untersucht (s. Abschnitt 10.3). Um die für die statistische Auswertung notwendige Gruppenstärke zu erreichen wurden die Schüler bzw. Schulen in die drei Gruppen Außenpegel\_1 bis Außenpegel\_3 eingeteilt. Objektive

Grundlage für die Einteilung war der häufigste Pegel  $L_{A,Peak}$ . Die sich ergebende Einteilung ist in Tabelle 12 angegeben. Während die Grenze zwischen den Gruppen „Außenpegel\_1“ und „Außenpegel\_2“ fließend und bezüglich anderer Parameter nicht eindeutig sind, hebt sich die Gruppe „Außenpegel\_3“ unstrittig ab.

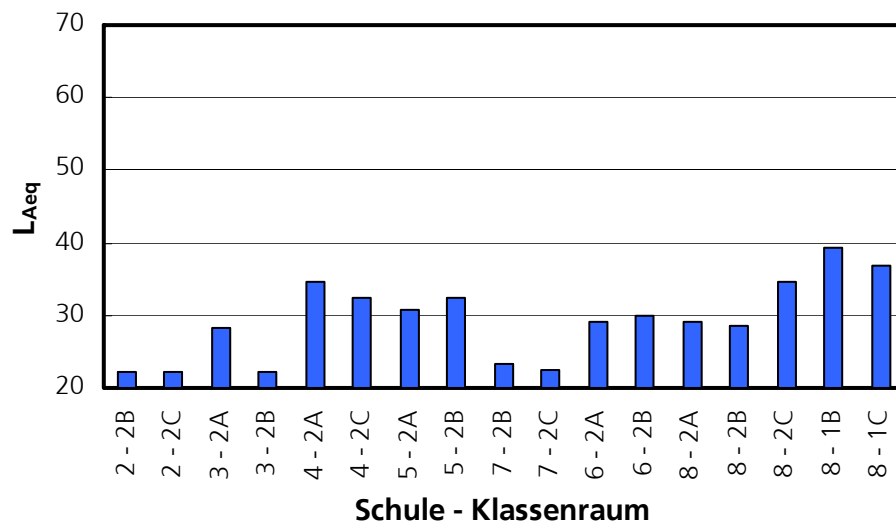
Tabelle 12:  
Gruppeneinteilung Außenpegel.

Gruppe	zugehörige Schulen	Wertebereich häufigster Pegel $L_{A,Peak}$ vor der Schule	Wertebereich Schallpegel $L_{A,eq}$ bei offenem Fenster im Klassenraum (unbesetzt)
Außenpegel_1	2, 6, 7	31 – 43 dB	36 – 43 dB
Außenpegel_2	1, 3	44 – 47 dB	43 – 46 dB
Außenpegel_3	4, 5, 8	50 – 61 dB	45 – 51 dB

#### 6.4.2 Im unbesetzten Klassenzimmer

Die A-bewerteten Schallpegel  $L_{A,eq}$  in den unbesetzten Klassenzimmern außerhalb der Unterrichtszeit bei geöffnetem und geschlossenem Fenster sind mit gleicher Einteilung der vertikalen Achse in Abbildung 50 und Abbildung 51 dargestellt.

Abbildung 50:  
Schallpegel bei geschlossenem Fenster (unbesetzt).

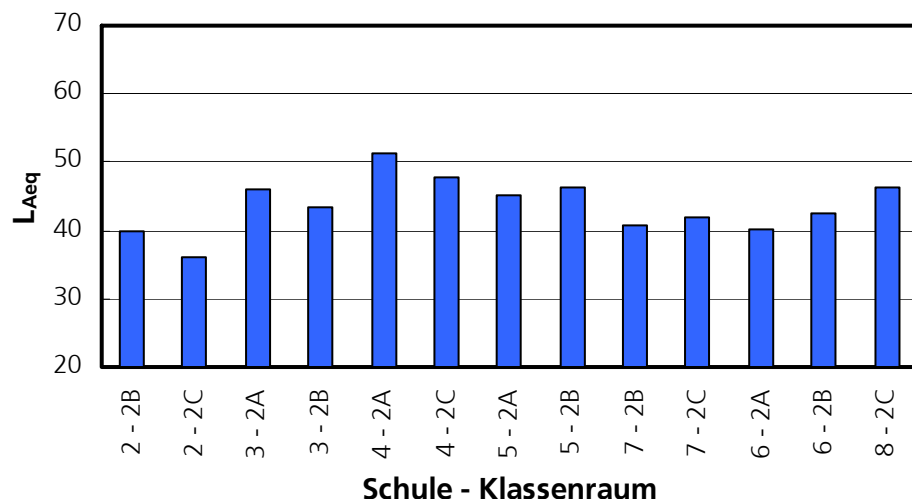


Bei geschlossenem Fenster betragen die Schallpegel in Räumen der Schulen 4, 5 und 8 mit den höchsten Außenlärmpegeln (zugleich Gruppe Außenpegel\_3, s. Tabelle 1) auch innen über 30 dB(A). An den anderen Schulen sind die äquivalenten Schalldruckpegel kleiner als 30 dB(A). Aber auch an Schule 8 ist in

zwei von drei zweiten Klassen der Schallpegel kleiner als 30 dB(A). Die ersten Klassen dieser Schule fallen allerdings durch die höchsten Pegel (39 dB(A) und 37 dB(A)) auf. Der Unterschied zwischen ersten und zweiten Klassen dieser Schule, die in verschiedenen Gebäuden untergebracht sind, ist zu einem großen Teil auf die um den Faktor 2 unterschiedlichen Nachhallzeiten (s. Abschnitt 6.2.1) zurückzuführen. Eine entscheidende Rolle spielen natürlich die Dämmung der Fenster und die Ausrichtung der Klassenräume.

In keinem der Klassenräume übersteigt der äquivalente Schalldruckpegel im unbesetzten Zustand bei geschlossenem Fenster 40 dB(A). Von einer stärkeren Beeinträchtigung des Unterrichts ist daher nicht auszugehen und die Anforderungen nach DIN 18041 [1] sind erfüllt. Eine gewisse Belastung ist an Schule 4 wegen der ungünstigen Ausrichtung zur Straße und des großen Fensterflächenanteils in Verbindung mit der un stetigen Beschaffenheit des Außenlärms (s. Abschnitt 6.4.1) im Unterricht zu beobachten. Wie Befragungen der Kinder zeigen, nehmen auch die Grundschüler Unterschiede im Außenlärm wahr. Die insgesamt geringe Belastung mit den wenig differenzierenden Schallpegeln läßt in Verbindung mit der gegebenen Stichprobe keine Analyse hinsichtlich der kognitiven Leistungen zu (s. Abschnitt 10.3).

Abbildung 51: Schallpegel bei geöffnetem Fenster (unbesetzt).



Bei geöffnetem Fenster sind die Schallpegel in den Klassenräumen auch an den Schulen mit geringer Außenlärmbelastung deutlich höher als bei geschlossenem Fenster. Die Belastungs-Rangfolge der Schulen weicht im Klassenzimmer etwas von der im Freien vor den Klassenraumfenstern ab. Die Nachhallzeiten spielen hier eine Rolle. Die niedrigsten Pegel ( $L_{A,eq} = 36$  dB und  $L_{A,eq} = 40$  dB) finden sich an Schule 2 in deren Räumen die Nachhallzeit zu den kürzesten zählt. Trotz der mit Abstand geringsten Schallpegel vor den Klassenräumen an Schule 7 ist dort in den unbesetzten Klassenräumen, die die längsten Nachhallzeiten unter den zweiten Klassen aufweisen, der äquivalente Schallpegel mit 41 dB(A) etwas höher. Am anderen Ende der Skala ( $L_{A,eq} = 48$  dB und  $L_{A,eq} = 51$  dB) steht Schule 4, in der relativ hoher Außenlärmpegel mit relativ langen Nachhallzeiten zusammentreffen (vgl. Abschnitt 6.2.1 und 6.4.1). Was diese Zahlen bedeuten, verdeutlicht das Ergebnis aus den Kinderfragebögen zur Aussage „Wenn die

Fenster im Klassenzimmer geöffnet sind, dann verstehe ich die Lehrerin (bzw. den Lehrer) schlecht". In der Gruppe mit den höchsten Pegeln stimmten 58 % dieser Aussage zu. In der Gruppe mit den niedrigsten Pegeln waren es nur 19 % (s. Abbildung 73).

In den Diagrammen Abbildung 52 Abbildung 53 sind die Schalldruckpegel in den einzelnen Terzbändern zwischen 50 Hz und 5000 Hz dargestellt.

Abbildung 52:  
Frequenzabhängigkeit der Schallpegel bei geschlossenem Fenster im unbesetzten Klassenraum.

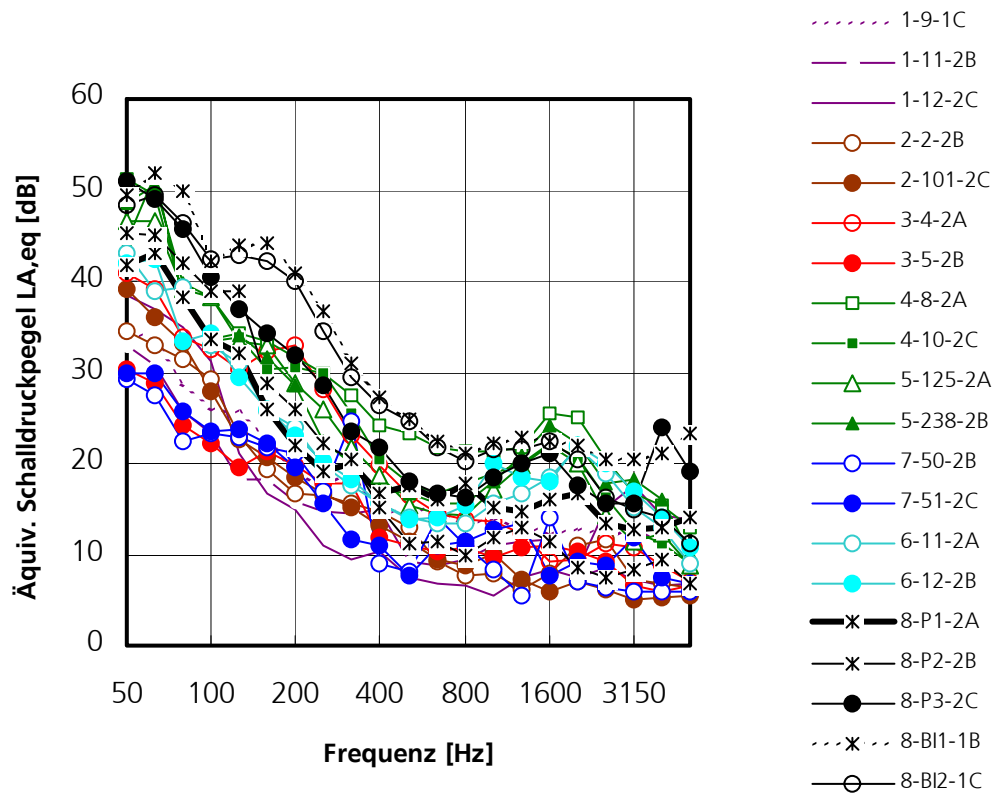
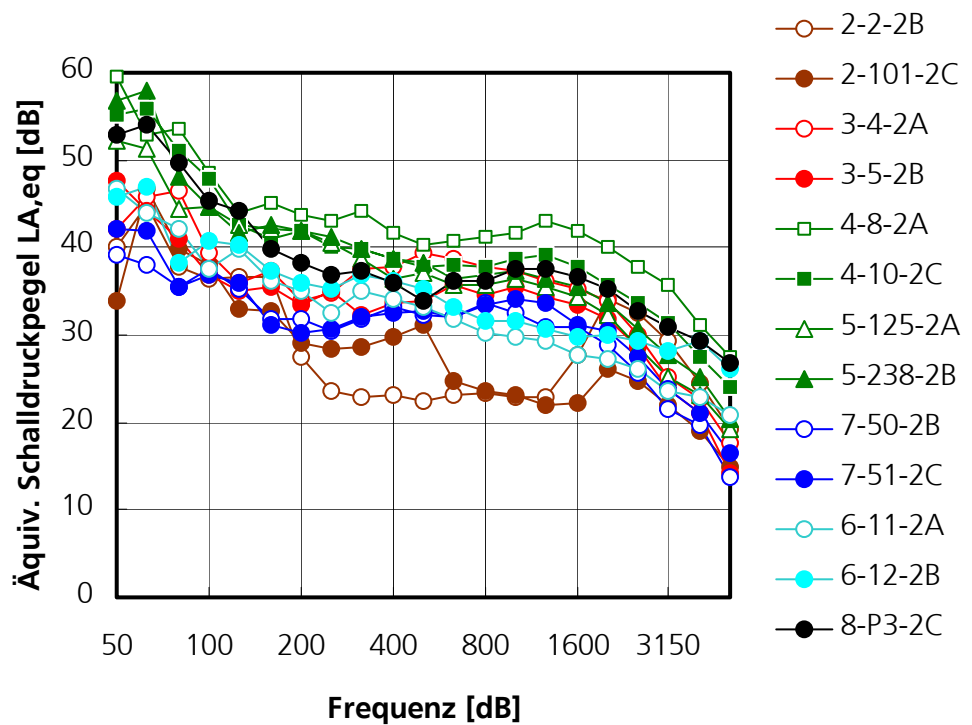


Abbildung 53:  
Frequenzabhängigkeit der Schallpegel bei geöffnetem Fenster im unbesetzten Klassenraum.

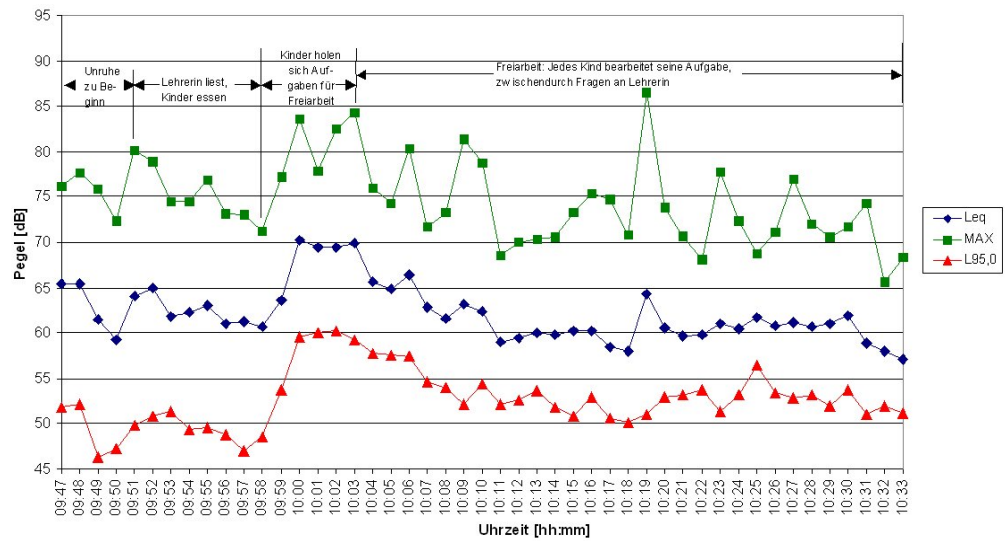


### 6.4.3 Während des Unterrichts

Messungen des Schallpegels im Unterricht wurden, wie in Abschnitt 4.3.3 erläutert, nur vereinzelt zusätzlich in das Messprogramm aufgenommen. Beispielhaft zeigt Abbildung 54 eine Auswertung von Unterrichtsprotokoll und Messdaten, bei der den aufeinander folgenden Messwerten aus 1-Minuten-Zeiträumen Unterrichtsphasen zugeordnet sind. Die Messwerte sind äquivalenter Schallpegel  $L_{A,eq}$ , Maximalpegel  $L_{A,max}$  und Hintergrundpegel  $L_{95,A}$ .

Der Wechsel der Unterrichtsphasen ist häufig in den Messwerten wiederzuerkennen. Die Qualität der akustischen Umgebung „Unterricht“ ist mehrdimensional und durch einen einzigen akustischen Parameter, sei es äquivalenter oder maximaler Schallpegel, nur unzureichend beschrieben. Je nach Fragestellung ist auch eine geeignete zeitliche Auflösung zu wählen. Im hier gewählten Zeitraster von einer Minute sind Redeanteile von Schülern und Lehrer im Dialog nicht mehr zu trennen.

Abbildung 54:  
Beispiel des Schallpegelverlaufs während einer Unterrichtsstunde.



## 7 Untersuchungsräume

### 7.1 Zweck und Vorgehen

Neben den Begehungen und Messungen zur Auswahl der Schulen und der akustischen Bestandsaufnahme der teilnehmenden Schulen ist die Einrichtung von Untersuchungsräumen an den teilnehmenden Schulen der dritte große Bestandteil des Teilprojektes A.

Ziel war es, an allen teilnehmenden Schulen einen Untersuchungsraum bereitzustellen, der einheitliche, möglichst optimale akustische Bedingungen bereitstellt und der dem jeweiligen Klassenraum, in dem die Kinder unterrichtet werden, abgesehen von der Akustik möglichst gleicht. Durch Vergleich der Ergebnisse von in Klassenraum und Untersuchungsraum wiederholt bearbeiteten Aufgaben konnte die akute Wirkung der akustischen Umgebung auf Hörverstehensleistungen erforscht werden. Der besondere Vorteil eines solchen wiederholten Vorgehens liegt in der prinzipbedingten Berücksichtigung der konfundierenden Variablen (s. Abschnitt 10.1). Um dabei möglichst große Unterschiede der Nachhallzeit zwischen Heimatklassenraum und Untersuchungsraum und damit nachweisbare Effekte auf die kognitiven Leistungen zu erzielen, wurden mit 0,5 s im unbesetzten Raum ein Wert unter der Anforderung von 0,7 s der DIN 18041 [3] angestrebt (vgl. Abschnitt 4.1.1).

Dieser Zielsetzung standen einige Randbedingungen gegenüber. Die Veränderungen sollten nach der Studie wieder beseitigt werden. Die Maßnahmen mussten im finanziellen und zeitlichen Rahmen des Projektes umsetzbar sein. Um die Belastung der Schulen möglichst kurz zu halten und das verwendete Material mehrfach nutzen zu können, wurde es von Schule zu Schule transportiert. Auf- und Abbau mussten zeitlich im Einklang mit dem Untersuchungsprogramm des Teilprojektes B (s. Abschnitt 9.3) stehen. Das bedeutete, dass in der

Regel je Woche an einem Tag Abbau an einer Schule, Transport zur nächsten Schule und Aufbau dort stattfanden.

Infolgedessen wurde auf Maßnahmen zur Verbesserung der Schalldämmung verzichtet. Provisorisch abgedichtete Türen oder Fenster hätten den Unterrichts- und Testablauf behindert. Maßnahmen an den Decken hätten gegen Herabstürzen gesichert werden müssen. Wie die Messergebnisse aus Abschnitt 6.3.1 zeigten, war die Schalldämmung zwischen benachbarten Räumen nicht verbesserungsbedürftig. Insgesamt standen Aufwand und erzielbare Wirkung von Maßnahmen zur Erhöhung der Schalldämmung in keinem sinnvollen Verhältnis.

Die Maßnahmen beschränkten sich daher auf die Raumakustik. Die Raumakustik kann durch Position, Qualität (Absorptionsgrad) und Fläche schallabsorbierender Oberflächen beeinflusst werden. Für dauerhafte Umbauten werden gerne, wegen der großen ungenutzten Fläche, die Decken mit absorbierendem Aufbau versehen. Da zum einen die frühen Reflexionen von der Decke einen positiven Beitrag zur Sprachverständlichkeit leisten und andererseits die Montage an der Decke besondere Umsicht bezüglich der Gefahr herabfallender Teile erfordert hätte, wurden nicht die Decken sondern vor allem die Rückwände mit Schallabsorbieren belegt. Falls notwendig wurden auch Flächen an den Seitenwänden oder Raumecken bestückt (s. Abbildung 55).

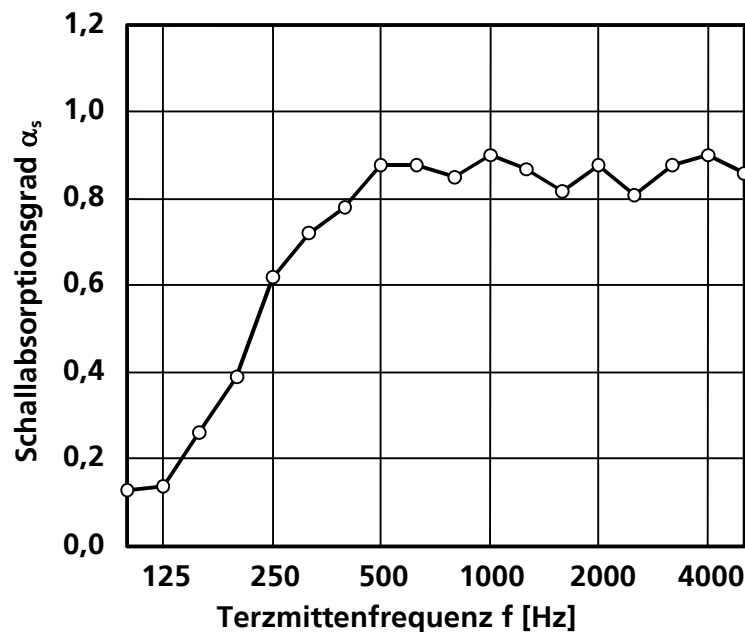
Abbildung 55:  
Polyestervliesmatten an den Rückseiten, Seitenwänden und Raumkanten der Untersuchungsräume.



Als absorbierendes Material wurden Polyestervliesmatten eingesetzt. Da sie weich und leicht sind, bergen sie ein geringes Unfallrisiko. Die weißen Matten wurden aufgehängt oder aufgestellt. Es wurden bevorzugt 10 cm dicke Matten mit einer Dichte von  $40 \text{ kg/m}^3$  verwendet. Angestrebt wurde eine einheitliche Nachhallzeit von 0,5 s im gesamten Frequenzbereich. Der Absorptionsgrad einer 5 cm dicken Schicht ist in Abbildung 56 über der Frequenz aufgetragen. Die eingesetzten Absorberflächen sind in Tabelle 13 angegeben.



Abbildung 56:  
Absorptionsgrad von 5 cm dicken Polyestervliesmatten der Dichte 40 kg/m<sup>3</sup> im Hallraum gemessen.



## 7.2 Nachhallzeiten

An Schule 2 wurde kein zusätzlicher Untersuchungsraum von der Schule zur Verfügung gestellt. Die messwiederholten Tests fanden dort nicht statt. Die Klassenräume hätten dem angestrebten Zustand ohne Behandlung entsprochen. An den Schulen 5 und 8 standen Räume zur Verfügung, deren Nachhallzeit der Zielsetzung von vorneherein entsprach. An Schule 5 handelte es sich dabei um einen Raum im selben Gang wie eines der beiden Klassenzimmer. An Schule 8 war dies der Raum einer der drei zweiten Klassen, der sich aber von den Heimatklassenräumen der ersten Klassen unterschied. An den Schulen 1, 4 und 7 lagen die zur Verfügung gestellten Räume in Nachbarschaft zu den Heimatklassenräumen. Als Untersuchungsraum musste auch auf einen Musiksaal (Schule 6) und einen Filmsaal (Schule 3) zurückgegriffen werden. Während der Musiksaal in der Nachhallzeit angepasst wurde, war die Nachhallzeit in dem Filmsaal der Schule 3 so lang und in den Klassenräumen so nahe dem Zielwert (s. Abbildung 58), dass es vorteilhaft war, die Klassenräume mit Absorbieren auszustatten und den Ablauf der Leistungstests abzuwandeln (s. Abschnitt 10.1.2).

Insgesamt wurden 6 Räume an 5 Schulen akustisch angepasst. Eine Übersicht gibt Tabelle 13.

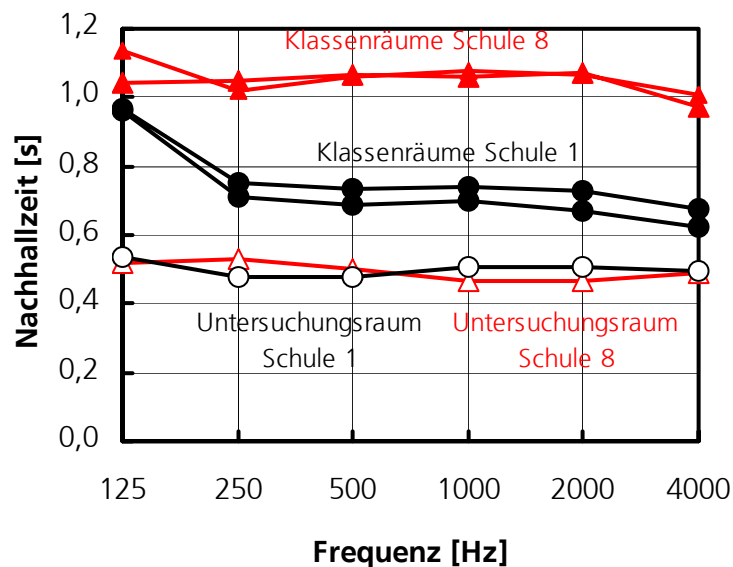
Tabelle 13:  
Übersicht der Untersuchungsräume.

