

# **Klassenraumakustik**

Diplomarbeit

verfasst von

**Maurice Müller**

Institut für Breitbandkommunikation  
der Technischen Universität Graz

Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Kubin

Betreuer/Begutachter: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Graber, Gerhard

Graz, im September 2009

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Maurice Müller  
Graz, September 2009

## **Statutory Declaration**

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Maurice Müller  
September 2009

## Zusammenfassung

Lärm ist ein täglicher Belastungsfaktor in Klassenräumen, ein Umstand, der auch von Lehrer/innen in zahlreichen Studien bestätigt wird. Diese Diplomarbeit geht auf die Wirkungen von Lärm und Nachhallzeit auf Schüler und Lehrer im Klassenraum ein. Nach einer Literaturrecherche aller akustischen Bedingungen des Klassenraumes werden raumakustische Messungen in Grazer Schulen, einer Hauptschule in Trofaiach (Steiermark) und einer Grundschule in Wiltz/Luxemburg durchgeführt. Dabei wird überprüft, ob eine akustische Typisierung der Klassenräume in Abhängigkeit vom Baujahr möglich ist. Es werden Messungen der Klassenräume im besetzten und unbesetzten Zustand sowie mit Überdeckung der Schulbänke durch Bühnenmolton durchgeführt, um die äquivalente Absorptionsfläche der Schüler und des Bühnenmoltons zu ermitteln und zu vergleichen. In 5 Fluren werden Nachhallzeitmessungen und Schallpegelmessungen während der Pausen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Akustik in Klassenzimmern in vielen Fällen die Anforderungen der Norm nicht erfüllt und eine grobe Typisierung der Klassenraumakustik in Abhängigkeit vom Baujahr möglich ist.

## Abstract

Noise is an everyday stress factor in classrooms, a fact that is confirmed by teachers in numerous studies. This diploma thesis comes on the effects of noise and reverberation time on pupils and teachers in classrooms. After a literature research of the acoustic conditions of the classroom, acoustic measurements were carried out in schools in Graz, a secondary modern school in Trofaiach (Styria) and an elementary school in Wiltz/Luxembourg. Besides, it is checked whether an acoustic classification of the classrooms as a function of the construction year is possible. Measurements of classrooms are carried out in the occupied and unoccupied state as well as by covering of school desks by molton to determine and to compare the equivalent absorption surface of the pupils and the molton. In five corridors reverberation time measurements and sound level measurements are carried out during the breaks. The results show that the acoustics of classrooms in many cases do not fulfill the requirements of the standard and that a rough classification of the classroom acoustics as a function of the year of construction is possible.

*„If everything were linear, nothing would influence nothing”*  
Albert Einstein

## Danksagung:

Folgenden Personen, die mir bei der Entstehung meiner Diplomarbeit behilflich waren, möchte ich meinen Dank aussprechen:

Den netten Mitarbeiter/innen der Bibliothek des Psychologischen Instituts und der Erziehungswissenschaften der Universität Graz sowie der Bibliothek der Technischen Universität Graz, der Hauptbibliothek der Universität Graz, des Institutes für elektronische Musik und Akustik und der Arbeitsgemeinschaft „Zuhören“, ohne die ich viele Dokumente nicht gefunden hätte. Weiters allen Personen, die mir Dokumente per Post oder per Email zukommen haben lassen, insbesondere der Firma Ecophon, die mir die wichtige Studie der Heriot-Watt-Universität Edinburgh kostenlos zugeschickt hat und der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Dortmund (BAuA), die mir die wichtigen Publikationen „Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse“ über Lärmwirkungen kostenlos zugeschickt hat.

Dem Landesschulrat für Steiermark für die Zustimmung zu den raumakustischen Messungen in Grazer Schulen sowie den Direktoren des Bundesgymnasiums und Bundesrealgymnasiums Seebacher, der Bundeshandelsakademie Graz (Grazbachgasse) und der Bundesbildungsanstalt für Kindergartenpädagogik Graz (Grottenhofstrasse).

Dem Abgeordneten und Bürgermeister der Stadt Wiltz (L), Romain Schneider, für seine Zustimmung zu den raumakustischen Messungen in der Primärschule Wiltz; dem Schuldelegierten und Lehrer Yves Schlabertz für die zeitliche Organisation meiner Messungen; allen Lehrerinnen und Lehrern, die sich viel Zeit genommen haben und großes Interesse gezeigt haben. Bedanken möchte ich mich auch beim Portier der Primärschule Franz Schenk, der mir immer tatkräftig beim Transportieren des Equipments behilflich war (und wenn ich mich wieder eingesperrt hatte).

Dem Kollegen Thomas Pienn und dem Direktor der Franz Jonas-Hauptschule Trofaiach für die Organisation der raumakustischen Messungen.

Herrn ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Graber für das interdisziplinäre Thema meiner Diplomarbeit sowie für das Bereitstellen des Equipments für die Messungen und zum Schluss meiner Mutter für Ihre lange Ausdauer in meinem Werdegang.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Klassenraumakustik und Lärm: Eine aktuelle Problematik</b>	<b>10</b>
1.1. Einleitung .....	10
1.2. Wissenschaftliche Literatur zur Lärmsituation an Schulen .....	11
<b>2. Lärm in der Schule: Ein Gebiet der Lärmwirkungsforschung</b>	<b>39</b>
2.1. Lärmwirkungsforschung: Ein kurzer Überblick .....	41
2.1.1. Aurale Wirkungen.....	45
2.1.2. Extraaurale Wirkungen .....	48
2.2. Lärmwirkungsforschung im Klassenraum .....	56
2.2.1. Nachhallzeit und Belastung von Lehrer/innen und Schüler/innen.....	56
2.2.2. Lärmwirkung auf Schulkinder: Nachhallzeit, Leistungsfähigkeit und der „Irrelevant Sound Effect“,.....	69
<b>3. Klassenraumakustik: Aktueller Stand der Forschung</b>	<b>86</b>
3.1. Normen und gesetzliche Regelungen.....	86
3.2. Zusammenhänge der Nachhallzeit, des SNR, des STI und der Sprachverständlichkeit in Klassenräumen .....	91
3.2.1. Theoretische und gemessene Zusammenhänge zwischen der NHZ, dem SNR und STI in Klassenräumen .....	92
3.2.2. Zusammenhänge zwischen der Nachhallzeit, dem SNR, dem STI und der subjektiven Sprachverständlichkeit in Klassenräumen.....	105
3.3. Der Lombard Effekt und die Sprechanstrengung von Lehrern und Lehrerinnen im Klassenraum.....	114
3.4. Aktuelle Messergebnisse über Klassenraumakustik in der Literatur.....	120
3.5. Zusammenfassung zum Einfluss der Nachhallzeit im Klassenraum .....	123
<b>4. Untersuchungen zur äquivalenten Absorptionsfläche von Schüler und Schülerinnen.</b>	<b>125</b>
4.1. Fragestellungen .....	125
4.2. Beschreibung des Messverfahrens und der Messtechnik.....	127
4.3. Messungen und Auswertungen .....	133
4.3.1. Messwerte der Grundschule Wiltz/Luxemburg .....	134
4.3.2. Zusammenfassung und Interpretation.....	161

4.3.3. Durchschnittliche äquivalente Absorptionsfläche des Bühnenmoltons im Vergleich zur äquivalenten Absorptionsfläche der Schüler/innen .....	168
4.3.4. Vergleich der durchschnittlichen Nachhallzeit von 8 Klassenräumen im besetzten und leeren Zustand .....	173
4.3.5. Vergleich der durchschnittlichen Nachhallzeit von 13 Klassenräumen mit und ohne Bühnenmolton .....	174
4.3.6. STI und EDT in Abhängigkeit von der Nachhallzeit $T_{30}$ .....	176
4.3.7. Nachhallzeit von Fluren und Schallpegelmessungen während den Pausen.....	177
4.3.8. Überprüfung eines Vorhersagemodells für den Artikulationsverlust (Alcons) in besetzten Klassenräumen. ....	183
4.3.9. Untersuchungen im Sonderunterrichtsraum (Raum 1 Altes Gebäude AG).....	193
4.3.10. Schussfolgerung.....	198
<b>5. Messungen in Grazer Schulen und einer Hauptschule in Trofaiach (Steiermark)</b>	<b>199</b>
5.1. Bundesgymnasium Seebacher.....	202
5.1.1. Messungen .....	202
5.1.2. Zusammenfassung und Interpretation.....	211
5.2. Bundeshandelsakademie Grazbachgasse (HAK).....	216
5.2.1. Messungen .....	216
5.2.2. Zusammenfassung und Interpretation.....	234
5.3. Bundesbildungsanstalt für Kindergartenpädagogik (Grottenhofstrasse) .....	240
5.3.1. Messungen .....	240
5.3.2. Zusammenfassung und Interpretation.....	249
5.4. Franz Jonas-Hauptschule (Trofaiach, Steiermark).....	254
5.4.1. Messungen .....	254
5.4.2. Zusammenfassung und Interpretation.....	261
<b>6. Raumakustische Typisierung in Abhängigkeit vom Baujahr</b>	<b>266</b>
<b>7. Maßnahmen zur Verbesserung der Raumakustik und zur Lärmreduktion</b>	<b>270</b>
7.1. Technische Maßnahmen.....	270
7.2. Pädagogische Maßnahmen.....	279



---

<b>8.</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick</b>	<b>282</b>
<b>9.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>285</b>
<b>10.</b>	<b>Anhang A: Details zu den Studien</b>	<b>298</b>
<b>11.</b>	<b>Anhang B: Tabellen</b>	<b>301</b>
<b>12.</b>	<b>Anhang C: Anleitung für Nachhallzeitmessungen in Klassenräumen</b>	<b>303</b>
<b>13.</b>	<b>Anhang D: Regressionsberechnung und Messwerttabellen für Grundschule Wiltz/Luxemburg</b>	<b>304</b>

---

# 1. Klassenraumakustik und Lärm: Eine aktuelle Problematik

*„Eines Tages wird der Mensch den Lärm so unerbittlich bekämpfen müssen wie die Cholera  
und die Pest“*  
Robert Koch

## 1.1. Einleitung

Das Thema Lärm und seine gesundheitlichen Folgen wurde in den letzten Jahren intensiver als je zuvor in den Medien diskutiert, demzufolge findet dieses Jahr in zahlreichen Ländern zum 12. Mal der „International Noise Awareness Day“ statt, der die Menschen für diese Thematik sensibilisieren soll. Die EU hat durch die EU-Richtlinie 2003/10/EG<sup>1</sup> die Auslösewerte (z. B. zur Gehörschutz-Tragepflicht) am Arbeitsplatz um 5 dB(A) gegenüber der Richtlinie von 1986 (86/188/EWG) gesenkt. Die Lärmproblematik insbesondere am Arbeitsplatz gilt zugleich als großes ökonomisches Problem, denn Lärmschwerhörigkeit gilt heute als eine der am weitesten verbreiteten Berufskrankheiten.<sup>2</sup>

Auch die Lärmproblematik in Bildungsstätten rückte in den vergangenen Jahren verstärkt ins öffentliche und wissenschaftliche Interesse, wie zahlreiche Studien vor allem aus dem deutschsprachigen Raum deutlich machen. Es sind dies vor allem Studien der Carl von Ossietzky-Universität Oldenburg, des Instituts für Interdisziplinäre Schulforschung (ISF) der Universität Bremen und der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt.

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich in der Einleitung mit der Lärmsituation an Schulen aus der wissenschaftlichen Literatur und soll zeigen, wie die Raumakustik mit dem Lärmpegel im Klassenraum in Verbindung gebracht werden kann, sowie Gründe für Verbesserungen der raumakustischen Bedingungen nennen.

In Kapitel 2 werden Erkenntnisse aus der Lärmwirkungsforschung dargestellt und gezeigt, welchen Effekt die Nachhallzeit auf den Geräuschpegel und die Belastung im Klassenzimmer sowie auf die Leistungsfähigkeit der Schüler hat.

In Kapitel 3 wird der aktuelle Stand der Klassenraumakustik diskutiert; es werden die Normen sowie die Zusammenhänge der raumakustischen Gütemaße im Klassenzimmer dargestellt,

---

<sup>1</sup> In Österreich umgesetzt unter anderem durch die „Verordnung Lärm und Vibrationen“ [VOLV].

<sup>2</sup> Vgl. [AUVA].

außerdem wird auf den Lombard-Effekt eingegangen und alle Einflüsse der Nachhallzeit im Klassenraum zusammengefasst.

In Kapitel 4 sind Untersuchungen zur äquivalenten Absorptionsfläche von Schüler/innen in einer Grundschule in Wiltz/Luxemburg durchgeführt worden. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen stellte sich die Frage ob eine akustische Typisierung von Klassenräumen in Abhängigkeit des Baujahres möglich ist. Daraufhin sind in Kapitel 5 raumakustische Messungen in 3 Grazer Schulen und einer Hauptschule in Trofaiach durchgeführt worden, um in Kapitel 6 eine akustische Typisierung in Abhängigkeit vom Baujahr zu erstellen.

In Kapitel 7 werden die technischen (Absorber) und pädagogischen Maßnahmen aufgelistet und ihre Wirkung in der Praxis beschrieben.

## 1.2. Wissenschaftliche Literatur zur Lärmsituation an Schulen

In Österreich führte die Kooperation „ARGE Zuhören“<sup>3</sup> im Jahr 2005 eine erste Onlinebefragung zum Thema Lärm in der Schule mit 1200 Teilnehmer/innen durch, unter denen auch 375 Lehrer/innen aus der Steiermark waren. Diese Pilotstudien wurden mit Unterstützung der GÖD<sup>4</sup> in den Jahren 2006-2009 zu österreichweiten Lehrer/innen-Befragungen ausgeweitet, an denen bis heute 3358 Lehrer/innen teilgenommen haben. Die Befragungsergebnisse von 2007-2008 mit 1459 Pflichtschul-Lehrer/innen sind kürzlich publiziert worden<sup>5</sup>. Abb. 1, 2 und 6 zeigen das Ergebnis zu drei Fragen, die 3358 Pflichtschullehrer/innen aus Niederösterreich, Oberösterreich, Salzburg, Steiermark und Wien in den Onlinebefragungen beantwortet haben:

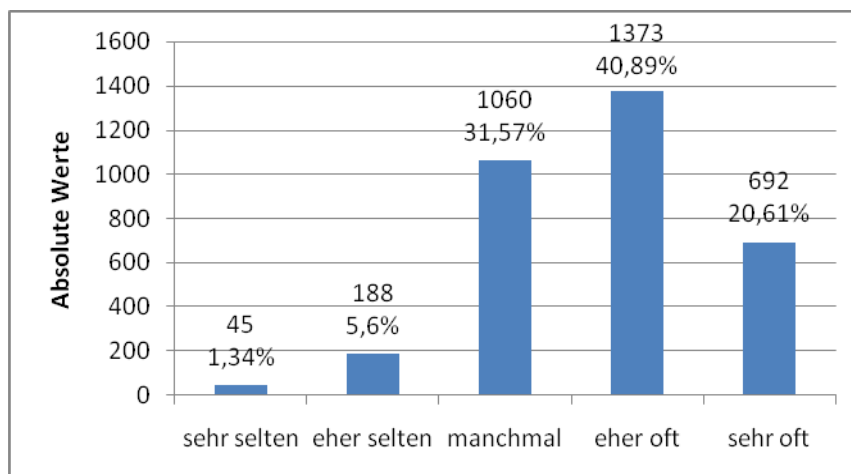


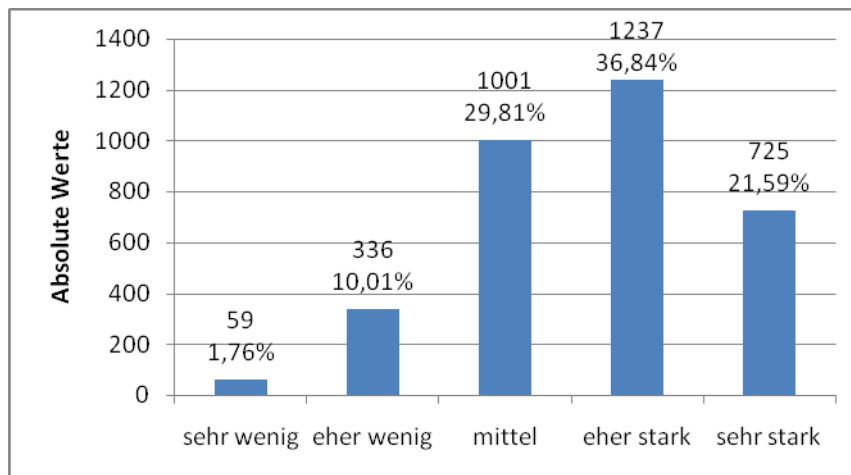
Abb. 1: „Wie häufig scheint Ihnen der Lärm in Ihren Klassen zu laut?“ (N=3358).  
Vgl. [HOTTER1]

<sup>3</sup> Arbeitsgemeinschaft „Zuhören“ besteht aus den folgenden Personen: Chibici B., Hotter E., Zollneritsch J. Siehe dazu <http://www.zuhoeren.at> (2009).

<sup>4</sup> Gewerkschaft Öffentlicher Dienst, Wien.

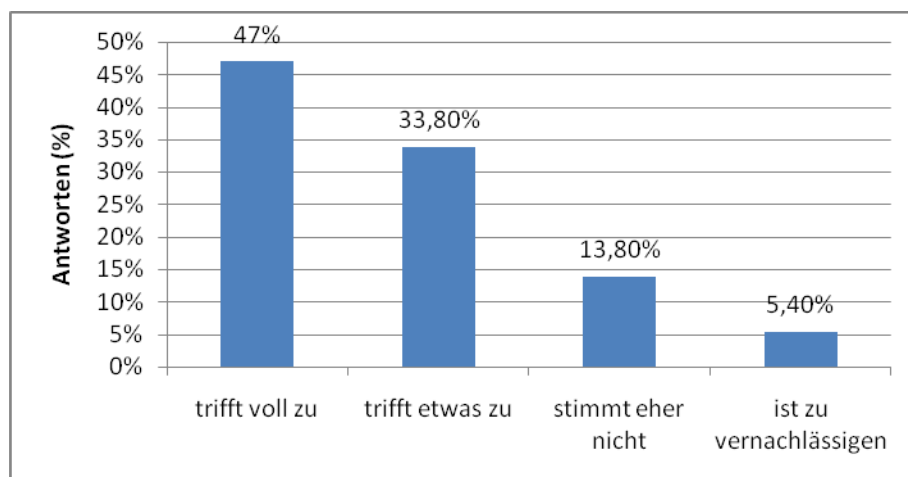
<sup>5</sup> Siehe [HOTTER2].

Ein Blick auf Abb. 1 zeigt, dass auch in Österreich zu großer Lärm in der Schule keine Ausnahme ist: 40% aller Lehrer/innen antworten auf die in Abb. 1 gestellte Frage mit „eher oft“ und 20% mit „sehr oft“. Wie Abb. 2 zeigt fühlen sich die meisten Lehrer/innen durch Lärm auch gestresst, denn ein Drittel der Lehrer/innen antwortet auf die Frage, ob Lärm im Klassenzimmer das Wohlempfinden beeinträchtigt mit „eher stark“ und 21% mit „sehr stark“. Die Lehrer sind sich der Lärmproblematik in der Schule also durchaus bewusst.



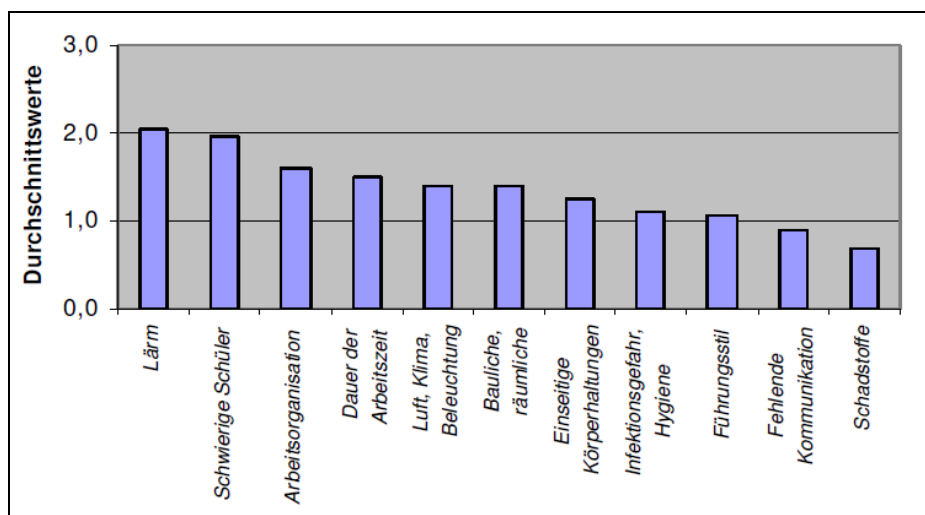
**Abb. 2:** „Wie stark sind Sie durch Lärm in Ihren Klassen in Ihrem Wohlbefinden beeinträchtigt?“ (N=3358). Vgl. [HOTTER1].

Die von „ARGE Zuhören“ publizierten Umfrageergebnisse bilden allerdings keine neuen Erkenntnisse, denn schon 2001 stellte sich in einer Studie des Instituts für Interdisziplinäre Schulforschung der Universität Bremen heraus, dass Lärm einer der wesentlichen Belastungsfaktoren im Lehrerberuf ist. Mehr als 80 Prozent von 1159 befragten Lehrer/innen gaben an, dass sie sich durch Lärm in der Schule belastet fühlten wie Abb. 3 zeigt.



**Abb. 3:** „Mich belastet der Lärm, den Schülerinnen und Schüler machen“ (N=1159) Vgl. [SCHOENWAEELDER2, S. 142] auch zit. in [TIESLER2], [TIESLER3].

2001 hat auch ein Arbeitskreis des Staatlichen Schulamtes in Darmstadt eine Lehrerbefragung unter 294 Lehrkräften zu Belastungsfaktoren am Arbeitsplatz durchgeführt, dabei war, wie in Abb. 4 zu sehen ist, Lärm noch vor dem Faktor „schwierige Schüler“ der am meisten belastende Faktor.



**Abb. 4:** Beurteilung der persönlichen Belastungsfaktoren am Arbeitsplatz Schule durch Lehrer/innen. 3 = stark belastet, 2 = mittel belastet, 1 = gering belastet, 0 = gar nicht belastet. (N=204) [RICKES].

In der österreichischen Studie „LehrerIn 2000“<sup>6</sup> aus dem Jahr 1999 wurden 6861 Lehrer und Lehrerinnen nach berufsspezifischen Belastungen schriftlich befragt. Das Ergebnis dieser Studie unterscheidet sich vom Ergebnis der Studie aus Darmstadt, da Lärm nur von 13% aller Lehrer/innen als Belastung genannt wurde.<sup>7</sup>

**Tabelle 1:** Berufsbedingte Belastungen. Belastungen die mindestens fünfmal genannt wurden. 6861 Lehrer/innen [SORA, S.191]

Art der Belastung	Häufigkeit in %
Disziplin der Schüler	60
Elternkontakt	19
Schlechtes Berufsbild	18
Lärmbelastung	13
Körperliche Belastung	12
Verwaltungsarbeit	11
Zu hohe Schülerzahl	8
Korrekturarbeiten	8
Kein eigener Arbeitsplatz	7
Fehlende Pausen	6
Verhältnis zum Direktor	6
Unterrichtsvorbereitung	6
Ständiger Zeitdruck	5

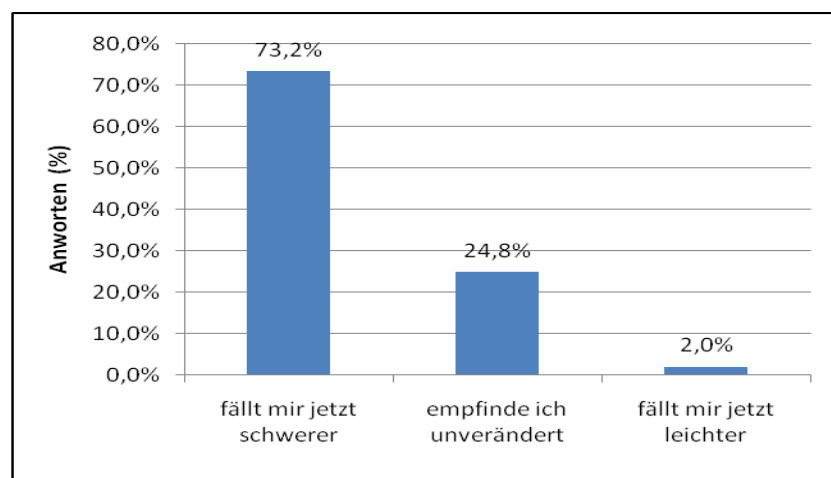
<sup>6</sup> [SORA].

<sup>7</sup> [Ebd.].

Diese Studie liefert aber noch 3 weitere Erkenntnisse:

- Die Lärmbelastung ist für Frauen größer als für Männer (16 % versus 9%),
- Die Lärmbelastung ist für die ältere LehrerInnen größer als für jüngere (16 % versus 8%)
- Die Lärmbelastung ist für AHS-LehrerInnen (20%) am stärksten, gefolgt von den BMHS-LehrerInnen (15%), VolksschullehrerInnen (13%), HauptschullehrerInnen (9%) und BerufsschullehrerInnen (0%)

In der Studie der Universität Bremen<sup>8</sup> gaben ebenfalls 73% der Lehrerinnen und Lehrer an, dass sie diesen Lärm gegenwärtig (zum Zeitpunkt der Umfrage) schwerer ertrugen als zu Beginn ihrer Berufstätigkeit (siehe Abb. 5)

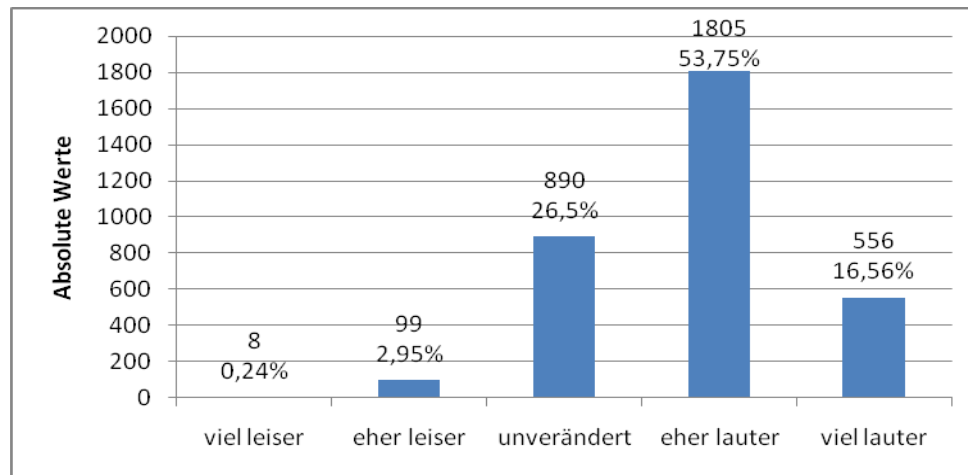


**Abb. 5:** „Im Vergleich zum Beginn meiner Berufstätigkeit fällt mir jetzt das Ertragen von Lärm leichter/schwerer?“ (N=1159)  
Vgl. [SCHOENWAELDER2, S. 142], auch zit. in [TIESLER9]

Diese Studie deutet laut Oberdörster und Tiesler<sup>9</sup> möglicherweise auf eine Abnahme der Lärmtoleranz hin, wenn man diesem Geräusch über lange Zeit (Lebens- oder Dienstjahre) regelmäßig am Arbeitsplatz ausgesetzt ist. Ein ähnliches Ergebnis wurde auch innerhalb der Onlinebefragung durch „ARGE Zuhören“ in Österreich gefunden. Mehr als zwei Drittel der Lehrer/innen stufen die Lärmsituation von heute im Vergleich zu der vor drei Jahren als lauter (bzw. eher lauter) ein (vgl. Abb. 6).

<sup>8</sup> [SCHOENWAELDER2].

<sup>9</sup> Siehe [OBERDOERSTER1, S. 20].



**Abb. 6:** „Verglichen mit der Lärmsituation vor drei Jahren, wurde es in den Klassen eher lauter oder leiser?“ (N=3358) Vgl. [HOTTER1]

Vor den oft sehr aufwändigen Studien der oben zitierten Forschungseinrichtungen hatten aber schon viele andere Autoren die Thematik von „Lärm in der Schule“ zum Gegenstand ihrer Forschung gemacht. Eine Zusammenfassung früherer und aktueller Studien findet sich in Tabelle 2. Sie entspricht der Auswahl von Lazarus<sup>10</sup> mit zusätzlich hinzugefügten aktuellen Studien. Laut den in Tabelle 2 angegebenen Schallpegelwerten sowie laut Aussagen neuerer Studien<sup>11</sup> sind die Schallpegel nicht so hoch, dass Innenohrschäden befürchtet werden müssen (siehe hierzu auch Kapitel 2). Sust<sup>12</sup>, aber auch Schönwälder<sup>13</sup> sprechen in diesem Kontext und in Verbindung mit Lärm in der Schule von „Lärm mittlerer Intensität“ (Beurteilungspegel: 50-85 dB(A)), der insbesondere extra-aurale (psychische) Wirkungen hat. Man muss aber vollständiger Weise erwähnen, dass auch deutlich höhere Pegel in Bildungsstätten möglich sind: So ergaben Messungen in halligen Fluren während den Pausen für diese Diplomarbeit Spitzenpegel von bis zu 95 dB(A) (fast, Messungen im Sekudentakt, siehe Kapitel 4). Schulz et al.<sup>14</sup> haben schon im Jahr 1979 Messungen in Fluren bzw. Treppenhäusern während Schulpausen durchgeführt und geben einen äquivalenten Dauerschallpegel von 87-109 dB(A) an. Schick et al.<sup>15</sup> führten Nachhallzeitmessungen in 39 Fluren, Foyers und Treppenhäusern von 22 Schulen in Hessen durch und bezeichneten die Lärmwirkung von Fluren und Foyers insbesondere in Pausen als „*unzumutbar*“. Relativiert wird diese Aussage von Ritterstaedt et al.<sup>16</sup>, die auf Grundlage von Messungen in Pausen an 7 Schulen Schallpegel zwischen 50 dB(A) und 80 dB(A) feststellten, wobei aber Messwerte oberhalb von 85 dB(A) nicht regelmäßig auftraten.

<sup>10</sup> Siehe [LAZARUS1, S. 524].

<sup>11</sup> Siehe [LEISTNER, S. 5], [OBERDOERSTER1, S. 16-17], u. a.

<sup>12</sup> Vgl. [SUST1].

<sup>13</sup> Vgl. [SCHOENWÄELDER1, S. 11].

<sup>14</sup> Vgl. [SCHULZ].

<sup>15</sup> Vgl. [SCHICK2, S. 43].

<sup>16</sup> Vgl. [RITTERSTAEDT, S. 51], auch zit. in [OBERDOERSTER1, S. 16] oder [SCHOENWÄELDER1, S. 10-S. 11].

**Tabelle 2:** Geräuschbelastung im Unterricht:  $L_{Aeq,T}$  in dB (T Mittelungszeit in Minuten) von Klassenräumen (KR) in Schulen und Universitäten. Mit und ohne Sprechen der Lehrer/innen und Schüler/innen während des Unterrichts (U) bzw. im leeren Klassenzimmer. Auswahl der Studien und Aufbau der Tabelle nach Lazarus<sup>17</sup>. Neuere Studien sind hinzugefügt worden. Die Werte sind auf die jeweils einzeln angegebenen Quellen bezogen! Details und Kurzfassung der Studien, siehe Anhang A.

Autoren	$L_{Aeq,T}$ während d. Sprechens (in dB)	$L_{Aeq,T}$ ohne Sprechen (in dB)	T in min	Bemerkungen
[GUNDERMANN, S. 245]		51-60 <sup>18</sup> DIN-phon <sup>19</sup> In Klassen von Lehrerinnen: 57 DIN-phon von Lehrern: 54 DIN-phon	15	Schüler im Raum, 4 Meter vom Lehrer entfernt gemessen
[PEARSONS, S. 46], [OLSEN, S. 2]	Schule I: 48 ( $\sigma = 2$ ) Schule II: 51 ( $\sigma = 2$ )		Keine Angabe	U. (20 KR) 23 Schüler, Schule II lag in einer verkehrsreichen Straße (Verkehrslärm)
[SCHULZ, S. 194]	75-81 Min: 40 Max: 100		120-180	5 KR während des U.
[RITTERSTAEDT, S. 26]	56.8 – 73.5 LAFm <sup>20</sup>		60	
[MARKIDES, S. 116]		76.25 ( $\sigma = 8.42$ )	5	Schwerhörigen Schule (13 KR), einzelne Nebengeräusche w. U.
		46.05 ( $\sigma = 4.95$ )	5	Schüler und Lehrer sind ruhig
	61 ( $\sigma = 5.52$ )		5	Schüler unterhalten sich. Lehrer wendet sich jedem Kind zu
[PEKKARINEN2, S. 259]	67 ( $\sigma = 5$ ) Min: 58, Max: 79		20 bis 30	U. (Lehrer spr.): 24 KR
		33 ( $\sigma = \pm 5$ ) (leere KR) Min: 23 Max: 49	20 bis 30	27 leere KR
[HECKER], Werte nach [LAZARUS1]	59-68		45	U. (KR)
	74-77		5	Alle Schüler im Raum, Pause
		48	5	Ruhe
	59-61		5	Frontalunterricht
	61-65		5	Allg. U.
		54 - 59	5	Einzelarbeit der Schüler
	65-78		45	Holzwerkstatt
70-82		45	Sporthalle	
[HODGSON2, S. 230]		44,4 ( $\sigma = 3.5$ ) Min: 34.5 Max: 50.9		Allg. Hintergrundgeräusche (18 Vorlesungen in 11 KR: 6-254 Schüler)

<sup>17</sup> [LAZARUS1, S. 524].

<sup>18</sup> Nur Lärmpegel ohne Lehrerstimme.

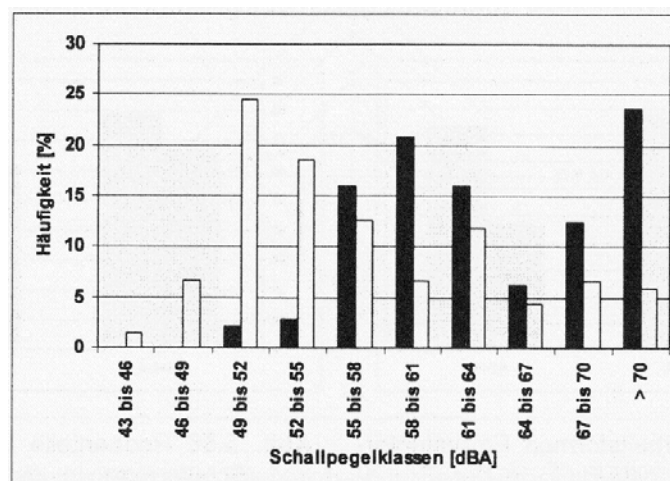
<sup>19</sup> Bis 1966 in Deutschland als Einheit üblich.

<sup>20</sup> Gemittelter Pegel mit Fast-Zeitkonstante, A-Frequenzbewertung.



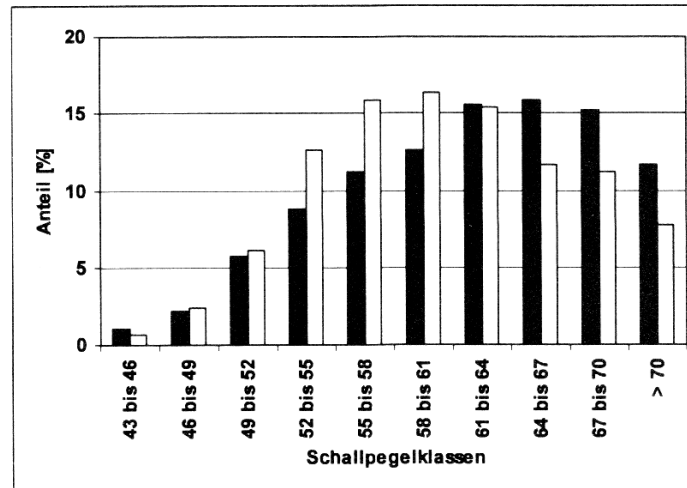
	50,8 ( $\sigma = 3.7$ ) Min: 43 Max: 59			Sprechen des Lehrers
[MACKENZIE, S. 18, S. 19, S. 21]	49-77		15	U. (6 Std.) einer Schule (S.17)
		55.5	15	Schüler sind ruhig (S.18) Lehrer spricht (Raum unbehandelt)
	77.3		15	Schüler arbeiten (Raum unbehandelt)
[SHIELD, S. 735]	61.2		2	Eine Person spricht. 110 besetzte KR (7-32 Schüler)
	72.9		2	Gruppenarbeit
		56.3	2	Stilles Lesen oder Test
[SCHOENWAELDER1, S. 41]	64.5 ( $\sigma = 6.84$ )		35	U. (30 KR, 467 UStd)
	68.01 ( $\sigma = 8.14$ )		45	U. (30 KR, 439 UStd)
[OBERDOERSTER1, S. 94, S. 95, S. 99]	49 bis >70 max. Häufigkeit bei >70		5	Schule I, unsaniert
	43 bis >70 max. Häufigkeit bei [49;52]		5	Schule I, saniert
	43 bis >70 max. Häufigkeit bei [64;67]		5	Schule II, EG, RT>0.5s
	43 bis >70 max. Häufigkeit bei [58;61]		5	Schule II, OG, RT<0.5s

Die Abb. 7 und Abb. 8 zeigen die aus Tabelle 2 zitierten Werte von Oberdörster<sup>21</sup>. Ist der Klassenraum raumakustisch günstig (RT<0.5s), dann sind die gemessenen Schallpegel niedriger.



**Abb. 7:** Häufigkeitsverteilung des Arbeitsgeräuschpegels  $L_{Aeq,5min}$  vor (schwarz, RT>0.5s) und nach (weiß, RT<0.5s) der akustischen Sanierung der Baumberge-Schule über alle U.-Std. (175 Std., Jahrgangübergreifend) [OBERDOERSTER1, S. 94]

<sup>21</sup> [OBERDOERSTER1].



**Abb. 8:** Häufigkeitsverteilung des Arbeitsgeräuschpegels  $L_{Aeq,5min}$  im EG:  $RT > 0.5$  s (schwarz) und im OG  $RT < 0.5$  s (weiß) der Schule „Stichnathstrasse“ über alle U.-Std. (175 Std., Jahrgangübergreifend) [OBERDOERSTER1, S. 99]

Weitere Studien aus verschiedenen Ländern sind aus dem zusammenfassenden Forschungsstandbericht von August Schick, Maria Klatte und Markus Meis<sup>22</sup> entnommen:

**Tabelle 3:** Schallpegelmessungen in Schulen aus verschiedenen Ländern. Studienaufzählung und Werte nach [SCHICK1]

Autoren	Land	Ergebnisse (Messungen)
[JOSSERAND]	Frankreich	Schulräume: bis 70 dB(A) Berufsschulen: 95 bis 100 dB(A)
[SENNHEISER]	Deutschland	KR verschiedener Schularten (o. Schüler): 42,5 bis 46,6 dB (Mittelwerte) KR mit Schüler: 75 dB (Vorschule) 65,3 dB (Grundschule) 64,5 dB (weiterführende Schulen)
[BRAKE]	Neuseeland	50 Schulen mit 106 KR und 149 Lehrern: Durchschnittlicher Signal-Sprach-Abstand: 6 dB(A) Conclusion: „The acoustic conditions in the majority of classrooms studied were unacceptable“
[KRYUKOVA]	Weissrussland	>75 dB(A) Mittelungspegel in Pausen
[NIU]	China	42 dB(A) und höher als 55 dB(A)
[KOSZARNY2], [KOSZARNY1]	Polen	Pausenhallen von Grundschulen: 86 dB(A) In höheren Schulen 9 dB(A) weniger Höhere Schülerzahl (>30) bedeutet höherer Schallpegel (um 3dB gegenüber 25 Schüler)

Man muss zwischen dem eigentlichen Grundgeräuschpegel von leeren Klassenräumen, auch „technischer Hintergrundgeräuschpegel“ nach Oberdörster<sup>23</sup> genannt, der durch

<sup>22</sup> Siehe dazu [SCHICK1].

<sup>23</sup> Vgl. [OBERDOERSTER1, S. 22].

Verkehrslärm, Klimaanlage, Trittschall oder von anderen Quellen produziert wird und dem Hintergrundgeräuschpegel einer still arbeitenden Klasse unterscheiden. Zwar hängen beide Pegel von der Raumakustik ab, jedoch waren in MacKenzie<sup>24</sup> die Pegelreduktionen durch akustische Sanierung im leeren Klassenraum ( $\Delta L=4\text{dB}$ ) deutlich niedriger als im besetzten Fall ( $\Delta L=9\text{dB}$ ). Lazarus<sup>25</sup> liefert eine Auflistung von Studien, wo die technischen Hintergrundgeräuschpegel im leeren Klassenraum noch einmal separat erfasst werden:

**Tabelle 4:** Geräusche in Klassenräumen (KR): Hintergrundgeräusche (leere Räume, Fenster geschlossen), Schülergeräusche (ruhig ohne Sprechen der Lehrer oder Schüler), Sprechpegel des Lehrers ermittelt am jeweils angegebenen Messort oder im Raumbereich (RB) wo die Schüler sitzen. Auswahl und Aufbau der Tabelle nach Lazarus. Neuere Studien sind hinzugefügt worden. Werte sind auf die jeweils einzeln angegebenen Quellen bezogen! Details und Kurzfassung zu den Studien siehe Anhang A.

Autoren	Hintergrundgeräusche $L_{NAeq}$ in dB: Verkehrsgläusche: V Ventilation: K	Schülergeräusch (ruhig, o. Sprechen)	Sprachpegel der Lehrer/innen $L_{SA}$ in dB	Messort des Sprachpegels der Lehrer/innen	Bemerkungen
[GUNDERMAN N, S. 246]			60-70 (ohne signif. Geschlechtsunterschied)	4 m / RB	4 KR
[PEARSONS, S. 19, S. 46], [OLSEN, S. 2]	43 (V) "quiet period" während dem Unterricht		62 / 57	2m / 7m	Schule I, 9KR
	47 (V)		66 / 62	2m / 7m	Schule II, 9KR
[SCHULZ, S. 194]	46 – 55 (V) Min: 30 Max: 98 (V)				4 KR leer
[MARKIDES, S. 116]	46.05 ( $\sigma= 4.95$ ) (V,K)		57.5 ( $\sigma= 8.39$ )	2m	13 KR
[BRADLEY2, S. 847]	41.9 ( $\sigma= 2.1$ ) Min: 38.4 Max: 45.1				10 KR
[PEKKARINEN2, S. 259]	33 ( $\sigma= 5$ ) (V,K) Min:23 Max:49 (leer, 27 KR)				27 KR
[HODGSON2, S. 230]	40.9 (K) Min: 33 Max:47 (leer?)	41.9 ( $L_{NAeq}$ ) Min:30 Max: 50.2	50.8 Min: 43 Max: 59	Im Raumbereich	18 Vorlesungen in 11 KR
[MACKENZIE]	44.7 (unbehandelt, leer) (S.18)		55.5, „pupils silent“ spricht Lehrer	Im Raumbereich	70 KR
[SHIELD, S. 736]	47				30 leere KR

<sup>24</sup> Vgl. [MACKENZIE], zit. n. [OBERDOERSTER1, S. 22].

<sup>25</sup> [LAZARUS1, S. 525].

[SCHOENWAEELDER1, S. 33, S. 35]	26-31 (leer)	32-52 (10 leiseste Sekunden)			Schule I (leer)
	26-36 (leer)	32-52			Schule II (leer)
[LEISTNER, S. 74]	22-39 (leer)				Fenster geschlossen
	36-51 (leer)				Bei geöffnetem Fenster
[SATO, S. 2072],	49.5 (Klassengrad 1 und 3.)				Trennung Hintergrundgeräuschpegel (Kinder und V, K) und Lehrersprachpegel durch „Fitting von Normalverteilungskurven“ <sup>26</sup> (27 KR)
	48.2 (Klassengrad 6.)				
			65,3 ( $\sigma= 3,69$ ) in 1 Meter		

Einige wenige Studien<sup>27</sup> ermittelten auch die Grundgeräuschpegel von still arbeitenden Schülern durch Ermittlung der leisesten Pegel. Schönwälder<sup>28</sup> hat hierzu die 10 „leisesten“ Beobachtungssekunden der Unterrichtsstunden einer arbeitenden Schulklasse genommen (Minimalwert  $L_{Aeq,10s}$ ). Dieser lag zwischen 32 dB(A) und 52 dB(A). (siehe Tabelle 2 und Tabelle 4). Oberdörster<sup>29</sup> wendet in Anlehnung an Ritterstaedt<sup>30</sup> den  $L_{A95}$  („Grundgeräuschpegel“) während dem Unterricht an: Dieser gibt den Schallpegel an, der 95% der Zeit überschritten wird. Laut Oberdörster beschreibt dieser Wert die Grundgeräuschsituation (mit Schüler) wesentlich besser als z. B. der Minimalpegel, da dieser auch rein zufällig entstanden sein könnte.

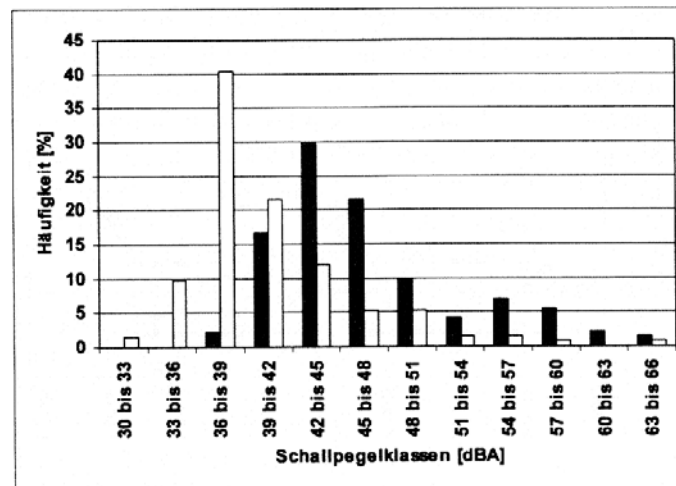
<sup>26</sup> Dies ist ein Verfahren um den Sprachpegel des Lehrers vom Schülergeräusch und Hintergrundgeräusch zu trennen, dabei werden 2 Normalverteilungen mit 2 Maxima auf die gemessene Pegelverteilung gelegt (siehe Kapitel 3).

<sup>27</sup> [SCHOENWAEELDER1], [HODGSON2].

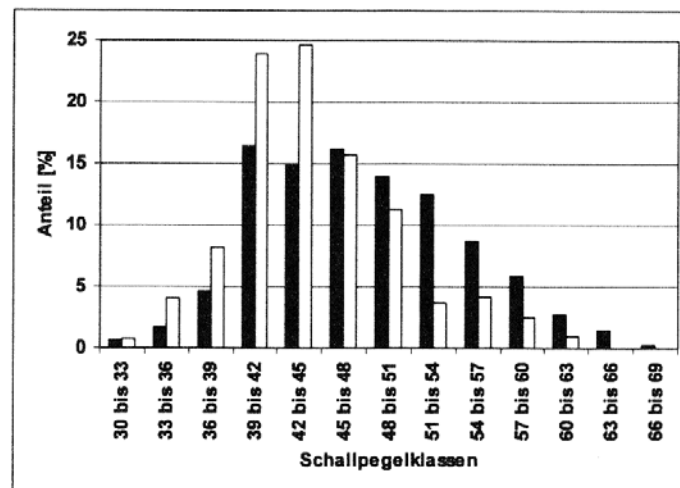
<sup>28</sup> Vgl. [SCHOENWAEELDER1, S. 23, S. 32-37].

<sup>29</sup> Vgl. [OBERDOERSTER1, S. 65].

<sup>30</sup> [RITTERSTAEDT].



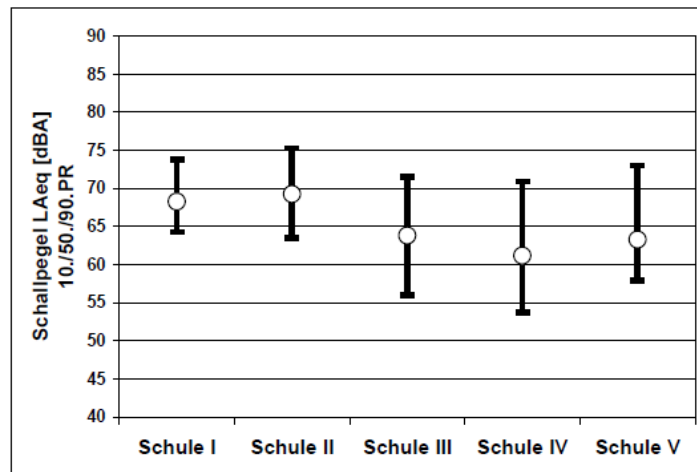
**Abb. 9:** Häufigkeitsverteilung des Grundgeräuschpegels  $L_{A95,5min}$  vor (schwarz,  $RT > 0.5s$ ) und nach (weiss,  $RT < 0.5s$ ) der akustischen Sanierung. (Schule I Baumberge, über alle U.-Std) [OBERDOERSTER1, S. 95]



**Abb. 10:** Häufigkeitsverteilung des Grundgeräuschpegels  $L_{A95,5min}$  im OG (weiss,  $RT < 0.5$ ) und im EG (schwarz,  $RT > 0.5$ ) (Schule II, Stichnathstrasse, über alle U.-Std) (Jahrgangübergreifend) [OBERDOERSTER1, S. 100]

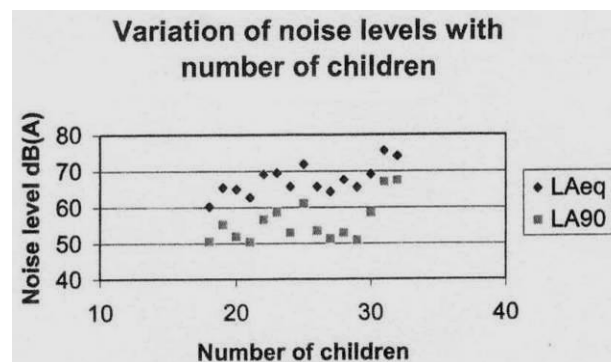
Zwar sind die Ausmaße der Schallpegel im Unterricht fast immer gleich, dennoch gibt Schönwälder an, dass der Schallpegel von der Schule abhängig ist. So schreibt er: „Bereits damals fiel uns auf, dass es in manchen Schulen leiser, in anderen lauter zuzugehen schien.“<sup>31</sup> Der Schallpegel ist von vielen Parametern abhängig, unter anderem auch vom Lehrer und vom Unterrichtsfach. Abb. 11 zeigt die Untersuchung von 5 verschiedenen Schulen der zitierten Studie. Die Schule III und V haben ein aufwändiges pädagogisches Programm mit den Schulanfängern durchgeführt in dem ein „geräuschvermeidendes Verhalten eingeübt wird“.

<sup>31</sup> [SCHOENWÄELDER1, S. 43, 44].



**Abb. 11:** Mittlere Schallpegel. Medianwerte (Kreise), 10. Perzentile und 90. Perzentile. Verkürzte (= ohne Organisationstätigkeiten) Unterrichtsstunden (N=565 Ust.) [SCHOENWAELDER1]

Shield<sup>32</sup> führten Lärmmessungen in 110 Klassenräumen von 16 Schulen durch und fanden eine signifikante lineare Korrelation zwischen dem Arbeitsgeräuschpegel (LAeq) oder Grundgeräuschpegel (LA90) und der Anzahl der Schüler im Klassenraum. Ab einer Anzahl von 18 Schülern steigt der Arbeitsgeräuschpegel stetig an: In Klassenräumen von 18 Schülern liegt der Arbeitsgeräuschpegel bei 60 dB(A), dagegen liegt der Arbeitsgeräuschpegel von 32 Schülern bei 75 dB(A) (siehe Abb. 12). Das entspricht in etwa einer Steigung von 1dB pro Schüler. Eine ähnliche Steigung zeigt sich auch beim Grundgeräuschpegel LA90. In Tabelle 3 sind noch andere Studien angeführt, die diesen Zusammenhang untersuchten und ähnliche Ergebnisse (1dB pro Schüler) festgestellt haben.



**Abb. 12:** Zusammenhang zwischen  $L_{Aeq}$  und  $L_{A90}$  im Klassenraum und der Anzahl der Schüler. 220 Messungen in 110 Klassenräumen von 16 Schulen.  $L_{Aeq}$  ( $r=0.669$ ,  $p<0.01$ );  $L_{A90}$  ( $r=0.566$ ,  $p<0.05$ ) [SHIELD, S.735]

Es stellen sich noch zwei weitere Fragen: Ist der Schallpegel während des Unterrichts abhängig vom Schulzweig und abhängig vom Alter der Schüler? Diesen Zusammenhang hat Schönwälder in der Sekundarschule untersucht<sup>33</sup> und kam zum Ergebnis, dass der Schulzweig

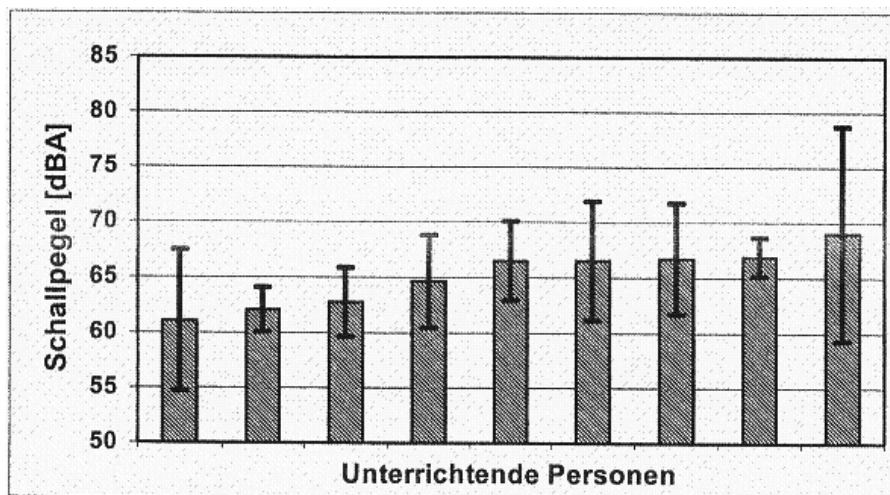
<sup>32</sup> [SHIELD].

<sup>33</sup> Vgl. [SCHOENWAELDER1, S. 50]. Die Grundschulen haben keine Schulzweigauswahl.

keine so große Rolle für die Lautstärke spielt, vielmehr haben individuelle Merkmale jeder Schulklasse (deren Sozialgeschichte) und die pädagogischen Fähigkeiten des Lehrers oder der Lehrerin Einfluss auf den Geräuschpegel. Ein Pauschalurteil kann also nicht gefällt werden. In Tabelle 5 wurden die 50-prozentigen kumulierten Häufigkeiten aus den Abbildungen von Schönwälder<sup>34</sup> zusammengefasst, sortiert nach ansteigendem Alter der Schüler. Es fällt auf, dass der Lärmpegel nicht abhängig ist von der Aufteilung zwischen Hauptschule, Realschule und Gymnasium. Vielmehr stellt Schönwälder<sup>35</sup> fest, dass es wohl „lautere“ und „leisere“ Lehrkräfte gibt, wie Abb. 13 zeigt. Diese Aussage braucht aber noch eine systematischere Analyse laut Aussage des Autors. Die Studie des SORA-Institutes hat einen Unterschied zwischen der subjektiven Lärmbelastung (Befragung) der Lehrer und der Lehrerinnen unter den Schulzweigen festgestellt (siehe S. 13)

**Tabelle 5:** Schallpegelklasse in dB(A) bei der kumulierten Häufigkeit von 50% für 7. bis 10. Klassen, sortiert nach Schulzweig, nach den Abbildungen von [SCHOENWAEELDER1, S.51]

Klasse	Hauptschule	Realschule	Gymnasium
7. Klassen	[55,58]	[61,64]	[64,67]
8. Klassen	[64,67]	[55,58]	[61,64]
9. Klassen	[61,64]	[58,61]	[61,64]
10. Klassen	[58,61]	[55,58]	[55,58]

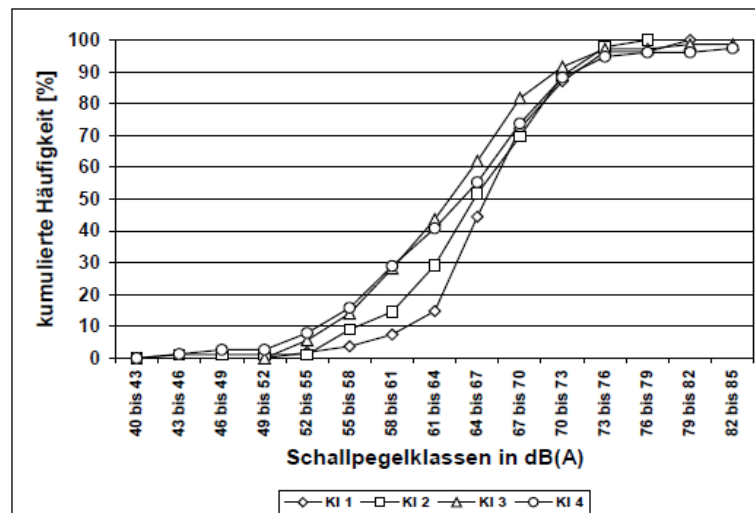


**Abb. 13:** Mittlerer Schallpegel und Standardabweichung von 9 verschiedenen Lehrkräften aus mehreren Unterrichtsstunden [SCHOENWAEELDER2, S. 154]

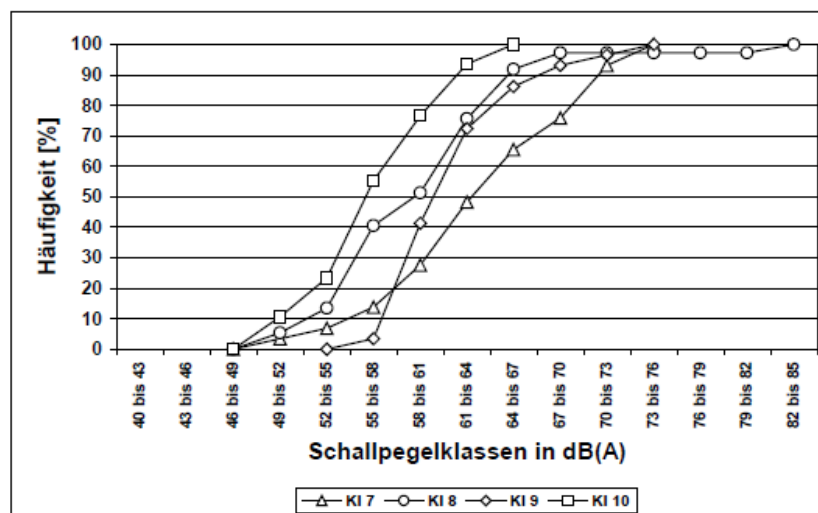
In der einschlägigen Literatur findet sich immer wieder die Aussage, dass jüngere Kinder lauter sind als ältere. Dieser Zusammenhang hat Schönwälder untersucht, mit dem Ergebnis, dass diese Aussagen für alle Grundschulen und für die Sekundarstufe I im Vergleich zwischen zwei Altersstufen stimmt, also 1. Klassen und 2. Klassen, sowie 3. Klassen und 4. Klassen (siehe Abb. 14, Abb. 15):

<sup>34</sup> [Ebd., S. 51].

<sup>35</sup> [SCHOENWAEELDER2, S. 154].



**Abb. 14:** Kumulierte Häufigkeiten der Schallpegel (Medianwerte) in Ust. aller 4 Grundschulen sortiert nach Klassenstufen 1- 4.  
[SCHOENWÄELDER1, S. 45]



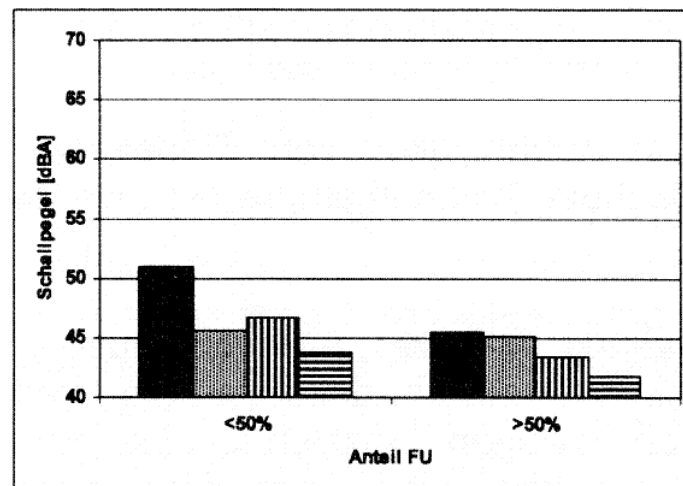
**Abb. 15:** Kumulierte Häufigkeiten der Schallpegel (Medianwerte) in Ust. der Sekundarstufe I sortiert nach Klassenstufen 7-10  
[SCHOENWÄELDER1, S. 47]

Auch Oberdörster<sup>36</sup> kam zu ähnlichen jahrgangsabhängigen Ergebnissen. Die Abb. 16 und 17 zeigen eine Abnahme des Grundgeräusches ( $L_{A95,5min}$ <sup>37</sup>) in Abhängigkeit der Altersstufe der Schüler. Abb. 18 zeigt den mittleren Arbeitsgeräuschpegel der Grundschule „Stichnathstrasse“ in Abhängigkeit von der Altersstufe und vom Lehrerredeanteil.

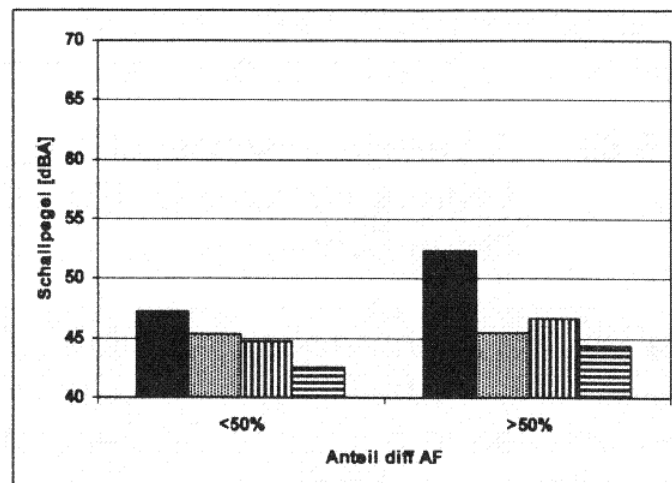
<sup>36</sup> [OBERDOERSTER1].

<sup>37</sup> Schallpegel, der 95 % in der Zeitspanne von 5 min überschritten wird.





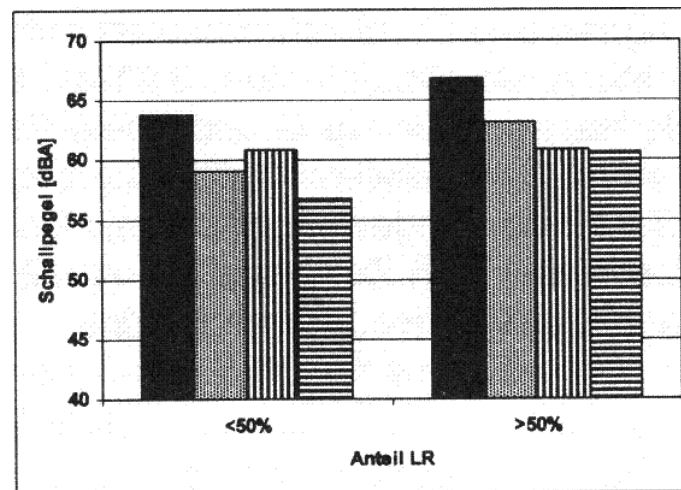
**Abb. 16:** Mittlerer Grundgeräuschpegel  $L_{A95,5min}$  für Zeitabschnitte von FU (Frontalunterricht)  
1.Klasse: schwarz, 2. Kl: grau, 3. Kl (||), 4. Kl. (=) (Baumberge-Schule) [OBERDOERSTER1, S.105]



**Abb. 17:** Mittlerer Grundgeräuschpegel  $L_{A95,5min}$  für Zeitabschnitte von diffAF (Differenzierte Arbeitsformen)<sup>38</sup>  
nach Jahrgängen sortiert.

1. Klasse: schwarz, 2. Kl: grau, 3. Kl (||), 4. Kl. (=) (Baumberge-Schule)  
[OBERDOERSTER1, S.105]

<sup>38</sup> Unter differenzierter Arbeitsform versteht man die drei Kategorien: Einzel-, Partner- und Gruppenarbeit.



**Abb. 18:** Mittlerer Arbeitsgeräuschpegel  $L_{Aeq,5min}$  für Zeitabschnitte von LR (Lehrerredeanteil) nach Jahrgängen sortiert (Klassenangabe wie in Abb.16.) (Schule „Stichnathstrasse“) [OBERDOERSTER1, S.109]

Laut den Messungen von Oberdörster sind also Unterschiede zwischen den 1. und 4. Klassen von 8 bis 9 dB möglich, je nach Anteil von Frontalunterricht oder differenzierter Arbeitsform. Zwar hat auch Schönwälder<sup>39</sup> einen solchen Sachverhalt für eine Grundschule gefunden, erwähnen muss man aber, dass Bradley<sup>40</sup> in seinen Untersuchungen keinen Zusammenhang zwischen 1., 3., und 6. Klassen festgestellt haben. Die Studie von Koszarny<sup>41</sup> in Tabelle 3 gibt einen Pegelunterschied zwischen Grundschulen und höheren Schulen von 9 dB(A) an. Die Studie von Sennheiser<sup>42</sup> gibt einen Unterschied zwischen der Vorschule und der Grundschule von 10 dB(A) an (siehe Tabelle 3)

Wie aufwändige Untersuchungen von Oberdörster und Tiesler zeigen, wirken sich die Unterrichtsformen auf den Schallpegel aus und zwar auf den Arbeitsgeräuschpegel und den Grundgeräuschpegel. Ein Wechsel von Frontalunterricht zu offenen Unterrichtsformen ergibt nach Oberdörster<sup>43</sup> einen Anstieg des Grundgeräuschpegels. Abb. 19 zeigt, dass diese Pegelreduktionen oder Pegelanstiege abhängig sind von der Raumakustik: So betrug der Anstieg des Grundgeräuschpegels vor der Sanierung bis 10 dB, nach der Sanierung verringerte sich dieser auf nur noch 5dB.

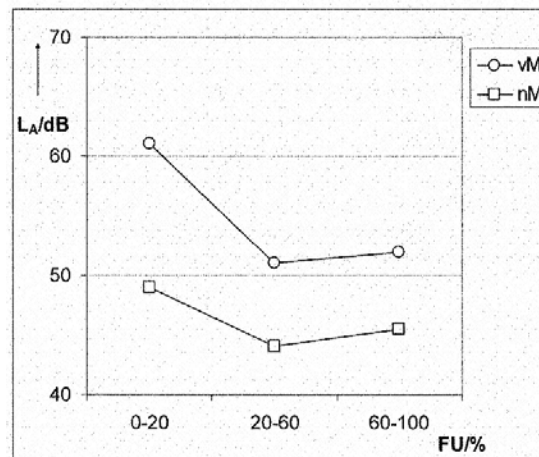
<sup>39</sup>[SCHOENWAELDER2, S. 153].

<sup>40</sup>[BRADLEY3, S. 2072].

<sup>41</sup>[KOSZARNY2], [KOSZARNY1] zit. n. [SCHICK1]

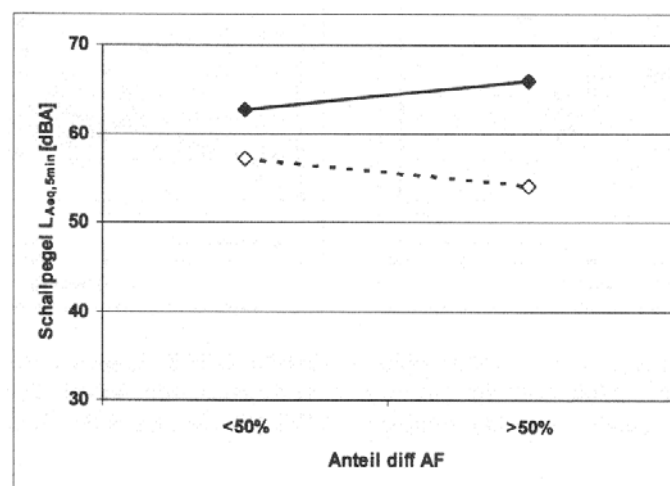
<sup>42</sup>[SENNHEISER] zit. n. [SCHICK1]

<sup>43</sup>Vgl. [OBERDOERSTER4].

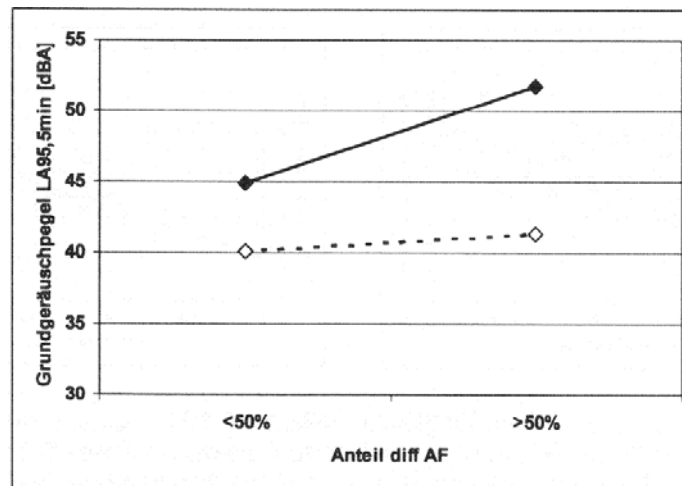


**Abb. 19:** Veränderung des durchschnittlichen Grundgeräuschpegels  $L_{A,95}$  vor (Kreise,  $RT > 0.5s$ ) und nach (Quadrate,  $RT < 0.5s$ ) der raumakustischen Sanierung in Abhängigkeit der Arbeitsform. FU = Frontalunterricht. [LAZARUS1, S. 534], in Anlehnung an [OBERDOERSTER4]

Obwohl dieser Zusammenhang erklärbar ist, stellten ihn Tiesler und Oberdörster nicht in der zweiten untersuchten Schule (Stichnathstrasse) fest. Deshalb ist hier nur die erste Schule (Bamberge-Schule) zitiert. Den Zusammenhang zwischen Arbeitsgeräuschpegel bzw. Grundgeräuschpegel in Abhängigkeit zum Anteil der differenzierten Arbeitsformen zeigen Abb. 20 bzw. Abb. 21. Es sei beim Arbeitsgeräuschpegel nur auf die Wirkung der Raumakustik hingewiesen.

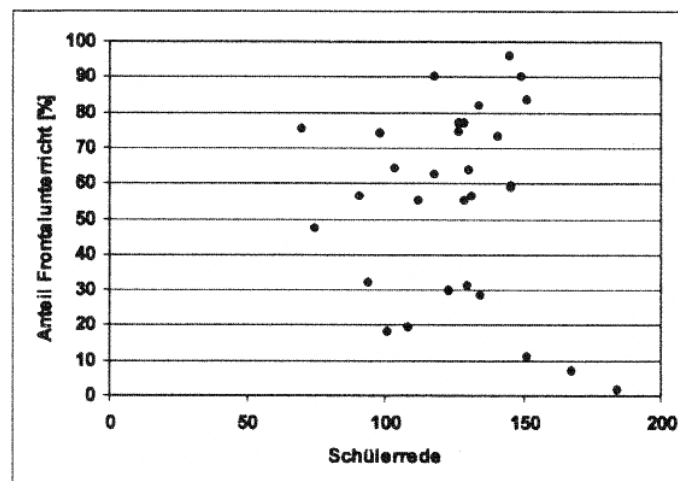


**Abb. 20:** Arbeitsgeräuschpegel  $L_{Aeq,5min}$  in Abhängigkeit vom zeitlichen Anteil diffAF vor (durchgezogen,  $RT > 0.5s$ ) und nach (gestrichelt,  $RT < 0.5s$ ) der raumakustischen Sanierung. (Bamberge-Schule) [OBERDOERSTER1, S. 114]

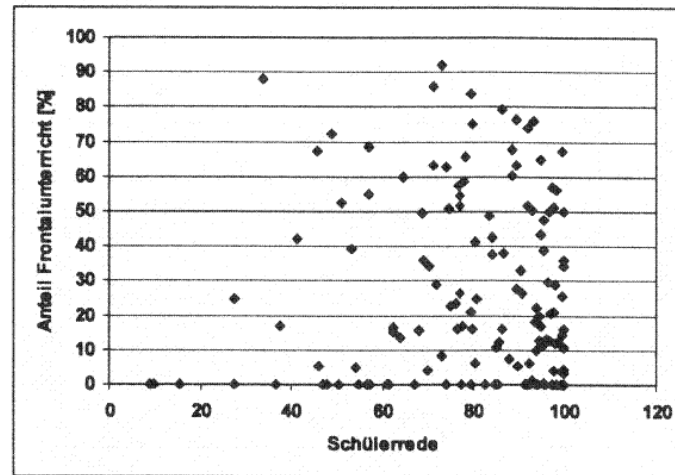


**Abb. 21:** Grundgeräuschpegel  $L_{A95,5min}$  in Abhängigkeit vom zeitlichen Anteil diffAF vor (durchgezogen,  $RT>0.5s$ ) und nach (gestrichelt,  $RT<0.5s$ ) der raumakustischen Sanierung (Baumberge-Schule) [Ebd.]

Man läuft Gefahr diesen Anstieg des Schallpegels beim Wechsel zu differenzierten Arbeitsformen durch den Redeanteil der Lehrer/innen und Schüler/innen in den unterschiedlichen Arbeitsformen zu erklären. Interessanterweise sind diese Redeanteile aber bei frontaler und offener Arbeitsform in etwa gleich. Abb. 22 und Abb. 23 zeigen hier keinen statistischen Zusammenhang ( $r \approx 0$ ) (Korrelationskoeffizient, siehe auch Anhang D).



**Abb. 22:** Anteil an Arbeitsform FU in %, in Abhängigkeit vom zeitlichen Anteil der Schülerrede in 5-min Zeiteinheiten (Baumberge-Schule) [Ebd., S. 84] auch zit. in. [OBERDOERSTER4]



**Abb. 23:** Anteil an Arbeitsform FU in %, in Abhängigkeit vom zeitlichen Anteil der Schülerrede in 5-min Zeiteinheiten. (Schule „Stichnathstrasse“) [OBERDOERSTER1, S. 84]

Nach Oberdörster<sup>44</sup> steht auch der zeitliche Anteil der Lehrerrede in keinem statistischen Zusammenhang mit der Arbeitsform. Es gibt also keine sinnvolle Abhängigkeit zwischen den zeitlichen Anteilen der Schülerrede oder Lehrerrede und der Arbeitsform:

*„Das Geschehen im Unterricht lässt sich folglich mit gängigen Stereotypen nicht hinreichend beschreiben. Frontalunterricht heißt eben nicht, dass der Lehrer ohne Unterbrechung doziert (Stichwort: „Frontales Unterrichtsgespräch). Ebenso wenig bedeuten offene, schülerzentrierte Arbeitsformen, dass der Lehrer aufhört zur Klasse zu sprechen.“<sup>45</sup>*

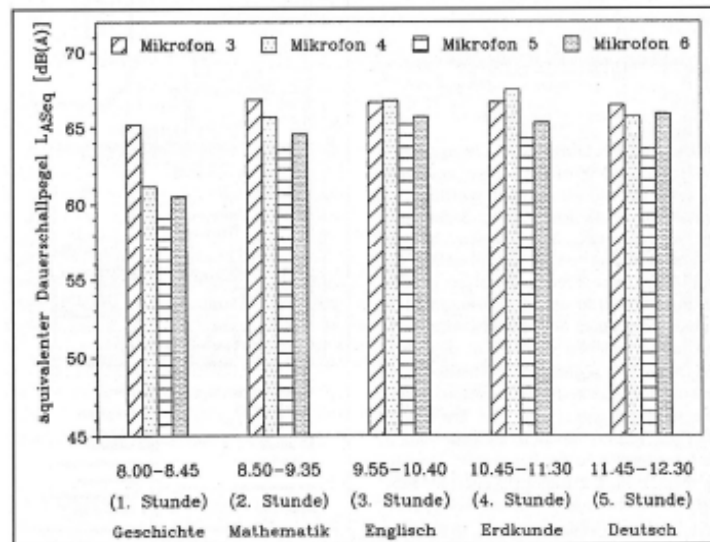
Was die Anteile von Lehrerrede oder Schülerrede betrifft, so gibt es Unterschiede zwischen den Schulen, zwischen den Lehrer/innen und den Fächern die unterrichtet werden.

Während dem Verlauf des Tages steigt im Allgemeinen der Schallpegel an. Hecker<sup>46</sup> hat schon 1994 darauf hingewiesen, dass die Schüler zur „Morgenstunde“ (auf Schüler gerichtete Mikrofone 4 bis 6) deutlich leiser sind (siehe Abb. 24).

<sup>44</sup> Vgl. [OBERDOERSTER1, S. 84].

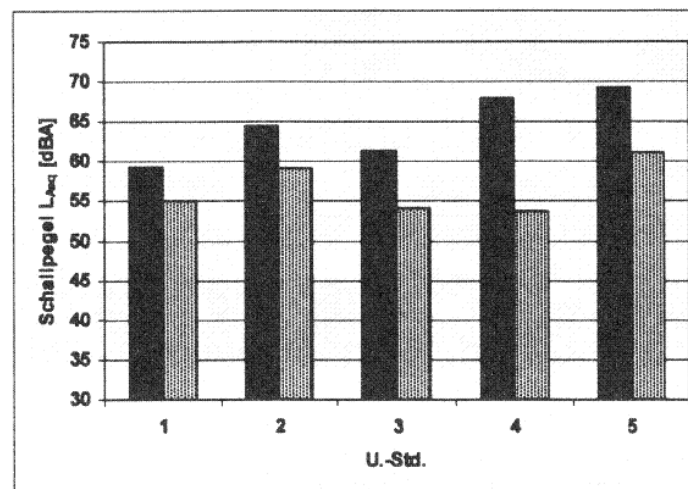
<sup>45</sup> [OBERDOERSTER4].

<sup>46</sup> Vgl. [HECKER].



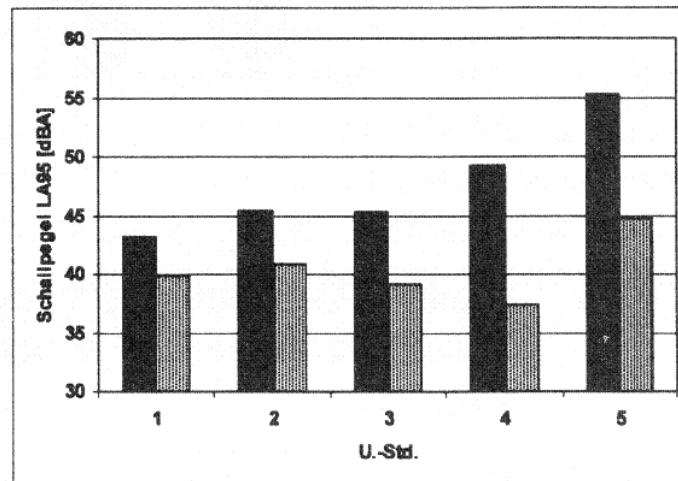
**Abb. 24:** Äquivalenter Dauerschallpegel  $L_{ASeq}$  im 45 min Takt über alle 5 Unterrichtseinheiten.  
[HECKER]

Ein ähnlicher Anstieg des Grundgeräuschpegels und des Arbeitsgeräuschpegels beobachtet auch Oberdörster<sup>47</sup>, außer nach einer raumakustischen Sanierung. Dabei liegt die Differenz des Arbeitsgeräuschpegels und des Grundgeräuschpegels der ersten und letzten Stunde bei mehr als 10 dB, wie Abb. 25 und Abb. 26 zeigen. Die Messung von  $L_{A95,45min}$  ergibt ein ähnliches Bild.



**Abb. 25:** Mittlerer Arbeitsgeräuschpegel  $L_{Aeq,5min}$  vor (schwarz,  $RT > 0.5s$ ,  $r = 0.68$ ; Steigung = 2.53;  $N = 16$  KR) und nach (grau,  $RT < 0.5s$ ,  $r = 0.22$ ; Steigung = 0.84;  $N = 15$  KR) der Sanierung (Baumbergschule, alle Ust.) (Regressionsberechnung, siehe Anhang D)  
[OBERDOERSTER1, S. 97]

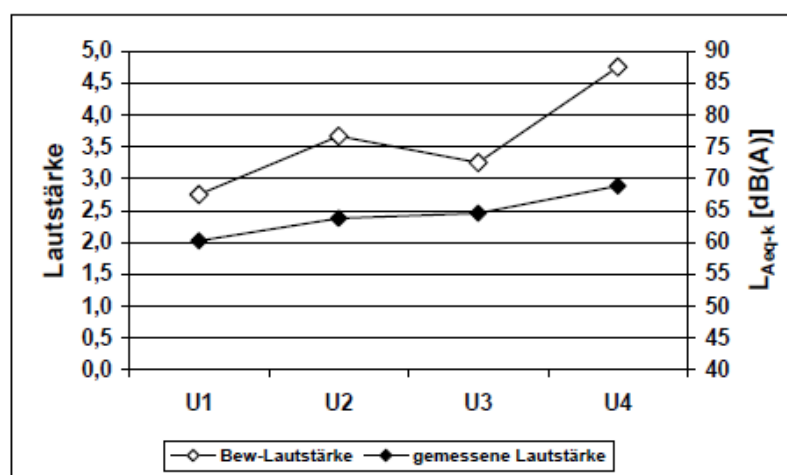
<sup>47</sup> Vgl. [OBERDOERSTER1, S. 97, 98].