Schule	Ähnlichkeit von Untersuchungsraum und Klassenraum	Zusätzliche Polyestervliesmatten
1	gleichartig	ca. 6 m <sup>2</sup> doppellagig
2	kein Untersuchungsraum	(bei Klassenräumen nicht notwendig)
3	Klassenräume verwendet, vertauschte Rollen mit Filmsaal	ca. 16 m <sup>2</sup> und 21 m <sup>2</sup> Filmsaal unbehandelt
4	angrenzender Klassenraum	ca. 32 m <sup>2</sup>
5	gleichartig	nicht notwendig
6	Musiksaal	ca. 36 m <sup>2</sup>
7	angrenzender Klassenraum	ca. 36 m <sup>2</sup>
8	Klassenraum der 2a, unterschiedlich zu Räumen der ersten Klassen	nicht notwendig

### 7.2.1 Erste Klassen

Im Untersuchungsraum der Schule 1 war wenig zusätzliche absorbierende Fläche aber mit Schwerpunkt der Absorption bei niedrigen Frequenzen notwendig um die Nachhallzeit bei 125 Hz von 0,65 s auf 0,54 s zu verkürzen. In diesem Fall wurden nur in den hinteren Raumecken 2 bzw. 3 Schichten Polyestervliesmatten aufgestellt.

Abbildung 57:  
Frequenzabhängige Nachhallzeiten in Klassen- und Untersuchungsraum der beteiligten ersten Klassen.



An Schule 8 entsprach der Frequenzgang der Nachhallzeit des als Untersuchungsraum verwendeten Klassenraumes der 2a bereits den Anforderungen (s. Abbildung 58)

## 7.2.2 Zweite Klassen

Abbildung 58 zeigt die Nachhallzeiten im Filmsaal der Schule 3. Sie erreichen bei den tiefen Frequenzbändern 125 Hz und 250 Hz Werte um 2,0 s und bei hohen Frequenzen um 1,4 s. Die Nachhallzeiten sind damit deutlich länger als in jedem anderen Klassenraum der Studie. Die Nachhallzeiten der Klassenräume der Schule 3 liegen dagegen bezüglich der Nachhallzeiten im Mittelfeld aller Klassenräume und konnten gut auf Nachhallzeiten um 0,5 s abgestimmt werden.

Abbildung 58:  
Besonders lange Nachhallzeiten im Filmsaal der Schule 3.

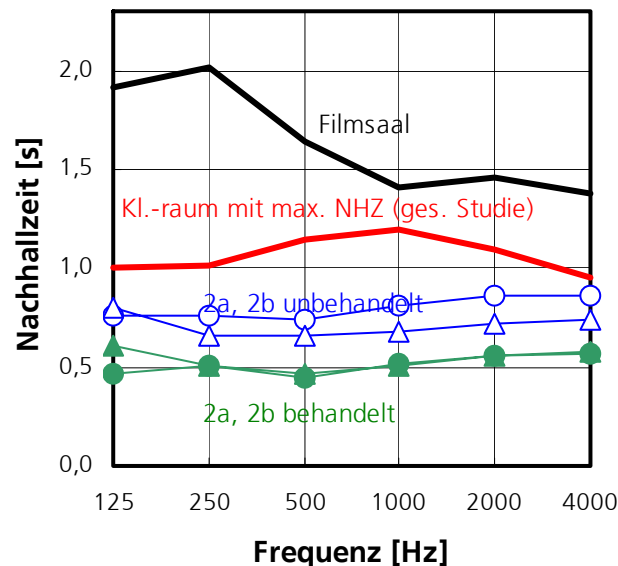
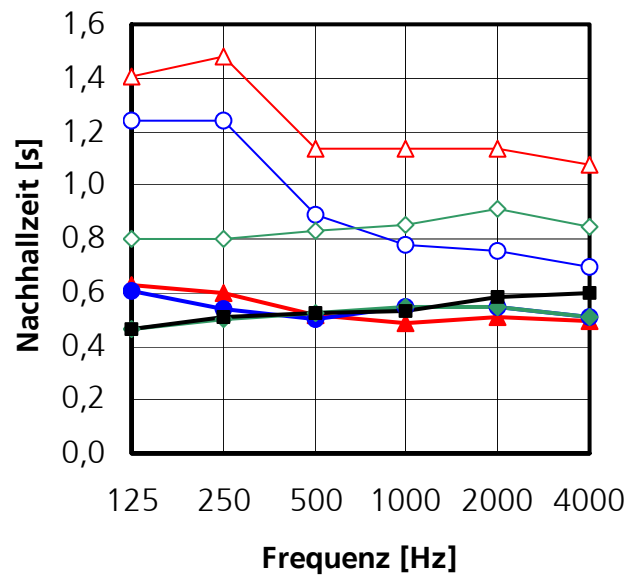


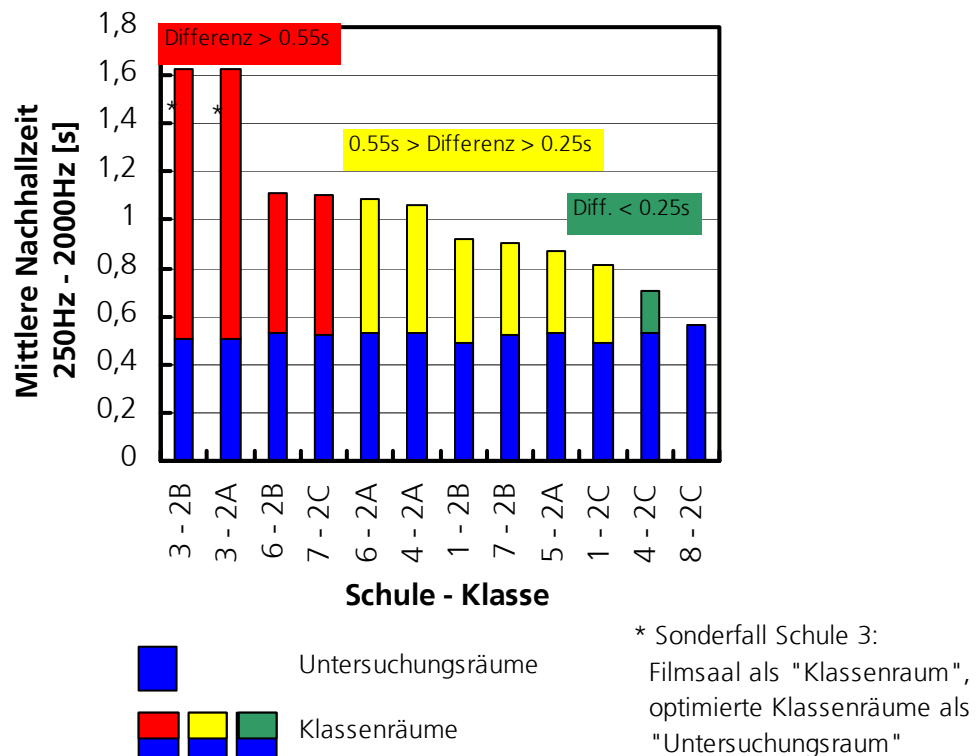
Abbildung 59 können die frequenzabhängigen Nachhallzeiten in den behandelten und unbehandelten Untersuchungsräumen der Schulen 4-7 entnommen werden. Die Nachhallzeiten der Untersuchungsräume an Schule 1 und 8 sind in Abbildung 57 abzulesen.

Abbildung 59:  
Nachhallzeiten der behandelten und unbehandelten Unterrichtsräume der Schulen 4-7.



Zur Auswertung der messwiederholten Tests wurden die Zweitklässler in drei Gruppen mit unterschiedlicher Differenz der frequenzgemittelten Nachhallzeit eingeteilt (s. Abschnitt 10.1.2). Die mittlere Nachhallzeit im Frequenzbereich 250 Hz bis 2000 Hz der Klassenräume und der Unterrichtsräume sind mit der Gruppeneinteilung in Abbildung 60 dargestellt.

Abbildung 60:  
Mittlere Nachhallzeit in den Untersuchungsräumen und Differenz zu den Klassenräumen.

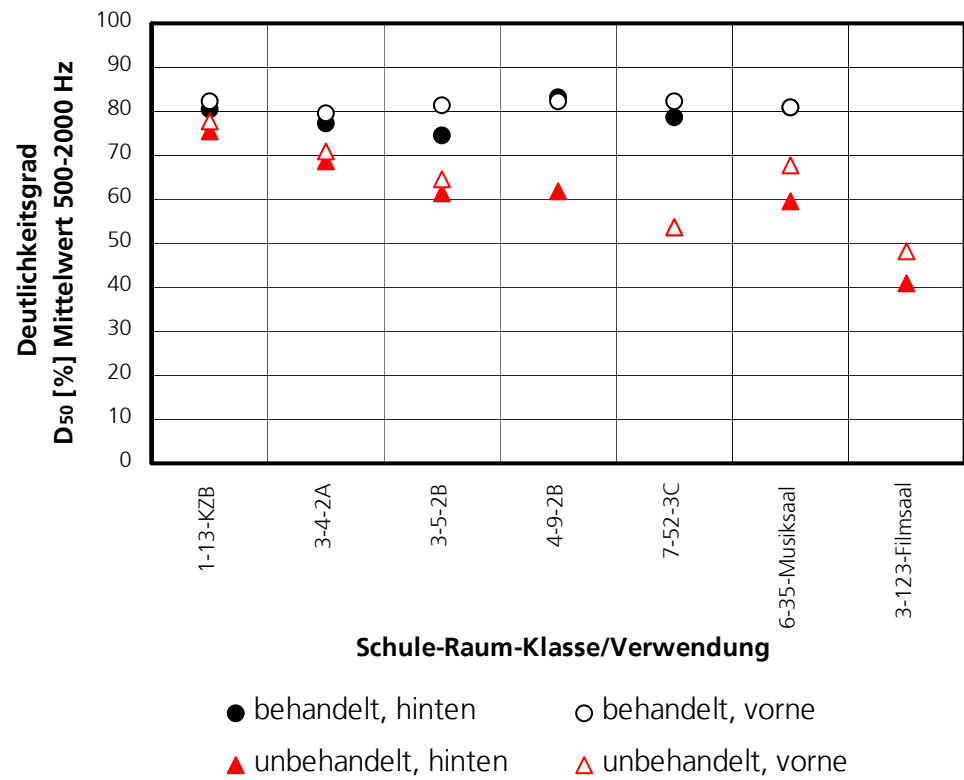


### 7.3 Unterschiede zwischen den Sitzplätzen in den Untersuchungsräumen

Wie in Abschnitt 6.2.5 und 6.2.6 gezeigt wurde, sind die Unterschiede der raumakustischen Parameter zwischen den Sitzplätzen in den unbehandelten Heimatklassenräumen im Rahmen dieser Studie vernachlässigbar. Gleiches gilt für die raumakustisch behandelten Untersuchungsräume.

Wie in Abschnitt 6.2.5 wurden der mittlere Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  bei den Frequenzen 500-2000 Hz auf den Übertragungswegen 1a, 1b und 2a zu den hinteren Sitzplätzen und auf den Übertragungswegen 1c, 1d und 2c zu den vorderen Sitzplätzen gemittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 61 dargestellt. Das Maximum der Differenz zwischen hinteren und vorderen Plätzen liegt unbehandelt bei 8 % und behandelt bei 7 %.

Abbildung 61  
 Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  in den Untersuchungsräumen auf den vorderen und hinteren Plätzen.



# Methodik und Ergebnisse der kognitionspsychologischen Untersuchungen (Teilprojekt B)

## 8 Vorarbeiten

Im Vorfeld der Hauptuntersuchung wurde die Validität und Praktikabilität der psychologischen Testbatterie durch Vorversuche im Labor (Universität Oldenburg) und im Feld (Grundschulen im Raum Eichstätt) geprüft. Die Voruntersuchungen im Feld sollten insbesondere die Erstellung eines realistischen Versuchs- und Zeitplans für die Hauptuntersuchung ermöglichen.

Die Voruntersuchungen begannen im Oktober 2004 und fanden im April 2005 ihren Abschluss. An den Felduntersuchungen nahmen insgesamt 198 Grundschüler (108 männlich, 90 weiblich) im Alter zwischen sieben und zehn Jahren teil. Die Größe der Stichproben variierte von 22 bis 27 Schülern pro Klasse. Aufgrund von Krankheit oder fehlender Einwilligung der Eltern nahmen insgesamt neun Schüler nicht an der Untersuchung teil.

Alle Aufgaben wurden von den Kindern im Klassenverband bearbeitet. Während der Untersuchungsdurchführung befand sich neben der Versuchsleiterin und einer studentischen Hilfskraft zumeist eine Lehrkraft im Raum. Die computergestützten Testaufgaben wurden mit Hilfe eines Laptops, eines Beamers und einer Aktivbox präsentiert. Der Lautsprecher befand sich zwischen Tafel und Lehrerpult und wurde ungefähr in Sitzhöhe auf die Grundschüler gerichtet. Die Lautstärke der dargebotenen Items wurde mittels eines Schallpegelmessers auf 66 dB (A) Leq aus einem Meter Entfernung eingestellt.

Alle Aufgaben der Voruntersuchung wurden in zwei aufeinander folgenden Unterrichtsstunden durchgeführt. Spätestens nach 45 Minuten wurde eine Pause von maximal fünf Minuten eingelegt.

Aus zeitökonomischen Gründen und aus Gründen der ökologischen Validität sollte die Hauptuntersuchung während der normalen Unterrichtszeit im Klassenverband, d.h. mit ca. 25 Kindern, durchgeführt werden. Da für einige der Testaufgaben bislang keine Erfahrungen mit solch großen Probandengruppen vorlagen, wurde im Rahmen der Voruntersuchung geprüft, mit welchen Problemen hierbei zu rechnen ist und wie viel Zeit die einzelnen Verfahren unter diesen Bedingungen in Anspruch nehmen. Letzteres war für die Erstellung des Zeitplans für die Hauptuntersuchung von großer Bedeutung.

Aufgrund der Erfahrungen in den Voruntersuchungen konnte konstatiert werden, dass sich alle Testverfahren gut zur Testung im Klassenverband eigneten. Für einige der Verfahren wurde jedoch mehr Durchführungszeit als bei der Einzel- bzw. Kleingruppentestung benötigt. Dies wurde bei der Erstellung des Versuchs- und Zeitplans der Hauptuntersuchung berücksichtigt.

Die kindgerechte Aufbereitung und die relativ geringe zeitliche Dauer der einzelnen Testverfahren bewirkten, dass die Probanden der Voruntersuchung engagiert und motiviert mitarbeiteten. An dem für die Hauptuntersuchung vorge-

sehenen zeitlichen Rahmen von einer Doppelstunde Testzeit pro Tag und Klasse konnte daher festgehalten werden.

Die laborexperimentellen Voruntersuchungen dienten der Prüfung der Validität der Testaufgaben. Wie in Teil 1 dieses Berichts dargestellt, sollten kognitive und auditive Grundfunktionen erfasst werden, die als Vorläuferfertigkeiten des Schriftspracherwerbs gelten und sich in früheren Studien als besonders sensitiv für negative Lärmwirkungen erwiesen haben. Die diesbezüglichen Testaufgaben sollten daher zwischen Kindern mit guten und schwachen schriftsprachlichen Leistungen differenzieren. Entsprechend dieser Hypothese zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen Kindern mit Lese-/Rechtschreibstörung und Kontrollkindern bei den Aufgaben zur phonologischen Bewusstheit und zum Satzverständnis (vgl. Heims 2005) [36]. Analoge Befunde zeigten sich bei der Überprüfung der Aufgabe „Lautdiskrimination“. Kinder mit Lese-/Rechtschreibstörungen erbrachten in dieser Aufgabe signifikant schlechtere Leistungen als Kinder mit guten schriftsprachlichen Leistungen (Steinbrink & Klatte, in Vorb. [61]). Insgesamt erwiesen sich die Testaufgaben als valide Indikatoren schriftsprachrelevanter Basisfunktionen.

## 9 Methodik der Hauptuntersuchung

### 9.1 Beschreibung der Testbatterie

Die kognitive Testbatterie bestand aus Diagnose-Instrumenten zur Lese- und Rechtschreibkompetenz sowie aus Testverfahren zu auditiven und kognitiven Grundfunktionen, die z.T. im Rahmen von früheren Projekten der Autoren entwickelt wurden und sich als äußerst sensitiv für die während der Bearbeitung vorliegenden akustischen Bedingungen erwiesen haben (vgl. Teil Einführung dieses Berichts). Weiterhin wurde ein nichtsprachlicher Intelligenztest eingesetzt. Hierdurch sollte eine Kontrolle der allgemeinen intellektuellen Lernvoraussetzungen bei der Analyse potenzieller Leistungsunterschiede in den sprachlichen Funktionen ermöglicht werden. Das Leistungsniveau im Bereich Lesen und Rechtschreiben wurde mit aktuellen und anerkannten psychometrischen Testverfahren erfasst (Mayringer & Wimmer 2003 [49] bzw. May 2002 [47]). Sozial-emotionale Aspekte des Schulbesuchs sowie die Lärmbelastung der Kinder wurde mit Hilfe von kindgerechten Fragenbögen erhoben (Rauer & Schuck 2004 [54] bzw. Henze 2006 [37]). Weiterhin wurde ein Elternfragebogen konstruiert, mit dem soziodemographische Variablen, das Vorliegen von Lern- und Entwicklungsstörungen sowie Aspekte der Wohnumwelt und des Medienverhaltens in der Familie erfasst wurden. Eine Übersicht über die erfassten Funktionsbereiche und der verwendeten Verfahren findet sich in Tabelle 14. Die Untersuchung der Erstklässler beschränkte sich auf die Bereiche Lesen, Rechtschreiben, Lautdiskrimination und Anweisungsverständnis. Die Elternfragebögen wurden an Erst- und Zweitklässler ausgegeben.



Tabelle 14:  
Leistungsbereiche und zugeordnete Testverfahren für die kognitionspsychologischen Untersuchungen.

<b>Funktionsbereiche</b>	<b>Testverfahren</b>
<b>I Komplexe Leistungen</b>	
<i>Lesen</i>	Stilles Lesen: Salzburger Lesescreening (SLS)
<i>Rechtschreiben</i>	Hamburger Schreibprobe (HSP 1+ und 2)
<i>Nichtsprachliche Intelligenz</i>	Coloured Progressive Matrices; Kurzfassung
<b>II Kognitive Grundfunktionen / Vorläuferfertigkeiten</b>	
<i>Phonologisches Kurzzeitgedächtnis</i>	Pseudowörter merken Seriellles Wiedergeben von Bilderfolgen
<i>Phonologische Bewusstheit</i>	Laute kategorisieren, „Odd One Out“ (OOO)
<i>Hörverstehen: Lautdiskrimination, Satzverständnis</i>	Lautdiskrimination (LD) Knuspel-Sätze für die 2.Klasse Satzverständnistest für Erstklässler
<b>III Fragebögen</b>	
<i>(Klasse 1 und 2) soziodemographische Variablen Schulprobleme, Entwicklungsstörungen, Wohnumwelt etc.</i>	Elternfragebogen
<i>Wahrnehmung / Erleben / Wohlbefinden in der Schule/ Lernfreude / Klassenklima Lärmbelastung Schule/zu Hause</i>	FEESS- Fragebogen zur Erfassung emotionaler und sozialer Schulerfahrungen für Kinder  Kinder-Lärmfragebogen (Henze 2006 [37])

Lesen:

Salzburger Lese-Screening (SLS): Dieser Test erfordert das stille Lesen und Beurteilen von Sätzen nach richtig / falsch (z.B. „Tee kann man trinken“). Es wird erfasst, wie viele Sätze in 3 Minuten korrekt bearbeitet werden können. Neben der Anzahl richtig bearbeiteter Sätze wurde zur schulstufenübergreifenden Analyse der Lesequotient (LQ) einbezogen. Der LQ ermöglicht eine Beurteilung der Leistungsergebnisse relativ zur statistischen Norm. Er drückt aus, wie weit

die bei einem Kind gemessene Lesefertigkeit vom Durchschnitt der Normierungsstichprobe abweicht. Die Skalierung des LQ entspricht der des Intelligenzquotienten (Mittelwert 100, Standardabweichung 15).

Rechtschreiben: Hamburger Schreibprobe (HSP)

Erstklässler: HSP 1+, Zweitklässler: HSP 2.

Die HSP besteht aus einzelnen Wörtern, die nach Bildvorlagen im eigenen Tempo geschrieben werden, sowie aus Sätzen, die in einem auch für die langsamsten Schreiber geeigneten Tempo diktiert werden. Um die für die schnelleren Schreiber entstehenden Wartezeiten zu überbrücken, wurden vorbereitete Rätselblätter ausgegeben. Als quantitatives Maß der Rechtschreibleistung wird die Anzahl der richtig geschriebenen Wortelemente erfasst („Graphemtreffer“).

Nichtsprachliche Intelligenz: CPM

Hier wurde eine Kurzfassung der „Coloured Progressive Matrices“ eingesetzt. Den Kindern werden visuelle Muster präsentiert, in denen jeweils ein „Puzzlestein“ fehlt. Aus sechs Alternativen, die mit den Ziffern 1 bis 6 bezeichnet sind, soll das Teil ausgewählt werden, welches das unvollständige Muster sinnvoll ergänzt. Die Nummer des ausgewählten Teils ist in das Antwortblatt einzutragen. Pro Aufgabe standen 30 Sekunden zur Verfügung, anschließend wurde durch einen Gong der Beginn des nächsten Durchgangs angekündigt. Die Aufgabe wurde anhand von zwei Beispielen erläutert, anschließend folgten 12 Aufgaben mit aufsteigendem Schwierigkeitsgrad.

Lautdiskrimination im Störgeräusch

Den Kindern werden jeweils 3 Bilder von leicht benennbaren Objekten präsentiert, deren verbale Bezeichnungen sich klanglich ähneln (z.B. Fee – Reh – See). Ein Wort wird dazu akustisch präsentiert (z.B. „Reh“). Die Aufgabe besteht darin, das dem Wort entsprechende Bild auf dem Antwortbogen anzukreuzen. Vor Durchführung der Testaufgabe wurden alle Bilder präsentiert und gemeinsam benannt.

Die Aufgabe besteht aus insgesamt 24 Testwörtern. Durch Umkehrung der Reihenfolge der Testitems wurden 2 Pseudoparalleltestformen konstruiert.

Sämtliche Wörter wurden in einem sprachlichen Störgeräusch präsentiert. Als Störgeräusch diente ein 3 Sekunden andauerndes Stimmengewirr ohne erkennbare Einzelwörter (es handelte sich um eine Kunstkopf-Aufnahme von ca. 60 Studierenden, die sich vor Seminarbeginn miteinander unterhielten). Das Testwort setzte jeweils 1 Sekunde nach Onset des Stimmengewirrs ein.

Das Signal-Rausch-Verhältnis wurde durch Vorversuche mit Zweitklässlern so adjustiert, dass eine mittlere Schwierigkeit erreicht wurde (ca. 70 % Sprachverständlichkeit, Ratewahrscheinlichkeit: 33,3 %). Dies konnte nur durch Variation des Signal-Rausch-Verhältnisses (S/N) innerhalb der Wortliste erreicht werden. Das S/N betrug bei den leichter zu diskriminierenden Wörtern -5, bei den schwierigeren -3 dB (Average RMS).

## Satzverständnis: Verstehen komplexer Anweisungen

Es werden mehrteilige mündliche Anweisungen gegeben, die auf den Antwortbögen auszuführen sind. Der Test für die Zweitklässler basiert auf dem Untertest „Hörverstehen“ aus Knuspel's Leseaufgaben (z.B. Satz 1\_A: „Wie heißt Du mit Nachnamen? Schreibe nur die ersten 3 Buchstaben Deines Nachnamens in Druckbuchstaben auf die Linie!“ Marx 1998 [46]).

Für die Erstklässler wurde ein ähnliches Verfahren konstruiert, welches jedoch weniger Vorkenntnisse voraussetzt (z.B. Satz 1\_A: „Male ein Kreuz unter den Ball, der neben dem Stuhl liegt“). Beide Tests liegen in 2 Paralleltestformen vor, die inhaltlich unterschiedliche, jedoch strukturell identische Anweisungen enthalten (Satz 1\_B: „Male einen Kreis unter das Buch, das neben dem Ball liegt“). Beide Tests werden anhand eines Punkteschemas ausgewertet, welches die richtig bearbeiteten Elemente der Anweisungen erfasst. Der Test für die Zweitklässler umfasst 14 Sätze pro Testform, der Erstklässler-Test 8 Sätze pro Testform (zzgl. Übungssätze).

## Phonologisches Kurzzeitgedächtnis – visuell: Bilderfolgen wiedergeben

Bei dieser Aufgabe werden den Kindern jeweils 4 Bilder von leicht benennbaren Objekten nacheinander präsentiert, die aus einem Pool von jeweils 6 Items gezogen wurden. Diese Sequenz muss schriftlich reproduziert werden („serial recall“). Diese Aufgabe erfasst die Fähigkeit, visuelle Informationen in phonologische Codes zu transformieren und diese im Arbeitsgedächtnis verfügbar zu halten.

Es wurden 3 verschiedene Itempools verwendet:

- Unähnliche Einsilber: Hund, Bett, Schiff, Haus, Ball, Topf
- Phonologisch ähnliche Einsilber: Hut, Kuh, Stuhl, Schuh, Buch, Uhr
- Dreisilber: Luftballon, Pullover, Zahnbürste, Schmetterling, Banane, Telefon.

Die Variation der Items erlaubt eine Kontrolle der Inanspruchnahme des phonologischen Arbeitsgedächtnisses beim Memorieren der Bilder. Eine schlechtere Leistung bei ähnlich klingenden und langen Wörtern zeigt, dass die Items phonologisch enkodiert und durch inneres Wiederholen (Rehearsal) memoriert werden (s. Baddeley 2000 [13]). Der Rehearsalprozess wird ab etwa 7 Jahren spontan eingesetzt, während jüngere Kinder eher zu einer visuellen Repräsentation bildlichen Materials tendieren (Gathercole 2004 [29]). Defizite in der Entwicklung des phonologischen Arbeitsgedächtnisses stehen mit zahlreichen Lern- und Entwicklungsstörungen in Zusammenhang (s. Hasselhorn 2003 [34]).

Die Darbietungszeit pro Bild sowie das Inter-Stimulus-Intervall betragen jeweils 1 Sekunde. Nach der Präsentation des letzten Bildes muss die gezeigte Bilderfolge reproduziert werden. Um dies im Gruppenversuch zu ermöglichen, wurde auf den Antwortblättern für jeden Versuchsdurchgang der entsprechende Itempool (6 Bilder) dargestellt. Die Reihenfolge der 4 gezeigten Bilder wird durch Zuordnen der Ziffern 1 bis 4 zu den betreffenden Objekten wiedergege-

ben. Es werden jeweils 4 Bilderfolgen aus den 3 Itempools, d.h. insgesamt 12 Durchgänge bearbeitet.

Die Aufgabe wurde in einem Vorversuch mit 45 Zweitklässlern einer Eichstätter Grundschule geprüft. Sie erwies sich als gut durchführbar im Klassenverband und hinsichtlich der Schwierigkeit angemessen. Weiterhin zeigten sich erwartungsgemäß hochsignifikante Effekte der phonologischen Ähnlichkeit und der Wortlänge.

#### Phonologisches Kurzzeitgedächtnis - auditiv: Pseudowörter merken

Bei dieser Aufgabe werden Paare von Pseudowörtern vorgesprochen. Die Länge der Pseudowörter variiert zwischen 4 und 6 Silben, das Inter-Stimulus-Intervall beträgt 3 Sekunden. Dieses Intervall ist mit einem Stimmengewirr ausgefüllt, welches auch bei der Lautdiskriminationsaufgabe verwendet wurde (s.o.). Die Pseudowörter selbst werden ohne Störgeräusch präsentiert, um eine einwandfreie Identifikation zu gewährleisten. Auf den Antwortbögen ist anzukreuzen, ob die Wörter gleich (z.B. „relomano – relomano“) oder nicht gleich (z.B. „gadibola – gabodila“) sind. Die Antworten „gleich“ und „nicht gleich“ sind auf den Antwortbögen durch Abbildungen zweier identischer Objekte (2 Autos) bzw. zweier unterschiedlicher Objekte (Auto und Fahrrad) realisiert.

Die Aufgabe besteht aus 24 Durchgängen (12 gleiche und 12 ungleiche Paare). Durch Umkehrung der Reihenfolge der Testitems wurden 2 Paralleltestformen konstruiert. Das Behalten von Pseudowörtern ist eine Standardaufgabe zur Messung der Kurzzeitgedächtniskapazität bei Kindern (Baddeley et al. 1998 [13]).

#### Phonologische Bewusstheit: Laute kategorisieren

Zur Prüfung der phonologischen Bewusstheit wurde das Kategorisieren von Lauten eingesetzt. Die Kinder hatten zu entscheiden, welches von jeweils 3 Wörtern sich im An- oder Endlaut von den anderen beiden Wörtern unterschied („Odd-One-Out“, vgl. Bradley & Bryant 1983 [17], s.a. Stock et al. 2004 [62]). In jedem Durchgang wurden den Kindern drei einsilbige Wörter mit einem Inter-Stimulus-Intervall von 1 Sekunde präsentiert. Danach erschien auf dem Bildschirm eine Schlange, von der entweder der Kopf („der Anfang“), – oder der Schwanz („das Ende“) hinter einer Kiste hervorschaute.

Wenn der Anfang der Schlange erschien, sollten die Kinder entscheiden, welches der drei Wörter sich am Anfang von den anderen zwei Wörtern unterschied. Wenn das Ende der Schlange erschien, sollten die Versuchspersonen entscheiden, welches von den drei Wörtern sich am Ende des Wortes von den anderen beiden Wörtern unterschied. Die Reihenfolge der An- und Endlaut-Aufgaben war zufällig mit der Einschränkung, dass sich keine Bedingung öfter als dreimal wiederholte. Für die Entscheidung hatten die Kinder 13 Sekunden Zeit, bis der nächste Durchgang durch den Gong angekündigt wurde. Die Aufgabe besteht aus 16 Versuchsdurchgängen. In den ersten 8 Durchgängen wurden Wörter präsentiert (z.B. „Wein-Satz-Blitz“), in den Durchgängen 9 bis 16 wurden Pseudowörter dargeboten (z.B. „Rack-Wiss-Ropp“).

In den Vorversuchen hatte sich gezeigt, dass bei dieser Aufgabe eine besonders intensive Instruktions- und Übungsphase erforderlich ist, um das Verständnis zu gewährleisten (s. Zwischenbericht 1). Nach Überarbeitung der Instruktion und Konstruktion weiterer Beispielaufgaben konnte dieses Problem gelöst werden.

#### Kinder-Lärmfragebogen

Im Rahmen einer Diplomarbeit (Henze 2006 [37]) wurde ein Fragebogen zur Lärmbelastung in der häuslichen und schulischen Umwelt konstruiert. Der Fragebogen umfasst Items zur Situation innerhalb des Klassenraums („In der Stillarbeit ist es wirklich still“, „Ich kann die Stimme meiner Lehrerin gut verstehen“, „Meine Mitschüler sind oft sehr laut“), zur Außenlärmbelastung („Wenn die Fenster im Klassenzimmer geöffnet sind, dann verstehe ich die Lehrerin schlecht“) sowie zur häuslichen Wohnumwelt („Wegen des vielen Verkehrs ist es gefährlich, draußen zu spielen“, „Ich höre zu Hause Autos von der Straße“). Die Aussagen wurden von den Mitarbeiterinnen vorgelesen und von den Kindern durch Ankreuzen auf den Antwortbögen mit „stimmt“ oder „stimmt nicht“ beantwortet.

Fragebogen zur Erfassung sozialer und emotionaler Schulerfahrungen bei Grundschulkindern (FEES, Rauer & Schuck 2004 [54]).

Der Fragebogen gliedert sich in 2 Teile mit den Skalen „Soziale Integration“, „Klassenklima“ und „Fähigkeits-Selbstkonzept“ bzw. „Schuleinstellung“, „Anstrengungsbereitschaft“, „Lernfreude“ und „Gefühl des Angenommenseins“. Der Fragebogen besteht ebenfalls aus einfachen Aussagen, die vorgelesen und mit „stimmt“ oder „stimmt nicht“ beantwortet werden müssen (z.B. „Nach den Ferien freue ich mich auf die Schule“).

#### Elternfragebogen:

Der Elternfragebogen umfasst soziodemographische Aspekte (v.a. Bildungsstand und Einkommen der Eltern, Muttersprache des Kindes), Fragen zur Wohnumwelt (insbesondere Lärmbelastung) und zum Medienverhalten in der Familie sowie zu Schulproblemen und Entwicklungsstörungen des Kindes. Der Fragebogen war vorab in verschiedene Landessprachen übersetzt worden, so dass auch Eltern mit schlechten Deutschkenntnissen an der Befragung beteiligt werden konnten. Die Fragebögen wurden den Kindern am ersten Tag der Untersuchungswoche mitgegeben und am Ende der Untersuchungswoche wieder eingesammelt. Aufgrund der guten Akzeptanz der Untersuchung bei den Eltern wurde ein hoher Rücklauf der Fragebögen erreicht. Von 487 ausgegebenen Fragebögen wurden 429 ausgefüllt zurückgebracht (88,1 %).

## 9.2 Stichprobe

Die Stichprobe der Schulklassen wurde zum einen auf der Grundlage von bau- und raumakustischen Messungen rekrutiert, welche vom Fraunhofer Institut für Bauphysik vorgenommen worden waren (vgl. Abschnitt 5). Weiterhin wurden Lehrerfragebögen eingesetzt, anhand derer organisatorische Aspekte (Größe und Zusammensetzung der Klasse, tägliche Unterrichtszeit, Unterrichtszeit im Klassenraum etc.) abgefragt wurden, die eventuell einer Teilnahme entgegen-

stehen könnten. Primäres Kriterium der Auswahl stellten die Nachhallzeiten in den Klassenräumen der Kinder dar. Diese lagen zwischen 0,49 und 1,11 Sekunden.

Insgesamt nahmen 487 Kinder aus 17 zweiten und 4 ersten Schulklassen aus 8 Stuttgarter Grundschulen an der Untersuchung teil. 30 weitere Kinder aus diesen Klassen (5,8 %) konnten aufgrund fehlender Einverständniserklärung der Eltern oder aus Krankheitsgründen nicht einbezogen werden.

89 der teilnehmenden Kinder besuchten die erste, 398 die zweite Klassenstufe. Die ersten Klassen wurden nachträglich in das ursprünglich auf Zweitklässler beschränkte Design aufgenommen, da in einer der ausgewählten Schulen (Schule 8) in den Räumen der ersten Klassen besonders ungünstige akustische Bedingungen vorherrschten. Zu den beiden ersten Klassen dieser Schule wurden als Vergleichsgruppe zwei erste Klassen aus einer anderen Schule (Schule 1) ausgewählt, deren Klassenräume bessere akustische Bedingungen aufwiesen, die jedoch bezüglich des Anteils an Kindern mit nicht-deutscher Muttersprache vergleichbar waren.

Das Alter der Erstklässler lag im Mittel bei 7 Jahren, 5 Monaten, das der Zweitklässler bei 8 Jahren, 4 Monaten. Tabelle 15 und Tabelle 16 zeigen die Verteilung der Probanden auf die Schulen sowie Alter und Geschlechterverteilung. Weiterhin ist jeweils die Anzahl der Kinder mit Deutsch als Zweitsprache (DaZ) angegeben. In den ersten Klassen betrug der Anteil von Kindern mit nicht-deutscher Muttersprache 61,8 Prozent, bei den Zweitklässlern 34,7 Prozent.

Tabelle 15:  
Stichprobe der Erstklässler.

Schulcode	Erstklässler				Alter in Monaten Mittelwert (SD)
	Anzahl der teilnehmenden Klassen	Mädchen	Jungen	Gesamt (davon DaZ)	
Schule_1	2	24	13	37 (21)	88,08 (4,76)
Schule_8	2	24	28	52 (34)	89,12 (5,23)
<b>GESAMT</b>	<b>4</b>	<b>48 (53,9 %)</b>	<b>41 (46,1 %)</b>	<b>89 (55)</b>	<b>88,69 (5,04)</b>

Tabelle 16:  
Stichprobe der Zweitklässler.

Schulcode	Zweitklässler				
	Anzahl der teilnehmenden Klassen	Mädchen	Jungen	Gesamt (davon DaZ)	Alter in Monaten Mittelwert (SD)
Schule_1	2	16	15	31 (13)	100,00 (6,5)
Schule_2	2	21	23	44 (4)	100,23 (5,3)
Schule_3	2	28	24	52 (9)	101,19 (4,53)
Schule_4	2	19	26	45 (16)	102,13 (6,91)
Schule_5	2	23	22	45 (23)	102,55* (6,28)
Schule_6	2	21	26	47 (11)	102,15 (5,44)
Schule_7	2	27	25	52 (15)	103,62 (5,91)
Schule_8	3	46	36	82 (47)	101,30 (6,91)
<b>GESAMT</b>	<b>17</b>	<b>201 (50,5 %)</b>	<b>197 (49,5 %)</b>	<b>398 (138)</b>	<b>101,70 (6,11)</b>

Zur Anonymisierung der Daten wurde jedem Kind ein Zeichen zugewiesen (Löwe, Schaukel, Eis, Sonne...). Dieses Zeichen war auf allen Versuchsunterlagen des jeweiligen Kindes abgebildet. Schule und Klasse wurden durch einen Buchstabencode und die Farbe des Bildes codiert. Die Nachnamen der Kinder wurden nicht erfasst. Eine Zuordnung der Zeichen zu den jeweiligen Kindern ist jedoch prinzipiell über die erfassten Vornamen und den Geburtsmonat möglich (Pseudo-Anonymisierung). Diese Option wurde beibehalten, um Eltern und Lehrkräfte gegebenenfalls über besondere Auffälligkeiten informieren zu können (z.B. Verdacht auf Hörstörungen). Dies geschah nach Abschluss der Datenerhebung im Rahmen eines Gesprächs über die Untersuchungsergebnisse mit den Lehrkräften und Schulleiterinnen. Die Schulen, die kein Gespräch wünschten, wurden schriftlich über die schulbezogenen Ergebnisse informiert. Weiterhin wurde den Lehrkräften angeboten, nach Rücksprache mit den Eltern die Leistungen einzelner Kinder mit den Projektmitarbeiterinnen zu besprechen. Dieses Angebot wurde in wenigen Einzelfällen in Anspruch genommen.

### 9.3 Ablauf der Hauptuntersuchung

Die Durchführung der Hauptuntersuchung erfolgte im Zeitraum 30.5. bis 22.7.05. Die Daten wurden in jeder Schule an 4 bis 5 Tagen innerhalb einer Kalenderwoche erhoben. Die Untersuchungsdauer für die zweiten Klassen betrug maximal 7 Unterrichtsstunden. Die Erstklässler wurden mit einem reduzierten Instrumentarium untersucht, welches innerhalb von 3 Unterrichtsstunden abgearbeitet werden konnte. Die Untersuchungszeit pro Klasse und Tag wurde auf maximal eine Doppelstunde beschränkt, um die Kinder nicht zu überfordern.

In Abstimmung mit den teilnehmenden Schulen wurden individuelle Zeitpläne für die Untersuchungsdurchführung entwickelt. Hierbei wurden die jeweiligen Stundenpläne der Klassen (z.B. Religions- und Sportunterricht), die Raumbelagungen und andere schulinterne Besonderheiten (z.B. Bundesjugendspiele, Pädagogischer Tag) berücksichtigt. Ein exemplarischer Versuchs- und Zeitplan ist

Tabelle 17 zu entnehmen. Einige Tage vor Beginn der Untersuchung wurde in der jeweiligen Schule ein Informationsabend für die Eltern, Lehrkräfte und Schulleiter durchgeführt, auf dem die ProjektmitarbeiterInnen Inhalte, Ziele und den genauen Ablauf der Studie vorstellten und Fragen beantworteten. Durch dieses Vorgehen konnte eine hohe Akzeptanz bei den Eltern erreicht werden.

Tabelle 17:  
Versuchs- und Zeitplan zur Durchführung der Untersuchung

Schulstunden	Montag 04.07.05	Dienstag 05.07.05	Mittwoch 06.07.05	Donnerstag 07.07.05
<b>1.</b> <b>8:00-8:45</b>	Untersuchungsraum vorbereiten	<i>Laute unterscheiden</i> <i>Pseudowörter merken</i>	Schreiben Laute kategorisieren	<i>Laute unterscheiden</i> <i>Pseudowörter merken</i>
<b>2.</b> <b>8:45-9:30</b>	Untersuchungsraum vorbereiten	<i>Satzverstehen</i> <i>Lärmfragebogen</i>	Satzverstehen Pseudowörter merken	<i>Satzverstehen</i> <i>Lärmfragebogen</i>
<b>3.</b> <b>9:50-10:35</b>	Wir stellen uns vor Lesescreening Puzzle	Fragebogen Teil 1 Laute unterscheiden	Fragebogen Teil 1 Laute unterscheiden	(Religion)
<b>4.</b> <b>10:35-11:20</b>	Wir stellen uns vor Lesescreening Puzzle	Fragebogen Teil 2 Bilder behalten	Fragebogen Teil 2 Bilder behalten	Schreiben Laute kategorisieren
<b>5.</b> <b>11:40-12:25</b>				Satzverstehen Pseudowörter merken

Legende:

xyz Hellgrau: Gruppenuntersuchung Klasse 2a

xyz Dunkelgrau: Gruppenuntersuchung Klasse 2c

*kursiv* = Durchführung im Klassenraum (diese Tests wurden einmal im Klassenzimmer und einmal im Untersuchungsraum durchgeführt)

normal = Durchführung im Untersuchungsraum

In 7 der 8 teilnehmenden Schulen wurde für den Durchführungszeitraum ein Untersuchungsraum bereitgestellt. Die Untersuchungsräume waren bezüglich der Raumakustik vergleichbar; ihre Nachhallzeiten lagen im nach DIN 18041 (Neufassung Mai 2004) anzustrebenden Bereich. Gegebenenfalls wurde dieses Kriterium durch Einbringen von Absorbermaterialien in den Untersuchungsraum erreicht (s. hierzu Abschnitt 7 dieses Berichts). In Schule 2 war aus organisatorischen Gründen kein Untersuchungsraum verfügbar, die Räume der teilnehmenden Klassen dieser Schule entsprachen jedoch ohnehin den geltenden Anforderungen. Somit wurde (a) eine Testdurchführung unter konstanten



raumakustischen Bedingungen sowie (b) in 7 Schulen auch ein Vergleich der Leistungen in den Heimatklassenräumen der Kinder mit den Leistungen im akustisch optimierten Untersuchungsraum möglich. Letzteres wurde dadurch realisiert, dass drei der auditiven Testaufgaben (Lautdiskrimination, Pseudowörter-Merken, Satzverständnis) sowohl im Untersuchungsraum als auch im Klassenraum durchgeführt wurden (Messwiederholung). Zur Kontrolle von Übungseffekten bearbeitete jeweils eine Klasse einer Schule die Aufgaben erst im Untersuchungsraum und dann im Klassenraum, die teilnehmende Parallelklasse wurde in umgekehrter Reihenfolge getestet.

Sämtliche Testverfahren wurden im Klassenverband durchgeführt. Die Klassenlehrerinnen waren zwar eingeladen, während der Untersuchungsstunden im Raum zu bleiben und von einem hinteren Sitzplatz aus zuzusehen, dies wurde jedoch nur von wenigen angenommen. In den meisten Fällen hielten sich die Lehrkräfte während der Untersuchungszeit außerhalb des Raumes auf.

Für die Testdurchführung wurden die Tische je nach Klassengröße in 4 bis 5 Sitzreihen frontal zum Lehrerpult aufgestellt. Die Anordnung der Tische wurde in allen Klassen- und Untersuchungsräumen weitmöglichst konstant gehalten. Bei den Tests, die im Klassenraum und im Untersuchungsraum durchgeführt wurden, saßen die Kinder zu beiden Testzeitpunkten an analogen Sitzplätzen. Die Sitzplätze der Kinder im Klassen- und Untersuchungsraum wurden im Untersuchungsprotokoll festgehalten. Um zu vermeiden, dass sich die Kinder gegenseitig ablenken bzw. voneinander abschreiben, wurden zwischen benachbarten Sitzplätzen Trennwände aus festem Pappkarton aufgestellt. Dieses Vorgehen hatte sich in Vorversuchen als notwendig erwiesen, da aufgrund der bewusst übersichtlich gestalteten Antwortbögen schon „aus den Augenwinkeln“ erkannt wird, welche Antwort der Tischnachbar einträgt.

In der ersten Unterrichtsstunde stellten sich die Mitarbeiterinnen den Kindern vor und informierten sie über den Ablauf der Untersuchungswoche sowie über das Kodierungsverfahren (jedes Kind erhielt „sein“ Zeichen). Als Dankeschön für die Mitarbeit an der Studie wurde der Klassenlehrerin am letzten Untersuchungstag im Beisein der Kinder ein Geldgeschenk für die Klassenkasse überreicht, außerdem erhielt jedes Kind eine kleine Süßigkeit.

Jede Testaufgabe wurde zunächst anhand von Beispielen erläutert, anschließend wurden einige Übungsaufgaben durchgeführt, wobei die Kinder Fragen stellen durften und die Projektmitarbeiterinnen die Antworten der Kinder auf den Übungsblättern kontrollierten, um zu prüfen ob die Instruktion verstanden wurde. Wenn dies gewährleistet war, wurde die Testaufgabe durchgeführt. Während der Durchführung waren Zwischenfragen nicht mehr erlaubt, jedes Kind bearbeitete die Aufgabe still für sich.

Die Lese- und die Rechtschreibtests wurden gemäß den vorgegebenen Durchführungsanweisungen bearbeitet. Die Fragebögen für die Kinder bestanden aus einfachen Aussagen, die von den Mitarbeiterinnen vorgelesen wurden und dann von den Kindern auf vorgefertigten Antwortbögen durch Ankreuzen mit „stimmt“ oder „stimmt nicht“ beantwortet wurden. Ein selbständiges Bearbeiten schriftlich vorgelegter Fragebögen ist bei Kindern dieser Altersstufe noch nicht möglich.

Die Instruktion und Durchführung der Testaufgaben zur nichtsprachlichen Intelligenz sowie zu den kognitiven Grundfunktionen erfolgte mittels des Präsentationsprogramms Microsoft PowerPoint XP. Die Darbietung der Grafiken (Bilder, Antwortbögen) erfolgte über ein Notebook, welches mit einem besonders geräuscharmen Beamer (NEC VT 670) verbunden war.

Sämtliche Sprachmaterialien waren vorab von einem ausgebildeten männlichen Sprecher im Schall-Labor des Instituts für Psychologie der Universität Oldenburg gesprochen und mittels eines Kunstkopfsystems (Cortex MK2) aufgenommen worden (Sampling Rate 44100 Hz; 16-Bit-Auflösung); anschließend erfolgte eine Umwandlung in Wav-Files und digitale Bearbeitung mittels des Sound-Editierprogramms „CoolEdit“. Die resultierenden Signale wurden in die Präsentationen eingebunden.

Die Sprachsignale wurden über eine an das Notebook angeschlossene Aktivbox (Genelec Active Monitor Model 1029A) präsentiert, welche sich auf dem Lehrerpult vor der ersten Tischreihe befand. Der Sprachsignalpegel wurde anhand eines Kalibrierrauschens auf 66 dB(A) in 1 m Entfernung justiert. Dies entspricht in etwa dem Pegel einer angehobenen Lehrerstimme.

Bei jeder Testaufgabe wurde das aktuelle Antwortblatt projiziert, wobei ein roter Pfeil auf die für den jeweiligen Versuchsdurchgang gültige Zeile deutete. Weiterhin kontrollierten die im Raum anwesenden Mitarbeiterinnen, ob die Kinder das richtige Antwortblatt aufgeschlagen hatten und die Antworten in die richtigen Zeilen eintrugen. Jede Einzelaufgabe wurde mit einem akustischen Achtungssignal angekündigt („Gong“). Abbildung 62 zeigt eine zweite Klasse während der Versuchsdurchführung.

Abbildung 62:  
Datenerhebung in einer zweiten Klasse.



## 10 Ergebnisse

### 10.1 Akute Wirkungen der Nachhallzeit auf das Hörverstehen

Die akuten Wirkungen der Nachhallzeit auf die Hörverstehensleistungen wurden im Rahmen eines Messwiederholungsplanes erfasst. Hierzu bearbeiteten die Zweitklässler die Aufgaben „Lautdiskrimination“, „Behalten von Pseudowörtern“ und „Satzverstehen“ einmal in ihrem Klassenraum und einmal im akustisch behandelten Untersuchungsraum. Bei den Erstklässlern wurden nur die Aufgaben „Lautdiskrimination“ und „Satzverständnis“ eingesetzt. Dadurch, dass die Leistung jedes Kindes im Untersuchungsraum mit der Leistung desselben Kindes im Klassenraum verglichen wurde, konnten konfundierende Variablen wie unterschiedliche Deutschkenntnisse und unterschiedliche häusliche Sprachanregung aus der Analyse eliminiert und eine „reine“ Einschätzung der Wirkungen der Nachhallzeiten gewährleistet werden. Es wurde von der Hypothese ausgegangen, dass diejenigen Kinder, deren Klassenräume lange Nachhallzeiten aufweisen, bessere Hörverstehensleistungen zeigen, wenn die Aufgabe im Untersuchungsraum durchgeführt wird. Bei Kindern aus akustisch günstigen Klassenräumen wurde keine bedeutsame Leistungsverbesserung erwartet.