**Abb. 26:** Mittlerer Grundgeräuschpegel  $L_{A95,5\text{min}}$  vor (schwarz,  $RT > 0.5\text{s}$ ;  $r = 0.76$ ; Steigung = 2.09;  $N = 16$  KR) und nach (grau,  $RT < 0.5\text{s}$ ;  $r = 0.14$ ; Steigung = 0.22;  $N = 15$  KR) der raumakustischen Sanierung (Baumbergeschule, alle Ust) (Regressionsberechnung, siehe Anhang D) [OBERDOERSTER1, S.97]

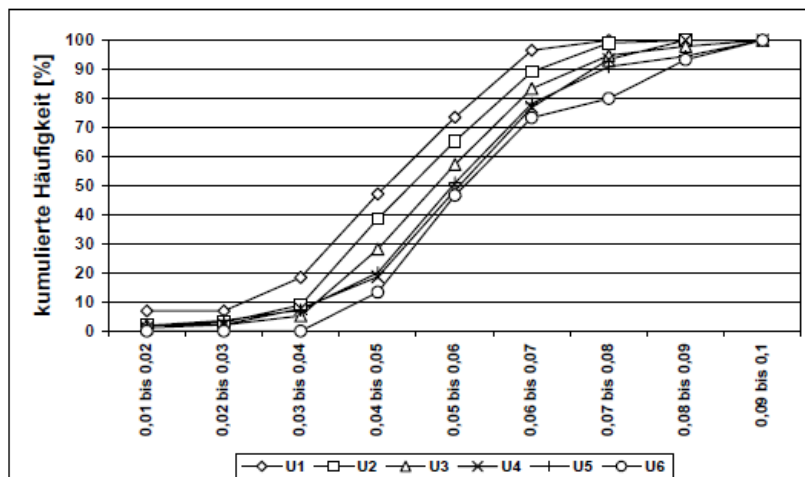
Einen interessanten Sachverhalt zwischen dem Schallpegel und der Bewertung der Lautstärke zeigt Schönwälder<sup>48</sup>, der die momentane Lärmempfindlichkeit sowie den Lärmpegel über 4 nacheinander folgenden Unterrichtsstunden einer Schulklasse angibt. Der Index  $-k$  ist bei den Auswertungen von Schönwälder üblich und bezeichnet die verkürzte Unterrichtsstunde, da festgestellt wurde, dass am Anfang und zum Schluss der Unterrichtsstunde jeweils 5 Minuten für Organisationsarbeit verwendet werden, die nicht den eigentlichen Unterricht betreffen.

$$\text{momentane Lärmempfindlichkeit} = \frac{\text{empfundene Lautstärke}}{L_{Aeq(-k)}}$$



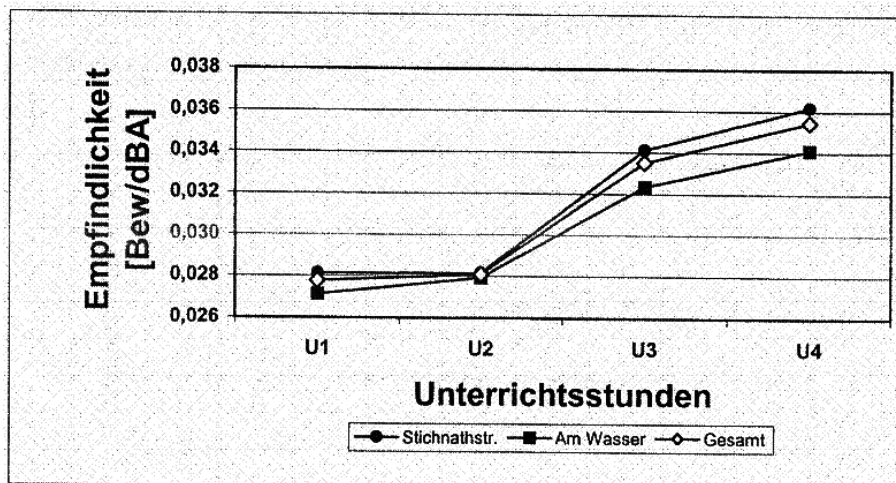
**Abb. 27:** Bewertete Lautstärke (1 bis 7) und gemessener Schallpegel in 15 Unterrichtsstunden einer Schulklasse [SCHOENWAELDER1, S. 101]

<sup>48</sup> Vgl. [SCHOENWAELDER1].



**Abb. 28:** Kumulierte Häufigkeiten der momentanen Lärmempfindlichkeit in Abhängigkeit zur Unterrichtsstunde [Ebd., S. 100]

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Lärmempfindlichkeit über den Vormittag zunimmt<sup>49</sup>. Schönwälder weist in einer anderen Publikation auf eine ähnliche Steigung der Empfindlichkeit für zwei weitere untersuchte Schulen hin<sup>50</sup> (siehe Abb. 29):



**Abb. 29:** Lärmempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Unterrichtsstunde (N=20 Unterrichtstage) für 3 verschiedene Schulen: „Stichnathstr.“, „Am Wasser“, „Gesamtschule“ [SCHOENWAELDER2, S.160]

Man nimmt an, dass der Grund für diese Abnahme der Lärmtoleranz die Ermüdung ist. Ob diese Abnahme allerdings als Ermüdungsindikator gelten kann, konnte nicht geklärt werden.<sup>51</sup>

<sup>49</sup> [Ebd., S. 102].

<sup>50</sup> Vgl. [SCHOENWAELDER2, S. 160], auch zit. in [TIESLER3].



Alle typischen Geräuschquellen, ausgenommen die Schülergeräusche, wurden von MacKenzie<sup>52</sup> zusammengefasst und sind insbesondere bei der Protokollierung von Messungen von Bedeutung. Die Schallisolation (z. B. Schallschutzfenster) ist für Klassenräume außerordentlich wichtig.

**Tabelle 6:** Typische Lärmquellen nach [MACKENZIE]

Typische Lärmquellen wie sie in Klassenräumen auftreten		
Innenbereich (Klassenbereich)	Innenbereich (Schule)	Außenbereich (Schule)
Heizungsanlage (z. B. Heißluftsysteme); Lüftungsgebläse ; Computer; Drucker; Trittschall vom Boden; Lärmwirkung der Tischplatte; Regengeräusche am Dachfenster; Regengeräusche auf Metalldächern; Dachknacken (Wärmeausdehnung) Mechanische Öffnungsvorrichtungen für Fenster; Overhead-Projektoren; Vögel (am Dachfenster); Leuchtstoffröhrenlampen.	Stimmen (vom Korridor); Einwirkung von Lärm (Türschließen); Einwirkung von Lärm am Boden; Luftschall (durch zerlegbare Trennwände); Singen; Gymnastik; Musik; Periodisches Läuten; Koffer, Schulrännel.	Verkehrslärm: Fahrzeuge, Flugzeuge, Züge, Hubschrauber; Geräte zum Rasenschneiden; Bäume; Windgeräusche; Leere LKWs mit Untersetzungsgetrieben; Regengeräusche auf Gebäudeteilen.

Wie die Abbildungen 7 bis 10 sowie die Abbildungen 19, 20, 21, 25 und 26 andeuten, kann der Lärmpegel im Klassenzimmer in Verbindung mit der Klassenraumakustik (insbesondere der Nachhallzeit) gebracht werden. Der Zusammenhang zwischen dem Lärmpegel und der Raumakustik wird durch Abb. 30 von Tiesler<sup>53</sup> dargestellt. In anderer Form findet sich dieser Zusammenhang auch in Schick<sup>54</sup> :

<sup>51</sup> [SCHOENWÄELDER1, S. 125].

<sup>52</sup> [MACKENZIE, S. 10].

<sup>53</sup> Vgl. [TIESLER7, S. 13].

<sup>54</sup> Vgl. [SCHICK2, S. 33].

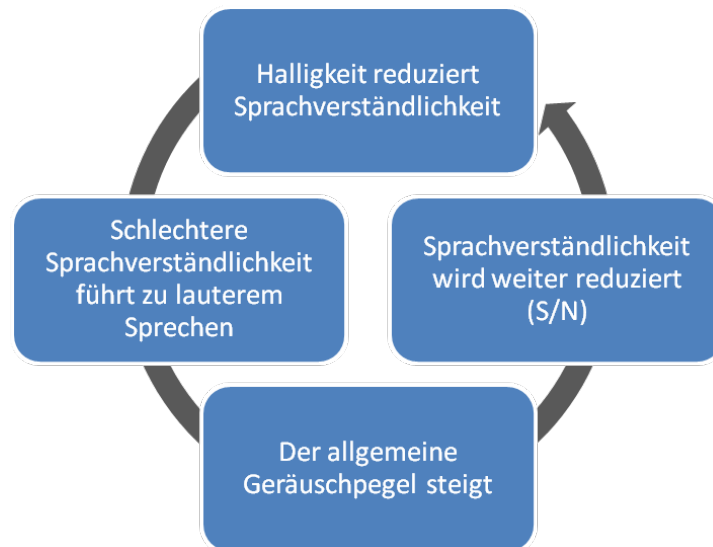
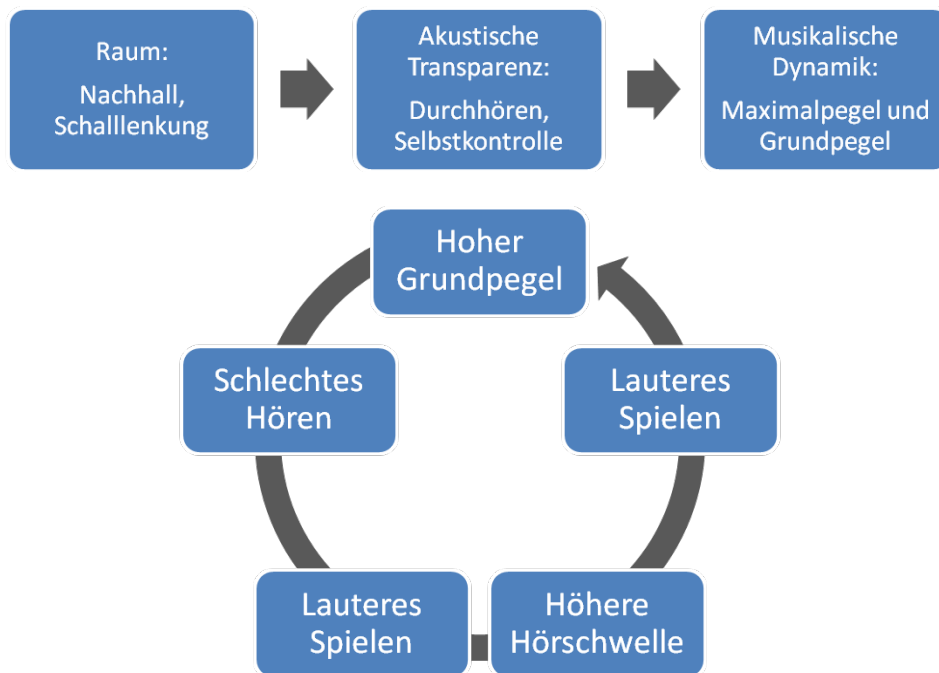


Abb. 30: Lärmkaskade. In Anlehnung an [TIESLER7, S.13]

Dass es auch einen Zusammenhang zwischen der Nachhallzeit und der Qualität der Sprachübertragung gibt, ist bekannt (siehe Kapitel 3.2). Der durch die Kinder selbst produzierte Lärm kann durch die schlechten raumakustischen Bedingungen so verstärkt werden, dass ungestörtes Lernen bzw. Lehren unmöglich wird. Hier kommt nun der Lombard-Effekt des Lehrers ins Spiel, der den automatischen Effekt des Sprechpegelanstiegs von 0,3 bis 1 dB pro 1 dB Umgebungsgeräuschpegel bezeichnet (siehe Kapitel 3.3). In halligen Räumen verhalten sich die Schüler lauter und so steigt der allgemeine Geräuschpegel an. Durch diesen Anstieg wird auch der Signal-Geräuschabstand wieder reduziert und somit die Sprachverständlichkeit. Dieser Teufelskreis wird von Chibici und Schick<sup>55</sup> zutreffend als „Lärmkaskade“ bezeichnet, der nur durch Verbesserung der Nachhallzeit gebrochen werden kann. Fuchs<sup>56</sup> stellt die „Lautheitsspirale“ in Klassenräumen am Beispiel von Musizierenden dar:

<sup>55</sup> [CHIBICI], [SCHICK2].

<sup>56</sup> Vgl. [FUCHS].



**Abb. 31:** Modell für das Zustandekommen unnötig hoher Schallpegel in akustisch schlecht konditionierten, kommunikationsintensiv genutzten Räumen am Beispiel von Musizierenden [FUCHS, S. 49]

In diesem Modell trägt die „Stimmfaltung“ und die Hörschwellenverschiebung laut Fuchs dazu bei, dass die Lautstärke immer stärker ansteigt, bis „*keiner sein eigenes Wort mehr versteht*“ und eine Artikulation nicht mehr möglich ist, da jedem Spieler dafür die ausreichende Dynamik fehlt. Die Verwendung elektroakustischer Verstärkung hat positiven Einfluss auf die Sprachverständlichkeit, wie auch aus Versuchsergebnissen mit Grundschulkindern in Klassenräumen ersichtlich ist (siehe Kapitel 2.2.2.)<sup>57</sup>. Allerdings führt diese alleinige Maßnahme in ein „*akustisches Chaos*“. Die ASA<sup>58</sup> hat hierzu ihre Position ausdrücklich in einem extra publizierten Dokument festgelegt und rät von einer permanenten Anwendung von Verstärkung in Klassenzimmern aus mehreren Gründen ab. (siehe Seite 108).

Die Verbindung des Lärmpegels mit der Nachhallzeit ist wissenschaftlich nicht so einfach zu beweisen, da die komplexe Umgebung eines Klassenraumes von mehreren Parametern abhängt, denn

*„die Qualität der akustischen Umgebung „Unterricht“ ist mehrdimensional und durch einen einzigen akustischen Parameter, sei es äquivalenter oder maximaler Schallpegel, nur unzureichend beschrieben.“<sup>59</sup>*

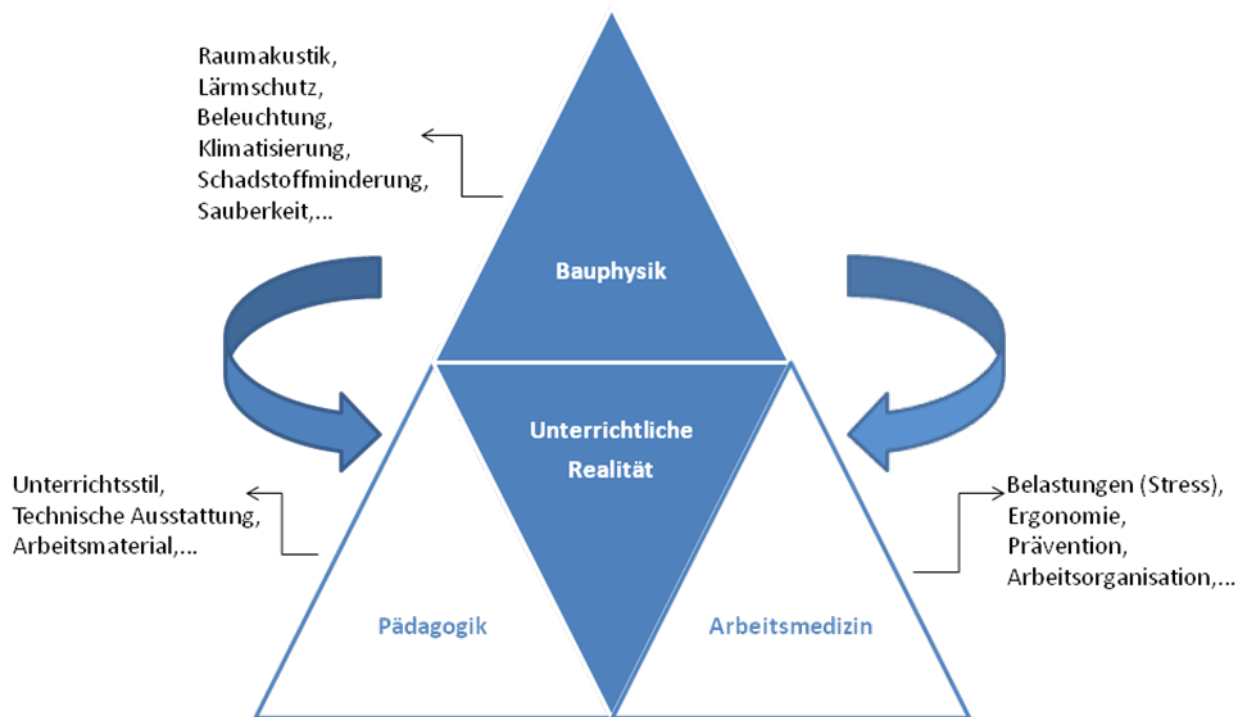
Lärm im Unterricht entsteht nicht durch den Klassenraum selbst, sondern hängt mit dem Vorgang des Unterrichtens zusammen. So können pädagogische Maßnahmen, wie Kapitel

<sup>57</sup> Vgl. [KLATTE3].

<sup>58</sup> Siehe dazu [ASA].

<sup>59</sup> Vgl. [LEISTNER, S. 77].

7.2. zeigt, Einfluss auf die Geräuschkulisse haben. Laut Schönwälder<sup>60</sup> waren Unterschiede im Lärmpegel zwischen den Schulen nicht immer aus physikalischen Bedingungen zu erklären, sondern mussten mit Konzepten und Verfahren erklärt werden, die von Schuldirektionen angewendet wurden, um das Verhalten von Schüler/innen „in sozial verträgliche Bahnen zu lenken“. Auf die „unterrichtliche Realität“ und somit die unterrichtliche Qualität im Klassenraum haben laut Oberdörster und Tiesler zusammenfassend drei wesentliche Faktoren Einfluss, die in folgender Abbildung dargestellt sind:



**Abb. 32:** Zusammenspiel verschiedener Faktoren zur „unterrichtlichen Realität“. In Anlehnung an [OBERDOERSTER3]

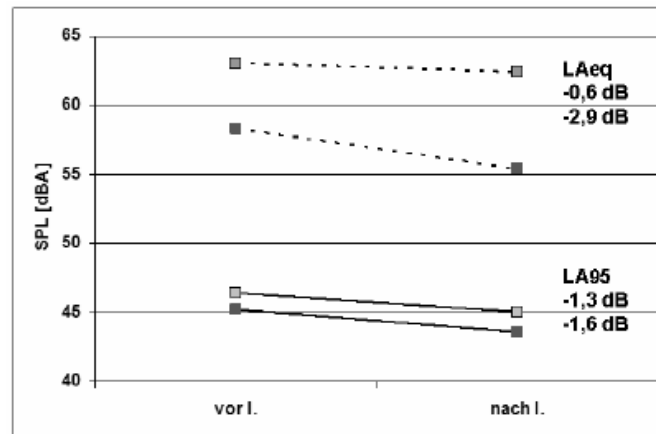
Die raumakustische Qualität im Klassenraum ist also multidimensional und von Wechselwirkungen ergonomischer Faktoren abhängig. Die neue Studie von Tiesler<sup>61</sup> zeigt eine solche Wechselwirkung „ergonomischer Faktoren“: So gibt es eine Verbindung zwischen dem erzeugten Arbeitsgeräuschpegel und der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft. Eine Einführung einer 2-minütigen Lüftungspause führt zu einer Reduzierung des mittleren Lärmpegels, allerdings ist diese Reduzierung auch noch von den raumakustischen Bedingungen (Nachhallzeit) abhängig. Bei Tiesler<sup>62</sup> wird als schlechte Luftqualität eine CO<sub>2</sub>-Konzentration > 2000 ppm bezeichnet, die ebenfalls Einfluss auf die Herzfrequenz der Schüler hat und somit als Stressor bezeichnet werden kann.<sup>63</sup>

<sup>60</sup> Siehe dazu [SCHOENWAEELDER1, S. 77].

<sup>61</sup> [TIESLER8], [TIESLER5].

<sup>62</sup> Vgl.[TIESLER8].

<sup>63</sup> Vgl.[TIESLER5], [TIESLER8].



**Abb. 33:** Schallpegelmessungen in 175 Unterrichtsstunden (8 Klassen, 16 Tage) vor und nach Einführung einer Lüftungspause (RT>0,6s grau oben; RT<0,6s schwarz unten) [TIESLER5], [TIESLER8]

Die Lärmreduktion (mittlerer Intensität) ist nicht der einzige Grund zur Verbesserung der Klassenraumakustik. Weitere Gründe sieht man laut Machner<sup>64</sup> und Oberdörster<sup>65</sup> in der „Restrukturierung zum Ganztagschulbetrieb“ oder im „Wandel von pädagogischen Arbeitsformen“ (differenzierte Arbeitsformen, schülerzentriertes Unterrichtsgespräch). Einen anderen erschreckenden Grund erwähnen Bormann<sup>66</sup> und Schick<sup>67</sup>, die annehmen, dass in jeder deutschen Schule 5-10% der Kinder zeitweilig oder chronisch hörgeschädigt sind und in den meisten Fällen gemeinsam mit normalhörenden Schüler lernen. Die „Kinder- und Jugendgesundheitsurvey (KiGGS)“ vom Robert Koch-Institut aus dem Jahr 2008 zeigt weitere erschreckende Zahlen: „Jedes achte Kind von 1048 Kindern im Alter von 8 bis 14 Jahren weisen potentiell durch Lärm verursachte Gehörschäden auf.“<sup>68</sup> Diese chronischen Hörstörungen und vorübergehende Hörstörungen durch Erkältungen mit Mittelohrinfekten sehen Klätte und Schick<sup>69</sup> als Forderungen für optimale raumakustische Bedingungen in Klassenräumen, insbesondere wenn man von Untersuchungen ausgeht<sup>70</sup>, nach denen Kinder 75% der Unterrichtszeit mit Zuhören verbringen.

Die Einleitung dieser Diplomarbeit sollte die Lärmsituation von Schulen aus der wissenschaftlichen Literatur darstellen, den allgemeinen Zusammenhang zwischen der Raumakustik mit dem Lärmpegel im Klassenraum erklären sowie Gründe für Verbesserungen der raumakustischen Bedingungen nennen.

Der Lärmpegel im Klassenraum während dem Unterricht ist zusammenfassend von folgenden Variablen abhängig:

<sup>64</sup> Vgl. [MACHNER].

<sup>65</sup> Vgl. [OBERDOERSTER1].

<sup>66</sup> Vgl. [BORMANN].

<sup>67</sup> Vgl. [SCHICK1, S. 78].

<sup>68</sup> [ROBERT KOCH, S. 113].

<sup>69</sup> [KLATTE8, S. 36], [SCHICK2, S. 5].

<sup>70</sup> [BERG], zit. n. [KLATTE8].



**Abb. 34:** Variablen, von denen der Lärmpegel im Klassenraum abhängig ist. Der Lärmpegel ist nicht abhängig vom Schulzweig! Externe Lärmquellen: siehe Tabelle 6.

Das folgende Kapitel geht auf die Lärmwirkungen und die einzuhaltenden Grenzpegel ein.

## 2. Lärm in der Schule: Ein Gebiet der Lärmwirkungsforschung

*„Der Lärm aber ist die impertinenteste aller Unterbrechungen, da er sogar unsere eigenen Gedanken unterbricht, ja zerbricht.“ (Arthur Schopenhauer)*

Dieses Kapitel soll einen Überblick über mögliche Auswirkungen von Lärm auf den Menschen, insbesondere auf Lehrer und Schulkinder geben, um daraus die akustischen Bedingungen für ein optimales Arbeiten im Klassenraum abzuleiten. Kapitel 2.1. fasst die allgemeinen Effekte von Lärm zusammen. Kapitel 2.2. bezieht sich auf die Effekte von Lärm im Klassenraum, dem Einfluss der Nachhallzeit auf den Geräuschpegel im Klassenraum, auf die Leistungsfähigkeit, die subjektive Lärmbelastung der Schüler/innen und die Beurteilung der Schüler-Lehrer-Beziehung.

### Definition von Lärm:

In der Richtlinie VDI 2058<sup>71</sup> werden als Lärm alle Geräusche bezeichnet, *„die zur Beeinträchtigung der Gesundheit, der Leistungsfähigkeit sowie der Arbeitssicherheit führen können.“* OAL-Richtlinie Nr. 3<sup>72</sup> bezeichnet als Lärm alle Geräuschmissionen, *„die zur Beeinträchtigung der Gesundheit, des Wohlbefindens, der Arbeitssicherheit, der Sprachverständigung sowie der Leistungsfähigkeit führen können“.* Diese Definition hat durch den Begriff „Wohlbefinden“ auch einen subjektiven Parameter erhalten. Die ÖAL-Richtlinie Nr.6/18<sup>73</sup> definiert den Begriff „extraaurale Auswirkungen“ näher: *„Lärm ist – im weitesten Sinn – unerwünschter Schall, der Menschen belästigen, ihre Gesundheit stören, gefährden oder schädigen kann. Insbesondere im Bereich extraauraler Auswirkungen versteht man unter Lärm auch die negativ gefärbte Erlebnisqualität, welche durch bestimmte Schallmissionen ausgelöst wird und welche mit physiologischen und pathologischen Reaktionen einher gehen kann.“* Eine ähnliche Formulierung findet sich auch in den wichtigen Arbeiten von Sust und Ising: *„Lärm ist unerwünschter Schall, unerwünscht, weil Lärm die Gesundheit beeinträchtigt und/oder schädigt, Lärm die Leistung mindert und die Kommunikation stört, Lärm belästigend ist und die subjektive Befindlichkeit beeinträchtigt.“<sup>74</sup>*

---

<sup>71</sup> Vgl. [VDI 2058 Bl. 3].

<sup>72</sup> Vgl. [ÖAL-RL Nr. 3].

<sup>73</sup> Vgl. [ÖAL-RL Nr. 6/18].

<sup>74</sup> [SUST1] und [ISING2].

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Lärmdefinitionen. Eine kritische Beleuchtung von anderen Definitionen findet sich in Oberdörster<sup>75</sup>. Kalivoda<sup>76</sup> hat in Anlehnung an Guski<sup>77</sup> drei entscheidende Faktorengruppen zusammengefasst, ob ein Geräusch als Lärm empfunden wird oder nicht:

Akustische Faktoren (physikalische Charakteristik), situative Faktoren (Ort, Zeitpunkt, Situation und Intention sowie momentane Befindlichkeiten der Person) und persönliche Faktoren (emotionale und kognitive Bezüge zum Geräusch und Geräuschen im Allgemeinen).

VDI Richtlinie 2058<sup>78</sup> zählt für die Wirkungen von Geräuschen folgende Einflussgrößen auf:

- Akustisch messbare Einflussgrößen: Schalldruckpegel, Impulshaftigkeit, Frequenzzusammensetzung,...
- Geräuschbezogene Einflussgrößen: Auffälligkeit (besondere Ton- und Impulshaftigkeit), Ortsüblichkeit, Informationshaltigkeit, räumliche Veränderung der Schallquelle, Lästigkeit,...
- Tätigkeitsbezogene Einflussgrößen: Aufmerksamkeit, Konzentration, Ausdauer, Sprachkommunikation, Kreativität, Gedächtnis, Wahrnehmungsfähigkeit,...
- Personenbezogene Einflussgrößen: Einstellung zum Geräusch oder Geräuscherzeuger, Einstellung zur Tätigkeit, körperliche und psychische Voraussetzungen des einzelnen (individuelles Gesundheitsverhalten, familiäre Veranlagung für bestimmte Krankheiten, persönliches Stressbewältigungspotential, individuelle Lärmempfindlichkeit, Lebensalter, individuelles Hörvermögen, Erkrankung, Schwangerschaft, Stillzeit,...)

Aus alledem ergibt sich: *„Lärm ist kein physikalisches Phänomen, sondern erst psychische Prozesse können ein Geräusch zu Lärm werden lassen.“*<sup>79</sup>

Lärm und seine Auswirkung auf Lehrer/innen und Schüler/innen im Klassenraum ist also nicht alleine auf die akustisch messbaren Einflussgrößen beschränkt. Die Tatsache, dass Lärm mehrere Einflussgrößen hat, macht die Erforschung seiner Wirkung - insbesondere für diese Diplomarbeit auf die Lehrer/innen, siehe Oberdörster<sup>80</sup> - auf spezifische Reaktionen (psychische und physische) besonders schwer, da in der Regel immer ein Einwirken mehrerer Einflussgrößen vorherrscht.

---

<sup>75</sup> Siehe [OBERDOERSTER1, S. 18].

<sup>76</sup> Vgl. [KALIVODA, S.103].

<sup>77</sup> [GUSKI1, S. 47].

<sup>78</sup> [VDI 2058 Bl.3, S. 4].

<sup>79</sup> [KALIVODA, S.103].

<sup>80</sup> Siehe [OBERDOERSTER1, S. 114].



## 2.1. Lärmwirkungsforschung: Ein kurzer Überblick

Einen Überblick über alle Lärmwirkungen verschaffen die WHO Richtlinien<sup>81</sup> aus dem Jahr 1999. Sie zählen folgende Wirkungen auf:

- Lärmbedingte Hörschädigung
- Interferenz mit der Sprachkommunikation
- Beeinträchtigung der Ruhephase und des Schlafes
- Kardiovaskuläre und physiologische Effekte
- Psychische Gesundheitseffekte
- Leistungsbeeinträchtigungen
- Effekte auf das ortsbezogene Verhalten und Belästigung (Ärger)

Kinder (Schulkinder und Vorschulkinder) sind laut Bistrup<sup>82</sup> anfälliger für lärmbedingte Hörschäden (aurale Lärmwirkungen) als Erwachsene.<sup>83</sup> Die folgende Aufzählung der extraauralen Lärmwirkungen auf Schulkinder ist aus der Publikation von Evans<sup>84</sup> entnommen, in der rund 89 Studienergebnisse zusammengefasst sind:

- *„Residing or attending school near a major noise source is associated with elevated blood pressure“<sup>85</sup>*

Die genannten Studien untersuchten die Effekte von Flug- und Verkehrslärm mit Lärmpegeln zwischen  $L_{eq}=58$  dB(A), 112 dB(A) peak oder 95 dB(A) peak, ab denen Effekte messbar waren. Ein Blutdruckanstieg, der in den Studien zwischen 4-8 mm de mercure lag, können laut Aussagen der Autoren auf längere Zeit zu chronischen kardiovaskulären Erkrankungen führen.

- *„...there are suggestive findings indicating that children chronically exposed to ambient noise sources may be more vulnerable to learned helplessness. Children attending schools in airport flight paths are less rely to solve or persist in attempting to solve challenging puzzles.“<sup>86</sup>*

Die genannten Studien untersuchten die Effekte von Fluglärm- mit Lärmpegeln von 95 dB(A) peak auf die Motivation der Kinder Puzzles zu lösen. Dabei zeigte sich, dass lärmexponierte Kinder nicht nur schlechter im Lösen der Puzzlespiele waren, sondern im Vergleich zu nicht lärmexponierten Kindern (2%) eher dazu neigten (zu rund 15%) aufzugeben.

- *„Children chronically exposed to noise may suffer from attentional deficits.“<sup>87</sup>*

Die genannten Studien geben an, dass die Aufmerksamkeit und Konzentration von Kindern bei lärmexponierten Schulkindern schwächer sei als bei nicht lärmexponierten. Laut Evans<sup>88</sup>

---

<sup>81</sup> [WHO].

<sup>82</sup> [BISTRUP].

<sup>83</sup> Vgl. [Ebd., S. 51].

<sup>84</sup> Vgl. [EVANS1].

<sup>85</sup> [Ebd., S. 45].

<sup>86</sup> [Ebd., S. 48].

<sup>87</sup> [Ebd., S. 49].

<sup>88</sup> [Ebd.].

können aber keine definitiven Aussagen über diese Zusammenhänge gemacht werden, da die meisten zitierten Studien methodologische Mängel aufweisen, weil die meisten Studienergebnisse sich auf Aussagen von Lehrer/innen berufen. Als Lärmquelle wird Fluglärm mit 75 bis 105 dB(A) peak genannt sowie Verkehrslärm zwischen 62 und 94 dB(A).

- *„These same children [children chronically exposed to noise] may suffer deficits in auditory discrimination“<sup>89</sup>*

Chronisch lärmbelastete Kinder zeigen Defizite im Erwerb der Lautdiskrimination auf: Gleich-ungleich-Entscheidung bei Wortpaaren wie „Fisch“ und „Tisch“ und beim Erkennen von Wörtern, die mit einem Störgeräusch vorgespielt werden. Im Gegensatz hierzu zeigen aber Experimente, dass chronisch lärmbelastete Kinder in Lautdiskriminationsaufgaben mit Störgeräusch besser abschneiden als nicht chronisch lärmbelastete Kinder. Die chronische Lärmbelastung lag bei 108 dB(A) peak Schienenlärm und 95 dB(A) peak Fluglärm. Man nimmt an, dass chronisch lärmbelastete Kinder Coping-Strategien entwickeln, die es ihnen ermöglichen akustische Störreize (Lärm) zu ignorieren. Es bleiben dennoch Defizite in der „gesamten“ Lautdiskrimination. Diese bleibenden Defizite der Lautdiskrimination bei chronisch lärmbelasteten Kinder werden von Klätte<sup>90</sup> folgendermaßen erklärt:

*„Diese Strategie [Coping-strategie] wird jedoch übergeneralisiert, sodass auch wesentliche akustische Cues nicht mehr adäquat aufgenommen und verarbeitet werden. Das beeinträchtigt den Erwerb differenzierter Lautrepräsentationen.“<sup>91</sup>*

- *“Noise exposure has little if any effect on children’s short term or working memory. Memory tasks that put especially demanding loads on working memory, however may show some deficits.“<sup>92</sup>*

Widersprochen wird diese Aussage von neueren Studien der Experten Klätte, Hellbrück, Kilcher und Hygge, die eine Verschlechterung des Kurzzeitgedächtnisses insbesondere bei sprachhaltigem Hintergrundschall feststellten. Der Effekt wird als „Irrelevant Sound Effect“ bezeichnet. Die Hintergrundgeräusche besitzen moderate Schallpegel von 55-76 dB(A) und somit hat auch typischer Klassenraumlärm ähnliche Auswirkungen. Wegen der Wichtigkeit dieser Wirkung von Lärm mittlerer Intensität auf die Schüler im Klassenraum wird in Kapitel 2.2 näher darauf eingegangen.

- *„Chronic exposure to noise has been associated with reading deficits in seven out of nine studies, particularly for children in higher elementary school grades.“<sup>93</sup>*

In den Studien wurde der Einfluss von Verkehrslärm von 55-66 dB(A), Schienenlärm von 59-89 dB(A) oder Fluglärm von 96,2 dB(A) peak oder 90 dB(A) peak untersucht. Die Lesefähigkeitsdefizite der Schulkinder werden durch die reduzierte Lautdiskrimination und Aufmerksamkeit erklärt. Die Lärmexposition verzögert die kognitive Entwicklung des Kindes. Die Studie von Stansfeld<sup>94</sup> ist die umfangreichste Studie<sup>95</sup> über die

---

<sup>89</sup> [Ebd., S. 54].

<sup>90</sup> Vgl. [KLATTE8]

<sup>91</sup> [KLATTE8, S. 35].

<sup>92</sup> [EVANS1, S. 55].

<sup>93</sup> [Ebd., S. 59].

<sup>94</sup> [STANSFELD].

Gesundheitseffekte von externem Lärm (Fluglärm und Verkehrslärm) auf Schulkinder im Alter von 9-10 Jahren.<sup>96</sup> 2844 Schulkinder aus Großbritannien, den Niederlanden und Spanien nahmen an ihr teil. Ein 5 dB-Anstieg des Fluglärmpegels (Tagesdauerlärm) war äquivalent zu einer 2-monatigen retardierten Lesefähigkeit in Großbritannien und einer einmonatigen retardierten Lesefähigkeit in den Niederlanden. Für Spanien waren keine Daten erstellt worden. Der Effekt ist linear und setzt bei 50 dB(A) ein.<sup>97</sup> Nach Green<sup>98</sup> setzt die gegenüber der Klassenzugehörigkeit retardierte Lesefähigkeit erst bei 63 dB(A) ein. Evans und Haines<sup>99</sup> haben den Effekt von Fluglärm mit  $Leq > 66 \text{ dB(A)}$  und  $Leq < 57 \text{ dB(A)}$ <sup>100</sup> auf die Leseleistung von Kindern untersucht. Die lärmexponierten Kinder zeigten eine signifikant schlechtere Leseleistung im Vergleich zu den nicht lärmexponierten Kindern.

Laut WHO<sup>101</sup> hat Lärm über 80 dB(A) einen Einfluss auf soziales Verhalten wie Hilfsbereitschaft und fördert Aggression. Diese Effekte werden auch in Publikationen über die Lärmproblematik in Bildungsstätten erwähnt.<sup>102</sup>

Die Einteilung der Lärmwirkungen in aurale (mit Auswirkungen auf das Gehörorgan, schallbedingte Hörschäden) und extraaurale mit Auswirkungen auf den Gesamtorganismus durch Beeinflussung von Organen und Organsystemen, von Funktionen und Leistungen, ist eine in der Lärmwirkungsforschung heute allgemeingültige Einteilung<sup>103</sup>. Die extraauralen Wirkungen kann man wiederum in Wirkungen auf psychischer Ebene (emotionale Reaktionen, Befindlichkeitsstörungen, Störungen kognitiver Leistung) und Wirkungen auf physischer Ebene (Herzkreislaufwirkungen, Stoffwechselveränderungen) aufteilen.<sup>104</sup>

Ein mögliches und oft zitiertes Lärmwirkungsmodell, ist das Modell des Lärmforschers Wolfgang Babisch (siehe Abb. 35). Dabei unterscheidet man bei der Erforschung der Lärmwirkung zwischen drei Ebenen: Stressindikatoren (Stresshormone, Herzfrequenz), Risikofaktoren und Krankheit. Stressindikatoren sind für die Untersuchung von Wirkungsmechanismen geeignet, da sie kurzfristig ansprechbare Reaktionsparameter sind. Den Risikofaktoren werden unmittelbar gesundheitliche Bedeutung beigemessen. Sie sind Variablen, die zur Beurteilung von Wirkungszusammenhängen herangezogen werden können („Was bedeutet ein x-prozentiger Anstieg des Cholesterins für das Risiko, einen Herzinfarkt zu bekommen?“). Die letzte Ebene ist die Krankheit: Sie erfordert allerdings sehr große Untersuchungsstichproben um einen statistisch gesicherten Nachweis von Effekten zu liefern.<sup>105</sup>

---

<sup>95</sup> Aussage laut Homepage der Universität London  
[http://www.qmul.ac.uk/qmul/research/newsrelease.php?news\\_id=133](http://www.qmul.ac.uk/qmul/research/newsrelease.php?news_id=133).

<sup>96</sup>Siehe auch: [http://www.wolfson.qmul.ac.uk/RANCH\\_Project/](http://www.wolfson.qmul.ac.uk/RANCH_Project/).

<sup>97</sup> Vgl. [STANSFELD].

<sup>98</sup> Vgl. [GREEN], zit. n. [MASCHKE1].

<sup>99</sup> Vgl. [EVANS2], [HAINES] auch zit. in. [KLATTE8].

<sup>100</sup> 16h Außenlärm.

<sup>101</sup> Vgl. [WHO].

<sup>102</sup> Siehe [KLATTE8].

<sup>103</sup> Siehe z. B. [ÖAL-RL Nr. 6/18], [ÖAL-RL Nr. 3], [VDI 2058 Bl. 3], und andere Literatur.

<sup>104</sup> Vgl. [ÖAL-RL Nr. 6/18].

<sup>105</sup> Vgl. [BABISCH1].

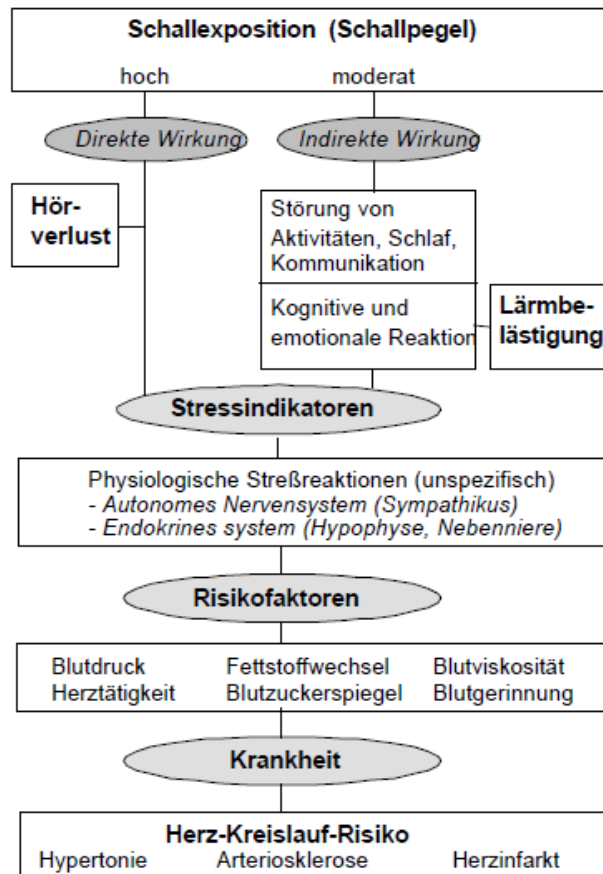


Abb. 35: Lärmwirkungsschema [BABISCH1], [BABISCH2] auch zit. in [MUELLER]

Oberdörster<sup>106</sup> hat für die Wirkung von Lärm und/oder der Nachhallzeit auf die Lehrer/innen den Stressindikator Herzfrequenz genommen, weil dieser sehr reizsensitiv ist, d. h. jede geringste Störung der Homöostase (Herz-Kreislauf-System) führt zu einer Änderung dieses Parameters und ist somit als Indikator „wechselnder psychophysischer Zustände“ der Versuchsperson zu betrachten. Die Herzfrequenz ist außerdem einfach mittels EKG-Messgerät am Körper der Versuchspersonen (Lehrer/innen) zu messen und aufzuzeichnen, ohne den gewöhnlichen Arbeitsablauf zu stören. Der Nachteil von Stressindikatoren und somit auch der Herzfrequenzaufzeichnung, wie im Modell von Babisch und am Anfang von Kapitel 2 beschrieben ist, besteht dagegen in ihrer höchst unspezifischen Reaktion, d. h. aus einer Erregung kann nicht im Rückschluss auf einen spezifischen Auslöser (Wut, Freude, Lärm, physische Tätigkeit etc.) geschlossen werden. So wird das Herzfrequenzprofil erst interpretierbar, wenn zugleich im Beobachtungszeitraum protokolliert wurde, welche psychischen und physischen Situationen aufeinander gefolgt sind, insbesondere bei außergewöhnlichen Situationen wie „*physische Anstrengungen: Laufen,...*“, „*Auseinandersetzungen mit einem Schüler*“, „*Hinlegen, Ausruhen*“.<sup>107</sup> Nähere Details der Aufzeichnung der Herzfrequenz sind in Kapitel 2.1.2. „*Extraaurale Wirkungen*“ beschrieben.

<sup>106</sup> Vgl. [OBERDOERSTER1].

<sup>107</sup> [SCHOENWAELDER2, S. 116].

Im nächsten Kapitel folgt ein kurzer Überblick zu den auralen Lärmwirkungen, bevor in Kapitel 2.1.2. die extraauralen Lärmwirkungen genauer beschrieben werden.

### 2.1.1. Aurale Wirkungen

Dieses Kapitel beschreibt die Einwirkungen von Lärm auf das Gehörorgan, die man hinsichtlich der Dauer der Schalleinwirkungen in akute und chronische Einwirkungen aufteilen kann. Sehr kurze Schalleinwirkungen mit hohen Pegeln führen zu einem akuten Schalltrauma, langandauernde Schalleinwirkungen über Jahre führen zu einem chronischen Schalltrauma (Lärmschwerhörigkeit). Das akute Lärmtrauma hat folgende Formen:

- Explosionstrauma: Verletzung des Mittelohres (Trommelfellverletzung, Luxation oder Fraktur der Gehörknöchelchen) durch akute Schalleinwirkung (hohe Schalldrücke längerer Dauer ( $> 2$  ms) laut ÖAL-Richtlinie Nr.6/18). Es kann auch eine Innenohrschädigung auftreten.
- Knalltrauma: Mechanische Schädigung des Cortischen Organes durch sehr kurze Schalleinwirkung ( $< 2$  ms). Trommelfeld und Mittelohr (Gehörknöchelchen) bleiben unverletzt. Vorwiegend einseitige Schädigung, praktisch immer asymmetrisch. (ÖAL-Richtlinie Nr.6/18).

Bei der Hörschwellenverschiebung (Threshold Shift), die aufgrund einer Funktionsbeeinträchtigung oder durch Zerstören der Zilien der äußeren Haarzellen entsteht, unterscheidet man zwischen reversibler oder zeitweiliger Hörschwellenverschiebung (TTS = Temporary threshold shift) und irreversibler bleibender Hörschwellenverschiebung (PTS = Permanent threshold shift), die zugleich ein Gehörschaden ist. Die Größe (Höhe) der zeitweiligen Hörschwellenverschiebung ist abhängig von der Intensität (tritt erst ab 75 dB(A) überhaupt auf), der Dauer der Schalleinwirkung und der Frequenz. Mit zunehmender Frequenz des einwirkenden Schalls bis 16 kHz steigen die Werte der Hörschwellenverschiebung an.

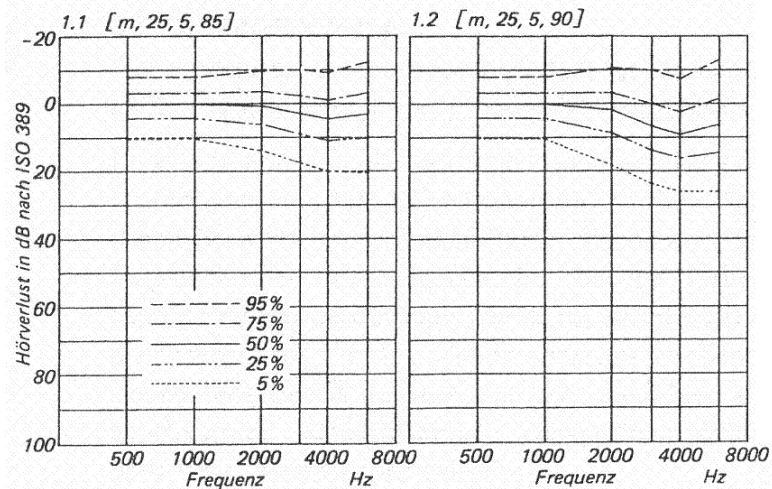
Die Einwirkung von Dauerlärm führt zuerst zu einer TTS, trifft die nächste Lärmexposition auf ein nicht zur Gänze erholtes Gehör, so kann es zu einer PTS kommen. In diesem Fall sterben einzelne Sinneszellen ab und verschwinden völlig. Diese Lärmschwerhörigkeit (chronisches Schalltrauma) ist eine im Allgemeinen reine symmetrische Innenschwerhörigkeit mit Maximum im Hochtonbereich. Allerdings kommt es nie zu einer völligen Zerstörung des Cortischen Organes, so dass nie völlige Taubheit infolge von einem chronischen Schalltrauma entstehen kann.

Ein noch heute angewandtes Schadensrisikomodell für Arbeitslärm ist das „Empirische Hörverlust-Modell bei Lärmbelastung nach ISO 1999:1990-01“<sup>108</sup>, auch Energieäquivalenzprinzip genannt, welches ein auf empirischer Grundlage aufgebautes mathematisches Modell zur einheitlichen Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Hörverlustes für lärmexponierte Populationen ist. Eine absolute Vermeidung von lärmbedingten Gehörschäden liegt bei 75 dB(A).

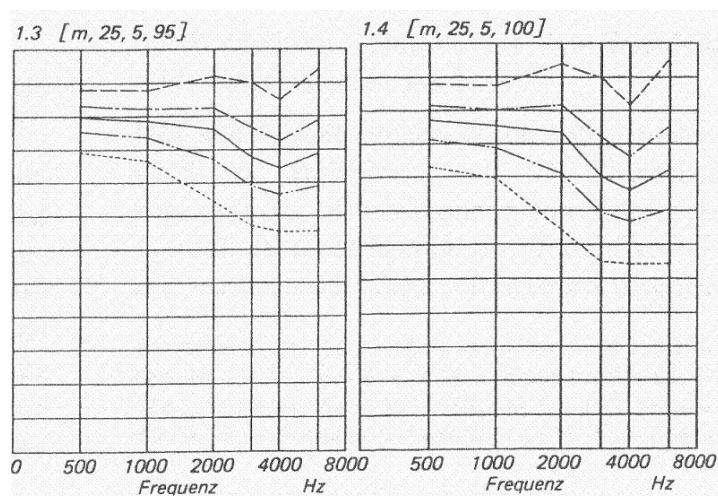
---

<sup>108</sup> Siehe [VDI 2058 Bl. 2].

Abbildungen 36-37 zeigen die 5 Perzentile (0,05 ; 0,25 ; 0,5 ; 0,75 ; 0,95) für 25jährige Männer, die 5 Jahre einem Beurteilungspegel von 85, 90, 95 oder 100 dB (A) exponiert waren.



**Abb. 36:** Hörverlustverteilungen nach ISO 1999 für 25 jährige Männer, die 5 Jahre einem Beurteilungspegel von 85 dB(A) (links) bzw. 90 dB(A) (rechts) exponiert waren [VDI 2058 Bl. 2, S. 4]



**Abb. 37:** Hörverlustverteilungen nach ISO 1999 für 25 jährige Männer, die 5 Jahre einem Beurteilungspegel von 95 dB(A) (links) bzw. 100 dB(A) (rechts) exponiert waren [VDI 2058 Bl. 2]

Dieses Modell hat für seine Gültigkeit genau festgelegte Grenzen, ist ein reines Risikoabschätzungsmodell und kann keine genauen Angaben über individuelle Hörschäden machen. Die Gültigkeitsgrenzen sind:

- $L_{Aeq,8h}$  zwischen 75 dB und 100 dB
- Lebensalter über 18 Jahren
- Expositionsdauer bis zu 40 Jahren

So entspricht der im Modell verwendete Beurteilungspegel  $L_{Aeq,8h}$ , der der A-bewertete, energieäquivalente, auf 8 Stunden bezogene Dauerschallpegel ist, nicht mehr dem heutigen Stand der Forschung: Impulslärm oder impulshaltiger Industrieschall haben eine deutlich stärkere Schadenswirkung als kontinuierliche (quasistationäre) langsam schwankende Geräusche mit gleichem Dauerschallpegel. So führte impulshaltiger Lärm in der Metallindustrie zu Hörschäden, die unter kontinuierlichen Geräuschen (Holzindustrie) erst bei 10 dB bis 20 dB(A) höheren Geräuschpegeln auftraten.<sup>109</sup> Für Kinder und Jugendliche ist dieses Modell nicht anwendbar, außerdem geht man davon aus, dass Kinder (Schulkinder und Vorschulkinder) anfälliger für lärmbedingte Hörschäden sind als Erwachsene.<sup>110</sup>

Gemäß ISO 1999:1990-01 oder Anhang A der VOLV<sup>111</sup> wird der Expositionspegel  $L_{A,Ex,T_o}$  zum jeweiligen Beurteilungszeitraum  $T_o$  von 8 h oder 40 h folgendermaßen berechnet:

$$L_{A,Ex,T_o} = L_{A,eq,T_e} + 10 \log \left( \frac{T_e}{T_o} \right)$$

bzw.:

$$L_{A,eq,T_e} = 10 \log \left[ \left( \frac{1}{T_e} \right) \cdot \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{A,eq,T_e,i}} \cdot T_{e,i} \right]$$

$$T_e = \sum_{i=1}^n T_{e,i}$$

ist die gesamte Expositionsdauer.

Erwähnt werden muss, dass bei  $L_{A,Ex,8h} > 80$  dB das Auftreten von Gehörschäden möglich ist. Eine Gehörgefährdung mit statistisch relevanter Wahrscheinlichkeit liegt aber erst bei  $L_{A,Ex,8h} > 85$  dB bzw.  $L_{C,peak} = 137$  dB vor.<sup>112</sup>

Die Lärmschwerhörigkeit ist zusammenfassend von folgenden Faktoren abhängig:<sup>113</sup>

- Der Dauer der Lärmexposition
- Der Intensität und dem Frequenzspektrum des einwirkenden Lärms
- Dem Vorhandensein und der Verteilung von Lärmpausen während der täglichen Exposition
- Individuellen Faktoren

<sup>109</sup> Vgl. [ISING1, S. 9].

<sup>110</sup> Vgl. [BISTRUP, S. 51].

<sup>111</sup> [VOLV].

<sup>112</sup> Vgl. [AIÖ2], siehe auch [VDI 2058 Bl. 3, S. 6].

<sup>113</sup> [ÖAL-RL Nr. 6/18, S. 9]

Weitere klinische Erscheinungsbilder von lärmbedingten Hörschäden wie der Recruitment-Effekt, der Tinnitus (40 % aller Lärmarbeiter haben einen zeitweiligen hochfrequenten Tinnitus), sowie die lärminduzierten Ohrschmerzen, seien hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Für Bildungsstätten liegt der Beurteilungspegel trotz hoher Spitzenpegel von über 95 dB(A) während den Pausen nicht im Bereich von Hörschäden bzw. dauerhaften Hörschäden. Die Hörschäden, die bei Kindern festgestellt wurden, sind mit der Ausnahme von angeborenen Hörschäden auf den hohen Freizeitlärm zurückzuführen, also auf zu laute Walkmans oder MP3-Player und zu lauter Musik bei Discobesuchen.<sup>114</sup>

Nach den auralen Lärmwirkungen, die in diesem Kapitel kurz erwähnt worden sind, folgt nun im nächsten Kapitel die Beschreibung der extraauralen Lärmwirkungen und der einzuhaltenden Grenzwerte.

## 2.1.2. Extraaurale Wirkungen

In diesem Kapitel werden die extraauralen Auswirkungen von Lärm auf den Gesamtorganismus und die Grenzpegel beschrieben, um daraus akustische Bedingungen für ein optimales Arbeiten im Klassenraum abzuleiten.

In der Psychologie und der Arbeitswissenschaft versteht man Lärm als einen Belastungsfaktor<sup>115</sup> bzw. Stressor. Stress wird nach Hans Selye, dem „Vater“ der Stressforschung, als „*unspezifische Reaktion des Organismus auf jede Anforderung*“ definiert.<sup>116</sup> Stressreaktionen sind die in der Person stattfindenden Prozesse bzw. Auswirkungen von Belastungen (Stress). Diese finden auf physiologischer (Puls, Blutdruck), kognitiver, emotionaler (Ermüdung, Ärger) und auf Verhaltensebene (Aggression) statt.<sup>117</sup> Tabelle 7 gibt einen Überblick zu allen möglichen Stressreaktionen auf Belastungen.

**Tabelle 7:** Stressreaktionen nach [LEXIKON]

	Kurzfristige, aktuelle Reaktionen	Mittel bis langfristige, chronische Reaktionen
physiologisch, somatisch	Erhöhte Herzfrequenz Erhöhter Blutdruck Ausschüttung von Stresshormonen	Psychosomatische Beschwerden Unzufriedenheit Resignation Depressivität Burnout
psychisch, kognitiv-emotional	Anspannung, Nervosität, innere Unruhe Frustration, Ärger, Ermüdungs, Monotonie, Sättigungsgefühle	

<sup>114</sup> Vgl. [MASCHKE1, S. 11] oder [ROBERT KOCH].

<sup>115</sup> Die auf eine Person von aussen einwirkenden, belastenden Bedingungen (Stress). [LEXIKON, S. 195]. Jede Belastung nimmt bestimmte Funktionen des Organismus in Anspruch (Beanspruchung) = alle physischen und psychischen Veränderungen bei Aussetzung einer / mehrerer Belastung/ungen.

<sup>116</sup> [Ebd., S. 258].

<sup>117</sup> Vgl. [Ebd., S. 263].



<b>verhaltensmässig, individuell</b>	Leistungsschwankungen Nachlassen der Konzentration Fehlhandlungen Schlechte sensumotorische Koordination Hastigkeit und Ungeduld	Vermehrter Nikotin-, Alkohol-, Tablettenkonsum Fehlzeiten (Krankheitstage) Innere Kündigung
<b>sozial</b>	Erhöhte Reizbarkeit Konflikte Streit Aggression gegen andere Rückzug (Isolierung) innerhalb und ausserhalb der Arbeit	

Belastungen am Arbeitsplatz und im Klassenraum können sein: Lärm, Temperatur, schlechte Sitzposition, Angst, Freude, Ärger, Konkurrenzkampf, Zeitdruck, Unsicherheit, fehlende Unterstützung, zu hohe Leistungsanforderungen, zu geringe Leistungsanforderungen.<sup>118</sup> Ausgangspunkte dieser Stressoren können im materiell-technischen, sozialen und personalen Bereich oder in den Überlappungsbereichen ihren Ursprung haben (siehe Abb. 38). Lärm ist dem materiell-technischen Bereich zuzuordnen.

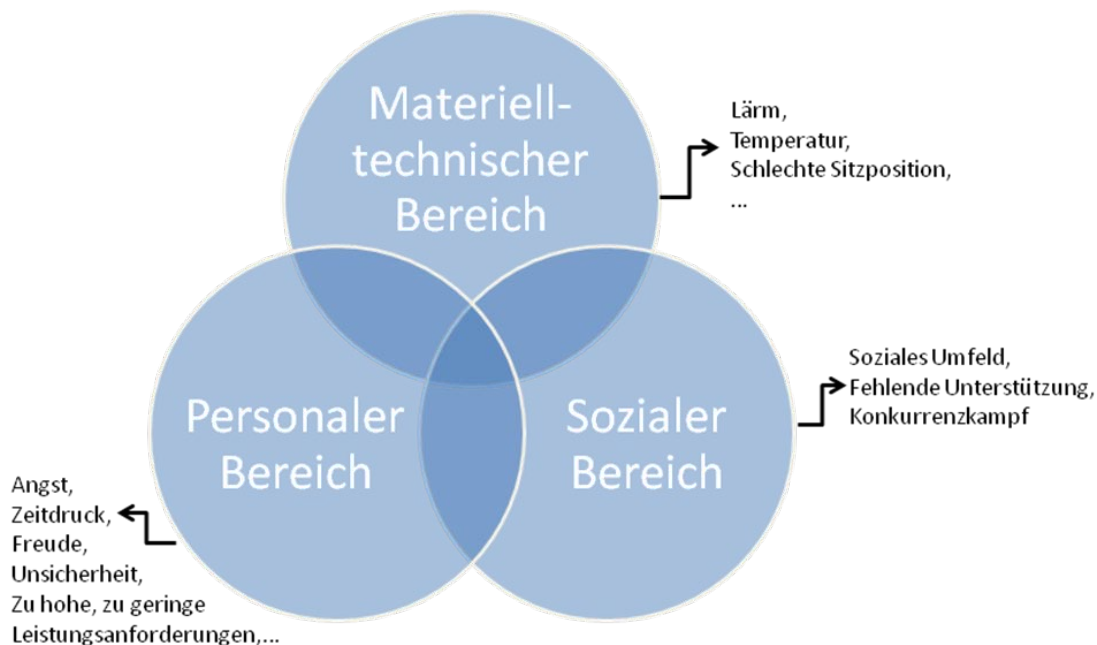


Abb. 38: Ausgangspunkte von Belastungen. Vgl.: [LEXIKON, S.195]

Neben den Gehörschäden löst Lärm als Stressor einerseits physiologische (vegetative, endokrinologische) Reaktionen aus, die je nach Intensität, Häufigkeit und mentaler Verarbeitung zu Stressreaktionen führen und andererseits durch die lärmbedingte Störung und Beeinträchtigung von Tätigkeiten, mentalen Prozessen, Kommunikation und Erholungsphasen auch psychische (Belästigung, Ärger, Anspannung) Reaktionen auslösen, die dann wiederum Stressreaktionen auslösen können. Die psychologischen und die physiologischen Aspekte der Stressreaktion bilden also eine Einheit und können sich in ihrer Wirkung verstärken (psycho-physiologische Reaktionen).<sup>119</sup> Einen kurzen Überblick der physischen und psychischen Wirkungen von Lärm gibt auch VDI 2058 Bl.3:

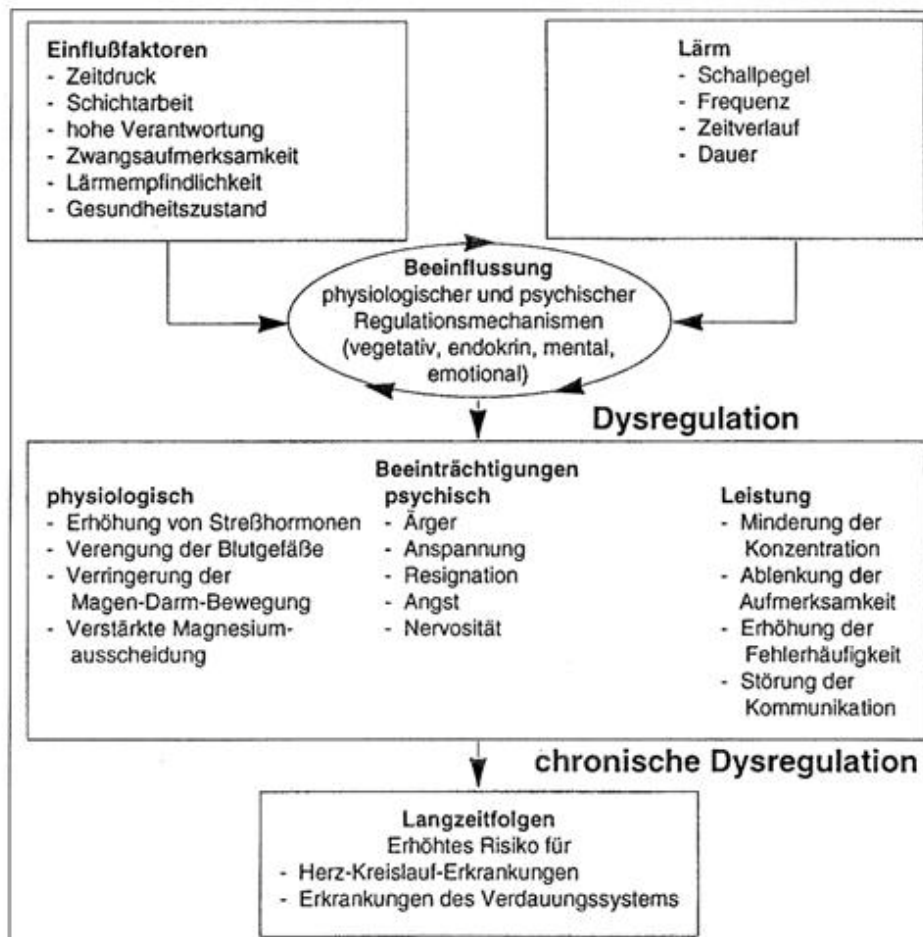
<sup>118</sup> Vgl. [ECOPHON].

<sup>119</sup> Vgl. [ISING2, S. 4], [SUST1].

**Tabelle 8:** Physische und psychische Wirkungen von Lärm. Vgl. [VDI 2058 Bl. 3, S. 6]

Psychisch	Physisch
Verärgerung	Erhöhung des systolischen und/oder diastolischen Blutdrucks
Anspannung	Verengung der peripheren Blutgefäße
Resignation	Erhöhung von Stresshormonwerten
Angst	Verstärkte Magnesium-Ausscheidung
Nervosität	Veränderung von Atem- und Herzrhythmus
Leistungsfähigkeit (Leistungsminderung)	Verringerung der Magen- und Darm-Bewegung

Das Stressmodell von Sust und Lazarus, das in der Literatur der Klassenraumakustik zitiert wird, ist als kontinuierlich ablaufender und sich wiederholender Prozess (Regulationsprozess) zu verstehen. Der Einfluss von Lärm und seine Einflussfaktoren werden als Dysregulationen (Fehlregulationen) aufgefasst, die physiologische, psychologische oder leistungsbezogene Beeinträchtigungen zur Folge haben können.<sup>120</sup> Langfristig kann eine Dysregulation zu einer chronischen Dysregulation werden.



**Abb. 39:** Extra-aurale Lärmwirkungen  
[ISING2, S. 6], auch zit. in [SUST1, S. 3], [OBERDOERSTER1, S. 45]

<sup>120</sup> Vgl. [ISING2, S. 5].

Das „Transaktionale Stressmodell“ der Forschergruppe um Lazarus<sup>121</sup> begreift Stress als Ergebnis einer Transaktion zwischen der Umwelt und der Person (2 Systeme). Die Grundlage für die Stressentstehung bilden die subjektive Wahrnehmung und Bewertung („appraisal“) zwischen beiden Systemen, also die „kognitiven Vermittlungsprozessen“.<sup>122</sup> Abb. 40 zeigt die schematische Darstellung dieses Modells. Stress nach Lazarus tritt also nur dann auf, wenn Reize oder Belastungen als stressend bewertet werden.

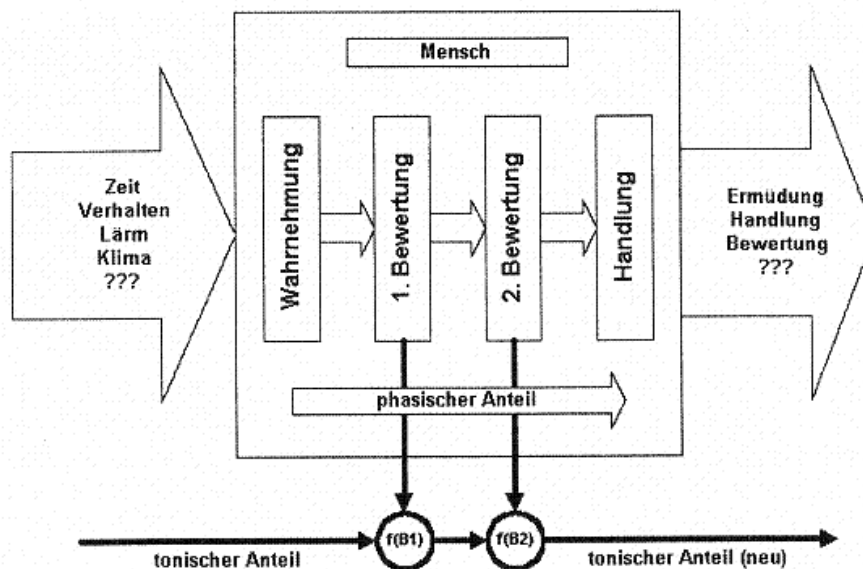


Abb. 40: Stressmodell nach Lazarus und Launier [OBERDOERSTER1, S. 43], in Anlehnung an [LAZARUS2]

Lazarus unterscheidet drei Formen der Bewertung: primäre („primary appraisal“), sekundäre Bewertung („secondary appraisal“) und Neubewertung. In der ersten Bewertung wird ein Ereignis entweder als irrelevant, günstig/positiv oder stressend in bezug auf das Wohlbefinden betrachtet. Wird ein Ereignis als irrelevant eingestuft, so ist es ohne jegliche Auswirkung auf das Wohlbefinden der Person. Durch eine positive/günstige Bewertung kann die Person sich entspannen oder dem zuwenden, was noch ansteht. Stressende Bewertungen treten in drei Formen auf: Schädigung/Verlust („harm-loss“), Bedrohung („threat“) und Herausforderung („challenge“). Wenn ein Ereignis als stressend oder belastend eingestuft wird, so überdenkt die Person Möglichkeiten die Situation zu bewältigen. Diese Phase der Sichtung und Auswahl an Bewältigungsstrategien („coping-strategies“) bezeichnet Lazarus als sekundäre Bewertung. Rudow<sup>123</sup> schreibt hierzu: „Der Stressor (z. B. die undisziplinierte Klasse) wird danach eingeschätzt, welche (individuellen und Umwelt-) Ressourcen zu seiner Bewältigung gegeben sind (sekundäre Bewertung).“ Wie unterschiedlich diese Bewältigungsprozesse sein können und welchen fundamentalen Einfluss sie auf die Bewertung einer Belastung haben, ob sie als stressend empfunden wird oder nicht, zeigt Rudow in einem Beispiel zum Stressor Lärm im Klassenraum: „Ein Lehrer ärgert sich über

<sup>121</sup> [LAZARUS2].

<sup>122</sup> Vgl. [NITSCH, S. 87], [ROTHLAND, S. 37].

<sup>123</sup> [RUDOW]

den Lärm in der Klasse, er sagt sich aber: Was soll's, die Mitarbeit der Schüler ist doch gut.“<sup>124</sup> Da die Bewertungsvorgänge im transaktionalen Modell veränderlich sind, können ständig neue Informationen hinzukommen. In Abhängigkeit vom Erfolg oder Misserfolg der gewählten Bewältigungsstrategie wird der Prozess neu bewertet und beginnt von vorne.<sup>125</sup>

Im schulischen Kontext wurde laut Rothland<sup>126</sup> das Modell von Lazarus immer wieder als Ausgangsmodell zur Untersuchung von Lehrerstress herangezogen. So hat auch Oberdörster<sup>127</sup> dieses Modell zum Verständnis der Änderung der Herzfrequenz bei Lehrern/innen herangezogen. Eine kurzzeitige Dysregulation (Reaktion) auf momentane Ereignisse (Einflussfaktoren) wird als phasische Reaktion bezeichnet (kurzzeitiger Zeitabschnitt). Ein Beispiel wäre ein plötzliches Herzrasen in einer Schrecksituation. Über einen längeren Zeitraum (längerer Zeitabschnitt) können kontinuierliche Dysregulationen zu einer Änderung des tonischen Anteils führen. In der Beanspruchungsanalyse mit Hilfe der Herzfrequenz wählt Oberdörster und Schönwälder<sup>128</sup> folgende Kenngrößen:

- Basiswert (tonischer Anteil): die niedrigste durchschnittliche Herzfrequenz über ein definiertes Zeitintervall während Unterrichtsstunden oder Pausen, auch Basisaktivierung<sup>129</sup> genannt.
- Mittlere Beanspruchung (phasischer Anteil): die gemittelte Herzfrequenz während definierten Zeitabschnitten.
- Relativer Arbeitspuls: Abstand zwischen Beanspruchung und dem Basiswert des entsprechenden Zeitabschnittes (Differenz von mittlerer Beanspruchung und Basisaktivierung).

Oberdörster hat die Herzfrequenz im 15 Sekunden-Takt aufgezeichnet, um die respiratorische Arrhythmie (Einatmen beschleunigter und Ausatmen verlangsamter Puls) zu eliminieren.<sup>130</sup> Mit diesen 15-Sekunden-Messwerten werden die oben beschriebenen Größen ausgerechnet.

Auf die Details aller einzelnen extraauralen Lärmwirkungen kann innerhalb dieser Diplomarbeit nicht eingegangen werden, diese würden den Rahmen dieser Arbeit sprengen und am eigentlichen Thema der Arbeit vorbeigehen. Zu erwähnen wäre aber noch der Ausdruck Beanspruchung, der insbesondere von Gerhart Tiesler in seinen Publikationen oft in bezug auf Belastungen der Lehrer verwendet wird. Man geht im Belastungs-Beanspruchungs-Konzept davon aus, dass eine Belastung (für jede am Ort tätige Person) in Abhängigkeit von individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten verschiedenartige Beanspruchungen erzeugt.<sup>131</sup>

---

<sup>124</sup> [Ebd.]

<sup>125</sup> Vgl. [LAZARUS2], [ROTHLAND, S. 37].

<sup>126</sup> [Ebd.]

<sup>127</sup> Vgl. [OBERDOERSTER 1].

<sup>128</sup> [Ebd.] und [SCHOENWAELDER2].

<sup>129</sup> Mit Aktivierung bezeichnet man den Grad der psychophysischen Erregung eines Menschen [Ebd., S. 123].

<sup>130</sup> [OBERDOERSTER1, S.66]

<sup>131</sup> Vgl. [LEXIKON, S. 195].

Die Dosiswirkung von Lärm in bezug auf die Komplexität einer Arbeitsaufgabe wird von Ising<sup>132</sup> durch folgende Punkte zusammengefasst:

Das Störpotential von Lärm nimmt zu:

1. Je mehr Informationen im Gedächtnis betrachtet werden müssen
2. Je mehr geistige Operationen ausgeführt werden müssen (Schlussfolgern, Rechenoperationen)
3. Je höher die Anforderungen an kontinuierlicher Konzentration und Aufmerksamkeit sind
4. Je verantwortungsvoller die Tätigkeiten in bezug auf Fehlerfolgen sind (Qualitätsbewusstsein)
5. Je stärker die Aufgaben unter Zeitdruck gelöst werden müssen.

Kurz zusammengefasst:

„Je komplexer die Aufgabe umso eher wird Lärm zur Störung“.<sup>133</sup>

Im Jahr 1999 hat der Verein Deutscher Ingenieure folgende Grenzwerte publiziert:

**Tabelle 9:** Grenzwerte für Tätigkeiten an Arbeitsplätzen [VDI 2058 Bl. 3]

Grenzwerte:	Tätigkeiten:
<b>55 dB</b>	Bei überwiegend geistiger Tätigkeit (hohe Komplexität)
<b>70 dB</b>	Bei einfachen oder überwiegend mechanisierten Bürotätigkeiten (mittlere Komplexität)
<b>85 dB</b>	Bei allen sonstigen Tätigkeiten

Der Grenzwert von 55 dB wird in vielen Publikationen der Klassenakustik angegeben. Er wird, wie in der Einleitung bereits angesprochen, meistens überschritten (siehe Tabelle 2 und 4).

Diese Grenzwerte sind als sogenannter „Arbeitspegel“ definiert:<sup>134</sup>

$$L_{A,r} = L_{A,Ex,T_o} + K$$

$K$  ist der Zuschlag für Impuls- oder Tonhaltigkeit.

$K_I$  beträgt für impulshaltige Geräusche 6 dB, wenn Anzeigedynamik „impulse“ sich um mindestens 2 dB von den Maximalpegeln der Anzeigedynamik „fast“ unterscheidet.

$K_T$  für tonhaltige Geräusche beträgt 6 dB, wenn Tonkomponenten deutlich hörbar sind und die Terzbandanalyse ergibt, dass der Pegel eines (oder zweier) Terzbänder die Pegel der benachbarten Bänder um 5 dB oder mehr übersteigt.

<sup>132</sup> [ISING2] auch zit. in [OBERDOERSTER1, S. 21].

<sup>133</sup> [ISING2].

<sup>134</sup> [VOLV, S. 8].

Die ÖNORM S 5004 empfiehlt noch einen Zuschlag von 5 dB für informationshaltige Signale.

Die WHO hat Grenzwerte für das Grundgeräusch im Unterricht in ihren Richtlinien angegeben. In der Tabelle sind auch die Folgen der Erhöhung dieser Grenzwerte angeführt:

**Tabelle 10:** „Guideline values“ der Weltgesundheitsorganisation (WHO) für Lärm [WHO, S. 47]. Übersetzung nach [BABISCH2]. Komplette Tabelle im Anhang B.

Umweltbereich	Kritische Effekte	Mittelungspegel Leq [dB(A)]	Zeitbasis [Stunden]	Maximalpegel Lmax, fast [dB(A)]
Klassenraum (Schule), Vorschule (innen)	Sprachverständlichkeit, Störung von Informationsaufnahme, Mitteilungen und Kommunikation	35	Unterricht	-
Vorschule, Schlafräume (innen)	Schlafstörung	30	Ruhezeit	45
Schule, Spielplatz (außen)	Störung und Belästigung (Externe Quellen)	55	Spielzeit	-

Auch der Wert von 35 dB wird laut den Studien der Tabelle 4 oft überschritten.

Die Arbeitsinspektion Österreich<sup>135</sup> hat 2006 eine Tabelle publiziert, die die Grenzwerte nach der Gesetzgebung<sup>136</sup> und die möglichen Wirkungen bei Überschreitung darstellt.

**Tabelle 11:** Übersicht: Wirkungen von Lärm (Arbeitsinspektion Österreich, 2006)

<b><math>L_{A,r} &gt; 50</math> dB Verboten für überwiegend geistige Tätigkeiten und in bestimmten Räumen (§ 5 VOLV)</b>	<p>Extraaurale Wirkungen - psychenervale Reaktionen können unabhängig vom Schalldruckpegel auftreten und sind vorrangig bestimmt durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Informationsgehalt und die subjektive Einstellung des Hörenden.</li> </ul> <p>Grenze unter Beachtung des allgemeinen Minimierungsgebotes vorgegeben. Sie treten in Erscheinung durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufmerksamkeits-, Konzentrationsverlust,</li> <li>• subjektives Stöempfinden,</li> <li>• Beeinträchtigung der Handlungsregulation,</li> <li>• Abnahme der Handgeschicklichkeit,</li> <li>• Zunahme von Fehlern und Ausschussproduktion.</li> </ul>
--	--

<sup>135</sup> Vgl. [AIÖ1].

<sup>136</sup> [VOLV].

<p><b><math>L_{A,r} &gt; 65 \text{ dB}</math></b>  <b>Verboten für einfache Bürotätigkeiten und vergleichbare Tätigkeiten (§ 5 VOLV)</b></p>	<p>Extraaurale Wirkungen - vegetative Reaktionen können nach Exposition gegenüber Beurteilungspegeln von mehr als 65 dB auftreten. Grenze unter Beachtung des allgemeinen Minimierungsgebotes vorgegeben. Vegetative Reaktionen zeigen sich in:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Herzfrequenzanstieg,</li> <li>• Gefäßkontraktionen, Blutdruckanstieg,</li> <li>• Erhöhung des Muskeltonus (Schreibdruck),</li> <li>• Verstärkung der Magensaftproduktion und der Darmbewegungen,</li> <li>• Ausschüttung von Nebennierenrindenhormonen,</li> <li>• Schlafstörungen.</li> </ul>
<p><b><math>L_{A,EX,8h} &gt; 85 \text{ dB}</math></b>  <b>Persönliche Lärmexposition muss <math>\leq 85 \text{ dB}</math> sein! (§ 3 VOLV)</b></p>	<p>Aurale Wirkungen. Die temporäre Hörschwellenverschiebung ist eine Hörmüdung. Erkennbar an einer Hörverschlechterung um 5 - 20 dB. Sie bildet sich innerhalb von 8 - 24 h zurück (Lärmpausen).</p> <p>Die Lärmschwerhörigkeit ist</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• nach fortgesetzter persönlicher Lärmexposition von mehr als 85 dB (ohne entsprechende Lärmpausen) mit bestimmter statistisch relevanter Wahrscheinlichkeit zu erwarten.</li> <li>• nicht behandelbar, nicht rückbildungsfähig, da auf einer Degeneration der für das Hören verantwortlichen Haarzellen im Innenohr beruhend.</li> <li>• eine der häufigsten Berufskrankheiten.</li> </ul> <p>Sie beginnt als Hochtonschwerhörigkeit und betrifft später die mittleren Frequenzen im Sprachbereich.</p>
<p><b><math>L_{C,peak} &gt; 137 \text{ dB}</math></b>  <b>Persönlicher Spitzenschallpegel muss <math>\leq 137 \text{ dB}</math> sein! (§ 3 VOLV)</b></p>	<p>Aurale Wirkungen - akute akustische Traumata</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Knalltrauma (rückbildungsfähig)        Nach kurzen energiereichen Schallereignissen (Impulsdauer <math>&lt; 2 \text{ ms}</math>);        Hörverschlechterung über Stunden oder Tage.</li> <li>• Explosionstrauma        Nach Einwirkung energiereicher Druckwellenfronten (Impulsdauer <math>&gt; 2 \text{ ms}</math>);        evtl. Trommelfellrisse, Beschädigung der Gehörknöchelchenkette und mehr oder weniger ausgeprägte Innenohrschäden.</li> </ul>

Die Arbeitsinspektion gibt an, dass schon ab  $L_{A,r} > 50 \text{ dB}$  Aufmerksamkeits- und Konzentrationsverlust möglich ist. Es soll also auch in Klassenräumen der Geräuschpegel so weit wie möglich minimiert werden.

Dieses Kapitel sollte die möglichen extraauralen Wirkungen von Lärm aufzählen und beschreiben. Dabei wurde festgestellt, dass sich Lärm (auch Lärm mittlerer Intensität, Schüllärm) auf die Herzfrequenz auswirkt, wie in Studien des Instituts für Interdisziplinäre Schulforschung der Universität Bremen mit Lehrerinnen und Lehrern ebenfalls festgestellt wurde. So muss man befürchten, dass Lehrer bei hoher Lärmbelastung ein höheres Risiko haben, an Herz-Kreislaufkrankheiten zu erkranken,<sup>137</sup> obwohl es schwierig oder unmöglich ist, eine krankmachende Wirkung des Lärms mittlerer Intensität nachzuweisen, wenn man einen einzigen Stressor alleine betrachtet.<sup>138</sup>

Im nächsten Kapitel wird der Zusammenhang zwischen der Lärmbelastung während dem Unterricht und der Nachhallzeit des Klassenraums beschrieben.

<sup>137</sup> Vgl. [OBERDOERSTER1].

<sup>138</sup> Vgl. [SCHOENWAEELDER1, S. 124].