Die Differenz der mittleren Nachhallzeiten von 250 Hz bis 2 kHz zwischen den Klassenräumen der Kinder und dem Untersuchungsraum in der jeweiligen Schule diente als unabhängige Variable. Die Leistungsunterschiede zugunsten des Untersuchungsraumes sollten mit zunehmender Differenz ansteigen.

#### 10.1.1 Erstklässler-Untersuchung

##### Methodik

An diesem Untersuchungsteil beteiligten sich zwei erste Klassen aus Schule 8 ( $n=46$ ) und zwei erste Klassen aus Schule 1 ( $n=35$ ). Die beiden Klassenräume der Erstklässler aus Schule 8 wiesen mit  $T20=1,06$  s deutlich zu lange Nachhallzeiten auf. Hier wurde von einer Leistungsverbesserung im Untersuchungsraum ( $T20=0,49$ s) ausgegangen. Um ausschließen zu können, dass ein solcher Effekt allein durch die eventuell motivationssteigernde Wirkung der Testung in einem neuen, den Kindern unvertrauten Raum zustande kommt, wurden die Kinder aus Schule 1 einbezogen. Eine dieser Klassen ( $n=19$ ) bearbeitete nur den Lautdiskriminationstest, und zwar ebenfalls im Klassenraum und im Untersuchungsraum. Aufgrund der geringen Differenz der Nachhallzeit im Klassenraum dieser Kinder ( $T20=0,69$ s) zum Untersuchungsraum ( $T20=0,49$ ) wurden keine Leistungsunterschiede erwartet. Die andere erste Klasse aus Schule 1 ( $n=16$ ) wurde zweimal im Untersuchungsraum getestet, da ein Raumwechsel aus organisatorischen Gründen nicht möglich war. In dieser Gruppe bestand also kein Unterschied in den akustischen Bedingungen zwischen den Testzeitpunkten, ihnen wurde bezüglich der Nachhallzeitdifferenz der Wert 0 zugewiesen. Zusammenfassend unterschieden sich die Kinder beider Schulen folglich hinsichtlich der Variable „Nachhallzeitdifferenz zwischen den Testräumen“. Bei allen Kindern der Schule 1 lag dieser Wert unter 0,2 Sekunden, bei den Kindern aus Schule 8 bei 0,57 s. Ein signifikanter Einfluss der Raumakustik auf die Hörverstehensleis-

tungen sollte sich durch eine Leistungsverbesserung im Untersuchungsraum bei den Kindern der Schule 8 nachweisen lassen.

Alle Kinder bearbeiteten zunächst die Aufgabe „Lautdiskrimination“ und anschließend die Aufgabe „Satzverständnis“. In Schule 8 bearbeitete die eine Klasse die Aufgaben zunächst im Untersuchungsraum und dann im Klassenraum, die Parallelklasse wurde in umgekehrter Reihenfolge getestet. In Schule 1 bearbeitete die eine Klasse die Aufgabe zuerst im Untersuchungsraum und dann im Klassenraum. Bei der anderen Klasse, die die Aufgaben zweimal im Untersuchungsraum durchführte, wurden die Daten des zweiten Durchgangs der Bedingung „Untersuchungsraum“ zugewiesen, die des ersten der Bedingung „Klassenraum“ mit Nachhallzeitdifferenz 0 s. So konnte eine Kontrolle potentieller Übungeffekte in beiden Schulen gewährleistet werden.

### Ergebnisse

Tabelle 18 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Aufgaben „Lautdiskrimination“ und „Satzverständnis“ in Abhängigkeit vom Testraum und der Nachhallzeitdifferenz.

Tabelle 18:

Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) bei den Testaufgaben „Lautdiskrimination“ und „Satzverständnis“ in Abhängigkeit von Testraum und Nachhallzeitdifferenz bei Erstklässlern (N=81).

Nachhallzeit-Differenz (NHD)	Anzahl der Fälle (N)	Aufgabe	Leistung im Klassenraum M (SD)	Leistung im Untersuchungsraum M (SD)
NHD<0,2 s	35	Lautdiskrimination: (Anzahl richtige von 24)	13,29 (2,71) 55,38%	13,97 (2,51) 58,21 %
	16	Satzverständnis (erreichte Punkte von 34)	19,5 (5,0) 57,35 %	20,44 ((6,0) 60,12 %
NHD=0,57 s	46	Lautdiskrimination: Anzahl richtige von 24	13,13 (2,69) 54,71 %	15,52 (2,93) 64,67 %
	46	Satzverständnis (erreichte Punkte von 34)	21,2 (7,56) 62,35 %	21,37 (6,35) 62,85 %

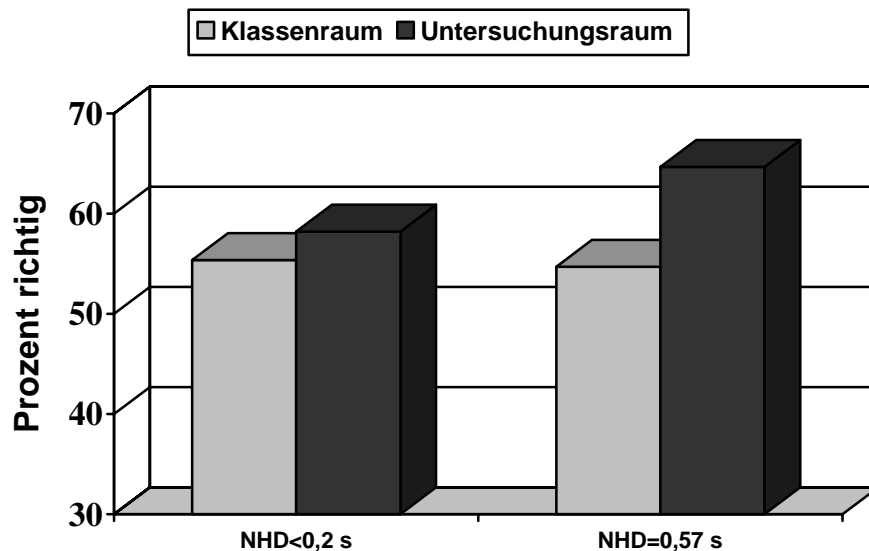
#### Lautdiskrimination

Die varianzanalytische Auswertung der Leistungen im Lautdiskriminationstest (Anzahl richtig gelöster Aufgaben von 24) mit dem messwiederholten Faktor

„Testraum“ (Klassenraum vs. Untersuchungsraum) und dem Gruppenfaktor „Nachhallzeitdifferenz“ (gering vs. hoch) erbrachte einen signifikanten Haupteffekt des Faktors „Testraum“ ( $F(1,79)=25.88$ ;  $p<0.001$ ). Der Haupteffekt des Gruppenfaktors „Nachhallzeitdifferenz“ erwies sich als nicht signifikant, jedoch zeigte sich eine bedeutsame Interaktion zwischen den beiden Faktoren ( $F(1,79)=7.95$ ;  $p<0.006$ ): Die Leistungsverbesserung im Untersuchungsraum war bei den Kindern aus Schule 8 wesentlich stärker ausgeprägt. Wie in Abbildung 63 dargestellt, zeigten diese Kinder eine um etwa 10 Prozent bessere Leistung, wenn die Aufgabe im Untersuchungsraum durchgeführt wurde. Die geringfügigen Leistungsunterschiede bei den Kindern der Schule 1 (Nachhallzeitdifferenz  $<0,2s$ ) erwiesen sich als nicht signifikant ( $T(34)=1,55$ ;  $p<0,13$ ).

Abbildung 63:

Wirkungen der Nachhallzeit auf die Lautdiskriminationsleistung bei Erstklässlern in Abhängigkeit von der Nachhallzeitdifferenz (NHD) zwischen Klassen- und Untersuchungsraum (N=81). Anmerkung: Die Skalierung der Ordinate beginnt beim Wert 30, da bei dieser Aufgabe allein durch Raten eine Trefferquote von 33,33 Prozent erreicht wird.



Satzverständnis:

Die varianzanalytische Auswertung der Leistungen im Satzverständnis test (Anzahl erreichter Punkte von 34) erbrachte weder einen signifikanten Effekt des Testraums noch der Nachhallzeitdifferenz. Die Interaktion zwischen den beiden Faktoren erwies sich ebenfalls als nicht signifikant ( $F<1$  in allen Fällen).

## 10.1.2 Zweitklässler-Untersuchung

### Methodik

Das Messwiederholungsdesign konnte in 12 der insgesamt 17 teilnehmenden zweiten Klassen realisiert werden (für die beiden Klassen aus Schule 2 stand kein Untersuchungsraum zur Verfügung, die Daten einer Klasse aus Schule 5

konnten wegen technischer Probleme nicht einbezogen werden, zwei Klassen aus Schule 8 konnten aus schulorganisatorischen Gründen nicht zweimal getestet werden). Die resultierende Stichprobe (N=266) wurde anhand der Nachhallzeitdifferenzen (NHD) zwischen den Klassen- und den Untersuchungsräumen in drei Gruppen eingeteilt: (NHD<0,25s, n=47; NHD>0,55s, n=122; sowie eine Zwischengruppe, n=99).

Eine Besonderheit bestand bei den Kindern aus Schule 3. Diese Kinder bearbeiteten die Aufgaben einmal in ihren Klassenräumen, die durch Einbringen von Absorbermaterialien den Untersuchungsräumen in den anderen Schulen entsprechende Nachhallzeiten aufwiesen (T20=0,51 s, s. Abschnitt 7.2.2). Die in diesen Räumen erhobenen Daten wurden der Bedingung „Untersuchungsraum“ zugewiesen. Die andere Testung erfolgte in einem anderen Klassenraum dieser Schule, der sehr lange Nachhallzeiten aufwies („Filmraum“, T20=1,63 s). Die hier erhobenen Daten wurden der Bedingung „Klassenraum“ zugewiesen; die Nachhallzeitdifferenz betrug somit in dieser Gruppe 1,12 s. Durch dieses Vorgehen konnte ein breiterer Range der Nachhallzeiten erreicht werden, als es die in der Stichprobe verfügbaren Heimatklassenräume der Kinder ermöglicht hätten. Verschiedene Studien belegen, dass Räume mit Nachhallzeiten über 1,5 Sekunden in vielen Schulen tatsächlich als Klassenräume genutzt werden. Aus diesem Grund wurde entschieden, anstelle einer aufwändigen Bedämpfung des Filmraums auf 0,5 s Nachhallzeit die akustisch günstigeren Klassenräume als Untersuchungsräume herzurichten und den Filmraum im Originalzustand zu belassen.

Die Kinder bearbeiteten die Testaufgaben „Lautdiskrimination“, „Pseudowörter-Merken“ und „Satzverstehen“ jeweils im Klassenraum und im Untersuchungsraum. Zur Kontrolle von Übungseffekten wurde die Reihenfolge der Testräume zwischen den Klassen ausbalanciert.

## **Ergebnisse**

Tabelle 19 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Aufgaben „Lautdiskrimination“, Pseudowörter-Merken und „Satzverständnis“ in Abhängigkeit vom Testraum und der Nachhallzeitdifferenz.

Tabelle 19:  
Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) bei den Testaufgaben „Lautdiskrimination“, „Pseudowörter-Merken“ und „Satzverständnis“ in Abhängigkeit von Testraum und Nachhallzeitdifferenz bei Zweitklässlern (N=266).

Nachhallzeit-Differenz	Anzahl der Fälle (n)*	Aufgabe	Leistung im Klassenraum M (SD)	Leistung im Untersuchungsraum M (SD)
NHD < 0,25 s	45	Lautdiskrimination: (Anzahl richtige von 24)	15,27 (2,82) 63,63 %	14,98 (2,55) 62,42 %
	47	Pseudowörter-Merken (Anzahl richtige von 24)	19,3 (2,57) 80,42 %	18,74 (3,07) 78,08 %
	47	Satzverständnis (erreichte Punkte von 34)	24,87 (3,99) 73,15 %	24,7 (3,56) 72,65 %
0,25 s ≤ NHD ≤ 0,55 s	122	Lautdiskrimination: Anzahl richtige von 24	15,47 (3,52) 64,46 %	15,92 (2,96) 66,33 %
	120	Pseudowörter-Merken (Anzahl richtige von 24)	19,5 (2,68) 81,25 %	19,33 (2,73) 80,54 %
	121	Satzverständnis (erreichte Punkte von 31)	25,68 (4,37) 82,83 %	26,46 (3,89) 85,35 %
NHD > 0,55 s	99	Lautdiskrimination: Anzahl richtige von 24	<b>15,47 (2,79)</b> <b>64,46 %</b>	<b>16,7 (2,94)</b> <b>69,58 %</b>
	98	Pseudowörter-Merken (Anzahl richtige von 24)	<b>18,66 (3,47)</b> <b>77,75 %</b>	<b>19,36 (3,3)</b> <b>80,67 %</b>
	99	Satzverständnis (erreichte Punkte von 31)	26,86 (3,48) 86,64 %	26,96 (3,2) 86,97 %

Fettgedruckt: Statistisch signifikante Mittelwertsunterschiede ( $p < 0,05$ ).

\*Die geringfügig variierenden Fallzahlen kommen dadurch zustande, dass einige Kinder wegen Verspätungen, kurzzeitiger Abwesenheit (Toilettenbesuch!) o.ä. nicht an allen drei Testaufgaben teilnahmen.

Lautdiskrimination:

Die varianzanalytische Auswertung mit dem messwiederholten Faktor „Testraum“ und dem Zwischen-Gruppen-Faktor „Nachhallzeitdifferenz“ ergab einen marginal signifikanten Haupteffekt des Testraums ( $F(1,263)=3.85$ ;  $p<0.051$ ) sowie eine hypothesengemäÙe Interaktion zwischen diesen beiden Faktoren ( $F(2,263)=3.12$ ;  $p<0,05$ ). Nachfolgende Mittelwertsvergleiche belegten signifikante Leistungsverbesserungen im Untersuchungsraum nur bei den Kindern aus der Gruppe  $NHD>0,55$  s ( $T(98)=3.52$ ;  $p<0,001$ ). In den anderen beiden Gruppen waren keine Leistungsunterschiede zwischen den Testräumen nachweisbar ( $T(44)<1$  bzw.  $T(121)=1,46$ ;  $p<0,15$ ).

Abbildung 64:

Wirkungen der Nachhallzeit auf die Lautdiskriminationsleistung bei Zweitklässlern in Abhängigkeit von der Nachhallzeitdifferenz (NHD) zwischen Klassen- und Untersuchungsraum (N=266).

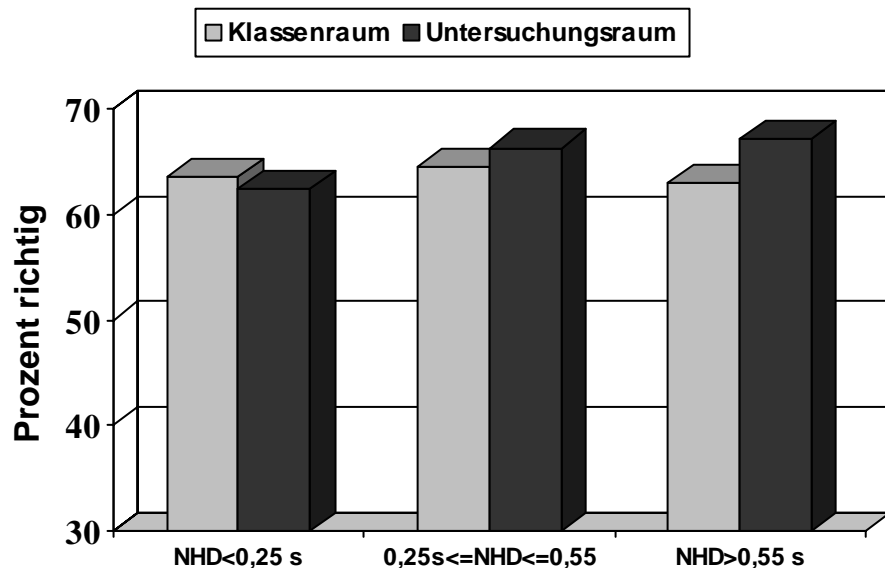


Abbildung 64 zeigt die Mittelwerte der im Klassen- und Untersuchungsraum erbrachten Leistungen in Abhängigkeit von der Nachhallzeitdifferenz zwischen den Räumen. Hierbei ist zu betonen, dass die signifikante Leistungsverbesserung in der Gruppe  $NHD>0,55$  s nicht allein durch die Kinder aus Schule 3 vermittelt wird, die in einem besonders ungünstigen Raum untersucht wurden („Filmraum“). Der Effekt bleibt auch dann bestehen, wenn diese Kinder aus der Analyse herausgenommen werden ( $T(46)=2,15$ ;  $p<0,05$ ).

Pseudowörter-Merken:

Die varianzanalytische Auswertung der Leistungen beim „Pseudowörter-Merken“ (Anzahl richtige von 24) erbrachte zwar weder einen signifikanten Haupteffekt des Testraums ( $F(1, 262)<1$ ) noch der Nachhallzeit-Differenz



( $F(2,262) < 1$ ), jedoch zeigte sich auch hier eine hypothesengemäße Interaktion zwischen diesen Faktoren ( $F(2,262) = 4,12$ ;  $p < 0,017$ ). Nachfolgende Mittelwertvergleiche belegten signifikante Leistungsverbesserungen im Untersuchungsraum nur bei den Kindern aus der Gruppe  $NHD > 0,55$  s ( $T(97) = 2,1$ ;  $p < 0,05$ ). In den anderen beiden Gruppen waren keine Leistungsunterschiede zwischen den Testräumen nachweisbar ( $T(46) = 1,58$ ;  $p < 0,12$  bzw.  $T(119) < 1$ ).

#### Satzverständnis

Bezüglich der Leistungen im Satzverständnistest zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt des Gruppenfaktors „Nachhallzeitdifferenz“ ( $F(2,264) = 5,9$ ;  $p < 0,01$ ). Wie aus Tabelle 19 zu ersehen, erbrachten die Kinder aus der Gruppe  $NHD < 0,25$  s in beiden Räumen schlechtere Leistungen als die anderen Kinder. Der Effekt ist auf die schlechteren Deutschkenntnisse der Kinder in dieser Gruppe zurückzuführen (in den Klassenräumen mit günstiger Akustik wurden tendenziell mehr Kinder mit nicht-deutscher Muttersprache unterrichtet als in den akustisch ungünstigen Räumen, s.u.). Ein Haupteffekt des messwiederholten Faktors „Testraum“ oder eine Interaktion konnte nicht nachgewiesen werden ( $F(1,264) = 1,54$ ;  $p < 0,22$  bzw.  $F(2,264) = 2,49$ ;  $p < 0,09$ ). Dieses Ergebnis entspricht dem Befund in der Erstklässler-Untersuchung.

### 10.1.3 Diskussion der Ergebnisse der Erst- und Zweitklässler-Untersuchung

Sowohl bei den Erst- als auch bei den Zweitklässlern zeigten sich signifikante Wirkungen der Nachhallzeit im Testraum auf die Leistungen bei der Aufgabe „Lautdiskrimination“. Die Kinder, deren Klassenräume deutlich längere Nachhallzeiten als die Untersuchungsräume aufwiesen, erbrachten bessere Leistungen, wenn sie die Aufgabe im Untersuchungsraum durchführten. Bei denjenigen Kindern, bei denen die Differenz der Nachhallzeiten zwischen den Testräumen geringer ausfiel, ließen sich dagegen keine Leistungsunterschiede nachweisen. Motivationale Gründe für die Leistungsverbesserungen, die mit der Testung in einem unbekanntem Raum zusammenhängen, können somit als Ursache des Effekts ausgeschlossen werden.

Die Erstklässler zeigten eine Leistungsverbesserung im Untersuchungsraum um etwa 10 Prozent. Hierzu mag der Umstand beigetragen haben, dass der Anteil von Kindern mit nicht-deutscher Muttersprache in diesen Klassen sehr groß war. Das Verstehen einer Zweitsprache wird durch ungünstige Hörbedingungen besonders erschwert. Durch eine akustische Sanierung der Klassenräume könnte diesen Kindern der Erwerb des Lautinventars des Deutschen sicher sehr erleichtert werden.

Weder bei den Erst- noch bei den Zweitklässlern ließen sich signifikante Effekte des Testraums auf die Leistungen im Satzverständnis nachweisen. Auch diejenigen Kinder, die in relativ ungünstigen Klassenräumen unterrichtet wurden, zeigten keine Leistungsverbesserungen bei Testung im akustisch behandelten Untersuchungsraum. Dies ist vermutlich auf die Redundanz der Sprache zurück zu führen – fehlende Informationen können anhand des Satzkontextes ergänzt werden. Die Notwendigkeit, unvollständig übermittelte Informationen kontinuierlich zu ergänzen, ist jedoch aufgrund der geringeren Automatisierung der sprachlichen Funktionen für Kinder noch anstrengender als für Erwachsene.

Negative Folgen erhöhter Höranstrengung auf die Leistungen sind wahrscheinlich (vgl. Surprenant 1999), auch wenn sie in der kurzen, nur etwa 8 Minuten andauernden Testphase nicht signifikant zutage traten.

Bei der in den zweiten Klassen eingesetzten Aufgabe „Pseudowörter-Merken“ zeigten sich signifikante Leistungsverbesserungen im Untersuchungsraum bei denjenigen Kindern, bei denen die Differenz der Nachhallzeiten zwischen den Testräumen groß war. Obwohl der Effekt in absoluten Werten gering ausfiel (3 Prozent Leistungsverbesserung) deutet er an, dass ungünstige Nachhallzeiten auch das Behalten sprachlicher Information im Arbeitsgedächtnis beeinträchtigen können. Die Aufgabe war so gestaltet, dass von einer fehlerfreien Enkodierung der Pseudowörter auch unter ungünstigen Nachhallzeitbedingungen ausgegangen werden kann. Die Pseudowörter wurden langsam und deutlich artikuliert und ohne Störgeräusche präsentiert. Wir gehen davon aus, dass das zwischen den Pseudowörtern präsentierte Stimmengewirr durch den Nachhall verstärkt wird und dadurch eher zu Aufmerksamkeitsablenkungen führte, die mit dem Prozess des Memorierens der Pseudowörter interferierten.

Beim Vergleich der in akustisch unterschiedlichen Räumen erbrachten Leistungen konnten somit signifikante Wirkungen der Nachhallzeiten auf die Identifikation und Speicherung sprachlicher Informationen nachgewiesen werden. Die Störwirkung langer Nachhallzeiten auf das Sprachverstehen wurde bislang fast ausschließlich in laborexperimentellen Studien untersucht (z.B. Johnson 2000). Diese Effekte konnten im Feld repliziert werden.

## **10.2 Chronische Wirkungen der Nachhallzeit im Klassenraum**

Im vorigen Abschnitt wurden die akuten Wirkungen der Nachhallzeit auf die Leistungen der Kinder dargestellt. Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, inwieweit sich chronische Effekte der akustischen Bedingungen im Klassenraum nachweisen lassen. Hierbei lag die Überlegung zugrunde, dass permanent einwirkende Störungen grundlegender auditiver und kognitiver Funktionen durch ungünstige raumakustische Bedingungen langfristig zu überdauernden Beeinträchtigungen in der Entwicklung dieser Funktionen führen können. Neben den Leistungserhebungen wurden Befragungen zur Lärmbelastung sowie zu sozial-emotionalen Erfahrungen in der Schule durchgeführt. Geprüft wurde der Einfluss der Nachhallzeiten in den Klassenräumen der Kinder auf diese Variablen.

### **10.2.1 Einfluss und Kontrolle konfundierender Variablen**

Im Gegensatz zum oben beschriebenen Messwiederholungsdesign, bei dem jedes Kind „mit sich selbst“ verglichen wird, erfordert die Analyse chronischer Wirkungen einen Vergleich zwischen Kindern aus unterschiedlichen Schulklassen.

Leistungsunterschiede zwischen Gruppen von Kindern können durch zahlreiche Einflussfaktoren zustande kommen, die den vergleichsweise geringeren Einfluss der akustischen Bedingungen im Klassenraum überlagern. Hierzu gehören insbesondere die Sprachkenntnisse der Kinder sowie Bildungsstand und Familieneinkommen der Eltern (vgl. PISA \_ LIT). Diese konfundierenden Variablen wur-

den anhand von Eltern- und Lehrerfragebögen erfasst und bei der Analyse berücksichtigt.