## 2.2. Lärmwirkungsforschung im Klassenraum

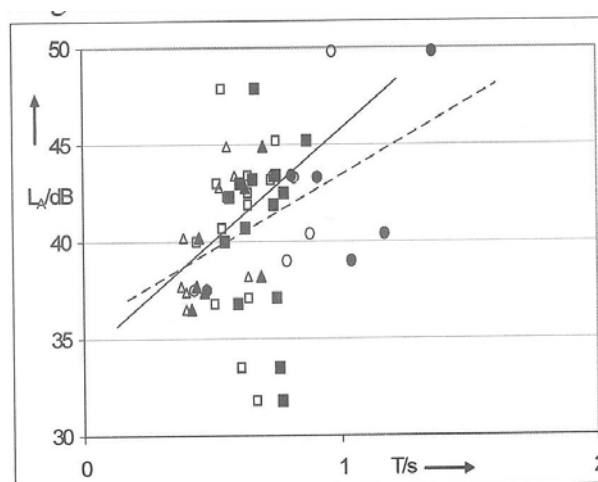
Wie in der Einleitung schon erwähnt worden ist, gibt es drei Hauptfaktoren, die für die Geräuschbelastung in der Schule verantwortlich sind:

- Die Geräusche der Schüler
- Die Umgebungsgeräusche der Schule (Verkehrsgerausche, Fluglärm, Schienenlärm) (siehe Kapitel 2.1)
- Die akustische Klassenraumsituation

Das folgende Kapitel beschäftigt sich ausschließlich mit dem Zusammenhang zwischen dem Unterrichtsgeräuschpegel (Arbeitsgeräuschpegel und Grundgeräuschpegel) und der Klassenraumakustik. Außerdem soll beschrieben werden, welchen Einfluss die Nachhallzeit und der Lärm auf Schüler und Lehrer haben.

### 2.2.1. Nachhallzeit und Belastung von Lehrer/innen und Schüler/innen

Oberdörster, Tiesler und Schönwälder haben in ihrer Untersuchung von drei Schulen eine Korrelation zwischen dem Unterrichtsgrundgeräuschpegel (Minimalwert von  $L_{Aeq,10s}$  zwischen 34-45 dB) und der Nachhallzeit (0,3-1,5s) gefunden.



**Abb. 41:** Unterrichtsgrundgeräuschpegel in Abhängigkeit von der Nachhallzeit (5 Schulen, 30 KR). Durchgezogener Strich: KR besetzt. Gestrichelt: KR leer. Die drei unterschiedlichen Symbole stehen für drei unterschiedliche Schulen. [LAZARUS 2007, S. 528]

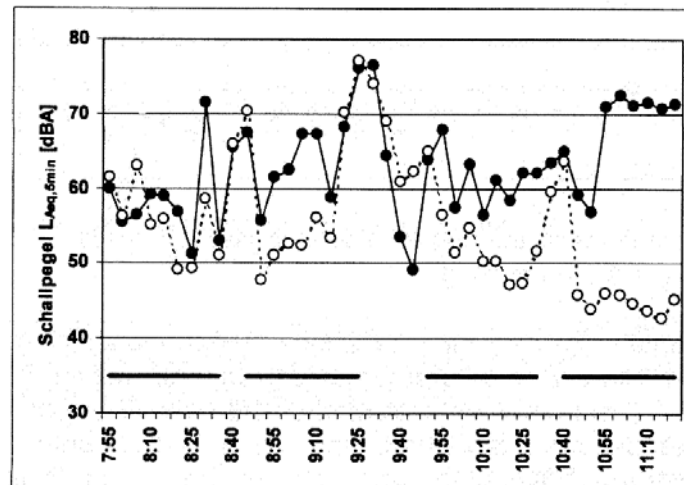
Auch Oberdörster<sup>139</sup> stellte fest, dass zwischen dem Geräuschpegel im Klassenraum und der Nachhallzeit ein linearer Zusammenhang zwischen  $T=0,3$  s und  $0,8$  s besteht. Sie ermittelten eine:

<sup>139</sup> Vgl. [OBERDOERSTER1, S. 164].



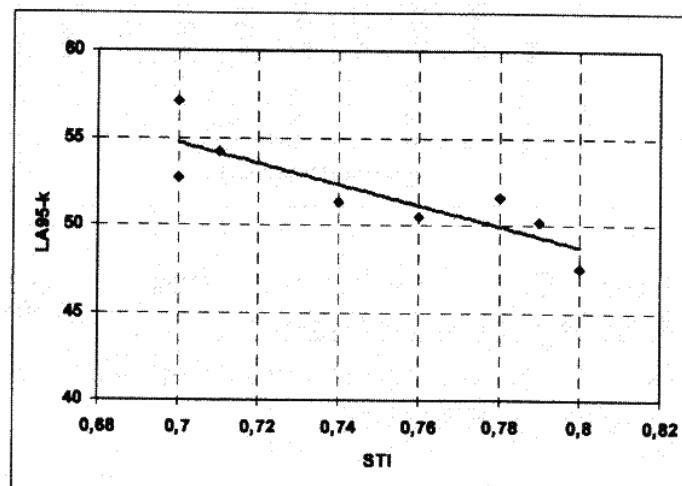
*Lineare Reduktion von 1,6 dB bis 2,0 dB pro 0,1 s Nachhallzeit.*

Dabei blieben die Pegelverläufe des Arbeitsgeräuschpegels vor und nach der Sanierung oft verblüffend ähnlich, nur die Amplitude wurde reduziert (siehe Abb. 42).



**Abb. 42:** Arbeitsgeräuschpegel im Unterricht (Di, 1.-4. Ust) vor (schwarz,  $RT > 0.5s$ ) und nach (weiß,  $RT < 0.5s$ ) der raumakustischen Sanierung. (Baumbergeschule) [OBERDOERSTER1, S. 147]

Sie stellten außerdem einen Zusammenhang zwischen dem STI und dem Grundgeräuschpegel fest:



**Abb. 43:** Grundgeräuschpegel  $L_{A95-k}$  in Abhängigkeit vom STI der KR (Schule Stichnathstrasse) ( $r=0.85$ ; Steigung =  $-59.98$ ) (Regressionsberechnung, siehe Anhang D) [OBERDOERSTER1, S. 102]

MacKenzie<sup>140</sup> stellte einen Unterschied von 7 bis 9 dB(A) im Hintergrundgeräuschpegel zwischen den unbehandelten und den behandelten Klassenräumen fest:

**Tabelle 12:** Instantaneous Background Noise Levels ( $L_{Aeq,15min}$ ) (dBA) (An einem typischen Arbeitstag von 70 KR)

	Background Noise Levels		RT	
	Untreated	Treated	untreated	treated
<b>Room unoccupied</b>	44,7	40,1	0,7	0,4
<b>Pupils silent</b>	55,5	46,5	0,6	0,4
<b>Pupils working</b>	77,3	70,1	0,6	0,4

Diese Abnahme des Schallpegels in den verschiedenen Studien wird einerseits durch die verbesserte Schallabsorption erklärt; durch reduzierte Nachhallzeit klingen auch Geräusche (wie Husten, Lachen, Hantieren, Stühle verschieben etc.) schneller aus, andererseits durch ein leiseres Verhalten der Personen im Raum bei niedrigen Nachhallzeiten.<sup>141</sup> Die physikalische Pegelreduktion für das diffuse Schallfeld bei Einfügen zusätzlicher äquivalenter Schallabsorptionsfläche  $\Delta A$  ergibt sich aus Umformung der Nachhallformel von Sabine:

$$\Delta L = \left( 10 \log \frac{A_1 + \Delta A}{A_1} \right) dB$$

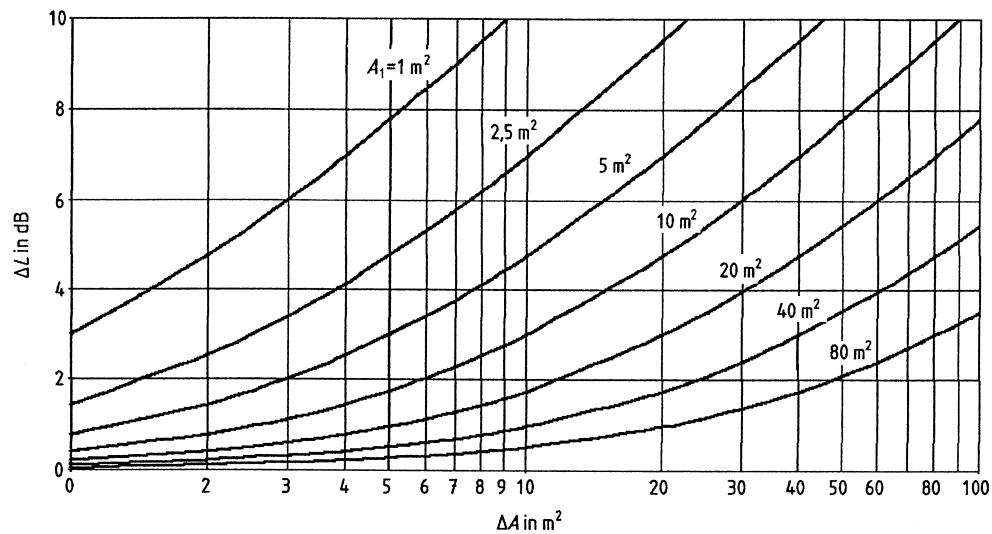
dabei ist:

- $\Delta L$  die physikalische Minderung des Schalldruckpegels
- $A_1$  die äquivalente Schallabsorptionsfläche des unbehandelten Raumes in  $m^2$
- $\Delta A$  die zusätzliche äquivalente Schallabsorptionsfläche in  $m^2$

Den grafischen Zusammenhang gibt folgende Abbildung:

<sup>140</sup> Vgl. [MACKENZIE].

<sup>141</sup> Vgl. [LAZARUS1, S. 528].



**Abb. 44:** Zusammenhang zwischen Schalldruckpegelminderung  $\Delta L$  im diffusen Schallfeld und der zusätzlichen äquivalenten Schallabsorptionsfläche  $\Delta A$  bei äquivalenter Schallabsorptionsfläche  $A_1$  des unbehandelten Raumes [DIN 18041, S. 25]

Oberdörster<sup>142</sup> zeigt die möglichen Pegelreduktionen am Beispiel einer Rechnung:

$$V = 225.8 \text{ m}^3; RT_{\text{vor}} = 0.75\text{s}; RT_{\text{nach}} = 0.35\text{s}$$

$$A_{\text{vor}} = 49.07 \text{ m}^2; A_{\text{san}} = 105.16 \text{ m}^2 \text{ (nach Sabine)}$$

$$\Delta L_{\text{calc}} = 3.31 \text{ dB}$$

Schönwälder bemerkt hierzu folgendes:

*„Die Verbesserung der Schallabsorption im Klassenraum bedeutet physikalisch eine Reduzierung des Schallpegels um maximal 3 dB(A), die tatsächlich gemessene Reduzierung um 6 bis 8 dB(A) ist auf die Wechselwirkung zwischen Verbesserung der Sprachverständlichkeit und dem daraus resultierenden Sozialverhalten der Schüler zurückzuführen «Wenn alles leiser ist, brauche ich auch nicht mehr so laut zu reden.“<sup>143</sup>*

Ein Erklärungsschema für dieses Phänomen wäre das Auftreten der „Lärmkaskaden“, wie sie in Kapitel 1 beschrieben worden sind. Die Nachhallzeit reduziert aber nicht nur den Durchschnittsschallpegel, sondern minimiert die allgemeine Steigerung des Grundgeräuschpegels bei Wechsel zu differenzierten offenen Arbeitsformen (siehe Abb. 19, und Abb. 21 S. 26). War dieser Wechsel vor der Sanierung ( $RT > 0.5\text{s}$ ) mit einem Grundgeräuschpegelanstieg von über 10 dB(A) verbunden, so beträgt dieser nach der

<sup>142</sup> [OBERDOERSTER1, S. 98].

<sup>143</sup> [SCHOENWAELDER1, S. 118].

Sanierung ( $RT < 0.5s$ ) nur noch  $5dB(A)$ .<sup>144</sup> Der Arbeitsgeräuschpegel  $L_{Aeq,5min}$  während den differenzierten Arbeitsphasen nach der Sanierung war sogar tendenziell leiser im Vergleich zum Frontalunterricht (siehe Abb. 20, S. 26).

Eine Verkürzung der Nachhallzeit reduziert bzw. verhindert den Anstieg des Arbeitsgeräuschpegels bzw. des Grundgeräuschpegels über den Vormittag hinweg. Die folgende Tabelle zeigt die Regression für den Arbeitsgeräuschpegel und Grundgeräuschpegel jeweils vor und nach der raumakustischen Sanierung nach Abb. 25 und Abb. 26. S. 29 und 30.

**Tabelle 13:** Regression des Arbeitsgeräuschpegels in Abhängigkeit der 4 Ust. im Tagesverlauf.  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $N$ =Anzahl der Klassenräume. Steigung = Steigung der Regressionsgeraden. (Regressionsberechnung, siehe Anhang D)

[OBERDOERSTER1, S. 97] (Baumberge-Schule)

$L_{Aeq,5min}$	Vor Sanierung ( $RT > 0.5$ )	Nach Sanierung ( $RT < 0.5s$ )
$r$	0.68	0.22
Steigung	2.53	0.84
$N$	16	15

**Tabelle 14:** Regression des Grundgeräuschpegels in Abhängigkeit der Ust. im Tagesverlauf.  $r$  = Korrelationskoeffizient,  $N$ =Anzahl der Klassenräume. Steigung = Steigung der Regressionsgeraden. (Regressionsberechnung, siehe Anhang D)

[Ebd.] (Baumberge-Schule)

$L_{A95,5min}$	Vor Sanierung ( $RT > 0.5$ )	Nach Sanierung ( $RT < 0.5s$ )
$r$	0.76	0.14
Steigung	2.09	0.22
$N$	16	14

Oberdörster<sup>145</sup> erkennt beim Vergleich der Kurvenverläufe zwischen dem Arbeitsgeräuschpegel ( $L_{Aeq,5min}$ ) und der Herzfrequenz große Ähnlichkeiten: so ist z. B. der synchrone Verlauf beider Parameter gut sichtbar (siehe Abb. 46, als Vorzeigebeispiel einer Lehrerin) und es stellt sich ein überraschend hoher Korrelationsfaktor von  $r=0,55$  ein. Oftmals fallen bei einer solchen Gegenüberstellung der Herzfrequenz und dem Schallpegel Maxima und Minima beider Kurven zusammen. Abb. 45 aus Berndt<sup>146</sup> zeigt den nahezu parallelen Verlauf der Herzfrequenz zum Schallpegel. Bei einer Steigerung des Schallpegels steigt auch der Medianwert der Herzfrequenz sowie die Basisaktivierung an.

<sup>144</sup> Vgl. [LAZARUS1, S. 534].

<sup>145</sup> Vgl. [OBERDOERSTER, S. 150].

<sup>146</sup> [BERNDT1].

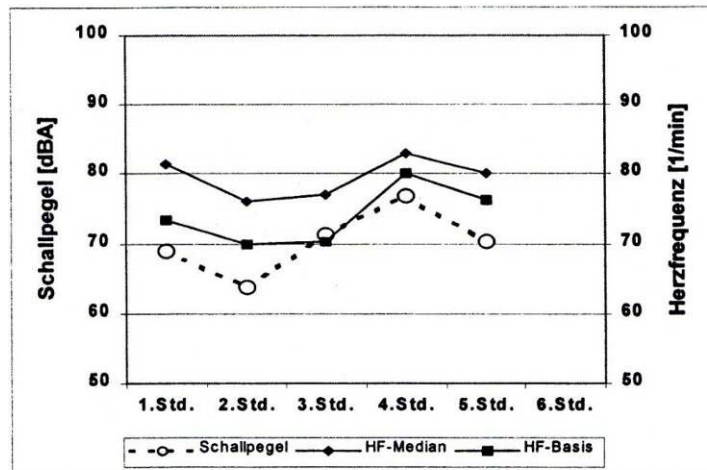


Abb. 45: Schallpegel und Herzfrequenz in den ersten 4 Stunden. Ust.-Mittelwerte von 9 Lehrkräften einer Grundschule. [BERNDT1, S. 307]

Ein vergleichbares Laborexperiment hat auch Schönwälder<sup>147</sup> durchgeführt, indem 15 Lehrern und 14 Lehrerinnen eine Folge von drei unterschiedlichen Störgeräuschen von 30 Sekunden mit jeweils einer Entspannungssituation (Vogelstimmen) von 15 Sekunden vorgespielt wurden. Dabei zeigte sich bei den Testgeräuschen ein Anstieg der Herzfrequenz und in den Entspannungsphasen ein Absinken der Herzfrequenz. Die Einschätzung der Geräusche im Fragebogen entsprach den realen Intensitäten.

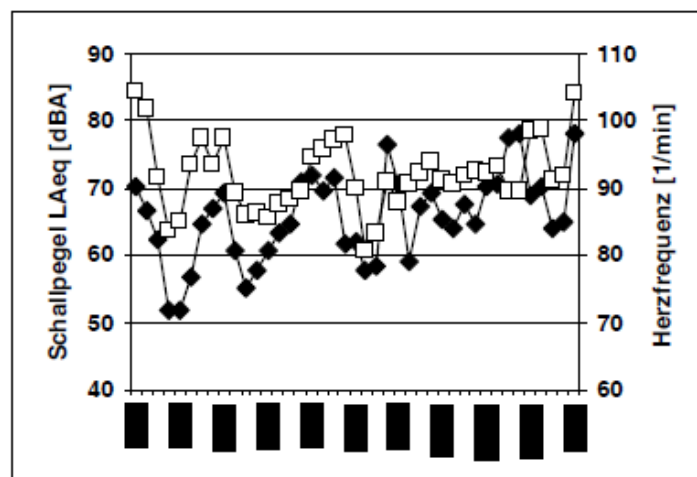
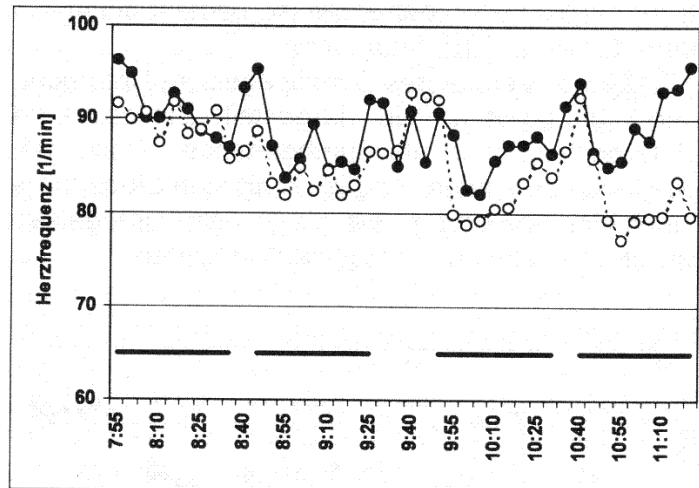


Abb. 46: Schallpegelverlauf (schwarz) und Beanspruchungsreaktion (Herzfrequenz mittlere Beanspruchung, weiß) einer Lehrerin über 2 Doppelstunden (Montag). ( $r=0.55$ ) [TIESLER6]

<sup>147</sup> Vgl. [SCHOENWAELDER1, S. 105].

Wie Abb. 47 zeigt, behielten die Kurven der mittleren Beanspruchung vor und nach der Sanierung einen verblüffend synchronen Verlauf, blieben jedoch in der Frequenz reduziert, ähnlich wie der Arbeitsgeräuschpegel.



**Abb. 47:** Mittlere Beanspruchung einer Lehrerin für 1. zur 4. Ust. (Dienstag) vor (schwarz,  $RT > 0.5s$ ) und nach (weiß,  $RT < 0.5s$ ) der raumakustischen Sanierung. [OBERDOERSTER1, S. 148]

Unter vergleichbaren Arbeitssituationen wurde nun die Herzfrequenz von 5 Lehrer/innen in Räumen mit  $RT > 0,5s$  in 486 Zeitabschnitten (35 min) und 8 Lehrer/innen in Räumen mit  $RT < 0,5s$  in 914 Zeitabschnitten (35 min) untersucht (siehe Tabelle 15). Man erkennt, dass sowohl die Beanspruchung als auch die Basisaktivierung auf bis zu drei Schläge pro Minute abnimmt.

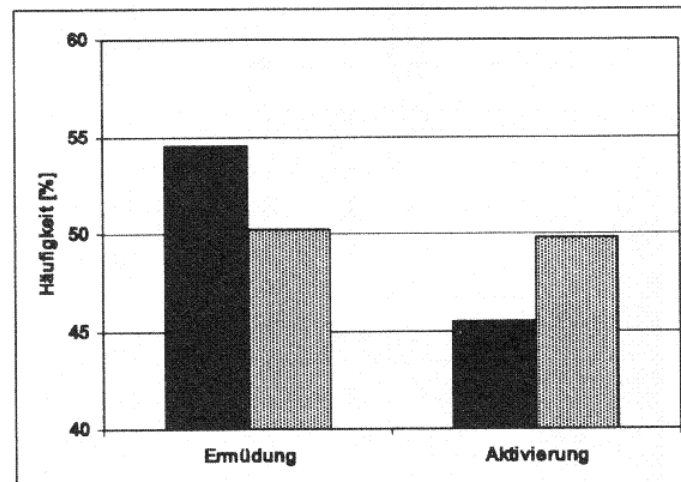
**Tabelle 15:** Mittlere Beanspruchung (HF-Mittelwerte) und Basisaktivierung (HF-durchschnittlicher Minimalwert) über alle Lehrer/innen der Baumberge-Schule und der Schule „Stichnathstrasse“. Die Werte in 1/min sind den Grafiken in [Ebd., S. 116, S. 118] ausgelesen.

Mittelwerte über alle Personen				
Nachhallzeit	Beanspruchung (HF-Mittelwerte)		Basisaktivierung (HF-durchschnittl. Min.)	
Schule	Stichnathstrasse	Baumbergeschule	Stichnathstrasse	Baumbergeschule
$RT > 0.5 s$	87.5	89.25	77.5	82.75
$RT < 0.5 s$	84	87.75	74	81.5

Bei Betrachten der Beanspruchung und der Basisaktivierung über den Tagesverlauf stellte Oberdörster<sup>148</sup> fest, dass beide Größen eine kontinuierliche Abnahme von bis zu 5 Schlägen pro Minute zwischen der 1. Ust. und 4. Ust. zeigen, die man als Ermüdungserscheinung erklären kann. Zwar war die Abnahme der Herzfrequenz nach der Sanierung kleiner, doch blieb der Verlauf der Abnahme ident mit dem Verlauf vor der Sanierung. Der Arbeitsaufwand

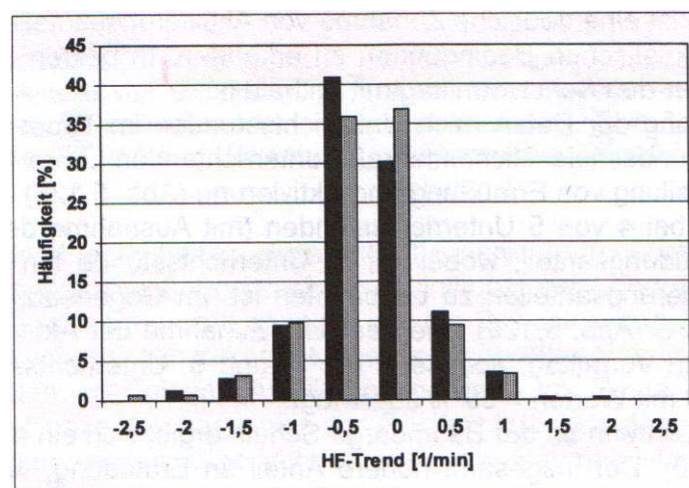
<sup>148</sup>Vgl. (OBERDOERSTER 1).

(Arbeitspuls) ist in beiden Fällen in etwa gleich.<sup>149</sup> Oberdörster betrachtet die Herzfrequenz (mittlere Beanspruchung) in 5 min Zeitabschnitten und bezeichnet den positiven Trend der Herzfrequenz als Aktivierung und den negativen Trend als Ermüdung. Nach der Sanierung zeigt sich, dass der Anteil an Ermüdung (in 5 min-Zeitabschnitten) ausgeglichener ist gegenüber dem Anteil an Aktivierung. Ermüdungsanteile überwiegen weniger als vor der raumakustischen Sanierung.



**Abb. 48:** Häufigkeitsverteilung von Aktivierungszeitabschnitten zu Ermüdungszeitabschnitten EG (schwarz, RT > 0.5s) und OG (grau, RT < 0.5s) (Grundschule Stichnathstasse, 13 Lehrer, 1400 Zeitabschnitte) [Ebd., S. 123]

Abbildung 49 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Trendwerte (Abnahme oder Zunahme) der Herzfrequenz über alle Lehrerinnen und Lehrer der Grundschule Stichnathstrasse. Für Klassenräume mit einer Nachhallzeit kleiner 0,5 s verschwindet das Maximum der Verteilung im Ermüdungsbereich.



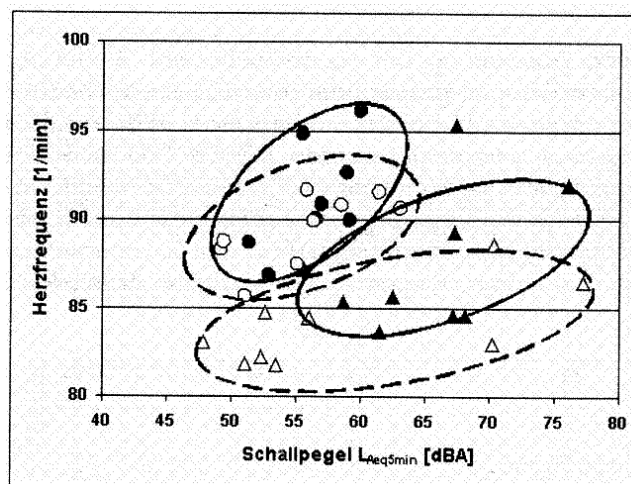
**Abb. 49:** Häufigkeitsverteilung der HF-Trend-Werte über alle Lehrerinnen und Lehrer, EG (schwarz, RT > 0.5s) und OG (grau, RT < 0.5s) (Grundschule Stichnathstasse, 13 Lehrer, 1400 Zeitabschnitte) [Ebd., S. 123]

<sup>149</sup> [OBERDOERSTER1, S.122]

Tiesler stellt für die Verbindung von Arbeitslärm zu Herzfrequenz folgendes fest:

*„Wird durch die akustische Sanierung der Arbeitsgeräuschpegel 5 bis 8 dB(A) gesenkt, so führt dies auch zu einer Senkung der Herzfrequenz um 5 bis 10 Schläge/min.“<sup>150</sup>*

Bezüglich der Korrelation der Herzfrequenz zur Raumakustik stellte Oberdörster<sup>151</sup> einen weiteren interessanten Sachverhalt fest: Nimmt man an, dass außer der Raumakustik alle anderen Einflussgrößen durch Auswahl ähnlicher Arbeitssituationen gleich bleiben, wie man aus den ähnlichen synchronen Verläufen des Arbeitsgeräuschpegels und der mittleren Beanspruchung auch beobachten kann, so ist die Empfindlichkeit der Dysregulation (Lärmwirkung) von der Raumakustik abhängig. Abb. 50 zeigt, dass die Steigung der Regressionsgeraden (Achsen der Ellipsen) der mittleren Beanspruchung nach der Sanierung abnimmt. Die Radien der Ellipsen geben die Streuung der Daten in den beiden Dimensionen an.



**Abb. 50:** Zusammenhang zwischen der mittleren Beanspruchung einer Lehrerin und dem Arbeitsgeräuschpegel am Di vor (schwarz, —, RT>0.5s) und nach (weiss, --, RT<0,5 s) der raumakustischen Sanierung für die 1. (Kreise) und 2. (Dreieck) Unterrichtsstunde.  
[Ebd., S. 156]

Die Lärmempfindlichkeit ist von der Raumakustik abhängig:

*„Während vor der Sanierung bei einem Pegelanstieg um 7dB ein Anstieg der HF um 6 Schläge/min zu beobachten wird, sind es nachher nur noch 3 Schläge/min. Hier ist eine Halbierung der Reaktion auf den gleichen Stressor zu beobachten, und dies bei Schallpegeln deutlich unter 65 dB.“<sup>152</sup>*

Durch die verbesserte Kommunikationsbedingung hat die Wirkung des Stressors Lärm abgenommen. Die verbesserte Kommunikationsbedingung kann möglicherweise als Einflussfaktor (Stressmodell Sust und Lazarus) oder Bewältigungsstrategie (nach Lazarus-Stressmodell) angesehen werden.

<sup>150</sup> [TIESLER1].

<sup>151</sup> Vgl. [OBERDOERSTER1, S. 156].

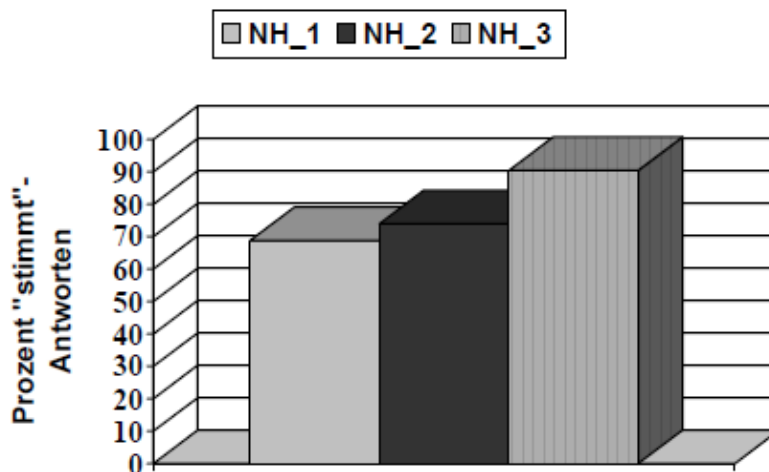
<sup>152</sup> [TIESLER5].



Die Reduzierung der Nachhallzeit senkt jedoch nicht nur die Lärmbelastung des Lehrers/der Lehrerin, sondern hat auch einen positiven Effekt auf die subjektive Beurteilung der Kinder hinsichtlich der Lärmbelastung während dem Unterricht.<sup>153</sup> Wie Abb. 51 und 52 zeigen, fühlen sich die Kinder aus Klassen mit niedrigen Nachhallzeiten weniger von Lärm belastet. Auch ein Fragebogen für Eltern (Abb. 53) über die Lärmbelastung der Kinder ergibt ähnliche Ergebnisse.

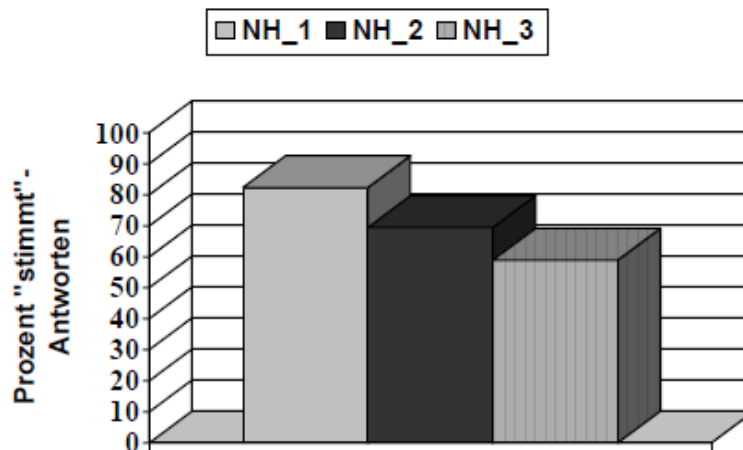
**Tabelle 16:** Nachhallzeitgruppen

Nachhallzeitgruppe	Name
$T20 < 0.65s$	NH1
$0.65s < T20 \leq 0.95s$	NH2
$T20 > 0.95s$	NH3

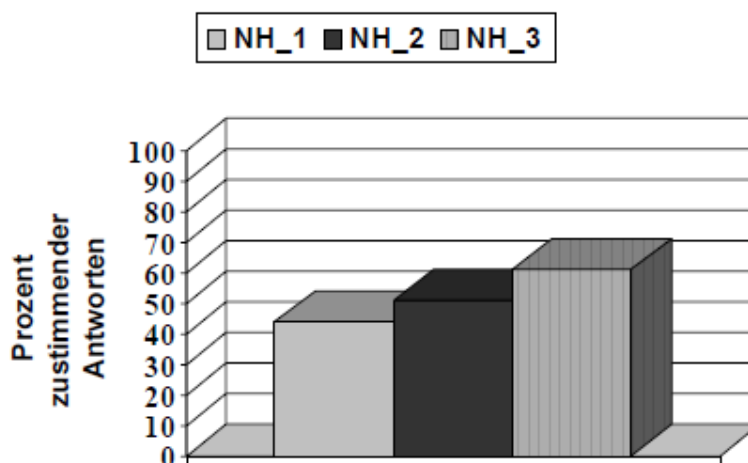


**Abb. 51:** %-satz von „stimm“-Antworten für die Frage „Meine Mitschüler sind oft sehr laut“ in Abhängigkeit von der Nachhallzeit. Nachhallzeitgruppen nach Tabelle 16. (N=388 Kinder) ( $p < 0.001$ ) [LEISTNER, S. 115]

<sup>153</sup> Vgl. [LEISTNER].



**Abb. 52:** %-satz von „stimmte“-Antworten für die Frage „In der Stillarbeit ist es wirklich still“ in Abhängigkeit von der Nachhallzeit. Nachhallzeitgruppen nach Tabelle 16. (N=389 Kinder) ( $p < 0.001$ ) [LEISTNER, S. 115], [SCHICK2, S. 25]

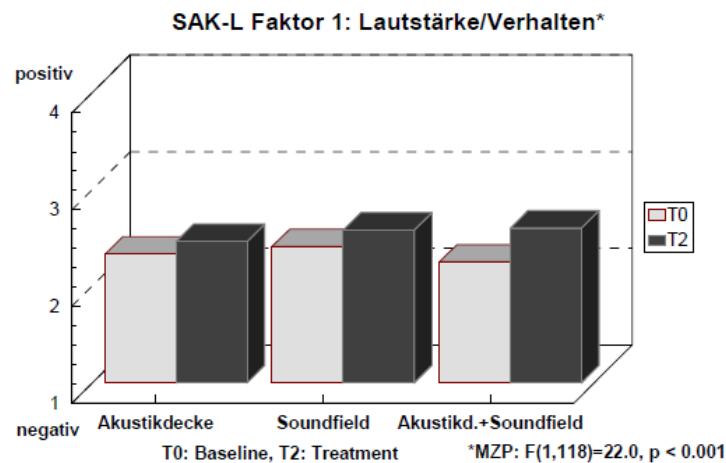


**Abb. 53:** %-satz von „stimmte“-Antworten für die Frage an die Eltern „Mein Kind leidet unter Lärm, den die anderen Kinder in der Schule machen“ in Abhängigkeit von der Nachhallzeit. Nachhallzeitgruppen nach Tab. 16. (N=352 Kinder) ( $p < 0.05$ ) [LEISTNER, S. 115]

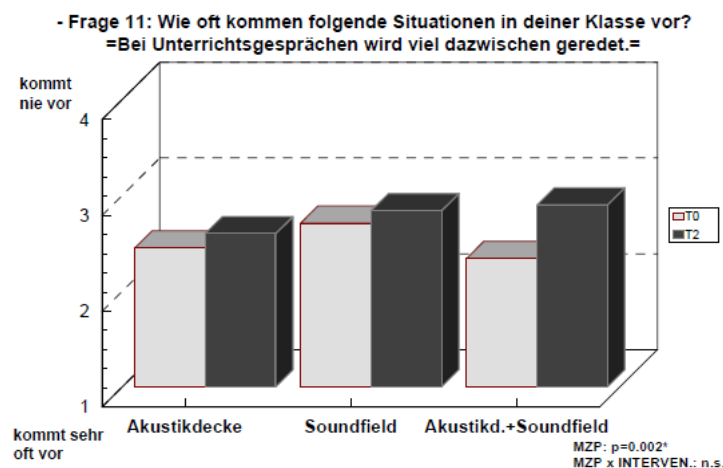
Die Nachhallzeit hat einen signifikanten Effekt auf die Beantwortung der Fragen über die Lärmbelastung im Klassenraum. Meis<sup>154</sup> zeigt in einer Schülerumfrage von 124 Kindern mit einem Durchschnittsalter von 9-10 Jahren, dass einerseits eine Sanierung des Klassenraums mit einer Akustikdecke oder eine Installation einer Lautsprecheranlage (Soundfield) eine subjektive Reduzierung der Lärmbelastung bei Schülern hervorbringt. Eine Kombination beider Maßnahmen bringt aber oftmals die größte subjektive Verbesserung (9%) für die Schüler (siehe Abb. 54). Dabei wurden die Fragebögen jeweils 1-2 Wochen vor der Intervention (T0) und etwa vier Monate nach der Intervention (T2) durchgeführt. Bei allen

<sup>154</sup> Vgl. [MEIS].

Fragen zur subjektiven Bewertung der Sanierungsmaßnahmen konnten positive Effekte nachgewiesen werden. Vor der Sanierung war die Nachhallzeit der Klassenräume deutlich über der Sollnachhallzeit der DIN 18041.

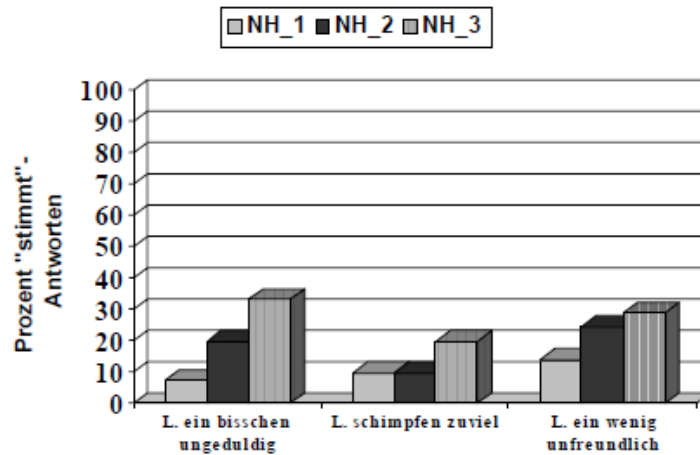


**Abb. 54:** Fragen über die Empfindung des Geräuschpegels. RT mit Akustikdecke war zwischen 0.3 und 0.68 s für Frequenzen zwischen 500 und 2000 Hz. (N=124 Kinder zwischen 9 und 10 Jahren) (T0 = ein bis zwei Wochen vor der Intervention, T2 = vier Monate nach der Intervention) [MEIS]

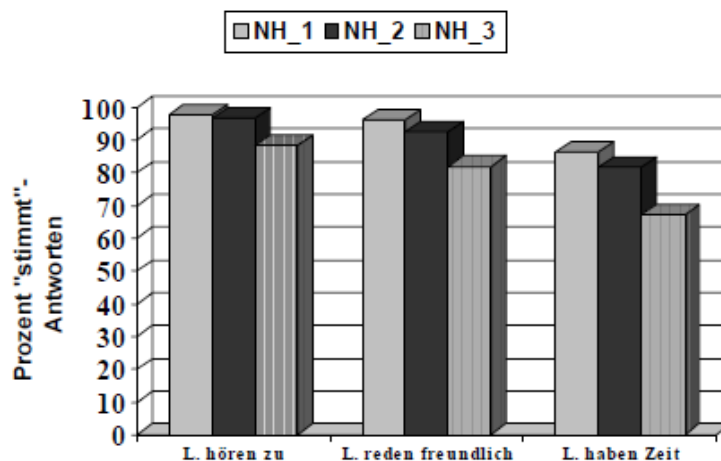


**Abb. 55:** Fragen über die Störung von Unterrichtsgesprächen. RT mit Akustikdecke war zwischen 0.3 und 0.68 s bei Frequenzen zwischen 500 und 2000 Hz. (N=124 Kinder zwischen 9 und 10 Jahren) (T0 = ein bis zwei Wochen vor der Intervention, T2 = vier Monate nach der Intervention) [Ebd.]

Weil Lärm wie in diesem Kapitel beschrieben, das soziale Klima beeinflussen kann, ist es notwendig, im Schülerfragebogen das Wohlempfinden und Lernklima in Abhängigkeit von den Hörbedingungen auszuwerten. Die Auswertungen von Leistner über das „kommunikative Klima“ im Klassenraum zeigen signifikante Aussagen, wie in Abb. 56 und 57 dargestellt:



**Abb. 56:** %-satz von „stimm“-Antworten bei den 3 formulierten Fragen: „Lehrer/innen ist ein bisschen ungeduldig, Lehrer/innen schimpfen zuviel, Lehrer/innen sind ein wenig unfreundlich“ Nachhallzeitgruppen siehe Tabelle 16. (N=389 Kinder) [LEISTNER]



**Abb. 57:** %-satz von „stimm“-Antworten bei den 3 formulierten Fragen: „Lehrer/innen hören zu, Lehrer/innen reden freundlich, Lehrer/innen haben Zeit“. Nachhallzeitgruppen siehe Tabelle 16. (N=389 Kinder) [Ebd.]

Leistner erklärt diese Ergebnisse der Umfragen so:

*„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.“<sup>155</sup>*

Für die Klassenraumakustik bedeutet dies, dass der Grund für eine schlechte Lehrer-Schüler-Beziehung nicht immer in der interpersonalen Beziehung zu suchen ist, sondern die schlechte Klassenraumakustik einen signifikanten Einfluss haben kann.

<sup>155</sup> [LEISTNER].

Das Kapitel 2.2.1. hat gezeigt, dass die Nachhallzeit direkten Einfluss auf den Geräuschpegel im Klassenraum und somit auf die Herzfrequenz und Lärmbelastung des Lehrers hat. Dabei zeigte sich, dass die Lärmempfindlichkeit (Steigung der Herzfrequenz in Abhängigkeit zum Lärmpegel) abhängig ist von der Raumakustik (RT). Niedrige Nachhallzeiten ( $<0,65$  s) haben positive Effekte auf die subjektive Beurteilung der Schüler hinsichtlich der Lärmbelastung während dem Unterricht sowie auch positive Effekte auf die Beurteilung der allgemeinen Lehrer-Schüler-Beziehung (siehe Abb.57). Im nächsten Kapitel wird analysiert, ob die Nachhallzeit und der Geräuschpegel Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von Schülern und Schülerinnen haben.

## 2.2.2. Lärmwirkung auf Schulkinder: Nachhallzeit, Leistungsfähigkeit und der „Irrelevant Sound Effect“,

Dieses Kapitel beschreibt den Einfluss von Lärm mittlerer Intensität (z. B. typisches Klassenraumgeräusch) und den Einfluss der Nachhallzeit auf kognitive Leistungen, insbesondere auf das Arbeitsgedächtnis. Folgende Grafik stellt den Zusammenhang der Effekte von Lärm und Nachhall auf die Leistungsfähigkeit dar:



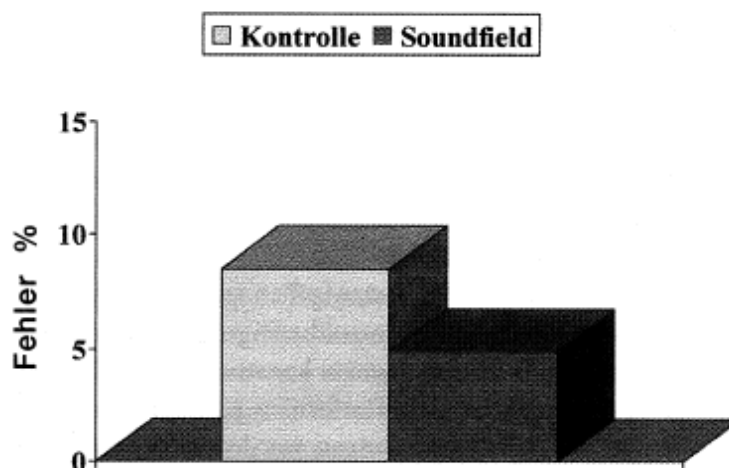
**Abb. 58:** Wirkungen von Lärm und Nachhall auf das Hörverstehen.

Vgl. [SCHICK2], [KLATTE9]

Als Erklärung schreibt Klatte:

*„Wenn die Kinder sehr viel kognitive Kapazität<sup>156</sup> benötigen, um die Sätze zu verstehen, bleiben für die Speicherung und Verarbeitung weniger Ressourcen verfügbar.“<sup>157</sup>*

Klatte<sup>158</sup> nimmt an, dass eine Verbesserung der Sprachverständlichkeit durch Lautsprecheranlagen (Soundfield-Systeme) Leistungsverbesserungen des Kurzzeitgedächtnisses der Schüler hervorbringen kann, auch wenn die Identifikation sprachlicher Informationen vorher schon gut gelingt. Durch den Einsatz des elektroakustischen Verstärkersystems wird eine Erhöhung der Sprachverständlichkeit durch den verbesserten Direktschallanteil und den gleichmäßigeren Schallpegel im Raum erreicht. Für die von Klatte durchgeführten Experimente wurden trockene Sprachaufnahmen eines ausgebildeten Sprechers im Schalllabor erstellt. Diese Sprachaufnahmen wurden anschließend in einem unbehandelten (ohne Lautsprecheranlage, „Kontrollbedingung“) und anschließend im gleichen behandelten (mit vier Lautsprechern in den Raumecken verteilt, „Soundfield-Bedingung“) Klassenraum eingespielt und an einer hinteren Sitzposition mit einem Kunstkopf nochmals aufgenommen. Die Aufnahmen wurden anschließend mit einem typischen Klassenraumgeräusch (8 Grundschülerinnen im Alter von 8-10 Jahren in einer typischen Gruppenarbeitssituation) gemischt, das vorher an gleicher Kunstkopfposition aufgenommen wurde. Die Sprachverständlichkeit wurde mit OIKi<sup>159</sup> überprüft, in dem die Kinder zwar Fehler machten, die Sprachverständlichkeit aber als recht gut bewertet werden kann. In absoluten Werten war nur ein geringer Effekt in den Lautdiskriminationsaufgaben zwischen beiden Bedingungen zu erkennen und dies außerdem nur bei jüngeren Kindern (siehe Abb.60).



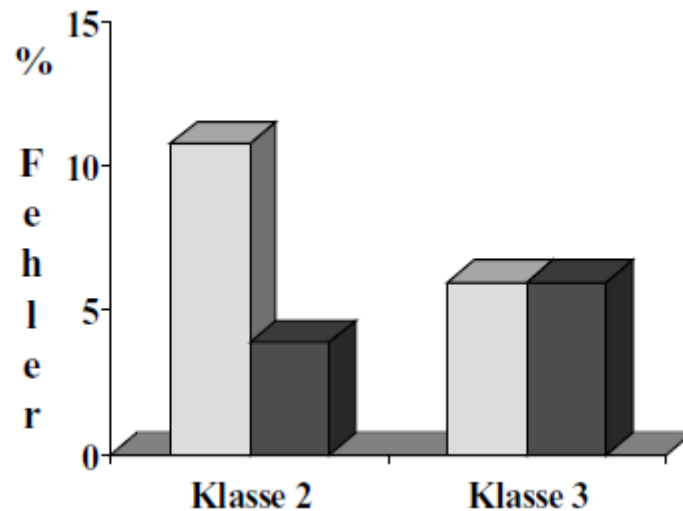
**Abb. 59:** Sprachverständlichkeitstest (angelehnt an OIKi) von 38 Kinder (Erst- und Zweitklässler, 7 bis 11 Jahren) bei einer Kunstkopfaufnahme eines Klassenraums mit Lautsprecheranlage (Soundfield, schwarz) und ohne (grau), bei gleicher normaler Sprechlautstärke unter typischem Klassenraumgeräusch. [KLATTE3, S. 82]

<sup>156</sup> des Arbeitsgedächtnisses.

<sup>157</sup> [KLATTE3].

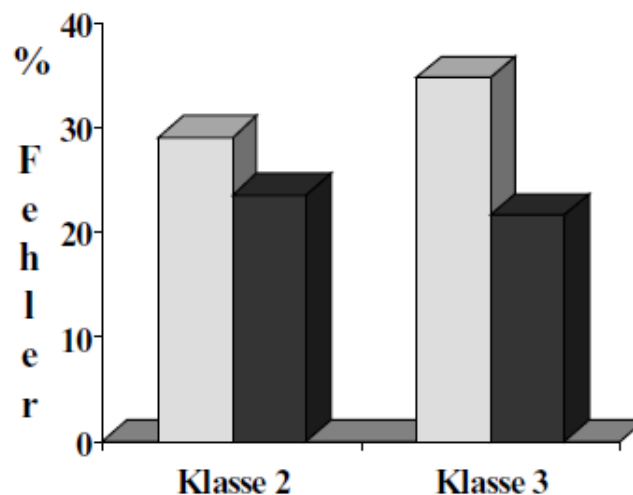
<sup>158</sup> Vgl. [KLATTE8].

<sup>159</sup> Oldenburger Kinder-Reimtest (siehe Kapitel 3).

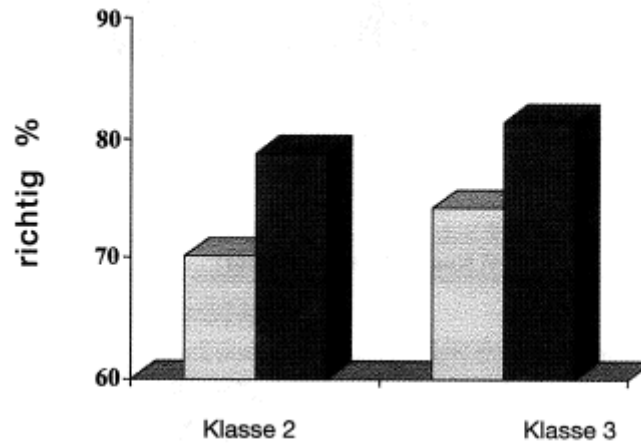


**Abb. 60:** Sprachverständlichkeitstest (angelehnt an OIKi) von 20 Zweitklässler und 18 Drittklässler bei einer Kunstkopfaufnahme eines Klassenraums mit Lautsprecheranlage (Soundfield) und ohne, bei gleicher normaler Sprechlautstärke unter typischem Klassenraumgeräusch. (Schwarz = Soundfield-Bedingung, grau= Kontrollbedingung) [KLATTE1], [KLATTE3, S. 83]

In beiden Bedingungen mussten die Kinder nun komplexere Aufgaben durchführen. Die Ergebnisse sind in Abb. 61 und 62 angegeben:



**Abb. 61:** Fehlerwerte für „serial-recall“-Aufgabe (Behaltensleistung) von 12 Ziffern von 38 Kinder (20 Zweitklässler, 18 Drittklässler) zwischen 7 und 11 Jahren unter typischem Klassenraumgeräusch. (Schwarz = Soundfield-Bedingung, grau= Kontrollbedingung) [KLATTE3, S. 83], [KLATTE1].



**Abb. 62:** Verstehen komplexer Anweisungen<sup>160</sup> von 38 Kindern (20 Zweitklässler, 18 Drittklässler) zwischen 7 und 11 Jahren unter typischem Klassenraumgeräusch. (Schwarz = Soundfield-Bedingung, grau=Kontrollbedingung) Prozentsätze: Klasse 2: 70.2% ; 78.8 % ; Klasse 3: 74.2% ; 81.4% [KLATTE3, S. 84], [KLATTE5b, S. 241], [KLATTE4, S. 5], [KLATTE1], [SCHICK2, S. 20]

Als zusammenfassende Erklärung schreibt Klatte:

*„Dies bestätigt die Annahme, dass eine Verbesserung der Sprachverständlichkeit positive Effekte haben kann, auch wenn die Identifikation von sprachlichen Informationen unter den gegebenen raumakustischen Bedingungen noch gut gelingt (die Drittklässler hatten ja bei der Lautdiskrimination keine Probleme).“<sup>161</sup>*

Der Effekt der Leistungsverbesserung scheint außerdem mit der Komplexität der Aufgabe zu wachsen. Dabei gilt der Lautdiskriminationstest als die Aufgabe mit der geringsten Komplexität, gefolgt von der Aufgabe zur Behaltensleistung und dem Verstehen komplexer Anweisungen. Dies entspricht wieder den Aussagen von Ising und der VDI 2058 (siehe Seite 52) über Lärmwirkungen.

Leistungsbeeinträchtigungen durch Hintergrundschall mittlerer Intensität sind in der Akustik als „Irrelevant Sound Effekt“ bekannt. Typischer Klassenraumlärm mittlerer Intensität hat ähnliche Auswirkungen wie der „Irrelevant Speech Effekt“ bzw. „Irrelevant Sound Effekt“.<sup>162</sup> Klatte definiert den „Irrelevant Speech Effect“ als:

*„eine Leistungsbeeinträchtigung bei der unmittelbaren Wiedergabe von visuell dargebotenen Sequenzen unverbundener Items („serial recall“) durch sprachlichen Hintergrundschall, welcher in keinem Bezug zur Aufgabe steht und instruktionsgemäß zu ignorieren ist.“<sup>163</sup>*

Dieser Effekt hat laut Klatte für die Lärmbekämpfung praktische Implikationen:

<sup>160</sup> Angelehnt an „Knuspels Leseaufgaben“ von Marx (1998).

<sup>161</sup> [KLATTE3, S. 84]

<sup>162</sup> Vgl. [KLATTE3, S. 33].

<sup>163</sup> [KLATTE7].

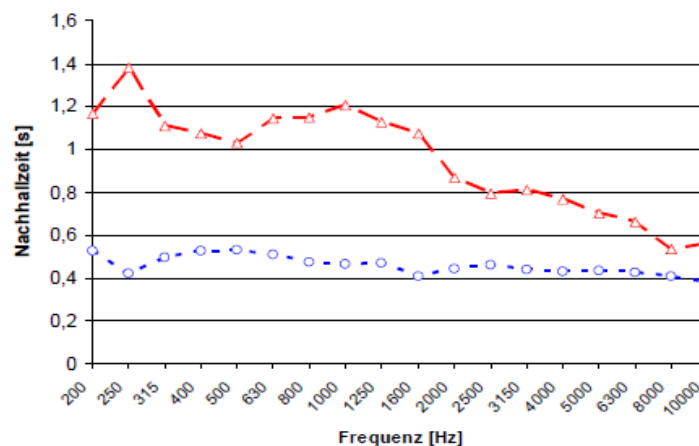


„Zum einen kann aus ihm gefolgert werden, dass vor allem Hintergrundsprachsall, aber – sofern bestimmte Voraussetzungen hinsichtlich der zeitlichen Schallstruktur erfüllt sind – auch Hintergrundmusik und gegebenenfalls sogar Schalle (Geräusche, Töne), bei bestimmten, serielles Behalten beinhaltenden mentalen Prozessen die Leistung in hochreliabler Weise beeinträchtigen.“<sup>164</sup>

In Untersuchungen von Klätte<sup>165</sup> stellte sich heraus, dass die Wirkungen der Hintergrundgeräusche für diesen Effekt in halligen Räumen verstärkt werden, wie Abb. 64 und 65 zeigen. Dabei mussten Erwachsene und Kinder die gehörten Wortfolgen (Interstimulus-Intervall von 1 s) bei Einspielen von Hintergrundgeräuschen (typisches Klassenraumgeräusch ohne Sprachanteile und dänische Sprecherin) in einem „virtuellen“ Klassenraum wiedergeben (siehe Abb. 63). Die Identifikationsleistung der einzelnen Wörter lag bei 98 %. Somit kann der Effekt der Leistungsverschlechterung nicht unmittelbar durch die Minderung der Sprachverständlichkeit erklärt werden. Der Signalpegel aus dem Lautsprecher vorne im Raum lag laut Klätte bei 66 dB(A) in einem Meter Entfernung.<sup>166</sup> Tabelle 17 zeigt die Schallpegel der zwei Hintergrundgeräusche sowie die Nachhallzeiten für beide Bedingungen im simulierten Klassenraum:

**Tabelle 17:** Hintergrundgeräusche als  $L_{Aeq}$ -Pegel an zentraler Sitzposition in 2 simulierten Klassenräumen mit unterschiedlichen Nachhallzeiten. Klassenraumgeräusch ohne Sprachanteile.

	[KLATTE6]	
	Dänische Sprecherin	Klassenraumgeräusch
Günstiger Raum $T_{30[250\text{Hz}-2\text{kHz}]}=0.47\text{s}$	55 dB(A)	54 dB(A)
Ungünstiger Raum: $T_{30[250\text{Hz}-2\text{kHz}]}=1.10\text{s}$	57 dB(A)	57 dB(A)

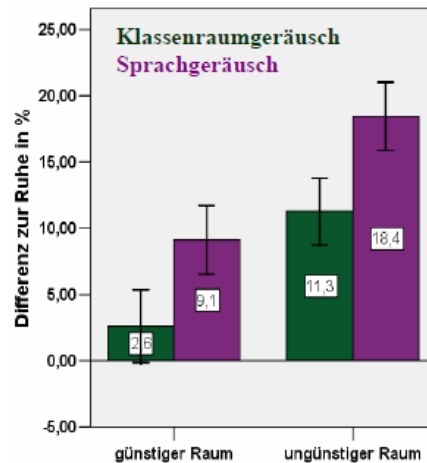


**Abb. 63:** Nachhallzeiten in den 2 virtuellen Klassenräumen im Kommunikations-Akustik-Simulator (KAS) des Oldenburger „Haus des Hörens“: DIN 18041 gerechter Raum (blau, Kreise), ungünstiger Raum (rot, Dreieck) [KLATTE9]

<sup>164</sup> [KLATTE7].

<sup>165</sup> Siehe [KLATTE6].

<sup>166</sup> [KLATTE9], [KLATTE6]



**Abb. 64:** Wirkungen von Hintergrundgeräuschen und Nachhallzeiten nach Tabelle 17 auf serielles Wiedergeben (Behalten) von Wortfolgen. Angaben in Prozent Leistungsbeeinträchtigung im Vergleich zur Ruhebedingung. (Drittklässler: N=47, bis 9 Jahren) (Erwachsene: N=94, 23 Jahre) Klassenraumgeräusch ohne Sprachanteile. [KLATTE6]

Auch Leistner<sup>167</sup> schreibt in seiner umfassenden Studie, dass ungünstige Nachhallzeiten das Behalten sprachlicher Information im Arbeitsgedächtnis beeinträchtigen. Dabei mussten die Grundschulkinder Pseudowörter (z. B. „relomano-relomano“, „gadibola-gabodila“) mit 4-6 Silben, die in einem behandelten Untersuchungsraum ( $T_{20}=0,51$  s) und in raumakustisch ungünstigen Klassenräumen akustisch dargeboten wurden, unterscheiden, ob sie gleich oder ungleich sind. Der Darbietungspegel lag bei 66 dB(A). Nur im Inter-Stimulus-Intervall, der drei Sekunden lang war, war ein Stimmengewirr (Störgeräusch, Kunstkopfaufnahme von 60 Studierende die sich am Beginn eines Seminars unterhielten) zu hören. So konnte die Identifikation der Pseudowörter auch unter ungünstigen Nachhallzeitbedingungen garantiert werden. Klassenräume mit Nachhallzeitdifferenzen von größer als 0,55 s im Vergleich zum akustisch günstigeren Untersuchungsraum ( $T_{20}=0,51$ ) brachten eine signifikante Leistungsverschlechterung beim Merken von Pseudowörtern wie Tabelle 18 zeigt:

**Tabelle 18:** Ergebnisse des Experiments „Pseudowörter-Merken“ von Drittklässler bei Nachhallzeitdifferenzen grösser als 0,55 Sekunden zwischen dem raumakustisch günstigen Untersuchungsraum ( $T_{20}=0,51$ ) und raumakustisch ungünstigere Klassenräume. Im Interstimulus-Intervall war ein Stimmengewirr von 3 Sekunden zu hören.

[LEISTNER] (N=98)

Nachhallzeitdifferenz	Anzahl der Kinder	Aufgabe	Leistung im Klassenraum Mittelwert	Leistung im Untersuchungsraum
NHD>0.55s	98	Pseudowörter-Merken (Anzahl richtige von 24)	18.66 ( $\sigma=3.47$ ) 77.75 %	19.36 ( $\sigma=3.3$ ) 80.67 %

<sup>167</sup> Vgl. [LEISTNER].

Laut Leistner war die Aufgabe „Pseudowörter-Merken“ so gestaltet, dass von einer fehlerfreien Enkodierung der Pseudowörter auch unter ungünstigen Nachhallzeitbedingungen ausgegangen werden konnte. Die Pseudowörter wurden langsam und deutlich artikuliert und ohne Störgeräusch präsentiert!<sup>168</sup> Das Störgeräusch wurde nur im Interstimulus-Intervall präsentiert!

Leistner erklärt dieses Phänomen der Leistungsverschlechterung durch Nachhall und Hintergrundgeräusch so:

*„Wir gehen davon aus, dass das zwischen Pseudowörtern präsentierte Stimmengewirr durch den Nachhall verstärkt wird und dadurch eher zu Aufmerksamkeitsablenkungen führte, die mit dem Prozess des Memorierens der Pseudowörter interferierten.“*<sup>169</sup>

Klatte<sup>170</sup> schreibt zu ihren Ergebnissen folgendes:

*„Die negativen Wirkungen der Hintergrundgeräusche wurden erheblich verstärkt, wenn die Aufgaben im halligen Raum durchgeführt wurden. Dies kann durch das Zusammenwirken von Interferenzen im Arbeitsgedächtnis und erhöhter Höranstrengung interpretiert werden.“*

Dieser Effekt hat praktische Implikationen für die Klassenraumakustik. Diesbezüglich schreibt auch Klatte<sup>171</sup>:

*„Die Überprüfung der Sprachverständlichkeit reicht nicht aus, um Beeinträchtigungen beim Verarbeiten gehörter Sprache durch ungünstige akustische Bedingungen auszuschließen.“*

Die Studie<sup>172</sup> zeigt ebenfalls, dass Kinder signifikant mehr Fehler beim Verständnis zum Ausführen akustisch dargebotener komplexer mehrteiliger Anweisungen<sup>173</sup> machen als Erwachsene, wenn im Hintergrund gesprochen wird. Hier zeigte sich, dass das Klassenraumgeräusch (ohne Sprachanteile) die Leistung signifikant beeinträchtigt, wenn auch weniger im Vergleich zum Hintergrundgeräusch einer dänischen Sprecherin mit gleichem Pegel von 55 dB(A) (siehe Abb. 65).

*„Die Kinder greifen womöglich auf ISE<sup>174</sup> sensitive Speicherprozesse“* und Erwachsene können offenbar Störgeräuschwirkungen besser durch ihr entwickeltes Arbeitsgedächtnis kompensieren (siehe Abb. 65).

---

<sup>168</sup> In der Studie von Leistner ist es wichtig zu erkennen dass die vorherige Aufgabe des Lautdiskriminationstests unter ständigem Störgeräusch unabhängig von der Aufgabe „Pseudowörter-Merken“ ist!

<sup>169</sup> [LEISTNER, S. 105].

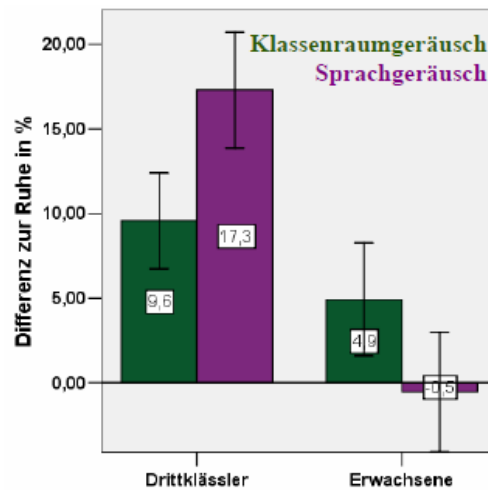
<sup>170</sup> [KLATTE6]

<sup>171</sup> [KLATTE6]

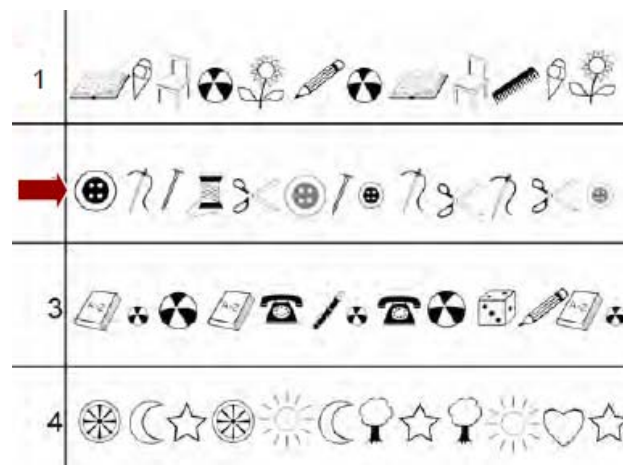
<sup>172</sup> Vgl. [KLATTE6]

<sup>173</sup> Beispiel: „Male einen Kreis unter ein Buch und streiche alle großen Bälle durch“. Solche Anweisungen basieren meistens auf dem im Handel erhältlichen Lesetest für Grundschul Kinder „Knuspels Leseaufgaben“ von Marx H. (1998) Göttingen. (siehe auch Abbildung 66)

<sup>174</sup> Irrelevant Sound Effekt bzw. Irrelevant Speech Effekt

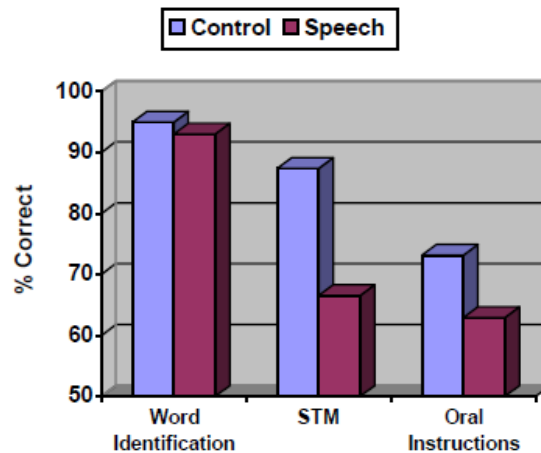


**Abb. 65:** Wirkungen von Hintergrundgeräuschen auf das Ausführen mündlicher komplexer Anweisungen. Angaben in Prozent Leistungsbeeinträchtigung im Vergleich zur Ruhebedingung (Drittklässler: N=47, bis 9 Jahren) (Erwachsene: N=94, 23 Jahre) Klassenraumgeräusch ohne Sprachanteile. [KLATTE6]; Vgl. auch [HELLBRUECK2]



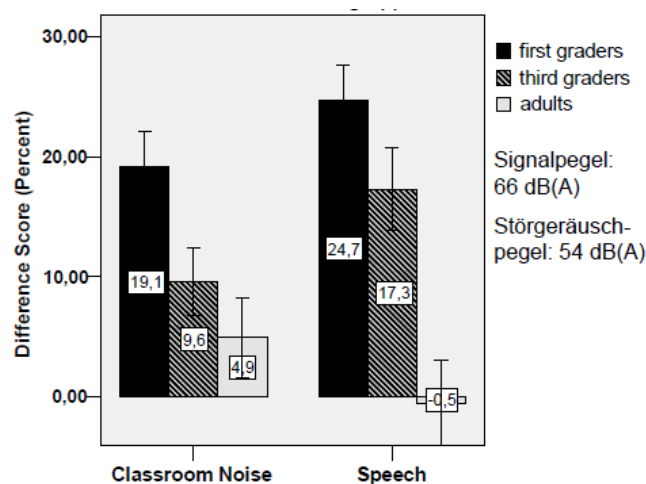
**Abb. 66:** Beispiel für mündliche komplexe Anweisungen laut [KLATTE9]: „Male ein Kreuz unter die Nadel zwischen den Scheren, und streiche alle kleinen Knöpfe durch.“ „Du siehst große und kleine Bälle. Wähle aus letzteren 2 aus, kreuze sie ein und unterstreiche dann nur diejenigen Bücher, die schwarz oder klein sind, mit jeweils einem Strich.“

Die Maskierung kann nicht als Erklärung für den „Irrelevant Sound Effekt“ dienen, da in allen Experimenten die Identifikation einzelner Wörter (Lautdiskrimination nach OIKi-Reimtest) mit ungefähr 98% immer recht hoch lag, wie Abb. 67 zeigt:



**Abb. 67:** Effekt des „Irrelevant Speech Effects“ auf die Identifikationsleistung einzelner Wörter, auf die Leistung des Kurzzeitgedächtnisses (STM)<sup>175</sup> von Pseudowörter im Paarvergleich<sup>176</sup> und die Anweisung komplexer mündlicher Anweisungen. (Hintergrundgeräusch: Dänische Sprecherin, Signalstärke: 62 dB(A), + 5 dB(A) SNR. Alle Werte sind Durchschnittswerte. (N=23 Erstklässler, 6-7 Jahre) [KLATTE5a]

Klatte<sup>177</sup> fasst in einer Studie die Ergebnisse von Erstklässlern, Drittklässlern und Erwachsenen zusammen. Hier wird die Altersabhängigkeit der Wirkungen von Störgeräuschen auf das Sprachverstehen besonders deutlich (siehe Abb.68). Zur Anzahl der Erstklässler gab es keine Angaben in der Studie.



**Abb. 68:** Leistungsver schlechterung bei Anweisung komplexer mündlicher Anweisungen relativ zur Ruhebedingung in Abhängigkeit vom Störgeräusch und vom Alter der Testpersonen. Klassenraumgeräusch ohne Sprachanteile. [KLATTE9]

<sup>175</sup> Short Time Memory.

<sup>176</sup> Wörter ohne Bedeutung wie „giboda-guboda.“

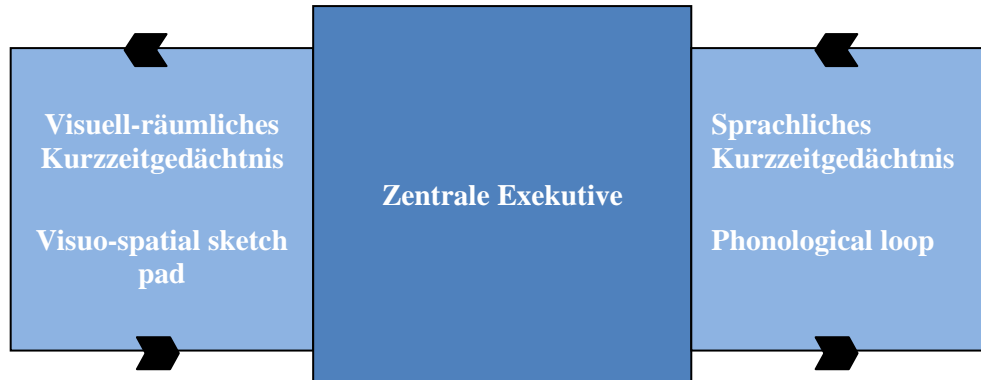
<sup>177</sup> [KLATTE9].

Klatte<sup>178</sup> zählt für die Altersabhängigkeit der Wirkungen von Störgeräuschen und Nachhallzeit folgende Gründe auf:

- Phonologische Entwicklung: Erwerb von robusten Sprachwahrnehmungskategorien
- Fähigkeit zum kontinuierlichen Ergänzen fehlender Information
- Entwicklung der Aufmerksamkeit: Inhibitorische Kontrolle, Ignorieren irrelevanter Hörreize.

In den Untersuchungen stellte sich die erhöhte Höranstrengung in halligen Klassenräumen und der Irrelevant Sound Effekt in Kombination als eine Erklärungsmöglichkeit für die Leistungsbeeinträchtigungen unter Störgeräuscheinwirkung heraus. Es wurde jedoch noch nicht erklärt, warum Sprache als Hintergrundgeräusch z. B. im Vergleich zu einem Klassenraumgeräusch ohne Sprachanteile eine höhere Leistungsbeeinträchtigung hervorruft. Erklärungen zu diesem Phänomen liefern Studien über den „Irrelevant Sound Effekt“. Dabei diente die Gedächtnispsychologie zur Erklärung dieses Phänomens.

Die aktuelle Gedächtnispsychologie nimmt an, dass das Gedächtnis modular aufgebaut ist und unterscheidet traditionell zwischen dem Langzeitspeicher und dem Kurzzeitspeicher. Das Arbeitsgedächtnis ist die Weiterentwicklung des Kurzzeitgedächtnisses und ist das System für aktuell ablaufende Informationsverarbeitungsprozesse.<sup>179</sup>



**Abb. 69:** Drei-Komponenten-Modell des Arbeitsgedächtnisses nach Baddeley & Hitch [BADDELEY, S. 49], [KLATTE8, S. 28]

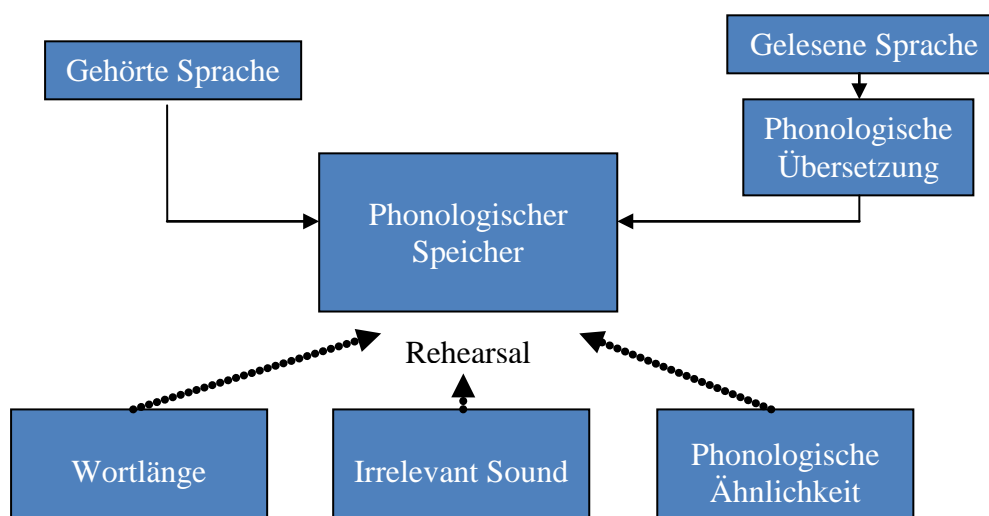
Das Modell des Arbeitsgedächtnisses, wie in Abb. 69 gezeigt wird, wurde von Alan Baddeley und Graham Hitch<sup>180</sup> entwickelt. Das Modell setzt sich aus drei Systemen zusammen, einer zentralen Exekutive, die die Funktionen im System überwacht und koordiniert und einfache

<sup>178</sup> [KLATTE9].

<sup>179</sup> Vgl. [KLATTE8].

<sup>180</sup> Vgl. [BADDELEY], siehe auch [KLATTE8, S. 28], [LEXIKON, S. 101].

Speicherfunktionen (Aufbewahrungsfunktionen) an die zwei Hilfssysteme („Slave-Systems“)<sup>181</sup> delegiert, die dann diese einfache Speicherfunktionen ausführen. So spart die Zentrale Exekutive Ressourcen für komplexere Verarbeitungsprozesse.<sup>182</sup> Sie dient als modalitätsunabhängiges Interface zwischen den Teilsystemen des Arbeitsgedächtnisses und dem Langzeitgedächtnis.<sup>183</sup> Das visuell-räumliche Kurzzeitgedächtnis dient der kurzzeitigen Speicherung visuell-räumlichen Materials. Die phonologische Schleife<sup>184</sup> ist für das kurzzeitige Behalten von sprachlicher (verbaler) Information wie Ziffern, Buchstaben oder Wörtern in „phonologischer Form“ und in der richtigen Reihenfolge verantwortlich. Baddeley nimmt an, dass z. B. visuell präsentierte Buchstabensequenzen in einen „akustischen, lautklanglichen Code“ (phonologischen Code) umgewandelt werden, um diesen dann im phonologischen Speicher abzulegen. Abb. 70 zeigt das Modell der phonologischen Schleife nach Baddeley mit den drei verschiedenen Effekten, die auf diese einwirken können:



**Abb. 70:** Modell der phonologischen Schleife nach Baddeley

[KLATTE8, S. 30]

Die Annahme, dass alle Buchstabensequenzen in einen phonologischen Code umgewandelt werden müssen, erklärt warum ähnlich klingende Items oder Sequenzen wie „D B C T P G“ schwieriger zu behalten sind als „K W Y L R Q“. Man spricht vom „Phonological similarity effect“ oder „phonologischer Ähnlichkeitseffekt“<sup>185</sup>, der bei akustischer und visueller Darbietung in gleicher Weise gilt. Da der phonologische Speicher nur kurzzeitig

<sup>181</sup> Siehe [BADDELEY, S. 49], [KLATTE2, S. 93].

<sup>182</sup> „More demanding information-processing tasks“ [BADDELEY, S. 49].

<sup>183</sup> Vgl. [LEXIKON, S. 101].

<sup>184</sup> Auch „articulatory loop“ (artikulatorische Schleife) genannt, da sie sich aus den Komponenten phonologischer Speicher und dem Prozess des subvokalen Artikulierens (Rehearsal) zusammensetzt [KLATTE2, S. 93], [BADDELEY, S. 49].

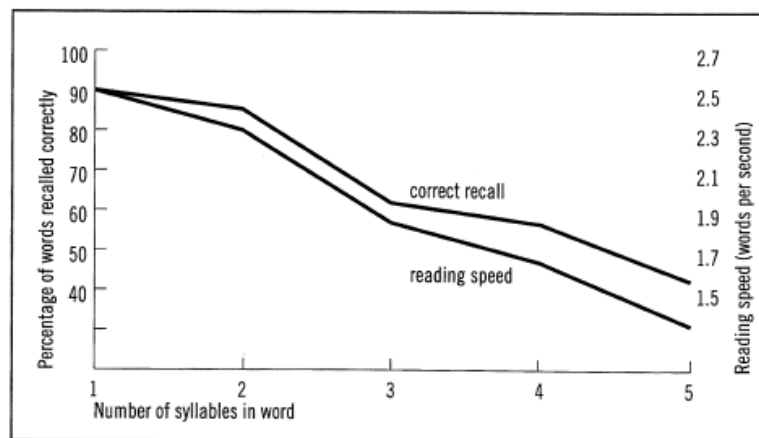
<sup>185</sup> [BADDELEY, S. 50].

Informationen (1 bis 2 s) behalten kann, bedarf es eines Auffrischungsprozesses: der „Rehearsal-Prozess“. Dieser ist eine kontinuierliche innerliche Wiederholung („subvocal speech“, „subvokales Artikulieren“), wie sie im Alltag für Telefonnummern bekannt ist. Neben dem Prozess der Aufrechterhaltung des Speichers kommt dem subvokalen Artikulieren die Bedeutung der Graphem-Phonem-Übersetzung zu, die für die Übersetzung visuell dargebotener Items in einen phonologischen Code verantwortlich ist, da diese sonst nicht im Speicher abgelegt werden können.<sup>186</sup>

Außer dem „phonologischen Ähnlichkeitseffekt“ sind noch zwei weitere Effekte bekannt, die sich auf die phonologische Schleife auswirken: der Wortlängeneffekt und der „Irrelevant Sound Effect“. Klatt definiert den Wortlängeneffekt folgendermaßen:

*„Der Wortlängeneffekt bezeichnet den empirischen Zustand zwischen der Gedächtnisspanne für Wörter und der Zeitdauer, die gebraucht wird, um die Wörter auszusprechen.“<sup>187</sup>*

Man nimmt an, dass die Daten im phonologischen Speicher bei langen Wörtern verblassen, bevor sie aufgefrischt werden können.<sup>188</sup> Je mehr Silben ein Wort enthält, desto langsamer kann dieses ausgesprochen werden und desto weniger Wörter werden korrekt in der „serial recall“-Aufgabe wiedergegeben (behalten).



**Abb. 71:** Wortlängeneffekt. Prozent an richtig behaltenen Wörtern in Abhängigkeit zur Anzahl der Silben. Rechts ist ebenfalls die Sprechgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Silben angegeben. [BADDELEY]

Die Annahme, dass akustisch dargebotenes Material bzw. gehörte Sprache direkt und ohne phonologische Übersetzung in den phonologischen Speicher gelangt, erklärt die Leistungsbeeinträchtigungen, die bei Kinder und Erwachsene zu beobachten sind.<sup>189</sup> Hierzu schreibt Klatt folgendes:

<sup>186</sup> Vgl. [KLATTE2, S. 93].

<sup>187</sup> [Ebd.].

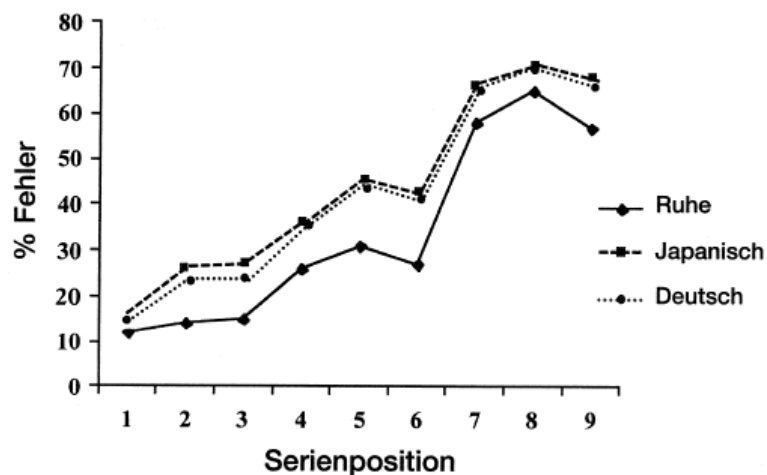
<sup>188</sup> [KLATTE8, S. 30].

<sup>189</sup> Vgl. [KLATTE8].