Anhand von Lehrerurteilen wurde jedem Kind ein Wert auf einer Variablen „Deutschkenntnisse“ mit den Stufen „Deutsch als Muttersprache“, „Deutsch als Zweisprache mit guten Deutschkenntnissen“ und „Deutsch als Zweisprache mit schwachen Deutschkenntnissen“ zugewiesen. Die Variablen „Bildungsstand der Mutter“ und „Familieneinkommen“ wurden anhand des Elternfragebogens erfasst, in dem Antwortkategorien zum Schulabschluss bzw. zur Einkommensklasse vorgegeben waren. 335 Eltern von Zweitklässlern (84,2 Prozent) und 74 Eltern von Erstklässlern (83,1 %) machten gültige Angaben zum Bildungsstand. Von diesen ließen sich 326 (81,9 %) bzw. 70 (78,7 %) den Kategorien „Kein Schulabschluss oder Hauptschulabschluss“, „Realschulabschluss oder Fachhochschulreife“ und „Hochschulreife“ zuordnen (die übrigen Angaben bezogen sich auf unbekannte ausländische Bildungsabschlüsse). Bezüglich des Familieneinkommens lagen 63 Angaben von Erstklässler-Eltern (70,8 %) und 294 Angaben von Zweitklässler-Eltern (73,9 %) vor (die anderen Eltern verweigerten diese Angabe).

Erwartungsgemäß erwiesen sich die Lese- und Rechtschreibleistungen der Kinder als in hohem Maße abhängig von diesen Faktoren. Exemplarisch sei hier der Einfluss des Bildungsstandes der Mutter auf die Leseleistungen dargestellt (vgl. Abbildung 65). Bei der Analyse wurden Erst- und Zweitklässler einbezogen, als abhängige Variable wurde der Lesequotient eingesetzt. Die einfaktorielle varianzanalytische Auswertung erbrachte einen hochsignifikanten Effekt des mütterlichen Bildungsstandes auf die Leseleistungen ( $F(2, 379)=29,78; p<0,0001$ ).

Abbildung 65:  
Einfluss des Bildungsstands der Mutter auf die Leistungen im Lesetest (Erst- und Zweitklässler, N=382). (HSA: Hauptschulabschluss; RSA: Realschulabschluss; FHR: Fachhochschulreife; HR: Hochschulreife).



Die Kinder, deren Mütter die Hochschulreife erlangt hatten, erbrachten eine mehr als eine Standardabweichung bessere Leistung als die Kinder, deren Müt-

ter keinen Schulabschluss oder einen Hauptschulabschluss erreicht hatten. Dieser Effekt bleibt auch nach Herauspartialisierung der Deutschkenntnisse der Kinder signifikant bestehen.

Bei den nachfolgend dargestellten Analysen des Einflusses der akustischen Bedingungen in den Klassenräumen der Kinder wurden diese konfundierenden Variablen sorgfältig kontrolliert.

### 10.2.2 Einteilung der Stichprobe

Auf der Grundlage der mittleren Nachhallzeiten in den Heimatklassenräumen wurde die Stichprobe in 3 Gruppen eingeteilt (NH\_1, NH\_2, NH\_3). Gruppe NH\_1 umfasst alle Kinder, in deren Klassenräumen die Nachhallzeiten im nach DIN 18041 [1] anzustrebenden Bereich (s. Abschnitt 4.1.1) liegen ( $T_{20} \leq 0,65$  s), die Nachhallzeiten der Gruppe NH\_3 sind mit über 0,95 s deutlich zu lang. NH\_2 stellt eine Mittelgruppe dar. Tabelle 20 zeigt die Verteilung der Klassen auf die Nachhallzeitgruppen. Wie aus der Tabelle zu entnehmen, wurden auch in der Schule 3 die Nachhallzeiten in den unbehandelten Heimatklassenräumen der Kinder zugrunde gelegt, da zur Analyse der chronischen Wirkungen natürlich die Situation berücksichtigt werden sollte, in der die Kinder normalerweise unterrichtet werden.

Insgesamt besteht die Gruppe NH\_1 somit aus 5 zweiten Klassen aus 2 Schulen (126 Zweitklässler), die Gruppe NH\_2 aus 8 zweiten und 2 ersten Klassen aus 5 Schulen (175 Zweitklässler, 37 Erstklässler) und die Gruppe NH\_3 aus 4 zweiten und 2 ersten Klassen aus 4 Schulen (97 Zweitklässler, 52 Erstklässler).

Zunächst wurde geprüft, inwieweit die Gruppen hinsichtlich der oben genannten Einflussfaktoren vergleichbar waren. Geprüft wurden folgende Variablen:

Anteil von Kindern mit Deutsch als Zweitsprache (DaZ) in den zweiten Klassen: In der Gruppe NH\_1 war der Anteil der Kinder mit DaZ tendenziell höher als in den Gruppen NH\_2 und NH\_3 (40,5 % vs. 35,4 % vs. 25,8 %;  $\chi^2(2)=5,31$ ;  $p < 0,07$ ). Für die nachfolgend dargestellte Analyse zu den Einflüssen der Nachhallzeiten ist jedoch festzuhalten, dass hypothesengemäße Unterschiede in den Leistungen und Beurteilungen durch den höheren Anteil an Kindern mit DaZ in der Gruppe NH\_1 eher verdeckt als verstärkt werden.

Bildungsstand der Mutter und Familieneinkommen: Weder bei den Erstklässlern noch bei den Zweitklässlern bestanden bezüglich der beiden Faktoren signifikante Unterschiede zwischen den Nachhallzeitgruppen.

Tabelle 20:  
Verteilung der Klassen auf die Nachhallzeitgruppen. Die raumakustischen Parameter beziehen sich auf den Heimatklassenraum.  $T_{20}$  Nachhallzeit Mittelwert 250-2000 Hz.  $D_{50}$  Deutlichkeitsgrad Mittelwert 500-2000 Hz. STI unter Unterrichtsbedingungen (s. Abschnitt 4.1.5, Abbildung 6).

Schule	Klasse	Klassenstärke (teilnehmende Kinder)	$T_{20}$ [s]	$D_{50}$ [%]	STI [-] Unt.- bedg.	Nachhallzeit- gruppe
<b>Zweite Klassen</b>						
Schule_2	2c	22 (22)	0,51	83	61	NH_1
Schule_2	2b	22 (22)	0,51	82	61	NH_1
Schule_8	2a	29 (27)	0,49	81	61	NH_1
Schule_8	2b	28 (28)	0,53	80	61	NH_1
Schule_8	2c	27 (27)	0,56	78	60	NH_1
<b>2 Schulen</b>	<b>5 Klassen</b>	<b>128 (126)</b>				<b>NH_1</b>
Schule_3	2°	26 (26)	0,68	69	55	NH_2
Schule_4	2c	22 (22)	0,71	70	56	NH_2
Schule_5	2b	23 (23)	0,75	63	56	NH_2
Schule_3	2b	26 (26)	0,79	62	54	NH_2
Schule_1	2c	23 (17)	0,82	65	54	NH_2
Schule_5	2a	22 (22)	0,87	62	54	NH_2
Schule_7	2b	25 (25)	0,90	61	52	NH_2
Schule_1	2b	24 (14)	0,92	58	53	NH_2
<b>5 Schulen</b>	<b>8 Klassen</b>	<b>191 (175)</b>				<b>NH_2</b>
Schule_4	2a	23 (23)	1,06	54	52	NH_3
Schule_6	2a	25 (25)	1,09	50	51	NH_3
Schule_7	2c	28 (27)	1,10	53	50	NH_3
Schule_6	2b	27 (22)	1,11	50	50	NH_3
<b>3 Schulen</b>	<b>4 Klassen</b>	<b>103 (97)</b>				
<b>Gesamt</b>		<b>422 (398)</b>				
<b>Erste Klassen</b>						
Schule_1	1a	22 (19)	0,69	69	56	NH_2
Schule_1	1c	21 (18)	0,74	65	55	NH_2
		<b>43 (37)</b>				
Schule_8	1c	26 (26)	1,06	53	50	NH_3
Schule_8	1b	26 (26)	1,06	55	51	NH_3
		<b>52 (52)</b>				
<b>Gesamt</b>		<b>95 (89)</b>				

### 10.2.3 Chronische Wirkungen der Nachhallzeit auf die Speicherung und Verarbeitung sprachlicher Information

Die Wirkungen der Nachhallzeit auf grundlegende kognitive Leistungen wurden anhand der Aufgaben „Laute kategorisieren“ und „Bilder merken“ geprüft. Bei

der Aufgabe „Laute kategorisieren“ werden jeweils drei Wörter oder Pseudowörter vorgesprochen, die nach An- oder Endlauten zu kategorisieren sind. Die Aufgabe erfordert genaues Hinhören, kurzzeitiges Speichern und das lautliche Durchgliedern der Wörter bzw. Pseudowörter. Sie beinhaltet Wahrnehmungs-, Arbeitsgedächtnis- und Lautverarbeitungsprozesse, die als wesentliche Voraussetzungen des Schriftspracherwerbs gelten. Übereinstimmend hiermit zeigten sich in den Voruntersuchungen und in der Hauptstudie hochsignifikante Korrelationen zwischen der Leistung in dieser Aufgabe und den Lese- und Rechtschreibleistungen, welche durch die Anzahl richtig beurteilter Sätze im Salzburger Lesescreening bzw. durch die Anzahl der Graphemtreffer in der Hamburger Schreibprobe erfasst wurden (Rechtschreiben: Vorstudie:  $N=22$ ,  $r=0,55$ ,  $p<0,008$ ; Hauptstudie:  $N=355$ ;  $r=0,41$ ;  $p<0,001$ ; Lesen: Hauptstudie:  $N=360$ ;  $r=0,4$ ;  $p<0,001$ ).

Die Aufgabe „Bilder merken“ erfordert das serielle Behalten von jeweils vier Abbildungen leicht benennbarer Objekte, die nacheinander präsentiert werden. Durch den Einfluss der Wortlänge und der phonologischen Ähnlichkeit auf die Leistungen lässt sich einschätzen, ob bzw. inwieweit bei der Aufgabenbearbeitung von einer phonologischen Strategie Gebrauch gemacht wird. Normalerweise sollten Kinder am Ende des zweiten Schuljahres spontan eine phonologische Behaltensstrategie einsetzen. Es wurden daher signifikante Effekte der Wortkategorie (unähnlich, ähnlich, lang) auf die Behaltensleistung erwartet. Potenzielle Defizite in der Entwicklung des phonologischen Arbeitsgedächtnisses sollten sich durch eine insgesamt schwächere Behaltensleistung und weniger ausgeprägte Effekte der Wortlänge und Ähnlichkeit nachweisen lassen (vgl. Hasselhorn 2003).

Neben diesen sprachlichen Aufgaben wurde die Testaufgabe zur nichtsprachlichen Intelligenz einbezogen. Hierdurch sollte eine Kontrolle der allgemeinen intellektuellen Leistungsfähigkeit bei der Analyse der Leistungen in der sprachlichen Aufgabe ermöglicht werden.

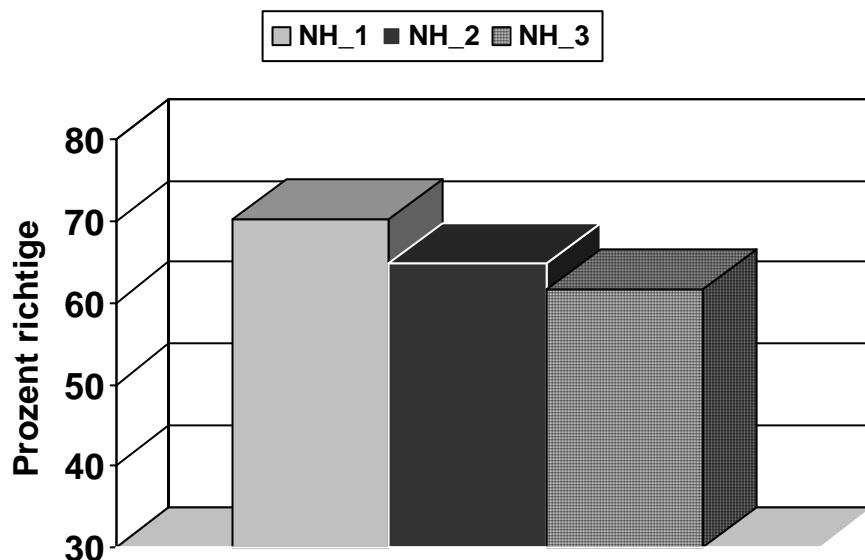
Die Aufgabe „Bilder merken“ wurde von 392 Kindern bearbeitet. Hiervon stammten 126 aus der Gruppe NH\_1, 172 aus der Gruppe NH\_2 und 94 aus der Gruppe NH\_3. Die zweifaktorielle varianzanalytische Auswertung der Daten (Anzahl richtig wiedergegebener Bilderfolgen) ergab einen hochsignifikanten Effekt des messwiederholten Faktors „Wortkategorie“ ( $F(2,778)=81,16$ ;  $p<0,001$ ). Die Kinder erbrachten beim Behalten der unähnlichen Items wesentlich bessere Leistungen als bei den Items der Kategorien „ähnlichen“ und „lang“. Der Effekt der Nachhallzeitgruppe und deren Interaktion mit dem Faktor „Wortkategorie“ erwiesen sich jedoch als nicht signifikant ( $F(2,389)=2,65$ ;  $p<0,07$  bzw.  $F(4,778)<1$ ). Unterschiede zwischen den Behaltensleistungen in Abhängigkeit von den Nachhallzeiten konnten somit nicht nachgewiesen werden. Auch wurden in allen Gruppen gleichermaßen phonologische Behaltensstrategien eingesetzt.

Die Aufgabe „Laute kategorisieren“ konnte in 16 der 17 zweiten Klassen mit insgesamt 363 Kindern durchgeführt werden. Hiervon stammten 103 aus der Gruppe NH\_1, 168 aus der Gruppe NH\_2 und 92 aus der Gruppe NH\_3. Tabelle 21 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen für beide Testaufgaben in den drei Nachhallzeitgruppen.

Tabelle 21:  
Mittelwerte (M), Standardabweichungen (SD) und Anzahl der Fälle (n) bei den Testaufgaben „Laute kategorisieren“ und „nichtsprachliche Intelligenz“ für die drei Nachhallzeitgruppen.

Nachhallzeitgruppe		Laute kategorisieren	Nichtsprachliche Intelligenz
<b>NH_1</b> <b>T20 ≤0,65s</b>	Mittelwert (SD)	11,24 (2,88)	8,86 (1,7)
	n	103	102
<b>NH_2</b> <b>0,65s &lt; T20</b> <b>≤0,95s</b>	Mittelwert (SD)	10,35 (3,41)	8,79 (1,75)
	n	168	167
<b>NH_3</b> <b>T20 &gt;0,95s</b>	Mittelwert (SD)	9,87 (3,22)	8,98 (1,98)
	n	92	91
<b>Insgesamt</b>	<b>Mittelwert (SD)</b>	<b>10,48 (3,25)</b>	<b>8,86 (1,79)</b>
	<b>N</b>	<b>363</b>	<b>360</b>

Abbildung 66:  
Wirkungen der Nachhallzeit auf die Leistung in der Aufgabe „Laute kategorisieren“ in Abhängigkeit von der Nachhallzeit im Klassenraum.



Die einfaktorielle varianzanalytische Auswertung der Leistungen (Anzahl richtig gelöster Aufgaben von 16) ergab einen signifikanten Effekt der Nachhallzeitgruppe ( $F(2,360)=4,67$ ;  $p<0,01$ ). Wie in Abbildung 5 dargestellt, erbrachten die

Kinder aus der Gruppe NH\_3 schlechtere Leistungen, in der Gruppe NH\_1 waren die Leistungen am besten. Nachfolgende Paarvergleiche mit Bonferroni-Korrektur belegten signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen NH\_3 und NH\_1. Dieser Effekt kann nicht auf Unterschiede in den allgemeinen intellektuellen Lernvoraussetzungen zurückgeführt werden: Die Analyse der Leistungen im nichtsprachlichen Intelligenztest in derselben Stichprobe, die auch die sprachliche Aufgabe bearbeitet hatte, erbrachte keinerlei Unterschiede zwischen den Nachhallzeitgruppen ( $F(2,357) < 1$ ).

Bei der Betrachtung der Leistungsunterschiede in der Aufgabe „Laute kategorisieren“ ist zu berücksichtigen, dass in der Gruppe NH\_1 tendenziell mehr Kinder mit nicht-deutscher Muttersprache vertreten waren. Aus diesem Grund waren auch die Leseleistungen der Kinder in der Gruppe NH\_1 signifikant schlechter als die aus der Gruppe NH\_3 (bezüglich der Rechtschreibleistungen bestanden keine Unterschied zwischen den Gruppen). Da die Leseleistungen auch auf die phonologischen Fertigkeiten zurückwirken, wäre eher ein umgekehrtes Befundmuster – bessere Leistungen beim Laute kategorisieren in der Gruppe NH\_3 – zu erwarten gewesen. Trotz der ungünstigeren Voraussetzungen zeigten jedoch die Kinder aus der Gruppe NH\_1 die besten Leistungen in dieser Aufgabe.

Es zeigte sich somit ein signifikanter Leistungsunterschied zwischen den Gruppen, der nicht durch soziodemografische Variablen und nicht durch unterschiedliche intellektuelle Lernvoraussetzungen erklärbar ist. Obgleich andere konfundierende Variablen nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden können, lässt sich dieser Befund als Folge der permanent einwirkenden Störungen durch die ungünstige akustische Situation in den Klassenräumen der Kinder aus der Gruppe NH\_3 interpretieren. Da sich bei der Aufgabe „Bilder merken“ keine Unterschiede zwischen den Gruppen nachweisen ließen, können die beim Laute kategorisieren aufgetretenen Effekte nicht auf Unterschiede in der Speicherkapazität zurückgeführt werden. Vielmehr scheint die Fähigkeit des genauen Hinhörens und Verarbeitens der Lautinformation betroffen zu sein.

#### 10.2.4 Nachhallzeit und Lärmbelastung

Lange Nachhallzeiten gehen mit einer Erhöhung des Hintergrundgeräuschpegels im Klassenraum einher, da alle Geräusche länger im Raum nachklingen. Dies gilt natürlich auch für unvermeidliche Geräusche wie Blättern, Bücher und Stifte auspacken, Husten, Stühle rücken etc. Auch ergaben sich in Evaluationsstudien Hinweise darauf, dass die Kinder sich in akustisch optimierten Räumen auch insgesamt ruhiger verhalten (Schönwälder et al. 2004). Es wurde der Frage nachgegangen, ob sich diese Phänomene in den Beurteilungen der Kinder hinsichtlich der Lärmbelastung im Unterricht widerspiegeln. Da die Kinderfragebögen nur mit den Zweitklässlern durchgeführt wurden bezieht sich die folgende Auswertung nur auf diese Gruppe.

Aus den Items des Kinderfragebogens wurden diejenigen zusammengefasst, die speziell die akustische Situation innerhalb des Klassenraums betreffen (Skala Innenlärm\_Lärmbelastung, neun Items, z.B. „In der Stillarbeit ist es wirklich



still“, „Geräusche wie Stühle rücken, Füße scharren und in Taschen herumkrabbeln stören mich“). Es wurden nur die Kinder einbezogen, die alle neun Items mit „stimmt“ oder „stimmt nicht“ beantwortet hatten. Kinder, die ein oder mehrere Items ausgelassen hatten, wurden in dieser Auswertung nicht berücksichtigt.

Die Daten wurden mittels einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit dem Faktor „Nachhallzeitgruppe“ (NH\_1, NH\_2 und NH\_3) ausgewertet. Es zeigten sich hochsignifikante Unterschiede zwischen den Gruppen ( $F(2, 372)=11,81$ ;  $p<0,000$ ). Nachfolgende Paarvergleiche mit Bonferroni-Korrektur ergaben, dass sich die Kinder aus den Klassen mit niedrigen Nachhallzeiten durch Lärm weniger belastet als die Kinder aus den Räumen mit mittleren und langen Nachhallzeiten ( $p<0,001$ ). Tabelle 22 zeigt die mittleren Skalenwerte in den drei Nachhallzeitgruppen.

Tabelle 22:  
Lärmbelastung im Klassenraum in Abhängigkeit von den Nachhallzeiten.

Nachhallzeitgruppe	Mittelwert	Standardabweichung	N
NH_1 T20≤0,65s	4,31	1,88	121
NH_2 0,65s<T20≤ 0,95s	4,99	1,37	161
NH_3 T20>0,95s	5,32	1,45	93
Gesamt	4,8	1,62	375

Eine Betrachtung der Antworten der Kinder auf einzelne Aussagen verdeutlicht den Sachverhalt. Abbildung 67 zeigt den Prozentsatz von Kindern, die auf die Aussage „Meine Mitschüler sind oft sehr laut“ mit „stimmt“ antworteten, für die drei Nachhallzeitgruppen. Offenkundig werden die Mitschüler in den Klassen mit ungünstiger Raumakustik als lauter erlebt. Dieser Unterschied in den Antworthäufigkeiten ist statistisch signifikant ( $\chi^2(2)=14,77$ ;  $p<0,001$ ).

Ähnliche Befunde zeigen sich für die Aussage „Unsere Lehrerin sagt oft, dass wir leiser sein sollen“. Diese Aussage wurde in allen Gruppen sehr häufig mit „stimmt“ beantwortet, jedoch ist der Prozentsatz von „stimmt“-Antworten in der Gruppe NH\_1 signifikant geringer ( $\chi^2(2)=12,82$ ;  $p<0,002$ ) (vgl. Abbildung 68).

Abbildung 67:  
 Prozentsatz von „stimmt“-Antworten auf die Aussage „Meine Mitschüler sind oft sehr laut“ in Abhängigkeit von der Nachhallzeit im Klassenraum (N=388).

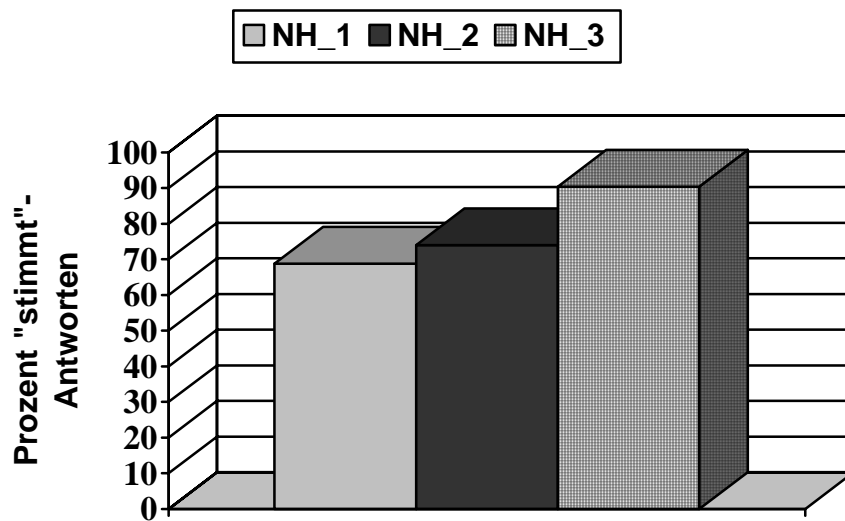
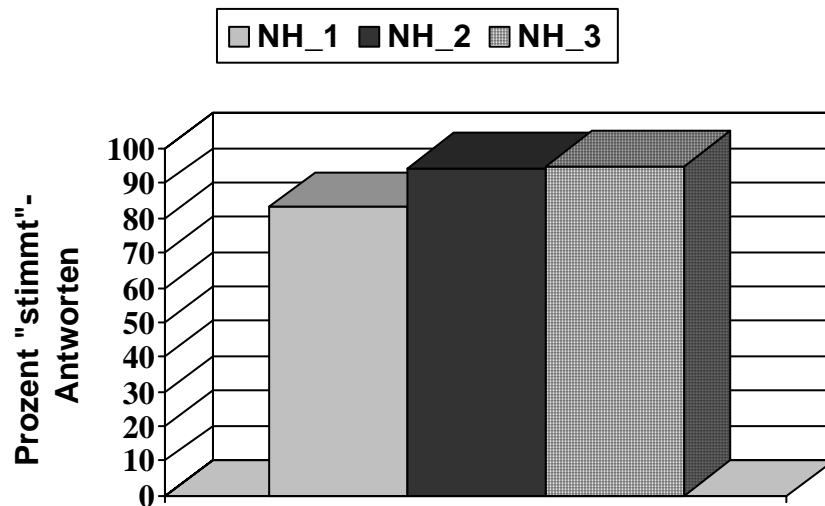
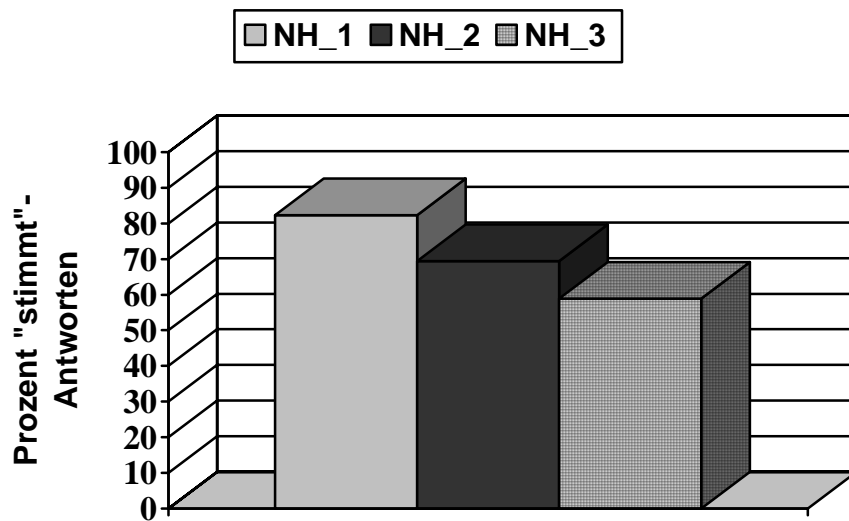


Abbildung 68:  
 Prozentsatz von „stimmt“-Antworten auf die Aussage „Unsere Lehrerin sagt oft, dass wir leiser sein sollen“ in Abhängigkeit von der Nachhallzeit im Klassenraum (N=389).



Auch bezüglich der Aussage „In der Stillarbeit ist es wirklich still“ zeigen sich die hypothesengemäßen Unterschiede sehr deutlich. Auf diese Aussage wurde in der Gruppe NH\_1 sehr viel häufiger mit „stimmt“ geantwortet. Auch dieser Unterschied ist hoch signifikant ( $\chi^2(2)=14,53$ ;  $p<0,001$ ) (vgl. Abbildung 69)

Abbildung 69:  
 Prozentsatz von „stimmt“-Antworten auf die Aussage „in der Stillarbeit ist es wirklich still“ in Abhängigkeit von der Nachhallzeit im Klassenraum (N=389).

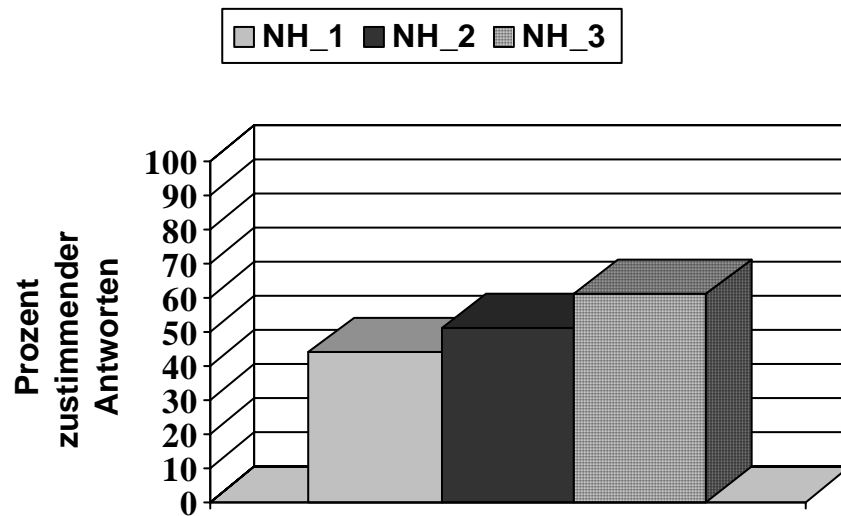


Im Elternfragebogen befand sich ebenfalls ein Item zur Lärmbelastung der Kinder in der Schule. Die Aussage „Unser Kind leidet unter dem Lärm, den die anderen Kinder in der Schule machen“ sollte mit „stimmt genau“, „stimmt teilweise“, „stimmt eher nicht“ oder „stimmt gar nicht“ beurteilt werden. Auch hier wurde geprüft, inwieweit die Antworthäufigkeiten in Abhängigkeit von den Nachhallzeiten in den Klassenräumen der Kinder variieren. Da der Elternfragebogen an alle Kinder verteilt wurde, konnten bei dieser Analyse auch die Erstklässler einbezogen werden. Es lagen gültige Antworten von 352 Eltern vor. Die Eltern, deren Kinder in Räumen mit langen Nachhallzeiten unterrichtet wurden, stimmten der Aussage öfter zu als die Eltern der Kinder aus den Räumen mit kürzeren Nachhallzeiten. Abbildung 70 zeigt den Prozentanteil zustimmender Antworten („stimmt teilweise“ oder „stimmt genau“) für die 3 Nachhallzeitgruppen. Die Unterschiede sind statistisch signifikant ( $\chi^2(2)=6.02$ ;  $p<0.05$ ).

Es konnte somit ein signifikanter Einfluss der Nachhallzeiten im Klassenraum auf die Lärmbelastung der Kinder nachgewiesen werden. Kinder, die in Klassenräumen mit langen Nachhallzeiten unterrichtet werden, sind durch Lärm stärker belastet als Kinder aus Räumen mit kürzeren Nachhallzeiten. Dies zeigt sich sowohl in den Aussagen der Kinder selbst als auch in den Aussagen der Eltern.

Abbildung 70:

Prozentsatz von zustimmenden Antworten der Eltern auf die Aussage „Mein Kind leidet unter dem Lärm, den die anderen Kinder in der Schule machen“ in Abhängigkeit von der Nachhallzeit im Klassenraum (N=352).



### 10.2.5 Wohlbefinden und „Lernklima“ in Abhängigkeit von der Nachhallzeit im Klassenraum

Lange Nachhallzeiten beeinträchtigen die Sprachverständlichkeit im Raum durch Verzerrung des Sprachsignals; weiterhin bewirken sie eine Zunahme des Grundgeräuschpegels. Das Unterrichten in derartigen Räumen bedeutet für die Lehrkräfte ständiges Reden mit erhobener Stimme, was auf die Dauer sehr anstrengt. Der Unterrichtsfluss wird durch häufiges Wiederholen von Informationen und Ermahnungen der Kinder zur Ruhe unterbrochen. Unlust, Ärger, Erschöpfung sowie Hals- und Stimmlippenprobleme können die Folge sein. Übereinstimmend hiermit zeigte sich in einer von der Heriot-Watt-Universität Edinburgh durchgeführten Studie zur Klassenraumakustik bei denjenigen Lehrkräften, die vorwiegend in raumakustisch ungünstigen Klassenräumen unterrichteten, ein höherer Krankenstand als bei den Kollegen, die in besseren Räumen tätig waren (MacKenzie & Airey 1999). Für die Kinder wird das Zuhören im Unterricht durch die ungünstige Akustik noch anstrengender, auch fühlen sie sich – wie Gespräche der Verf. mit SchülerInnen nahe legen - oft zu Unrecht wegen angeblich „lärmigen“ Verhaltens getadelt - in akustisch sehr ungünstigen Räumen entsteht auch bei „leisem“ Verhalten keine wirkliche Ruhe im Raum. Hinzu kommen die lärmbedingten Störungen der Konzentration und des Gedächtnisses, welche in laborexperimentellen Studien zweifelsfrei nachgewiesen wurden (Elliott 2002; Klatte et al. 2004).

Unter solchen Bedingungen sind entspannte und effiziente Unterrichtsgespräche nur bedingt möglich. Hieraus ergab sich die Hypothese, dass sich ungünstige raumakustische Bedingungen durch die erhöhte Belastung der Lehrkräfte und Kinder langfristig negativ auf das sozial-emotionale „Klima“ in der Klasse auswirken. Die Qualität der sozialen Beziehungen von Kindern zu ihren Mit-

schülern und Lehrkräften stellt nachweislich eine wesentliche Determinante der Schulleistung von dar. In einer aktuellen Längsschnittstudie wurde gezeigt, dass etwa 25 Prozent der Varianz der Schulleistungen von Sechstklässlern durch die sozialen Beziehungen in Klasse 4 aufgeklärt werden konnten (Flook et al. 2005).

Zur Erhebung dieser Aspekte wurde in den zweiten Klassen der „Fragebogen zur Erfassung sozialer und emotionaler Schulerfahrungen“ (FEES) von Rauer und Schuck (2004) eingesetzt. Es wurde geprüft, inwieweit sich die Skalenwerte zwischen den Nachhaltzeitgruppen unterscheiden.

Tabelle 23 zeigt die mittleren Skalenwerte für die 7 Bereiche des FEES für die 3 Nachhaltzeitgruppen sowie die Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung (ANOVA). Je höher der Skalenwert, desto positiver wird der jeweilige Aspekt beurteilt.

Tabelle 23:

Mittlere Skalenwerte des Fragebogens FEES in Abhängigkeit von den Nachhaltzeiten im Klassenraum sowie Ergebnisse der varianzanalytischen Auswertung (LF: Lernfreude, SE: Schuleinstellung, AB: Anstrengungsbereitschaft, GA: Gefühl des Angenommenseins, FSK: Fähigkeits-Selbstkonzept; KK: Klassenklima, SI: Soziale Integration).

Gruppe	NH_1			NH_2			NH_3			ANOVA	
	M	SD	n	M	SD	n	M	SD	n	F(df)	p
LF	9,48	2,86	122	9,58	2,68	171	9,08	3,11	92	<1	ns.
SE	10,97	4,09	122	11,39	3,57	171	10,33	4,5	93	2,13 (2,383)	ns.
<b>AB</b>	<b>10,87</b>	<b>1,5</b>	<b>123</b>	<b>10,90</b>	<b>1,61</b>	<b>172</b>	<b>10,26</b>	<b>2,11</b>	<b>94</b>	<b>4,78</b> <b>(2,386)</b>	<b>&lt;0,009</b>
<b>GA</b>	<b>11,29</b>	<b>2,30</b>	<b>119</b>	<b>10,81</b>	<b>2,68</b>	<b>169</b>	<b>9,84</b>	<b>3,56</b>	<b>92</b>	<b>7,06</b> <b>(2,377)</b>	<b>&lt;0,001</b>
FSK	12,12	2,37	120	12,27	2,35	168	12,23	1,9	93	<1	ns.
<b>KK</b>	<b>8,21</b>	<b>2,41</b>	<b>121</b>	<b>7,89</b>	<b>2,46</b>	<b>172</b>	<b>6,90</b>	<b>2,58</b>	<b>94</b>	<b>7,96</b> <b>(2,384)</b>	<b>&lt;0,001</b>
<b>SI</b>	<b>9,24</b>	<b>2,04</b>	<b>124</b>	<b>9,33</b>	<b>2,26</b>	<b>167</b>	<b>8,19</b>	<b>2,85</b>	<b>94</b>	<b>7,83</b> <b>(2,382)</b>	<b>&lt;0,001</b>

Die Auswertung basiert jeweils auf den Kindern, die maximal 2 Items der betreffenden Skala nicht beantwortet haben; hier wurden fallbezogene Mittelwerte eingesetzt. Kinder, die mehr als 2 Skalenitems nicht beantwortet hatten, wurden aus der jeweiligen Analyse ausgeschlossen. Hierdurch sind die leicht variierenden Fallzahlen zu erklären.

Es zeigten sich signifikante Effekte der Nachhaltzeitgruppe bei den Skalen „Anstrengungsbereitschaft“, „Gefühl des Angenommenseins“, „Klassenklima“ und „Soziale Integration“.

Nachfolgende Paarvergleiche mit Bonferroni-Korrektur ergaben, dass die Kinder aus der Gruppe NH\_3 (lange Nachhallzeiten) diese Aspekte negativer beurteilten als die Kinder aus den Gruppen NH\_1 und NH\_2. Dieses Ergebnis kann nicht durch Besonderheiten in der Zusammensetzung der Gruppe NH\_3 erklärt werden. Vielmehr befanden sich in der Gruppe NH\_1 besonders viele Kinder mit nicht-deutscher Muttersprache (s. o.); ein Umstand, der das Erreichen eines guten Klassenklimas und die soziale Integration der Kinder in die Gemeinschaft sicher erschwert. Dennoch werden diese Aspekte hier deutlich positiver beurteilt als in der Gruppe NH\_3.

Eine Darstellung der Antworten auf der Ebene der einzelnen Items soll den Sachverhalt veranschaulichen. Betrachten wir einige Items der Skala „Gefühl des Angenommenseins“ (GA), bei denen sich signifikante Gruppenunterschiede in den Antworthäufigkeiten zeigten ( $\chi^2$ -Test,  $p < 0,05$  in allen Fällen). Abbildung 71 zeigt den Prozentsatz von „stimmt“-Antworten auf die Aussagen „Meine Lehrer sind ein bisschen ungeduldig mit mir“ (N=387); „Meine Lehrer schimpfen zuviel mit mir“ (N=387) und „Meine Lehrer sind ein wenig unfreundlich zu mir“ (N=385) für die 3 Nachhallzeitgruppen.

Diese Aussagen werden von den Kindern aus den Klassenräumen mit langen Nachhallzeiten signifikant häufiger mit „stimmt“ beantwortet.

Abbildung 72 zeigt die Antworten auf positiv formulierte Items dieser Skala: „Meine Lehrer hören zu, wenn ich etwas zu sagen habe“ (N=389), „Meine Lehrer reden freundlich mit mir“ (N=388) und „Meine Lehrer haben Zeit für mich“ (N=381). Die Kinder aus den Klassenräumen mit langen Nachhallzeiten stimmen diesen Aussagen seltener zu als die Kinder aus den akustisch günstigeren Räumen.

Abbildung 71:  
Prozentsatz von „stimmt“-Antworten auf negativ formulierte Items der Skala „Gefühl des Angenommenseins“.

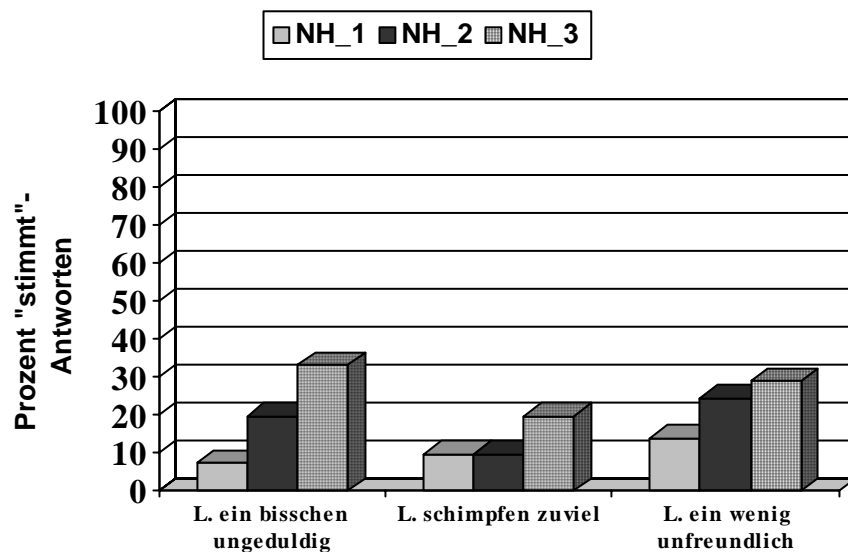
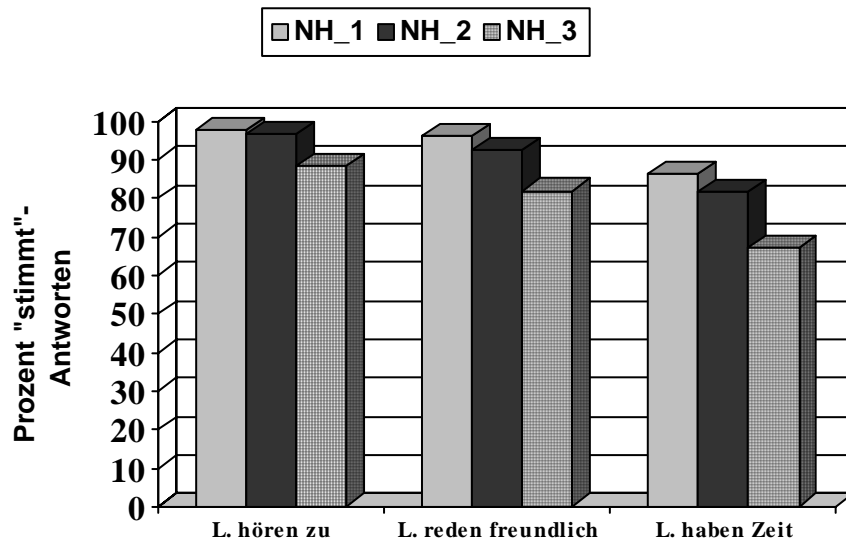


Abbildung 72:  
 Prozentsatz von „stimmt“-Antworten auf positiv formulierte Items der Skala  
 „Gefühl des Angenommenseins“.



Bei der Betrachtung der einzelnen Items dieser Skala fällt auf, dass signifikante Gruppenunterschiede in den Antworthäufigkeiten vor allem bei denjenigen Aussagen vorliegen, die das „kommunikative Klima“ im Unterricht betreffen (Lehrer reden freundlich, hören zu vs. sind ungeduldig; schimpfen zuviel). Bei den nicht unmittelbar kommunikationsbezogenen waren keine Unterschiede nachweisbar. Die Aussage „Meine Lehrer sind gerecht zu mir“ wurde in der Gruppe NH\_1 sogar seltener mit „stimmt“ beantwortet als in den anderen Gruppen. Dieses Ergebnismuster deutet darauf hin, dass die Unterschiede in den Beurteilungen nicht auf eine generell schlechtere Lehrer-Schüler-Beziehung zurückgehen, sondern eher Kommunikationsstörungen im mündlichen Unterricht widerspiegeln. Wie oben dargestellt, lassen sich diese als Folge der durch ungünstige akustische Bedingungen erhöhten Belastung von Lehrkräften und Kindern interpretieren.

### 10.3 Wirkungen bauakustischer Variablen

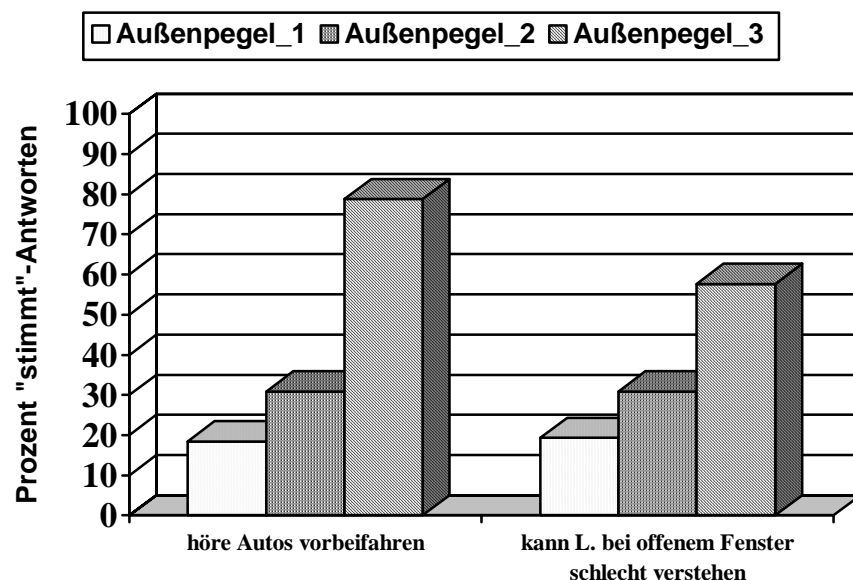
Im Teilprojekt A wurden neben den Nachhallzeiten zahlreiche weitere akustische Messgrößen erhoben, die zur Lärmbelastung der Kinder in der Schule beitragen. Hierzu gehört von außen eindringender Verkehrslärm sowie die Schalldämmung zu den Nachbarräumen und Gängen (s. Abschnitt 4 dieses Berichts). Diese Variablen wurden zu den Aussagen der Kinder im Lärmfragebogen in Beziehung gesetzt. Hierzu wurde die Stichprobe jeweils in drei Gruppen eingeteilt, die sich hinsichtlich der betrachteten akustischen Messgröße deutlich unterschieden.

Hierbei zeigte sich, dass die Kinder die aus den akustischen „Schwachstellen“ ihrer Klassenräume resultierenden Störungen durchaus registrieren und diese auch berichten können. Betrachten wir dies zunächst anhand der Außenlärm-belastung. Diese wurde durch eine Pegelmessung außen vor dem Schulgebäu-

de an der Frontseite des jeweiligen Klassenraums bestimmt (s. Abschnitt 4.3.2). Auf der Grundlage der Häufigkeitsverteilung der Schallpegel wurde die Stichprobe in drei Gruppen eingeteilt: Gruppe 1: häufigste Pegel  $L_{A,Peak} \leq 43$  dB, Gruppe 3: häufigste Pegel  $L_{A,Peak} \geq 50$  dB sowie eine Zwischengruppe (Gruppe 2). Siehe dazu auch Tabelle 12. Nicht überraschend, zeigten sich hochsignifikante Effekte dieser Kategorien auf die Häufigkeit von „stimmt“-Antworten bei den Aussagen „Im Klassenzimmer höre ich Autos an der Schule vorbeifahren“ und „Wenn die Fenster im Klassenzimmer geöffnet sind, dann verstehe ich die Lehrerin (bzw. den Lehrer) schlecht“ ( $\chi^2$ -Test,  $p < 0,001$  in beiden Fällen; vgl. Abbildung 73).

Abbildung 73:

Prozentsatz von „stimmt“-Antworten auf die Aussagen „Im Klassenraum höre ich Autos vorbeifahren“ und „Wenn die Fenster im Klassenzimmer geöffnet sind, dann verstehe ich die Lehrerin schlecht“ in Abhängigkeit vom Außenlärmpegel ( $L_{A,Peak}$ ) (Zweitklässler,  $N=387$  bzw.  $N=389$ ).



Analoge Befunde zeigten sich auch bezüglich der Dämmung zu den Nachbarräumen und Gängen. Auf der Grundlage der akustischen Messergebnisse wurde wiederum dreistufige Variablen „Dämmung zum Nachbarraum“ (Tabelle 8 und „Dämmung zum Flur“ (Tabelle 10) gebildet, die zu den Antworten der Kinder im Lärmfragebogen in Beziehung gesetzt wurde. Erwartungsgemäß zeigten sich hochsignifikante Effekte dieser Variablen auf die Häufigkeit von „stimmt“-Antworten bei den Aussagen „Aus den Räumen neben unserer Klasse hört man Geräusche“ bzw. „Ich höre es, wenn jemand auf dem Gang am Klassenzimmer vorbeiläuft“ ( $\chi^2$ -Test,  $p < 0,001$  bzw.  $p < 0,05$ ; vgl. Abbildung 74, Abbildung 75).



Abbildung 74:  
 Prozentsatz von „stimmt“-Antworten auf die Aussage „Aus den Räumen neben unserem Klassenzimmer hört man Geräusche“ in Abhängigkeit von der horizontalen Dämmung zu den Nebenräumen (Dämmung\_NR) (Zweitklässler, N=384).

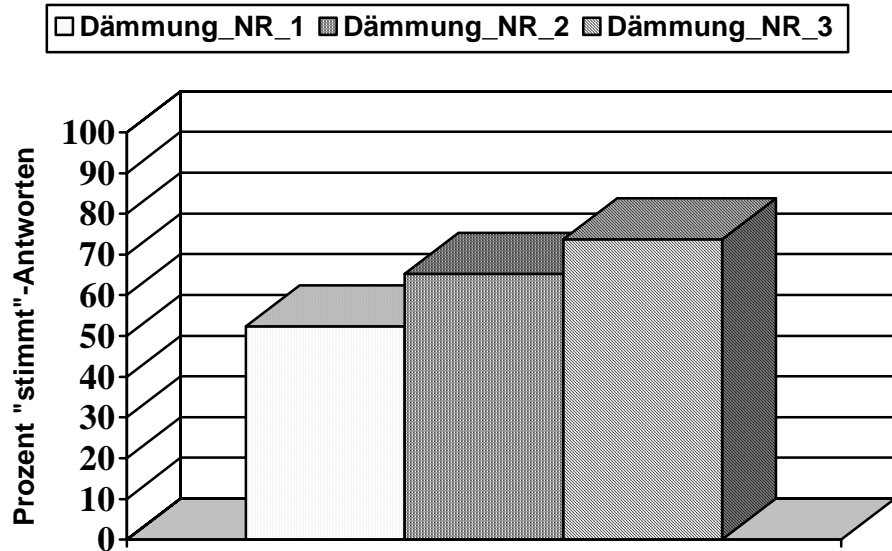
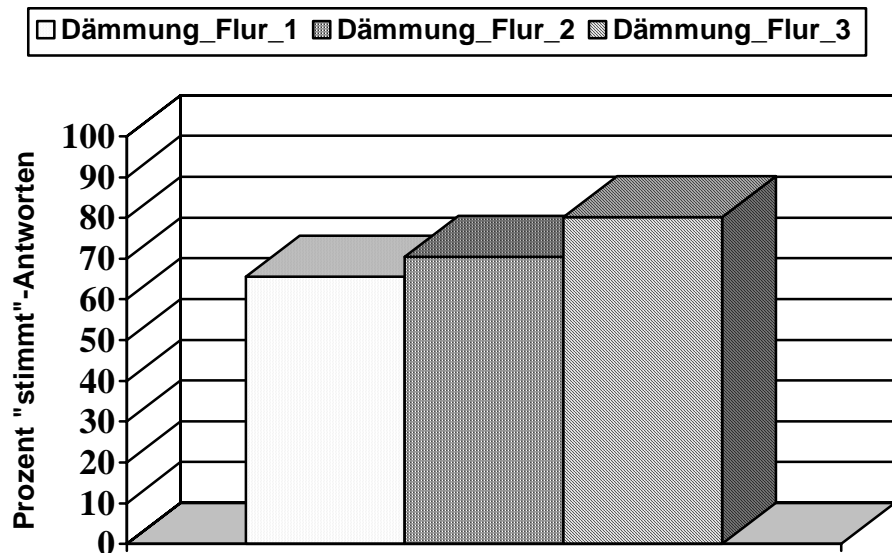


Abbildung 75:  
 Prozentsatz von „stimmt“-Antworten auf die Aussage „Ich höre es, wenn jemand auf dem Gang am Klassenzimmer vorbeiläuft“ in Abhängigkeit von der Dämmung zum Gang (Zweitklässler, N=384).