„Hintergrundsprache (und möglicherweise auch andere, in ihrer zeitlich-spektralen Struktur sprachähnliche Schalle wie instrumentale Musik) [gelangen] automatisch in den phonologischen Speicher, während gleichzeitig über den visuellen Weg die zu behaltenden Lerneinheiten eingelesen werden. Es kommt dabei zu einer Überlastung des phonologischen Speichers und die Leistung nimmt ab“<sup>190</sup>

Der ISE kann nicht unmittelbar mit einer Aufmerksamkeitsdistraction von der Aufgabe erklärt werden, sonst müsste eine verständliche Muttersprache als Störschall viel stärker wirken als eine Fremdsprache, was in Abb. 72 jedoch nicht der Fall ist. Hier zeigt sich in beiden Fällen für einen deutschen Hintergrundsprecher und einen japanischen Hintergrundsprecher die gleiche Fehlerrate von durchschnittlich 10 %. Außerdem bleibt bei Versuchen von Hellbrück<sup>191</sup> über mehrere Sitzungen der Störeffekt in voller Stärke bestehen, an den sich die Versuchspersonen also nicht gewöhnen.



**Abb. 72:** Wirkungen von vertrauter und unverständlicher Hintergrundsprache auf die visuelle „serial recall“-Aufgabe mit einer Folge von 9 Ziffern. ( $L_{AFeq}=60\text{dB}$ , Ruhe: $L_{Aeq}=35\text{dB}$ ) (N=48 Student/innen) [KLATTE7] auch zit. in [KLATTE8]

Die Sprachspezifitäts-Hypothese<sup>192</sup> innerhalb des Modells von Baddeley erklärt jedoch nicht, dass der ISE auch bei Sinustonfolgen<sup>193</sup> und bei rhythmischer instrumentaler „Staccato“-Musik<sup>194</sup> beobachtet wird. So hat in Abb. 73 die Viersinustonfolge einen statistisch signifikanten Effekt (5%), die einfache Sinustonfolge allerdings nicht. Klatte<sup>195</sup> fand in einem ähnlichen Experiment mit 4 und 6 Sinustonfolgen keine signifikante Verschlechterung der seriellen Behaltensleistung. Dass die Fehlerrate beim Stimmengewirr (100 Studenten im

<sup>190</sup> [Ebd.], vgl. auch [KLATTE2, S. 96].

<sup>191</sup> [HELLBRUECK1].

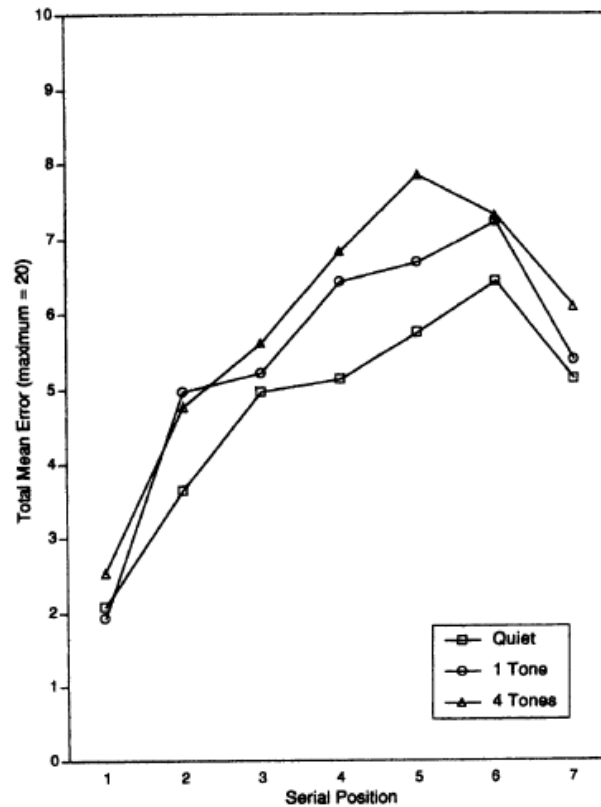
<sup>192</sup> Sprachspezifitäts-Hypothese ist die Hypothese dass nur sprachhaltiger Schall den ISE hervorrufen kann.

<sup>193</sup> Siehe [JONES].

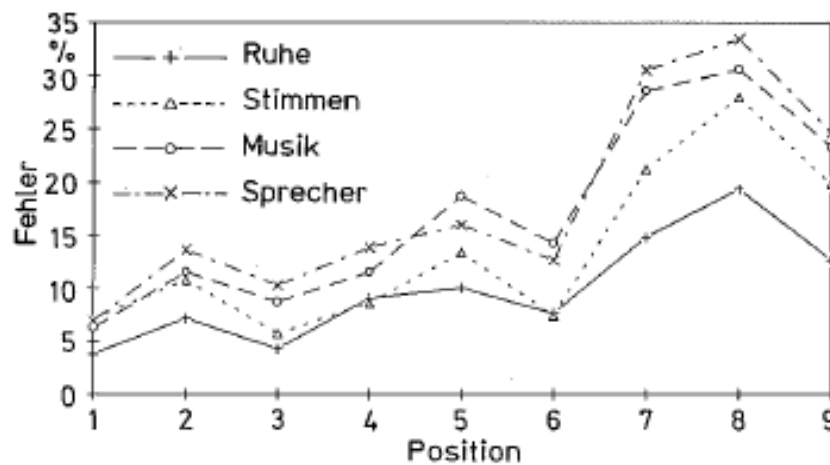
<sup>194</sup> Siehe [KLATTE7], [HELLBRUECK2], [KLATTE2].

<sup>195</sup> Vgl. [KLATTE7].

Vorlesungssaal einer japanischen Universität) in Abb. 74 kleiner war als bei der Staccato-Flötenmusik spricht ebenfalls gegen die Sprachspezifitäts-Hypothese von Baddeley.

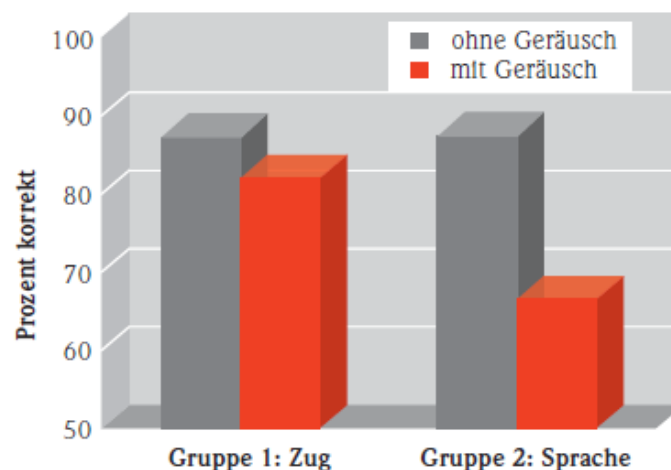


**Abb. 73:** Visuelle Serial-recall Aufgabe von 7 Konsonanten bei Hintergrundstörtschall mit 1 oder 4 Sinustonfolgen (245 Hz, 490 Hz, 980 Hz, 1980 Hz) mit 700 ms Spielzeit pro Ton und 65 dB(A) Pegel. Die Aufgabe wurden 20 mal wiederholt. (N=24), ( $p < 0.05$ )  
[JONES, S. 371]



**Abb. 74:** Wirkungen von unterschiedlichen Hintergrundgeräuschen gleichem Pegels (ca 70 dBA) auf die visuelle „serial recall“-Aufgabe von 30 Sequenzen à 9 Ziffern. (N=14), ( $p < 0.01$ ;  $p < 0.05$ )  
[KLATTE2, S. 95]

Jones und seine Mitarbeiter entwarfen zur Erklärung dieser Phänomene eine neue Hypothese namens „Changing-State“-Hypothese, die sich auf ein neues theoretisches Modell des Arbeitsgedächtnisses namens „Object-Oriented Episodic Record“ beruft, auf das hier jedoch nur überblicksmäßig eingegangen werden kann. In Anlehnung an andere Theorien wird das Kurzzeitgedächtnis mit einer Schreiftafel verglichen (Blackboard-Modell), auf die Wahrnehmungsereignisse als Objekte eingetragen werden, die sich zwischen den Modalitäten nicht in ihrer „Qualität“ unterscheiden. Die Objekte werden nun zu größeren Organisationseinheiten (Strömen, „Streams“) verbunden, welche bei auditorischen Objekten z. B. auf „gestalt-psychologischen“<sup>196</sup> Prinzipien basieren, bei visuellen Objekten durch subvokales Artikulieren. Es werden - metaphorisch gesprochen - „Fäden“ durch die Objekte (Items) gezogen. Sind die Objekteintragungen selbst stabil, so sind die Verknüpfungen extrem störanfällig. Ein Konflikt wird durch eine Interferenz zwischen den durch subvokale Artikulation (Rehearsal-Prozess) gebildeten Verknüpfungen und den Verknüpfungen akustischer Objekte erklärt.<sup>197</sup> Genauer gesagt: ein Schall interferiert mit dem seriellen Behalten, wenn er Zustandsänderungen im zeitlichen Verlauf (Töne, Silben) aufweist und diese als Folge von separaten akustischen Einheiten wahrgenommen werden.<sup>198</sup> Rauschen (z.B. rosa Rauschen)<sup>199</sup> und Verkehrsgeräusche<sup>200</sup> haben somit im Klassenzimmer keine Wirkung, wie in Experimenten gezeigt wurde (siehe Abb. 75 und 76).



**Abb. 75:** Leistungen von Erstklässlern beim Behalten von Pseudowörtern mit und ohne Hintergrundgeräusch. Ein Zuggeräusch gleichen Pegels beeinflusst die Leistung der Kinder nicht signifikant! [SCHICK2, S. 23]

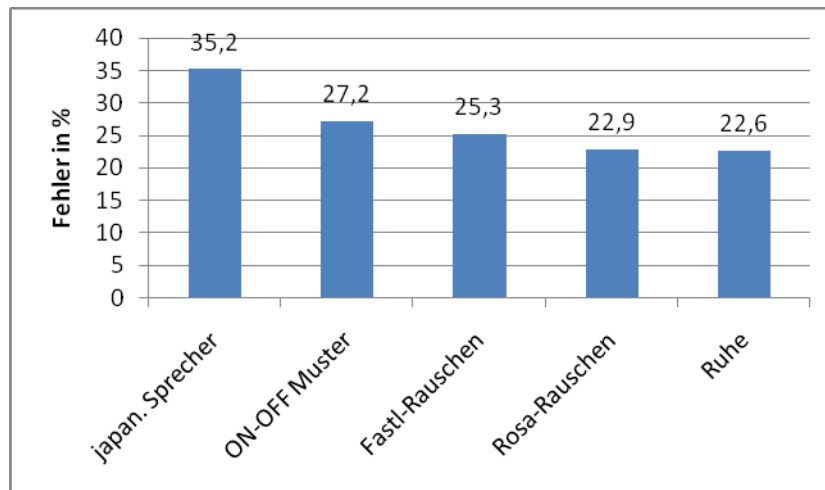
<sup>196</sup> Prinzipien der Gestaltpsychologie.

<sup>197</sup> Vgl. [KLATTE2, S. 96].

<sup>198</sup> vgl.: [KLATTE7, S. 519].

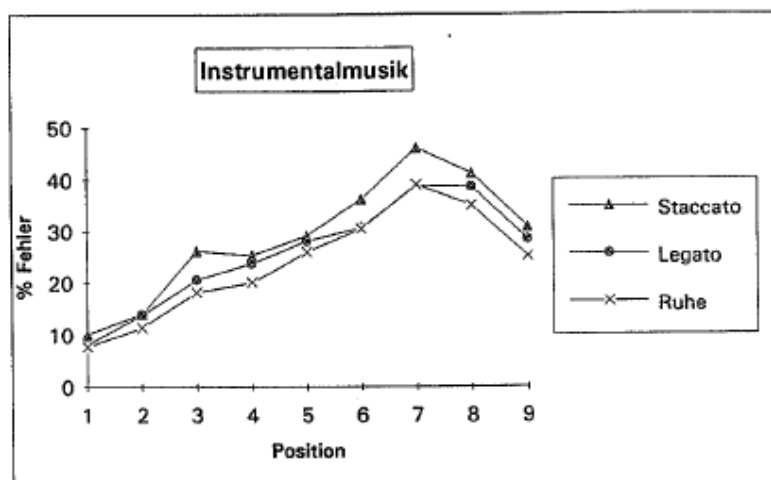
<sup>199</sup> [Ebd.].

<sup>200</sup> Siehe [HELLBRUECK].



**Abb. 76:** Mittlere Fehlerrate für verschiedene Hintergrundgeräusche. Vgl.: [KLATTE7, S. 531]

Legato-Musik und die Ruhebedingung zeigen kaum Unterschiede in der Fehlerrate bei der Serial-recall-Aufgabe, Staccato-Musik dagegen schon. Der Ruheschallpegel lag bei 32 dB, die Schallpegel aus den zwei Lautsprechern bei 62 dB. Ähnliche Ergebnisse wurden auch von Hellbrück und Schlittmeier an der Katholischen Universität Eichstätt gefunden,<sup>201</sup> mit 28% Fehlerrate bei Ruhebedingung, 29 % für Legato und 36 % für Staccato-Bedingung (siehe Abb. 77). Ein Unterschied zwischen Vokalmusik und Instrumentalmusik wurde in der Auswirkung nicht gefunden.<sup>202</sup>



**Abb. 77:** Mittlere Fehlerrate bei „serial recall“-Aufgabe von 24 Durchgängen à 9 Ziffern in Abhängigkeit von der Musikart. (N=48, im Alter zwischen 19 und 30 Jahren) [KLATTE7]

<sup>201</sup> Vgl. [KLATTE4, S. 7], [KLATTE5b, S. 245].

<sup>202</sup> Vgl. [KLATTE7, S. 538].

Hygge beschreibt Effekte von Lärm zwischen 55-66dB(A) auf das Langzeitgedächtnis von Schülern zwischen 12-14 Jahren<sup>203</sup>. Es stellte sich heraus, dass Sprachlärm und Schienenlärm keinen Effekt auf das Langzeitgedächtnis (1 Woche) hatten, Fluglärm mit Schienenlärm oder Verkehrslärm dagegen schon.

Dieses Kapitel sollte die Wirkung von Lärm mittlerer Intensität wie z. B. typisches Klassenraumgeräusch (Gruppenarbeit) und Nachhallzeit auf die Leistungsfähigkeit von Kindern beschreiben. Bei Darbietung von komplexen mündlichen Anweisungen und beim seriellen Wiedergeben (Behalten) von Wortfolgen stellte sich im raumakustisch ungünstigen Klassenraum eine deutlich größere Leistungsver schlechterung im Vergleich zum raumakustisch günstigeren Klassenraum ein. Dabei musste der Frage nachgegangen werden, warum Sprache als Hintergrundgeräusch eine größere Leistungsbeeinträchtigung hervorbringt. Die Antwort auf diese Frage konnten Erkenntnisse der Gedächtnispsychologie in den Studien über den „Irrelevant Sound Effekt“ beantworten. In Abb. 78 sind alle Größen die auf die Leistungsfähigkeit der Schüler und Schülerinnen Einfluss haben können zusammengefasst.



**Abb. 78:** Zusammenfassung der Einflussgrößen auf die Leistungsfähigkeit von Schülern laut Kapitel 2.2.2. Der „Irrelevant Sound Effekt“ ist laut Studien für Störgeräusche mittlerer Intensität relativ unabhängig vom Schallpegel.

Da auch das Hörverstehen als ein Grund für Leistungsbeeinträchtigungen gilt, wird im nächsten Kapitel der Zusammenhang zwischen der Nachhallzeit und der Sprachverständlichkeit erläutert. Außerdem wird die Norm für die Klassenraumakustik diskutiert und der Lombardeffekt dargestellt.

<sup>203</sup> Vgl. [HYGGE].

### 3. Klassenraumakustik: Aktueller Stand der Forschung

*„Es ist unmöglich, die Schönheiten der Naturgesetze angemessen zu vermitteln, wenn jemand die Mathematik nicht versteht. Ich bedaure, aber es ist wohl so.“*

Richard P. Feynman

In diesem Kapitel werden die Normangaben für die Raumakustik der Klassenräume und der Zusammenhang zwischen der Nachhallzeit und der Sprachverständlichkeit beschrieben. Es wird darauf eingegangen welcher SNR in Klassenräumen wirklich erforderlich ist, damit sich eine gute Sprachverständlichkeit einstellt und welche Nachhallzeit hierfür notwendig ist. Außerdem wird der Lombard-Effekt im Allgemeinen sowie sein Auftreten im Klassenraum dargestellt.

#### 3.1. Normen und gesetzliche Regelungen

##### Arbeitspegel $L_{A,r}$

Laut §5 VOLV<sup>204</sup> darf am Arbeitsplatz in Räumen, in den denen „vorwiegend geistige Tätigkeiten“ ausgeführt werden, der Arbeitspegel  $L_{A,r} = 50$  dB(A) nicht überschritten werden. Welche gesetzlichen Maßnahmen für Überschreitungen der Auslösewerte zu treffen sind, ist in der Tabelle der Arbeitsinspektion Österreich<sup>205</sup> zusammengefasst. VDI 2058 Bl. 3 gibt einen Grenzwert des Arbeitspegels ( $L_{Ar}$ )<sup>206</sup> von 55 dB(A) an, der auch immer wieder in den zahlreichen Publikationen der Klassenraumakustik als Referenzwert herangezogen wird.<sup>207</sup> Interessanterweise schreibt § 9 Abs. 1 VOLV vor, dass Lärm so weit verringert werden muss, wie es nach dem Stand der Technik und mit der Verfügbarkeit von geeigneten technischen Mitteln möglich ist. Ob die Schule als Arbeitsplatz gilt ist aber fraglich. In einer allgemeinen Betrachtung schreiben Tiesler und Machner:

*„Bislang wird die Institution Schule nicht als Arbeitsplatz betrachtet, weder für die Lehrkräfte, noch für die Schüler.“<sup>208</sup>*

---

<sup>204</sup> [VOLV].

<sup>205</sup> Siehe [AIÖ2] (siehe Anhang B).

<sup>206</sup> Siehe Definition Kapitel 2.1.2.

<sup>207</sup> Siehe z. B. [SCHOENWAELDER1], [TIESLER3], [SCHOENWAELDER2] u. a.

<sup>208</sup> [TIESLER5].

Tiesler schreibt zur Betrachtung der Schule als Arbeitsplatz:

*„Es handelt sich hier zwar nicht um einen Produktionsbetrieb im klassischen Sinne der Arbeitswissenschaft, dennoch sind hier Menschen tätig, die einer Aufgabe nachgehen und einen großen Teil ihres Arbeitstages in dieser Umgebung verbringen. Vergleichbar ist dieser Arbeitsplatz in jedem Fall aber mit einem Dienstleistungsunternehmen. Im Sinne einer „Humanisierung der Arbeitswelt“ ist es nur legitim auch die Schule unter einem solchen Gesichtspunkt zu betrachten, genauer zu analysieren.“<sup>209</sup>*

## Grundgeräuschpegel

DIN 18041 schreibt für Unterrichtsräume vor, dass der Grundgeräuschpegel von 35 dB(A) in Unterrichtsräumen nicht überschritten werden darf. In Unterrichtsräumen für Fremdsprachenunterricht bzw. in Unterrichtsräumen mit ausländischen Schülern anderer Muttersprache oder Schülern mit Hörbeeinträchtigungen darf der Grundgeräuschpegel höchstens 30 dB(A) betragen (siehe Tabelle 19).

**Tabelle 19:** Einstufung des Störschalldruckpegels bauseitiger Geräusche nach Anforderungen an die Raumnutzung (DIN 18041)

Schall- technische Anforderungen an die Raumnutzung	Störschall- druckpegel der bauseitigen Geräusche  $L_{NA, Bau}$  dB (20 $\mu$ Pa)	Eignung <sup>a</sup> für eine Entfernung Sprecher – Hörer		Eignung <sup>a</sup> für Personen mit Hör- verlusten	Eignung <sup>a</sup> für die Wahrnehmung schwieriger oder fremd- sprachiger Texte
		mittlere <sup>b, c</sup>	größere <sup>b</sup>		
I (mindest)	$\leq 40$	+	-	-	-
II (mittlere)	$\leq 35$	+	o	o	o
III (hohe)	$\leq 30$	+	+	+	+
<p><sup>a</sup> „+“ geeignet, „o“ bedingt geeignet, „-“ nicht geeignet</p> <p><sup>b</sup> Für eine mittlere Entfernung zwischen Sprecher und Hörer kann üblicherweise ein Abstand von 5 m bis 8 m, für größere Entfernungen &gt; 8 m angenommen werden.</p> <p><sup>c</sup> Auch geeignet für geringere Entfernungen zwischen Sprecher und Hörer bis etwa 5 m.</p>					

<sup>209</sup> [TIESLER6].

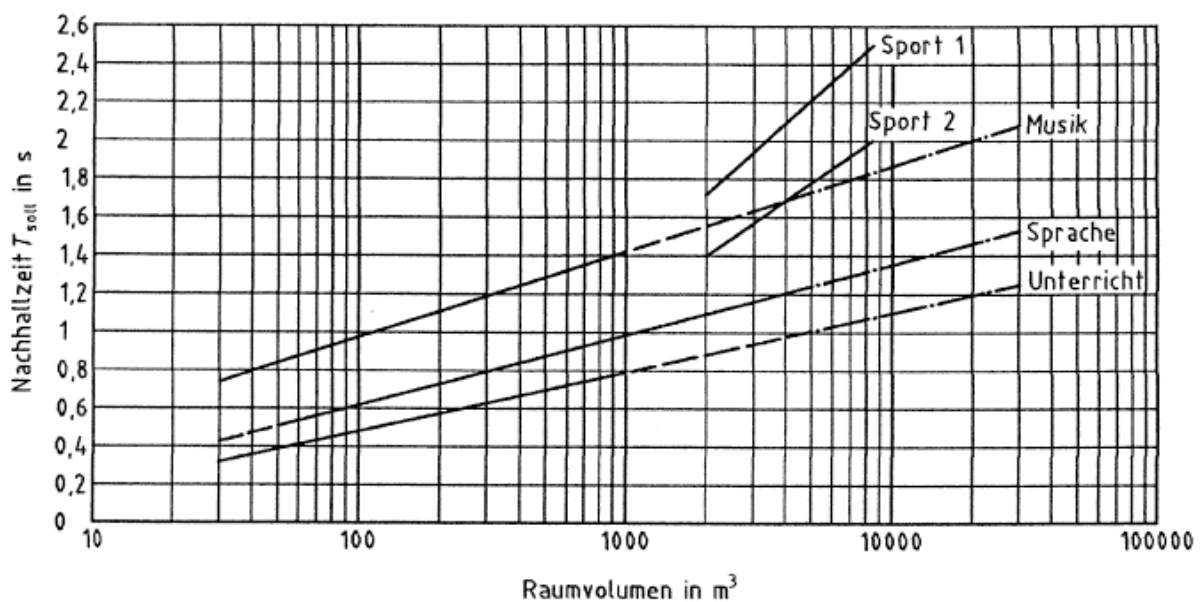
Auch die Richtlinien für Lärm der WHO schreiben vor, dass im Klassenraum das Grundgeräusch die 35 dB(A)-Grenze nicht überschreiten darf, ansonsten wird die Informationsaufnahme und die Sprachverständlichkeit gestört (siehe Anhang B).

### Nachhallzeit

DIN 18041 bzw. ÖNORM B 8115-3 sieht für Unterricht einen Sollwert für die Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Raumvolumen vor, die nach folgender Formel berechnet wird:

$$T_{soll} = \left( 0,32 \log \left( \frac{V}{m^3} \right) - 0,17 \right) s$$

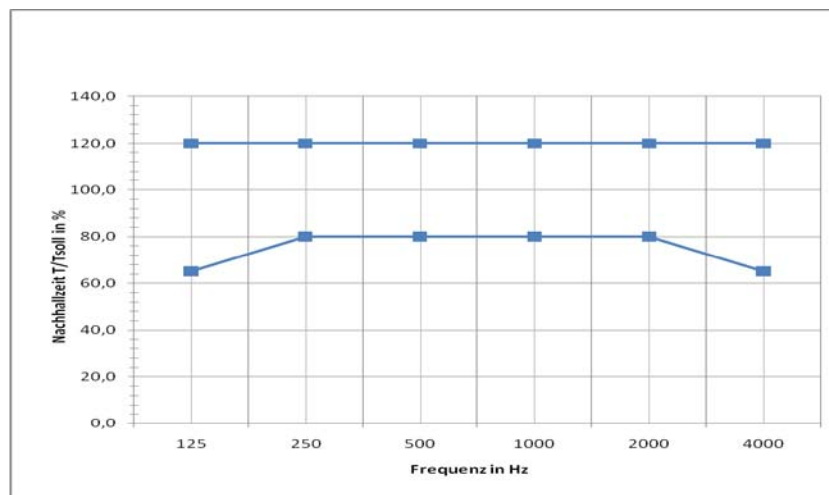
Andere Sollwerte für Sport, Musik und Sprache sind in der folgenden Abbildung dargestellt:



**Abb. 79:** Sollwert  $T_{soll}$  der Nachhallzeit für unterschiedliche Nutzungsarten in Abhängigkeit vom Volumen. [DIN 18041]

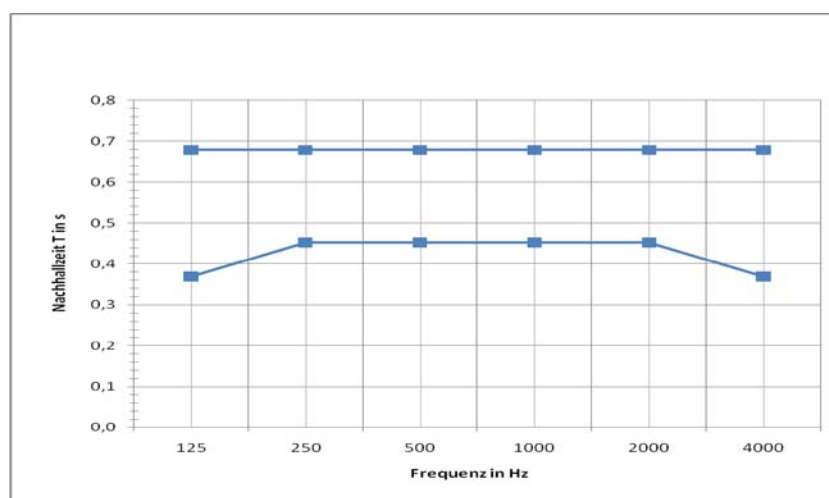
Für die Nutzungsart Sprache und Unterricht sieht DIN 18041 auch ein Toleranzband in den Oktavbändern 250 Hz bis 2000 Hz bis  $\pm 20\%$  vor, in dem die Nachhallzeit liegen muss:





**Abb. 80:** Toleranzbereich der empfohlenen Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz normiert auf  $T_{\text{soll}}$  gemäß DIN 18041

Für einen typischen Klassenraum von  $200 \text{ m}^3$ , wie er für die Messungen dieser Diplomarbeit vorlag, sieht das Toleranzband wie in folgender Abbildung dargestellt aus:



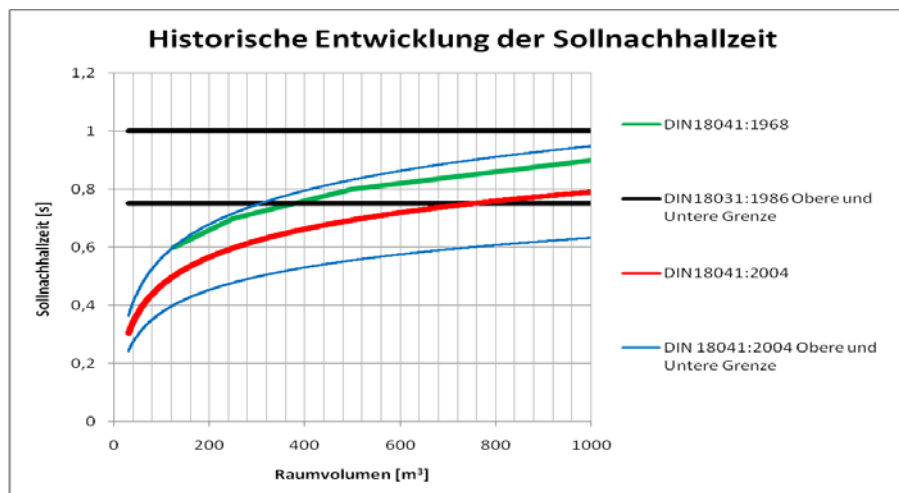
**Abb. 81:** Toleranzband der Nachhallzeit nach DIN 18041 für einen Unterrichtsraum von  $V=200\text{m}^3$ .  $T_{\text{soll}}=0,56\text{s}$

Die DIN 18041 gibt es seit 1968. Damals schrieb diese Norm folgende Nachhallzeiten für Unterrichts- und Ausbildungsräume (Gruppe 1) in Abhängigkeit vom Raumvolumen vor:

**Tabelle 20:** Sollnachhallzeiten für Frequenzen  $f=500\text{Hz}$  bis  $1000 \text{ Hz}$  in Abhängigkeit vom Raumvolumen für Unterrichtsräume nach DIN 18041:1968

Raumvolumen [ $\text{m}^3$ ]	125	250	500	1000
Sollnachhallzeit $T_{\text{soll}} (\pm 20\%)$ [s]	0,6	0,7	0,8	0,9

Neben der DIN 18041 aus dem Jahr 1968 gab es einen Fachbericht der DIN aus dem Jahr 1983, der eine Überarbeitung der Norm DIN 18031 „Hygiene im Schulbau“ aus dem Jahr 1963 vorsah. Dieser Fachbericht DIN 18031<sup>210</sup> sah eine Nachhallzeit von 0,75 bis 1 s zwischen 250 und 2000 Hz in Unterrichtsräumen vor. Allerdings ging dieser Fachbericht nie in eine neue Norm über, hingegen wurde nur die alte DIN 18031:1963 „Hygiene im Schulbau“ im Jahr 1983 zurückgezogen, da sie als überholt galt. Erst 2004 wurde die neue DIN 18041:2004 herausgegeben und löste somit die DIN 18041:1968 ab.



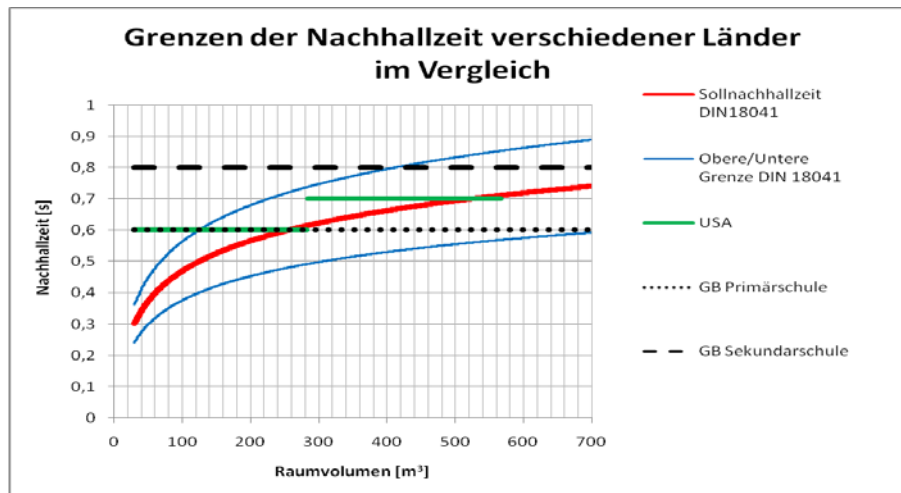
**Abb. 82:** Historische Entwicklung der Sollnachhallzeit von der Norm DIN 18041:1968 (linear interpoliert), des Fachberichtes DIN 18031:1986 bis zur Norm DIN 18041:2004. Obere Grenze und untere Grenze der Nachhallzeit nach dem Toleranzband der DIN 18041.

Gibt es für die Grenze des Grundgeräuschpegels in Klassenräumen (35 dB[A]) weitgehend Übereinstimmung unter den Ländern, so zeigen sich leichte Unterschiede, was die Nachhallzeiten von Klassenräumen in den Normen der einzelnen Länder betrifft. Die Tabelle zeigt die aktuellen Nachhallzeitvorschläge der USA und Großbritanniens:

**Tabelle 21** Maximal erlaubte Nachhallzeit für Klassenräume nach Vorschläge der USA und Großbritanniens. Nachhallzeiten in den Oktavbändern 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz.

Land	Dokument	Nachhallzeiten
USA	[ANSI S12.60, 2002, S.5]	V < 283 m³: RT = 0,6 s 283 m³ < V ≤ 566 m³: RT = 0,7
Großbritannien	[BUILDING, S.64]	Primärschule: < 0,6 s Sekundarschule: < 0,8 s

<sup>210</sup> [DIN18031, S. 31].



**Abb. 83:** Maximale Nachhallzeit (der Oktavbänder 500, 1000 und 2000 Hz) für Klassenräume der Vorschläge aus Großbritannien (GB), den USA im Vergleich zur Sollnachhallzeit der DIN 18041:2004 mit Toleranzgrenzen für die Oktavbänder 250 Hz bis 2000 Hz. Siehe auch Tabelle 21.

Für kleine Klassenräume hat die DIN 18041 die strengsten Bedingungen für die Nachhallzeit im Vergleich zu den USA und Großbritannien. Die obere Toleranzgrenze der DIN 18041 führt jedoch dazu, dass die USA bei größeren Klassenräumen strengere Bedingungen für die Nachhallzeit haben als die Länder, die die DIN 18041 anwenden. Betrachtet man noch einmal Abb. 82, so muss man die obere Toleranzgrenze der DIN 18041:2004 kritisieren, denn sie stellt eher eine Milderung der raumakustischen Bedingungen gegenüber der DIN 18041 aus dem Jahr 1968 dar.

Dieses Kapitel sollte die raumakustischen Bedingungen für die Klassenräume darstellen. Für den maximalen Grundgeräuschpegel von 35 dB im Klassenraum gibt es eine weltweite Übereinstimmung. Für die Grenze der Nachhallzeit im Klassenraum gibt es allerdings zwischen den Ländern große Unterschiede, außerdem machte die Sollnachhallzeit innerhalb der deutschen Normen im letzten Jahrhundert eine Entwicklung zu niedrigeren Werten mit.

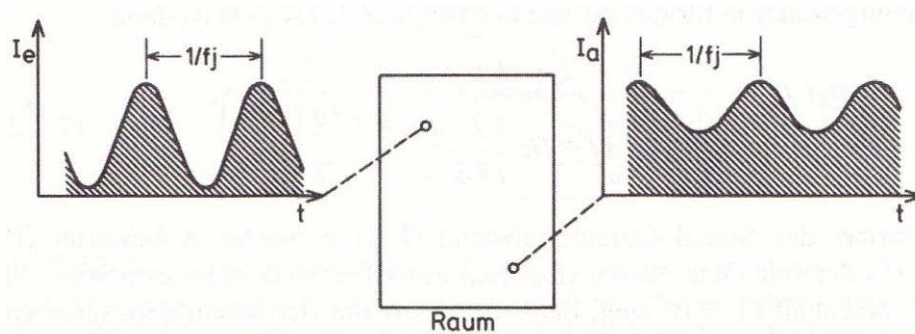
## 3.2. Zusammenhänge der Nachhallzeit, des SNR, des STI und der Sprachverständlichkeit in Klassenräumen

Dieses Kapitel geht auf die Relation zwischen der Sprachverständlichkeit und den Parametern Nachhallzeit und Signal-Störgeräuschabstand im Allgemeinen und für Klassenräume im Speziellen ein. Es soll die theoretischen Zusammenhänge der einzelnen raumakustischen Parameter veranschaulichen und den praktisch gemessenen Zusammenhängen aus den Studien über die Klassenraumakustik gegenüberstellen. Zur Messung der Sprachverständlichkeit können entweder objektive Messverfahren mit genormten

Sprachindizes angewendet werden oder subjektive Hörtests mittels Logatomen<sup>211</sup> oder ähnlich klingenden Wörter zur Lautdiskrimination durchgeführt werden. Aus beiden Methoden lassen sich raumakustische Bedingungen für eine optimale Sprachverständlichkeit ableiten.

### 3.2.1. Theoretische und gemessene Zusammenhänge zwischen der NHZ, dem SNR und STI in Klassenräumen

In der Theorie wird davon ausgegangen, dass die Sprechintensität  $I_e$  ein amplitudenmodulierter Vorgang mit Modulationsgrad  $m_s$  ist (Siehe Lazarus<sup>212</sup> und Graber<sup>213</sup>).



**Abb. 84:** Gesendete Sprechintensität ( $I_e$ ) mit Modulationsgrad  $m=1$  und empfangende Intensität  $I_a$  mit  $m < 1$  der Modulationsfrequenz  $f_j < 50\text{Hz}$  [LAZARUS1, S. 283].

Durch die Übertragung verändert sich die Intensität am Hörerplatz:

$$I_a = \bar{I}_a \cdot (1 + m_S \cdot m_T \cdot m_N \cdot \cos 2\pi f_j (t - \tau))$$

$\tau$  ist die Laufzeit des Signals.

Der für den Hörer wirksame Modulationsgrad  $m$  besteht aus dem Modulationsgrad der ungestörten Sprache  $m_s$ , dem Modulationsgrad des Nachhalls  $m_T$  und des Störgeräusches  $m_N$ .

$$m = m_S \cdot m_T \cdot m_N$$

<sup>211</sup> Logatome sind einsilbige Konsonanten-Vokal-Konsonanten-Gruppen (einsilbig) die keinen erkennbaren oder ableitbaren Sinn ergeben. Eine logische Ergänzung nicht verstandener Logatome ist somit nicht möglich.

<sup>212</sup> [LAZARUS1, S. 283-285].

<sup>213</sup> [GRABER].

Die Modulationsübertragungsfunktion des Raumes,

$$m_R(f_j) = m_T(f_j) \cdot m_N(f_j)$$

lässt sich aus Impulsantwort des Raumes  $h(t)$  und dem Signalstörabstand  $L_{SN}$  berechnen.  $f_j$  entspricht der Modulationsfrequenz  $< 50$  Hz. Dabei wird nach den Regeln der statistischen Raumakustik für das diffuse Schallfeld angenommen, dass die Impulsantwort des Raumes ein exponentieller Abklingvorgang ist.

$$m_R(\omega_j) = \frac{\int_0^\infty h^2(t) \cdot e^{-j\omega_j t} dt}{\int_0^\infty h^2(t) dt}$$

$$h(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot w(t)$$

$w(t)$  entspricht einem Oktavbandrauschen

$$\Rightarrow m_T(\omega_j) = \frac{1}{1 + j\omega_j \frac{\tau}{2}}$$

$$\Rightarrow |m_T(\omega_j)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\omega_j \frac{\tau}{2}\right)^2}}$$

Die endliche Nachhalldauer ist definiert als:

$$t_s = \tau \cdot \ln\left(\frac{E_0}{E_S}\right)$$

Dabei entspricht  $E_S$  der Schwellenenergiedichte (Mithörschwelle),  $E_0$  der Anfangsenergiedichte bei  $t=0$

Laut Sabine ist die Anfangsenergiedichte  $E_0$  des Schallereignisses  $10^6$  mal höher als am Ende des Zeitintervalles<sup>214</sup>:  $\Delta t = T - t_0 = T$ .

$$E_0 = 10^6 \cdot E(T)$$

<sup>214</sup> Dies entspricht der  $T_{60}$  Definition.

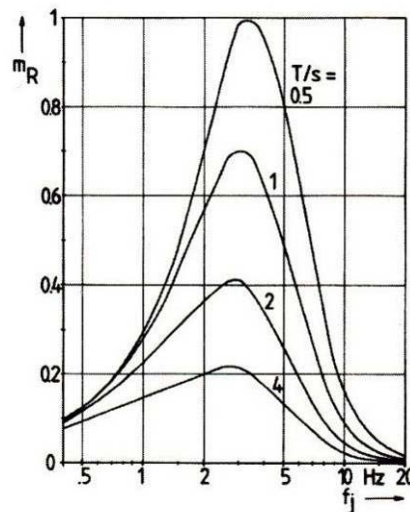
Eingesetzt in  $t_s$  ergibt dies:

$$T = \tau \cdot \ln \left( \frac{E_0}{E(T)} \right) = \tau \cdot \ln 10^6 = 6\tau \cdot \ln 10 = 13,8 \cdot \tau$$

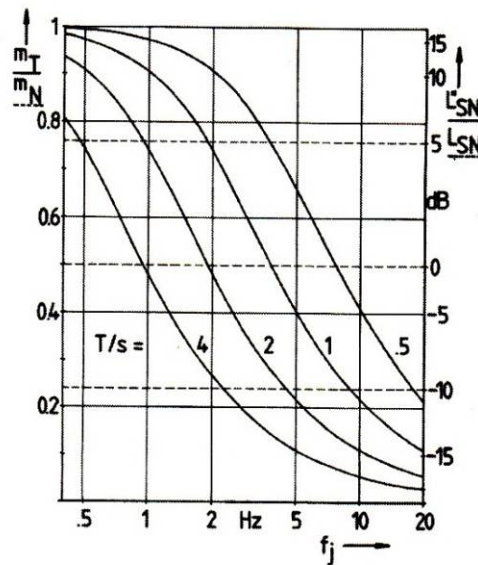
Eingesetzt in  $m_T(\omega)$  mit Berücksichtigung von  $m_N$  erhält man für die Modulationsübertragungsfunktion des Raumes:

$$m_R(f_j) = |m_T(\omega_j)| \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-(S/N)}{10dB}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( 2\pi f_j \frac{T_{60}}{13,8} \right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-(S/N)}{10dB}}}$$

Abb. 85 zeigt  $m_R$  für Oktavbandrauschen für unterschiedliche Nachhallzeiten und unterschiedliche Modulationsfrequenzen. Je höher die Nachhallzeit ist, desto kleiner der Modulationsgrad. Ähnliches gilt für das SNR: Je höher das SNR, desto größer der Modulationsgrad  $m_N$  (siehe Abb. 86). Beide Größen, der SNR und die Nachhallzeit beeinflussen also die Sprachverständlichkeit.



**Abb. 85:** Modulationsübertragungsfunktion  $m_R$  eines Raumes für Oktavbandrauschen bei unterschiedlichen Modulationsfrequenzen  $f_j$  in Abhängigkeit von der Nachhallzeit [LAZARUS1,S.285]



**Abb. 86:** Modulationsgrad  $m_T$  (—) in Abhängigkeit von der Nachhallzeit. Modulationsgrad  $m_N$  (- - -) in Abhängigkeit vom Signalgeräuschabstand ( $L_{SN}$ ). [Ebd., S. 285].

Als objektive raumakustische Kriterien sehen Fasold und Veres<sup>215</sup> folgende Größen vor:

### Deutlichkeitsgrad $D_{50}$

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

$D_{50} > 50$  %.... gute Verständlichkeit

### Deutlichkeitsmaß $C_{50}$ :

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt}$$

$C_{50} > 2$  dB ... sehr gute Verständlichkeit

$2$  dB  $> C_{50} > -3$  dB ... gute Verständlichkeit

$-3$  dB  $> C_{50} > -8$  dB ... noch ausreichende Verständlichkeit

<sup>215</sup> [FASOLD].

Bradley<sup>216</sup> untersuchte für Auditorien den Zusammenhang zwischen dem Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$ , dem Klarheitsmaß  $C_{80}$  und der Nachhallzeit. Hierbei ging er wie üblich (siehe Anfang des Kapitels) von einer exponentiell abklingenden Impulsantwort aus („Exponential Decay Theory“):

$$p^2(t) = A \cdot e^{-t/\tau}$$

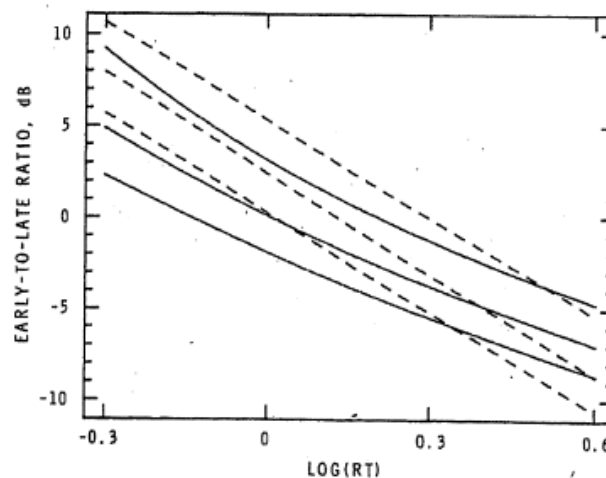
Die Zeitkonstante  $\tau = RT/13,815$

Eingesetzt in die  $C_{50}$  Formel:

$$C_{t_e} = 10 \log \left( \exp \left( 13,815 \cdot \frac{t_e}{RT} \right) - 1, 0 \right)$$

Wobei  $t_e$  die jeweilige Zeitgrenze für  $C$  ist: für  $C_{50}$  ist  $t_e=50\text{ms}$ , für  $C_{80}$  ist  $t_e=80\text{ms}$ .

Dieser theoretische Zusammenhang zwischen der Nachhallzeit und  $C_{50}$  bzw.  $C_{80}$  ist in Abb. 87 zu sehen, mit den jeweiligen Regressionslinien der durchgeführten Messungen in Auditorien.



**Abb. 87:**  $C_{35}$ ,  $C_{50}$ ,  $C_{80}$  von unten nach oben, in Abhängigkeit vom Logarithmus der Nachhallzeit (für 1 kHz). Durchgezogene Kurve entspricht der Vorhersage nach der „Exponential Decay Theory“. Die gestrichelten Kurven entsprechen den Regressionslinien der Messungen in mehreren Auditorien. [BRADLEY1, S. 204].

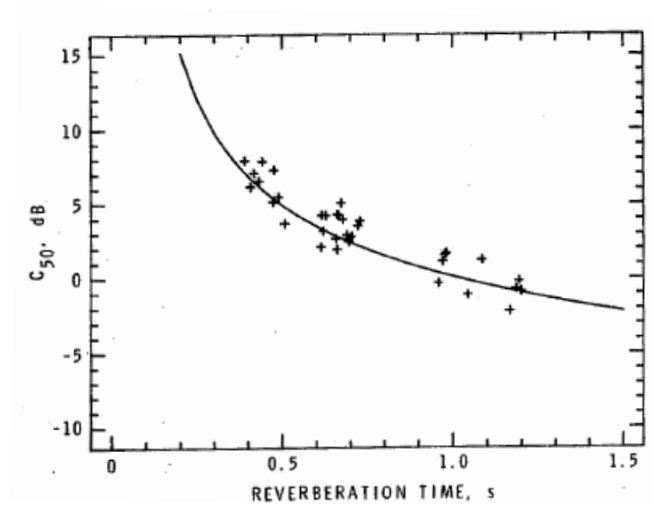
Die Vorhersage nach der „Exponential Decay Theory“, die laut Bradley für große Räume wie Auditorien nicht so geeignet war, wurde in einer weiteren Studie von Bradley<sup>217</sup> für 10 kleinere Klassenräume untersucht. Er fand heraus, dass die  $C_{50}$ -Messwerte sehr genau dieser Vorhersage entsprachen. Der mittlere Unterschied im Frequenzbereich von 250 Hz und 8000

<sup>216</sup> Vgl. [BRADLEY1].

<sup>217</sup> Vgl. [BRADLEY2, S. 848].



Hz lag bei  $\pm 1$  dB(A) (RMS-Fehler=1,27 bei 1000 Hz). Nur im 125 Hz Oktavband lag der Unterschied deutlich höher (Seat-Dip-Effect).



**Abb. 88:** Gemessene  $C_{50}$ -Werte in Abhängigkeit zu den gemessenen Nachhallzeiten für 1 kHz in 10 Klassenräumen. Die durchgezogene Kurve ist die Vorhersage nach der „Exponential Decay Theory“. [BRADLEY2, S. 848].

### Artikulationsverlust für Konsonanten $Al_{cons}$ nach Peutz und Klein:

$$Al_{cons} \approx 0,652 \cdot \left( \frac{r_{LH}}{r_R} \right)^2 \cdot T \quad [\%]$$

$T$  ... Nachhallzeit in s

$r_{LH}$  ... Abstand Schallquelle-Hörer in m

$r_R \approx \sqrt{\gamma} \cdot r_H$  ... Richtentfernung in m

$r_H = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{T}}$  ... Hallradius in m

$\gamma$  ... Bündelungsgrad der Schallquelle

$$Al_{cons} \approx 200 \cdot \frac{r_{LH}^2 \cdot T^2}{\gamma \cdot V} \quad [\%]$$

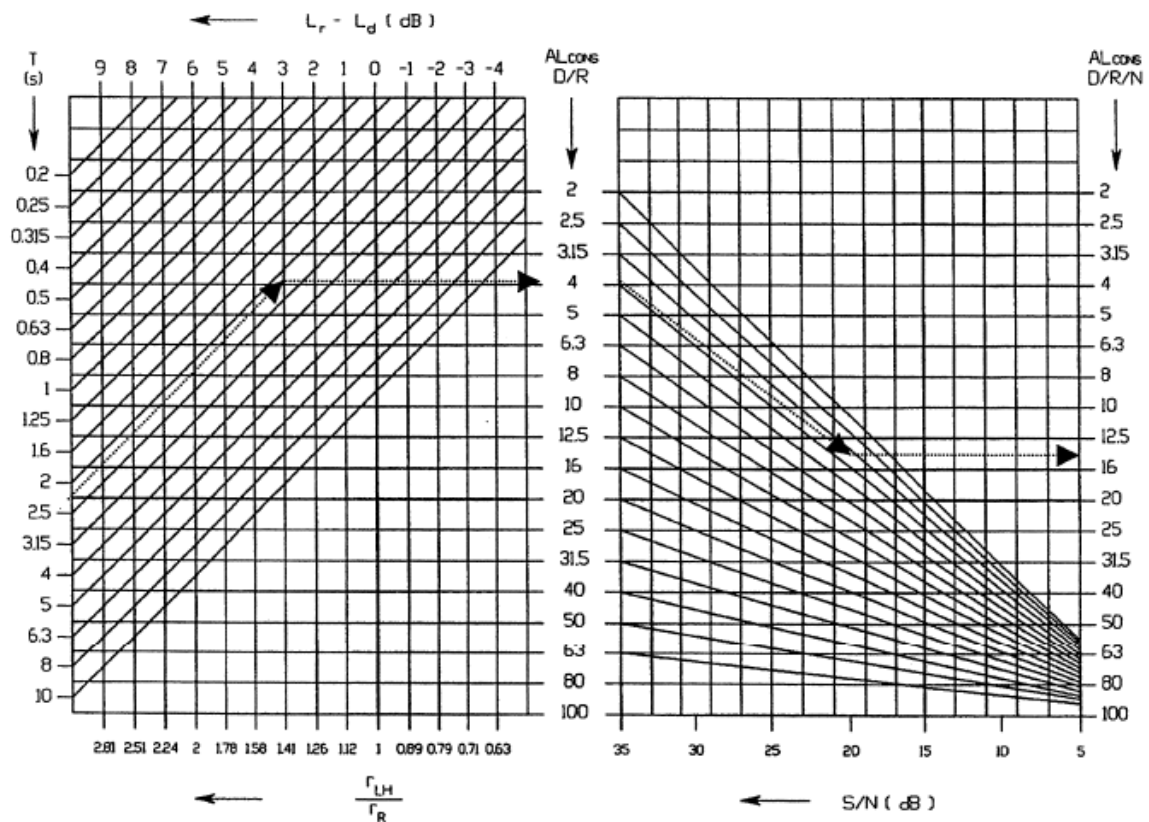
$Al_{cons} < 2\%$  ... ideale Verständlichkeit

$2\% < Al_{cons} < 7\%$  ... gute Verständlichkeit

$7\% < Al_{cons} < 20\%$  ... befriedigende Verständlichkeit

$20\% < Al_{cons}$  ... unbrauchbare Verständlichkeit

Der  $Al_{\text{cons}}$  ist auch abhängig von dem Signal-Stör-Abstand und muss bei schlechtem SNR-Verhältnis gegebenenfalls korrigiert werden. Abb. 89 zeigt die Abhängigkeit des  $Al_{\text{cons}}$  vom SNR und von der Nachhallzeit.



**Abb. 89:** Artikulationsverlust in Abhängigkeit von der Pegeldifferenz des Diffusschalls  $L_r$  und des Direktschalls  $L_d$  und der Nachhallzeit  $T$ . Der  $Al_{\text{cons}}$  wird in der rechten Abbildung für den jeweiligen SNR korrigiert. [AHNERT]

### Sprachübertragungsindex $STI^{218}$ , $RASTI^{219}$ :

Zur Berechnung dieser Sprachübertragungsindizes sei hier nur auf die Norm: ÖVE/ÖNORM EN 60268-16 verwiesen.

Beurteilung des STI laut ÖNORM EN ISO 9921:

- 0 bis 0,3....schlecht, bad
- 0,3 bis 0,45....schwach, poor
- 0,45 bis 0,6....angemessen, fair
- 0,6 bis 0,75....gut, good
- 0,75 bis 1....ausgezeichnet, excellent

Der STI ist vom SNR und von der Nachhallzeit abhängig, wie Abb. 90 und 91 zeigen:

<sup>218</sup> Speech Transmission Index.

<sup>219</sup> Rapid Speech Transmission Index.

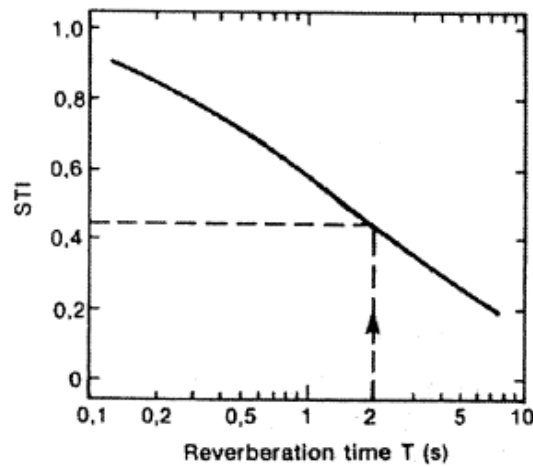


Abb. 90: STI in Abhängigkeit von der Nachhallzeit. [Ebd.]

Befindet sich der Hörer in einer größeren Entfernung zur Schallquelle als der Hallradius, nämlich im Fernfeld, so gilt folgende Darstellung, die den Zusammenhang des STI zum SNR und der Nachhallzeit veranschaulicht:

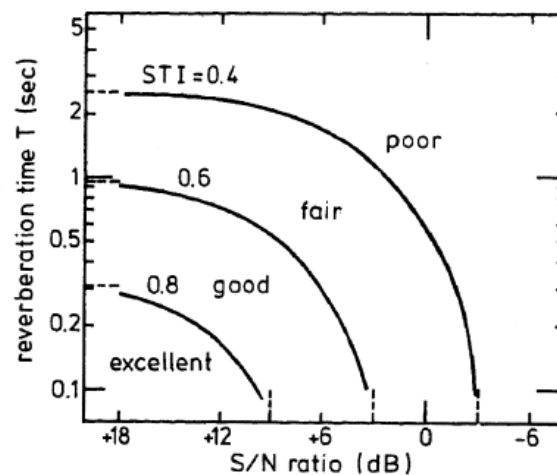
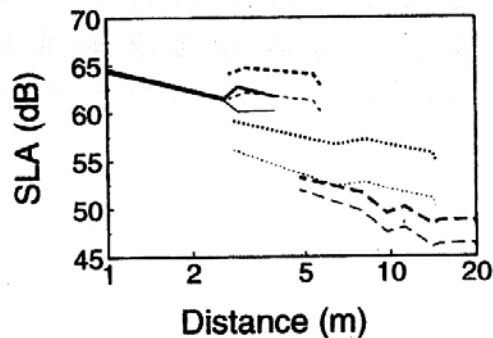


Abb. 91: Kurven von konstantem STI als Funktion des SNR und der Nachhallzeit im Fernfeld. [HOUTGAST]

Für einen ausgezeichneten STI wird ein SNR von Minimum +9 dB und höher sowie eine Nachhallzeit deutlich unter 0,5 s verlangt.

In kleinen Räumen mit wenig Geräuschpegel hängt der STI vor allem von der Nachhallzeit ab. Laut Oberförster<sup>220</sup> und Lazarus<sup>221</sup> kann im Klassenzimmer ab einer gewissen Entfernung nicht von einem völlig diffusen Schallfeld ausgegangen werden. Dies zeigen die Messungen von 30 Klassenräumen bei Hodgson<sup>222</sup>. Auch bei größter Entfernung nimmt der Schallpegel des Sprechers noch immer ab, wie Abb. 92 zeigt:<sup>223</sup>



**Abb. 92:** Sprachpegelverlauf in verschiedenen Klassenräumen in Abhängigkeit von der Entfernung Schallquelle-Hörer mit Durchschnittsvolumen von  $518 \text{ m}^3$  (Min:  $110 \text{ m}^3$ , Max:  $3890 \text{ m}^3$ ). [HODGSON1]

Auch Houtgast<sup>224</sup> erwähnt, dass sich die Hälfte des Publikums im Klassenraum im Direktfeld (Nahfeld) zum Sprecher befindet.

Modellberechnungen von Bistafa und Bradley<sup>225</sup> für Klassenräume mit  $V = 300 \text{ m}^3$  unter der Voraussetzung, dass der  $\text{STI} > 0,75$  ist, kommen für die Bedingungen der Nachhallzeiten und des SNR zu folgenden Ergebnissen:

**Tabelle 22:** Ergebnisse von Berechnungen von Bistafa und Bradley für zwei Sprechweisen: normal (60 dB) und angehoben (65 dB).  $T_{\text{opt}}$  ist die optimale Nachhallzeit berechnet nach maximaler Sprachverständlichkeit für Pseudowörter (PB-Wörter). Bei X ist eine Nachhallzeit für die Bedingung  $\text{STI} > 0,75$  nicht möglich. [LAZARUS1]

$L_{\text{NA}}/L_{\text{SA},1\text{m}}$ in dB	$L_{\text{NA}}/L_{\text{SA},1\text{m}}$ in dB	$L_{\text{NA}} - L_{\text{SA},1\text{m}}$ in dB	T in s für $\text{STI} > 0,75$	$T_{\text{opt}}$ für $\text{SV} = \text{max}$
45/60	50/65	-15	X	0.4
40/60	45/65	-20	X	0.3
35/60	40/65	-25	0.2-0.4	0.2
30/60	35/65	-30	0.1-0.4	0.2

<sup>220</sup> Vgl. [OBERFOERSTER1, S.29].

<sup>221</sup> Vgl. [LAZARUS1 S.537].

<sup>222</sup> Vgl. [HODGSON1].

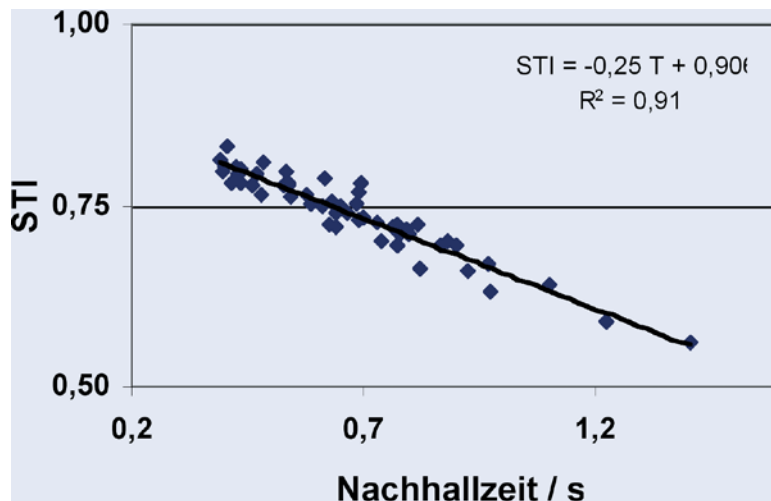
<sup>223</sup> Vgl. [LAZARUS1, S. 537].

<sup>224</sup> Vgl. [HOUTGAST].

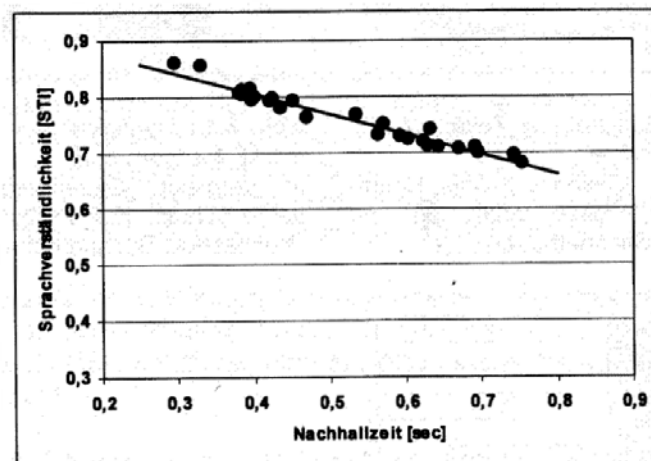
<sup>225</sup> Vgl. [LAZARUS1, S.536], siehe auch [BISTAFABA].

Es zeigt sich, dass nur für sehr ruhige Klassenräume eine maximale Sprachverständlichkeit bei 0,2 bis 0,4 s Nachhallzeit erreicht werden kann. Es zeigt sich außerdem, dass das SNR in einem Meter Entfernung nicht größer sein soll als -20 dB.<sup>226</sup>

In Studien über die Klassenraumakustik fand man bei Messungen einen linearen Zusammenhang zwischen dem STI und EDT<sup>227</sup> sowie einen linearen Zusammenhang zwischen dem STI und der Nachhallzeit. Einige dieser Studien sind hier zusammengestellt:



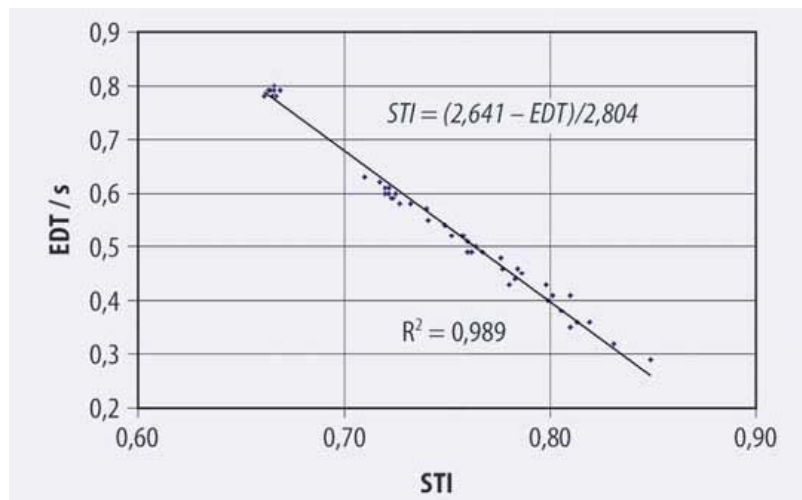
**Abb. 93:** Gemessener Sprachverständlichkeitsindex STI in Abhängigkeit von der Nachhallzeit (N=29 Klassenräume) (Regressionsberechnung, siehe Anhang D)  
Vgl. [TIESLER4]



**Abb. 94:** Gemessener Sprachverständlichkeit STI in Abhängigkeit von der Nachhallzeit RT in 47 Klassenräumen für alle Besetzungszustände (leer, halb: 13-14 Schüler und voll besetzt: 23-24 Schüler):  $STI=0.949-0.361*RT$ ;  $r=0.977$ . Mittlere Nachhallzeit von 125 Hz bis 8000 Hz. (Regressionsberechnung, siehe Anhang D) [OBERDOERSTER1, S. 77]

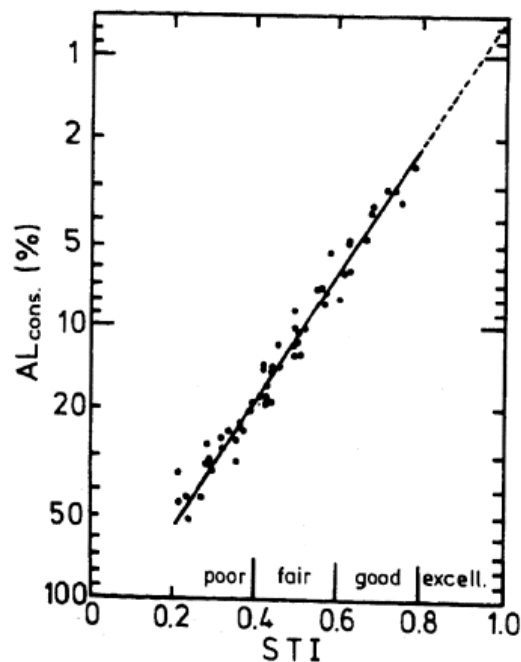
<sup>226</sup> Vgl. [LAZARUS1, S. 536].

<sup>227</sup> Early Decay Time.



**Abb. 95:** STI in Abhängigkeit vom EDT von Klassenraum-Modellberechnungen mit CATT von  $125\text{m}^3$  bis  $250\text{m}^3$ . (Regressionsberechnung, siehe Anhang D) [MOMMERTZ]

Laut Houtgast<sup>228</sup> gibt es einen theoretischen Zusammenhang zwischen dem STI und dem Alcons, den er auch für seine Sprachverständlichkeitstests in Klassenräumen verwendet. Der Zusammenhang gilt jedoch nur im Mittel für übliche Nachhallzeiten von 0,8 bis 4 s.



**Abb. 96:** Zusammenhang zwischen STI und Alcons aus 57 Bedingungen verschiedener Nachhallzeiten und Geräuschinterferenzen. [HOUTGAST]

<sup>228</sup> Vgl. [HOUTGAST].

DIN 18041 und Lazarus<sup>229</sup> geben den Zusammenhang in folgender Tabelle an:

**Tabelle 23:** Zusammenhang zwischen STI und Alcons nach DIN 18041

<b>STI</b>	0.75 bis 1	0.6 bis 0.76	0.45 bis 0.6	0.3 bis 0.45	0 bis 0.3
<b>Alcons (%)</b>	< 3%	7% bis 3%	15% bis 7%	34% bis 15%	> 34%

In der Literatur ist noch eine Berechnungsformel namens Farrel-Becker<sup>230</sup> bekannt, die eine Alcons-Berechnung aus dem STI-Wert erlaubt:

$$\%Al_{cons} = 170,5405e^{-5,419 \cdot STI}$$

### Silbenverständlichkeit:

Es gibt ein Verfahren zur objektiven Bestimmung der Silbenverständlichkeit.

$$v = 96 \cdot k_F \cdot k_N \cdot k_C \dots [\%]$$

$k_F = k_{ft} \cdot k_{fh} \leq 1$  ... Silbenverständlichkeitsfaktor (bandbreitenabhängig)

$k_N \leq 1$  ... Lautstärkefaktor ( $\approx 0,9$  guter Wert)

$$k_C = \sqrt[5]{\frac{1}{1 + 10 \frac{C_{50}}{10dB}}} \dots \text{Verständlichkeitsfaktor nach Kürer}$$

Für  $90\% \leq v \leq 96\%$  gilt die Bezeichnung „ausgezeichnet“, für  $v \leq 30\%$  gilt „unverständlich“. Die Wortverständlichkeit und Satzverständlichkeit lässt sich aus der Silbenverständlichkeit mit der Tabelle aus DIN 18041 ableiten:

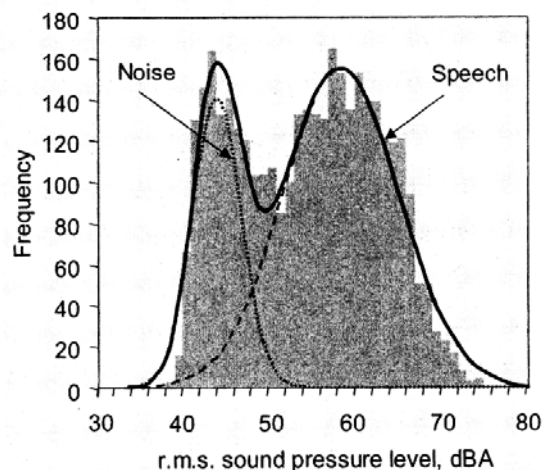
<sup>229</sup> Vgl. [LAZARUS1, S. 277].

<sup>230</sup> [BRUEL&KJAER], [DAVIS], [LAZARUS1, S. 277].

**Tabelle 24:** Zusammenhang zwischen Silben-, Satz-, und Wortverständlichkeit nach [DIN 18041]

Silbenverständlichkeit $V$ in %	Wortverständlichkeit $V_w$ in %	Satzverständlichkeit $V_{SA}$ in %
0 bis 34	0 bis 67	0 bis 89
34 bis 48	67 bis 78	89 bis 92
48 bis 67	78 bis 87	92 bis 95
67 bis 90	87 bis 94	95 bis 96
90 bis 96	94 bis 96	96

In den Studien über die Klassenraumakustik stellt sich die Frage, wie in einer arbeitenden Klasse der Nutzsignal-Störabstand (SNR) gemessen oder berechnet werden kann. Hier traten in den Studien immer wieder zwei Verfahren zur objektiven SNR-Bestimmung auf. Im einen Verfahren werden typische Zeitabschnitte für Hintergrundgeräusch und Sprecher ausgewählt und dann der äquivalente Schallpegel je Abschnitt ausgerechnet. Im anderen Verfahren, welches in Hodgson<sup>231</sup> und Sato<sup>232</sup> angewendet wird, werden Häufigkeitsverteilungen der Schallpegel gebildet und dann Normalverteilungen für Sprecher und Hintergrund gefittet (siehe Abb. 97).



**Abb. 97:** Trennung des Hintergrundgeräusches (Aktivität der Kinder) und der Lehrersprache zur Berechnung des SNR [SATO, S. 2071]

Falls das SNR groß genug ist, können aus den Maxima der Kurven die beiden Pegel ausgelesen werden. Hierzu schreibt Leistner:

*„Das setzt natürlich voraus, dass die Häufigkeitsverteilungen genau zwei Maxima aufweisen. Dies dürfte zwar auf Vorlesungen, nicht jedoch auf sehr viel abwechslungsreicheren Grundschulunterricht zutreffen.“*<sup>233</sup>

<sup>231</sup> Vgl. [HODGSON2].

<sup>232</sup> Vgl. [SATO].

<sup>233</sup> [LEISTNER, S. 29].



Dass Leistner mit seiner Äußerung recht hat, zeigen die Auswertungen von Sato<sup>234</sup>: Bei 8 Klassenräumen konnte diese Separationstechnik nicht angewendet werden. Laut den Autoren lag dies womöglich an der schwachen Schallisolation zu den anderen Klassenräumen, sodass auch die Sprache des Lehrers vom Nachbarklassenraum gut zu hören war.

Schönwälder<sup>235</sup> stellt die grundsätzliche Frage, ob die Trennung zwischen Nutz- und Störschall im Klassenraum überhaupt möglich ist:

*„Eine genaue Trennung war angesichts der unscharfen Definition von Nutz- und Störsignalen und der Mehrdimensionalität dieser Begriffe schwer möglich. Wir konnten aber zumindest viele Ereignisse im Unterricht a) als Geräuschquellen identifizieren und b) sie als notwendige Bestandteile des Unterrichts (funktionale Geräusche) oder mindestens als inhaltlich ohne Zusammenhang mit dem Unterricht (dysfunktionale) Geräusche einordnen.“<sup>236</sup>*

### **3.2.2. Zusammenhänge zwischen der Nachhallzeit, dem SNR, dem STI und der subjektiven Sprachverständlichkeit in Klassenräumen**

Es gibt eine große Anzahl an subjektiven Tests zur Sprachverständlichkeit. Einen Zusammenhang einiger dieser Tests sowie die genauen Prozente sind aus der ISO 9921:2003 zu entnehmen (siehe Abb. 98). Diese subjektiven Tests finden in zahlreichen Studien der Klassenraumakustik Anwendung und sind für die Überprüfung der Sprachverständlichkeit für Kinder als Ergänzung zu den objektiven STI-Werten von besonderer Bedeutung. So schreibt Kamps:

*„Diese Überprüfung und Ergänzung der objektiv gemessenen STI-Werte erscheint nicht zuletzt deshalb sinnvoll, da das kindliche Gehör eine größere Spanne von Frequenzen umfasst als das eines Erwachsenen, außerdem werden Kinder durch Nebengeräusche leichter gestört und abgelenkt.“<sup>237</sup>*

Die gleiche Aussage findet sich auch in MacKenzie<sup>238</sup>.

---

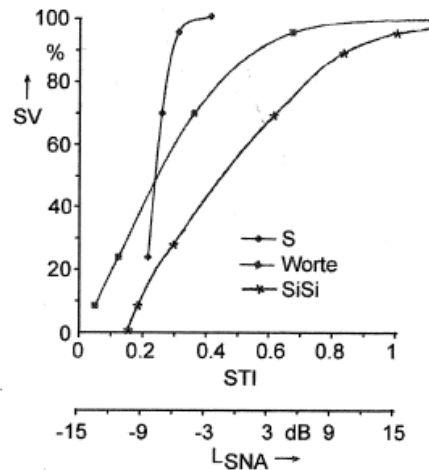
<sup>234</sup> Vgl. [SATO, S. 2071].

<sup>235</sup> [SCHOENWAELDER1].

<sup>236</sup> [Ebd., S. 53].

<sup>237</sup> [KAMPS].

<sup>238</sup> Vgl. [MACKENZIE, S. 15].

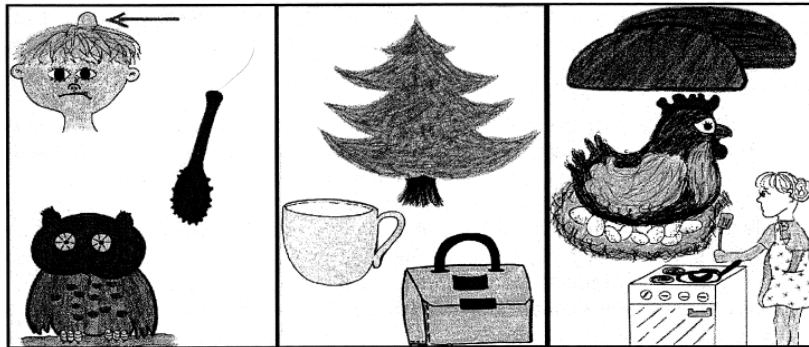


**Abb. 98:** Sprachverständlichkeit (SV in %) für sinnlose Silben (SiSi, CVC), PB-Wörter (Wörter) und einfache Sätze (S) in Abhängigkeit vom STI und  $L_{SN}$  in dB(A) nach ISO 9921:2003. [LAZARUS1, S. 305].

Für die Wortverständlichkeit bzw. Lautdiskrimination verwendet man in zahlreichen Studien über die Sprachverständlichkeit in Klassenräumen<sup>239</sup> einen Reimtest namens „Word Intelligibility by Picture Identification“, kurz WIPI. Dieser Test eignet sich besonders für Kinder, da er recht einfach aufgebaut ist und keine Schreib- und Lesefähigkeiten abverlangt werden. Der Test verlangt wenig Gedächtnisleistung und somit kann die Lautdiskrimination sehr genau gemessen werden. Der Test besteht aus 20 Bögen mit jeweils 6 Bildern, die 6 phonetisch ähnliche Wörter darstellen (Haus, Maus,...). Zu jeder Gruppe von 6 Bildern wird mit dem jeweiligen Wort ein Satz präsentiert. Das Kind soll dann das passende Bild auswählen. Im deutschsprachigen Raum und in den Studien der Carl Ossietsky-Universität Oldenburg wird der Oldenburger-Kinderreim-Test (OLKi) verwendet. Dieser Reimtest ist, wie Abb. 99 zeigt, ähnlich wie WIPI aus kindgemäßen zweisilbigen Wörtern aufgebaut. Der Test wurde ursprünglich zur Sprachverständlichkeitsmessung bei Kindern in Ruhebedingung für die audiologische Praxis entwickelt. Der Test kann für Untersuchungen der Raumakustik – insbesondere der Klassenraumakustik – verwendet werden. Ein Nachteil des OLKi, wie bei allen Reimtests, besteht darin, dass er für Messungen im Störgeräusch nur bedingt verwendbar ist, da die Sprachverständlichkeit nur relativ langsam mit steigendem Sprachpegel ansteigt und somit die Bestimmung der 50%-Schwelle für Sprachverständlichkeit nur mit großem Zeitaufwand möglich ist.<sup>240</sup>

<sup>239</sup> u. a. in [MACKENZIE].

<sup>240</sup> Vgl. [BRAND2, S. 203].



**Abb. 99:** Oldenburger Kinder-Reimtest. Anlaut Konsonant („Beule-Keule-Eule“), Inlaut Konsonant („Tanne-Tasse-Tasche“) und Inlaut Vokal („brate-Brote-brüte“)  
[BRAND2]

Die nun folgenden Studien sind der einschlägigen Literatur über die Klassenraumakustik entnommen:

Yacullo<sup>241</sup> untersuchte den Einfluss der Nachhallzeit und Lärm auf die Wortidentifikation. Dabei wurden 32 normal hörende Kinder im Alter von 8-9 Jahren Wörter in Räumen mit Nachhallzeiten von 0,0 und 0,8 s sowie mit einem Signal-Rauschabstand von +2dB und +6dB vorgespielt. Die höhere Nachhallzeit reduzierte die Sprachverständlichkeit um 40%, der geringere Signal-Rauschabstand reduzierte die Sprachverständlichkeit um 20 % (siehe Tabelle 25).

**Tabelle 25:** Sprachverständlichkeit von 32 Kindern (8-10 Jahren) in Abhängigkeit der Nachhallzeit und des SNR. [YACULLO, S. 238].

S/N	RT=0.0s		RT=0.8s	
	Mittelwert	$\sigma$	Mittelwert	$\sigma$
+6dB	85.4%	3.1	36.8%	14.4
+2dB	50.5%	5.7	16.9%	5.3

Die subjektiven Tests bestätigen also die Erkenntnis aus den objektiven Messungen und der Theorie, dass die Nachhallzeit der Parameter ist, der sich am meisten auf die Sprachverständlichkeit auswirkt!

Die Übersichtstafel der Silbenverständlichkeit nach Finitzo-Heiber<sup>242</sup> findet sich sehr häufig in der Literatur über die Klassenraumakustik:<sup>243</sup>

<sup>241</sup> Vgl. [YACULLO], auch zit. in [MACKENZIE, S. 4].

<sup>242</sup> Vgl. [FINITZO].

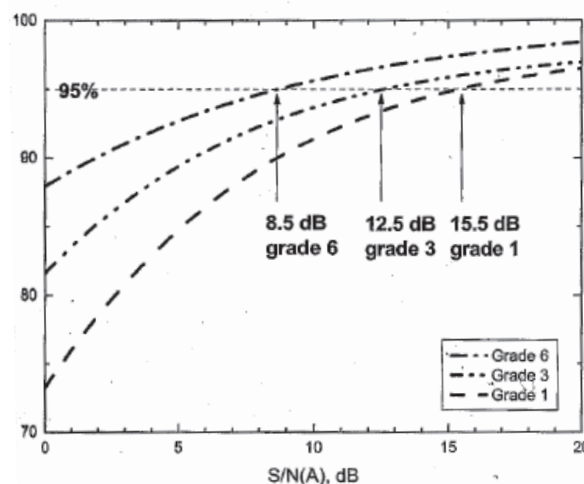
<sup>243</sup> Etwa bei [MACKENZIE, S. 4], [TENNHARDT, S. 42], [TIESLER7, S. 15], [OBERDOERSTER1, S. 34].

**Tabelle 26:** Silbenverständlichkeit in Abhängigkeit von der Nachhallzeit und dem Signal-Rausch-Abstand nach [FINITZO, S. 21]. 12 normalhörende Schulkinder (NH) zwischen 8 und 12 Jahren und 11 schwerhörige Schulkinder (SH) (mit Hörgerät!) zwischen 8 und 13 Jahren. (Einsilben-Wort-Diskrimination)

SNR in dB(A)	RT = 0 s		RT = 0.4 s		RT = 1.2 s	
	NH	SH	NH	SH	NH	SH
>45	94.5	83.0	92.5	74.0	76.5	45.0
12	89.2	70.0	82.8	60.2	68.8	41.2
6	79.7	59.5	71.3	47.7	54.2	27.0
0	60.2	39.0	47.7	27.8	29.7	11.2

Die Auswertungen zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen der Silbenverständlichkeit für Normalhörende zwischen der RT = 0 s und RT = 0,4 s, allerdings einen signifikanten Unterschied zwischen RT=0,4s und RT=1,2 s. Ab der oft zitierten Grenze für die Nachhallzeit von 0,5 s sinkt die Sprachverständlichkeit signifikant. Sogar extrem ruhige Klassenräume bei einer Nachhallzeit von 1,2 s sind für Schwerhörige ungeeignet. Bei einer RT = 0,4 s benötigen Schwerhörige einen SNR von mindestens 12 dB(A)<sup>244</sup>. Tennhardt<sup>245</sup> bewertet die Silbenverständlichkeit folgendermaßen: 0 bis 34% „schlecht“, 34 bis 48% „ungenügend“, 48 bis 67% „gut“, 67 bis 90% „sehr gut“, >90% „ausgezeichnet“. Er schlägt für fremdsprachige Schüler und Schwerhörige vor, die Bewertung um eine Stufe zu verschieben, so dass „gut“ erst bei 67% angesetzt wird.<sup>246</sup>

Bei Sprachverständlichkeitstests mit WIPI zeigt Bradley<sup>247</sup>, dass es einen Unterschied im Alter der Schüler gibt, der darin liegt, wie viel SNR sie benötigen, um eine Sprachverständlichkeit von 95% zu erreichen. Dabei zeigte sich, dass ein SNR von 15 dB für jüngere Kinder (6 Jahren) nicht ausreichend ist. Erst ab 23 bis 30 dB SNR stellt sich auch für jüngere Kinder 98% Sprachverständlichkeit ein (siehe Abb. 100).



**Abb. 100:** Sprachverständlichkeit (%) in Abhängigkeit vom SNR von 840 Schülern des Grades 1, 3 und 6 im Alter von 6, 8 und 11 Jahren.  $T_{60}$  zwischen 0.4 und 0.44, EDT zwischen 0.42 und 0.37 [BRADLEY4]

<sup>244</sup> So in [OBERDOERSTER1, S. 34].

<sup>245</sup> Vgl. [TENNHARDT].

<sup>246</sup> [Ebd.], auch zit. in [OBERDOERSTER1].

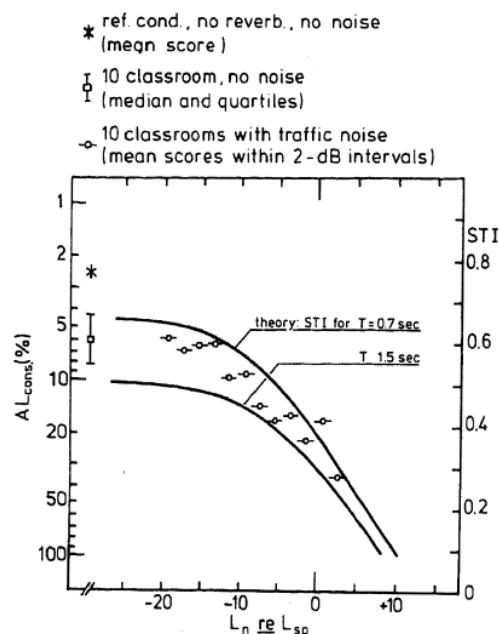
<sup>247</sup> Vgl. [BRADLEY4].

Die oft zitierte Studie von Sust<sup>248</sup> erwähnt, dass auch für Erwachsene (Zwei Muttersprachler und zwei Fremdsprachler) ein SNR von 13 dB für eine ausgezeichnete Silbenverständlichkeit (>90%) erforderlich ist. Diese Bedingungen müssen laut Sust ebenfalls für die Schule gelten. Sie vergleicht die Ergebnisse aus ihren Untersuchungen mit den Angaben für den Sprachübertragungsindex STI der ISO 9921. Die Tests wurden unter verschiedenen Hörbedingungen (und verschiedenen Nachhallzeiten) durchgeführt.

**Tabelle 27:** Zuordnung der Qualitätsskala zu STI und SNR Werten [SUST2]

Bewertung	ISO 9921		Sust & Lazarus	
	STI	SNR in dB	STI	SNR in dB
excellent	>0.75	>7.5	>0.95	>13
good	0.6 bis 0.75	3 bis 7.5	0.7 bis 0.95	6 bis 13
fair	0.45 bis 0.6	-1.5 bis 3	0.5 bis 0.7	0 bis 6
poor	0.32 bis 0.45	-6 bis -1.5	0.3 bis 0.5	-6 bis 0
bad	<0.32	< -6	< 0.3	< -6

Houtgast<sup>249</sup> hat mit einem Reimtest den Artikulationsverlust in 10 Klassenräumen ohne Verkehrsgeräusch und in 10 Klassenräumen mit Verkehrsgeräusch abgefragt. Die Klassenräume hatten ein Volumen von 170-200m<sup>3</sup> und hatten Nachhallzeiten zwischen 0,5 und 1,5 s. Seine Ergebnisse entsprachen ziemlich genau den theoretischen Werten, die er aus dem Zusammenhang des STI zum Alcons (siehe Abb. 96) gefunden hat. Er fand außerdem heraus, dass ab einem SNR < 15 dB in Klassenräumen die Sprachverständlichkeit (Alcons) schnell absinkt (siehe Abb. 101).



**Abb. 101:** Alcons in Abhängigkeit zum SNR ( $L_n$  re  $L_{sp}$ ) durch Sprachverständlichkeitstest. Die 2 durchgezogene Kurven sind theoretische Vorhersagen über den Zusammenhang zwischen ALcons und STI für eine Nachhallzeit von 0.7 s und 1.5 s. [HOUTGAST]

<sup>248</sup> Vgl. [SUST2].

<sup>249</sup> Vgl. [HOUTGAST].

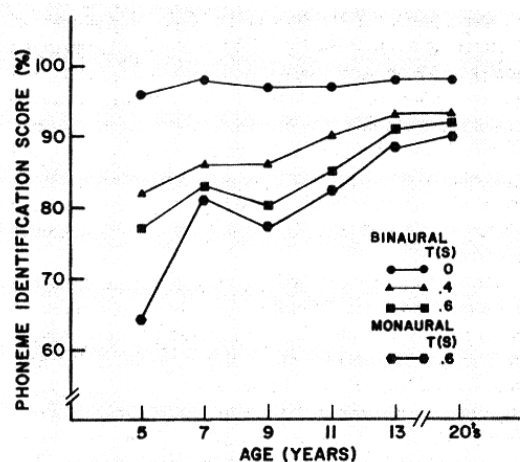
Auf eine alleinige Sprachverständlichkeitsverbesserung durch Lautsprecheranlagen ist laut ASA<sup>250</sup> zu verzichten, auch wenn Klatter<sup>251</sup> eine Verbesserung der Sprachverständlichkeit bei gleicher Sprechlautstärke am Hörplatz festgestellt hat, wie Abb. 59 S.69 zeigt. Dabei wurde 38 Kindern eine Kunstkopfaufnahme vorgespielt. Diese Aufnahme wurde in einem Klassenraum mit und ohne Lautsprecheranlage erstellt.

Die Acoustical Society of America (ASA) gibt in einem separat publizierten Dokument zwei Gründe gegen eine regelmäßige Anwendung von Lautsprechersystemen in Klassenräumen zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit an:

1. Lautsprechersysteme erhöhen den Lärmpegel im Klassenzimmer und stören somit die Nachbarklassenräume.
2. Lautsprechersysteme erfordern eine regelmäßige Wartung und ein Training der Benutzer. Schlecht gewartete Mikrofone und Lautsprecher reduzieren die Sprachkommunikation.

Whitlock<sup>252</sup> schreibt, dass Lautsprechersysteme richtigerweise nur den Lehrer-Schüler Sprachstrom verbessern, die Kommunikation Schüler-Lehrer und Schüler-Schüler jedoch nicht, welche in der modernen differenzierten Unterrichtsform jedoch üblich ist.

Die nun folgenden Studien betreffen die Nachhallzeit in den subjektiven Sprachverständlichkeitstest. Sie sind oft zitierte Studien in der Literatur der Klassenraumakustik. Die schon recht alte Publikation von Neuman<sup>253</sup> über die Sprachverständlichkeit von Kindern unterschiedlichen Alters, zeigt eindeutige Ergebnisse: Ähnlich wie beim SNR, benötigen jüngere Kinder niedrigere Nachhallzeiten als ältere. Ältere Kinder und Erwachsene können fehlende Information besser ergänzen. Die Silbenverständlichkeit ist signifikant abhängig von der Nachhallzeit. Das schlechteste Ergebnis brachte die monaurale Wiedergabe jeweils am rechten und linken Ohr.



**Abb. 102:** Durchschnittliche monaurale und binaurale Silbenverständlichkeit (Non-sense Silben) bei unterschiedlichen Nachhallzeiten in Abhängigkeit vom Alter der Kinder (N=25 Kinder) [NEUMAN]

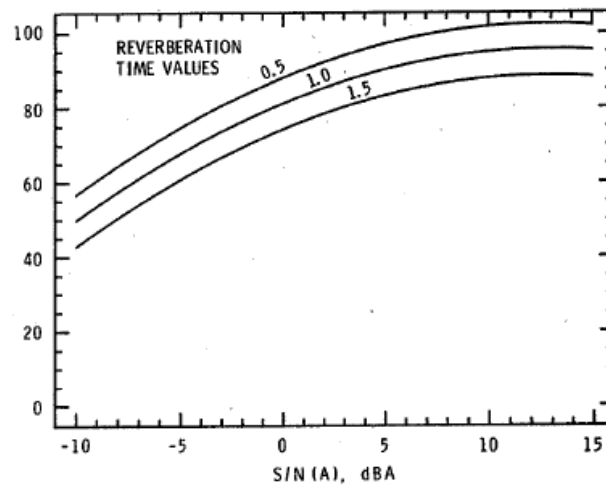
<sup>250</sup> Siehe dazu [ASA].

<sup>251</sup> Vgl. [KLATTE3, S. 82].

<sup>252</sup> Vgl. [WHITLOCK, S. 6].

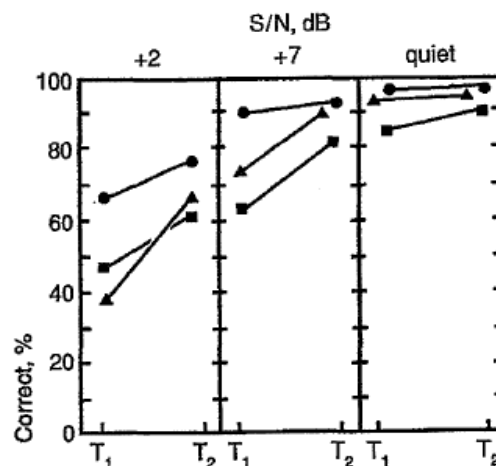
<sup>253</sup> Vgl. [NEUMAN], auch zit. in [SPRENG 2002].

Bradley<sup>254</sup> gab eine Nachhallzeit von 0,4 bis 0,5 in Klassenräumen als optimal an (siehe Abb. 103).



**Abb. 103:** Sprachverständlichkeit (%) in Abhängigkeit vom SNR und der NHZ von 243 Schüler 7. Grades (12-13 Jahren). Jeweils 4 Messungen wurden pro Schüler mittels WIPI durchgeführt. Dies ergaben 972 Sprachverständlichkeitstests. NHZ für 1000 Hz, gemessen in Klassenräumen von 253-529m<sup>3</sup> [BRADLEY2]

Pekkarinen<sup>255</sup> kam in einem Testklassenraum von 9,5 x 6,5 x 3,5 m zu dem Ergebnis, dass durch Glaswollabsorber an der Decke und der Rückwand eine Nachhallzeitreduktion von 1,7 auf 0,7 s zwischen 500 und 2000 Hz eine deutliche Verbesserung der Sprachverständlichkeit erbrachte.



**Abb. 104:** Verbesserung der Diskrimination zwischen  $T_1=1.7$  s und  $T_2=0.7$  s bei verschiedenen Lärmpegeln (S/N). Kreise = Satzverständlichkeit, Dreieck=Wortverständlichkeit, Quadrat=Wörter ohne Bedeutung. (N=152 Kinder, zwischen 15 und 16 Jahren) [PEKKARINEN1, S. 222]

<sup>254</sup> Vgl. [BRADLEY2].

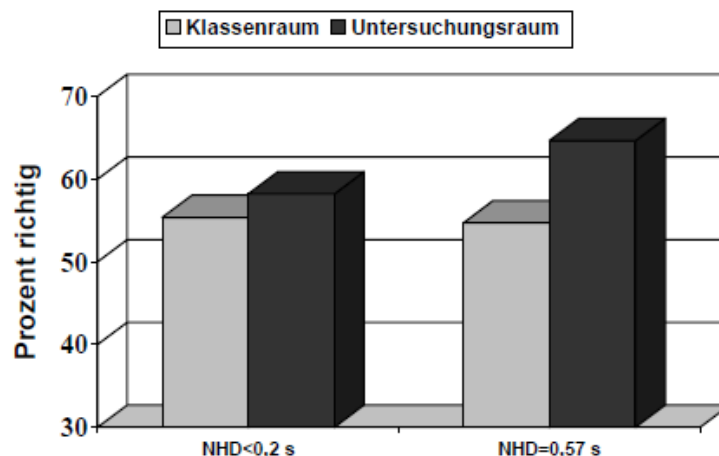
<sup>255</sup> Vgl. [PEKKARINEN1].

MacKenzie<sup>256</sup> stellte bei seinen Untersuchungen fest, dass in den Fällen, in denen die Testpersonen umgebende Klassenkameraden miteinander sprachen, der Prozentsatz der Wörter (WIPI), die korrekt verstanden wurden, deutlich abnahm. Diese Abnahme war in behandelten Klassenräumen ( $RT=0,4s$ ) deutlicher reduziert als in unbehandelten ( $RT=0,6 s$ ).

**Tabelle 28:** Sprachverständlichkeit in Klassenzimmer verschiedener Nachhallzeiten. Die Nachhallzeitwerte und die Sprachverständlichkeitswerte sind Mittelwerte. [MACKENZIE, S. 33]

Word Intelligibility by Picture Identification (70 Unterrichtsräume)		
	Unbehandelt ( $RT_{\text{besetzt}}=0,6$ )	Behandelt ( $RT_{\text{besetzt}}=0,4$ )
Klassenzimmer ruhig	94.2%	97.2%
Schüler arbeiten und sprechen	57.2%	67.0%

Zum Schluss dieses Kapitels sollen noch die Felduntersuchungen von Leistner<sup>257</sup> erwähnt werden. Er untersuchte, um wie viel sich die Lautdiskrimination (Tests waren an OIKI-angelehnt) verbessert, wenn die Schüler in einem raumakustisch günstigen Untersuchungsraum ( $T_{20}=0,49 s$ ) im Vergleich zu ihrem Klassenraum bei einer Nachhalldifferenz von  $<0,2s$  und  $0,57s$  getestet wurden. Nur die Nachhallzeitdifferenzen  $NHD >0,55s$  waren statistisch als signifikant zu betrachten (siehe Abb. 105 und 106).

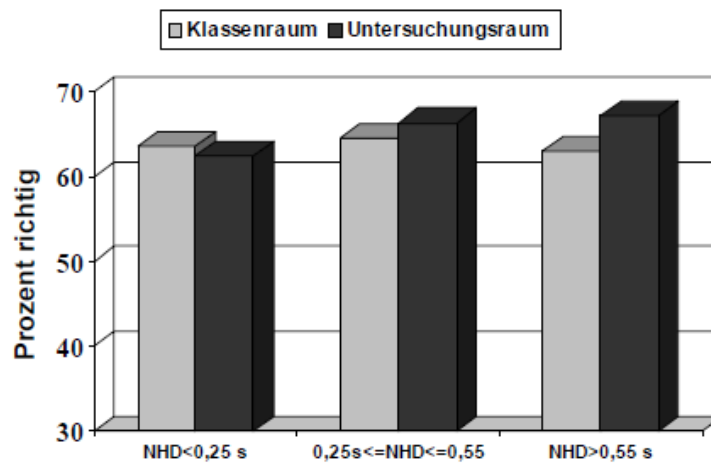


**Abb. 105:** Lautdiskriminationsleistung von 98 Erstklässler in Abhängigkeit der Differenz der Nachhallzeit ihres Klassenraums (grau) zu einem Untersuchungsraum mit der Nachhallzeit ( $T_{20}$ ) von  $0,49 s$  (schwarz). [LEISTNER, S. 100].

<sup>256</sup> Vgl. [MACKENZIE].

<sup>257</sup> Vgl. [LEISTNER].





**Abb. 106:** Lautdiskriminationsleistung von 398 Zweitklässler in Abhängigkeit der Differenz der Nachhallzeit ihres Klassenraums (grau) zu einem Untersuchungsraum mit der Nachhallzeit ( $T_{20}$ ) von 0,51 s (schwarz) [Ebd.]

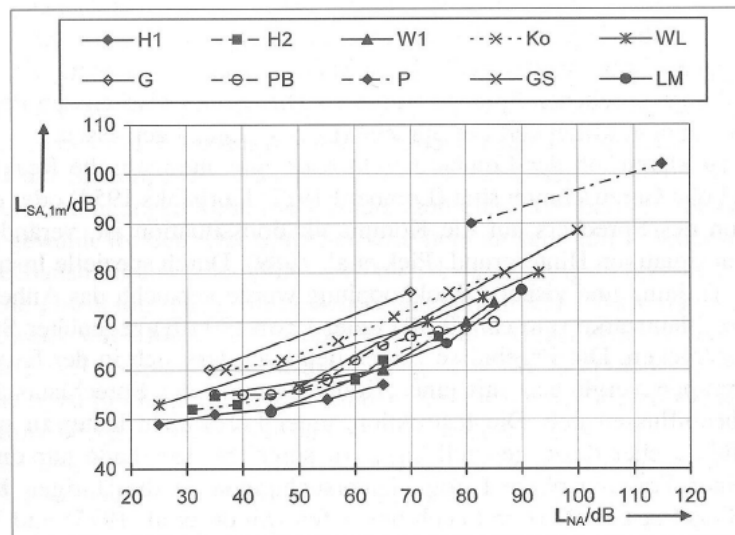
Zusammenfassend für das Kapitel 3.2. bleibt festzuhalten, dass die objektiven Messungen des STI oder die Angaben der Theorie nicht immer mit der Sprachverständlichkeit subjektiver Sprachverständlichkeitstests übereinstimmen. Insbesondere für die Klassenraumakustik ist das eine wichtige Erkenntnis, da laut Literatur das kindliche Gehör eine größere Spanne von Frequenzen umfasst und Kinder durch Nebengeräusche leichter gestört werden. Außerdem benötigen jüngere Kinder verbesserte raumakustische Bedingungen, um die gleiche Sprachverständlichkeit zu erreichen. Nur aus den subjektiven Sprachverständlichkeitstests der einzelnen Studien lassen sich also die raumakustischen Bedingungen für den Klassenraum ableiten. Die subjektiven Sprachverständlichkeitstests bestätigen aber die Erkenntnis aus den objektiven Messungen und der Theorie, dass die Nachhallzeit der Parameter ist, der sich am meisten auf die Sprachverständlichkeit auswirkt. Eine Nachhallverbesserung eines Raums durch Absorber wie er bei Leistner<sup>258</sup> vorkommt, bringt immer Leistungsverbesserungen in der Lautdiskrimination mit sich. Aus den Studien über die subjektive Sprachverständlichkeit von Kindern in Klassenräumen lassen sich folgende raumakustische Bedingungen für den Klassenraum ableiten:

- Nachhallzeiten von 0,5 bis 0,6 und maximal 0,7 sind zulässig. Eine optimale Nachhallzeit für die Sprachverständlichkeit liegt bei 0,5 s oder unter 0,5 s.
- SNR von 15 dB an jedem Sitzplatz ist optimal. Ein SNR von 13 dB ist laut einigen Studien erlaubt.

<sup>258</sup> Siehe [LEISTNER].

### 3.3. Der Lombard Effekt und die Sprechanstrengung von Lehrern und Lehrerinnen im Klassenraum

Der Lombard-Effekt wurde zum ersten Mal im Jahr 1911 von Etienne Lombard<sup>259</sup> erwähnt und beschreibt den Zusammenhang zwischen der Lautstärke der Stimme eines Sprechers und dem Umgebungsgeräusch. Lombard entdeckte, dass Menschen, die beidohrig mit Kopfhörer beschallt wurden, beim Sprechen anfangen zu schreien. Personen, die einseitig schwerhörig waren, zeigten den Effekt nur, wenn sie am gesunden Ohr beschallt wurden. Lazarus schreibt, dass man davon ausgehen kann, dass diese Reaktion des Sprechers ein eher unbewusst stattfindender Regulationsprozess ist, der weniger direkt mit dem Geräusch als mit dem Hören und Verstehen der eigenen Stimme verbunden ist. Der Sprecher kontrolliert also seine Sprechweise durch Rückmeldung (Rückkopplung) aus dem Gehörten. Lazarus hat eine Reihe von Studien grafisch zusammengefasst.<sup>260</sup>



**Abb. 107:** Schallpegel gesprochener Sprache  $L_{SA,1m}$  in 1m Abstand vom Sprecher bei Umgebungsgeräuschen unterschiedlichen Pegels ( $L_{NA}$ ). [LAZARUS1].

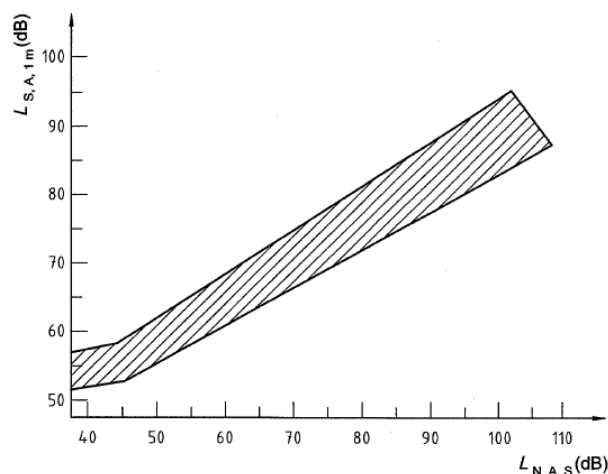
<sup>259</sup> [LOMBARD].

<sup>260</sup> Vgl. [LAZARUS1].

**Tabelle 29:** Lombardeffekt nach einer Quellenauswahl von [LAZARUS1]. Die Werte sind den einzelnen Quellen entnommen.

Autoren	Abkürzung	Anstieg (LS/LN)
[KORN]	Ko	0.4
[PICKETT]	P	0.4
[WEBSTER]	W1	0.6
[GARDNER]	G	0.36
[PEARSONS], siehe [OLSEN]	PB	0.6
[WALTZMAN] <sup>261</sup>	WL	0.375
[HEUSDEN]	H1 / H2	0.3 / 0.5
[LAZARUS3]	LM	0.55
[GUSKI2] <sup>262</sup>	GS	0.66

Lazarus<sup>263</sup> fasst zusammen, dass ab einem Störgeräuschpegel von  $L_N = 40-50$  dB(A) der Sprechpegel um 0,3 bis 0,6 dB pro 1 dB Geräuschpegelanstieg steigt. ÖNORM EN ISO 9921 gibt einen ähnlichen Zusammenhang, wie Abb. 108 zeigt:



**Abb. 108:** Zusammenhang zwischen dem Sprechpegel und dem Störgeräuschpegel am Ort des Sprechers (in 1 Meter Entfernung) nach [ÖENORM EN ISO 9921]

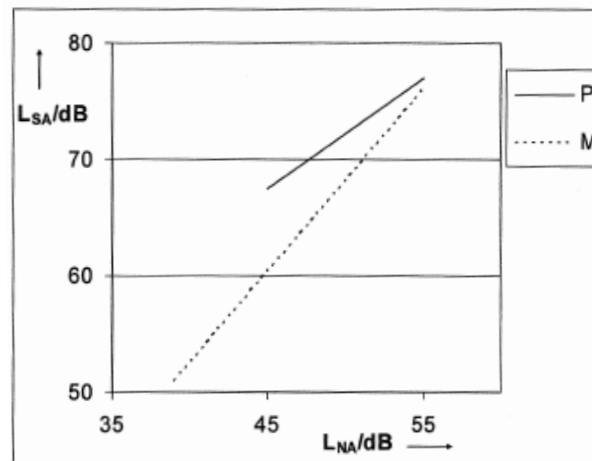
Interessanterweise steigt der Sprechpegel laut Lazarus bei Lehrern und Lehrerinnen etwas höher. Der Anstieg bei Lehrer und Lehrerinnen liegt bei 1 dB pro 1 dB Geräuschpegelanstieg bzw. 0,57-0,72 dB pro dB Geräuschpegelanstieg.<sup>264</sup>

<sup>261</sup> Ist der Durchschnitt, berechnet aus der Tabelle von [WALTZMAN, S. 584].

<sup>262</sup> Andere Quelle als in [LAZARUS1, S. 83], jedoch mit ähnlichen Ergebnissen für die Steigung.

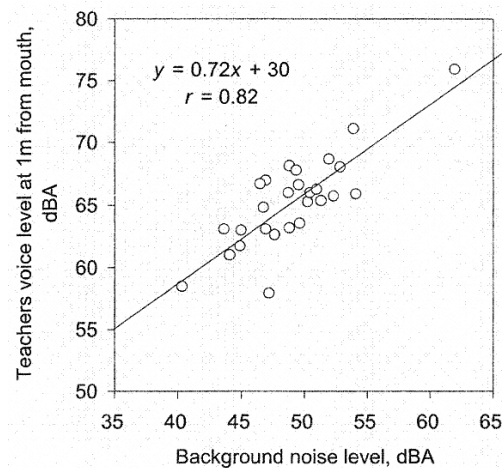
<sup>263</sup> Vgl. [Ebd.].

<sup>264</sup> [Ebd.].



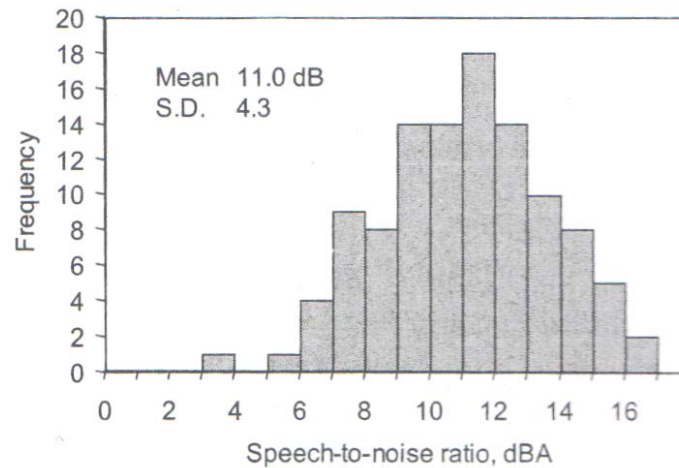
**Abb. 109:** Sprechpegelanstieg von Lehrern und Lehrerinnen in 1 Meter Entfernung für Klassenräume mit üblichen Unterrichtsgeräuschen ( $L_{NA}$ ), nach [PEARSONS] aus [OLSEN] (P): 1dB pro  $dB_{NA}$  (20 KR) und [MARKIDES] (M): 0,57-0,6 dB pro  $dB_{NA}$  (12 KR) [LAZARUS, S. 529]

Sato<sup>265</sup> hat den Lombardeffekt bei 27 Lehrern in 41 Klassenräumen untersucht. In Abb. 110 wird jeweils der Durchschnittslärmpegel von 4 Mikrofonpositionen im Raum dargestellt. Er entdeckte eine Steigung des Sprechpegels von 0,72 dB pro dB Lärmpegel in einem Meter Entfernung vom Mund des Lehrers gemessen. Dabei stellte er fest, dass die Lehrer immer einen Durchschnitt von 11 dB SNR für 4 Mikrofonpositionen im Raum einhalten wie Abb. 111 zeigt.



**Abb. 110:** Sprachpegel von 27 Lehrer/innen in 1 Meter Entfernung in Abhängigkeit vom Lärmpegel in der Klasse. [SATO, S. 2072]

<sup>265</sup> Vgl. [SATO].



**Abb. 111:** Häufigkeitsverteilung von durchschnittlichen SNR-Werten von 4 Mikrofonpositionen in 27 arbeitenden Klassenräumen [SATO, S.2071]

Da dieser Effekt automatisch abläuft, reden die Lehrer immer mit Stimmaufwand von „erhoben“ bis „laut“ (Bewertung nach ÖNORM EN ISO 9921 in 1 Meter Entfernung siehe Tabelle 31). Die Sprechpegel von Lehrer und Lehrerinnen einiger wichtiger Studien aus der Tabelle 4 der Einleitung sind hier nochmals zusammengefasst:

**Tabelle 30:** Mittlere Sprachpegel und mittlerer Hintergrundgeräuschpegel (während Unterrichts) in dB(A) für 20 KR in 2 Schulen, mit Standardabweichungen [PEARSONS, S.19, S.46] nach [OLSEN].

	Hintergrundgeräusch	Sprache 1m	Sprache 2m	Sprache 7m
Schule I	48 ( $\sigma = 2$ )	69 ( $\sigma = 4$ )	62 ( $\sigma = 5$ )	57 ( $\sigma = 4$ )
Schule II	51 ( $\sigma = 2$ )	73 ( $\sigma = 4$ )	66 ( $\sigma = 5$ )	62 ( $\sigma = 6$ )

Gundermann<sup>266</sup> haben im Jahr 1964 durch Messungen der Sprachlautstärke von 100 Lehrer und Lehrerinnen festgestellt, dass der Sprachpegel im Durchschnitt zwischen 60 und 70 DIN-phon in 4 Meter (15 Minuten-Messung) Entfernung vom Lehrer oder der Lehrerin liegt. Bei erhöhter Lautstärke im Unterricht steigt der Sprachpegel um 10 DIN-phon. Markides gibt einen durchschnittlichen Sprachpegel von 57,5 ( $\sigma=8,39$ ) dB(A) in 2 Meter vom Lehrer an (13 KR). Sato stellt einen durchschnittlichen Sprachpegel von 65,3 dB(A) ( $\sigma=3,69$ ) von 27 Lehrer/innen in 1 Meter Entfernung fest.<sup>267</sup>

Man sieht in Abb. 109 und 110, dass sich beim Grenzwert von 35 dB ein Lehrersprachpegel von Minimum 55 dB einstellt. Diese ist eine entspannte Sprechanstrengung.

<sup>266</sup> [GUNDERMANN]

<sup>267</sup> [MARKIDES], [SATO]

**Tabelle 31:** Stimmaufwand in Abhängigkeit vom Sprechpegel bei 1 m nach [OENORM EN ISO 9921, S. 11]

Stimmaufwand	LSA,1m
Sehr laut	78
Laut	72
Erhoben	66
Normal	60
Entspannt	54

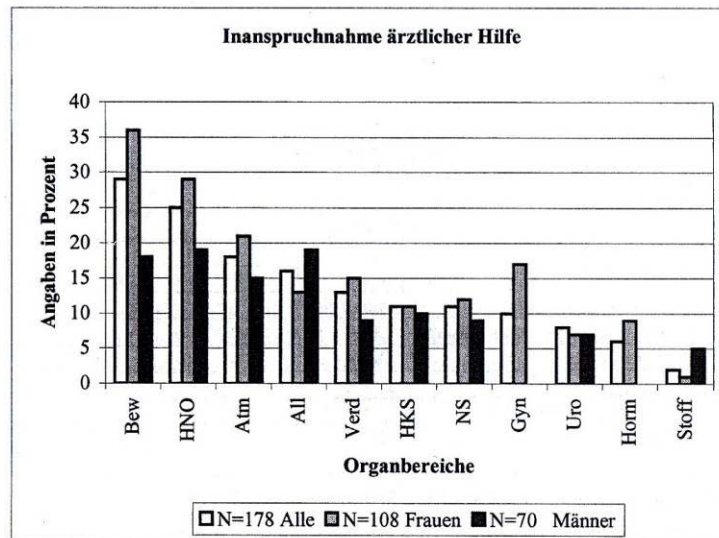
Es stellt sich nun die Frage, ob Lehrer/innen vermehrt Hals- und Stimmlippenprobleme aufweisen. In der Studie „LehrerIn 2000“ wurden 6861 Lehrer und Lehrerinnen aus Österreich ersucht, Fragen über körperliche Beschwerden zu beantworten. Die Erkenntnisse über Hals- und Stimmprobleme sind hier zusammengefasst:

- Jede/r neunte LehrerIn hat ständig Probleme mit dem Hals oder der Stimme, weitere 61% geben an, zeitweise unter diesen Beschwerden zu leiden. Das bedeutet, dass fast drei Viertel der LehrerInnen in dieser Hinsicht Beschwerden verspüren.
- Fast die Hälfte (48%) war wegen dieser Beschwerden auch bereits in ärztlicher Behandlung. Ein Fünftel der Befragten (20%) nimmt gegen Hals- und Stimmprobleme Medikamente ein.
- Das am weitesten verbreitete Gesundheitsproblem der LehrerInnen - Hals und Stimmprobleme - geht nach Meinung der Befragten zum größten Teil auf den Lehrberuf zurück. Insgesamt 68%, also mehr als zwei Drittel, sind der Überzeugung, dass die Belastung des Halses und der Stimme zumindest teilweise oder auch überwiegend mit den Anforderungen des Unterrichtens zusammenhängt.<sup>268</sup>

Berndt<sup>269</sup> fand in einer Umfrage heraus, dass die Beschwerden im HNO-Bereich und die Erkrankungen der Atmungsorgane die häufigsten Beschwerden sind, nach den Störungen des Bewegungsapparates bei denen Lehrern und Lehrerinnen ärztliche Hilfe aufsuchen. Diese Studie untersuchte die psychophysische Verfassung von Lehrer/innen unabhängig vom Lombard-Effekt. Diese Ergebnisse sind somit nicht direkt mit dem Lombard-Effekt in Verbindung zu setzen, denn auch andere Einflüsse (Erkältungen,...) können einen möglichen Grund sein. Der Lombard-Effekt ist jedoch in Verbindung mit der Nachhallzeit und somit dem Lärmpegel im Klassenraum (siehe Kapitel 2.2.1) dafür verantwortlich, dass Lehrer und Lehrerinnen mit erhöhtem Stimmaufwand reden müssen.

<sup>268</sup> [SORA, S.167 bis S.174].

<sup>269</sup> Vgl. [BERNDT2].



**Abb. 112:** Inanspruchnahme ärztlicher Hilfe nach prozentualer Häufigkeit von 178 Lehrer und Lehrerinnen. Bew = Störungen des Bewegungsapparates (Rücken, Schulter, Nacken), HNO=Beschwerden im HNO-Bereich, Atm=Erkrankungen der Atmungsorgane, All=Allergien, Verd=Beschwerden im Bereich der Verdauungsorgane, HKS=Herz-Kreislauf-System, NS=Nervensystem, Gyn=Gynäkologische Beschwerden, Uro=Nieren, Blase und Prostata Beschwerden, Horm=Hormonelle Störungen, Stoff=Stoffwechselfprobleme [BERNDT2]

Die Studie der Heriot-Watt Universität<sup>270</sup>, in der 126 Lehrer und Lehrerinnen teilnahmen, zeigt, dass bei denjenigen Lehrkräften, die in raumakustisch ungünstigen Klassenräumen unterrichteten, ein höherer Anteil an Krankenständen festzustellen war als bei den Kollegen ( $p=0,0134$ ), die in besseren Räumen tätig waren. Halsprobleme werden als Hauptursache genannt. Nur 5,5% aller Lehrer/innen geben an, dass sie noch nie Probleme mit dem Hals oder der Stimme hatten. 68,5% geben an, dass sie zeitweise oder oft an Hals- oder Stimmproblemen leiden. Lehrer, die in Klassenräumen mit niedriger Decke unterrichten, leiden weniger unter Hals- oder Stimmproblemen als ihre Kollegen, die in Klassenräumen mit hoher Decke unterrichten ( $p=0,0187$ ). Die Klassenräume mit hohen Decken stammen laut Studie aus der Viktorianischen Zeit!

Der Lombard-Effekt ist also nicht nur als rein wissenschaftlicher Effekt zu betrachten, sondern hat womöglich gesundheitliche und somit ökonomische Folgen. Man kann annehmen, dass dieser Effekt in raumakustisch ungünstigen Klassenräumen durch den höheren Lärmpegel ausgeprägter auftritt als in raumakustisch günstigeren Klassenräumen mit einem niedrigeren Lärmpegel. Im Kapitel 2.2.1. wurde deutlich, dass eine Reduzierung der Nachhallzeit von 0,1 s eine lineare Reduktion des Geräuschpegels von 1-2 dB(A) zur Folge hat. Würde man die Nachhallzeit eines Klassenraums von 0,75 s auf 0,35 s reduzieren, so hätte dies eine tatsächlich gemessene Reduzierung um 6 bis 8 dB(A) durch Veränderung des Sozialverhaltens der Schüler zur Folge. Der Lombard Effekt von 0,57 dB(A) bis 1 dB(A) pro 1dB(A) Lärmpegel hat zur Folge, dass die Lehrer mit einem um maximal 6 dB(A) reduzierten Sprechpegel sprechen würden, was einer Reduzierung des Sprachaufwandes nach ISO 9921 um eine Stufe entspricht (siehe Tabelle 31). Wird der Lärmpegel von 35 dB(A) erreicht, so sinkt die Sprechanstrengung der Lehrer/innen auf einen Wert von 55 dB(A). Sie könnten dann mit einem „entspannten“ Stimmaufwand sprechen.

<sup>270</sup> Vgl. [MACKENZIE, S.37].

### 3.4. Aktuelle Messergebnisse über Klassenraumakustik in der Literatur

Das folgende Kapitel fasst die Ergebnisse von einigen umfangreichen Studien über die raumakustische Qualität von Schulen zusammen. Es werden nur Studien mit Auswertungen mehrerer Klassenräume und Schulen zitiert. Dieses Kapitel soll den aktuellen Stand der raumakustischen Qualität von Schulen darstellen und als Vergleich zu den im Kapitel 4 und 5 durchgeführten Messungen dienen.

Tabelle 32: Werte raumakustischer Parameter aus Klassenraummessungen verschiedener Autoren

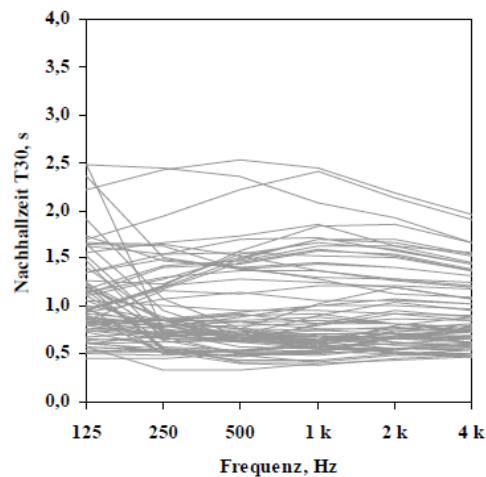
Autoren	Nachhallzeit		Sprachverständlichkeit		Länder	Bemerkungen:
	Leer	Besetzt	Leer	besetzt		
[PEKKARINE N2]	0.7 ( $\sigma=0.3$ ) Min: 0.3 Max: 2.4	0.5 ( $\sigma=0.1$ ) Min: 0.3 Max:1.9	RASTI: 0.68( $\sigma=0.07$ ) Min: 0.44 Max: 0.81	RASTI 0.72( $\sigma=0.05$ ) Min:0.6 Max:0.81	SF	Durch-schnitts- volumen: 160m <sup>3</sup> ( $\sigma=60$ ) 31 KR
[MACKENZIE , S. 23]	0.7 / 0.4	0.6 / 0.4	STI: 0.601 / 0.7	STI: 0.501 / 0.7	GB	Unbehandelt/be- handelt 70 Schulen
[SCHOENWALDER1] <sup>271</sup>	0.81-1.36 0.48 0.42-0.74 0.55-0.87 0.75	0.74-0.97 0.43 0.38-0.64 0.44-0.75 0.64	STI: 0.56-0.7 0.78 0.71-0.8 0.7-0.76 0.68	STI: 0.63-0.7 0.8 0.71-0.81 0.7-0.81 0.71	D	Schule 1 Schule 2 Schule 3 Schule 4 Schule 5
[SCHICK2]	≈0.4-2.2  ≈0.6-3.5				D	182 KR, 30 Schulen 39 Flure, Foyers, Treppenhäuser, 22 Schulen

Kirchner<sup>272</sup> hat in seinen Studien 168 Klassenräume von 32 Berliner Schulen sowie 14 Flure untersucht. Dabei stellte er fest, dass die oft intensiver möblierten Grundschulen geringere Nachhallzeiten aufweisen als Oberschulen.

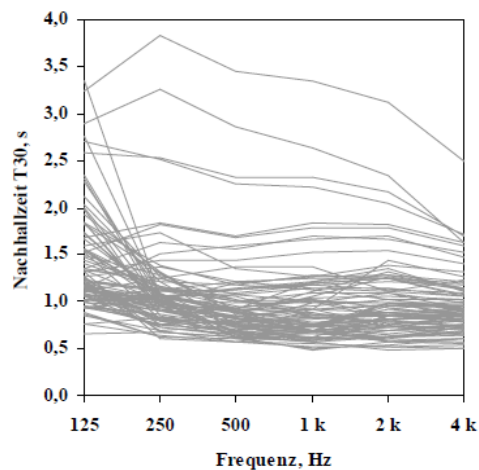
<sup>271</sup> Werte nach [LAZARUS1].

<sup>272</sup> [KIRCHNER1], [KIRCHNER2].





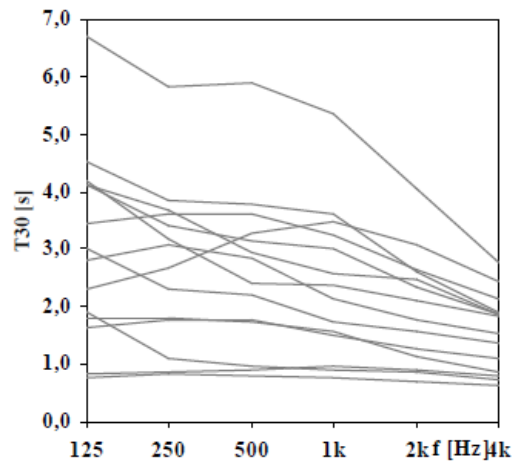
**Abb. 113:** Nachhallzeiten von Klassenräumen in Berliner Grundschulen (75 KR), unbesetzter Zustand  
[KIRCHNER1]



**Abb. 114:** Nachhallzeiten von Klassenräumen in Berliner Oberschulen (91 KR), unbesetzter Zustand.  
[KIRCHNER1]

Abb. 113 und 114 zeigen die für Klassenräume üblichen Nachhallzeitverläufe. Man kann die Nachhallzeitverläufe in zwei Gruppen aufteilen: eine Gruppe (A) von Klassenräumen hat einen konstanten Nachhallverlauf über den Frequenzbereich bzw. sinkt leicht bei tieferen und höheren Frequenzen. Die andere Gruppe (B) zeigt eine typische Steigung der Nachhallzeit zu den tiefen Frequenzen (125 Hz, 250 Hz), die auch Oberdörster<sup>273</sup> erwähnt. Die meisten Klassenräume gehören zur Gruppe B.

<sup>273</sup> [OBERDOERSTER1, S. 70].



**Abb. 115:** Nachhallzeiten von 14 Fluren in Berliner Schulen  
[KIRCHNER2]

In einigen Studien wurde eine zusätzliche raumakustische Sanierung vorgenommen und die Wirkung dieser Maßnahme gemessen:

**Tabelle 33:** Werte raumakustischer Parameter aus Klassenraummessungen verschiedener Autoren nach einer raumakustischen Sanierung

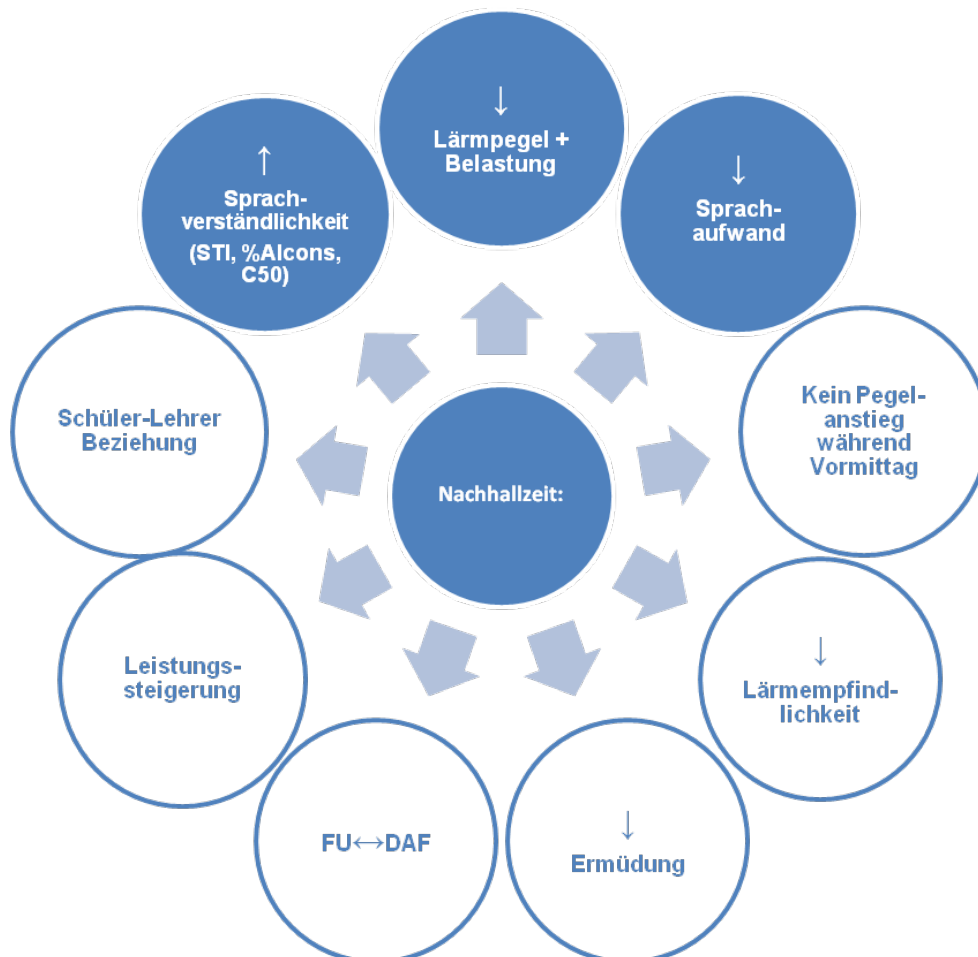
Autoren	Vor Sanierung		Nach Sanierung		Land	Bemerkungen
	Leer	Besetzt	Leer	besetzt		
[PEKKAR INEN1]		1.7		0.7	KS	T in s von 637 KR
[MACKE NZIE, S. 23]	0.7 0.601 44.7 10.8	0.6 0.501 55.5 13.7	0.4 0.7 40.1 4.6	0.4 0.7 46.5 4.6	GB	T in s STI LN in dB(A) ALcons
[SCHOEN WAEDEL R1] <sup>274</sup>	1.4 0.95 0.88 0.55 0.7 0.68	0.6 0.8 0.8 0.64 0.7 0.71	0.4 0.4 0.4 0.84 0.85 0.85	0.3 0.3 0.3 0.88 0.86 0.87	D	KR 1, T in s KR 2, T KR 3, T KR 1, STI KR 2, STI KR 3, STI

Dieses Kapitel zeigt, dass die in Klassenräumen gemessene Nachhallzeiten aus verschiedenen Studien zwischen 0,4 s und 2,4 s liegen. Nach einer Sanierung liegen die Nachhallzeiten zwischen 0,4s und 0,7 s. Es gibt, was die raumakustische Qualität von Schulen betrifft, keinen Unterschied zwischen den Ländern laut den Ergebnissen der oben zitierten wissenschaftlichen Literatur.

<sup>274</sup> Werte nach [LAZARUS1].

### 3.5. Zusammenfassung zum Einfluss der Nachhallzeit im Klassenraum

Folgende Abbildung zeigt eine Zusammenfassung der positiven Effekte, die durch eine Reduzierung der Nachhallzeit erreicht werden können:



**Abb. 116:** Positive Effekte durch Reduzierung der Nachhallzeit im Klassenraum. Einige Effekte, die in der Abbildung transparent dargestellt sind, wurden in den Studien bei einer Reduzierung der Nachhallzeit auf unter 0,5s beobachtet.

- Reduzierung des Lärmpegels (Arbeits- und Grundgeräuschpegel) im Klassenraum. Reduzierung der Lärmbelastung der Lehrerin oder des Lehrers (Senken der Herzfrequenz auf bis zu 3 Schläge pro Minute) sowie Reduzierung der subjektiven Lärmbelastung der Schüler und Schülerinnen. (Kapitel 2.2.1)
- Zunahme der Sprachverständlichkeit (siehe Kapitel 3.2.1). STI-Werte, %Alcons-Werte und C50-Werte verbessern sich durch Abnahme der Nachhallzeit. Die Verbesserung der subjektiven Sprachverständlichkeit ist abhängig vom Alter und von der Hörfähigkeit der Schüler (siehe Kapitel 3.2.2, siehe auch S.37), sowie vom SNR im Klassenraum.
- Reduzierung des Sprachaufwands des Lehrers oder der Lehrerin. (siehe Kapitel 3.3.)

- Die Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels für nacheinander folgende Unterrichtsstunden über den Vormittag ist deutlich reduziert oder bleibt aus. (Abb. 25 und 26 S.29 bis S.30; Tabelle 13 und 14 S. 60)
- Reduzierung der Lärmempfindlichkeit des Lehrers oder der Lehrerin: Reduzierung der Steigung der Herzfrequenz in Abhängigkeit vom Lärmpegel im Klassenraum. (Reduzierung der Herzfrequenzreaktion auf den Stressor „Lärm“) (Abb. 50, S. 64)
- Ausgleich zwischen Ermüdungs- und Aktivierungsphasen (Herzfrequenz-Trendwerte) der Lehrerin oder des Lehrers (siehe Kapitel 2.2.) (Abb. 48 und Abb. 49 S. 63)
- Reduzierung oder Ausbleiben der Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels bei Wechsel zu differenzierten Arbeitsformen (Abb. 19, 20, 21 S. 27 und S. 28)
- Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Schüler (siehe Kapitel 2.2.2.)
- Verbesserung der Lehrer-Schüler-Beziehung („kommunikative Klima“) (siehe S. 65 bis 68)

## 4. Untersuchungen zur äquivalenten Absorptionsfläche von Schüler und Schülerinnen.

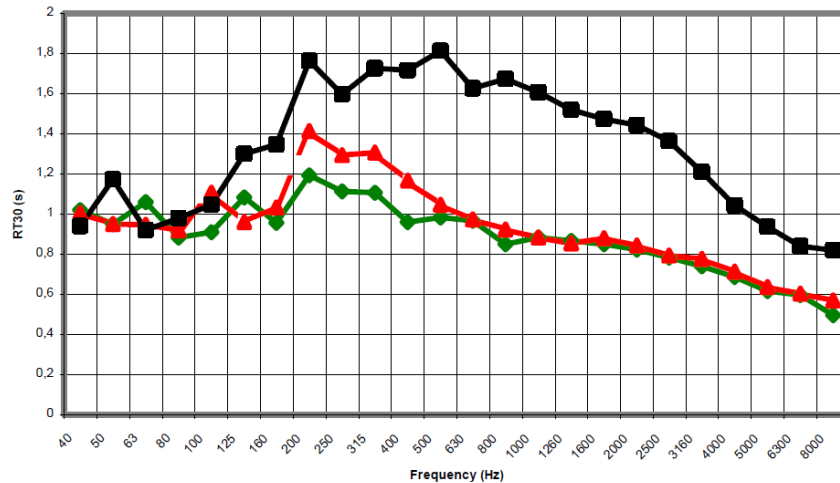
### 4.1. Fragestellungen

Für diese Diplomarbeit wurden in der Grundschule meiner Geburtsstadt Wiltz/Luxemburg raumakustische Messungen mit WINMLS 2004 durchgeführt. Es sollte die raumakustische Qualität der Räume ermittelt sowie die äquivalente Absorptionsfläche der Schüler und Schülerinnen im Klassenraum ermittelt werden. Es wurden in 14 leeren Klassenräumen, 8 besetzten Klassenräumen ( $\approx 15$  Schüler) und 14 Klassenräumen, in denen die Sitzplätze mit Bühnenmolton überdeckt waren, die Nachhallzeit und andere raumakustische Parameter ermittelt. Die Grundschule in Wiltz besteht aus zwei Gebäuden, ein Altbau (AG) aus den 50er Jahren (in der Abbildung rechts) und ein Neubau (NB) (links) aus dem 21. Jh. Die Hörsamkeit in den Klassenräumen und dem Flur im Neubau war wesentlich besser.



**Abb. 117:** Grundschule Wiltz (L). Altbau oben-rechts aus dem Jahr 1951 und Neubau aus dem Jahr 2002 unten.

Die Idee, Bühnenmolton zu verwenden, stammt aus Grazer Untersuchungen<sup>275</sup>, in denen sich herausgestellt hat, dass sich Bühnenmolton zur Simulation von Publikum eignet. In den Abbildungen der Publikation ist sichtbar, dass die Simulation meist zu den tiefen Frequenzen schlechter wird, d. h. die Nachhallzeit des Bühnenmoltons weicht von der Nachhallzeit des besetzten Raumes ab.



**Abb. 118:** Auditorium (Hörsaal XII) der Technischen Universität Graz: unbesetzt (schwarz), besetzt (grün), Bühnenmolton (rot) [BIRNSTINGL]

Die Messergebnisse wurden mit den Forderungen der DIN 18041 verglichen, die auch in Luxemburg gültig ist. Für jeden Raum wurde die äquivalente Absorptionsfläche ermittelt, die erforderlich ist, um die nach der DIN 18041 verlangte Sollnachhallzeit zu erreichen. Es wurde die äquivalente Absorptionsfläche des Bühnenmoltons und der Schüler ermittelt und mit Ergebnissen aus der Literatur verglichen. Auf eine genaue altersabhängige Analyse der Absorptionsfläche der Kinder wurde im Verlauf der Messungen verzichtet, da nicht genügend besetzte Klassenräume mit Schülern gleichen Altersgrades zur Verfügung standen. Es wurde außerdem die Nachhallzeit von 5 Fluren ermittelt, worin 2 Flure sich als raumakustisch günstiger herausstellten. Während einer Woche wurden Schallpegelmessungen während der Pausen durchgeführt. Es sollte festgestellt werden, ob in einem Flur mit einer niedrigeren Nachhallzeit auch ein geringerer Schallpegel gemessen werden kann, bzw. ob sich die Schüler in einem solchen auch leiser verhalten. Es wurde darauf geachtet, dass für jeden Flur und für alle unterschiedlichen Pausenzeiten (Morgen, Mittag, Nachmittag) Pegelmessungen durchgeführt wurden.

Am Schluss wurde geprüft, ob sich die Formel für den Artikulationsverlust (Alcons) bestehend aus der Nachhallzeit, der Entfernung Mikrofon-Lautsprecher, dem Volumen und dem Bündelungsgrad der Schallquelle als Vorhersagemodell für den besetzten Klassenraum eignet. Dabei wurde angenommen, dass der Bündelungsgrad der Schallquelle während der Messung mit und ohne Schüler gleich bleibt.

Für einen Sonderunterrichtsraum gelten strengere Bedingungen für die Nachhallzeit laut DIN 18041. In diesem wurden zwei verschiedene Mengen an Bühnenmolton verwendet, um die jeweilige äquivalente Absorptionsfläche zu ermitteln und mit der äquivalenten Absorptionsfläche der Schüler zu vergleichen.

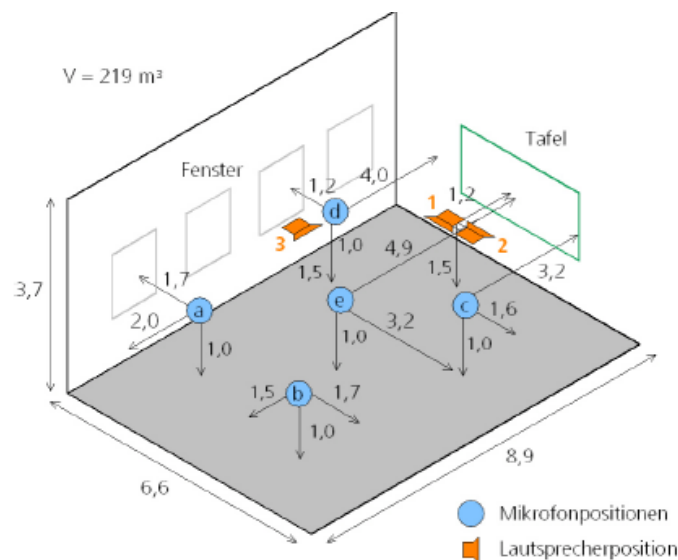
<sup>275</sup> Vgl. [BIRNSTINGL].

## 4.2. Beschreibung des Messverfahrens und der Messtechnik

Die Messungen wurden mit folgendem Equipment durchgeführt:

- 2 DPA 4006 TL Kugelmikrofone
- Software WINMLS von Morset Sound Development
- Genelec 1030A Lautsprecher
- RME Fireface 400: Fire-wire Interface complete Audio solution.
- Digital Sound Level Meter MS6701 konform mit IEC 651 Typ 2 der Firma MASTECH (Kalibrierung im Jahr 2009).

Die Mikrofonpositionen sollten gemäß OENORM EN ISO 3382 aufgestellt werden. Dabei sollte das Modell von Leistner<sup>276</sup> dienen, in dem die Lautsprecherpositionen möglichst gut die Stehpositionen der Lehrer und Lehrerinnen nachahmen sollten.



**Abb. 119:** Mikrofon- und Lautsprecherpositionen nach [LEISTNER]. Angaben in Meter.

Es muss ein Abstand  $d_{\min}$  des Mikrofons zu der Schallquelle von:

$$d_{\min} = 2\sqrt{\frac{V}{cT}}$$

eingehalten werden, wobei  $c$  die Schallgeschwindigkeit in Meter pro Sekunde ist. Die Messpunkte müssen mindestens eine halbe Wellenlänge der tiefsten Messfrequenz (1,37 Meter) voneinander entfernt sein. Außerdem müssen die Mikrofone mindestens 1 Meter von einer reflektierenden Fläche entfernt sein. Es stellte sich heraus, dass das Modell von Leistner aus mehreren Gründen nicht anwendbar war: Die zur Tafel gerichteten Lautsprecherposition 2 war nicht anwendbar, da die Tafel in jedem Klassenraum des Altbaus durch die direkte Anregung in Schwingung geriet. In jedem Klassenraum gab es außer der Tafel noch eine große Anzahl anderer Flächen und Materialien, die in Schwingung gerieten und die

<sup>276</sup> Vgl. [LEISTNER].

eigentliche Nachhallzeitmessung stören konnten. Einige dieser Gegenstände habe ich in den folgenden Abbildungen fotografiert:

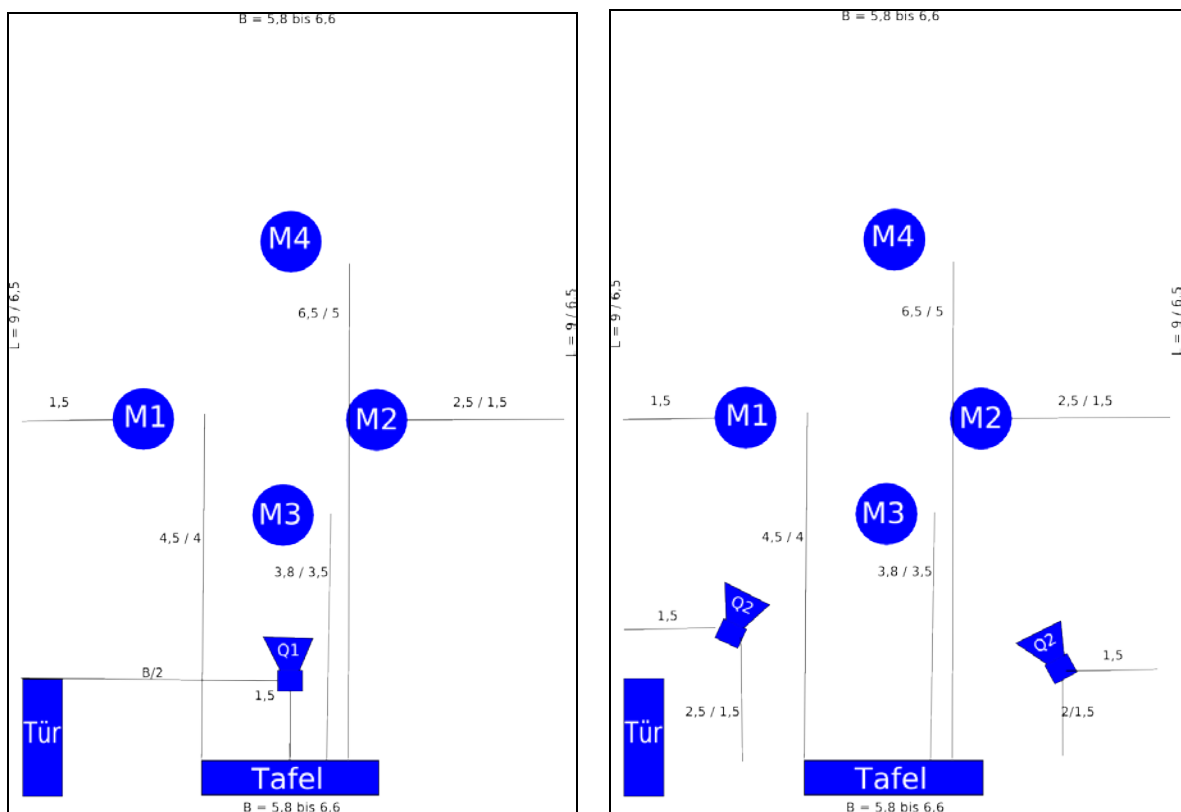


**Abb. 120:** Resonierende Gegenstände in Klassenräumen: Tafel, Heizkörper und Lampen.

Die Position der Bänke in den Klassenräumen konnte in U-form, in Frontalunterrichtsform oder in Gruppenarbeitsform angeordnet sein, was die Anwendung des Modells von Leistner für die Mikrofonpositionen und Lautsprecherpositionen ebenfalls unmöglich machte. Außerdem standen in vielen Klassenräumen rechts, links oder hinter den Schülern kleine Bibliotheken und Sofas bzw. Computer und Spielecken.

Nach langer Betrachtung der Klassenräume wurde folgendes Modell mit 4 Mikrofonpositionen und 2 Lautsprecherpositionen (siehe Abbildung 121) aufgestellt. Dieses Modell war ein Kompromiss für alle Klassenräume, weil einerseits pro besetztem Klassenraum nur 20 Minuten Zeit für die Messungen zur Verfügung standen und andererseits die Klassenräume sich untereinander stark unterschieden. Auf die 3. Lautsprecherposition nach dem Modell Leistner wurde verzichtet, da diese in den vorliegenden Klassenräumen fast nie vorkam und weil sich an dieser Position oft Gegenstände, Schulbänke oder Plakate befanden. Da die Anzahl der Schüler im Klassenraum im Durchschnitt 15 betrug, saßen die Schüler vor allem im vorderen Teil der Klassenräume. Weitere Mikrofonpositionen waren somit unter Einhaltung der Bedingungen der OENORM EN ISO 3382 nicht möglich und hätten sich ausserhalb der Sitzplätze der Schüler befunden. Die Mikrofonposition M2 musste von reflektierenden Flächen wie Regale und elektronische Geräte mindestens 1 Meter Abstand haben, deshalb wurde der Abstand oft auf 2,5 Meter von der Wand verlängert.

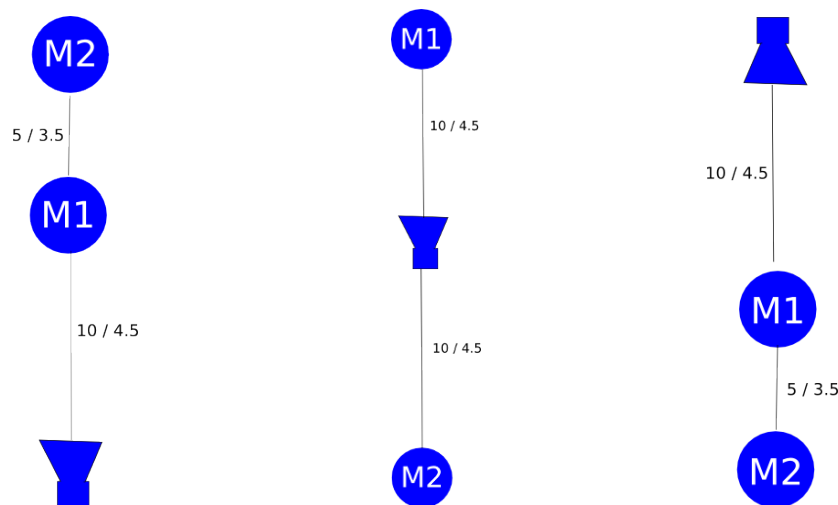




**Abb. 121:** Grundmodell der Positionen des Lautsprechers und der Mikrofone M1 bis M4 eines großen/kleinen Klassenraumes für die Vorstudie. Je nachdem wo das Pult stand wurde entweder der Lautsprecher nach rechts oder links verschoben. Angaben in Meter. Große KR haben eine Länge von +/- 9 m, kleine KR eine Länge von +/- 6,5 m. Distanzangaben von der Tafel gemessen. Die Tafel war 15 bis 20 cm von der Wand entfernt.

Für kleine Klassenräume (Länge von 6,5 m) gelten die verkürzten Distanzangaben. Die „großen“ Klassenräume besaßen eine Länge von +/- 9 Meter. Für den Sonderunterrichtsraum wurde ein gesondertes Modell angewendet.

Die Messungen pro Mikrofonposition wurden dreimal durchgeführt. Für die Nachhallzeitmessungen in den Fluren die ein sehr diffuses Schallfeld aufwiesen, wurde folgendes Modell verwendet:



**Abb. 122:** Drei Lautsprecherpositionen und die jeweiligen Mikrofonpositionen für die Messungen in Fluren. Der Lautsprecher wurde immer mittig im Flur platziert. Angaben in Meter für Altbau/Neubau des Schulgebäudes. Für den Neubau gelten die verkürzten Distanzangaben. Wegen der Verkleinerung der Abbildungen, sind die Distanzverhältnisse nicht berücksichtigt worden!

Die Höhe aller Mikrofone lag bei 1,2 Meter, welche der Ohrdurchschnittshöhe bei Sitzposition entspricht. Der Lautsprecher besaß eine Höhe von 1,5 Meter. Es wurde wegen der Einfachheit in der Handhabung kein Dodekaederlautsprecher verwendet. Dies widerspricht zwar der ISO 3382 Norm, nach dieser eine Kugelschallquelle verwendet werden muss, jedoch verwenden viele andere Studien Lautsprecher (auch Leistner) unter anderem auch mit der Begründung, dass ein Lautsprecher eine Bündelung aufweist und somit eine grobe Annäherung an die Bündelung eines menschlichen Sprechers darstellt. Nach einem Vergleich der Bündelung des Lautsprechers, die innerhalb eines Toningenieurprojektes am Institut für Breitbandkommunikation gemessen wurde, mit der gemessenen Bündelung von menschlichen Sprechern und Sprecherinnen aus der Literatur, stellt man allerdings fest, dass dies nur eine sehr grobe Annäherung ist, da ein Lautsprecher viel gebündelter abstrahlt als ein menschlicher Sprecher.

Die Messungen wurden mit einem einzelnen Sweep mit 85 dB oder 83 dB SPL in Klassenräumen und einem einzelnen Sweep mit 90 dB SPL in Fluren durchgeführt. Neuere Studien der Klassenraumakustik wie Oberdörster<sup>277</sup> verwendeten ebenfalls die einfache Sweep-Messung, während alle älteren Studien<sup>278</sup> aus den 90er Jahren die MLS-Messung verwendeten. Die Unterschiede, Vorteile und Nachteile der beiden Messungen sind in zahlreichen Studien aufgezählt, die von der Audio Engineering Society (AES) in den Journals (JAES) oder in den Convention Papers publiziert wurden. Speziell für Klassenraummessungen hat San Souci<sup>279</sup> folgende Unterschiede zusammengestellt:

- Esweep liefert im Allgemeinen einen höheren SNR als MLS

<sup>277</sup> Vgl. [OBERDOERSTER].

<sup>278</sup> So z. B. [MACKENZIE], u. a.

<sup>279</sup> [SANSOUCI].

- Esweep ist empfindlicher für Umgebungsgeräusche und eignet sich weniger für Messungen im besetzten Zustand.
- MLS ist weniger tolerant für Varianz (Zeitvarianz) und harmonische Verzerrungen. Bewegung im Schallfeld oder sogar Temperaturänderungen können Verzerrungen hervorrufen, die sich als Rauschen bemerkbar machen.

Bei den durchgeführten Messungen konnte festgestellt werden, dass die Sweep-Messung gegenüber der MLS-Messung auch praktische Vorteile hat: Während einem langsamen Sweep sind alle resonierenden Flächen und Gegenstände gut lokalisierbar während bei MLS-Rauschen alle Flächen gleichzeitig zu schwingen beginnen und diese somit nicht mehr einzeln trennbar sind. Der Signalpegel sollte anfangs 67.5 dB(A) in einem Meter Entfernung betragen, was laut MacKenzie<sup>280</sup> repräsentativ für die Sprechlautstärke von Lehrer/innen ist. Leider war dieser Pegel für die Messungen zu niedrig, da WINMLS einen höheren SNR benötigte. Als Pegel wurde von mir 83 dB und 85 dB SPL gewählt, bei denen sichergestellt war, dass der Pegel bei einem Meter Entfernung unter 90 dB(A) lag und somit eine Hörschädigung von Schüler/innen mit Sicherheit ausgeschlossen werden konnte.

In jedem Klassenraum (außer in Sonderklassenräumen) wurde die gleiche Menge an Bühnenmolton mit 300 g/m<sup>2</sup> und 100 % Baumwolle verwendet. Der Bühnenmolton hat eine Dicke von 0,5 cm und ist schwerentflammbar.

**Tabelle 34:** Fläche des verwendeten Moltons

	Tuch 1 (L x B) in m	Tuch 2	Tuch 3	Tuch 4	Tuch 5	Tuch 6
	4,57 x 2,05	4,13 x 0,97	4,46 x 1,94	2,66 x 1,94	4,25 x 1,00	4,1 x 0,97
<b>Gesamt</b>	35,41 m <sup>2</sup>					

Der Bühnenmolton wurde gleichmäßig und einmal gefaltet auf den Stühlen und Schulbänken verteilt, wie folgende Fotos zeigen:

<sup>280</sup> Vgl. [MACKENZIE].



**Abb. 123:** Platzierung des Bühnenmoltons in Klassenräumen

Die Schallpegelmessungen während der Pausen wurden in der Mitte der Flure durchgeführt.

Für die Ermittlung der raumakustischen Qualität der Klassenräume wurde der räumliche Mittelwert über alle Messungen und Mikrofon- und Lautsprecherpositionen gemäß ISO 3382 ausgerechnet. Diese Auswertung möchte ich durch die Aussagen von Leistner<sup>281</sup> begründen, dass sich die einzelnen Mikrofonpositionen im Klassenraum wenn überhaupt nur sehr wenig unterscheiden. Daraus kann man folgern, dass es im Klassenraum keinen akustisch bevorzugten Übertragungsweg gibt. Nur  $D_{50}$  und  $C_{50}$  können sich bei 125Hz von Position zu Position leicht unterscheiden.

In den Ferien wurden die Schulbänke für eine Großreinigung anders platziert als üblich. Es musste deshalb eine Veränderung des Schallfeldes alleine durch die veränderte Position der Bänke befürchtet werden, welche somit eine genaue Analyse des  $A_{l,cons}$  und der äquivalenten Absorptionsfläche der Schüler unmöglich gemacht hätte. Es wurden deshalb zusätzlich vor dem Eintreten der Kinder nochmals im unbesetzten Zustand an den genauen Positionen Messungen durchgeführt, um diese dann im besetzten Zustand mit den genau gleichen Mikrofonpositionen zu wiederholen. So war ein genauer Vergleich zwischen beiden Zuständen möglich und es konnte die äquivalente Absorptionsfläche der Kinder bzw. der  $A_{l,cons}$  im besetzten und unbesetzten Zustand berechnet werden.

---

<sup>281</sup> Vgl. [LEISTNER].

### 4.3. Messungen und Auswertungen

Es wurden zur Auswertung der Messungen folgende Formeln verwendet:

Sollnachhallzeit in Unterrichtsräumen laut DIN 18041:

$$T_{soll} = \left( 0,32 \log \left( \frac{V}{m^3} \right) - 0,17 \right) s$$

Noch erforderliche äquivalente Absorptionsfläche um  $T_{soll}$  zu erreichen:

$$A_{zus} = 0,161 \cdot V \cdot \left( \frac{1}{T_{soll}} - \frac{1}{T_{ist}} \right) [m^2]$$

Äquivalente Absorptionsfläche der Schüler/Molton:

$$A_{Schüler/Molton} = 0,161 \cdot V \cdot \left( \frac{1}{T_{Schüler/Molton}} - \frac{1}{T_{leer}} \right) [m^2]$$

Artikulationsverlust % Alcons:

$$Al_{cons} \approx 200 \cdot \frac{r_{LH}^2 \cdot T^2}{\gamma \cdot V} [\%]$$

Bündelungsgrad:

$$\gamma \approx 200 \cdot \frac{r_{LH}^2 \cdot T^2}{V \cdot Al_{cons}}$$

Formel Farrel-Becker<sup>282</sup>:

$$\%Al_{cons} = 170,5405e^{-5,419 \cdot STI}$$

---

<sup>282</sup> [BRUEL&KJAER], [DAVIS], [LAZARUS1, S.277]

### 4.3.1. Messwerte der Grundschule Wiltz/Luxemburg

Für die Bewertung der Klassenräume nach DIN 18041 wurden die Klassenräume im leeren Zustand gemessen und die äquivalente Absorptionsfläche der vorgesehenen Anzahl an Kinder eingerechnet. Die äquivalente Absorptionsfläche pro Schüler wurde der DIN 18041 entnommen:

**Tabelle 35:** frequenzabhängige äquivalente Absorptionsfläche  $A$  in  $m^2$  von Schüler in Unterrichtsräumen an Holztischen ( $3 m^2 / Person$ ) nach DIN 18041

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
0,05	0,33	0,43	0,32	0,38	0,37

Die Angaben der äquivalenten Absorptionsfläche nach DIN 18041 werden durch Messungen im besetzten Zustand verifiziert.

$$A_{leer} = 0,161 \cdot \frac{V}{T_{leer}} [m^2]$$

$$T_{MitSchüler} = 0,161 \cdot \frac{V}{A_{leer} + A_{Schüler}} [s]$$

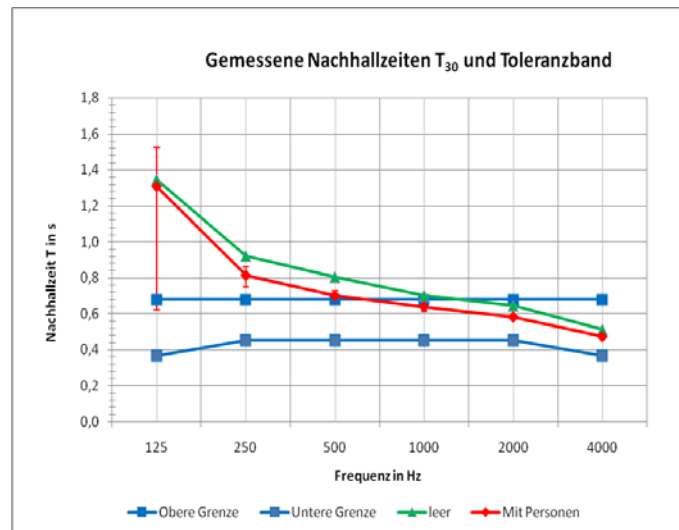
Die Seiten 134 bis 159 zeigen die detaillierten Messergebnisse. Ein erstes Diagramm zeigt die Nachhallzeit (räumlicher Mittelwert), ein zweites Diagramm zeigt die noch erforderliche äquivalente Absorptionsfläche um die Sollnachhallzeit zu erreichen. Auf Seite 160 sind die Messergebnisse zusammengefasst und interpretiert worden.

## Raum 2 (Altes Gebäude, EG)

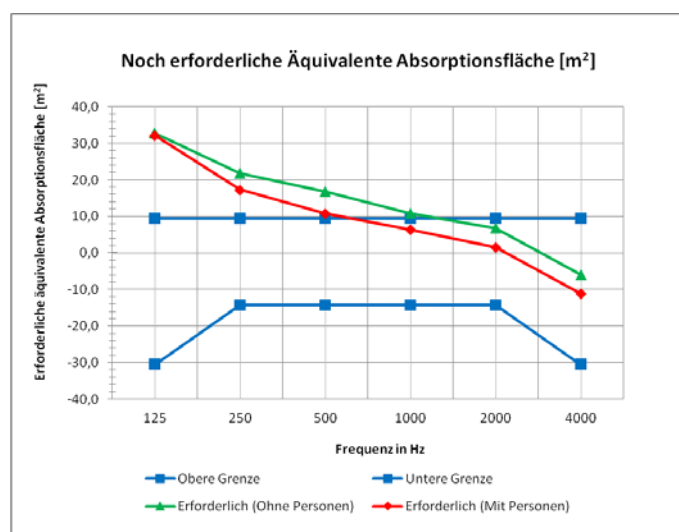
Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (siehe Abb. 121). Lautsprecherposition 2 wurde nach links verschoben.



Grundgeräuschpegel [dBA]	30,5
Feuchtigkeit	45 %
Temperatur	21 °C
Messpegel [dB SPL]	83
Anzahl Schüler	14
L x B x H [m]	9 x 6,5 x 3,4
Volumen [m <sup>3</sup> ]	198,9
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,57 s



**Abb. 124:** Gemessene Nachhallzeit, Min-Max-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)



**Abb. 125:** Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband (Personen eingerechnet)

Tabelle 36: Raumakustische Gütemaße

Raum 2 (AG) leer								
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub> [s], gemittelt</b>		1,35	0,92	0,81	0,70	0,64	0,51	0,45
$\sigma$		0,194	0,039	0,017	0,012	0,009	0,005	0,005
max		1,58	0,98	0,84	0,72	0,66	0,52	0,45
min		0,63	0,84	0,77	0,67	0,63	0,50	0,44
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,27	0,90	0,81	0,71	0,66	0,51	0,44
	$\sigma$	0,000	0,009	0,012	0,005	0,005	0,005	0,000
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,26	0,93	0,82	0,69	0,65	0,51	0,44
	$\sigma$	0,005	0,017	0,012	0,012	0,008	0,000	0,000
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,30	0,89	0,80	0,71	0,63	0,51	0,45
	$\sigma$	0,005	0,009	0,009	0,008	0,005	0,005	0,000
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,23	0,96	0,79	0,70	0,65	0,51	0,45
	$\sigma$	0,017	0,016	0,008	0,009	0,000	0,005	0,000
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,57	0,89	0,78	0,70	0,64	0,52	0,45
	$\sigma$	0,008	0,005	0,005	0,008	0,000	0,005	0,000
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,50	0,95	0,81	0,70	0,65	0,52	0,45
	$\sigma$	0,005	0,005	0,008	0,005	0,005	0,005	0,000
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,43	0,87	0,82	0,69	0,64	0,51	0,44
	$\sigma$	0,005	0,021	0,005	0,000	0,005	0,000	0,005
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,23	0,98	0,81	0,71	0,63	0,51	0,45
	$\sigma$	0,422	0,005	0,008	0,005	0,005	0,000	0,005
<b>EDT [s]</b>		1,12	0,80	0,72	0,67	0,56	0,42	0,37
$\sigma$		0,19	0,09	0,09	0,05	0,00	0,08	0,06
max		1,48	0,96	0,92	0,73	0,70	0,57	0,47
min		0,81	0,68	0,59	0,56	0,31	0,27	0,25
<b>C50 [dB]</b>		-2,06	1,50	2,85	4,28	6,48	8,40	9,28
$\sigma$		2,35	1,55	0,82	1,40	1,77	1,43	1,38
max		2,30	3,90	4,20	6,40	9,80	10,60	11,40
min		-4,60	-0,90	1,50	2,10	2,10	4,20	4,70
<b>D50 [%]</b>		38,83	58,08	65,79	72,33	80,96	86,96	89,04
$\sigma$		13,04	8,42	4,10	6,34	6,31	4,17	3,58
max		64,00	71,00	72,00	81,00	90,00	92,00	93,00
min		25,00	46,00	59,00	62,00	62,00	72,00	75,00
<b>STI</b>		0,72						
$\sigma$		0,02						
max		0,76						
min		0,69						
<b>RASTI</b>		0,72						
$\sigma$		0,03						
max		0,77						
min		0,69						
<b>%Alcons</b>		3,45						
$\sigma$		0,41						
max		3,90						
min		2,80						

Tabelle 37: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen							
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
T <sub>30</sub> [s]		1,31	0,81	0,70	0,64	0,58	0,47
$\sigma$		0,185	0,030	0,013	0,010	0,007	0,004
max		1,53	0,86	0,73	0,65	0,59	0,48
min		0,62	0,75	0,67	0,61	0,57	0,46
Max - T <sub>30</sub>		0,22	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01
T <sub>30</sub> - min		0,69	0,06	0,03	0,03	0,01	0,01

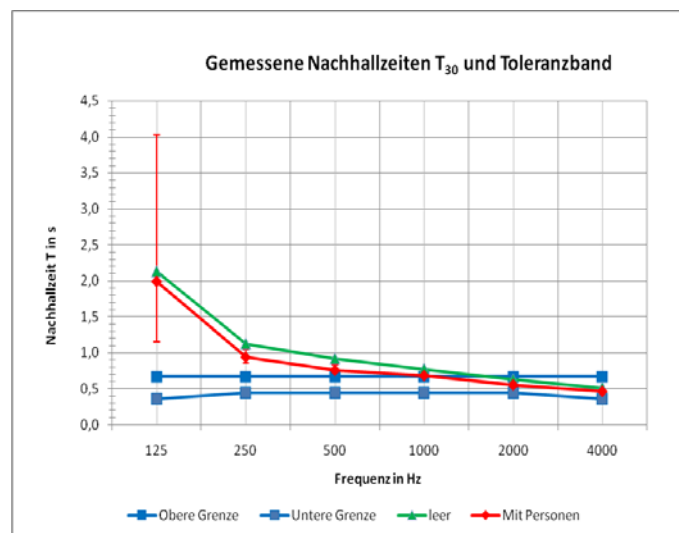


## Raum 4 (Altes Gebäude, EG)

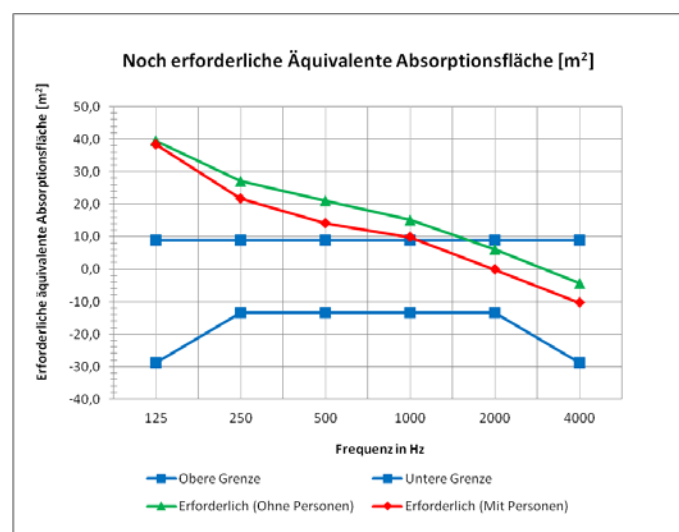
Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (siehe Abb. 121). Lautsprecherposition 2 wurde nach links verschoben.