Es wurde jedoch darauf verzichtet, die bauakustischen Variablen zu den Leistungsdaten in Beziehung zu setzen, da keine begründeten Hypothesen über ei-

nen Wirkzusammenhang aufgestellt werden konnten. Bei der Rekrutierung der Stichprobe wurden schwerpunktmäßig die Nachhallzeiten berücksichtigt, da diese nach derzeitigem Forschungsstand die wichtigste Einflussgröße darstellen. Schulen mit erheblicher Außenlärmbelastung waren in der Stichprobe nicht vertreten. Vielmehr lagen die Innenpegel bei geschlossenem Fenstern in keinem der untersuchten Räume der 2. Klassen über 35 dB(A)  $L_{A,eq}$  (s. Abschnitt 6.4.2). In der Regel wird bei geschlossenem Fenster unterrichtet, wenn nötig wird in den Pausen „stoßgelüftet“. In der hier untersuchten Stichprobe lag daher keine Belastung des Unterrichts durch von außen eindringenden Verkehrslärm vor, die so schwerwiegend war, dass negative Wirkungen auf die Leistungen der Kinder oder das Lernklima zu erwarten gewesen wären.

Ähnliches gilt für die Dämmung der Klassenräume zu den Gängen. Wie in Abschnitt 6.3.2 des Berichts ausgeführt, wurden in vielen Klassen mangelhaft gedämmte Türen vorgefunden. Dies mag zwar gelegentlich zu Störungen führen, in der Regel herrscht jedoch während der Unterrichtszeit Ruhe auf den Gängen. Erhebliche, den Unterricht nachhaltig beeinträchtigende Störungen durch schlecht gedämmte Türen sind daher nicht zu erwarten. Während der Durchführung der Untersuchung wurden in keinem Klassenraum Lärmimmissionen aus den Gängen oder Nachbarräumen festgestellt, die so erheblich waren, dass chronische Wirkungen auf die Leistungen der Kinder angenommen werden könnten.

Generell ist festzuhalten, dass Störungen durch Lärmimmissionen von außen (Flur, Straße, Nachbarräume) in der Regel nur sporadisch auftreten (z.B. an heißen Sommertagen, wenn bei geöffnetem Fenster unterrichtet werden muss). Die Nachhallzeiten im Klassenraum wirken dagegen permanent auf das Unterrichtsgeschehen ein. Wirkungen der akustischen Umwelt auf Leistungen und Befinden hängen maßgeblich von der Einwirkzeit ab – den Nachhallzeiten kommt daher ein unvergleichlich stärkeres Gewicht zu als den anderen Variablen. Die Reduzierung der Nachhallzeiten in den Klassenräumen sollte daher das primäre Ziel auf dem Weg zu einer besseren „Hörumwelt Schule“ darstellen.

# Zusammenfassung

## 11 Hintergrund und Fragestellung des Projekts

Schulisches Lernen basiert maßgeblich auf mündlicher Kommunikation. Schulräume sollten daher so gestaltet sein, dass sie das Kommunizieren mit und unter Kindern fördert. Hierzu gehört, dass die Sprache überall im Raum klar und mühelos zu verstehen sein sollte. Eine zunehmende Anzahl von Untersuchungen belegt jedoch, dass die akustischen Bedingungen in Schulräumen diese Anforderung oft nicht erfüllen. Lange Nachhallzeiten und hohe Grundgeräuschpegel in den Räumen erschweren das Lernen und Lehren. Der Lärm stellt nachweislich einen der wesentlichsten Belastungsfaktoren im Lehrerberuf dar.

In der hier berichteten Studie wurden Wirkungen der akustischen Bedingungen in Schulräumen auf die dort lernenden Kinder analysiert. Den Hintergrund der Untersuchung bilden folgende Forschungsbefunde (s. Einleitung):

- Lärm und Nachhall bewirken bei Kindern erheblich stärkere Verschlechterungen des Sprachverstehens als bei Erwachsenen.
- Lärm beeinträchtigt nicht nur die Sprachwahrnehmung, sondern auch Aufmerksamkeits-, Arbeitsgedächtnis- und Lautverarbeitungsprozesse. Diese Wirkungen zeigen sich bereits im Bereich moderater Pegel und sind bei Kindern stärker ausgeprägt als bei Erwachsenen. Die betroffenen Funktionen sind für die kognitive Entwicklung von entscheidender Bedeutung.
- In Feldstudien wurde wiederholt gezeigt, dass chronisch lärmexponierte Kinder Defizite im Bereich des Lesens aufweisen, die zum Teil durch lärmbedingte Störungen in der Entwicklung der Sprachwahrnehmung bedingt sind.

Das Projekt zielte darauf, die akustischen Bedingungen in Grundschulklassenräumen der Region Stuttgart detailliert zu erfassen und sie zu den Leistungen und dem Befinden der dort lernenden Kinder in Beziehung zu setzen. Die bislang vorliegenden Befunde zur Wirkung von Lärm und Nachhall auf Hörverstehensleistungen von Kindern basieren fast ausschließlich auf laborexperimentellen Untersuchungen. Durch die Konzentration auf das reale Lernumfeld der Kinder sollte die Bedeutung derartiger Befunde im Bezugsfeld Schule eingeschätzt und begründete Empfehlungen für die akustische Gestaltung von Lernumwelten abgeleitet werden.

## 12 Methodik

### 12.1 Stichprobe

In enger Kooperation zwischen Akustikern des Fraunhofer Institutes für Bauphysik (IBP) und Psychologinnen und Psychologen der Universität Oldenburg

und der Katholischen Universität Eichstätt wurde eine Stichprobe von 21 Klassenräumen aus 8 Stuttgarter Grundschulen rekrutiert, die sich hinsichtlich raumakustischer Kriterien unterschieden. Von Seiten der Akustiker wurden, basierend auf einer umfassenden Analyse von Bau- und Raumakustik der teilnehmenden Schulklassen, die akustischen Daten bereitgestellt (vgl. Tabelle 24). Das wesentlichste Kriterium bei der Zusammenstellung der Stichprobe waren die Nachhallzeiten in den Klassenräumen. Die Nachhallzeit ist die bedeutendste Kenngröße der Raumakustik. Lange Nachhallzeiten reduzieren die Sprachverständlichkeit im Raum und bewirken eine Erhöhung des Grundgeräuschpegels, da alle - auch unvermeidliche - Geräusche länger im Raum verbleiben. Die mittleren Nachhallzeiten in den einbezogenen Klassenräumen lagen zwischen 0.5 und 1.1 Sekunden (Richtwert nach DIN 18041: 0,7 Sekunden unbesetzt). In 17 der 21 Klassenräume wurden Zweitklässler unterrichtet, in 4 Räumen Erstklässler. Insgesamt nahmen 398 Zweit- und 89 Erstklässler an der Untersuchung teil.

## 12.2 Leistungstests und Fragebögen

Aufgrund der besonderen Anfälligkeit sprachlicher Funktionen für negative Lärmwirkungen und der maßgeblichen Bedeutung des Zuhörens im Schulunterricht wurden Testaufgaben eingesetzt, die das Verstehen, Speichern und Verarbeiten sprachlicher Informationen beinhalteten. Neben einem einfachen Wortverständnistest wurden Aufgaben zum Kurzzeitgedächtnis (Behalten von Pseudowörtern, Behalten von Bildern), zur Lautverarbeitung (Laute Kategorisieren) und zum Satzverstehen (Verstehen komplexer Anweisungen) einbezogen. Zur Kontrolle der allgemeinen intellektuellen Lernvoraussetzungen wurde ein Kurzttest zur nichtsprachlichen Intelligenz eingesetzt. Weiterhin wurden standardisierte Befragungen zur Lärmbelastung in der schulischen und häuslichen Umwelt sowie zu sozial-emotionalen Schulerfahrungen der Kinder durchgeführt. Konfundierende Faktoren wie Muttersprache und soziale Herkunft der Kinder wurden mittels Eltern- und Lehrerfragebögen erfasst und bei der statistischen Analyse berücksichtigt.

## 12.3 Design

Um die *akuten* Wirkungen der Klassenraumakustik auf die Hörverstehensleistungen zu bestimmen, bearbeiteten die Kinder die Testaufgaben zum Hörverstehen einmal in ihrem Klassenraum und einmal in einem in der jeweiligen Schule bereitgestellten Untersuchungsraum. Die Untersuchungsräume wurden provisorisch raumakustisch so behandelt, dass die Nachhallzeit einheitlich 0,5 s lang war. Das diesbezügliche Vorgehen ist in Abschnitt 7 dokumentiert. Negative Wirkungen einer ungünstigen Klassenraumakustik sollten sich durch eine Leistungsverbesserung im Untersuchungsraum nachweisen lassen. Zur Prüfung der *chronischen* Wirkungen der akustischen Bedingungen wurden die Leistungen unter konstanten akustischen Bedingungen in den Untersuchungsräumen erhoben und auf potenzielle Unterschiede zwischen Kindern aus akustisch unterschiedlichen Klassenräumen hin analysiert.

## 12.4 Ablauf der psychologischen Untersuchung

Die Durchführung der Datenerhebung erfolgte im Zeitraum von acht Wochen vor den Sommerferien 2005. Die Daten wurden in jeder Schule innerhalb einer

Kalenderwoche erhoben. Sämtliche Testverfahren wurden im Klassenverband durchgeführt.

Die Fragebögen für die Kinder bestanden aus einfachen Aussagen, die von den Mitarbeiterinnen vorgelesen wurden und dann von den Kindern auf vorgefertigten Antwortbögen durch Ankreuzen mit „stimmt“ oder „stimmt nicht“ beantwortet wurden. Die Instruktion und Durchführung der Testaufgaben zur nichtsprachlichen Intelligenz sowie zu den kognitiven Grundfunktionen erfolgte mittels des Präsentationsprogramms Microsoft PowerPoint XP. Die Sprachsignale wurden über eine an das Notebook angeschlossene Aktivbox präsentiert, welche sich auf dem Lehrerpult vor der ersten Tischreihe befand. Der Sprachsignalpegel wurde anhand eines Kalibrierrauschens auf 66 dB(A) in 1 m Entfernung justiert.

## 13 Ergebnisse

### 13.1 Akustische Messungen

Die akustischen Untersuchungen geben ein Bild vom akustischen Zustand von 8 Stuttgarter Schulen. Die Schulen sind zwar nicht in jeder Hinsicht repräsentativ, ergeben dann jedoch auch als Extremfälle einen Überblick über den Bestand. Weiter wurde die Korrelation raumakustischer Parameter von Klassenräumen untereinander untersucht. Die Frage nach Unterschieden in der raumakustischen Qualität der Sitzplätze innerhalb eines Klassenraumes wurde ebenfalls untersucht.

Als zusätzlicher Gewinn des Auswahlverfahrens liegen aus 60 Klassenräumen in Grundschulen Werte der Nachhallzeit sowie der Schallpegel bei geöffnetem und geschlossenem Fenster aus verkürzten Messungen vor. Die mittleren Nachhallzeiten überschreiten dabei nicht den Wert von 1,2 s. Im größten Teil der Klassenräume entsprechen die Nachhallzeiten den geltenden Anforderungen oder liegen darunter wobei 0,44 s die kürzeste vorgefundene Nachhallzeit ist. Die Schallpegel in unbesetzten Klassenräumen bei geschlossenen Fenstern überstiegen 40 dB(A) nicht. Im Wesentlichen ist daher lediglich bei offenen Fenstern mit Beeinträchtigungen des Unterrichts durch Lärm von Außen zu rechnen (bis zu 58 dB(A) im unbesetzten Klassenraum). Dann kommen auch die Unterschiede zwischen den Schulen zum Tragen (niedrigster Wert 28 dB(A)). Die Vorauswahl der Schulen ist in Abschnitt 5 dokumentiert.

Die Akustik der 8 teilnehmenden Schulen wurde hinsichtlich Parametern, die die Sprachverständlichkeit im Raum beschreiben (Raumakustik), hinsichtlich der Schalldämmung (Bauakustik) und hinsichtlich der herrschenden Schallpegel erfasst. Eine Übersicht über die wichtigsten ermittelten Parameter und den Wertebereich, den die Ergebnisse einnehmen, gibt Tabelle 24.

Tabelle 24:  
Wertebereiche der akustischen Parameter der Klassenzimmer in der Hauptuntersuchung.

<b>Akustischer Parameter</b>	<b>im ungünstigsten Fall</b>	<b>im günstigsten Fall</b>
Nachhallzeit T (Mittelwert 250 Hz bis 2000 Hz)	1,1 s	0,5 s
Deutlichkeitsgrad $D_{50}$ (Mittelwert 500 Hz bis 2000 Hz)	50 %	83 %
Sprachübertragungsindex STI unter Unterrichtsbedingungen/ Kategorie nach ISO 9921 [11]	0,50/ angemessen	0,61/ gut
bewertete Schallpegeldifferenz $D_w$ zum Flur	28 dB	36 dB (55 dB mit Garderobe)
bewertete Schallpegeldifferenz $D_w$ zwischen Klassenräumen, horizontal	41 dB	68 dB
bewertete Schallpegeldifferenz $D_w$ zwischen Klassenräumen, vertikal	43 dB	eingeschossige Bauten bzw. 62 dB mehrgeschossig
Normtrittschallpegel $L_{n,T}$	81 dB	eingeschossige Bauten bzw. 48 dB mehrgeschossig
Schallpegel vor den Schulen $L_{A,eq,F}$	60 dB	36 dB
$L_{A,eq}$ bei geschlossenem Fenster	39 dB	22 dB
$L_{A,eq}$ bei geöffnetem Fenster	51 dB	36 dB

Wenn einzelne Schulen durch günstige bauakustische Werte auffallen, so ist das in den meisten Fällen auf die Konzeption des Schulgebäudes zurückzuführen und nicht auf besondere Baumaterialien. Von den mehrgeschossigen Bauten erreichte nur eines die Anforderungen für den Normtrittschallpegel. Die übrigen weisen zum Teil erhebliche Überschreitungen der Anforderung nach DIN 4109 [5] auf. Bei eingeschossigen Bauten entfällt dagegen die Lärmbelastung durch Tritt- und Luftschall in vertikaler Richtung zwischen Räumen von vorneherein. Etwas abgemildert trifft dieses Bild auch auf vertikale Luftschalldämmung zu. In horizontaler Übertragungsrichtung werden die Anforderungen nur an einer Schule nicht eingehalten. Die Klassenzimmertüren dämmen durchweg wegen - in der Regel - fehlender Dichtungen schlecht. An einer Schule wird dies durch einen Vorraum (Garderobe) mit einer zweiten Tür mehr als kompensiert. In diesem Fall ist die Luftschalldämmung sowohl zum Flur als auch zum Nachbarraum hervorragend.

Es wurde eine Vielzahl raumakustischer Parameter der Klassenzimmer bestimmt. Um die zusätzlich zur Nachhallzeit wichtigen Parameter zu identifizieren

ren wurde die Korrelation aller Parameter zur Nachhallzeit untersucht. Dabei wurde in der Stichprobe der betrachteten 21 Klassenräume hohe Korrelation ( $R^2 > 0,8$ ) aller Parameter zur Nachhallzeit festgestellt. Daraus folgt zweierlei: Erstens reicht zumindest in dieser Studie ein Parameter zur Beschreibung der Raumakustik aus. Zweitens können die Ergebnisse der psychologischen Tests an Stelle der Nachhallzeit auch auf jeden anderen der eng korrelierenden Parameter wie zum Beispiel den Sprachübertragungsindex STI oder den Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  bezogen werden und es kommen dieselben Ergebnisse heraus. Bei den Messungen der raumakustischen Parameter wurden verschiedene Sprechrichtungen und Positionen des Lehrers und verschiedene Sitzpositionen im Klassenraum simuliert. Die Messungen zeigten keine Unterschiede zwischen Sitzpositionen im vorderen und im hinteren Teil des Klassenraumes.

### 13.2 Akute Wirkungen der Nachhallzeit auf das Hörverstehen

Die akuten Wirkungen der Nachhallzeit auf die Hörverstehensleistungen wurden im Rahmen eines Messwiederholungsplanes erfasst. Hierzu bearbeiteten die Zweitklässler die Aufgaben „Lautdiskrimination“, „Behalten von Pseudowörtern“ und „Satzverstehen“ einmal in ihrem Klassenraum und einmal im akustisch behandelten Untersuchungsraum. Bei den Erstklässlern wurden nur die Aufgaben „Lautdiskrimination“ und „Satzverständnis“ eingesetzt.

Sowohl bei den Erst- als auch bei den Zweitklässlern zeigten sich signifikante Wirkungen der Nachhallzeit im Testraum auf die Leistungen bei der Aufgabe „Lautdiskrimination“. Die Kinder, deren Klassenräume deutlich längere Nachhallzeiten als die Untersuchungsräume aufwiesen, erbrachten bessere Leistungen, wenn sie die Aufgabe im Untersuchungsraum durchführten. Bei denjenigen Kindern, bei denen die Differenz der Nachhallzeiten zwischen den Testräumen geringer ausfiel, ließen sich dagegen keine Leistungsunterschiede nachweisen. Die Erstklässler zeigten eine Leistungsverbesserung im Untersuchungsraum um etwa 10 Prozent.

Bei der in den zweiten Klassen eingesetzten Aufgabe „Pseudowörter-Merken“ zeigten sich ebenfalls signifikante Leistungsverbesserungen im Untersuchungsraum bei denjenigen Kindern, bei denen die Differenz der Nachhallzeiten zwischen den Testräumen groß war. Dagegen ließen sich weder bei den Erst- noch bei den Zweitklässlern signifikante Effekte des Testraums auf die Leistungen im Satzverständnis nachweisen. Dies ist vermutlich auf die Redundanz der Sprache zurück zu führen – fehlende Informationen können anhand des Satzkontextes ergänzt werden. Die Notwendigkeit, unvollständig übermittelte Informationen kontinuierlich zu ergänzen, ist jedoch aufgrund der geringeren Automatisierung der sprachlichen Funktionen für Kinder noch anstrengender als für Erwachsene. Negative Folgen erhöhter Höranstrengung auf die Leistungen sind wahrscheinlich, auch wenn sie in der kurzen Testphase nicht signifikant zutage traten.

Beim Vergleich der in akustisch unterschiedlichen Räumen erbrachten Leistungen konnten somit signifikante Wirkungen der Nachhallzeiten auf die Identifikation und Speicherung sprachlicher Informationen nachgewiesen werden. Wirkungen der Nachhallzeit auf Sprachverstehensleistungen von Kindern wurde

bislang fast ausschließlich in laborexperimentellen Studien untersucht. Diese Effekte konnten im schulischen Feld repliziert werden.

### 13.3 Chronische Wirkungen der Nachhallzeit

Diesem Teil der Untersuchung lag die Überlegung zugrunde, dass permanent einwirkende Störungen grundlegender auditiver und kognitiver Funktionen durch ungünstige raumakustische Bedingungen langfristig zu überdauernden Beeinträchtigungen in der Entwicklung dieser Funktionen führen können. Neben den Leistungserhebungen wurden Befragungen zur Lärmbelastung sowie zu sozial-emotionalen Erfahrungen in der Schule durchgeführt. Geprüft wurde der Einfluss der Nachhallzeiten in den Klassenräumen der Kinder auf diese Variablen.

Auf der Grundlage der mittleren Nachhallzeiten in den Heimatklassenräumen wurde die Stichprobe in 3 Gruppen eingeteilt (NH\_1, NH\_2, NH\_3). Gruppe NH\_1 umfasst alle Kinder, in deren Klassenräumen die Nachhallzeiten im nach DIN 18041 [3] anzustrebenden Bereich (s. Abschnitt 4.1.1) liegen ( $T_{20} \leq 0,65$  s), die Nachhallzeiten der Gruppe NH\_3 sind mit über 0,95 s deutlich zu lang. NH\_2 stellt eine Mittelgruppe dar.

#### 13.3.1 Kognitive Leistungen

Die Wirkungen der Nachhallzeit auf grundlegende kognitive Leistungen wurden anhand der Aufgaben „Laute kategorisieren“ und „Bilder merken“ geprüft. Die Aufgabe „Bilder merken“ erfordert das serielle Behalten von jeweils vier Abbildungen leicht benennbarer Objekte, die nacheinander präsentiert werden. Bei der Aufgabe „Laute kategorisieren“ werden jeweils drei Wörter oder Pseudowörter vorgesprochen, die nach An- oder Endlauten zu kategorisieren sind. Die Aufgabe erfordert genaues Hinhören, kurzzeitiges Speichern und das lautliche Durchgliedern der Wörter bzw. Pseudowörter. Sie beinhaltet Wahrnehmungs-, Arbeitsgedächtnis- und Lautverarbeitungsprozesse, die als wesentliche Voraussetzungen des Schriftspracherwerbs gelten. Übereinstimmend hiermit zeigten sich in den Voruntersuchungen und in der Hauptstudie hochsignifikante Korrelationen zwischen der Leistung in dieser Aufgabe und den Lese- und Rechtschreibleistungen.

Bei der Aufgabe „Bilder merken“ zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Behaltensleistungen in Abhängigkeit von den Nachhallzeiten. Auch wurden in allen Gruppen gleichermaßen phonologische Behaltensstrategien eingesetzt.

Die Leistungen in der Aufgabe „Laute kategorisieren“ unterschieden sich signifikant in Abhängigkeit von der Nachhallzeitgruppe. Die Kinder aus den akustisch ungünstigsten Klassenräumen (Gruppe NH\_3) erbrachten schlechtere Leistungen als die Kinder aus der Gruppe NH\_1. Dieser Effekt kann nicht auf Unterschiede in den allgemeinen intellektuellen Lernvoraussetzungen zurückgeführt werden: Die Analyse der Leistungen im nichtsprachlichen Intelligenztest erbrachte keinerlei Unterschiede zwischen den Gruppen.

Es zeigte sich somit ein signifikanter Leistungsunterschied zwischen den Gruppen, der nicht durch soziodemografische Variablen und nicht durch unter-



schiedliche intellektuelle Lernvoraussetzungen erklärbar ist. Obgleich andere konfundierende Variablen nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden können, lässt sich dieser Befund als Folge der permanent einwirkenden Störungen durch die ungünstige akustische Situation in den Klassenräumen der Kinder aus der Gruppe NH\_3 interpretieren. Da sich bei der Aufgabe „Bilder merken“ keine Unterschiede zwischen den Gruppen nachweisen ließen, können die beim Laute kategorisieren aufgetretenen Effekte nicht auf Unterschiede in der Speicherkapazität zurückgeführt werden. Vielmehr scheint die Fähigkeit des genauen Hinhörens und Verarbeitens der Lautinformation betroffen zu sein.

### 13.3.2 Lärmbelastung

Lange Nachhallzeiten gehen mit einer Erhöhung des Hintergrundgeräuschpegels im Klassenraum einher, da alle Geräusche länger im Raum nachklingen. Auch ergaben sich in früheren Studien Hinweise darauf, dass die Kinder sich in akustisch optimierten Räumen auch insgesamt ruhiger verhalten. Es wurde der Frage nachgegangen, ob sich diese Phänomene in den Beurteilungen der Kinder hinsichtlich der Lärmbelastung im Unterricht widerspiegeln.

Aus den Items des Kinderfragebogens wurden diejenigen zusammengefasst, die speziell die akustische Situation innerhalb des Klassenraums betreffen. Es zeigte sich ein hochsignifikanter Effekt der Nachhallzeit in den Klassenräumen auf die Beantwortung dieser Fragen. Die Kinder aus den Klassen mit niedrigen Nachhallzeiten (Gruppe NH\_1) fühlten sich durch Lärm weniger belastet als die Kinder aus den Räumen mit mittleren und langen Nachhallzeiten. Beispielsweise beantworteten über 80 Prozent der Kinder aus der Gruppe NH\_1 die Aussage „In der Stillarbeit ist es wirklich still“ mit „stimmt“. Aus den Gruppen NH2 und NH3 stimmten nur 69 bzw. 60 Prozent dieser Aussage zu. Im Elternfragebogen befand sich ebenfalls ein Item zur Lärmbelastung der Kinder in der Schule. Auch hier erwies sich die berichtete Belastung als abhängig von der Nachhallzeit im Klassenraum der Kinder.

Es konnte somit ein signifikanter Einfluss der Nachhallzeiten im Klassenraum auf die Lärmbelastung der Kinder nachgewiesen werden. Kinder, die in Klassenräumen mit langen Nachhallzeiten unterrichtet werden, sind durch Lärm stärker belastet als Kinder aus Räumen mit kürzeren Nachhallzeiten.

### 13.3.3 Wohlbefinden und „Lernklima“

Das Unterrichten in lauten, halligen Räumen bedeutet für die Lehrkräfte ständiges Reden mit erhobener Stimme, was auf die Dauer sehr anstrengt. Der Unterrichtsfluss wird durch häufiges Wiederholen von Informationen und Ermahnungen der Kinder zur Ruhe unterbrochen. Unlust, Ärger, Erschöpfung sowie Hals- und Stimmlippenprobleme können die Folge sein. Für die Kinder wird das Zuhören im Unterricht durch die ungünstige Akustik noch anstrengender, auch fühlen sie sich – wie Gespräche der Verf. mit SchülerInnen nahe legen – oft zu Unrecht wegen angeblich „lärmigen“ Verhaltens getadelt – in akustisch sehr ungünstigen Räumen entsteht auch bei „leisem“ Verhalten keine wirkliche Ruhe im Raum. Hinzu kommen die lärmbedingten Störungen der Konzentration und des Gedächtnisses, welche in laborexperimentellen Studien zweifelsfrei nachgewiesen wurden.

Unter solchen Bedingungen sind entspannte und effiziente Unterrichtsgespräche nur bedingt möglich. Hieraus ergab sich die Hypothese, dass sich ungünstige raumakustische Bedingungen durch die erhöhte Belastung der Lehrkräfte und Kinder langfristig negativ auf das sozial-emotionale „Klima“ in der Klasse auswirken. Zur Erhebung dieser Aspekte wurde in den zweiten Klassen der „Fragebogen zur Erfassung sozialer und emotionaler Schulerfahrungen“ (FEES) eingesetzt.

Es zeigten sich signifikante Effekte der Nachhallzeitgruppe bei den Skalen „Anstrengungsbereitschaft“, „Gefühl des Angenommenseins“, „Klassenklima“ und „Soziale Integration“. Die Kinder aus der Gruppe NH\_3 (lange Nachhallzeiten) beurteilten diese Aspekte negativer als die Kinder aus den Gruppen NH\_1 und NH\_2. Dieses Ergebnis kann nicht durch Besonderheiten in der Zusammensetzung der Gruppe NH\_3 erklärt werden. Vielmehr befanden sich in der Gruppe NH\_1 besonders viele Kinder mit nicht-deutscher Muttersprache; ein Umstand, der das Erreichen eines guten Klassenklimas und die soziale Integration der Kinder in die Gemeinschaft sicher erschwert. Dennoch werden diese Aspekte hier deutlich positiver beurteilt als in der Gruppe NH\_3.

Bei der Betrachtung der einzelnen Items fiel auf, dass signifikante Gruppenunterschiede in den Antworthäufigkeiten vor allem bei denjenigen Aussagen vorliegen, die das „kommunikative Klima“ im Unterricht betreffen (Lehrer reden freundlich, hören zu vs. sind ungeduldig; schimpfen zuviel). Bei den nicht unmittelbar kommunikationsbezogenen Items waren keine Unterschiede nachweisbar. Dieses Ergebnismuster deutet darauf hin, dass die Unterschiede in den Beurteilungen nicht auf eine generell schlechtere Lehrer-Schüler-Beziehung zurückgehen, sondern eher Kommunikationsstörungen im mündlichen Unterricht widerspiegeln. Diese lassen sich als Folge der durch ungünstige akustische Bedingungen erhöhten Belastung von Lehrkräften und Kindern interpretieren.

#### 13.3.4 Wirkungen bauakustischer Variablen

Neben den Nachhallzeiten wurden zahlreiche weitere akustische Messgrößen erhoben, die zur Lärmbelastung der Kinder in der Schule beitragen. Hierzu gehört von außen eindringender Verkehrslärm sowie die Schalldämmung zu den Nachbarräumen und Gängen. Diese Variablen wurden zu den Aussagen der Kinder im Lärmfragebogen in Beziehung gesetzt. Hierbei zeigte sich, dass die Kinder die aus den akustischen „Schwachstellen“ ihrer Klassenräume resultierenden Störungen durchaus registrieren und diese auch berichten können. Beispielsweise zeigten sich hochsignifikante Effekte der Außenlärmpegel auf die Häufigkeit von „stimmt“-Antworten bei den Aussagen „Im Klassenzimmer höre ich Autos an der Schule vorbeifahren“ und „Wenn die Fenster im Klassenzimmer geöffnet sind, dann verstehe ich die Lehrerin schlecht“. Analoge Befunde zeigten sich auch bezüglich der Dämmung zu den Nachbarräumen und Gängen.

Es wurde jedoch darauf verzichtet, die bauakustischen Variablen zu den Leistungsdaten in Beziehung zu setzen, da keine begründeten Hypothesen über einen Wirkzusammenhang aufgestellt werden konnten. Bei der Rekrutierung der Stichprobe wurden schwerpunktmäßig die Nachhallzeiten berücksichtigt, da diese nach derzeitigem Forschungsstand die wichtigste Einflussgröße darstellen.

Schulen mit erheblicher Außenlärmbelastung waren in der Stichprobe nicht vertreten. Während der Durchführung der Untersuchung wurden in keinem Klassenraum Lärmimmissionen aus den Gängen oder Nachbarräumen festgestellt, die so erheblich waren, dass chronische Wirkungen auf die Leistungen der Kinder angenommen werden könnten.

Generell ist festzuhalten, dass Störungen durch Lärmimmissionen von außen in der Regel nur sporadisch auftreten (z.B. an heißen Sommertagen, wenn bei geöffnetem Fenster unterrichtet werden muss). Die Nachhallzeiten im Klassenraum wirken dagegen *permanent* auf das Unterrichtsgeschehen ein. Wirkungen der akustischen Umwelt auf Leistungen und Befinden hängen maßgeblich von der Einwirkzeit ab – den Nachhallzeiten kommt daher ein unvergleichlich stärkeres Gewicht zu als den anderen Variablen.

## Folgerungen

Bei der Diskussion um die Qualität von Bildungseinrichtungen sollte auch die Umwelt betrachtet werden, in der das Lernen und Lehren stattfindet. Die hier berichteten Befunde belegen die Bedeutung guter akustischer Bedingungen für erfolgreiches Lernen. Die Optimierung der Raumakustik trägt nicht nur zur Entlastung der Lehrerinnen und Lehrer bei, sondern auch zur Steigerung des Wohlbefindens und der Leistungsfähigkeit der Schülerinnen und Schüler. Eine Nachhallzeit im unbesetzten Zustand von 0,5 s +/- 10% im Hörfrequenzbereich sollte beim Schulbau und bei der Sanierung von Schulen *verbindlich* berücksichtigt werden. Diese bewusst einfach formulierte Anforderung soll mögliche Unklarheiten aufgrund des Interpretationsspielraumes, den DIN 18041 bezüglich Fremdsprachlichkeit, Toleranzbereich und Besetzungszustand lässt, ausräumen. Zugleich ist die hier als Anforderung empfohlene Nachhallzeit kürzer als die nach bestehender DIN 18041 geforderten 0,7 s. Klassenräume mit Nachhallzeiten über einer Sekunde sollten umgehend saniert werden. Die für den Schulbau zuständigen Behörden und Planer sollten umfassend über die Thematik aufgeklärt werden. Wird die Raumakustik gleich von Anfang an mit eingeplant, so verursacht sie nur geringe Mehrkosten.

Wir hoffen, dass die hier berichtete Studie dazu beiträgt, dass das Wissen um die optimale akustische Gestaltung von Klassenräumen auch umgesetzt wird.

# Anhänge

## 14 Literatur

- [1] DIN EN ISO 140-4:1998-12 Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 4: Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden.
- [2] DIN EN ISO 140-7:1998-12 Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 7: Messung der Trittschalldämmung von Decken in Gebäuden
- [3] DIN 18041:2004-05 Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen; Mai 2004
- [4] VDI 2571 Schallabstrahlung von Industriebauten, VDI Richtlinie August 1976
- [5] DIN 4109:1989-11 Schallschutz im Hochbau – Anforderungen und Nachweise
- [6] DIN 52210-1:1984-08 Bauakustische Prüfungen – Luft- und Trittschalldämmung Meßverfahren
- [7] DIN EN 60268-16:2004-01 Elektroakustische Geräte – Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex (IEC 60268-16:2003); Januar 2004
- [8] DIN EN 60651:1994 Schallpegelmesser; Mai 1994
- [9] DIN EN ISO 717-1:1997-01 Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 1: Luftschalldämmung
- [10] DIN EN ISO 717-2:1997-01 Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 2: Trittschalldämmung
- [11] DIN EN ISO 9921:2004-02 Ergonomie – Beurteilung der Sprachkommunikation (ISO 9921:2003); Februar 2004
- [12] ISO 9921:2003 Ergonomics – Assessment of speech communication; Oktober 2003
- [13] Baddeley, A. D., Gathercole, S. E. & Papagno, C. (1998). The phonological loop as a language learning device. *Psychological Review*, 105, 158-173.
- [14] Beaman, C.P. (2005). Auditory distraction from low-intensity noise: A review of the consequences for learning and workplace environments. *Applied Cognitive Psychology* 19, 1041-1064.

- [15] Bradley J.S. (1998). Relationship among Measures of Speech Intelligibility in Rooms; *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 46, No. 5, Mai 1998
- [16] Bradley J.S. (2005), Korrespondenz, Institute for Research in Construction, National Research Council, Ottawa K1A 0R6, Canada
- [17] Bradley, L. & Bryant, P. (1983). Categorizing sounds and learning to read: A causal connection. *Nature* 301, 419-421.
- [18] Bradlow, A., Kraus, N., & Hayes, E. (2003). Speaking clearly for children with learning disabilities: Sentence perception in noise. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 46, 80-97.
- [19] Buch, M. & Frieling, E. (2001). Belastungs- und Beanspruchungsoptimierung in Kindertagesstätten. Bericht des Instituts für Arbeitswissenschaft der Universität Kassel.
- [20] Cunningham, J., Nicol, T., Zecker, S. G., Bradlow, A., & Kraus, N. (2001). Neurobiologic responses to speech in noise in children with learning problems: deficits and strategies for improvement. *Clinical Neurophysiology* 112, 758-767.
- [21] Dempster, F. (1993). Resistance to interference: Developmental changes in a basic processing mechanism. In: Howe, L. & Pasnak, R. (Eds.). *Emerging Themes in Cognitive Development*, pp. 3-27. New York.
- [22] Doyle, A.B. (1973). Listening to distraction: A developmental study of selective attention. *Journal of Experimental Child Psychology* 15, 100-115.
- [23] Elliott, L. L. (1979). Performance of children aged 9 to 17 years on a test of speech intelligibility in noise using sentence material with controlled word predictability. *Journal of the Acoustical Society of America* 66, 651-653.
- [24] Elliott, E.M. (2002). The irrelevant speech effect and children: Theoretical implications of developmental change. *Memory & Cognition* 30(3), 478-487.
- [25] Evans, G. & Lepore, S. J. (1993): Non-auditory effects of noise on children. *Children's Environment* 10: 31-51.
- [26] Evans, G. & Maxwell, L. (1997). Chronic noise exposure and reading deficits: The mediating effects of language acquisition. *Environment and Behavior* 29, 638-656.
- [27] Fasold W., Sonntag E., Winkler H. (1987). *Bau- und Raumakustik*; 1. Auflage 1987, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin

- [28] Flook, L.; Repetti, R.L.; Ullman, J.B. (2005). Classroom social experiences as predictors of academic performance. *Developmental Psychology* 41, 319-327.
- [29] Gathercole, S., Pickering, A., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental Psychology* 40, 177-190.
- [30] Geffner, D.; Lucker, J.R. & Koch, W. (1996). Evaluation of auditory discrimination in children with ADD and without ADD. *Child Psychiatry and Human Development* 26, 169-179.
- [31] Godfrey, J. J., Syrdallasky, A. K., Millay, K. K., & Knox, C. M. (1981). Performance of dyslexic children in speech-perception tests. *Journal of Experimental Child Psychology*, 32, 401-424.
- [32] Gumenyuk, V., Korzyukov, O., Alho, K., Escera, C., & Naatanen, R. (2004). Effects of auditory distraction on electrophysiological brain activity and performance in children aged 8-13 years. *Psychophysiology*, 41, 30-36.
- [33] Haines, M.M.; Stansfeld, S.A.; Berglund, R.F. & Head, J. (2001). Chronic aircraft noise exposure, stress responses, mental health and cognitive performance in school children. *Psychological Medicine* 31, 265-277.
- [34] Hasselhorn, M. & Grube, D. (2003). Das Arbeitsgedächtnis: Funktionsweise, Entwicklung und Bedeutung für kognitive Leistungsstörungen. *Sprache - Stimme - Gehör* 27, 31-37. 2003.
- [35] Hazan, V. & Barrett, S. (2000). The development of phonemic categorization in children aged 6-12. *Journal of Phonetics* 28, 377-396.
- [36] Heims, A. (2005). Auditive Verarbeitungs- und Wahrnehmungsfunktionen bei Kindern mit Lese-/Rechtschreibstörung. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Psychologie, Universität Oldenburg.
- [37] Henze, A. (2006). Entwicklung eines Fragebogens zur Erfassung der subjektiv empfundenen Lärmsituation. Eine empirische Studie mit Grundschulkindern. Diplomarbeit KU Eichstätt, Lehrstuhl für Arbeits-, Umwelt- und Gesundheitspsychologie.
- [38] Hodgson, M. R., Rempel, R., Kennedy, S. (1999) Measurement and prediction of typical speech and background noise levels in university classrooms during lectures. *J. Acoust. Soc. Am.* 105/1999.
- [39] Johnson, C. E. Children's phoneme identification in reverberation and noise. (2000). *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 43, 144-157.

- [40] Karabiber Z., Vallet M. (2003). Classroom acoustics policies – An Overview; Euronoise Neapel 2003
- [41] Klatte, M., Meis, M., Janott, C., Hilge, C. & Schick, A. (2002). Zum Einfluss der Sprachverständlichkeit auf kognitive Leistungen: Eine Studie mit Grundschulkindern. In: Jekosch, U. (Hrsg.). Fortschritte der Akustik - DAGA 2002. Oldenburg: DEGA e.V.
- [42] Klatte, M.; Lee, N. & Hellbrück, J. (2002). Effects of irrelevant speech and articulatory suppression on serial recall of heard and read materials. *Psychologische Beiträge* 44, 166-186.
- [43] Klatte, M.; Sukowski, H.; Meis, M. & Schick, A. (2004). Effects of irrelevant speech on speech perception and phonological short-term memory in children aged 6 to 7 years. *Proceedings of the Joint Congress CFA/DAGA*, pp 193-194.
- [44] Kujala, T.; Shtyrov, Y.; Winkler, I.; Saher, M.; Tervaniemi, M. (2004). Long-term exposure to noise impairs cortical sound processing and attention control. *Psychophysiology* 41, 875-881.
- [45] Märtens, C. (in Vorb.). Nachhallzeiten und Sprachverständlichkeit in Unterrichtsräumen; Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart, noch laufende Dissertation.
- [46] Marx, H. (1998). Knuspels Leseaufgaben. Göttingen: Hogrefe.
- [47] May, P. (2002). Hamburger Schreibprobe (HSP). 6. Auflage. Göttingen: Hogrefe.
- [48] Mayo, L. H., Florentine, M., & Buus, S. (1997). Age of second-language acquisition and perception of speech in noise. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 40, 686-693. 2003.
- [49] Mayringer, H. & Wimmer, H. (2003). Salzburger Lese-Screening (SLS) für die Klassenstufen 1-4. Göttingen: Hogrefe.
- [50] Mommertz E., Engel G. (2002). Besser leise lernen. *Trockenbau Akustik* 11/02, Verlag Rudolf Müller, Köln.
- [51] Neath, I. (2000). Modeling the effects of irrelevant speech on memory. *Psychonomic Bulletin & Review* 7, 403-423.
- [52] Neuman, A.C. & Hochberg, I. (1983). Children's perception of speech in reverberation. *Journal of the Acoustical Society of America* 73(6), 2145-2149.
- [53] Papso, C. F. & Blood, I. M. (1989). Word recognition skills of children and adults in background noise. *Ear and Hearing* 10 (4), 235-236.



- [54] Rauer, W. & Schuck, K.-D. (2004). Fragebogen zur Erfassung von emotionalen und sozialen Schulerfahrungen von Grundschulkindern erster und zweiter Klassen (FEES). Göttingen: Hogrefe.
- [55] Rickes O., Schmitz A. (2005). Beeinträchtigt die Raumakustik der Schulgebäude die Gesundheit der Lehrkräfte? Fortschritte der Akustik. 31. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Akustik, München, 2005.
- [56] Ruhe, C. (2003). Schulraumakustik aus der Sicht der Beratungspraxis. Beiträge zur psychologischen Akustik. Hören in Schulen. BIS Oldenburg S. 65-83
- [57] Schick, A.; Klatte, M.; Meis, M. (1999): Die Lärmbelastung von Lehrern und Schülern – ein Forschungsstandbericht. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 46(3): 77-87.
- [58] Schneider, W. (2001). Training der phonologischen Bewusstheit. In: Klauer, K.-J. (Hrsg.). Handbuch Kognitives Training. 2. Auflage. Göttingen: Hogrefe
- [59] Schönwälder, H.-G. (2001). Die Arbeitslast der Lehrerinnen und Lehrer. Essen: Neue Deutsche Schule.
- [60] Schönwälder, H.G.; Berndt, J.; Ströver, F. & Tiesler, G. (2004). Lärm in Bildungsstätten – Ursachen und Minderung. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Fb 1030.
- [61] Steinbrink, C. & Klatte, M. Phonological working memory in dyslexic children. Manuskript in Vorbereitung.
- [62] Stock, C.; Marx, P. & Schneider, W. (2004). BAKO 1-4. Basiskompetenzen für Lese-/Rechtschreibleistungen. Göttingen: Beltz.
- [63] Surprenant, A. (1999). The effect of noise on memory for spoken syllables. International Journal of Psychology 34, 328-333.
- [64] Tiesler G. (2005). Leise lernt leichter - Teil 1. Trockenbau Akustik 4/05, Verlag Rudolf Müller, Köln.
- [65] Wijngaarden, S. J. v., Steeneken, H. J., & Houtgast, T. (2003). Quantifying the intelligibility of speech in noise for non-native listeners. Journal of the Acoustical Society of America 111, 1906-1916.
- [66] Zannin P.H.T., Loro C. P. (2005). Acoustical Quality of Educational Buildings – The Acoustic of Modular Classrooms; Tagungsband Internoise Rio de Janeiro, 2005
- [67] Ziegler, J.C.; Pech-Georgel, C. & George, F. (2005). Deficits in speech perception predict language learning impairment.

## 15 Projektbezogene Tagungsbeiträge

- [68] Klatte, M.; Wegner, M. & Hellbrück, J. (2006). Feldstudie zur Akustik in Schulen und ihrer Wirkungen auf Kinder: Ergebnisse aus Leistungstests und Fragebögen. Fortschritte der Akustik. Beiträge zur 32. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Akustik. DAGA 2006, Braunschweig.
- [69] Seidel, J.; Weber, L.; Leistner, P. (2006). Akustische Bedingungen in Grundschulen und Ihre Wirkung auf die Lernleistung der Kinder Teil 1: akustische Untersuchungen. Fortschritte der Akustik. Beiträge zur 32. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Akustik. DAGA 2006, Braunschweig.
- [70] Klatte, M.; Seidel, J.; Wegner, M.; Hellbrück, J. & Leistner, P. (2006). Effects of classroom reverberation time on speech perception and noise ratings in elementary school children: A field study. Euronoise 2006, Tampere, Finland.
- [71] Klatte, M.; Wegner, M. & Hellbrück, J. (2005). Noise in the School Environment and Cognitive Performance in Elementary School Children Part B – Cognitive Psychological Studies. Proceedings of the Forum Acusticum 2005, Budapest.
- [72] Seidel, J.; Weber, L.; Leistner, P.; Laschczok, S. (2005). Acoustic properties in German class rooms and their effect on the cognitive performance of primary school pupils. Proceedings of the Forum Acusticum 2005, Budapest.
- [73] Klatte, M.; Wegner, M. & Hellbrück, J. (2005). Lärm in der schulischen Umwelt und kognitive Leistungen von Grundschulkindern. Teil B: Kognitionspsychologische Untersuchungen. Fortschritte der Akustik. 31. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Akustik, München.
- [74] Seidel, J.; Weber, L.; Leistner, P. (2005). Lärm in der schulischen Umwelt und kognitive Leistungen bei Grundschulkindern. Teilprojekt A: Umwelt- und bauakustische Untersuchungen. Fortschritte der Akustik. 31. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Akustik, München.

## 16 Formelzeichen und Abkürzungen

$A$	Index für A-bewertete Größen, z.B. $L_A$	
$A$	Äquivalente Schallabsorptionsfläche	[m <sup>2</sup> ]
$C_{50}$	Deutlichkeitsmaß	[dB]
$D$	Schallpegeldifferenz	[dB]
$D_{n,w}$	Bewertete Normschallpegeldifferenz	[dB]
$D_{nT,w}$	Bewertete Standardschallpegeldifferenz	[dB]
$D_w$	Bewertete Schallpegeldifferenz	[dB]
$D_{50}$	Deutlichkeitsgrad	[%]
$_{eq}$	Index für äquivalent, z.B. $L_{eq}$ Äquivalenter Schallpegel	
EDT	Early Decay Time, dt. frühe Abklingzeit	[s]
$F$	Index für Zeitkonstante Fast bei Schallpegeln, z.B. $L_{A,F}$	
$f$	Frequenz	[Hz]
$G$	Absolute Wegabhängigkeit	[*]
$H$	Relative Wegabhängigkeit	[-]
Hz	Frequenzeinheit Hertz	
$i$	ganzzahlige Variable	[-]
$L$	Schalldruckpegel	[dB]
$L_{A,eq}$	Äquivalenter A-bewerteter Schalldruckpegel	[dB]
$L_{A,Peak}$	Häufigster A-bewerteter Schalldruckpegel	[dB]
$L_{xx}$	Pegel, der zu xx% der Zeit überschritten wurde	[dB]
$L_{max}$	Mittlerer Maximalpegel = $L_1$	[dB]
$L'_n$	Normtrittschallpegel	[dB]
$L'_{n,w}$	Bewerteter Normtrittschallpegel	[dB]
$L_w$	Schalleistungspegel	[dB]
$N_r$	Anzahl der Klassenräume	[-]
$N_w$	Anzahl der Übertragungswege	[-]
$p$	Schalldruck	[Pa]
$P$	Variable für einen raumakustischer Parameter	
$r$	Laufvariable über die Räume	
$R$	Schalldämm-Maß ohne Nebenwege	[dB]
$R'$	Schalldämm-Maß mit Nebenwegen	[dB]
$R'_w$	Bewertetes Schalldämm-Maß mit Nebenwegen	[dB]
$S$	Fläche des Trennbauteiles	[m <sup>2</sup> ]
STI	Speech Transmission Index, dt. Sprachübertragungsindex	[-]
$\sigma$	Standardabweichung	
$\sigma_G$	Standardabweichung der absoluten Wegabhängigkeit	[*]
$\sigma_H$	Standardabweichung der relativen Wegabhängigkeit	[-]
$t_s, t_c$	Schwerpunktzeit, engl. Centre Time	[s]
$T$	Nachhallzeit	[s]
$T_{20}$	Nachhallzeit ermittelt aus 20 dB Abfall	[s]
$T_{30}$	Nachhallzeit ermittelt aus 30 dB Abfall	[s]
$V$	Volumen eines Klassenraumes	[m <sup>3</sup> ]
$_w$	Index für nach ISO 717 bewertete Größen	
$w$	Laufvariable über die Übertragungswege	
$x$	Variable	
$\langle x \rangle$	Mittelwert von $x$	[*]
$\langle G \rangle$	Mittlere absolute Wegabhängigkeit	[*]
$\langle H \rangle$	Mittlere relative Wegabhängigkeit	[-]