Grundgeräuschpegel [dBA]	33,3
Feuchtigkeit	49 %
Temperatur	20 °C
Messpegel [dB SPL]	83
Anzahl Schüler	16
L x B x H [m]	9 x 6,2 x 3,3
Volumen [m <sup>3</sup> ]	184,14
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,55 s



**Abb. 126:** Gemessene Nachhallzeit, Min-Max-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)



**Abb. 127:** Noch erforderliche Absorptionsfläche um  $T_{soll}$  zu erreichen und Toleranzband (Personen eingerechnet)

Tabelle 38: Raumakustische Gütemaße

Raum 4 (AG) leer		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub> [s], gemittelt</b>		2,13	1,13	0,92	0,77	0,63	0,51	0,48
$\sigma$		1,112	0,065	0,047	0,026	0,017	0,007	0,006
max		4,52	1,28	1,03	0,85	0,66	0,53	0,49
min		1,19	1,01	0,83	0,74	0,59	0,50	0,47
M1Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,84	1,21	0,92	0,77	0,65	0,51	0,49
	$\sigma$	0,008	0,057	0,009	0,012	0,008	0,000	0,005
M2Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,74	1,17	0,85	0,75	0,62	0,52	0,48
	$\sigma$	0,009	0,017	0,017	0,009	0,005	0,005	0,000
M3Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	4,29	1,09	1,01	0,79	0,63	0,51	0,49
	$\sigma$	0,260	0,005	0,026	0,009	0,005	0,005	0,005
M4Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	3,71	1,02	0,90	0,76	0,60	0,52	0,49
	$\sigma$	0,242	0,008	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
M1Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,49	1,12	0,93	0,76	0,64	0,51	0,48
	$\sigma$	0,005	0,012	0,012	0,009	0,008	0,000	0,005
M2Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,34	1,07	0,88	0,75	0,60	0,51	0,47
	$\sigma$	0,008	0,009	0,000	0,012	0,009	0,005	0,005
M3Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,45	1,19	0,95	0,81	0,64	0,51	0,48
	$\sigma$	0,012	0,014	0,009	0,029	0,005	0,000	0,005
M4Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,19	1,14	0,91	0,80	0,63	0,51	0,48
	$\sigma$	0,005	0,009	0,008	0,012	0,005	0,000	0,000
<b>EDT [s]</b>		1,26	1,00	0,89	0,73	0,54	0,45	0,42
$\sigma$		0,48	0,13	0,06	0,04	0,00	0,09	0,07
max		2,56	1,30	1,05	0,83	0,65	0,60	0,56
min		0,84	0,78	0,82	0,67	0,32	0,26	0,31
<b>C50 [dB]</b>		-1,63	0,75	1,49	3,93	6,63	7,98	8,28
$\sigma$		2,16	1,43	1,13	0,88	1,43	1,34	0,79
Max		0,70	3,20	3,40	5,40	9,50	10,60	10,10
Min		-5,50	-1,50	-1,30	2,60	5,30	6,20	7,10
<b>D50 [%]</b>		40,88	54,04	58,54	71,00	81,67	85,92	86,92
$\sigma$		11,31	8,11	6,63	4,09	4,46	3,35	2,04
max		54,00	68,00	69,00	78,00	90,00	92,00	91,00
min		22,00	42,00	42,00	65,00	77,00	81,00	84,00
<b>STI</b>		0,70						
$\sigma$		0,02						
max		0,74						
min		0,67						
<b>RASTI</b>		0,70						
$\sigma$		0,02						
max		0,75						
min		0,67						
<b>%Alcons</b>		3,78						
$\sigma$		0,37						
max		4,50						
min		3,10						

Tabelle 39: : Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen		125	250	500	1000	2000	4000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub> [s]</b>		1,99	0,94	0,76	0,68	0,55	0,47
$\sigma$		0,964	0,045	0,032	0,020	0,013	0,006
max		4,03	1,04	0,83	0,74	0,58	0,48
min		1,15	0,86	0,70	0,66	0,53	0,45
Max - T <sub>30</sub>		2,04	0,11	0,08	0,06	0,03	0,01
T <sub>30</sub> - min		0,84	0,08	0,06	0,03	0,03	0,01

### Raum 13 (Altes Gebäude, 1. Stock)

Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (siehe Abb. 121). Lautsprecherposition 2 wurde nach links verschoben.



Grundgeräuschpegel [dBA]	32
Feuchtigkeit	40 %
Temperatur	25 °C
Messpegel [dB SPL]	85
Anzahl Schüler	16
L x B x H [m]	9 x 6,3 x 3,3
Volumen [m <sup>3</sup> ]	187,1
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,56 s

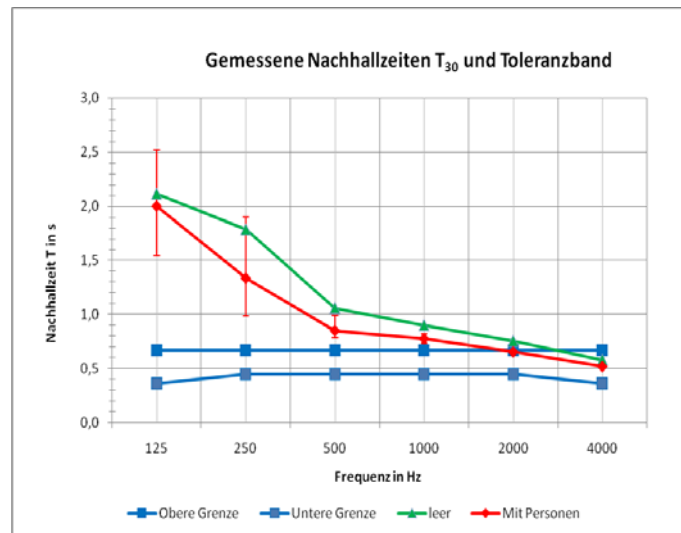


Abb. 128: Gemessene Nachhallzeit, Min-Max-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)

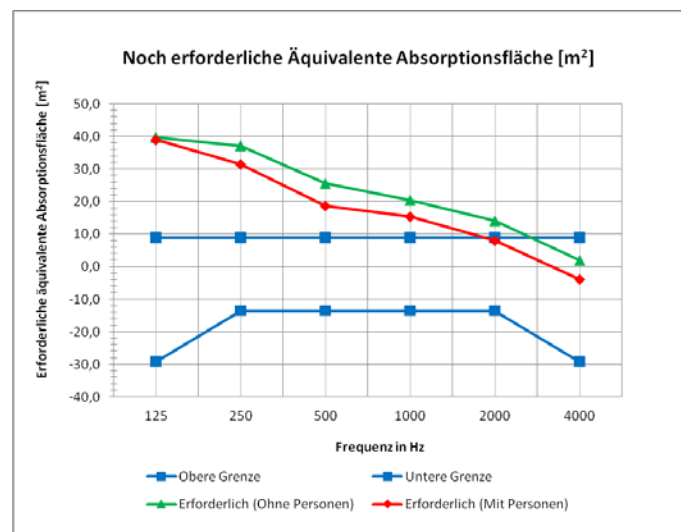


Abb. 129: Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband (Personen eingerechnet)

Tabelle 40: Raumakustische Gütemaße

Raum 13 (AG) leer								
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub> [s] gemittelt</b>		2,11	1,78	1,06	0,90	0,75	0,58	0,48
$\sigma$		0,346	0,567	0,084	0,030	0,019	0,007	0,007
max		2,70	2,84	1,28	0,95	0,78	0,59	0,49
min		1,61	1,19	0,95	0,84	0,72	0,56	0,47
M1Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,27	2,34	1,10	0,94	0,77	0,58	0,48
	$\sigma$	0,162	0,181	0,028	0,009	0,008	0,005	0,005
M2Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,13	2,32	1,07	0,91	0,77	0,57	0,47
	$\sigma$	0,068	0,133	0,016	0,005	0,000	0,005	0,005
M3Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,68	1,58	1,02	0,90	0,74	0,58	0,47
	$\sigma$	0,017	0,017	0,017	0,009	0,005	0,000	0,000
M4Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,50	1,27	0,96	0,86	0,73	0,57	0,49
	$\sigma$	0,005	0,000	0,012	0,005	0,008	0,005	0,005
M1Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,93	2,15	1,05	0,93	0,78	0,58	0,48
	$\sigma$	0,131	0,649	0,021	0,021	0,000	0,005	0,005
M2Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,85	2,07	1,01	0,87	0,74	0,58	0,49
	$\sigma$	0,168	0,655	0,021	0,034	0,017	0,005	0,005
M3Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,94	1,34	1,25	0,88	0,76	0,58	0,48
	$\sigma$	0,005	0,005	0,029	0,005	0,005	0,005	0,000
M4Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,61	1,19	1,00	0,88	0,74	0,58	0,48
	$\sigma$	0,000	0,005	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>EDT [s]</b>		1,77	1,32	1,03	0,91	0,75	0,54	0,47
$\sigma$		0,22	0,25	0,07	0,06	0,00	0,08	0,09
max		2,21	2,01	1,14	1,05	0,94	0,72	0,70
min		1,36	0,95	0,91	0,84	0,62	0,41	0,37
<b>C50 [dB]</b>		-8,60	-7,13	-5,62	-4,78	-2,48	0,13	0,76
$\sigma$		14,36	16,11	16,17	15,53	17,43	15,84	16,21
max		-1,80	2,00	1,70	2,00	5,10	8,60	9,30
min		-55,10	-59,90	-58,90	-55,90	-60,00	-52,30	-52,50
<b>D50 [%]</b>		26,96	35,25	42,42	45,58	59,54	68,04	70,33
$\sigma$		12,79	17,01	16,38	17,81	20,51	23,20	24,94
max		40,00	61,00	59,00	61,00	77,00	88,00	89,00
min		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>STI</b>		0,65						
$\sigma$		0,01						
max		0,67						
min		0,62						
<b>RASTI</b>		0,65						
$\sigma$		0,02						
max		0,67						
min		0,59						
<b>%Alcons</b>		5,04						
$\sigma$		0,40						
max		6,00						
min		4,50						

Tabelle 41: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen							
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub> [s]</b>		2,00	1,33	0,85	0,78	0,65	0,52
$\sigma$		0,309	0,321	0,054	0,023	0,014	0,006
max		2,52	1,90	0,99	0,82	0,67	0,53
min		1,54	0,98	0,78	0,74	0,63	0,50
Max - T <sub>30</sub>		0,52	0,56	0,14	0,04	0,02	0,01
T <sub>30</sub> - min		0,45	0,35	0,07	0,04	0,03	0,01

### Raum 14 (Altes Gebäude, 1. Stock)

Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (siehe Abb. 121). Lautsprecherposition 2 wurde nach links verschoben.



Grundgeräuschpegel [dBA]	32,6
Feuchtigkeit	49 %
Temperatur	24 °C
Messpegel [dB SPL]	83
Anzahl Schüler	15
L x B x H [m]	9 x 6,3 x 3,3
Volumen [m <sup>3</sup> ]	187,1
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,56 s

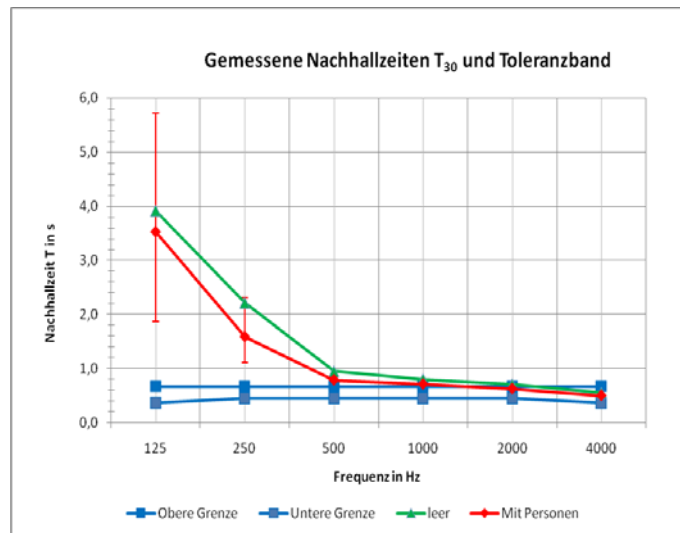


Abb. 130: Gemessene Nachhallzeit, Min-Max-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)

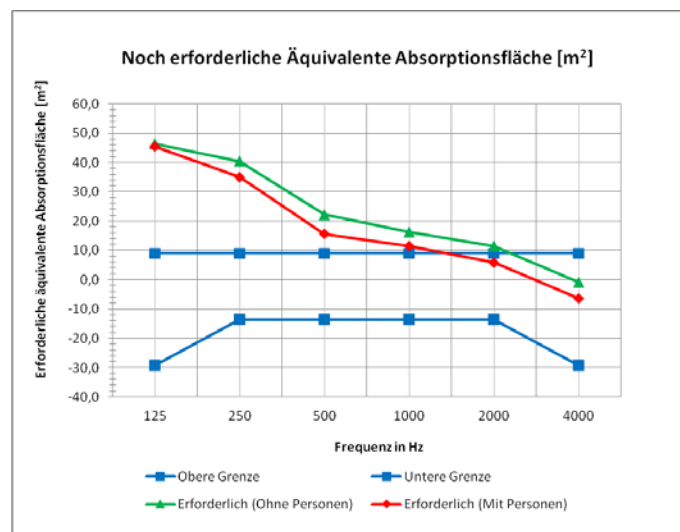


Abb. 131: Noch erforderliche Absorptionsfläche um  $T_{soll}$  zu erreichen und Toleranzband (Personen eingerechnet)

Tabelle 42: Raumakustische Gütemaße

Raum 14 (AG) leer								
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub> [s], gemittelt</b>		3,91	2,21	0,95	0,80	0,71	0,55	0,48
$\sigma$		1,479	0,763	0,066	0,019	0,016	0,008	0,008
max		6,66	3,71	1,06	0,84	0,73	0,57	0,49
min		1,96	1,35	0,86	0,77	0,68	0,54	0,47
M1Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	3,44	3,64	1,00	0,82	0,72	0,55	0,48
	$\sigma$	0,043	0,051	0,024	0,009	0,005	0,005	0,009
M2Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,98	2,95	0,96	0,77	0,70	0,54	0,49
	$\sigma$	0,048	0,159	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
M3Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	5,14	2,40	0,98	0,80	0,72	0,56	0,49
	$\sigma$	0,197	0,067	0,069	0,029	0,005	0,005	0,005
M4Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	5,21	1,45	0,93	0,79	0,70	0,54	0,47
	$\sigma$	0,110	0,024	0,019	0,005	0,005	0,005	0,000
M1Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	4,84	1,35	0,92	0,81	0,72	0,55	0,48
	$\sigma$	1,289	0,005	0,033	0,012	0,008	0,005	0,005
M2Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	5,71	1,42	0,87	0,79	0,70	0,54	0,48
	$\sigma$	0,113	0,053	0,008	0,005	0,005	0,005	0,005
M3Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,99	2,32	1,04	0,81	0,72	0,55	0,48
	$\sigma$	0,008	0,149	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
M4Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,99	2,14	0,86	0,80	0,68	0,55	0,47
	$\sigma$	0,022	0,134	0,000	0,000	0,005	0,005	0,005
<b>EDT [s]</b>		2,30	1,46	0,90	0,83	0,65	0,48	0,42
$\sigma$		0,73	0,53	0,09	0,04	0,00	0,05	0,04
max		4,02	2,88	1,13	0,91	0,77	0,58	0,48
min		1,61	0,95	0,77	0,74	0,55	0,40	0,33
<b>C50 [dB]</b>		-3,38	-1,13	1,34	2,50	5,28	7,52	8,14
$\sigma$		1,64	1,23	0,67	0,65	1,33	1,23	1,36
Max		-1,30	1,10	2,60	3,90	8,00	10,00	10,80
Min		-6,30	-3,10	-0,10	1,30	3,60	5,60	6,20
<b>D50 [%]</b>		31,75	43,54	57,75	63,92	76,67	84,71	86,29
$\sigma$		7,52	7,28	3,85	3,32	5,15	3,61	3,47
max		42,00	56,00	65,00	71,00	86,00	91,00	92,00
min		19,00	32,00	49,00	57,00	69,00	78,00	81,00
<b>STI</b>		0,66						
$\sigma$		0,02						
max		0,69						
min		0,62						
<b>RASTI</b>		0,68						
$\sigma$		0,02						
max		0,72						
min		0,66						
<b>%Alcons</b>		4,67						
$\sigma$		0,47						
max		5,80						
min		4,10						

Tabelle 43: Nachhaltigkeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

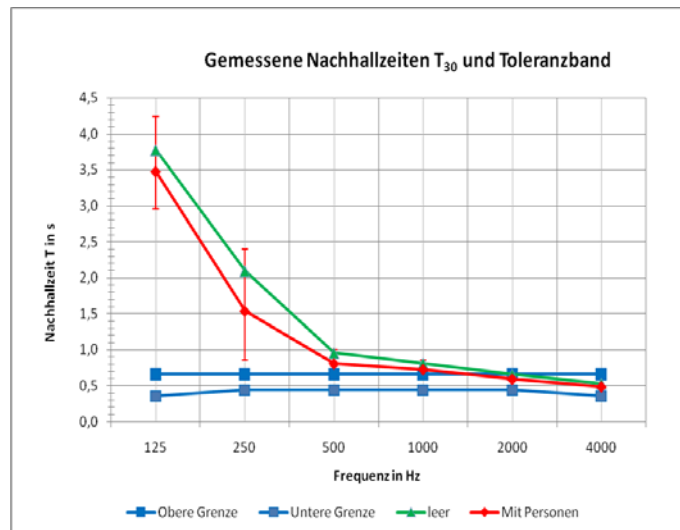
Mit Personen						
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	3,52	1,58	0,79	0,71	0,62	0,50
$\sigma$	1,228	0,399	0,046	0,015	0,012	0,007
max	5,71	2,30	0,86	0,74	0,64	0,52
min	1,87	1,10	0,73	0,69	0,60	0,49
Max - T <sub>30</sub>	2,19	0,72	0,08	0,03	0,02	0,02
T <sub>30</sub> - min	1,65	0,48	0,06	0,02	0,02	0,01

### Raum 17 (Altes Gebäude, 1. Stock)

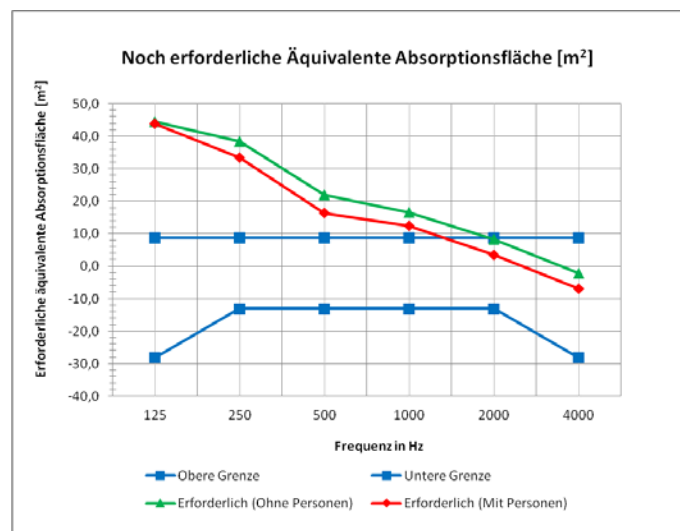
Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (siehe Abb. 121). Lautsprecherposition 2 wurde nach links verschoben.



Grundgeräuschpegel [dBA]	31
Feuchtigkeit	42 %
Temperatur	24 °C
Messpegel [dB SPL]	83
Anzahl Schüler	13
L x B x H [m]	9 x 6 x 3,3
Volumen [m <sup>3</sup> ]	178,2
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,55 s



**Abb. 132:** Gemessene Nachhallzeit, Min-Max-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)



**Abb. 133:** Noch erforderliche Absorptionsfläche um  $T_{soll}$  zu erreichen und Toleranzband (Personen eingerechnet)

Tabelle 44: Raumakustische Gütemaße

Raum 17 (AG) leer								
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub> [s], gemittelt</b>		3,78	2,09	0,95	0,81	0,66	0,53	0,45
$\sigma$		0,472	0,960	0,091	0,047	0,020	0,011	0,010
Max		4,69	3,74	1,24	0,97	0,70	0,56	0,47
Min		3,17	0,98	0,86	0,76	0,62	0,52	0,43
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	4,10	1,64	0,89	0,76	0,67	0,53	0,45
	$\sigma$	0,143	0,026	0,040	0,005	0,005	0,005	0,000
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	3,89	1,03	0,88	0,76	0,65	0,52	0,45
	$\sigma$	0,136	0,037	0,008	0,005	0,008	0,000	0,000
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	4,66	3,68	1,03	0,85	0,67	0,54	0,45
	$\sigma$	0,029	0,090	0,102	0,017	0,005	0,000	0,005
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	4,01	3,06	0,94	0,80	0,63	0,52	0,45
	$\sigma$	0,090	0,086	0,033	0,000	0,008	0,005	0,000
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	3,26	1,39	0,99	0,83	0,69	0,53	0,46
	$\sigma$	0,066	0,014	0,022	0,005	0,008	0,005	0,000
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	3,29	1,18	0,92	0,80	0,66	0,52	0,43
	$\sigma$	0,059	0,024	0,028	0,005	0,009	0,000	0,005
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	3,63	3,10	1,09	0,88	0,65	0,55	0,46
	$\sigma$	0,281	0,243	0,111	0,069	0,000	0,008	0,005
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	3,38	1,68	0,89	0,79	0,64	0,52	0,44
	$\sigma$	0,081	0,074	0,017	0,017	0,005	0,005	0,000
<b>EDT [s]</b>		2,15	1,12	0,91	0,79	0,66	0,51	0,42
$\sigma$		0,59	0,26	0,09	0,06	0,00	0,04	0,03
Max		3,09	1,58	1,09	0,90	0,72	0,57	0,46
Min		1,44	0,83	0,75	0,69	0,61	0,46	0,37
<b>C50 [dB]</b>		-2,84	0,76	1,71	2,50	5,60	7,68	8,84
$\sigma$		2,27	1,32	0,94	0,99	1,07	0,86	0,91
Max		0,90	2,80	3,10	4,30	7,80	9,10	10,80
Min		-7,10	-1,60	0,00	1,00	3,60	6,30	7,50
<b>D50 [%]</b>		34,83	55,29	59,21	63,88	78,17	85,21	88,29
$\sigma$		10,99	7,98	5,39	5,22	3,99	2,53	2,01
max		54,00	67,00	67,00	73,00	86,00	89,00	92,00
min		15,00	42,00	49,00	56,00	70,00	81,00	85,00
<b>STI</b>		0,68						
$\sigma$		0,02						
max		0,71						
min		0,65						
<b>RASTI</b>		0,68						
$\sigma$		0,01						
max		0,70						
min		0,66						
<b>%Alcons</b>		4,31						
$\sigma$		0,42						
max		4,90						
min		3,60						

Tabelle 45: Nachhaltigkeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen						
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T <sub>30</sub> [s]	3,48	1,54	0,80	0,72	0,59	0,49
$\sigma$	0,398	0,537	0,063	0,037	0,016	0,009
max	4,24	2,40	1,00	0,85	0,62	0,51
min	2,96	0,85	0,74	0,68	0,56	0,48
Max - T <sub>30</sub>	0,76	0,86	0,20	0,13	0,03	0,03
T <sub>30</sub> - min	0,52	0,68	0,07	0,04	0,03	0,01



### Raum 21 (Altes Gebäude 2. Stock)

Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (siehe Abb. 121). Lautsprecherposition 2 wurde nach links verschoben.



Grundgeräuschpegel [dBA]	33
Feuchtigkeit	46 %
Temperatur	22 °C
Messpegel [dB SPL]	85
Anzahl Schüler	15
L x B x H [m]	8,2 x 6 x 3,3
Volumen [m <sup>3</sup> ]	162,36
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,54 s

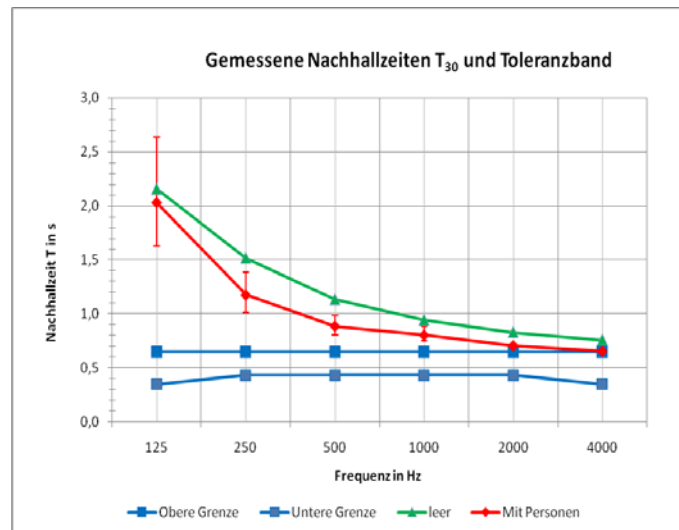


Abb. 134: Gemessene Nachhallzeit, Min-Max-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)

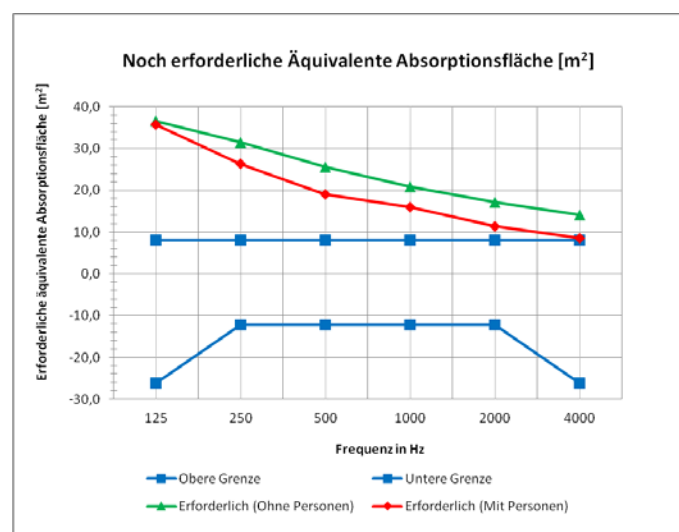


Abb. 135: Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband (Personen eingerechnet)

Tabelle 46: Raumakustische Gütemaße

Raum 21 (AG) leer								
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub> [s], gemittelt</b>		2,16	1,51	1,13	0,94	0,83	0,76	0,66
$\sigma$		0,296	0,209	0,091	0,050	0,019	0,015	0,010
max		2,85	1,87	1,30	1,05	0,86	0,79	0,68
min		1,71	1,25	1,00	0,87	0,80	0,73	0,64
M1Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,73	1,66	1,19	0,96	0,84	0,77	0,66
	$\sigma$	0,102	0,098	0,062	0,031	0,008	0,017	0,005
M2Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,43	1,32	1,08	0,88	0,82	0,74	0,65
	$\sigma$	0,123	0,033	0,014	0,009	0,008	0,012	0,005
M3Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,79	1,47	1,11	0,96	0,84	0,77	0,67
	$\sigma$	0,057	0,009	0,038	0,012	0,009	0,005	0,005
M4Q1	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,91	1,27	1,00	0,89	0,81	0,74	0,65
	$\sigma$	0,071	0,012	0,005	0,000	0,005	0,000	0,005
M1Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,04	1,84	1,29	1,04	0,86	0,77	0,67
	$\sigma$	0,017	0,031	0,019	0,008	0,000	0,005	0,005
M2Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,18	1,43	1,15	0,92	0,82	0,75	0,65
	$\sigma$	0,005	0,012	0,009	0,000	0,008	0,000	0,005
M3Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,14	1,77	1,18	0,94	0,84	0,77	0,67
	$\sigma$	0,122	0,005	0,052	0,024	0,005	0,005	0,008
M4Q2	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,02	1,34	1,05	0,92	0,81	0,75	0,65
	$\sigma$	0,162	0,061	0,031	0,005	0,009	0,012	0,005
<b>EDT [s]</b>		1,88	1,22	1,03	0,89	0,78	0,71	0,60
$\sigma$		0,41	0,11	0,10	0,04	0,00	0,04	0,03
max		2,48	1,45	1,16	1,00	0,87	0,80	0,66
min		1,14	1,04	0,79	0,81	0,65	0,62	0,55
<b>C50 [dB]</b>		-3,55	-1,03	0,28	0,78	3,26	3,41	4,09
$\sigma$		2,01	1,47	0,99	0,74	1,08	0,79	0,75
max		0,60	1,40	2,90	2,40	5,40	4,90	5,80
min		-6,90	-4,50	-1,40	-0,80	0,90	2,20	2,90
<b>D50 [%]</b>		31,58	44,46	51,71	54,46	67,79	68,63	71,63
$\sigma$		10,42	7,76	5,75	4,27	5,48	3,84	3,38
max		54,00	58,00	67,00	64,00	77,00	75,00	79,00
min		17,00	28,00	42,00	45,00	55,00	62,00	66,00
<b>STI</b>		0,63						
$\sigma$		0,01						
max		0,66						
min		0,61						
<b>RASTI</b>		0,65						
$\sigma$		0,02						
max		0,68						
min		0,62						
<b>%Alcons</b>		5,56						
$\sigma$		0,41						
max		6,40						
min		4,90						

Tabelle 47: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

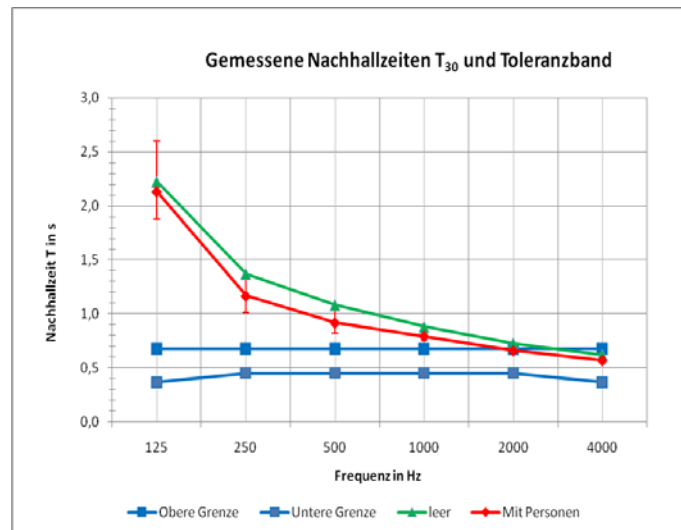
Mit Personen							
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub> [s]</b>		2,03	1,17	0,88	0,80	0,70	0,65
$\sigma$		0,261	0,125	0,055	0,036	0,013	0,011
max		2,63	1,38	0,98	0,88	0,72	0,68
min		1,63	1,01	0,80	0,75	0,68	0,63
Max - T <sub>30</sub>		0,61	0,21	0,10	0,08	0,02	0,02
T <sub>30</sub> - min		0,40	0,16	0,08	0,05	0,02	0,02

### Raum 24 (Altes Gebäude 2.Stock)

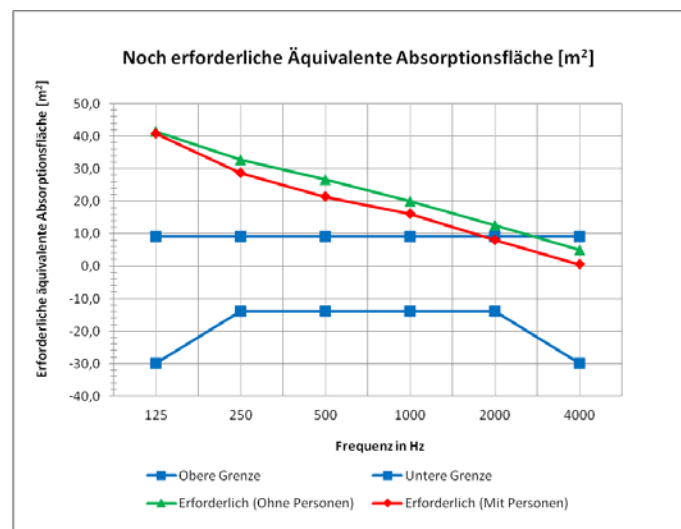
Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (siehe Abb. 121). Lautsprecherposition 2 wurde nach rechts verschoben.



Grundgeräuschpegel [dBA]	33
Feuchtigkeit	47 %
Temperatur	21 °C
Messpegel [dB SPL]	83
Anzahl Schüler	12
L x B x H [m]	9 x 6,5 x 3,3
Volumen [m <sup>3</sup> ]	193,05
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,56 s



**Abb. 136:** Gemessene Nachhallzeit, Min-Max-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)



**Abb. 137:** Noch erforderliche Absorptionsfläche um  $T_{soll}$  zu erreichen und Toleranzband (Personen eingerechnet)

Tabelle 48: Raumakustische Gütemaße

Raum 24 (AG) leer								
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
<b>T<sub>30</sub> [s], gemittelt</b>	2,23	1,37	1,08	0,88	0,73	0,62	0,55	
$\sigma$	0,253	0,143	0,085	0,033	0,020	0,009	0,005	
max	2,74	1,63	1,28	0,94	0,76	0,64	0,55	
min	1,95	1,16	0,95	0,83	0,70	0,60	0,54	
<b>M1Q1</b>	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,54	1,55	1,17	0,93	0,76	0,63	0,55
	$\sigma$	0,090	0,033	0,017	0,014	0,005	0,005	0,000
<b>M2Q1</b>	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,08	1,26	0,96	0,83	0,70	0,61	0,55
	$\sigma$	0,017	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,000
<b>M3Q1</b>	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,20	1,38	1,13	0,91	0,74	0,61	0,55
	$\sigma$	0,033	0,021	0,012	0,005	0,008	0,000	0,000
<b>M4Q1</b>	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,00	1,29	1,04	0,86	0,72	0,62	0,55
	$\sigma$	0,059	0,005	0,009	0,005	0,000	0,000	0,005
<b>M1Q2</b>	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,68	1,60	1,10	0,90	0,75	0,63	0,54
	$\sigma$	0,045	0,047	0,066	0,014	0,009	0,005	0,005
<b>M2Q2</b>	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,99	1,26	0,99	0,84	0,71	0,61	0,54
	$\sigma$	0,033	0,019	0,012	0,005	0,008	0,005	0,000
<b>M3Q2</b>	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,31	1,44	1,17	0,88	0,73	0,61	0,55
	$\sigma$	0,022	0,042	0,090	0,000	0,005	0,005	0,000
<b>M4Q2</b>	<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,00	1,18	1,10	0,87	0,71	0,62	0,54
	$\sigma$	0,022	0,024	0,042	0,008	0,000	0,005	0,005
<b>EDT [s]</b>	1,73	1,16	1,06	0,84	0,66	0,57	0,49	
$\sigma$	0,41	0,18	0,11	0,04	0,00	0,05	0,03	
max	2,77	1,49	1,30	0,92	0,81	0,64	0,54	
min	1,25	0,89	0,91	0,76	0,54	0,49	0,45	
<b>C50 [dB]</b>	-4,54	-0,59	0,81	2,23	4,82	5,97	6,76	
$\sigma$	1,31	1,86	1,18	0,68	1,18	0,56	0,64	
max	-2,60	1,60	3,00	3,50	6,70	7,20	7,80	
min	-7,10	-4,90	-2,60	0,20	3,20	4,40	5,30	
<b>D50 [%]</b>	26,29	47,04	54,67	62,54	74,79	79,63	82,58	
$\sigma$	5,46	10,43	6,60	3,67	5,08	2,23	2,18	
max	34,00	60,00	67,00	69,00	83,00	84,00	86,00	
min	16,00	25,00	35,00	51,00	67,00	73,00	77,00	
<b>STI</b>	0,66							
$\sigma$	0,02							
max	0,68							
min	0,62							
<b>RASTI</b>	0,66							
$\sigma$	0,02							
max	0,70							
min	0,63							
<b>%Alcons</b>	4,85							
$\sigma$	0,49							
max	5,80							
min	4,20							

Tabelle 49: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen						
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	2,13	1,16	0,92	0,79	0,66	0,57
$\sigma$	0,232	0,103	0,061	0,027	0,016	0,008
max	2,60	1,35	1,06	0,84	0,68	0,59
min	1,88	1,01	0,82	0,75	0,63	0,55
Max - T <sub>30</sub>	0,47	0,18	0,14	0,05	0,03	0,02
T <sub>30</sub> - min	0,25	0,15	0,10	0,04	0,02	0,01

### Raum 25 (Altes Gebäude, 2. Stock)

Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (siehe Abb. 121). Lautsprecherposition 2 wurde nach links verschoben.



Grundgeräuschpegel [dBA]	32
Feuchtigkeit	48 %
Temperatur	23 °C
Messpegel [dB SPL]	83
Anzahl Schüler	14
L x B x H [m]	9 x 6,5 x 3,3
Volumen [m <sup>3</sup> ]	193,05
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,56 s

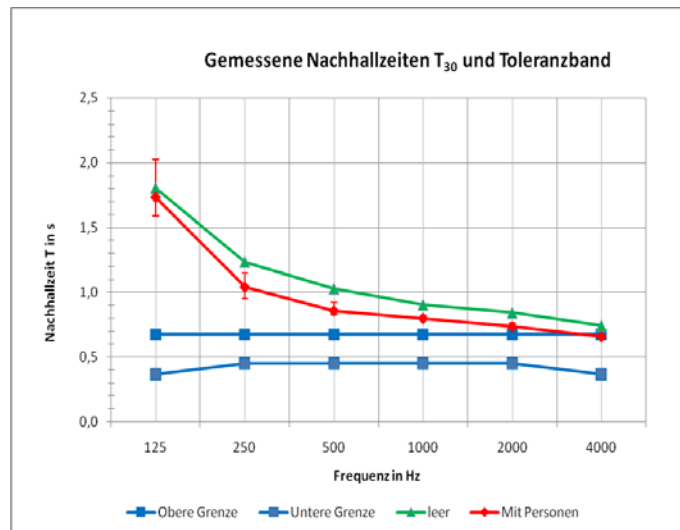


Abb. 138: Gemessene Nachhallzeit, Min-Max-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)

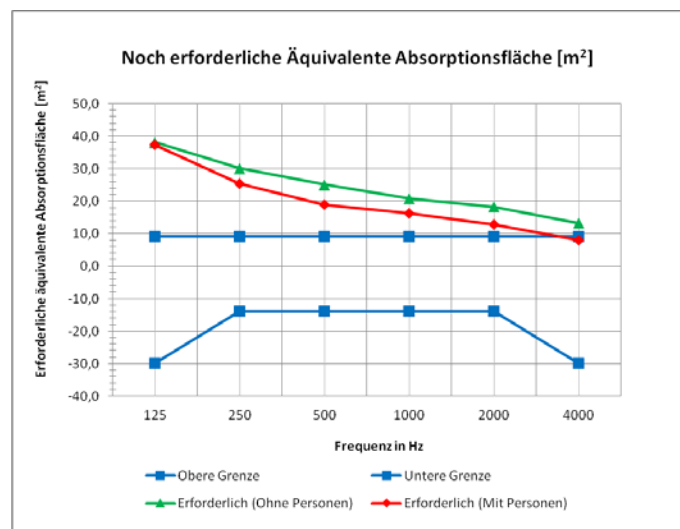


Abb. 139: Noch erforderliche Absorptionsfläche um  $T_{soll}$  zu erreichen und Toleranzband (Personen eingerechnet)

Tabelle 50: Raumakustische Gütemaße

Raum 25 (AG) leer		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub>[s], gemittelt</b>		1,80	1,23	1,03	0,90	0,84	0,74	0,62
$\sigma$		0,132	0,087	0,039	0,015	0,014	0,007	0,008
max		2,12	1,38	1,12	0,93	0,87	0,75	0,64
min		1,65	1,11	0,98	0,88	0,81	0,73	0,61
M1Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,68	1,18	1,02	0,88	0,83	0,75	0,63
	$\sigma$	0,005	0,012	0,012	0,005	0,005	0,005	0,005
M2Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,82	1,26	1,03	0,89	0,84	0,74	0,62
	$\sigma$	0,012	0,012	0,016	0,005	0,009	0,005	0,005
M3Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,80	1,18	1,00	0,90	0,84	0,74	0,63
	$\sigma$	0,016	0,005	0,012	0,016	0,000	0,005	0,000
M4Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,65	1,36	1,02	0,92	0,86	0,74	0,61
	$\sigma$	0,000	0,005	0,008	0,009	0,012	0,008	0,005
M1Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,10	1,13	1,00	0,89	0,82	0,74	0,62
	$\sigma$	0,016	0,022	0,012	0,005	0,008	0,008	0,005
M2Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,83	1,22	1,04	0,92	0,84	0,74	0,61
	$\sigma$	0,028	0,009	0,026	0,005	0,008	0,000	0,005
M3Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,84	1,15	1,00	0,90	0,83	0,74	0,63
	$\sigma$	0,005	0,005	0,014	0,014	0,008	0,009	0,008
M4Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,70	1,37	1,11	0,91	0,85	0,74	0,62
	$\sigma$	0,017	0,009	0,009	0,008	0,009	0,005	0,005
<b>EDT[s]</b>		1,68	1,10	0,96	0,91	0,81	0,70	0,57
$\sigma$		0,24	0,21	0,08	0,05	0,00	0,05	0,05
max		2,20	1,59	1,13	1,03	0,90	0,79	0,67
min		1,33	0,79	0,82	0,82	0,65	0,58	0,50
<b>C50[dB]</b>		-3,54	-0,48	0,34	0,68	2,75	3,83	4,83
$\sigma$		1,71	2,30	1,01	0,99	1,24	1,19	1,23
max		-0,90	4,50	3,10	2,90	5,10	5,60	7,00
min		-7,60	-7,00	-1,40	-2,00	0,00	1,20	2,30
<b>D50[%]</b>		31,25	47,25	51,88	53,88	65,04	70,29	74,88
$\sigma$		7,98	11,93	5,83	5,62	6,44	5,89	5,42
max		45,00	74,00	68,00	66,00	76,00	78,00	83,00
min		15,00	17,00	42,00	39,00	50,00	57,00	63,00
<b>STI</b>		0,64						
$\sigma$		0,01						
max		0,68						
min		0,62						
<b>RASTI</b>		0,64						
$\sigma$		0,02						
max		0,68						
min		0,62						
<b>%Alcons</b>		5,38						
$\sigma$		0,37						
max		6,00						
min		4,30						

Tabelle 51: Nachhaltigkeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

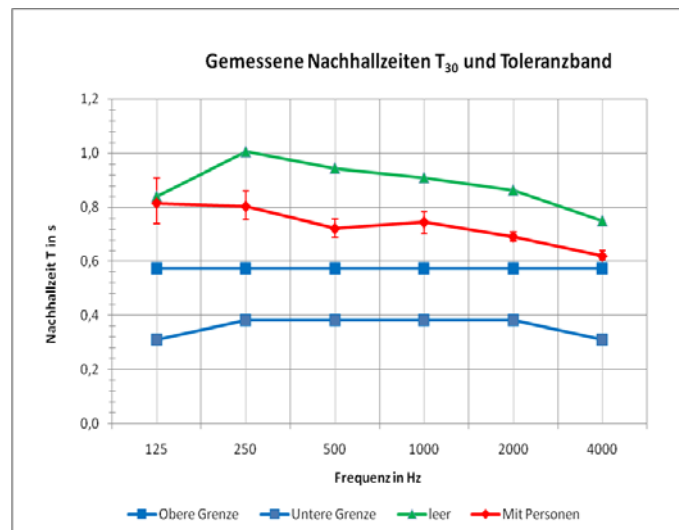
Mit Personen		125	250	500	1000	2000	4000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub> [s]</b>		1,73	1,04	0,86	0,80	0,73	0,66
$\sigma$		0,122	0,062	0,027	0,012	0,011	0,006
max		2,02	1,15	0,92	0,82	0,76	0,67
min		1,59	0,95	0,82	0,78	0,71	0,65
Max - T <sub>30</sub>		0,29	0,10	0,06	0,02	0,02	0,01
T <sub>30</sub> - min		0,14	0,09	0,03	0,02	0,02	0,01

## Raum 34 (Altes Gebäude, 3. Stock DG)

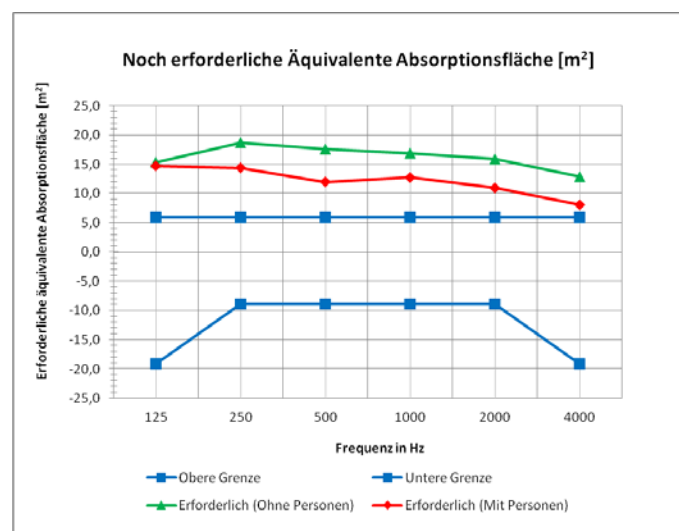
Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (siehe Abb. 121). Lautsprecherposition 2 wurde nach rechts verschoben. (verkürzte Distanzangaben)



Grundgeräuschpegel [dBA]	31,2
Feuchtigkeit	46 %
Temperatur	21 °C
Messpegel [dB SPL]	83,4
Anzahl Schüler	13
L x B x H [m]	6,5 x 5,8 x 2,8
Volumen [m <sup>3</sup> ]	105,56
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,48 s



**Abb. 140:** Gemessene Nachhallzeit, Min-Max-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)



**Abb. 141:** Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband (Personen eingerechnet)

Tabelle 52: Raumakustische Gütemaße

Raum 34 (AG) leer		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub> [s], gemittelt</b>		0,84	1,01	0,94	0,91	0,86	0,75	0,65
$\sigma$		0,051	0,051	0,034	0,028	0,012	0,012	0,008
max		0,94	1,10	1,01	0,97	0,89	0,78	0,66
min		0,76	0,93	0,89	0,85	0,84	0,73	0,63
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,94	1,08	0,97	0,89	0,87	0,75	0,65
	$\sigma$	0,005	0,017	0,009	0,005	0,009	0,005	0,008
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,78	0,98	0,91	0,92	0,86	0,76	0,65
	$\sigma$	0,014	0,014	0,014	0,005	0,005	0,012	0,008
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,79	0,94	0,96	0,95	0,87	0,76	0,65
	$\sigma$	0,000	0,005	0,017	0,014	0,017	0,000	0,005
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,87	1,05	1,00	0,91	0,87	0,74	0,64
	$\sigma$	0,005	0,005	0,014	0,005	0,012	0,009	0,005
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,87	1,00	0,92	0,91	0,85	0,75	0,65
	$\sigma$	0,009	0,031	0,005	0,005	0,005	0,009	0,005
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,80	0,99	0,97	0,89	0,86	0,74	0,65
	$\sigma$	0,009	0,028	0,008	0,028	0,012	0,005	0,008
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,81	1,05	0,91	0,94	0,86	0,75	0,65
	$\sigma$	0,005	0,024	0,014	0,005	0,012	0,000	0,000
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,86	0,95	0,92	0,87	0,87	0,75	0,64
	$\sigma$	0,005	0,012	0,005	0,012	0,005	0,005	0,000
<b>EDT[s]</b>		0,83	0,92	0,89	0,85	0,83	0,72	0,59
$\sigma$		0,16	0,10	0,11	0,06	0,00	0,04	0,02
max		1,18	1,08	1,08	1,00	0,91	0,78	0,65
min		0,57	0,75	0,65	0,74	0,73	0,64	0,56
<b>C50[dB]</b>		1,75	1,08	1,64	2,14	3,00	3,97	4,95
$\sigma$		3,07	1,79	0,75	0,62	0,93	1,00	0,62
max		6,40	4,50	3,20	2,70	4,70	5,90	6,40
min		-3,60	-3,10	0,60	0,10	1,50	2,60	3,60
<b>D50[%]</b>		58,96	55,92	59,21	62,13	66,46	70,96	75,67
$\sigma$		16,91	9,70	3,95	3,60	4,56	4,53	2,59
max		84,00	74,00	67,00	65,00	75,00	79,00	81,00
min		28,00	33,00	53,00	50,00	59,00	64,00	70,00
<b>STI</b>		0,66						
$\sigma$		0,01						
max		0,69						
min		0,65						
<b>RASTI</b>		0,65						
$\sigma$		0,02						
max		0,68						
min		0,62						
<b>%Alcons</b>		4,71						
$\sigma$		0,28						
max		5,20						
min		4,20						

Tabelle 53: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen		125	250	500	1000	2000	4000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub>[s]</b>		0,81	0,80	0,72	0,74	0,69	0,62
$\sigma$		0,048	0,033	0,020	0,019	0,008	0,008
max		0,91	0,86	0,76	0,78	0,71	0,64
min		0,74	0,75	0,69	0,70	0,68	0,61
Max - T <sub>30</sub>		0,09	0,06	0,04	0,04	0,02	0,02
T <sub>30</sub> - min		0,08	0,05	0,03	0,04	0,01	0,01



### Raum 35 (Altes Gebäude, 3. Stock DG)

Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (siehe Abb. 121). Lautsprecherposition 2 wurde nach links verschoben.



Grundgeräuschpegel [dBA]	31,2
Feuchtigkeit	48 %
Temperatur	21 °C
Messpegel [dB SPL]	83,2
Anzahl Schüler	14
L x B x H [m]	6,5 x 5,8 x 2,8
Volumen [m <sup>3</sup> ]	105,56
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,48 s

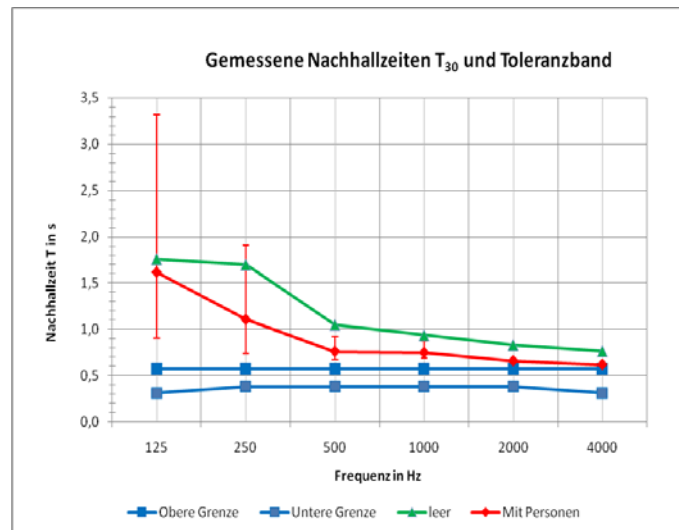


Abb. 142: Gemessene Nachhallzeit, Min-Max-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)

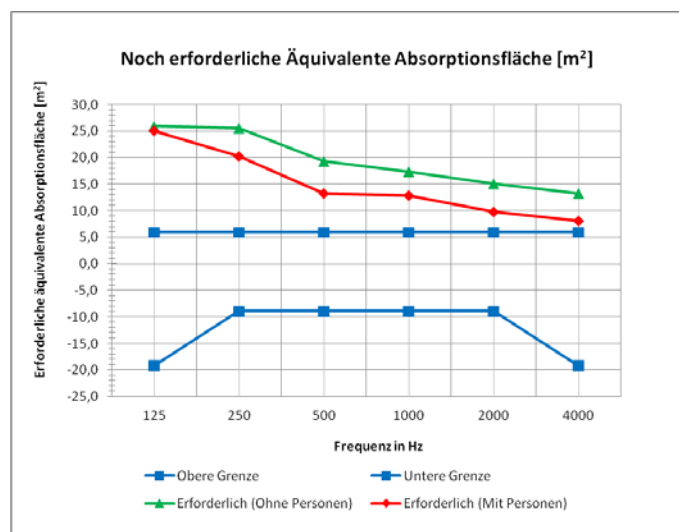


Abb. 143: Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband (Personen eingerechnet)

Tabelle 54: Raumakustische Gütemaße

Raum 35 (AG) leer		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub>[s], gemittelt</b>		1,76	1,69	1,04	0,93	0,83	0,76	0,65
$\sigma$		0,777	0,851	0,141	0,070	0,017	0,018	0,015
max		3,84	3,95	1,37	1,13	0,86	0,78	0,68
min		0,94	0,92	0,88	0,84	0,80	0,73	0,63
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,49	1,62	1,29	0,97	0,85	0,77	0,67
	$\sigma$	0,022	0,033	0,059	0,037	0,009	0,005	0,008
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,00	1,28	1,00	0,88	0,81	0,74	0,64
	$\sigma$	0,073	0,189	0,066	0,019	0,008	0,008	0,008
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,96	1,62	1,05	1,08	0,83	0,78	0,66
	$\sigma$	0,347	0,285	0,049	0,045	0,008	0,000	0,000
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,67	1,03	0,90	0,89	0,82	0,75	0,64
	$\sigma$	0,370	0,078	0,017	0,012	0,005	0,000	0,000
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,35	1,06	0,99	0,94	0,85	0,77	0,67
	$\sigma$	0,052	0,025	0,034	0,012	0,005	0,005	0,009
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,98	1,00	0,91	0,92	0,81	0,75	0,65
	$\sigma$	0,029	0,022	0,012	0,008	0,008	0,000	0,000
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	2,72	2,94	1,24	0,92	0,83	0,78	0,67
	$\sigma$	0,676	0,681	0,017	0,012	0,008	0,005	0,008
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	2,87	3,00	0,97	0,85	0,82	0,73	0,64
	$\sigma$	0,685	0,672	0,029	0,008	0,005	0,005	0,005
<b>EDT[s]</b>		1,05	1,22	0,93	0,87	0,80	0,74	0,61
$\sigma$		0,19	0,57	0,10	0,09	0,00	0,03	0,04
max		1,60	2,62	1,22	1,02	0,87	0,79	0,68
min		0,77	0,68	0,77	0,73	0,74	0,69	0,54
<b>C50[dB]</b>		-0,24	0,33	0,70	1,09	2,32	3,38	4,62
$\sigma$		1,41	1,82	1,30	0,88	1,06	1,07	0,96
max		2,10	3,30	3,00	2,00	3,80	4,60	6,00
min		-3,20	-2,90	-1,30	-1,10	0,20	1,30	2,50
<b>D50[%]</b>		50,79	51,88	53,75	56,17	63,00	68,38	74,13
$\sigma$		7,20	9,93	7,29	4,90	5,71	5,43	4,48
max		62,00	66,00	66,00	61,00	70,00	74,00	80,00
min		36,00	35,00	43,00	44,00	51,00	58,00	64,00
<b>STI</b>		0,64						
$\sigma$		0,02						
max		0,67						
min		0,61						
<b>RASTI</b>		0,64						
$\sigma$		0,02						
max		0,66						
min		0,61						
<b>%Alcons</b>		5,35						
$\sigma$		0,62						
max		6,20						
min		4,40						

Tabelle 55: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

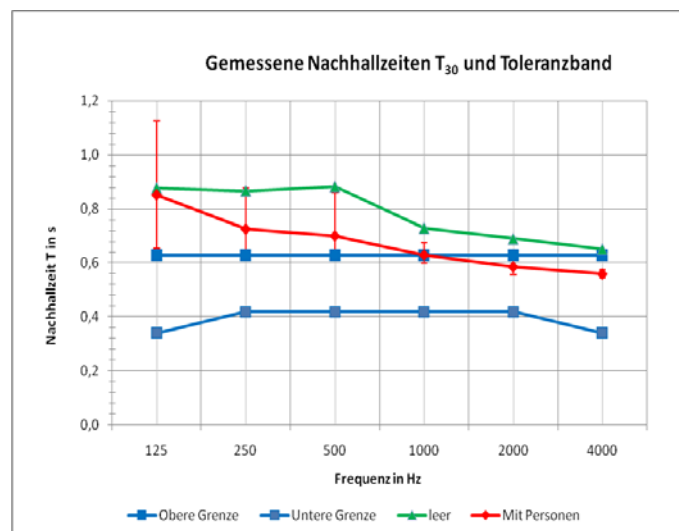
Mit Personen		125	250	500	1000	2000	4000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub>[s]</b>		1,62	1,11	0,76	0,75	0,66	0,62
$\sigma$		0,654	0,344	0,073	0,045	0,010	0,012
max		3,32	1,90	0,92	0,87	0,68	0,63
min		0,90	0,74	0,67	0,69	0,64	0,60
Max - T <sub>30</sub>		1,70	0,80	0,16	0,12	0,02	0,01
T <sub>30</sub> - min		0,71	0,37	0,09	0,06	0,02	0,02

## Raum 36 (Altes Gebäude, 3. Stock DG)

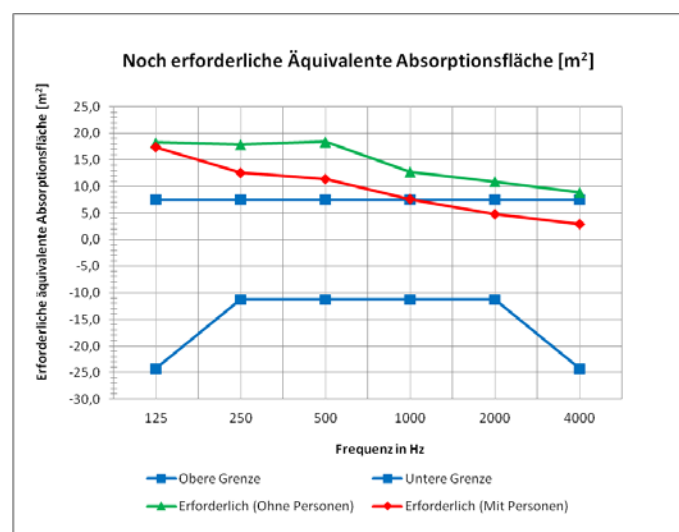
Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (siehe Abb. 121). Lautsprecherposition 2 wurde nach rechts verschoben.



Grundgeräuschpegel [dBA]	30,2
Feuchtigkeit	48 %
Temperatur	22 °C
Messpegel [dB SPL]	83,4
Anzahl Schüler	16
L x B x H [m]	9 x 5,8 x 2,8
Volumen [m <sup>3</sup> ]	146,16
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,52 s



**Abb. 144:** Gemessene Nachhallzeit, Min-Max-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)



**Abb. 145:** Noch erforderliche Absorptionsfläche um  $T_{soll}$  zu erreichen und Toleranzband (Personen eingerechnet)

Tabelle 56: Raumakustische Gütemaße

Raum 36 (AG) leer							
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub>[s], gemittelt</b>	0,88	0,87	0,88	0,73	0,69	0,65	0,57
$\sigma$	0,149	0,089	0,114	0,026	0,019	0,013	0,008
max	1,17	1,09	1,15	0,79	0,72	0,67	0,59
min	0,67	0,72	0,74	0,69	0,65	0,63	0,56
<b>M1Q1</b>							
T <sub>30</sub> [s]	0,86	0,96	1,11	0,74	0,68	0,65	0,58
$\sigma$	0,012	0,012	0,037	0,005	0,005	0,008	0,005
<b>M2Q1</b>							
T <sub>30</sub> [s]	0,74	0,89	0,88	0,71	0,67	0,64	0,57
$\sigma$	0,009	0,039	0,039	0,008	0,005	0,005	0,008
<b>M3Q1</b>							
T <sub>30</sub> [s]	0,76	1,01	0,96	0,77	0,71	0,66	0,57
$\sigma$	0,012	0,074	0,057	0,022	0,005	0,008	0,005
<b>M4Q1</b>							
T <sub>30</sub> [s]	0,68	0,83	0,79	0,71	0,68	0,64	0,56
$\sigma$	0,009	0,012	0,029	0,014	0,008	0,005	0,005
<b>M1Q2</b>							
T <sub>30</sub> [s]	0,86	0,84	0,92	0,75	0,70	0,66	0,58
$\sigma$	0,009	0,019	0,026	0,000	0,009	0,014	0,000
<b>M2Q2</b>							
T <sub>30</sub> [s]	1,03	0,73	0,76	0,71	0,67	0,65	0,57
$\sigma$	0,009	0,019	0,017	0,005	0,014	0,005	0,005
<b>M3Q2</b>							
T <sub>30</sub> [s]	1,15	0,79	0,89	0,75	0,71	0,67	0,58
$\sigma$	0,017	0,026	0,033	0,014	0,008	0,000	0,000
<b>M4Q2</b>							
T <sub>30</sub> [s]	0,93	0,88	0,76	0,71	0,70	0,65	0,57
$\sigma$	0,009	0,009	0,012	0,012	0,005	0,009	0,005
<b>EDT[s]</b>	0,79	0,77	0,82	0,67	0,64	0,61	0,52
$\sigma$	0,23	0,14	0,08	0,06	0,00	0,04	0,04
max	1,21	1,04	0,97	0,81	0,72	0,69	0,60
min	0,51	0,58	0,70	0,55	0,54	0,53	0,44
<b>C50[dB]</b>	0,23	1,85	1,09	2,42	3,88	4,18	4,89
$\sigma$	3,45	1,15	1,35	1,08	1,00	0,96	1,00
max	5,00	5,10	3,80	5,30	6,20	6,00	7,30
min	-6,50	-1,20	-0,60	0,60	1,30	2,20	3,30
<b>D50[%]</b>	52,42	60,29	56,21	63,21	70,79	72,21	75,17
$\sigma$	17,97	6,16	7,57	5,68	4,85	4,42	4,09
max	77,00	76,00	71,00	77,00	81,00	80,00	84,00
min	18,00	44,00	46,00	54,00	57,00	63,00	68,00
<b>STI</b>	0,70						
$\sigma$	0,01						
max	0,72						
min	0,67						
<b>RASTI</b>	0,68						
$\sigma$	0,01						
max	0,71						
min	0,66						
<b>%Alcons</b>	3,95						
$\sigma$	0,29						
max	4,40						
min	3,50						

Tabelle 57: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen						
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	0,85	0,73	0,70	0,63	0,59	0,56
$\sigma$	0,140	0,062	0,071	0,019	0,013	0,009
max	1,13	0,88	0,86	0,67	0,61	0,57
min	0,66	0,62	0,61	0,60	0,56	0,54
Max - T <sub>30</sub>	0,27	0,15	0,16	0,04	0,02	0,01
T <sub>30</sub> - min	0,20	0,11	0,09	0,03	0,03	0,02

## Raum 2 (Neues Gebäude, NB)

Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (siehe Abb. 121). Lautsprecherposition 2 wurde nach links verschoben.



Grundgeräuschpegel [dBA]	30.2
Feuchtigkeit	40 %
Temperatur	26 °C
Messpegel [dB SPL]	85
Anzahl Schüler	15
L x B x H [m]	10,1 x 6,6 x 3,2
Volumen [m <sup>3</sup> ]	213,31
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,58 s

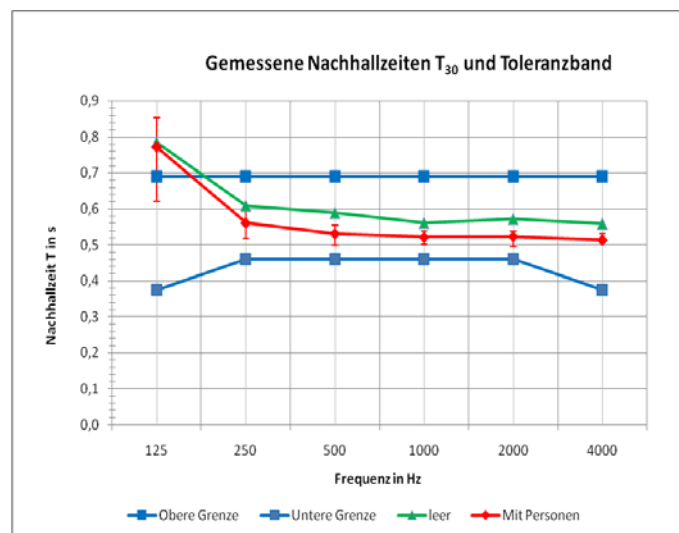


Abb. 146: Gemessene Nachhallzeit, Min-Max-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)

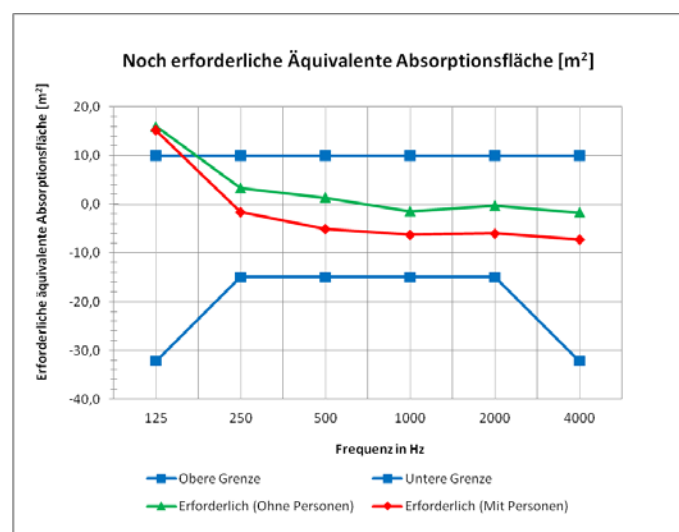


Abb. 147: Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband (Personen eingerechnet)

Tabelle 58: Raumakustische Gütemaße

Raum 2 (NB) leer								
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub>[s], gemittelt</b>		0,79	0,61	0,59	0,56	0,57	0,56	0,49
σ		0,065	0,036	0,021	0,011	0,011	0,009	0,006
max		0,87	0,67	0,62	0,58	0,59	0,58	0,50
min		0,63	0,56	0,55	0,54	0,54	0,55	0,48
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,82	0,58	0,60	0,55	0,56	0,55	0,49
	σ	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,000	0,000
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,77	0,57	0,56	0,55	0,55	0,56	0,50
	σ	0,008	0,005	0,000	0,008	0,008	0,005	0,000
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,64	0,60	0,60	0,57	0,58	0,58	0,49
	σ	0,005	0,005	0,000	0,009	0,005	0,005	0,005
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,76	0,57	0,60	0,57	0,57	0,55	0,49
	σ	0,009	0,005	0,000	0,005	0,005	0,000	0,000
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,83	0,64	0,56	0,58	0,58	0,57	0,49
	σ	0,012	0,009	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,82	0,65	0,61	0,56	0,58	0,56	0,49
	σ	0,005	0,005	0,005	0,005	0,000	0,000	0,005
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,78	0,61	0,58	0,57	0,58	0,56	0,48
	σ	0,005	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,005
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,86	0,66	0,61	0,55	0,58	0,56	0,49
	σ	0,005	0,005	0,009	0,005	0,008	0,005	0,000
<b>EDT[s]</b>		0,59	0,52	0,56	0,57	0,53	0,52	0,42
σ		0,12	0,09	0,06	0,05	0,00	0,05	0,04
max		0,90	0,67	0,64	0,66	0,62	0,60	0,48
min		0,45	0,37	0,47	0,50	0,27	0,36	0,28
<b>C50[dB]</b>		3,15	5,90	4,98	5,95	7,58	7,58	8,99
σ		1,57	1,87	0,81	1,31	1,54	1,09	1,10
max		7,20	9,50	6,30	8,40	11,10	9,90	11,10
min		0,70	2,90	3,40	3,80	6,20	6,20	7,20
<b>D50[%]</b>		67,00	78,04	75,92	79,33	84,58	84,92	88,63
σ		7,26	7,21	3,37	4,95	4,07	2,93	2,56
max		85,00	89,00	80,00	87,00	93,00	91,00	93,00
min		55,00	65,00	69,00	71,00	81,00	81,00	84,00
<b>STI</b>		0,76						
σ		0,02						
max		0,80						
min		0,75						
<b>RASTI</b>		0,76						
σ		0,02						
max		0,80						
min		0,74						
<b>%Alcons</b>		2,74						
σ		0,27						
max		3,00						
min		2,20						

Tabelle 59: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen							
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub>[s]</b>		0,77	0,56	0,53	0,52	0,52	0,51
σ		0,063	0,030	0,017	0,010	0,009	0,007
max		0,85	0,61	0,56	0,54	0,54	0,53
min		0,62	0,52	0,50	0,50	0,50	0,51
Max - T <sub>30</sub>		0,08	0,05	0,02	0,02	0,01	0,02
T <sub>30</sub> - min		0,15	0,04	0,03	0,02	0,03	0,01

### Raum 4 (Neues Gebäude, NB)

Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (siehe Abb. 121). Lautsprecherposition 2 wurde nach links verschoben.



Grundgeräuschpegel [dBA]	31
Feuchtigkeit	43 %
Temperatur	23 °C
Messpegel [dB SPL]	85
Anzahl Schüler	15
L x B x H [m]	10 x 6,6 x 3,2
Volumen [m <sup>3</sup> ]	211,2
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,57 s

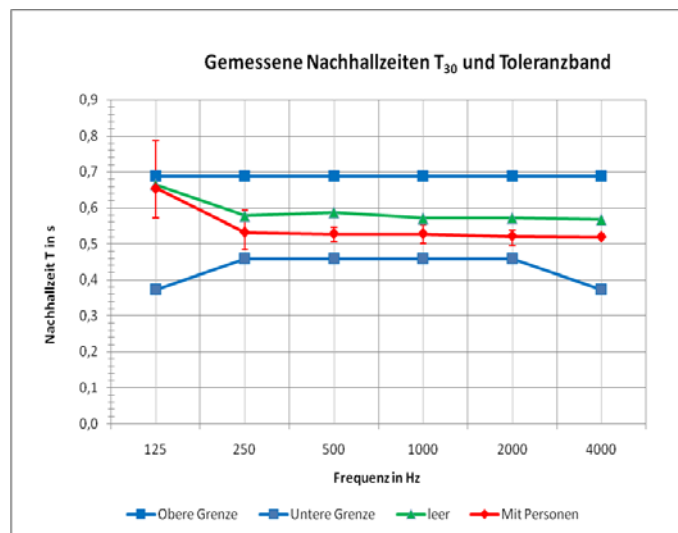


Abb. 148: Gemessene Nachhallzeit, Min-Max-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)

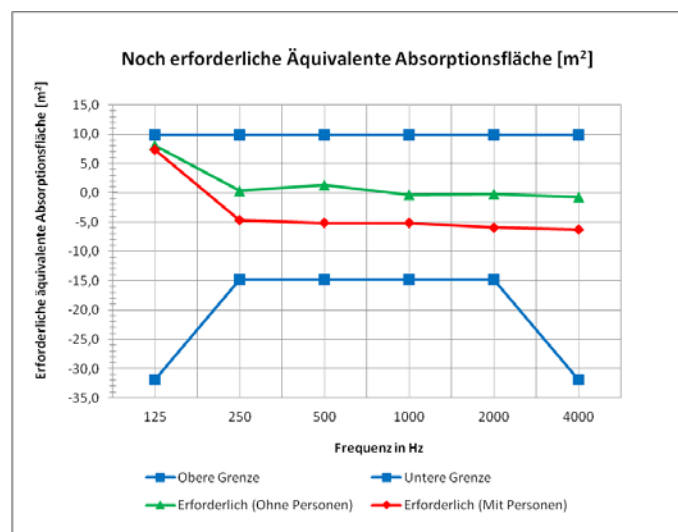


Abb. 149: Noch erforderliche Absorptionsfläche um  $T_{soll}$  zu erreichen und Toleranzband (Personen eingerechnet)

Tabelle 60: Raumakustische Gütemaße

Raum 4 (NB) leer		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub>[s], gemittelt</b>		0,66	0,58	0,59	0,57	0,57	0,57	0,48
$\sigma$		0,061	0,037	0,014	0,014	0,013	0,006	0,007
max		0,80	0,65	0,61	0,60	0,59	0,58	0,49
min		0,58	0,52	0,56	0,54	0,54	0,56	0,47
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,80	0,61	0,56	0,57	0,59	0,56	0,49
	$\sigma$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,65	0,52	0,60	0,58	0,57	0,57	0,49
	$\sigma$	0,005	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,005
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,58	0,58	0,59	0,60	0,54	0,57	0,48
	$\sigma$	0,000	0,005	0,000	0,005	0,005	0,005	0,000
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,67	0,59	0,59	0,57	0,57	0,56	0,48
	$\sigma$	0,000	0,000	0,005	0,005	0,000	0,005	0,000
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,70	0,56	0,58	0,57	0,57	0,58	0,48
	$\sigma$	0,000	0,000	0,005	0,005	0,000	0,005	0,000
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,62	0,58	0,59	0,54	0,57	0,57	0,47
	$\sigma$	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,005	0,000
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,64	0,54	0,61	0,57	0,58	0,57	0,49
	$\sigma$	0,000	0,005	0,005	0,005	0,000	0,000	0,000
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,65	0,64	0,59	0,57	0,58	0,56	0,49
	$\sigma$	0,005	0,005	0,005	0,000	0,005	0,005	0,005
<b>EDT[s]</b>		0,53	0,54	0,59	0,54	0,50	0,49	0,39
$\sigma$		0,10	0,11	0,05	0,06	0,00	0,09	0,06
max		0,63	0,73	0,66	0,62	0,63	0,60	0,49
min		0,31	0,39	0,50	0,44	0,21	0,34	0,29
<b>C50[dB]</b>		4,21	5,08	4,17	5,93	7,53	7,83	9,04
$\sigma$		2,54	1,60	1,31	1,29	1,47	1,00	0,61
max		9,20	7,20	6,80	8,00	10,70	9,40	10,00
min		1,10	1,70	2,70	3,80	5,50	5,80	7,50
<b>D50[%]</b>		70,88	75,54	71,79	79,29	84,50	85,67	88,79
$\sigma$		11,62	7,01	6,03	4,62	3,91	3,08	1,47
max		91,00	84,00	83,00	86,00	92,00	90,00	91,00
min		55,00	60,00	64,00	71,00	78,00	79,00	85,00
<b>STI</b>		0,77						
$\sigma$		0,03						
max		0,81						
min		0,73						
<b>RASTI</b>		0,76						
$\sigma$		0,04						
max		0,83						
min		0,70						
<b>%Alcons</b>		2,72						
$\sigma$		0,38						
max		3,30						
min		2,20						

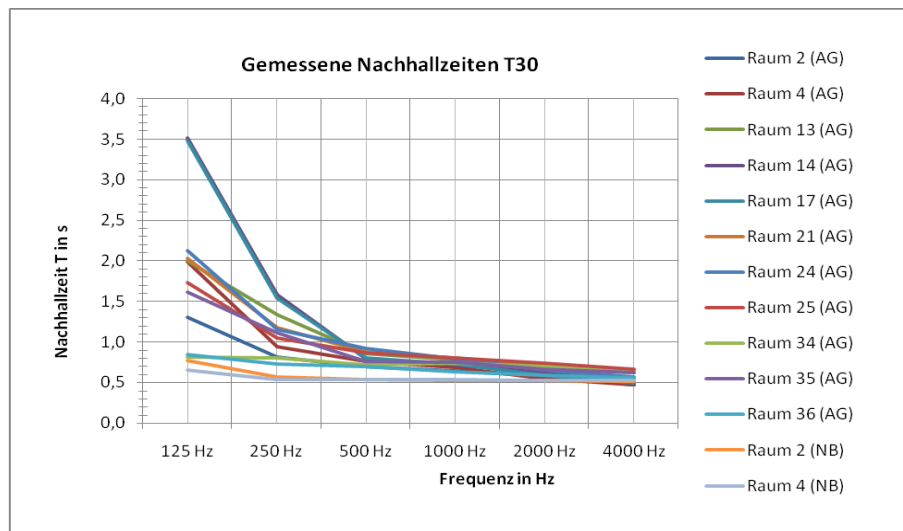
Tabelle 61: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen		125	250	500	1000	2000	4000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub>[s]</b>		0,65	0,53	0,53	0,53	0,52	0,52
$\sigma$		0,059	0,031	0,011	0,012	0,011	0,005
max		0,79	0,59	0,55	0,55	0,54	0,53
min		0,57	0,48	0,51	0,50	0,50	0,51
Max - T <sub>30</sub>		0,13	0,06	0,02	0,02	0,02	0,01
T <sub>30</sub> - min		0,08	0,05	0,02	0,03	0,03	0,01

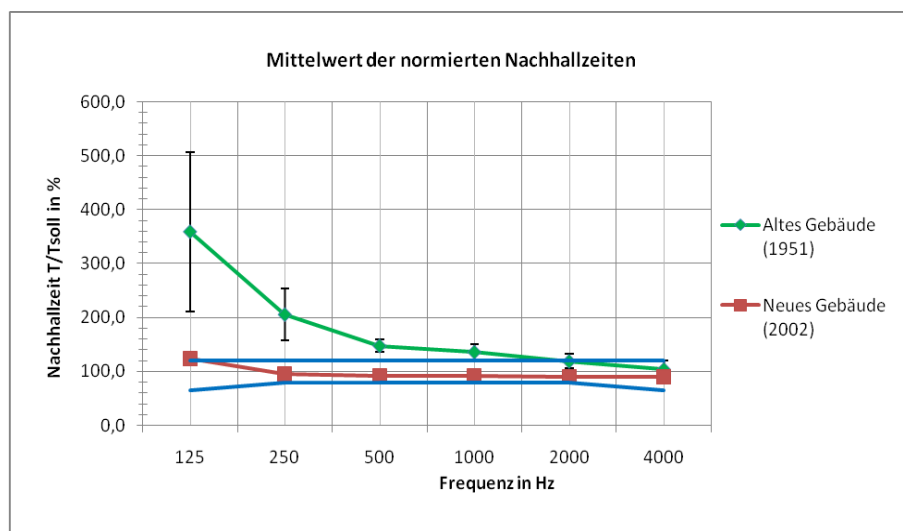


### 4.3.2. Zusammenfassung und Interpretation

Abbildung 150 zeigt die Zusammenfassung der Nachhallzeitmessungen der Grundschule Wiltz und ist vergleichbar mit den Messergebnissen der Studie von Berliner Klassenräumen von Kirchner<sup>283</sup> (siehe Abbildung 113 und 114, S. 121). Auch in dieser Zusammenfassung sind 2 Gruppen von Klassenräumen erkennbar: die Gruppe A hat einen konstanten Nachhallzeitverlauf über den Frequenzbereich während die Nachhallzeit der Gruppe-B-Klassenräume bei tieferen Frequenzen ansteigt.



**Abb. 150:** Zusammenfassung der Nachhallzeitmessungen der Grundschule Wiltz/Luxemburg (Personen eingerechnet) (4 MP, 2 QP, N=24) (AG=Altes Gebäude, NB=Neues Gebäude)



**Abb. 151:** Mittelwert und Standardabweichung der normierten Nachhallzeiten (auf Sollnachhallzeit normiert) für das alte (11 KR) und neue Gebäude (2 KR) (Personen vor Normierung eingerechnet). Das Toleranzband ist in blau eingezeichnet. Die Standardabweichungen für das neue Gebäude sind fast null und für die Darstellung zu gering. (Werte: siehe Tabelle 64)

<sup>283</sup> [KIRCHNER1].

Vergleicht man die Mittelwerte der Nachhallzeiten aus Tabelle 62 mit den Ergebnissen aus den Studien der Tabellen 32 und 33, so stellt man fest, dass die Klassenräume des alten Gebäudes im Vergleich zu den Studienergebnissen hohe Nachhallzeiten aufweisen. Nur Schick und Pekkarinen haben ausnahmsweise ähnlich hohe Werte gemessen.

**Tabelle 62:** Zusammenfassung aller Nachhallzeiten im besetzten Zustand (Personen eingerechnet) (AG=Altes Gebäude, NB= Neues Gebäude)

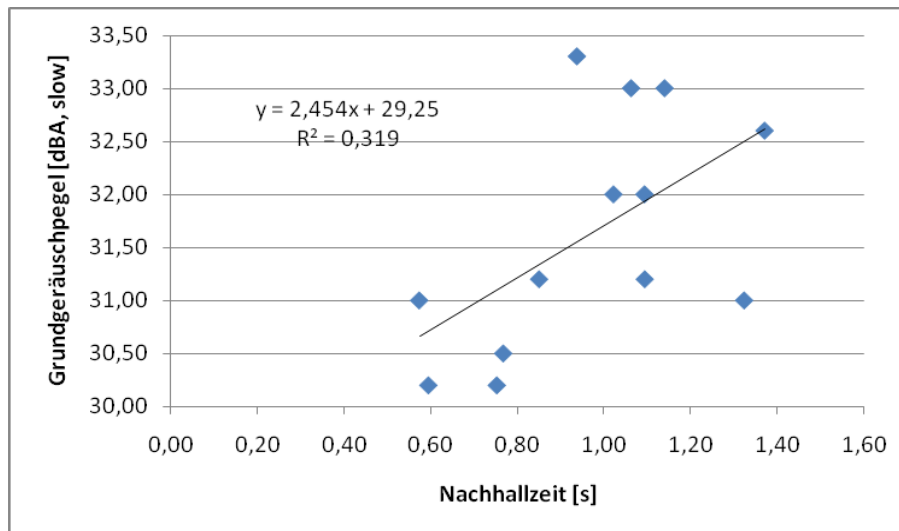
Raum	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	T30 Mittelwert [s]
Raum 2 (AG)	1,31	0,81	0,7	0,64	0,58	0,47	0,75
Raum 4 (AG)	1,99	0,94	0,76	0,68	0,55	0,47	0,90
Raum 13 (AG)	2	1,33	0,85	0,78	0,65	0,52	1,02
Raum 14 (AG)	3,52	1,58	0,79	0,71	0,62	0,5	1,29
Raum 17 (AG)	3,48	1,54	0,8	0,72	0,59	0,49	1,27
Raum 21 (AG)	2,03	1,17	0,88	0,8	0,7	0,65	1,04
Raum 24 (AG)	2,13	1,16	0,92	0,79	0,66	0,57	1,04
Raum 25 (AG)	1,73	1,04	0,86	0,8	0,73	0,66	0,97
Raum 34 (AG)	0,81	0,8	0,72	0,74	0,69	0,62	0,73
Raum 35 (AG)	1,62	1,11	0,76	0,75	0,66	0,62	0,92
Raum 36 (AG)	0,85	0,73	0,7	0,63	0,59	0,56	0,68
Raum 2 (NB)	0,77	0,56	0,53	0,52	0,52	0,51	0,57
Raum 4 (NB)	0,65	0,53	0,53	0,53	0,52	0,52	0,55

Der Grundgeräuschpegel lag in allen Klassenräumen deutlich unter dem WHO-Grenzwert von 35 dB(A) (siehe Anhang B).

**Tabelle 63:** Mittelwert der Nachhallzeiten (125Hz bis 8000 Hz) und Grundgeräuschpegel von 13 leeren Klassenräumen

Raum	T30 Mittelwert [s]	Grundgeräuschpegel (dB(A), slow)
Raum 2 (AG)	0,77	30,50
Raum 2 (NB)	0,60	30,20
Raum 4 (AG)	0,94	33,30
Raum 4 (NB)	0,57	31,00
Raum 13 (AG)	1,09	32,00
Raum 14 (AG)	1,37	32,60
Raum 17 (AG)	1,32	31,00
Raum 21 (AG)	1,14	33,00
Raum 24 (AG)	1,06	33,00
Raum 25 (AG)	1,02	32,00
Raum 34 (AG)	0,85	31,20
Raum 35 (AG)	1,10	31,20
Raum 36 (AG)	0,75	30,20

Abbildung 152 zeigt den Zusammenhang zwischen der mittleren Nachhallzeit und dem Grundgeräuschpegel in 13 leeren Klassenräumen. MacKenzie schreibt dass eine Nachhallzeitreduktion von 0,7 s auf 0,4 s den Grundgeräuschpegel um 4 dB(A) ( $L_{Aeq,15min}$ ) in leeren Klassenräumen minderte (siehe Tabelle 12, S. 58).



**Abb. 152:** Grundgeräuschpegel [dBA, slow] von 13 leere Klassenräume in Abhängigkeit zur Nachhallzeit T30 (Mittelwert von 125 bis 8000 Hz). Regressionsberechnung, siehe Anhang D.

Der Grundgeräuschpegel steigt um 2,5 dB(A) pro 0,1 s Nachhallzeit. Die Steigung ist somit etwas grösser als die Steigung die aus den Ergebnissen von MacKenzie ausgerechnet werden kann.

Die Anzahl der Schüler lag in jedem Klassenraum um 15. Nach den Studienergebnissen von Shield (siehe Abb. 12, S. 22) liegt bei 18 Schüler der LAeq bei 60 dB(A) und der LA90 bei 50 dB(A) und für jeden weiteren Schüler ist mit einer Erhöhung um 1 dB(A) zu rechnen. Somit ist ein LAeq von unter 60 dB(A) und ein LA90 von unter 50 dB(A) in jedem Klassenraum zu erwarten.

**Tabelle 64:** Nachhallzeiten auf die Sollnachhallzeit normiert. (Personen vor Normierung eingerechnet), AG=Altes Gebäude, NB=Neues Gebäude

Raum	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Raum 2 (AG)	2,30	1,42	1,23	1,12	1,02	0,82
Raum 4 (AG)	3,62	1,71	1,38	1,24	1,00	0,85
Raum 13 (AG)	3,57	2,38	1,52	1,39	1,16	0,93
Raum 14 (AG)	6,29	2,82	1,41	1,27	1,11	0,89
Raum 17 (AG)	6,33	2,80	1,45	1,31	1,07	0,89
Raum 21 (AG)	3,76	2,17	1,63	1,48	1,30	1,20
Raum 24 (AG)	3,80	2,07	1,64	1,41	1,18	1,02
Raum 25 (AG)	3,09	1,86	1,54	1,43	1,30	1,18
Raum 34 (AG)	1,69	1,67	1,50	1,54	1,44	1,29
Raum 35 (AG)	3,38	2,31	1,58	1,56	1,38	1,29
Raum 36 (AG)	1,63	1,40	1,35	1,21	1,13	1,08
Raum 2 (NB)	1,33	0,97	0,91	0,90	0,90	0,88
Raum 4 (NB)	1,14	0,93	0,93	0,93	0,91	0,91
Mittelwert (AG)	3,59	2,05	1,48	1,36	1,19	1,04
$\sigma$	1,48	0,47	0,12	0,14	0,14	0,17
Mittelwert (NB)	1,23	0,95	0,92	0,91	0,90	0,90
$\sigma$	0,09	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02

Es zeigt sich, dass das neue Gebäude deutlich niedrigere Nachhallzeiten aufweist.

Die Standardabweichung bei tiefen Frequenzen ist deutlich höher was den Aussagen von Kirchner und Oberdörster (siehe S. 122) entspricht.

Die Entscheidung die jüngeren Schüler im neuen Gebäude mit den raumakustisch optimalen Bedingungen zu unterrichten ist laut Erkenntnissen vieler Studien als richtig zu bewerten. Es können hierfür folgende Gründe zusammengefasst werden:

- Jüngere Kinder brauchen für eine optimale Sprachverständlichkeit deutlich niedrigere Nachhallzeiten und höhere SNR: (siehe Kapitel 3.3.2., Abb. 100, 102, S. 108 und 110)
- Jüngere Kinder werden in ihrer Leistungsfähigkeit bei komplexen Höraufgaben und beim Behalten von seriellen Wortfolgen deutlich mehr von Hintergrundgeräusche gestört (siehe Kapitel 2.2.2., Abb. 60, 61, 62, 64, 65, 68 S.70-77)
- Jüngere Kinder sind lauter als ältere Kinder (siehe Kapitel 1: Abb. 14ff., S. 24 bis 26, sowie Tabelle 3 S.18)

Im Folgenden soll nun untersucht werden, um wie viel sich der Lärmpegel und der Sprachaufwand des Lehrers oder der Lehrerin nach einer akustischen Sanierung senken wird. Es wurden die Erkenntnisse aus den Studien von Oberdörster und aus den Studien über den Lombard-Effekt (siehe Kapitel 2.2. und Kapitel 3.3.) angewandt.

**Tabelle 65:** Minderung des Lärmpegels im Unterricht durch raumakustische Sanierung. T30 ist der Mittelwert der Nachhallzeiten von 125 Hz bis 4000 Hz (Personen eingerechnet). A1 ist die äquivalente Absorptionsfläche des unbehandelten Raumes.  $\Delta A$  ist die zusätzlich einzubringende äquivalente Absorptionsfläche, um die Sollnachhallzeit zu erreichen.  $\Delta L$  entspricht der physikalischen Senkung des Lärmpegels nach DIN 18041. Formeln siehe Kapitel 2.2.1.

Raum	T30 Mittelwert [s]	Raumvolumen [m <sup>3</sup> ]	Sollnachhallzeit [s]	A1 [m <sup>2</sup> ]	$\Delta A$ [m <sup>2</sup> ]	$\Delta L$ [dB] (physikalisch)
Raum 2 (AG)	0,75	198,9	0,57	42,60	13,58	1,2
Raum 4 (AG)	0,90	184,14	0,55	33,00	20,90	2,1
Raum 13 (AG)	1,02	187,1	0,56	29,48	24,31	2,6
Raum 14 (AG)	1,29	187,1	0,56	23,41	30,38	3,6
Raum 17 (AG)	1,27	178,2	0,55	22,59	29,57	3,6
Raum 21 (AG)	1,04	162,36	0,54	25,17	23,23	2,8
Raum 24 (AG)	1,04	193,05	0,56	29,93	25,57	2,7
Raum 25 (AG)	0,97	193,05	0,56	32,04	23,46	2,4
Raum 34 (AG)	0,73	105,56	0,48	23,28	12,13	1,8
Raum 35 (AG)	0,92	105,56	0,48	18,47	16,93	2,8
Raum 36 (AG)	0,68	146,16	0,52	34,78	10,48	1,1
Raum 2 (NB)	0,57	213,31	0,58	60,43	-1,22	-0,1
Raum 4 (NB)	0,55	211,2	0,57	62,20	-2,55	-0,2

**Tabelle 66:** Physikalische nach DIN 18041 und tatsächliche Lärmpegelminderung  $\Delta L$  nach [OBERDOERSTER1] und [LAZARUS1] durch Reduzierung der Nachhallzeit auf die Sollnachhallzeit. (siehe Kapitel 2.2.)  $\Delta L_{\text{Lehrerstimme}}$  ist die Minderung des Sprachpegels von Lehrer/innen durch den Lombard-Effekt nach [SATO] aus dem Jahr 2008 (siehe Kapitel 3.3.)

Raum:	$\Delta L$ [dB] (physikalisch)	$\Delta L$ [dBA] (tatsächlich)		$\Delta L_{\text{Lehrerstimme}}$ [dBA] (0,72 dB pro $\text{dB}_{\text{LNA}}$ )	
		1 dBA pro 0,1 s	2 dBA pro 0,1 s	Minimal	Maximal
Raum 2 (AG)	1,2	1,8	3,6	1,3	2,6
Raum 4 (AG)	2,1	3,5	7,0	2,5	5,0
Raum 13 (AG)	2,6	4,6	9,2	3,3	6,6
Raum 14 (AG)	3,6	7,3	14,5	5,2	10,5
Raum 17 (AG)	3,6	7,2	14,4	5,2	10,4
Raum 21 (AG)	2,8	5,0	10,0	3,6	7,2
Raum 24 (AG)	2,7	4,8	9,6	3,4	6,9
Raum 25 (AG)	2,4	4,1	8,2	3,0	5,9
Raum 34 (AG)	1,8	2,5	5,0	1,8	3,6
Raum 35 (AG)	2,8	4,4	8,8	3,2	6,3
Raum 36 (AG)	1,1	1,6	3,1	1,1	2,3
Raum 2 (NB)	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2
Raum 4 (NB)	-0,2	-0,2	-0,5	-0,2	-0,3

Tabelle 66 zeigt, dass durch eine akustische Sanierung der Klassenräume im Alten Gebäude hohe Lärmpegelsenkungen im Unterricht zu erwarten sind, außerdem senkt sich der Stimm- und Sprechpegel des Lehrers oder der Lehrerin öfters um 6 dB, was einer Sprechanstrengungsstufe nach ISO 9921 entspricht. (siehe Tabelle 31). Selbstverständlich können diese Pegelsenkungen durch eine Sanierung des Klassenraums nicht garantiert werden, da der Lärmpegel von vielen Faktoren im Unterricht abhängig ist: So gibt es Unterschiede im Lärmpegel zwischen den Schulen (siehe Abb. 11, S. 22) und den Lehrern (Abb. 13, S. 23), allerdings nicht zwischen den Schulzweigen (Tabelle 5 S.23), außerdem hat der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft im Klassenraum und die Anzahl der Schüler auch Einfluss auf den Lärmpegel (siehe Abb. 33, S. 37)

Für die Berechnung der Sprachpegelreduzierung wurde die Studie von Sato<sup>284</sup> benutzt, da diese Studie die aktuellste (Jahr 2008) und umfangreichste Studie über den Lombard-Effekt bei Lehrer/innen war, die vorlag. Andere Studien geben eine höhere Steigung des Sprechpegels an (siehe Kapitel 3.3.).

Zusammenfassend kann die raumakustische Sanierung des Alten Gebäudes auf die Sollnachhallzeit folgende Effekte mit sich bringen:

<sup>284</sup> [SATO].



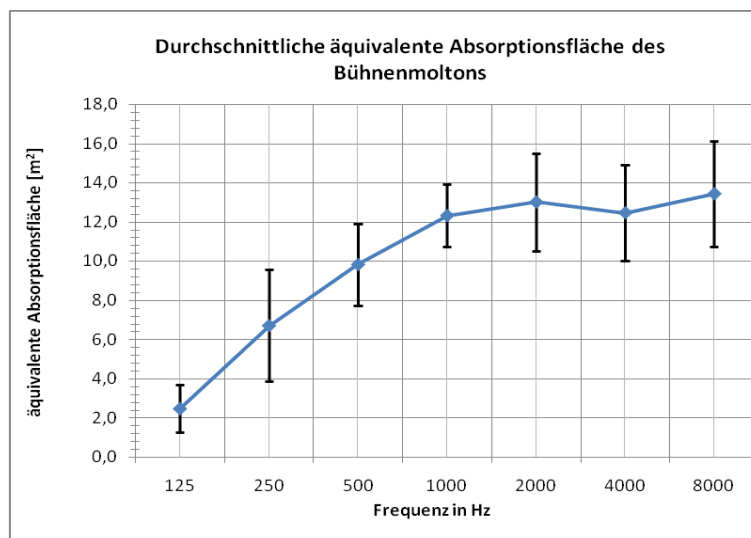
**Abb. 153:** Positive Effekte durch Sanierung der Klassenräume des Alten Gebäudes ( $T=0,9s$ ) auf die Sollnachhallzeit ( $T=0,5s$ ). Einige Effekte, die in der Abbildung transparent dargestellt sind, wurden in den Studien bei einer Reduzierung der Nachhallzeit auf unter  $0,5s$  beobachtet.

- Reduzierung des Lärmpegels (Arbeits- und Grundgeräuschpegel) im Klassenraum um 4 bis 8 dB(A). Reduzierung der Lärmbelastung der Lehrerin oder des Lehrers sowie Reduzierung der subjektiven Lärmbelastung der Schüler und Schülerinnen. (Kapitel 2.2.1)
- Zunahme der Sprachverständlichkeit (siehe Kapitel 3.2.1). Laut der Vorhersage von Oberdörster (siehe Abb. 94 S.100) wird durch eine Reduzierung der Nachhallzeit von  $0,9s$  auf  $0,5s$  der STI-Wert von  $0,6$  auf  $0,7$  verbessert. Laut Farrel-Becker-Formel (S.103) verbessert sich der %Alcons-Wert von  $6,6$  auf  $3,8$ . Laut dem Vorhersagemodell von Bradley (siehe S.97 und S.98) wird der C50-Wert von  $0,6$  dB auf  $4,7$  dB verbessert. Die Verbesserung der subjektiven Sprachverständlichkeit ist stark abhängig vom Alter und von der Hörfähigkeit der Schüler, sowie vom SNR im Klassenraum. (siehe Kapitel 3.2.2, siehe auch S.37)
- Reduzierung des Sprachaufwands des Lehrers oder der Lehrerin um 3 bis 6 dB(A). (siehe Kapitel 3.3.)

- Die Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels für nacheinander folgende Unterrichtsstunden über den Vormittag ist deutlich reduziert oder bleibt aus. (Abb. 25 und 26 S.30 bis S.31; Tabelle 13 und 14 S. 60)
- Reduzierung der Lärmempfindlichkeit des Lehrers oder der Lehrerin: Reduzierung der Steigung der Herzfrequenz in Abhängigkeit vom Lärmpegel im Klassenraum. (Reduzierung der Herzfrequenzreaktion auf den Stressor „Lärm“) (Abb. 50, S. 64)
- Ausgleich zwischen Ermüdungs- und Aktivierungsphasen (Herzfrequenz-Trendwerte) der Lehrerin oder des Lehrers (siehe Kapitel 2.2.) (Abb. 48 und Abb. 49 S. 63)
- Reduzierung oder Ausbleiben der Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels bei Wechsel zu differenzierten Arbeitsformen (Abb. 19, 20, 21 S. 27 und S. 28)
- Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Schüler (siehe Kapitel 2.2.2.)
- Verbesserung der Lehrer-Schüler-Beziehung („kommunikative Klima“) (siehe S. 65 bis 68)

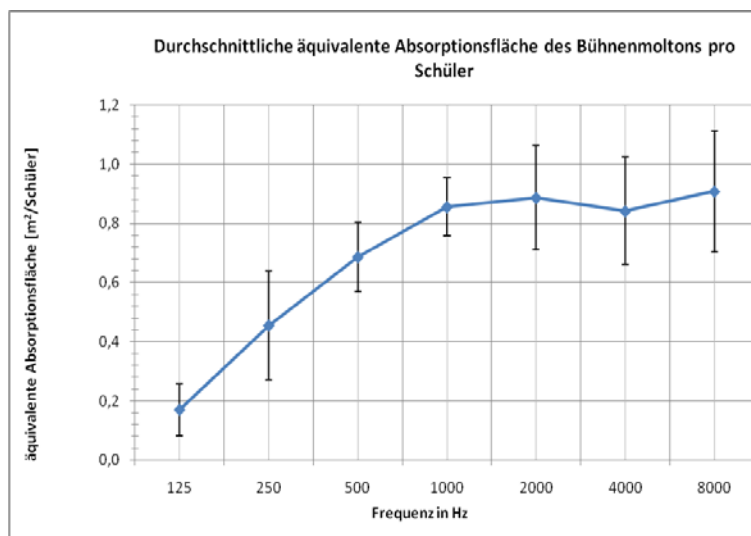
### 4.3.3. Durchschnittliche äquivalente Absorptionsfläche des Bühnenmoltons im Vergleich zur äquivalenten Absorptionsfläche der Schüler/innen

Die Anzahl der Schüler/innen war im Mittel  $14,4 \pm 1,2$ . Es wurde in jedem Klassenraum die gleiche Menge an Bühnenmolton verwendet und die durchschnittliche äquivalente Absorptionsfläche des Bühnenmoltons pro Klassenraum (räumlicher Mittelwert) ermittelt sowie nachher über 13 Klassenräume gemittelt.



**Abb. 154:** Mittelwert und Standardabweichung der äquivalenten Absorptionsfläche gleicher Menge an Bühnenmolton in 13 Klassenräumen. (Werte, siehe Anhang D)

Es wurde die durchschnittliche äquivalente Absorptionsfläche des Bühnenmoltons pro vorgesehene Anzahl an Schülern/innen (räumlicher Mittelwert) in jedem Klassenraum ermittelt und nachher über 13 Klassenräume gemittelt.

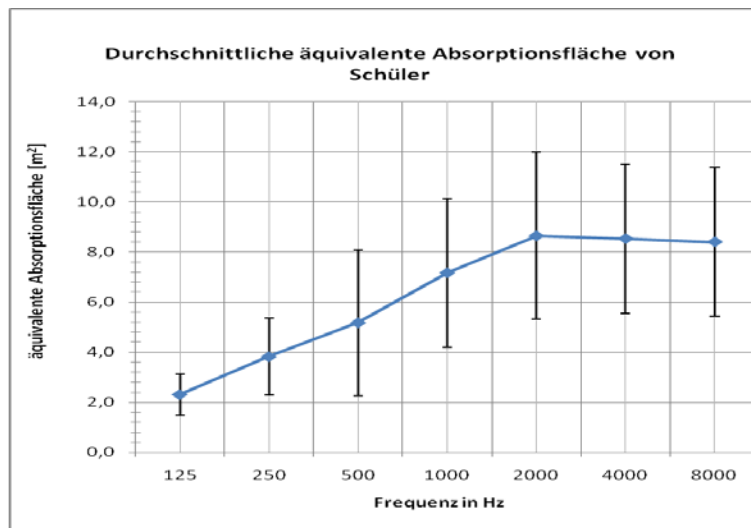


**Abb. 155:** Äquivalente Absorptionsfläche (Mittelwert, Standardabweichung) gleicher Menge an Bühnenmolton pro Schüler/in in 13 Klassenräumen. (Werte, siehe Anhang D)



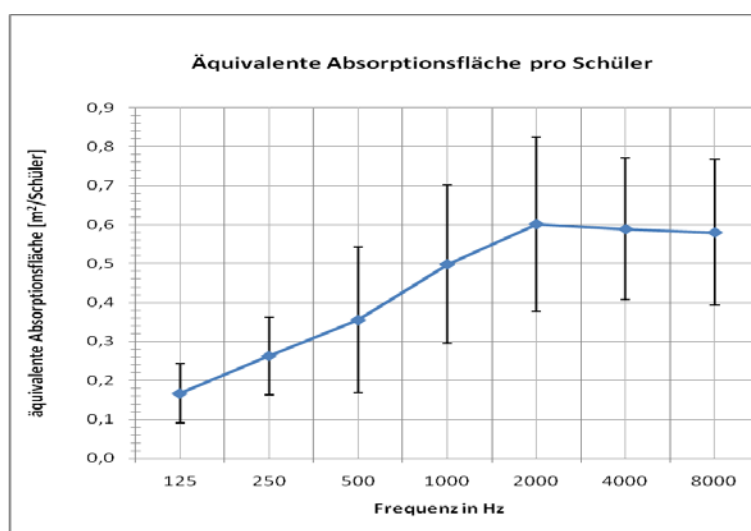
### Durchschnittliche äquivalente Absorptionsfläche von Schüler/innen

Es wurde die durchschnittliche äquivalente Absorptionsfläche der Schüler/innen pro Klassenraum ermittelt (räumlicher Mittelwert) und nachher über 8 Klassenräume gemittelt.



**Abb. 156:** Durchschnittliche äquivalente Absorptionsfläche von Schüler/innen in 8 Klassenräumen. Es wurde das Volumen des jeweiligen Klassenraumes verrechnet. Die Anzahl der Schüler/innen war im Mittel 14,4 ( $\sigma = 1,2$ ) (Werte, siehe Anhang D)

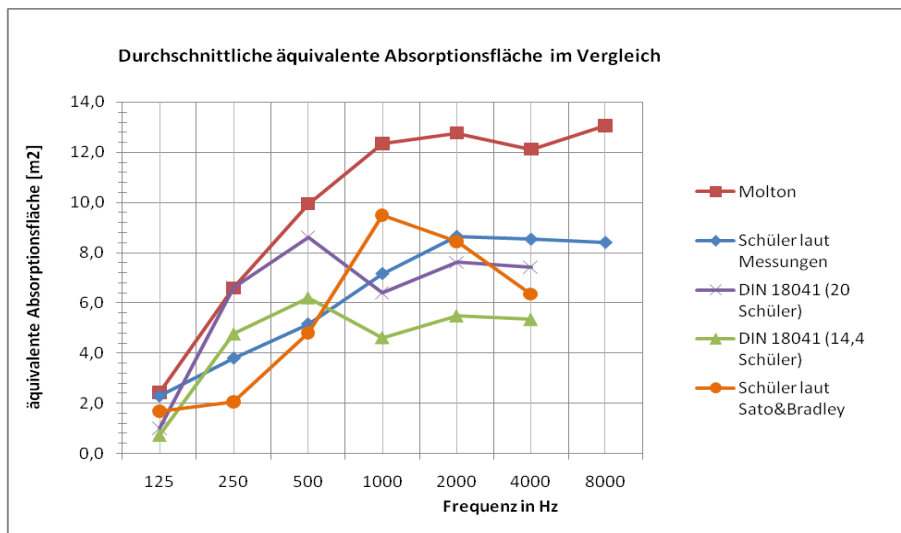
Es wurde die äquivalente Absorptionsfläche (räumlicher Mittelwert) pro Schüler/in in jedem Klassenraum mit vorhandener Anzahl an Schüler/innen ermittelt und nachher über 8 Klassenräume gemittelt.



**Abb. 157:** Äquivalente Absorptionsfläche pro Schüler/in (Mittelwert und Standardabweichung) von 8 Klassenräumen. (Werte, siehe Anhang D)

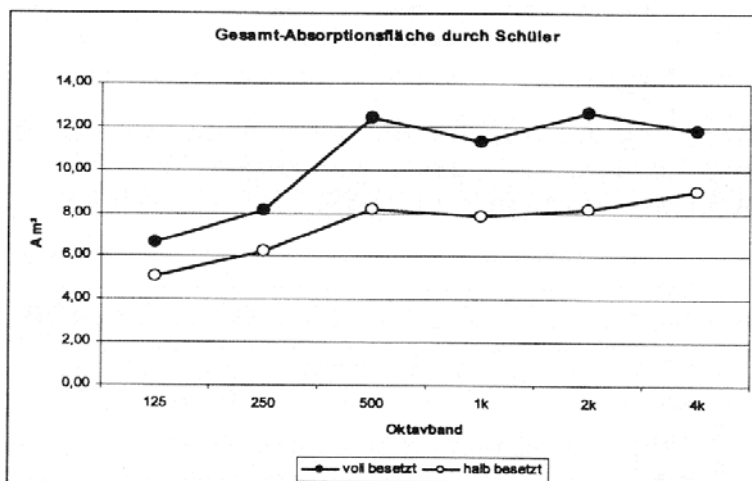
### Vergleich der äquivalenten Absorptionsflächen:

Der Vergleich der äquivalenten Absorptionsfläche des Bühnenmoltons mit der äquivalenten Absorptionsfläche der Schüler/innen (laut Messungen) zeigt, dass eine zu große Menge an Bühnenmolton verwendet wurde. Die äquivalente Absorptionsfläche der Schüler/innen laut den Messungen ist der äquivalenten Absorptionsfläche von Sato&Bradley<sup>285</sup> sehr ähnlich:



**Abb. 158:** Äquivalente Absorptionsfläche der festgelegten Menge an Molton in 13 Klassenräumen im Vergleich zu der äquivalenten Absorptionsfläche von Schülern/innen (Anzahl an Schüler war im Mittel: 14,4) in 8 Klassenräumen und der äquivalenten Absorptionsfläche von 20-21 Schüler/innen in 30 Klassenräumen nach [SATO] sowie der äquiv. Absorptionsfläche von 14,4 oder 20 Schüler nach DIN 18041 (Werte siehe Anhang D)

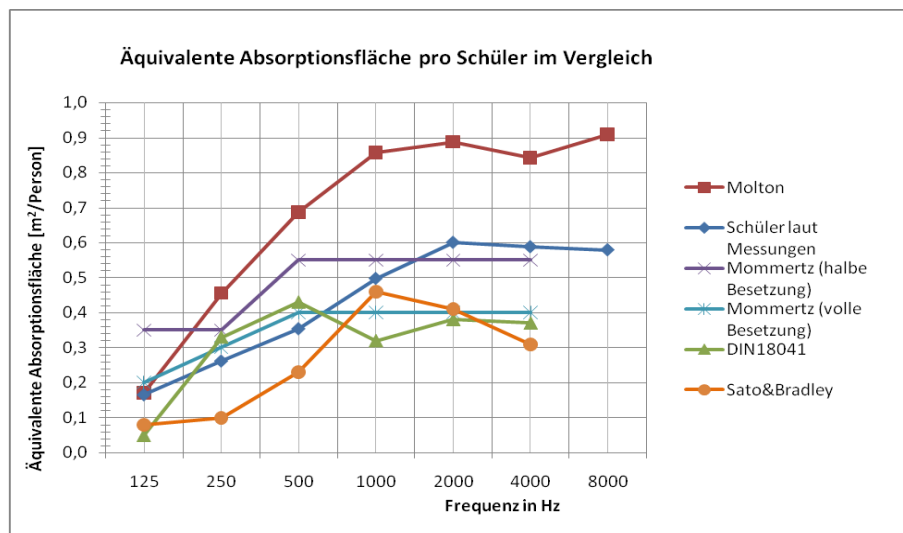
Die äquivalente Absorptionsfläche des Moltons passt sehr gut mit der Gesamtabsorptionsfläche der Schüler/innen (volle Besetzung, 23-24 Personen) laut Messungen von Oberdörster zusammen. Die äquivalente Absorptionsfläche der Schüler/innen laut Messungen zeigt eine große Ähnlichkeit mit den Ergebnissen von Oberdörster für 13-14 Schüler (Halbe Besetzung), insbesondere zwischen 500 und 4000 Hz.



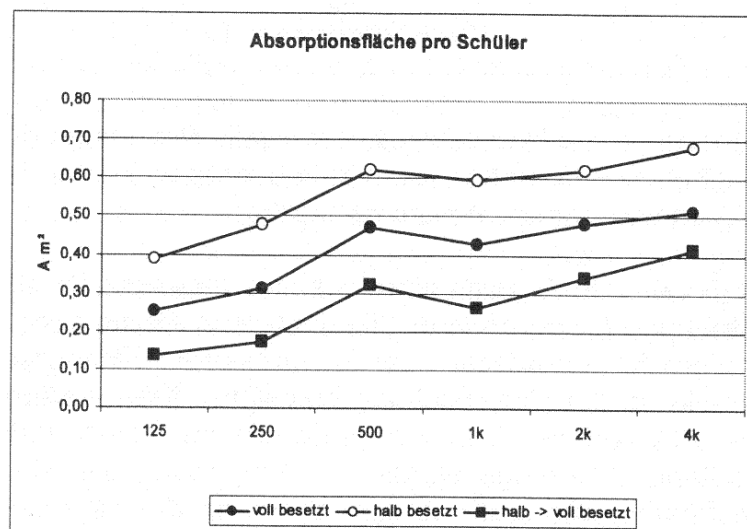
**Abb. 159:** Äquivalente Absorptionsfläche für unterschiedliche Besetzungen (Halb: 13-14 Schüler, Voll: 23-24 Schüler) nach [OBERDÖRSTER]

<sup>285</sup> [SATO].

Für die äquivalente Absorptionsfläche pro Schüler sind Ergebnisse aus mehreren Studien erhältlich. Wie folgende Abbildung zeigt, ist die Absorption des Bühnenmoltons für mittlere Frequenzen von 500 bis 2000 Hz völlig überdimensioniert. Zu bemerken bleibt, dass die äquivalente Absorptionsfläche pro Person in halbvoller Besetzung höher liegt als in voller Besetzung (siehe Mommertz<sup>286</sup>). Dies liegt laut Oberdörster<sup>287</sup> daran, dass bereits bei den ersten 12-15 Schüler/innen 70 % der Gesamtabsorptionsfläche im Raum vorhanden ist (siehe folgende Abbildungen):



**Abb. 160:** Äquivalente Absorptionsfläche pro Schüler laut Messungen der Schüler/innen (8 KR) und des Moltons (13 KR), laut [MOMMERTZ2], der DIN18041 und [SATO] (30 KR) (Werte, siehe Anhang D)

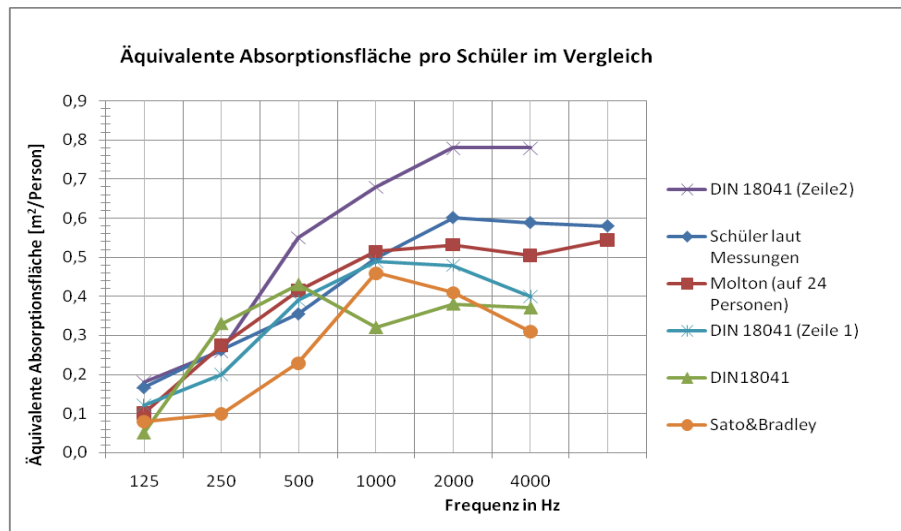


**Abb. 161:** Äquivalente Absorptionsfläche pro Schüler/in bei unterschiedlicher Besetzung nach [OBERDOERSTER]

<sup>286</sup> [MOMMERTZ].

<sup>287</sup> [OBERDOERSTER, S. 75].

Da die verwendete Moltonmenge für die vorgesehene Anzahl an Schüler zu groß war, allerdings die äquivalente Absorptionsfläche des Moltons ziemlich genau auf die äquivalente Absorptionsfläche von 20-24 Schüler laut Oberdörster passte, wurden im folgenden noch einmal verschiedene Absorptionsflächen pro Schüler gegenübergestellt. Dabei wurde die äquivalente Absorptionsfläche des Bühnenmoltons auf 24 Schüler bezogen.



**Abb. 162:** Äquivalente Absorptionsfläche pro Schüler laut Messungen der Schüler/innen (8 KR) und des Moltons (13 KR, auf 24 Personen berechnet), laut [MOMMERTZ2], der DIN18041 (Zeile 1 und 2), der DIN18041 für Schüler und [SATO] (30 KR) (Werte, siehe Anhang D)

DIN 18041 (1 m <sup>2</sup> /Person) (Zeile 2)	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
A <sub>schüler</sub> / Person	0,18	0,26	0,55	0,68	0,78	0,78

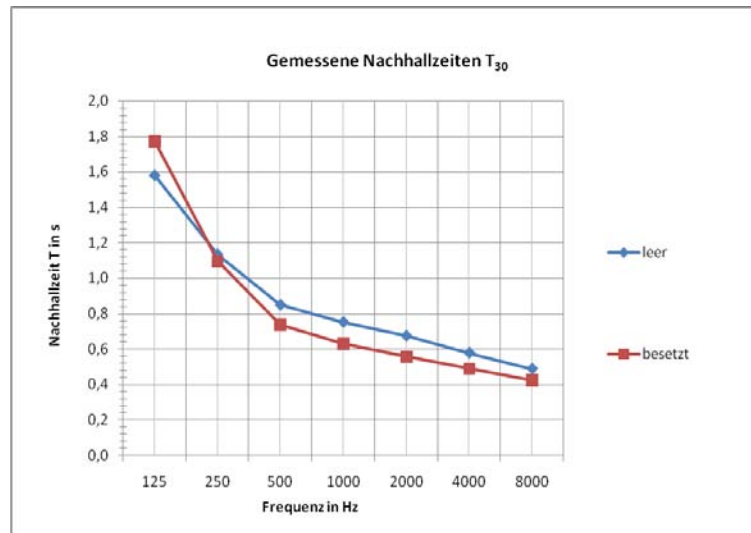
Messungen:	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
A <sub>molton</sub> [m <sup>2</sup> /24	0,10	0,27	0,41	0,51	0,53	0,50	0,54

DIN 18041 (0,5 m <sup>2</sup> /Person) (Zeile 1)	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
A <sub>schüler</sub> / Person	0,12	0,2	0,39	0,49	0,48	0,4

Messungen:	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
A <sub>schüler</sub> / Schüler	0,17	0,26	0,35	0,50	0,60	0,59	0,58
σ	0,076	0,099	0,187	0,203	0,224	0,182	0,188
Min	0,09	0,08	0,04	0,22	0,26	0,29	0,27
Max	0,31	0,39	0,67	0,81	0,90	0,83	0,86

Interessanterweise passen die Ergebnisse der Messungen bei 125 Hz und 250 Hz sehr genau mit den Angaben der DIN 18041 (Zeile 2) zusammen. Die verwendete Moltonmenge simuliert, wie aus den Untersuchungen ersichtlich ist, ziemlich exakt 24 Schüler im Klassenraum.

#### 4.3.4. Vergleich der durchschnittlichen Nachhallzeit von 8 Klassenräumen im besetzten und leeren Zustand



**Abb. 163:** Mittelwert der Nachhallzeit von 8 Klassenräumen im besetzten und unbesetzten Zustand (räumlicher Mittelwert). Die Standardabweichung wurde wegen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. (Werte, siehe Anhang D)

**Tabelle 67:** Mittelwerte der Nachhallzeiten von 8 Klassenräumen im besetzten und unbesetzten Zustand.

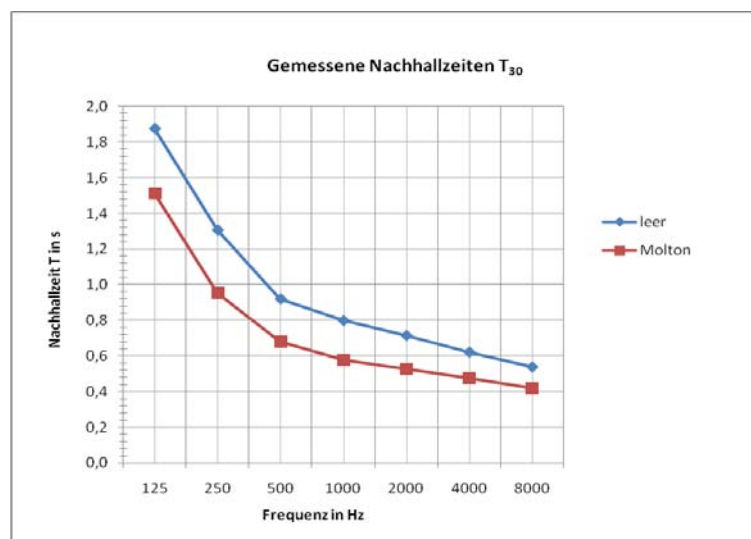
Mittelwerte aller 8 Klassenräume							
F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$T_{30}$ unocc. [s]	1,58	1,13	0,85	0,75	0,67	0,58	0,49
$\sigma$	0,60	0,36	0,15	0,12	0,09	0,08	0,07
$T_{30}$ occ. [s]	1,77	1,09	0,74	0,63	0,56	0,49	0,42
$\sigma$	0,93	0,46	0,14	0,10	0,07	0,05	0,04
Differenz	-0,19	0,04	0,11	0,12	0,12	0,09	0,06

Die höhere Nachhallzeit bei 125 Hz im besetzten Zustand kann unterschiedliche Gründe haben: Kinder sind nicht ganz ruhig während der Messungen, resonierende Gegenstände sind üblicherweise in diesem Frequenzbereich, Raummoden, Messfehler innerhalb der Messkette...

Für die Messungen wurde die äquivalente Absorptionsfläche von Schülern in Unterrichtsräumen an Holztischen ( $3 \text{ m}^2$  / Person) nach DIN 18041 verrechnet, um normgerechte Messergebnisse vorzulegen (siehe Tabelle 35).

### 4.3.5. Vergleich der durchschnittlichen Nachhallzeit von 13 Klassenräumen mit und ohne Bühnenmolton

Durchschnittliche Nachhallzeit [s] von 13 KR mit und ohne Molton								
leer	Mittelwert	1,88	1,31	0,92	0,80	0,72	0,62	0,54
	$\sigma$	1,00	0,51	0,16	0,12	0,10	0,09	0,08
Molton	Mittelwert	1,51	0,95	0,68	0,58	0,53	0,48	0,42
	$\sigma$	0,64	0,29	0,11	0,07	0,04	0,04	0,03



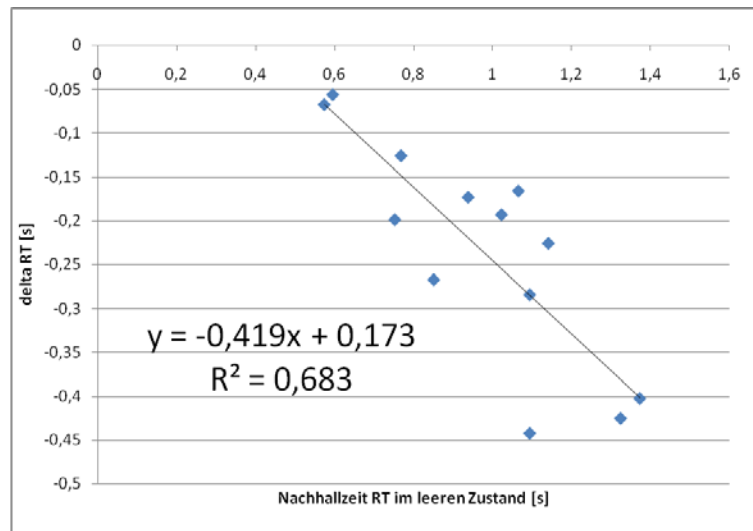
**Abb. 164:** Mittelwert der Nachhallzeit [s] von 13 Klassenräumen leer und mit Molton. (räumlicher Mittelwert). Die Standardabweichung wurde wegen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. (Werte, siehe Anhang D)

Es zeigt sich, dass die Nachhallzeit durch die verwendete Menge an Molton mehr als 0,3 s im Vergleich zur Nachhallzeit des leeren Zustandes reduziert wird. Diese Reduktion ist deutlich höher als die Reduktion von 0,2 s, die durch das Absorptionsverhalten der Kinder verursacht wurde. Es zeigt sich auch hier, dass die verwendete Menge an Molton für die Anzahl an Schülern zu hoch war.

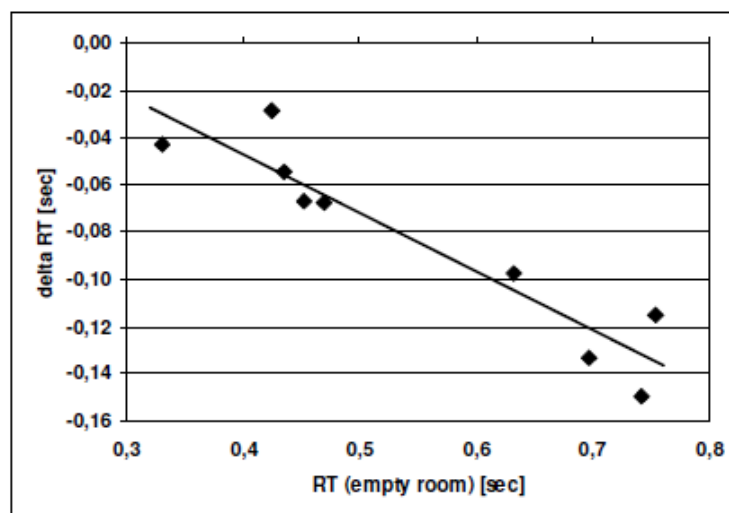
Folgende Grafik zeigt den Unterschied der Nachhallzeit zwischen dem leeren Zustand eines Klassenraums und dem Klassenraum mit Bühnenmolton (delta). Die Nachhallzeiten sind Mittelwerte über alle Frequenzen (125 Hz bis 8000 Hz). Im Vergleich zu den Ergebnissen von Machner<sup>288</sup> oder Oberdörster<sup>289</sup> ist die Steigung des Deltas beim Bühnenmolton viel niedriger.

<sup>288</sup> [MACHNER].

Wie in Kapitel 4.3.2 festgestellt wurde entspricht die äquivalente Gesamtabsorptionsfläche des Bühnenmoltons laut Berechnungen der äquivalenten Gesamtabsorptionsfläche der Schüler bei voller Besetzung (23-24 Schüler) laut Oberdörster. Allerdings bestätigt sich diese Aussage nicht für Auswertungen der durchschnittlichen Nachhallzeiten (125 Hz bis 8000 Hz), wie folgende Abbildungen zeigen:



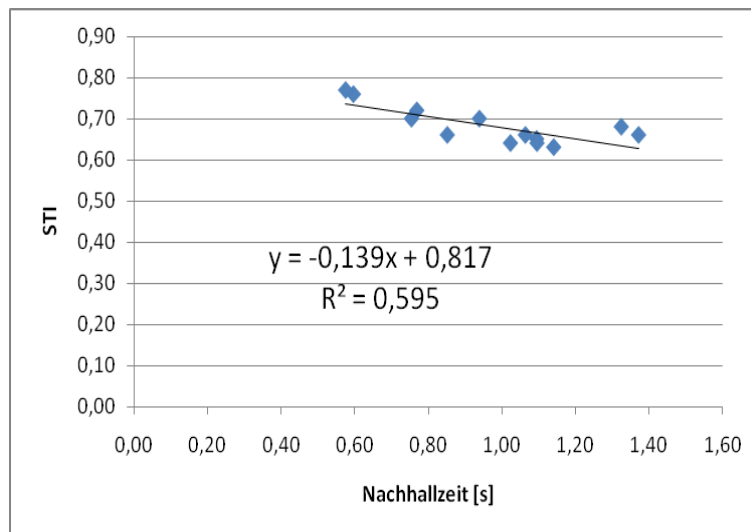
**Abb. 165:** Veränderung der Nachhallzeit T30 (RT) durch die verwendete Menge an Bühnenmolton im Vergleich zum leeren Zustand. 13 KR. (Werte und Regressionsberechnung, siehe Anhang D)



**Abb. 166:** Veränderung der Nachhallzeit durch volle Besetzung der Klassenräume mit Schülern im Vergleich zum leeren Zustand.  $\Delta RT = 0,052 - 0,249 \cdot RT$ ; Korrelationskoeffizient  $r = -0,94$ ; 23-24 Schüler. [OBERDOERSTER1, S.72], [MACHNER]

<sup>289</sup> [OBERDOERSTER1].

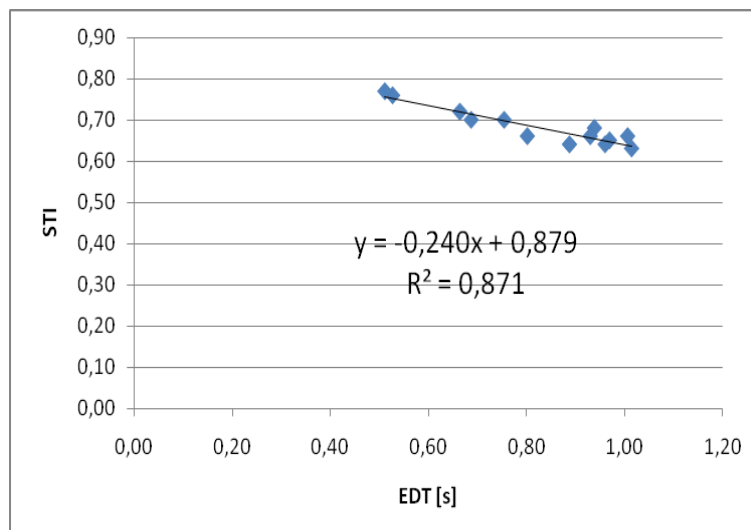
### 4.3.6. STI und EDT in Abhängigkeit von der Nachhallzeit $T_{30}$



**Abb. 167:** STI in Abhängigkeit von der Nachhallzeit (Mittelwert von 125 Hz bis 8000 Hz) von 13 leeren KR. (Regressionsberechnung und Werte, siehe Anhang D)

[TIESLER4] hat folgende Trendlinie gefunden:  $STI = -0,25T + 0,9$  ;  $R^2 = 0,91$

[OBERDOERSTER1]:  $STI = -0,361 \cdot RT + 0,949$  ;  $r = 0,977$



**Abb. 168:** STI in Abhängigkeit vom EDT von 13 leeren Klassenräumen. (Regressionsberechnung und Werte, siehe Anhang D)

[MOMMERTZ] hat aus Modellberechnungen mit CATT folgende Trendlinie gefunden:

$$STI = -0,356 \cdot EDT + 0,941 ; R^2 = 0,989$$



### Interpretation:

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es einen Zusammenhang zwischen dem STI und der Nachhallzeit sowie STI und EDT im Klassenraum gibt. Die Ergebnisse aus den Studien bestätigen diesen Zusammenhang, obwohl die Trendlinien der Messergebnisse sich von den Trendlinien der Studien unterscheiden. Der Grund hierfür liegt im Besetzungszustand der Klassenräume. Nur [OBERDOERSTER1] hat ein Diagramm zur Vorhersage der STI in Abhängigkeit von der Nachhallzeit für alle Besetzungszustände (voll, halbvoll, leer). Die Messungen bestätigen dass eine Vorhersage des STI durch die Nachhallzeit über einen linearen Zusammenhang möglich ist.

#### 4.3.7. Nachhallzeit von Fluren und Schallpegelmessungen während den Pausen

Die Nachhallzeiten von vier Fluren im alten Gebäude und von einem Flur im neuen Gebäude wurden gemessen. Als Grenzwert für die Nachhallzeit gilt die Empfehlung der Firma Ecophon<sup>290</sup> von 0,6 s in Fluren und 0,8 s in Treppenhäusern von Schulen, welche der schwedischen Norm entspricht. Im Gegensatz zu den Normen der skandinavischen Länder schreibt die DIN 18041 leider keinen Wert für die Nachhallzeit in Fluren und Treppenhäusern von Schulen vor.

**Tabelle 68:** Richtwerte an die Nachhallzeit für Flure und Treppenhäuser in anderen europäischen Ländern [KIRCHNER2]

Land	Norm	Nachhallzeit
Schweden	SS 025268 (2007)	Gymnasium: 0,6-0,8 s (Flure) 1-1,5 s (Treppenhäuser) Vorschule, Grundschule: 0,5 s (Flure) 0,8 s (Treppenhäuser)
Norwegen	NS 8175 (2005)	0,8-0,9 s (Flure) 0,8-1,3 s (Treppenhäuser)
Finnland	SFS 5907 (2004)	<0,9 s bzw. <1,3 s
Dänemark	Bygningsreglement 2008	≤ 0,4s (Flure mit Gruppenarbeit) ≤ 0,9s (Flure ohne Gruppenarbeit) ≤ 1,3 s (Treppenhäuser)

Die Schallpegelmessungen während der Pausen wurden in der Mitte eines jeden Flures durchgeführt, so lange bis sich keine Person mehr im Flur befand. Dargestellt sind die Schallpegelmessungen als relative Häufigkeiten für zwei Gruppen von Fluren. Alle Flure im alten Gebäude waren mit zwei Treppenhäusern verbunden, deshalb zirkulierte der Schall durch das ganze Gebäude und erzeugte insbesondere bei tiefen Frequenzen hohe Nachhallzeiten.

<sup>290</sup> [ECOPHON, S. 121].



Erdgeschoss (Altes Gebäude, AG)	
Grundgeräuschpegel [dBA]	32,3
Feuchtigkeit	51 %
Temperatur	19 °C
Messpegel [dB SPL]	90
L x B x H [m]	61,4 x 3 x 3,5



Flur 1. Stock (Altes Gebäude, AG)	
Grundgeräuschpegel [dBA]	36,4
Feuchtigkeit	47 %
Temperatur	21 °C
Messpegel [dB SPL]	90
L x B x H [m]	59,7 x 3,1 x 3,5



Flur 2. Stock (Altes Gebäude, AG)	
Grundgeräuschpegel [dBA]	35
Feuchtigkeit	54 %
Temperatur	18 °C
Messpegel [dB SPL]	90
L x B x H [m]	60 x 3,1 x 3,4



Flur 3. Stock (Altes Gebäude, AG)	
Grundgeräuschpegel [dBA]	34,1
Feuchtigkeit	45 %
Temperatur	23 °C
Messpegel [dB SPL]	90
L x B x H [m]	46,4 x 3 x 2,8



Flur EG (Neues Gebäude, NG)	
Grundgeräuschpegel [dBA]	33
Feuchtigkeit	42 %
Temperatur	22 °C
Messpegel [dB SPL]	90
L x B x H [m]	23,5 x 2,6 x 2,9

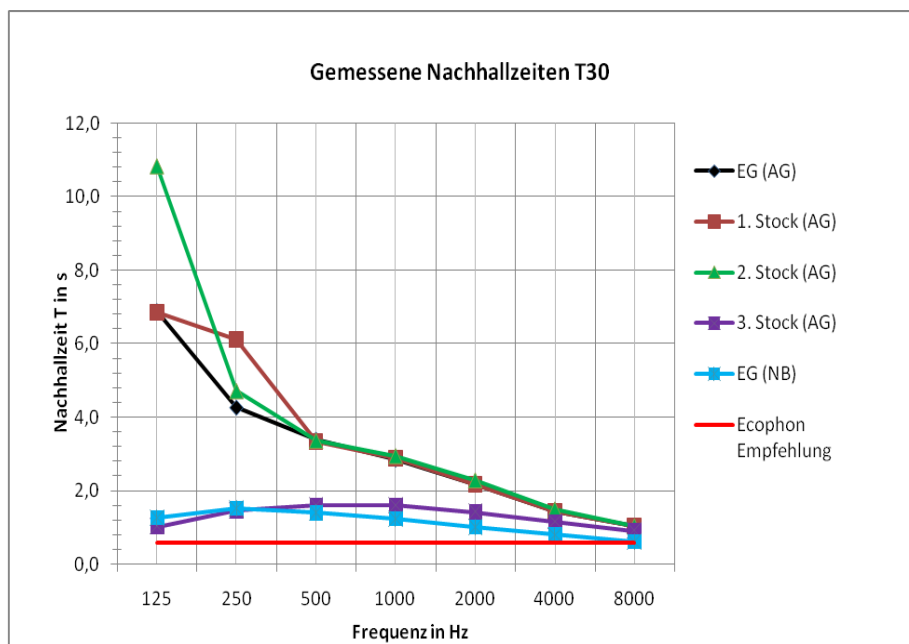
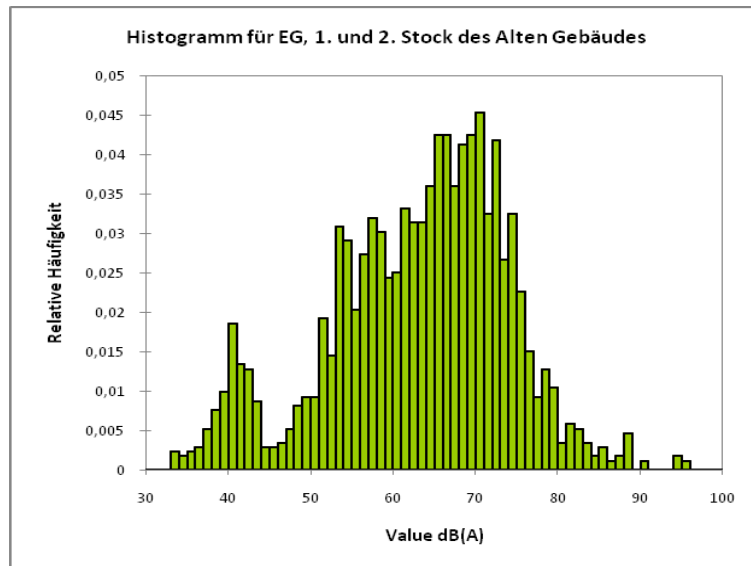
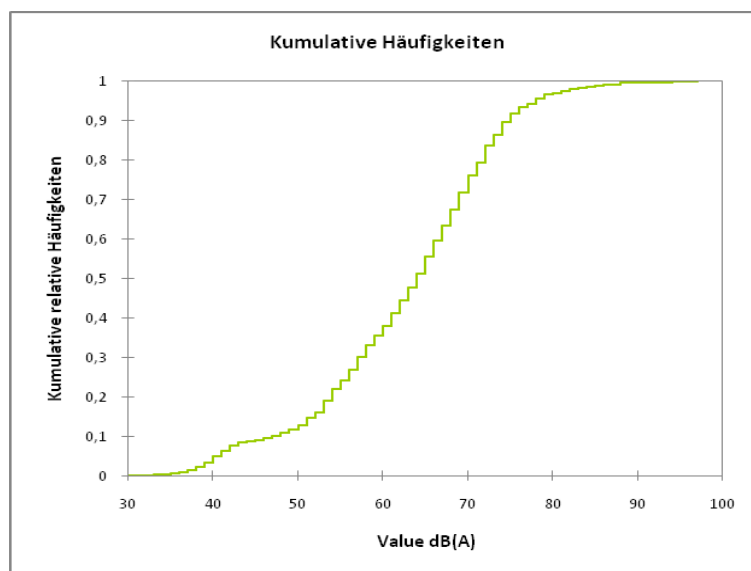


Abb. 169: Nachhallzeiten der Flure und Ecophon-Empfehlung von 0,6 s. (Werte, siehe Anhang D)

Abb. 169 zeigt die Nachhallzeiten der Flure. Keiner der Flure erfüllt die Empfehlung der Firma Ecophon. Der Flur des neuen Gebäudes und des 3. Stocks des alten Gebäudes kommen dieser Empfehlung mit Nachhallzeiten zwischen 0,6 und 1,5 s am nächsten. Die Nachhallzeiten stimmen mit den Ergebnissen von Berliner Schulen nach Kirchner überein (siehe Abb. 115, S. 122). Die Nachhallzeiten der Flure im mittleren Frequenzbereich haben das gleiche Ausmaß wie bei Schick<sup>291</sup> (siehe Kapitel 3.4) gemessen wurde. Die Nachhallzeiten der tiefen Frequenzen haben allerdings extreme Ausmaße, was durch die Öffnung aller Flure zu den zwei Treppenhäuser erklärbar ist.

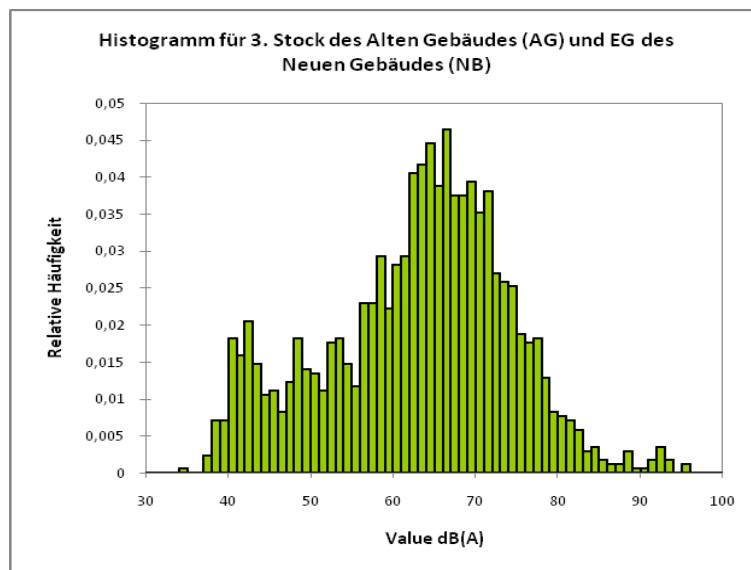


**Abb. 170:** Schallpegelverteilung von 1720 Einzelschallpegelmessungen (fast, Sekundentakt) im Flur EG, 1. Stock und 2. Stock (Altes Gebäude) während Pausen (Morgen, Mittag, Nachmittag) einer Woche. (Werte, siehe Anhang D) (Auflösung: 1 dB(A)).  $L_{Aeq} = 75$  dB(A). Min=33,5 dB(A), Max=95,5 dB(A), MW=63 dB(A),  $\sigma = 10,91$

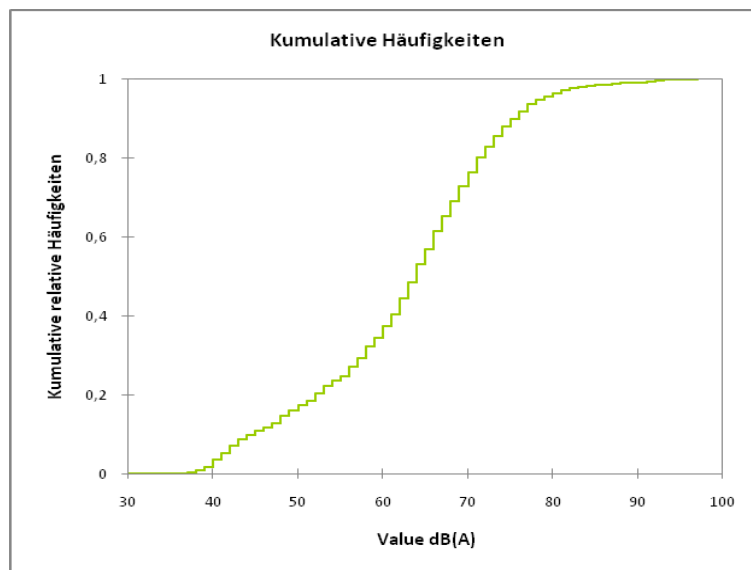


**Abb. 171:** Kumulative Häufigkeiten von 1720 Einzelschallpegelmessungen (fast, Sekundentakt) im Flur EG, 1. Stock und 2. Stock (Altes Gebäude) während Pausen (Morgen, Mittag, Nachmittag) einer Woche. (Werte, siehe Anhang D) (Auflösung: 1 dB(A))

<sup>291</sup> [SCHICK2].



**Abb. 172:** Pegelverteilungen von 1703 Einzelschallpegelmessungen (fast, Sekundentakt) im Flur 3. Stock (Altes Gebäude) und EG (Neues Gebäude) während Pausen (Morgen, Mittag, Nachmittag) einer Woche. (Werte, siehe Anhang D) (Auflösung: 1dB)  $L_{Aeq} = 75,9$  dB(A), Min=34 dB(A), Max=95,3, MW=62,8  $\sigma=11,24$



**Abb. 173:** Kumulative Häufigkeiten von 1703 Einzelschallpegelmessungen (fast, Sekundentakt) im Flur 3. Stock (Altes Gebäude) und EG (Neues Gebäude) während Pausen (Morgen, Mittag, Nachmittag) einer Woche. (Werte, siehe Anhang D) (Auflösung: 1dB)

Die Schallpegel des lauten Klingelgeräusches der Flure wurden für die Auswertungen gelöscht bzw. nicht berücksichtigt. Die Aussagen von Schick<sup>292</sup> (siehe Einleitung), dass der Lärmpegel in Fluren oft „unzumutbar“ ist, hat sich bei den Messungen bestätigt. Es wurden sogar Pegelspitzen von 95 dB(A) „fast“ gemessen. Man stellt fest, dass das Maximum der Schallpegelverteilung in Abb. 170 in der Klasse 70-71 dB(A) und in Abb. 172 in der Klasse 66-67 dB(A) liegt. Also scheint es in den Fluren mit niedrigeren Nachhallzeiten etwas leiser zuzugehen als in Fluren mit hohen Nachhallzeiten. Die  $L_{Aeq}$ -Werte bestätigen diese Aussage nicht. Es wurde darauf geachtet, dass Messungen bei beiden Gruppen der Fluren jeweils für Pausen am Morgen, am Mittag und am Nachmittag vorhanden waren. Die Anzahl an Einzelmessungen war zufällig für beide Gruppen gleich groß. Es war ungefähr die gleiche Anzahl an Personen in den Fluren vorhanden. Die gemessenen Werte widersprechen der subjektiven Bewertung dass es im 3. Stock des Alten Gebäudes und im 1. Stock des Neuen Gebäudes deutlich leiser war (Schätzung 3 bis 6 dBA). Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass in diesen Fluren sich die jüngeren Kinder aufhielten, die allgemein belebter und bewegter waren als die älteren Kinder. Außerdem ist der Flur im neuen Gebäude deutlich kleiner. Im Allgemeinen kann man also nicht davon ausgehen, dass es in einem Flur mit niedrigerer Nachhallzeit immer leiser zugeht, vielmehr hängt die Lautstärke von der Anzahl der Kinder und von der Disziplin der Kinder, also von den pädagogischen Maßnahmen ab. So zeigt sich in beiden Abbildungen, dass der sehr hohe Schallpegel von 95 dB(A) in beiden Gruppen vorlag und somit von der niedrigeren Nachhallzeit nicht verhindert wurde. Ritterstaedt<sup>293</sup> untersuchte ebenfalls die Schallpegel der Pausen und der Umgebung von 7 Schulen. Er verwendete folgende Werte:

LAFm = über die Messzeit gemittelter Pegel

LAF95 = Pegel, der 95 % der Messzeit überschritten wird mit Fast-Zeitkonstante

LAF1 = Pegel, der 1% der Messzeit überschritten wird mit Fast-Zeitkonstante

**Tabelle 69:** Geräuschmessungen in Schulhöfen [RITTERSTAEDT, S. 24]

Schule	Umgebung	Pause		
	LAFm	LAFm	LAF95	LAF1
1	58	80	73	90
2	58	78	71	87
3	53	75	66	83
4	64	78	72	87
5	59	77	70	84
6	54	75	70	82
7	57	74	64	83

Die gemessenen  $L_{Aeq}$ -Werte sind ähnlich wie die Werte aus Ritterstaedt, liegen aber deutlich niedriger als die Extremwerte aus Schulz<sup>294</sup> von  $L_{Aeq} = 87-109$  dB(A) für Flure und Treppenhäuser während Pausen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in den gemessenen Fluren keine auralen Lärmwirkungen zu befürchten sind, extraaurale Lärmwirkungen je nach Dauer der Schalleinwirkung dagegen schon.

<sup>292</sup> [SCHICK2].

<sup>293</sup> [RITTERSTAEDT].

<sup>294</sup> [SCHULZ].

### 4.3.8. Überprüfung eines Vorhersagemodells für den Artikulationsverlust (Alcons) in besetzten Klassenräumen.

In diesem Abschnitt sollte untersucht werden, ob der Artikulationsverlust (Alcons) laut Peutz und Klein in Klassenräumen durch Kenntnis des Bündelungsgrades aus dem leeren Klassenraum und der Nachhallzeit aus dem besetzten Zustand vorhersagbar ist. Dabei wird der Bündelungsgrad aus den Messungen im unbesetzten Zustand errechnet. Es wird angenommen, dass der Bündelungsgrad im besetzten und unbesetzten Zustand gleich ist.

Artikulationsverlust %Alcons:

$$Al_{cons} \approx 200 \cdot \frac{r_{LH}^2 \cdot T^2}{\gamma \cdot V} \quad [\%]$$

Bündelungsgrad:

$$\gamma \approx 200 \cdot \frac{r_{LH}^2 \cdot T^2}{V \cdot Al_{cons}}$$

Formel Farrel-Becker<sup>295</sup>:

$$\%Al_{cons} = 170,5405e^{-5,419 \cdot STI}$$

Laut Bistafa und Bradley<sup>296</sup> dient für die Vorhersage des Alcons per Konvention (de facto Standard) die Nachhallzeit von 2000 Hz. WINMLS nutzt allerdings laut den Angaben des Herstellers eine Umrechnungsformel, um den Alcons-Wert aus dem STI-Wert zu berechnen:

*“%Alcons is in WinMLS calculated solely from the STI based on an empirical formula.”*<sup>297</sup>

Laut Lazarus<sup>298</sup> stehen unterschiedliche Umrechnungsmethoden zwischen dem STI und Alcons zur Verfügung, die in Kapitel 3 beschrieben sind: die Tabelle laut DIN 18041, die Umrechnung über CIS (Common Intelligibility Scale) laut DIN 18041, die Umrechnungsformel laut Farrel Becker sowie die Grafik (empirisch) laut Houtgast. Der Alcons laut Umrechnungsformel von Farrel Becker aus dem STI-Wert wird für die kommenden Klassenräume berechnet. Da WINMLS die STI-Werte für die Alcons-Berechnung heranzieht, wird die durchschnittliche Nachhallzeit der Mittenfrequenzen 125 Hz bis 8000 Hz zur Vorhersage herangezogen, da diese Frequenzen auch für die STI-Berechnung laut ISO EN 60268-16 dienen. Die folgenden Auswertungen des Artikulationsverlustes sind auf die Quellenpositionen und Mikrofonpositionen bezogen. Um Rundungsfehler im Endresultat zu vermeiden, wurde eine sechsstellige Dezimalzahl für den Bündelungsgrad verwendet. So ist der Fehler (zweistellige Dezimalzahl) des Vorhersagemodells nicht auf Rundungsfehler während diesem Zwischenschritt zurückzuführen.

<sup>295</sup> [BRUEL&KJAER], [DAVIS], [LAZARUS1, S. 277].

<sup>296</sup> [BISTAFA2].

<sup>297</sup> WINMLS 2004 Manual.

<sup>298</sup> [LAZARUS].

### 4.3.8.1. Messungen

#### Raum 23 Altes Gebäude (AG) im leeren und besetzten Zustand



Grundgeräuschpegel [dBA]	32
Feuchtigkeit	28 %
Temperatur	25 °C
Messpegel [dB SPL]	83
Anzahl Schüler	13
L x B x H [m]	9 x 6,5 x 3,3
Volumen [m <sup>3</sup> ]	193,05
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,56 s

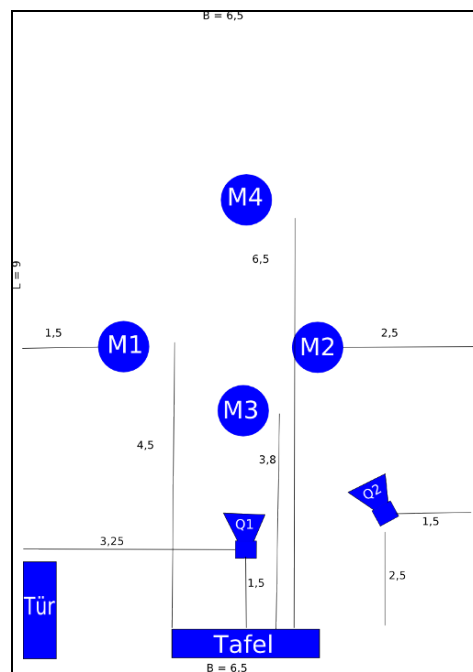


Tabelle 70: Messwerte und daraus berechneter Bündelungsgrad im unbesetzten Zustand

Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2
%Alcons	4,50	4,17	3,90	4,30	4,20	3,50	4,10	3,93
STI	0,67	0,69	0,70	0,68	0,68	0,72	0,69	0,69
RASTI	0,67	0,69	0,69	0,68	0,67	0,72	0,70	0,73
T30[125Hz-8000Hz]	0,95	0,93	0,89	0,88	0,92	0,86	1,14	0,94
Alcons (Farrel-Becker)	4,52	4,13	3,84	4,28	4,28	3,45	4,05	3,98
r <sub>LH</sub> [m]	3,5	3,1	2,3	5,0	4,0	2,2	2,1	4,3
V [m <sup>3</sup> ]	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05
γ Bündelungsgrad	2,545253	2,064505	1,108333	4,704886	3,350844	1,065457	1,444560	4,325032

Tabelle 71: Messwerte und daraus berechneter Bündelungsgrad im besetzten Zustand

Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2
%Alcons	4,10	3,80	3,50	4,00	3,50	3,30	3,50	4,10
STI	0,69	0,70	0,72	0,69	0,72	0,73	0,72	0,69
RASTI	0,69	0,72	0,72	0,71	0,71	0,73	0,72	0,72
T30[125Hz-8000Hz]	0,87	0,83	0,88	0,83	0,81	0,77	0,96	0,96
Alcons (Farrel-Becker)	4,05	3,84	3,45	4,05	3,45	3,26	3,45	4,05
r <sub>LH</sub> [m]	3,5	3,1	2,3	5,0	4,0	2,2	2,1	4,3
V [m <sup>3</sup> ]	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05
γ Bündelungsgrad	2,358298	1,811131	1,204727	4,429975	3,118263	0,897553	1,206604	4,318643



### Raum 36 Altes Gebäude (AG) im unbesetzten und besetzten Zustand



Grundgeräuschpegel [dBA]	31,2
Feuchtigkeit	39 %
Temperatur	20 °C
Messpegel [dB SPL]	83,4
Anzahl Schüler	16
L x B x H [m]	9 x 5,9 x 2,8
Volumen [m <sup>3</sup> ]	146,16
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,52 s

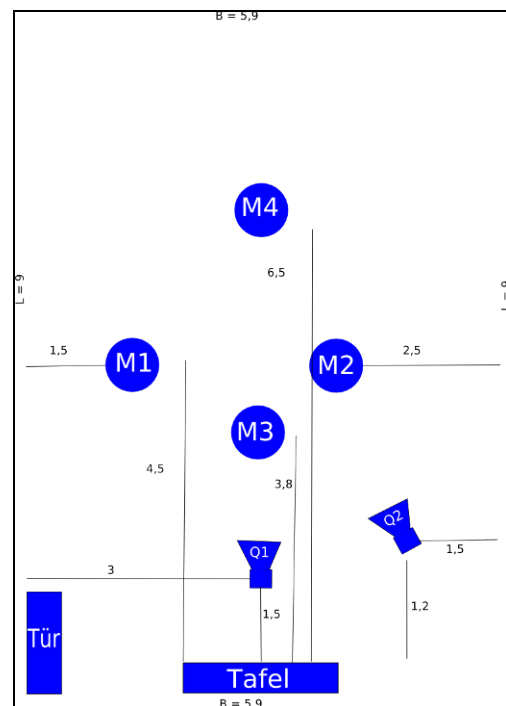


Tabelle 72: Messwerte und daraus berechneter Bündelungsgrad im unbesetzten Zustand

Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2
%Alcons	3,40	3,10	2,80	3,10	3,30	3,40	3,30	3,30
STI	0,72	0,74	0,76	0,74	0,73	0,72	0,73	0,73
RASTI	0,70	0,72	0,75	0,72	0,74	0,70	0,74	0,72
T30[125Hz-8000Hz]	0,62	0,61	0,62	0,63	0,63	0,62	0,62	0,63
Alcons (Farrel-Becker)	3,45	3,09	2,77	3,09	3,26	3,45	3,26	3,26
r <sub>LH</sub> [m]	3,3	3,0	2,3	5,0	4,3	3,3	3,0	5,5
V [m <sup>3</sup> ]	146,16	146,16	146,16	146,16	146,16	146,16	146,16	146,16
γ Bündelungsgrad	1,669252	1,457531	0,998347	4,419683	3,043025	1,708115	1,447795	4,910945

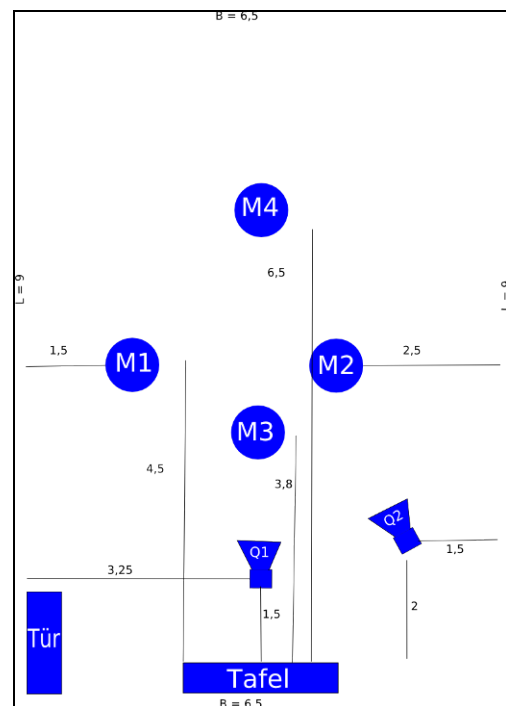
Tabelle 73: Messwerte und daraus berechneter Bündelungsgrad im besetzten Zustand

Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2
%Alcons	2,80	2,60	2,30	2,60	2,80	2,60	2,60	2,50
STI	0,76	0,77	0,79	0,77	0,76	0,77	0,77	0,78
RASTI	0,74	0,76	0,80	0,76	0,77	0,76	0,78	0,77
T30[125Hz-8000Hz]	0,50	0,49	0,50	0,49	0,53	0,53	0,51	0,51
Alcons (Farrel-Becker)	2,77	2,63	2,36	2,63	2,77	2,63	2,63	2,49
r <sub>LH</sub> [m]	3,3	3,0	2,3	5,0	4,3	3,3	3,0	5,5
V [m <sup>3</sup> ]	146,16	146,16	146,16	146,16	146,16	146,16	146,16	146,16
γ Bündelungsgrad	1,307778	1,143909	0,800355	3,196025	2,510944	1,601266	1,225108	4,379210

### Raum 24 Altes Gebäude (AG) im unbesetzten und besetzten Zustand



Grundgeräuschpegel [dBA]	33
Feuchtigkeit	47 %
Temperatur	21 °C
Messpegel [dB SPL]	83
Anzahl Schüler	12
L x B x H [m]	9 x 6,5 x 3,3
Volumen [m <sup>3</sup> ]	193,05
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,56 s



**Tabelle 74:** Messwerte und daraus berechneter Bündelungsgrad im unbesetzten Zustand

Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2
%Alcons	4,20	4,20	3,70	4,10	4,00	3,90	4,70	4,63
STI	0,69	0,68	0,71	0,69	0,69	0,70	0,66	0,66
RASTI	0,68	0,70	0,72	0,67	0,67	0,69	0,66	0,66
T30[125Hz-8000Hz]	0,89	0,90	0,88	0,92	0,86	0,91	0,91	0,93
Alcons (Farrel-Becker)	4,13	4,28	3,64	4,05	4,05	3,84	4,77	4,69
r <sub>LH</sub> [m]	3,4	3,1	2,3	5,0	4,3	2,7	2,5	4,8
V [m <sup>3</sup> ]	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05
γ Bündelungsgrad	2,263266	1,899815	1,150770	5,297077	3,541881	1,591910	1,134879	4,501437

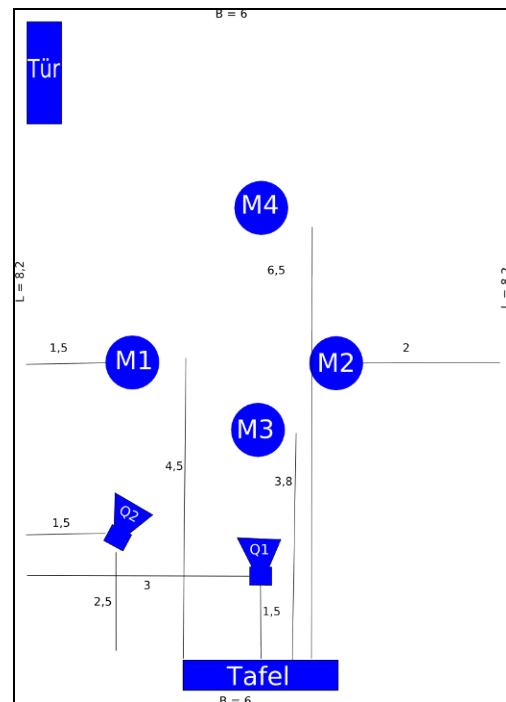
**Tabelle 75:** Messwerte und daraus berechneter Bündelungsgrad im besetzten Zustand

Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2
%Alcons	3,40	3,50	3,00	3,60	3,10	3,50	3,30	3,70
STI	0,72	0,71	0,75	0,71	0,74	0,72	0,73	0,70
RASTI	0,74	0,73	0,77	0,70	0,73	0,75	0,75	0,72
T30[125Hz-8000Hz]	0,75	0,73	0,75	0,78	0,76	0,78	0,76	0,79
Alcons (Farrel-Becker)	3,45	3,64	2,93	3,64	3,09	3,45	3,26	3,84
r <sub>LH</sub> [m]	3,4	3,1	2,3	5,0	4,3	2,7	2,5	4,8
V [m <sup>3</sup> ]	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05
γ Bündelungsgrad	2,004061	2,076531	1,367502	5,632228	4,722709	1,689282	1,485608	5,105669

### Raum 21 Altes Gebäude (AG) im unbesetzten und besetzten Zustand



Grundgeräuschpegel [dBA]	34
Feuchtigkeit	43 %
Temperatur	19 °C
Messpegel [dB SPL]	85
Anzahl Schüler	15
L x B x H [m]	8,2 x 6 x 3,3
Volumen [m <sup>3</sup> ]	162,36
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,54 s



**Tabelle 76:** Messwerte und daraus berechneter Bündelungsgrad im unbesetzten Zustand

Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2
%Alcons	5,10	5,20	3,90	4,10	4,60	4,60	4,30	5,60
STI	0,65	0,65	0,70	0,69	0,67	0,67	0,68	0,63
RASTI	0,67	0,65	0,68	0,66	0,68	0,67	0,68	0,63
T30[125Hz-8000Hz]	0,88	0,90	0,87	0,88	0,90	0,92	0,86	0,87
Alcons (Farrel-Becker)	5,04	5,04	3,84	4,05	4,52	4,52	4,28	5,61
r <sub>LH</sub> [m]	3,3	3,1	2,3	5,0	2,0	3,2	2,0	4,2
V [m <sup>3</sup> ]	162,36	162,36	162,36	162,36	162,36	162,36	162,36	162,36
γ Bündelungsgrad	2,023715	1,843979	1,268836	5,797774	0,875920	2,299392	0,839074	2,956296

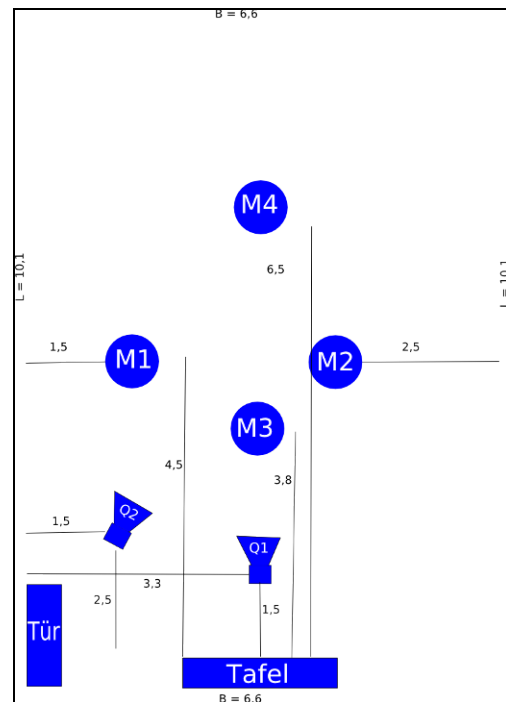
**Tabelle 77:** Messwerte und daraus berechneter Bündelungsgrad im besetzten Zustand

Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2
%Alcons	4,10	3,80	2,90	3,20	3,80	3,70	3,20	3,90
STI	0,69	0,70	0,75	0,73	0,70	0,70	0,73	0,70
RASTI	0,72	0,72	0,78	0,71	0,71	0,70	0,76	0,73
T30[125Hz-8000Hz]	0,72	0,69	0,70	0,70	0,75	0,74	0,73	0,71
Alcons (Farrel-Becker)	4,05	3,84	2,93	3,26	3,84	3,84	3,26	3,84
r <sub>LH</sub> [m]	3,3	3,1	2,3	5,0	2,0	3,2	2,0	4,2
V [m <sup>3</sup> ]	162,36	162,36	162,36	162,36	162,36	162,36	162,36	162,36
γ Bündelungsgrad	1,689409	1,495472	1,110051	4,677185	0,734941	1,888550	0,817345	2,819990

### Raum 2 Neues Gebäude (NB) im unbesetzten und besetzten Zustand



Grundgeräuschpegel [dBA]	31
Feuchtigkeit	35 %
Temperatur	23 °C
Messpegel [dB SPL]	85
Anzahl Schüler	15
L x B x H [m]	10,1 x 6,6 x 3,2
Volumen [m <sup>3</sup> ]	213,31
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,58 s



**Tabelle 78:** Messwerte und daraus berechneter Bündelungsgrad im unbesetzten Zustand

Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2
%Alcons	2,40	2,50	1,90	2,80	2,57	2,70	2,07	3,23
STI	0,79	0,78	0,83	0,76	0,78	0,77	0,81	0,73
RASTI	0,77	0,77	0,81	0,76	0,78	0,75	0,82	0,73
T30[125Hz-8000Hz]	0,52	0,52	0,52	0,54	0,55	0,54	0,54	0,55
Alcons (Farrel-Becker)	2,40	2,49	1,90	2,77	2,54	2,68	2,08	3,26
r <sub>LH</sub> [m]	3,5	3,1	2,3	5,0	2,0	3,2	2,2	4,3
V [m <sup>3</sup> ]	213,31	213,31	213,31	213,31	213,31	213,31	213,31	213,31
γ Bündelungsgrad	1,287270	0,988892	0,703291	2,398252	0,444312	1,044241	0,650500	1,644470

**Tabelle 79:** Messwerte und daraus berechneter Bündelungsgrad im besetzten Zustand

Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2
%Alcons	2,30	2,30	2,10	2,50	2,60	2,30	2,20	3,00
STI	0,80	0,80	0,82	0,78	0,78	0,79	0,80	0,75
RASTI	0,80	0,79	0,80	0,77	0,78	0,78	0,80	0,76
T30[125Hz-8000Hz]	0,52	0,50	0,50	0,51	0,52	0,52	0,52	0,53
Alcons (Farrel-Becker)	2,23	2,23	2,00	2,49	2,49	2,36	2,23	2,93
r <sub>LH</sub> [m]	3,5	3,1	2,3	5,0	2,0	3,2	2,2	4,3
V [m <sup>3</sup> ]	213,31	213,31	213,31	213,31	213,31	213,31	213,31	213,31
γ Bündelungsgrad	1,342902	0,984992	0,583737	2,438704	0,392189	1,134960	0,551649	1,597107

#### 4.3.8.2. Evaluation des Vorhersagemodells:

Der Fehlermittelwert (Absolutwert) über alle Mikrofonpositionen und alle Klassenräume beträgt: 0,37 %Alcons ( $\sigma=0,22$ ).

Raum	Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2
Raum 23	$T_{30\text{personen}}$ [s]	0,87	0,83	0,88	0,83	0,81	0,77	0,96	0,96
	$r_{LH}$ [m]	3,5	3,1	2,3	5	4	2,2	2,1	4,3
	$V$ [m <sup>3</sup> ]	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05
	$\gamma_{\text{unbesetzt}}$	2,545253	2,064505	1,108333	4,704886	3,350844	1,065457	1,44456	4,325032
	%Alcons <sub>Vorhersage</sub>	3,80	3,33	3,80	3,77	3,26	2,78	2,92	4,09
	%Alcons <sub>PersonenMessung</sub>	4,10	3,80	3,50	4,00	3,50	3,30	3,50	4,10
	Fehler (Absolutwert)	0,30	0,47	0,30	0,23	0,24	0,52	0,58	0,01
Raum 36	$T_{30\text{personen}}$ [s]	0,50	0,49	0,50	0,49	0,53	0,53	0,51	0,51
	$r_{LH}$ [m]	3,3	3	2,3	5	4,3	3,3	3	5,5
	$V$ [m <sup>3</sup> ]	146,16	146,16	146,16	146,16	146,16	146,16	146,16	146,16
	$\gamma_{\text{unbesetzt}}$	1,669252	1,457531	0,998347	4,419683	3,043025	1,708115	1,447795	4,910945
	%Alcons <sub>Vorhersage</sub>	2,19	2,04	1,84	1,88	2,31	2,44	2,20	2,23
	%Alcons <sub>PersonenMessung</sub>	2,80	2,60	2,30	2,60	2,80	2,60	2,60	2,50
	Fehler (Absolutwert)	0,61	0,56	0,46	0,72	0,49	0,16	0,40	0,27
Raum 24	$T_{30\text{personen}}$ [s]	0,75	0,73	0,75	0,78	0,76	0,78	0,76	0,79
	$r_{LH}$ [m]	3,4	3,1	2,3	5	4,3	2,7	2,5	4,8
	$V$ [m <sup>3</sup> ]	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05	193,05
	$\gamma_{\text{unbesetzt}}$	2,263266	1,899815	1,15077	5,297077	3,541881	1,59191	1,134879	4,501437
	%Alcons <sub>Vorhersage</sub>	3,01	2,79	2,67	3,00	3,16	2,91	3,27	3,32
	%Alcons <sub>PersonenMessung</sub>	3,40	3,50	3,00	3,60	3,10	3,50	3,30	3,70
	Fehler (Absolutwert)	0,39	0,71	0,33	0,60	0,06	0,59	0,03	0,38

Fehlermittelwert und Standardabweichung für Raum 23, 36, 24								
Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2
Fehlermittelwert	0,43	0,58	0,36	0,52	0,26	0,43	0,34	0,22
$\sigma$	0,128	0,099	0,066	0,207	0,176	0,188	0,228	0,157
Min	0,30	0,47	0,30	0,23	0,06	0,16	0,03	0,01
Max	0,61	0,71	0,46	0,72	0,49	0,59	0,58	0,38

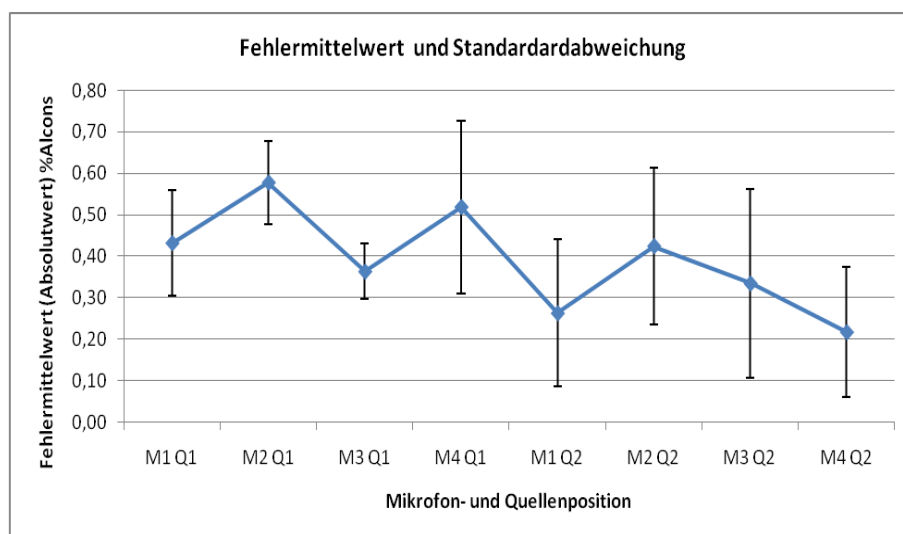
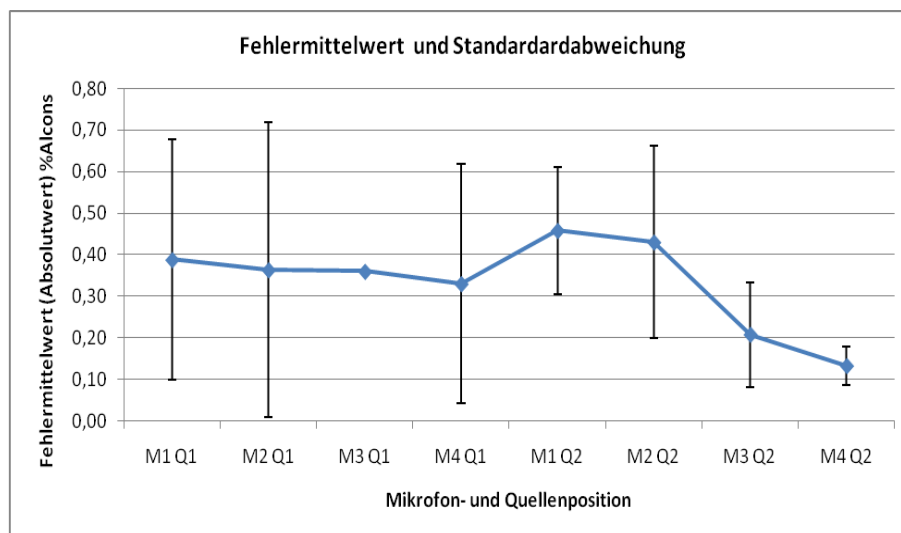


Abb. 174: Fehlermittelwert und Standardabweichung (Absolutwerte) der Vorhersage für Raum 24, 23, 36 in %Alcons in Abhängigkeit der Mikrofonpositionen

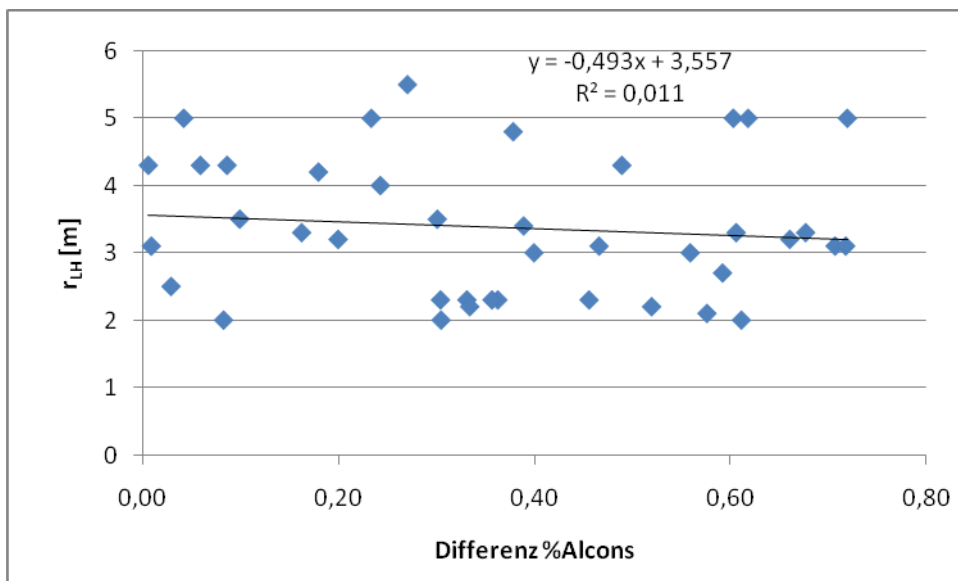
Raum	Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2
Raum 21	$T_{30\text{personen}}$ [s]	0,72	0,69	0,70	0,70	0,75	0,74	0,73	0,71
	$r_{1,H}$ [m]	3,3	3,1	2,3	5	2	3,2	2	4,2
	$V$ [m <sup>3</sup> ]	162,36	162,36	162,36	162,36	162,36	162,36	162,36	162,36
	$\gamma$ unbesetzt	2,023715	1,843979	1,268836	5,797774	0,87592	2,299392	0,839074	2,956296
	%Alcons <sub>Vorhersage</sub>	3,42	3,08	2,54	2,58	3,19	3,04	3,12	3,72
	%Alcons <sub>PersonenMessung</sub>	4,10	3,80	2,90	3,20	3,80	3,70	3,20	3,90
	Fehler (Absolutwert)	0,68	0,72	0,36	0,62	0,61	0,66	0,08	0,18
Raum 2 NB	$T_{30\text{personen}}$ [s]	0,52	0,50	0,50	0,51	0,52	0,52	0,52	0,53
	$r_{1,H}$ [m]	3,5	3,1	2,3	5	2	3,2	2,2	4,3
	$V$ [m <sup>3</sup> ]	213,31	213,31	213,31	213,31	213,31	213,31	213,31	213,31
	$\gamma$ unbesetzt	1,28727	0,988892	0,703291	2,398252	0,444312	1,044241	0,6505	1,64447
	%Alcons <sub>Vorhersage</sub>	2,40	2,29	1,74	2,54	2,29	2,50	1,87	2,91
	%Alcons <sub>PersonenMessung</sub>	2,30	2,30	2,10	2,50	2,60	2,30	2,20	3,00
	Fehler (Absolutwert)	0,10	0,01	0,36	0,04	0,31	0,20	0,33	0,09

Fehlermittelwert und Standardabweichung für Raum 21, 2 NB									
Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2	
Fehlermittelwert	0,39	0,36	0,36	0,33	0,46	0,43	0,21	0,13	
$\sigma$	0,289	0,355	0,003	0,288	0,153	0,231	0,126	0,047	
Min	0,10	0,01	0,36	0,04	0,31	0,20	0,08	0,09	
Max	0,68	0,72	0,36	0,62	0,61	0,66	0,33	0,18	



**Abb. 175:** Fehlermittelwert und Standardabweichung (Absolutwerte) der Vorhersage für Raum 21 AG (Altes Gebäude), 2 NB (Neues Gebäude) in %Alcons in Abhängigkeit der Mikrofonpositionen

Der Fehlermittelwert ist nicht von der Distanz Lautsprecher-Mikrofon abhängig, wie die Auswertung in Abb. 176 zeigt: Die Distanz Lautsprecher-Mikrofon korreliert nicht linear mit dem Fehlermittelwert %Alcons. M4Q2, der ganz hinten im Raum stand, hat in beiden Gruppen von Klassenräumen den niedrigsten Vorhersagefehler. Für M4Q1 ist dies aber nicht der Fall. Der Fehlermittelwert war auch für M3Q2 relativ niedrig. Bemerkenswert ist die geringe (bis 0) Standardabweichung bei M3Q1 in beiden Gruppen der Klassenräume. Mikrofonposition 3 stand in der Mitte des Raumes vor dem Lautsprecher und nahm somit viel Direktschall und wenig Reflexionen von Wänden im Vergleich zu den anderen Mikrofonen auf, die näher zu Reflexionsflächen standen. Die Position hat möglicherweise Einfluss auf die Streuung der Fehlerwerte. Dennoch hat auch M3Q1 einen absoluten Fehlermittelwert.

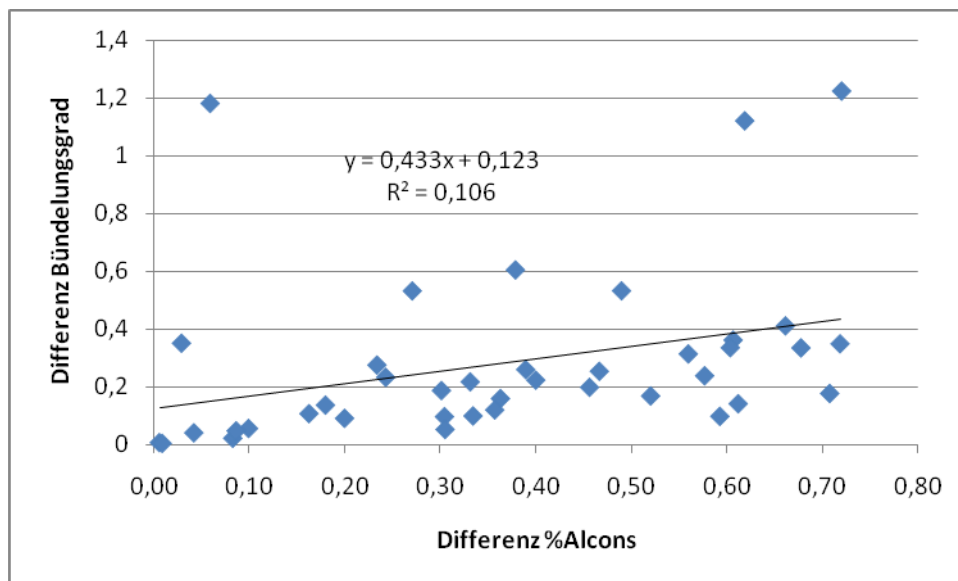


**Abb. 176:** Abstand Lautsprecher-Mikrofon in Abhängigkeit von der Differenz zwischen dem %Alcons-Wert aus der Vorhersage und dem gemessenen %Alcons-Wert (5 KR). (Zur Regressionsberechnung, siehe Anhang D)

Der Bündelungsgrad der Schallquelle laut den Voraussetzungen für dieses Vorhersagemodell soll im besetzten und unbesetzten Zustand gleich bleiben. Dies ist aber laut Auswertungen der Messungen durch die Alcons-Formel nicht immer der Fall, sondern es sind leichte Unterschiede zu verzeichnen. Im Folgenden wurde verifiziert, ob der absolute Fehler der %Alcons-Vorhersage (Unterschied %Alcons) mit dem Unterschied des Bündelungsgrades zwischen dem besetzten und unbesetzten Zustand linear korreliert. Es ist eine geringe lineare Korrelation zu verzeichnen, wie Abb. 177 zeigt.

**Tabelle 80:** Unterschied (Absolutwert) zwischen dem Bündelungsgrad im unbesetzten und dem Bündelungsgrad im besetzten Zustand.

Raum	Parameter	M1 Q1	M2 Q1	M3 Q1	M4 Q1	M1 Q2	M2 Q2	M3 Q2	M4 Q2
<b>Raum 23</b>									
unbesetzt	$\gamma$	2,545253	2,064505	1,108333	4,704886	3,350844	1,065457	1,44456	4,325032
besetzt	$\gamma$	2,358298	1,811131	1,204727	4,429975	3,118263	0,897553	1,206604	4,318643
Fehler (Absolutwert)		0,186955	0,253374	0,096394	0,274911	0,232581	0,167904	0,237956	0,006389
<b>Raum 36</b>									
unbesetzt	$\gamma$	1,669252	1,457531	0,998347	4,419683	3,043025	1,708115	1,447795	4,910945
besetzt	$\gamma$	1,307778	1,143909	0,800355	3,196025	2,510944	1,601266	1,225108	4,37921
Fehler (Absolutwert)		0,361474	0,313622	0,197992	1,223658	0,532081	0,106849	0,222687	0,531735
<b>Raum 24</b>									
unbesetzt	$\gamma$	2,263266	1,899815	1,15077	5,297077	3,541881	1,59191	1,134879	4,501437
besetzt	$\gamma$	2,004061	2,076531	1,367502	5,632228	4,722709	1,689282	1,485608	5,105669
Fehler (Absolutwert)		0,259205	0,176716	0,216732	0,335151	1,180828	0,097372	0,350729	0,604232
<b>Raum 21</b>									
unbesetzt	$\gamma$	2,023715	1,843979	1,268836	5,797774	0,87592	2,299392	0,839074	2,956296
besetzt	$\gamma$	1,689409	1,495472	1,110051	4,677185	0,734941	1,88855	0,817345	2,81999
Fehler (Absolutwert)		0,33431	0,34851	0,15879	1,12059	0,14098	0,41084	0,02173	0,136306
<b>Raum 2 NB</b>									
unbesetzt	$\gamma$	1,28727	0,988892	0,703291	2,398252	0,444312	1,044241	0,6505	1,64447
besetzt	$\gamma$	1,342902	0,984992	0,583737	2,438704	0,392189	1,13496	0,551649	1,597107
Fehler (Absolutwert)		0,055632	0,0039	0,119554	0,040452	0,052123	0,090719	0,098851	0,047363



**Abb. 177:** Zusammenhang zwischen der Differenz des Bündelungsgrades des besetzten und unbesetzten Zustandes aus Messungen und der Differenz des %Alcons zwischen der Vorhersage und dem gemessenen %Alcons-Wert. (Absolutwerte, 5 Klassenräume). (Zur Regressionsberechnung, siehe Anhang D)



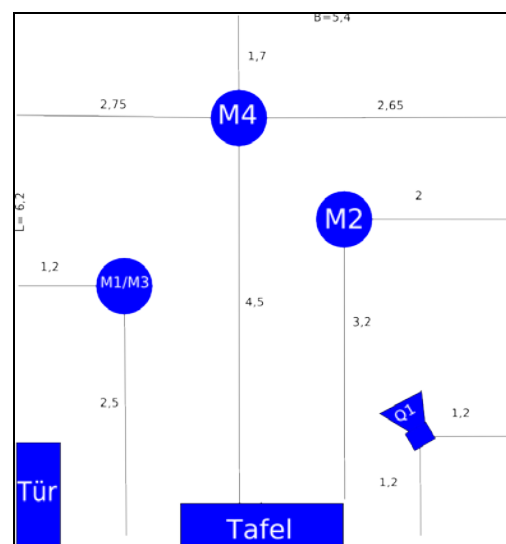
### 4.3.9. Untersuchungen im Sonderunterrichtsraum (Raum 1 Altes Gebäude AG)

Im Raum 1 des alten Gebäudes werden ausländische Kinder anderer Muttersprache gesondert unterrichtet. Die DIN 18041 sieht für diesen Fall eine verschärfte Bedingung der Sollnachhallzeit vor. Die Sollnachhallzeit muss zusätzlich 20 % unter der anzustrebenden Sollnachhallzeit in den Oktavbändern zwischen 250 Hz und 2000 Hz liegen.

Da der Klassenraum sehr klein war (6,2 x 5,4 x 3,3 m), wurden nur 3 Mikrofonpositionen und eine Quellenposition gewählt. Der Klassenraum bot Platz für 6 Schüler. Wegen den geringen Ausmaßen wurden in dem Klassenraum genauere Untersuchungen des Absorptionsverhaltens von Bühnenmolton durchgeführt. Es wurden zwei verschiedene Mengen an Bühnenmolton verwendet und mit dem Absorptionsverhalten der 6 Schüler verglichen. Als Messschallpegel wurde 75 dB(A) gewählt. Jeweils genau vor den Messungen im besetzten Zustand wurden die Messungen im unbesetzten Zustand noch einmal wiederholt, um einen genauen Vergleich der Schallbedingungen zu garantieren.

Stoff	L x B [m]	L x B [m]
Menge A	2,94 x 1,66	4,4 x 1,94
Fläche [m <sup>2</sup> ]	13,41	

Stoff	L x B [m]	L x B [m]	L x B [m]	L x B [m]
Menge B	2,94 x 1,66	4,13 x 0,97	4,5 x 2,05	4,4 x 1,94
Fläche [m <sup>2</sup> ]	26,64			



### Sonderunterrichtsraum (Raum 1):



Grundgeräuschpegel [dBA]	32
Feuchtigkeit	43 %
Temperatur	22 °C
Messpegel [dB SPL]	75
Anzahl Schüler	6
L x B x H [m]	6,2 x 5,4 x 3,3
Volumen [m <sup>3</sup> ]	110,48
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,39 s

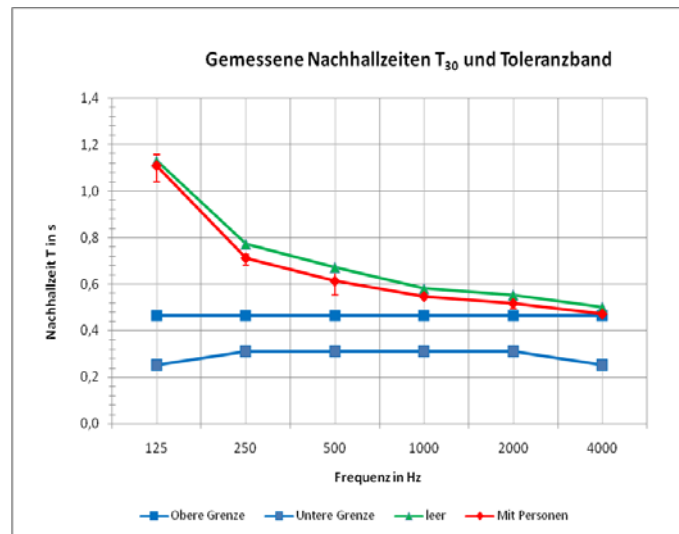


Abb. 178: Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (Personen eingerechnet)

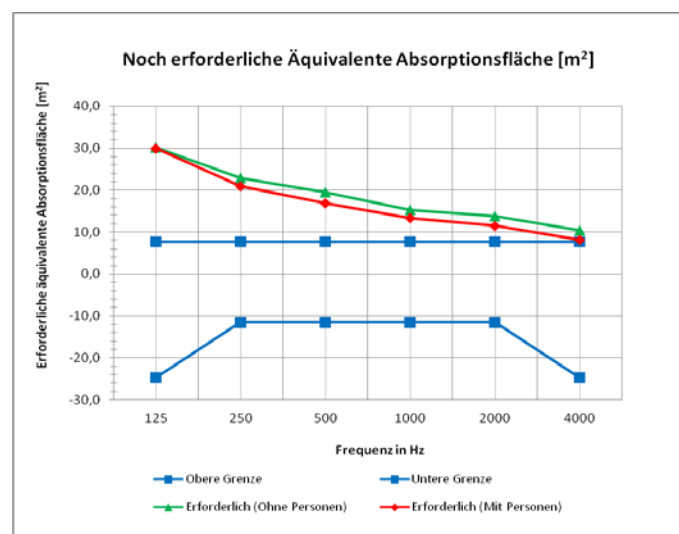


Abb. 179: Noch erforderliche Absorptionsfläche um  $T_{soll}$  zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 81: Raumakustische Gütemaße

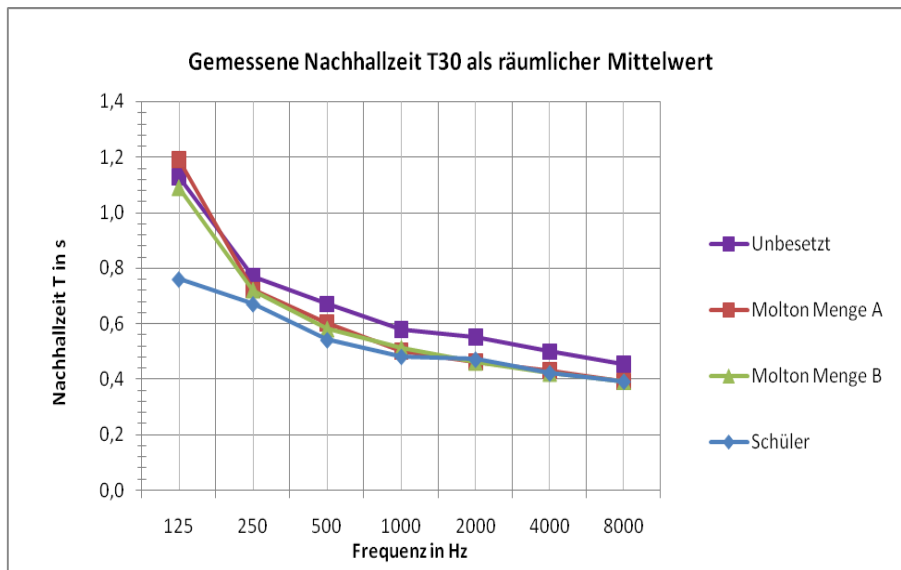
Sonderunterrichtsraum (leer)							
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub> [s], gemittelt</b>	1,13	0,77	0,67	0,58	0,55	0,50	0,46
$\sigma$	0,046	0,020	0,059	0,007	0,019	0,016	0,005
max	1,18	0,79	0,74	0,59	0,58	0,52	0,46
min	1,06	0,74	0,60	0,57	0,53	0,48	0,45
<b>EDT [s]</b>	0,87	0,70	0,57	0,56	0,55	0,46	0,45
$\sigma$	0,15	0,10	0,07	0,08	0,00	0,05	0,08
max	0,98	0,80	0,68	0,64	0,60	0,50	0,51
min	0,62	0,60	0,47	0,43	0,48	0,38	0,32
<b>C50 [dB]</b>	-0,13	3,25	4,25	5,30	6,00	7,50	7,70
$\sigma$	1,43	1,85	0,57	1,50	2,28	1,75	2,15
max	1,40	5,10	5,20	7,30	8,80	9,30	10,00
min	-1,60	1,40	3,70	3,80	3,70	5,70	5,50
<b>D50 [%]</b>	48,25	66,75	72,25	76,75	78,75	84,25	84,25
$\sigma$	6,50	9,81	2,95	5,85	8,29	5,26	6,26
max	57,00	78,00	77,00	84,00	88,00	90,00	91,00
min	42,00	57,00	69,00	71,00	70,00	79,00	78,00
<b>STI</b>	0,72						
$\sigma$	0,04						
max	0,76						
min	0,68						
<b>RASTI</b>	0,73						
$\sigma$	0,03						
max	0,77						
min	0,70						
<b>%Alcons</b>	3,50						
$\sigma$	0,70						
max	4,20						
min	2,70						

Mit Personen							
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	
<b>T<sub>30</sub> [s]</b>	1,11	0,71	0,61	0,55	0,52	0,47	
$\sigma$	0,044	0,017	0,049	0,006	0,017	0,014	
max	1,16	0,73	0,67	0,55	0,54	0,49	
min	1,04	0,68	0,55	0,54	0,50	0,45	
Max - T <sub>30</sub>	0,05	0,01	0,06	0,01	0,02	0,02	
T <sub>30</sub> - min	0,07	0,03	0,06	0,01	0,02	0,02	

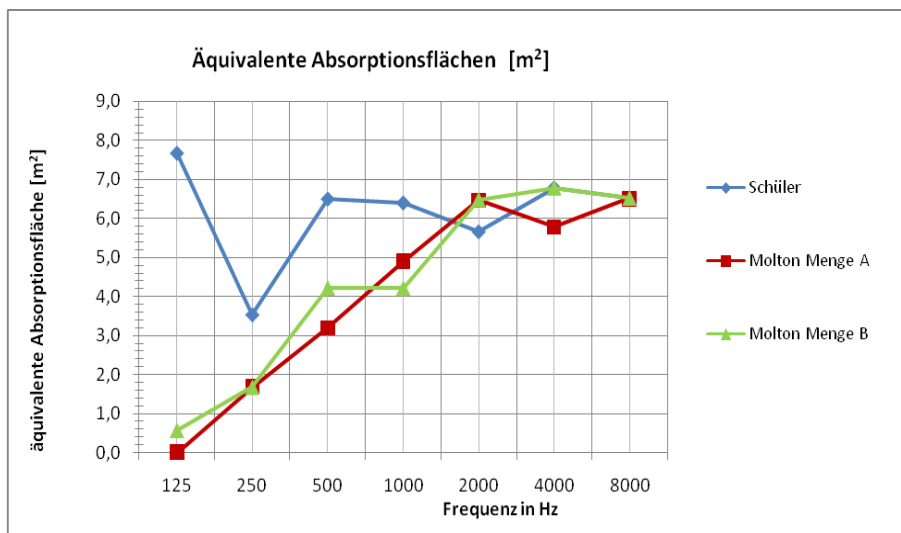
**Sonderunterrichtsraum (Raum 1) im besetzten Zustand (Bühnenmolton und Schüler):**



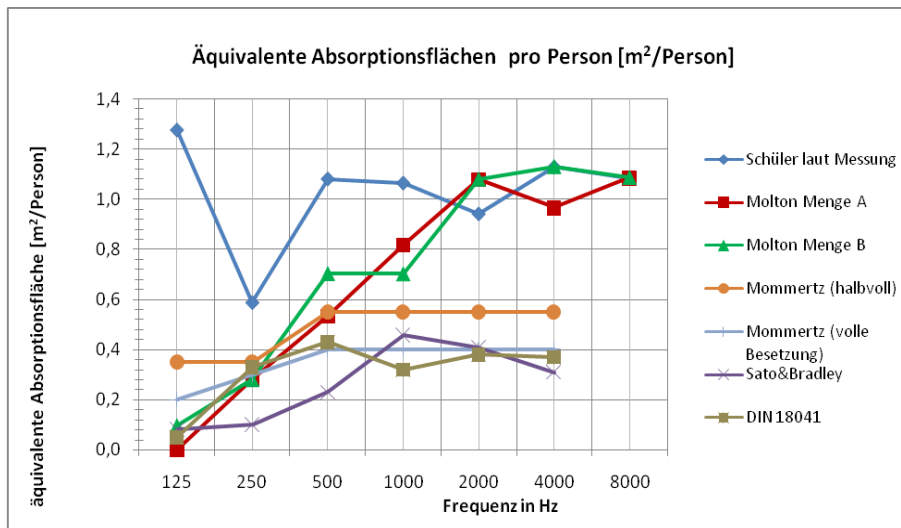
Grundgeräuschpegel [dBA]	31
Feuchtigkeit	42 %
Temperatur	20 °C
Messpegel [dB SPL]	70
Anzahl Schüler	6
L x B x H [m]	6,2 x 5,4 x 3,3
Volumen [m <sup>3</sup> ]	110,48
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,39 s



**Abb. 180:** Gemessene Nachhallzeiten für verschiedene Besetzungsarten (Werte, siehe Anhang D)

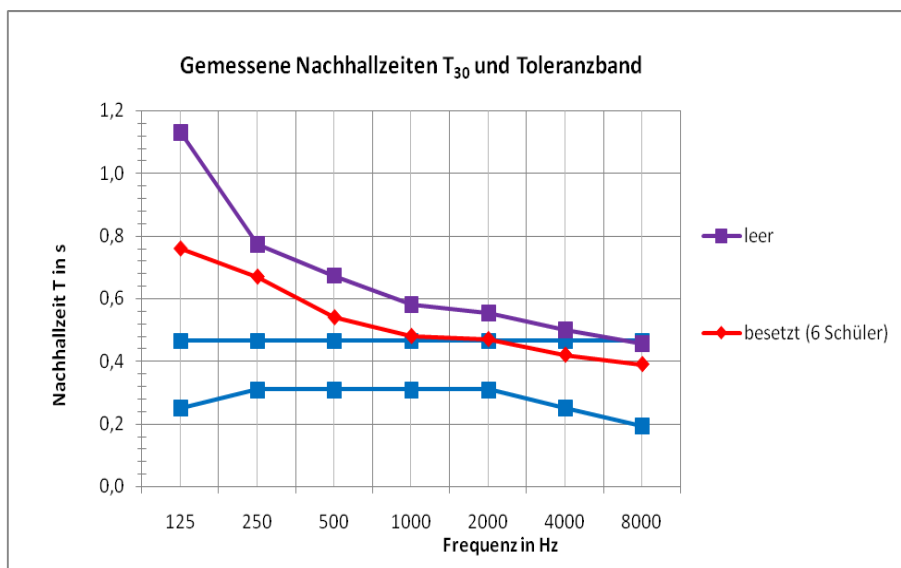


**Abb. 181:** Äquivalente Absorptionsfläche verschiedener Moltonmenge und der Schüler/innen (Werte, siehe Anhang D)



**Abb. 182:** Äquivalente Absorptionsfläche pro Person der Schüler/innen und der Moltonmenge im Sonderunterrichtsraum 1 (AG), nach [SATO], [MOMMERTZ2] und DIN 18041. (Werte, siehe Anhang D)

Die Untersuchungen zeigen, dass der Sonderunterrichtsraum den strengen Bedingungen der DIN 18041 nicht entspricht. Auch wenn der Raum mit 6 Schüler/innen (Lehrerin und Toningenieur) voll besetzt war, sank die Nachhallzeit, wie folgende Abbildung zeigt, dennoch nicht in das von DIN 18041 geforderte Toleranzband.



**Abb. 183:** Gemessene Nachhallzeiten im Sonderunterrichtsraum 2 (AG, Altes Gebäude) im leeren Zustand und mit Schüler/innen. (Werte, siehe Anhang D)

Die verwendete Menge an Molton war für die Simulation der 6 Schüler zu gering. Allerdings haben die 6 Schüler, obwohl sie 6-7 Jahre alt sind, eine außergewöhnlich hohe äquivalente

Absorptionsfläche. Keine zitierte Studie aus der Literatur kam annähernd an die gemessene äquivalente Absorptionsfläche pro Person heran. Der Bühnenmolton erreichte ab 1500 Hz die gleiche Absorptionswirkung pro Person wie die Schüler. Dies entspricht auch den Aussagen der Abbildungen aus Birnstingl<sup>299</sup>: Für tiefere Frequenzen wird das Publikum schlechter durch das Bühnenmolton simuliert. In diesem Fall hat das Molton bei tiefen Frequenzen eine zu hohe Absorptionswirkung.

#### **4.3.10. Schussfolgerung**

Bühnenmolton eignet sich bei Betrachtung seiner äquivalenten Absorptionsfläche und unter der Voraussetzung der Beachtung der Menge an Bühnenmolton hervorragend zur Simulation von Schülern im Klassenraum. Es gibt allerdings große Unterschiede zwischen den gemessenen äquivalenten Absorptionsflächen von Schülern in den Studien.

Es hat sich in den Auswertungen herausgestellt, dass der Neubau (NB) der Grundschule Wiltz/Luxemburg eine deutlich bessere Hörsamkeit aufweist als der Altbau (AG). Daraus ergibt sich eine interessante Frage: „Ist eine raumakustische Typisierung von Klassenräumen in Abhängigkeit des Baujahrs möglich?“ Es wurde versucht, diese Frage in weiteren Untersuchungen zu beantworten.

---

<sup>299</sup> [BIRNSTINGL].

## 5. Messungen in Grazer Schulen und einer Hauptschule in Trofaiach (Steiermark)

Da sich aus den Auswertungen der Messungen der Grundschule in Wiltz/Luxemburg herausgestellt hat, dass der Neubau aus dem Jahr 2002 eine wesentlich bessere Hörsamkeit aufweist als der Altbau aus dem Jahr 1951, soll in weiteren Untersuchungen dieser Diplomarbeit der Frage nachgegangen werden, ob eine akustische Typisierung in Abhängigkeit des Baujahrs der Klassenräume möglich ist. Es wurden raumakustische Messungen in Klassenräumen des Bundesgymnasiums Seebacher (Seebachergasse), der Bundeshandelsakademie (HAK) Grazbachgasse und der Bundesbildungsanstalt für Kindergartenpädagogik (Grottenhofstrasse) in Graz sowie der Franz Jonas-Hauptschule in Trofaiach durchgeführt, um nachher eine akustische Typisierung der Schulgebäude in Abhängigkeit vom Baujahr zu erstellen. Im Unterschied zur Grundschule Wiltz/Luxemburg waren in den Klassenräumen der Grazer Schulen und der Hauptschule Trofaiach keine (wesentlichen) resonierenden Gegenstände vorhanden. Es wurden vier Mikrofonpositionen und zwei Quellenpositionen gewählt sowie jede Messung pro Mikrofon-Quellen-Paar 3 mal durchgeführt. Es wurde das gleiche Messequipment wie in Kapitel 4 verwendet. Folgende Abbildungen zeigen die Schulen mit Angabe des jeweiligen Baujahrs:



**Abb. 184:** Bundesgymnasium Seebacher (Graz): Neubau aus den 60er Jahren (1967)



**Abb. 185:** Rechts: Handelsakademie Grazbachgasse: Altbau (1906, ein Klassenraum wurde im Jahr 1999/2000 saniert) und Neubau (1999/2000)



**Abb. 186:** Bundesbildungsanstalt für Kindergartenpädagogik (Grottenhofstrasse, Graz): Neubau und Deckensanierung aus dem Jahr 2007.



**Abb. 187:** Franz Jonas Hauptschule Trofaiach (Steiermark) aus dem Jahr 1974



## Bewertung der Klassenräume nach DIN 18041

Für die Bewertung der Klassenräume nach DIN 18041 wurden die Klassenräume im leeren Zustand gemessen und die äquivalente Absorptionsfläche der vorgesehenen Anzahl an Kinder eingerechnet. Die äquivalente Absorptionsfläche pro Schüler wurde der DIN 18041 entnommen:

**Tabelle 82:** frequenzabhängige äquivalente Absorptionsfläche  $A$  in  $m^2$  von Schüler in Unterrichtsräumen an Holztischen ( $3 m^2 / \text{Person}$ ) nach DIN 18041

125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
0,05	0,33	0,43	0,32	0,38	0,37

$$A_{\text{leer}} = 0,161 \cdot \frac{V}{T_{\text{leer}}} [m^2]$$

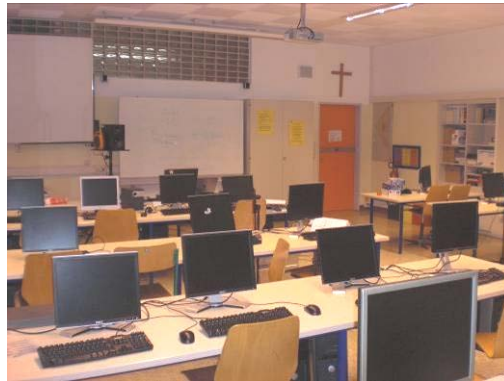
$$T_{\text{MitSchüler}} = 0,161 \cdot \frac{V}{A_{\text{leer}} + A_{\text{Schüler}}} [s]$$

Die Seiten 202 bis 265 zeigen die detaillierten Messergebnisse. Für jeden Raum sind die Mikrofon- und Lautsprecherpositionen schematisch dargestellt. Ein erstes Diagramm zeigt die Nachhallzeit (räumlicher Mittelwert), ein zweites Diagramm zeigt die noch erforderliche äquivalente Absorptionsfläche, um die Sollnachhallzeit zu erreichen. Für jede Schule wurden anschließend die Messergebnisse zusammengefasst und interpretiert.

## 5.1. Bundesgymnasium Seebacher

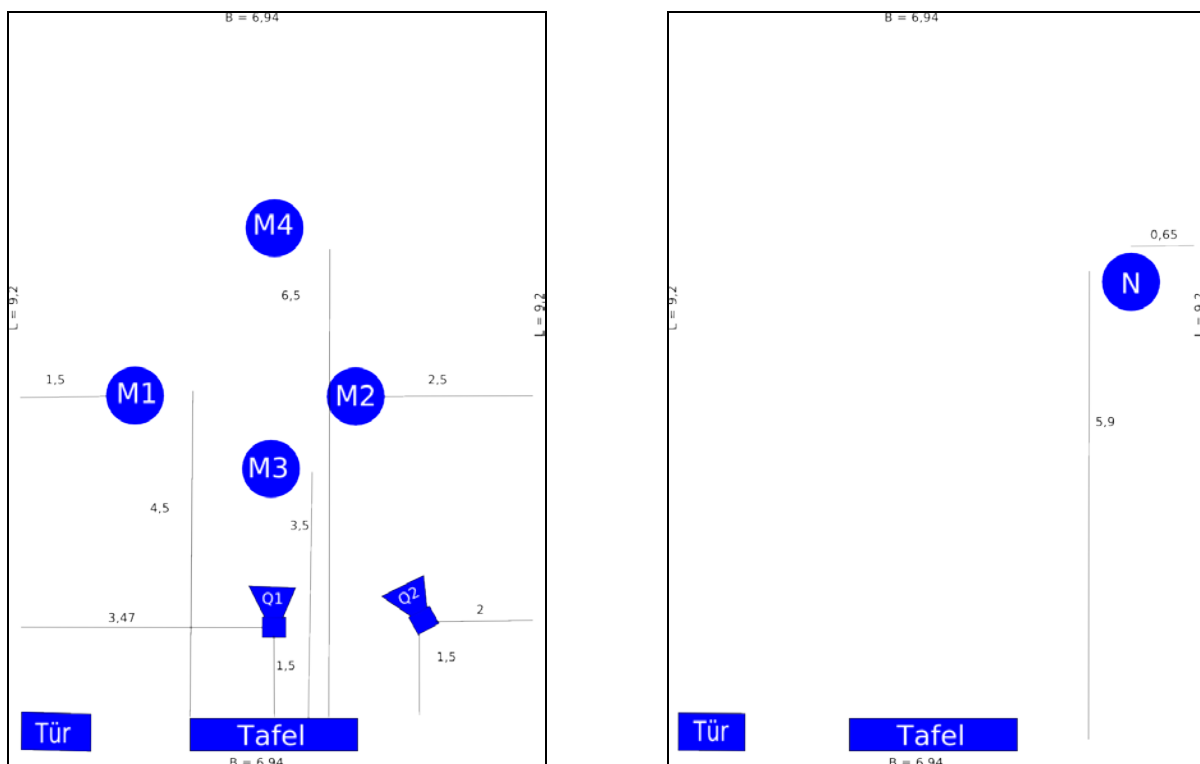
### 5.1.1. Messungen

#### Raum INF1 (Informatikraum)



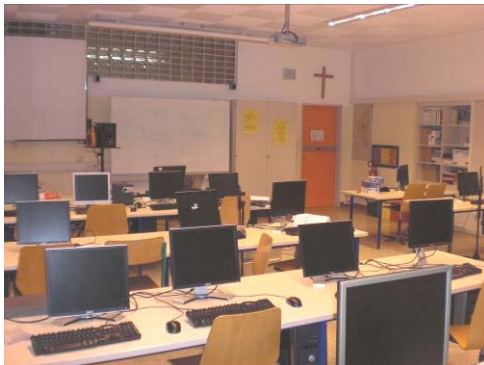
#### Beschreibung:

INF1 ist ein Informatikraum (9,2 x 6,94 x 3,1m) für 20-24 Schüler mit normalem Putz, normaler Decke und Kunststoff-Bodenbelag (Annahme: PVC). Ein Netzwerkverteiler emittierte in 1 Meter Entfernung einen Lärmpegel von 40,5 dB(A). Allein durch den Netzwerkverteiler wurde ein Grundgeräuschpegel von 37,5 dB (A) erreicht, der den Grenzpegel der WHO Richtlinien von 35 dB(A) überschreitet (siehe Anhang B).



**Abb. 188:** Links: Mikrofon- und Lautsprecherpositionen, Rechts: Position des Netzwerkverteilers (N).  
Entfernungen auf Tafel bezogen. Entfernung Tafel-Wand: 23 cm.

### Raum INF1 (Informatikraum)



Grundgeräuschpegel [dBA]	37,5
Feuchtigkeit	57 %
Temperatur	25 °C
Messpegel [dB SPL]	90
Anzahl Schüler	22
L x B x H [m]	9,2 x 6,94 x 3,1
Volumen [m <sup>3</sup> ]	197,92
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,56 s

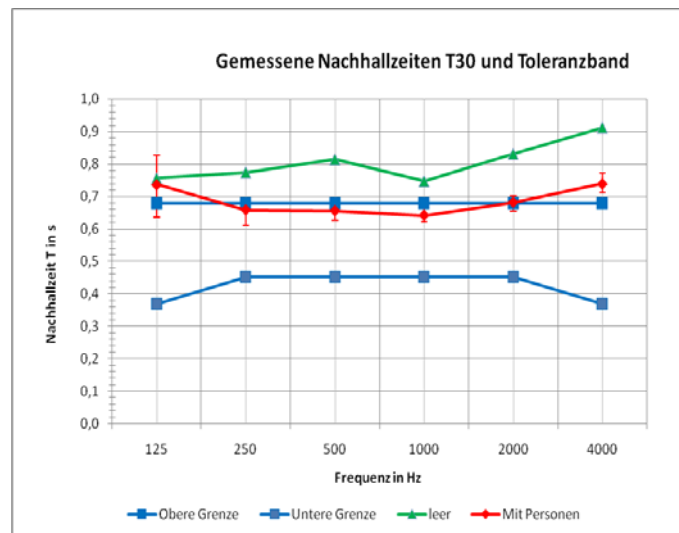


Abb. 189: Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)

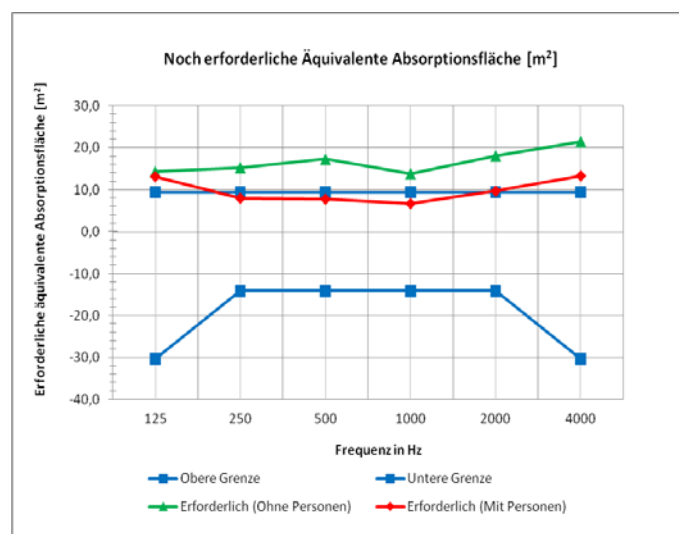


Abb. 190: Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 83: Raumakustische Gütemaße

INF1 (leer)								
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub> [s], gemittelt</b>		0,76	0,77	0,81	0,75	0,83	0,91	0,76
$\sigma$		0,056	0,026	0,028	0,019	0,017	0,022	0,013
max		0,85	0,81	0,85	0,79	0,86	0,96	0,79
min		0,65	0,71	0,77	0,72	0,79	0,87	0,74
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,76	0,78	0,80	0,74	0,83	0,91	0,77
	$\sigma$	0,008	0,012	0,008	0,009	0,008	0,005	0,005
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,85	0,79	0,82	0,78	0,85	0,91	0,76
	$\sigma$	0,005	0,012	0,021	0,008	0,005	0,009	0,000
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,78	0,78	0,77	0,75	0,83	0,94	0,76
	$\sigma$	0,009	0,005	0,005	0,017	0,028	0,033	0,017
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,75	0,71	0,78	0,74	0,82	0,93	0,77
	$\sigma$	0,019	0,005	0,009	0,014	0,012	0,022	0,021
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,66	0,79	0,84	0,74	0,84	0,90	0,76
	$\sigma$	0,009	0,008	0,012	0,022	0,012	0,000	0,005
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,68	0,78	0,83	0,73	0,81	0,88	0,74
	$\sigma$	0,005	0,019	0,017	0,005	0,012	0,008	0,005
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,79	0,77	0,83	0,75	0,82	0,91	0,76
	$\sigma$	0,012	0,009	0,009	0,000	0,009	0,008	0,005
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,78	0,78	0,84	0,74	0,83	0,92	0,77
	$\sigma$	0,005	0,014	0,000	0,009	0,005	0,005	0,005
<b>EDT [s]</b>		0,85	0,72	0,75	0,72	0,84	0,90	0,67
$\sigma$		0,15	0,09	0,07	0,06	0,00	0,03	0,04
max		1,02	0,95	0,85	0,83	0,91	0,96	0,74
min		0,53	0,58	0,63	0,63	0,71	0,85	0,61
<b>C50[dB]</b>		-0,23	0,81	0,83	2,23	2,13	2,14	3,70
$\sigma$		2,13	1,95	1,20	1,05	1,55	1,20	1,11
max		3,30	3,00	2,60	4,20	4,40	4,40	5,50
min		-3,90	-3,60	-1,70	0,30	-0,20	0,20	1,80
<b>D50[%]</b>		49,17	55,17	54,46	62,33	61,79	61,79	69,83
$\sigma$		11,77	10,73	7,09	5,54	8,35	6,38	5,38
max		67,00	68,00	65,00	72,00	73,00	73,00	78,00
min		29,00	31,00	40,00	51,00	49,00	51,00	60,00
<b>STI</b>		0,66						
$\sigma$		0,02						
max		0,70						
min		0,63						
<b>RASTI</b>		0,66						
$\sigma$		0,03						
max		0,69						
min		0,62						
<b>%Alcons</b>		4,73						
$\sigma$		0,57						
max		5,50						
min		3,90						

Tabelle 84: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen							
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub>[s]</b>		0,74	0,66	0,66	0,64	0,68	0,74
$\sigma$		0,05	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
max		0,83	0,68	0,68	0,67	0,70	0,77
min		0,64	0,61	0,63	0,62	0,65	0,71
Max - T <sub>30</sub>		0,09	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03
T <sub>30</sub> - min		0,10	0,05	0,03	0,02	0,03	0,03

## Raum 6D, Erdgeschoss



### Beschreibung:

Raum 6D ist ein normaler Klassenraum im Erdgeschoss (9,01 x 6,12 x 3,07m) für 26 Schüler mit normalem Putz, normaler Decke und Kunststoff-Bodenbelag (Annahme: PVC).

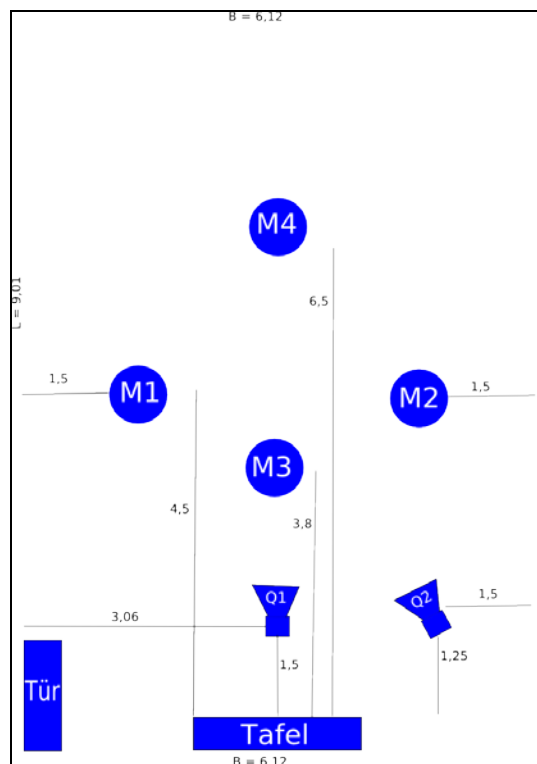


Abb. 191: Mikrofon- und Lautsprecherpositionen

### Raum 6D, Erdgeschoss



Grundgeräuschpegel [dBA]	35
Feuchtigkeit	58 %
Temperatur	24 °C
Messpegel [dB SPL]	85
Anzahl Schüler	26
L x B x H [m]	9,01 x 6,12 x 3,07
Volumen [m <sup>3</sup> ]	169,28
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,54 s

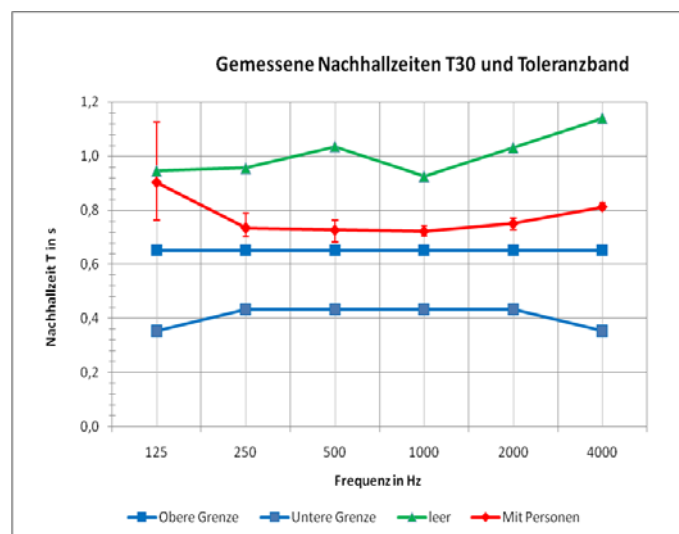


Abb. 192: Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)

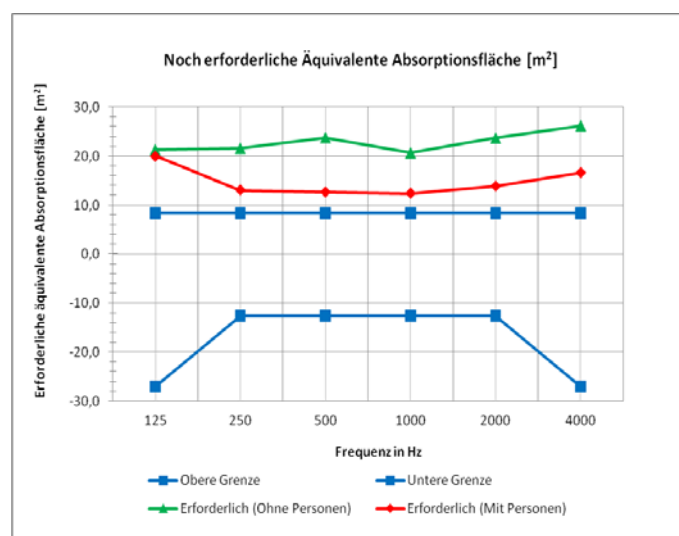


Abb. 193: Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 85: Raumakustische Gütemaße

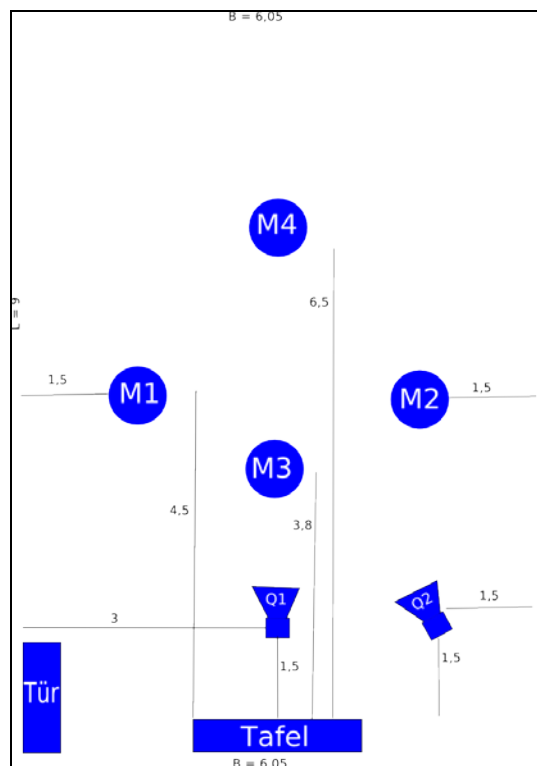
Raum 6D (leer)								
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub> [s], gemittelt</b>		0,95	0,96	1,04	0,93	1,03	1,14	0,89
$\sigma$		0,112	0,040	0,046	0,016	0,021	0,016	0,014
max		1,19	1,05	1,11	0,96	1,07	1,17	0,92
min		0,79	0,90	0,95	0,90	0,99	1,12	0,86
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,93	0,94	1,05	0,91	1,01	1,13	0,90
	$\sigma$	0,036	0,005	0,028	0,008	0,012	0,009	0,005
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,00	0,93	0,98	0,92	1,03	1,13	0,88
	$\sigma$	0,049	0,021	0,025	0,005	0,005	0,005	0,005
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,81	0,91	1,00	0,93	1,04	1,14	0,89
	$\sigma$	0,014	0,005	0,024	0,012	0,009	0,005	0,005
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,97	0,95	1,10	0,94	1,02	1,16	0,89
	$\sigma$	0,012	0,019	0,014	0,016	0,012	0,012	0,000
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,19	0,95	1,05	0,93	1,07	1,16	0,92
	$\sigma$	0,005	0,000	0,016	0,016	0,000	0,005	0,005
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,93	0,95	1,00	0,94	1,02	1,16	0,90
	$\sigma$	0,005	0,005	0,017	0,005	0,005	0,009	0,008
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,90	1,04	1,06	0,91	1,04	1,12	0,87
	$\sigma$	0,026	0,008	0,041	0,009	0,000	0,005	0,008
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,83	0,98	1,05	0,92	1,01	1,13	0,89
	$\sigma$	0,022	0,022	0,017	0,005	0,014	0,005	0,008
<b>EDT[s]</b>		0,80	0,89	1,02	0,91	1,03	1,13	0,79
$\sigma$		0,11	0,12	0,06	0,05	0,00	0,05	0,03
max		1,03	1,19	1,14	1,00	1,16	1,21	0,85
min		0,67	0,72	0,93	0,82	0,93	1,00	0,74
<b>C50[dB]</b>		1,66	1,95	-0,20	1,76	1,95	1,02	3,15
$\sigma$		2,62	1,59	0,96	0,89	1,16	0,75	0,69
max		6,30	5,40	2,00	3,70	4,70	2,60	4,50
min		-1,80	0,10	-1,70	0,30	0,10	-0,20	2,10
<b>D50[%]</b>		58,17	60,58	48,88	59,79	60,79	55,79	67,38
$\sigma$		13,51	8,54	5,73	4,92	6,06	4,35	3,36
max		82,00	79,00	62,00	70,00	75,00	65,00	74,00
min		41,00	51,00	40,00	51,00	51,00	49,00	62,00
<b>STI</b>		0,62						
$\sigma$		0,02						
max		0,66						
min		0,60						
<b>RASTI</b>		0,60						
$\sigma$		0,02						
max		0,64						
min		0,57						
<b>%Alcons</b>		5,85						
$\sigma$		0,55						
max		6,60						
min		4,70						

Tabelle 86: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen							
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub>[s]</b>		0,90	0,73	0,73	0,72	0,75	0,81
$\sigma$		0,10	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
max		1,13	0,79	0,76	0,74	0,77	0,83
min		0,76	0,70	0,68	0,71	0,73	0,80
Max - T <sub>30</sub>		0,22	0,05	0,04	0,02	0,02	0,02
T <sub>30</sub> - min		0,14	0,03	0,04	0,02	0,02	0,01

**Raum 8B (2.Stock)****Beschreibung:**

Raum 8B ist ein normaler Klassenraum im 2. Stock (9 x 6,05 x 3,08m) für 22 Schüler mit normalem Putz, normaler Decke und Parkettboden (Holz).



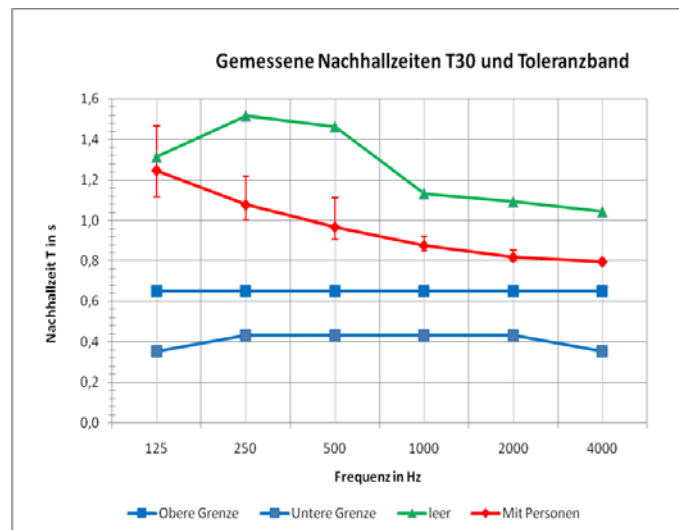
**Abb. 194:** Mikrofon- und Lautsprecherpositionen



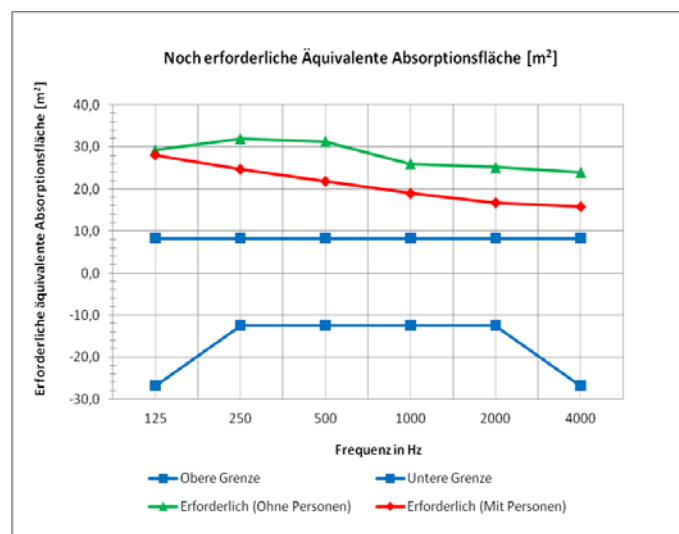
**Raum 8B (2.Stock)**



Grundgeräuschpegel [dBA]	35,4
Feuchtigkeit	60 %
Temperatur	25 °C
Messpegel [dB SPL]	85
Anzahl Schüler	22
L x B x H [m]	9 x 6,05 x 3,08
Volumen [m <sup>3</sup> ]	167,7
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,54 s



**Abb. 195:** Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)



**Abb. 196:** Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 87: Raumakustische Gütemaße

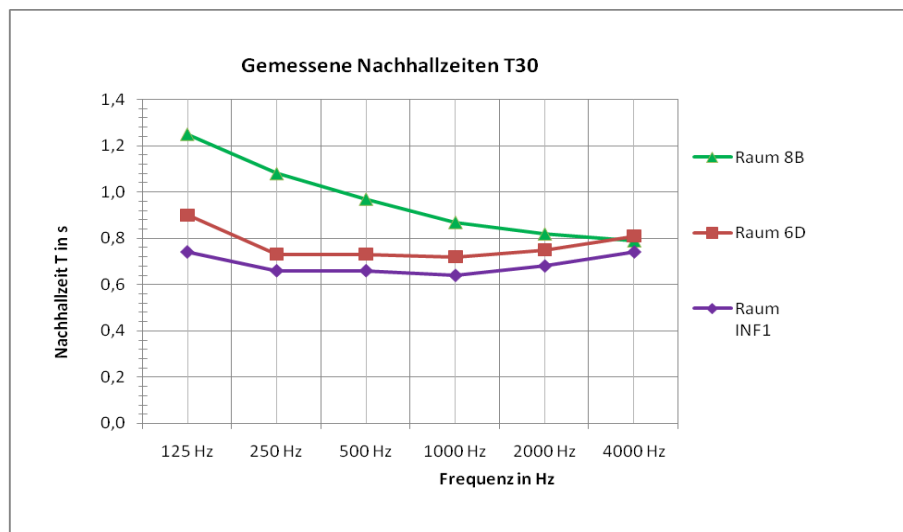
Raum 8B (leer)								
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
	<b>T<sub>30</sub>[s], gemittelt</b>	1,31	1,52	1,46	1,13	1,09	1,04	0,80
	$\sigma$	0,114	0,117	0,105	0,031	0,020	0,012	0,014
	Max	1,56	1,81	1,82	1,21	1,16	1,07	0,84
	Min	1,17	1,37	1,33	1,09	1,06	1,02	0,79
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,44	1,64	1,46	1,12	1,09	1,03	0,80
	$\sigma$	0,049	0,061	0,025	0,012	0,014	0,009	0,005
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,26	1,42	1,45	1,12	1,08	1,05	0,80
	$\sigma$	0,074	0,064	0,037	0,017	0,012	0,000	0,000
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,45	1,64	1,51	1,19	1,13	1,03	0,81
	$\sigma$	0,081	0,122	0,057	0,017	0,022	0,012	0,024
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,21	1,47	1,43	1,13	1,09	1,05	0,82
	$\sigma$	0,024	0,062	0,033	0,025	0,022	0,008	0,008
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,43	1,61	1,35	1,15	1,09	1,04	0,82
	$\sigma$	0,024	0,050	0,022	0,008	0,000	0,009	0,005
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,33	1,40	1,39	1,09	1,08	1,04	0,79
	$\sigma$	0,029	0,012	0,031	0,000	0,008	0,000	0,005
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,21	1,51	1,66	1,14	1,10	1,05	0,80
	$\sigma$	0,028	0,082	0,123	0,029	0,009	0,005	0,012
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,20	1,44	1,46	1,12	1,09	1,06	0,80
	$\sigma$	0,017	0,041	0,075	0,008	0,008	0,009	0,000
	<b>EDT[s]</b>	1,03	1,36	1,36	1,17	1,06	1,04	0,71
	$\sigma$	0,07	0,19	0,13	0,10	0,00	0,03	0,03
	Max	1,11	1,68	1,63	1,38	1,18	1,11	0,77
	Min	0,84	0,90	1,08	1,00	0,91	0,98	0,67
	<b>C50[dB]</b>	-0,42	-1,52	-1,35	0,30	1,78	1,86	4,05
	$\sigma$	2,84	1,97	0,79	0,78	0,76	0,53	0,48
	Max	3,20	2,30	-0,10	2,00	3,80	3,10	5,30
	Min	-6,00	-4,70	-2,80	-1,30	0,90	1,10	3,40
	<b>D50[%]</b>	48,04	41,79	42,29	51,58	60,08	60,58	71,71
	$\sigma$	15,21	10,94	4,29	4,52	4,13	2,93	2,15
	Max	68,00	63,00	49,00	61,00	71,00	67,00	77,00
	Min	20,00	24,00	34,00	42,00	55,00	56,00	69,00
	<b>STI</b>	0,60						
	$\sigma$	0,02						
	Max	0,62						
	Min	0,57						
	<b>RASTI</b>	0,57						
	$\sigma$	0,02						
	Max	0,61						
	Min	0,54						
	<b>%Alcons</b>	6,80						
	$\sigma$	0,54						
	Max	7,70						
	Min	5,90						

Tabelle 88: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

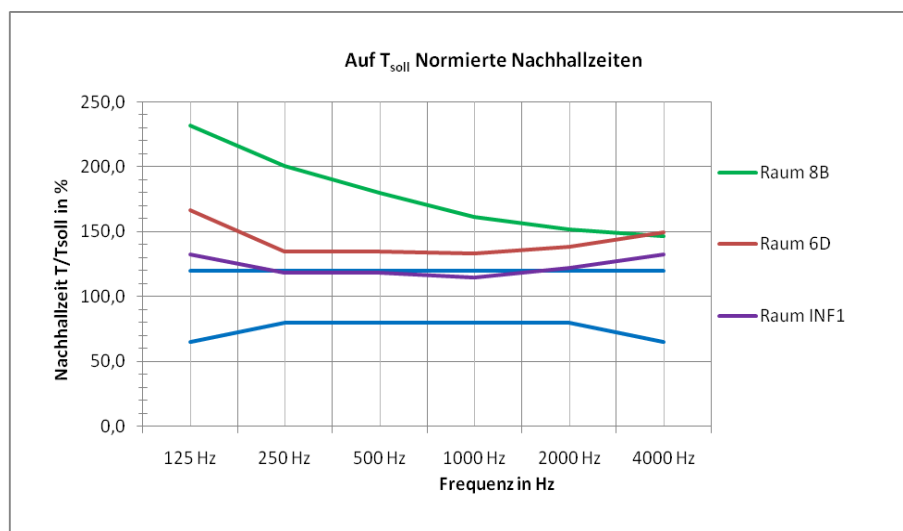
Mit Personen							
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
T <sub>30</sub> [s]		1,25	1,08	0,97	0,87	0,82	0,79
	$\sigma$	0,10	0,06	0,04	0,02	0,01	0,01
Max		1,47	1,22	1,11	0,92	0,85	0,81
Min		1,12	1,00	0,91	0,85	0,80	0,78
Max - T <sub>30</sub>		0,22	0,14	0,14	0,04	0,04	0,01
T <sub>30</sub> - min		0,13	0,08	0,06	0,03	0,02	0,01

### 5.1.2. Zusammenfassung und Interpretation

Abb. 197 zeigt die Zusammenfassung des Nachhallzeitmessungen des Bundesgymnasiums Seebacher. Obwohl der Raum 8B dem Raum 6D geometrisch sehr ähnlich ist, hat Raum 8B eine viel höhere Nachhallzeit als Raum 6D. Man kann annehmen, dass der Kunststoff-Bodenbelag im Raum 6D ein viel höheres Absorptionverhalten hat als der Parkettboden (Holz) im Raum 8B. Im Vergleich zu den Messergebnissen der Studie von Berliner Klassenräume von Kirchner<sup>300</sup> (siehe Abb. 113 und 114, S. 121) dominieren hier vor allem die Gruppe-A-Klassenräume mit konstantem Nachhallzeitverlauf über den Frequenzbereich. Raum 8B gehört zu den Gruppe-B-Klassenräumen mit einem Nachhallanstieg zu den tiefen Frequenzen.



**Abb. 197:** Zusammenfassung der Nachhallzeitmessungen des Bundesgymnasiums Seebacher (Graz) (Personen eingerechnet) (4 MP, 2 QP, N=24)



**Abb. 198:** Auf die Sollnachhallzeit normierte Nachhallzeiten der Klassenräume und Toleranzband. (Werte: siehe Tabelle 91). Personen vor Normierung eingerechnet. Bundesgymnasium Seebacher

<sup>300</sup> [KIRCHNER1].

Vergleicht man die Mittelwerte der Nachhallzeiten aus Tabelle 89 mit den Ergebnissen aus den Studien der Tabellen 32 und 33, so stellt man fest, dass die Klassenräume zu den aktuellen Studienergebnissen gewöhnliche Nachhallzeiten aufweisen. Raum 8D hat eine hohe Nachhallzeit und nur Schick und Pekkarinen haben ausnahmsweise ähnlich hohe Werte gemessen.

**Tabelle 89:** Zusammenfassung aller Nachhallzeiten im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Raum	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	T30 Mittelwert [s]
Raum INF1	0,74	0,66	0,66	0,64	0,68	0,74	0,69
Raum 6D	0,9	0,73	0,73	0,72	0,75	0,81	0,77
Raum 8B	1,25	1,08	0,97	0,87	0,82	0,79	0,96

Der Grundgeräuschpegel lag in fast allen Klassenräumen über dem WHO-Grenzwert von 35 dB(A) (siehe Anhang B).

**Tabelle 90:** Grundgeräuschpegel der Klassenräume

Raum	Grundgeräuschpegel (dB(A) (slow))
Raum INF1	37,5 (Netzwerkverteiler)
Raum 6D	35
Raum 8B	35,4

Laut Mackenzie<sup>301</sup> würde eine Nachhallzeitverbesserung von 0,7 s auf 0,4 s auch eine Grundgeräuschpegelminderung im unbesetzten Zustand von mindestens 4 dB(A) mit sich bringen (siehe Tabelle 12, S.58).

Die Anzahl der Schüler in den Klassenräumen lag zwischen 22 und 26. Nach den Studienergebnissen von Shield (siehe Abb. 12, S. 22) liegt bei 18 Schülern der LAeq bei 60 dB(A) und der LA90 bei 50 dB(A) und für jeden weiteren Schüler ist mit einer Erhöhung des LAeq und des LA90 von 1 dB(A) zu rechnen. Somit kommt man auf einen LA90 von 54 bis 58 dB(A).

<sup>301</sup> [MACKENZIE].

**Tabelle 91:** Nachhallzeiten auf die Sollnachhallzeit normiert. (Personen vor Normierung eingerechnet)

Raum	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Raum INF1	1,32	1,18	1,18	1,14	1,21	1,32
Raum 6D	1,67	1,35	1,35	1,33	1,39	1,50
Raum 8B	2,31	2,00	1,80	1,61	1,52	1,46

Im folgenden soll nun untersucht werden, um wieviel sich der Lärmpegel und der Sprachaufwand des Lehrers oder der Lehrerin nach einer akustischen Sanierung senken wird. Es wurden die Erkenntnisse aus den Studien von Oberdörster und aus den Studien über den Lombard-Effekt (siehe Kapitel 2.2. und Kapitel 3.3.) angewandt.

**Tabelle 92:** Minderung des Lärmpegels im Unterricht durch raumakustische Sanierung. T30 ist der Mittelwert der Nachhallzeiten von 125 Hz bis 4000 Hz (Personen eingerechnet). A1 ist die äquivalente Absorptionsfläche des unbehandelten Raumes.  $\Delta A$  ist die zusätzlich einzubringende äquivalente Absorptionsfläche um die Sollnachhallzeit zu erreichen.  $\Delta L$  entspricht der physikalischen Senkung des Lärmpegels nach DIN 18041. Formeln siehe Kapitel 2.2.1.

Raum	T30 Mittelwert [s]	Raumvolumen [m <sup>3</sup> ]	Sollnachhallzeit [s]	A1 [m <sup>2</sup> ]	$\Delta A$ [m <sup>2</sup> ]	$\Delta L$ [dB] (physikalisch)
Raum INF1	0,69	197,92	0,56	46,41	10,50	0,9
Raum 6D	0,77	169,28	0,54	35,24	15,23	1,6
Raum 8B	0,96	167,7	0,54	28,03	21,97	2,5

**Tabelle 93:** Physikalische nach DIN 18041 und tatsächliche Lärmpegelminderung  $\Delta L$  nach [OBERDOERSTER1] und [LAZARUS1] durch Reduzierung der Nachhallzeit auf die Sollnachhallzeit. (siehe Kapitel 2.2.)  $\Delta L_{\text{Lehrerstimme}}$  ist die Minderung des Sprachpegels von Lehrer/innen durch den Lombard-Effekt nach [SATO] aus dem Jahr 2008 (siehe Kapitel 3.3.)

Raum	$\Delta L$ [dB] (physikalisch)	$\Delta L$ [dBA] (tatsächlich)		$\Delta L_{\text{Lehrerstimme}}$ [dBA] (0,72 dB pro dB <sub>L,NA</sub> )	
		1dBA pro 0,1 s	2dBA pro 0,1 s	Minimal	Maximal
Raum INF1	0,9	1,3	2,5	0,9	1,8
Raum 6D	1,6	2,3	4,7	1,7	3,4
Raum 8B	2,5	4,2	8,5	3,0	6,1

Tabelle 93 zeigt, dass durch eine akustische Sanierung Lärmpegelsenkungen im Unterricht zu erwarten sind, außerdem senkt sich der Stimm- und Sprachaufwand des Lehrers oder der Lehrerin um mindestens 2 dB, was fast einer halben Sprechanstrengungsstufe nach ISO 9921 entspricht (siehe Tabelle 31). Selbstverständlich können diese Pegelsenkungen durch eine Sanierung des Klassenraums nicht garantiert werden, da der Lärmpegel von vielen Faktoren im Unterricht abhängig ist: So gibt es Unterschiede im Lärmpegel zwischen den Schulen (siehe Abb. 11, S. 22) und den Lehrern (Abb. 13, S. 23), allerdings nicht zwischen den Schulzweigen (Tabelle 5, S. 23), außerdem hat CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft und die Anzahl der Schüler im Klassenraum auch Einfluss auf den Lärmpegel (siehe Abb. 33, S. 37).

Für die Berechnung der Sprachpegelreduzierung wurde die Studie von Sato<sup>302</sup> benutzt, da diese Studie die aktuellste und umfangreichste Studie über den Lombard-Effekt bei Lehrer/innen war, die vorlag. Andere Studien geben eine höhere Steigung des Sprechpegels an (siehe Kapitel 3.3.).

Eine raumakustische Sanierung des Klassenraums 8B auf die Sollnachhallzeit kann folgende Effekte mit sich bringen:



**Abb. 199:** Positive Effekte durch Sanierung des Klassenraum 8B ( $T=0,9s$ ) auf die Sollnachhallzeit ( $0,5s$ ). Einige Effekte, die in der Abbildung transparent dargestellt sind, wurden in den Studien bei einer Reduzierung der Nachhallzeit auf unter  $0,5s$  beobachtet.

- Reduzierung des Lärmpegels (Arbeits- und Grundgeräuschpegel) im Klassenraum um 4 bis 8 dB(A). Reduzierung der Lärmbelastung der Lehrerin oder des Lehrers sowie Reduzierung der subjektiven Lärmbelastung der Schüler und Schülerinnen. (Kapitel 2.2.1)
- Zunahme der Sprachverständlichkeit (siehe Kapitel 3.2.1). Laut der Vorhersage von Oberdörster wird durch eine Reduzierung der Nachhallzeit von 0,9 s auf 0,5 s der STI-Wert von 0,6 auf 0,7 verbessert (siehe Abb.: 94 S.101). Laut Farrel-Becker-Formel

<sup>302</sup> [SATO].

kann sich der %Alcons-Wert von 6,6 auf 3,8 verbessern (S.103). Laut dem Vorhersagemodell von Bradley (siehe S. 96 und S.97) kann sich der C50-Wert von 0,6 dB auf 4,7 dB verbessern. Die Verbesserung der subjektiven Sprachverständlichkeit ist abhängig vom Alter und von der Hörfähigkeit der Schüler, sowie vom SNR im Klassenraum. (siehe Kapitel 3.2.2, siehe auch S.37)

- Reduzierung des Sprachaufwands des Lehrers oder der Lehrerin um 3 bis 6 dB(A). (siehe Kapitel 3.3.)
- Die Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels für nacheinander folgende Unterrichtsstunden über den Vormittag ist deutlich reduziert oder bleibt aus. (Abb. 25 und 26 S.29 bis S.30; Tabelle 13 und 14 S. 60)
- Reduzierung der Lärmempfindlichkeit des Lehrers oder der Lehrerin: Reduzierung der Steigung der Herzfrequenz in Abhängigkeit vom Lärmpegel im Klassenraum. (Reduzierung der Herzfrequenzreaktion auf den Stressor „Lärm“) (Abb. 50, S. 64)
- Ausgleich zwischen Ermüdungs- und Aktivierungsphasen (Herzfrequenz-Trendwerte) der Lehrerin oder des Lehrers (siehe Kapitel 2.2.) (Abb. 48 und Abb. 49 S. 63)
- Reduzierung oder Ausbleiben der Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels bei Wechsel zu differenzierten Arbeitsformen (Abb. 19, 20, 21 S. 27 und S. 28)
- Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Schüler (siehe Kapitel 2.2.2.)
- Verbesserung der Lehrer-Schüler-Beziehung („kommunikative Klima“) (siehe S. 65 bis 68)

## 5.2. Bundeshandelsakademie Grazbachgasse (HAK)

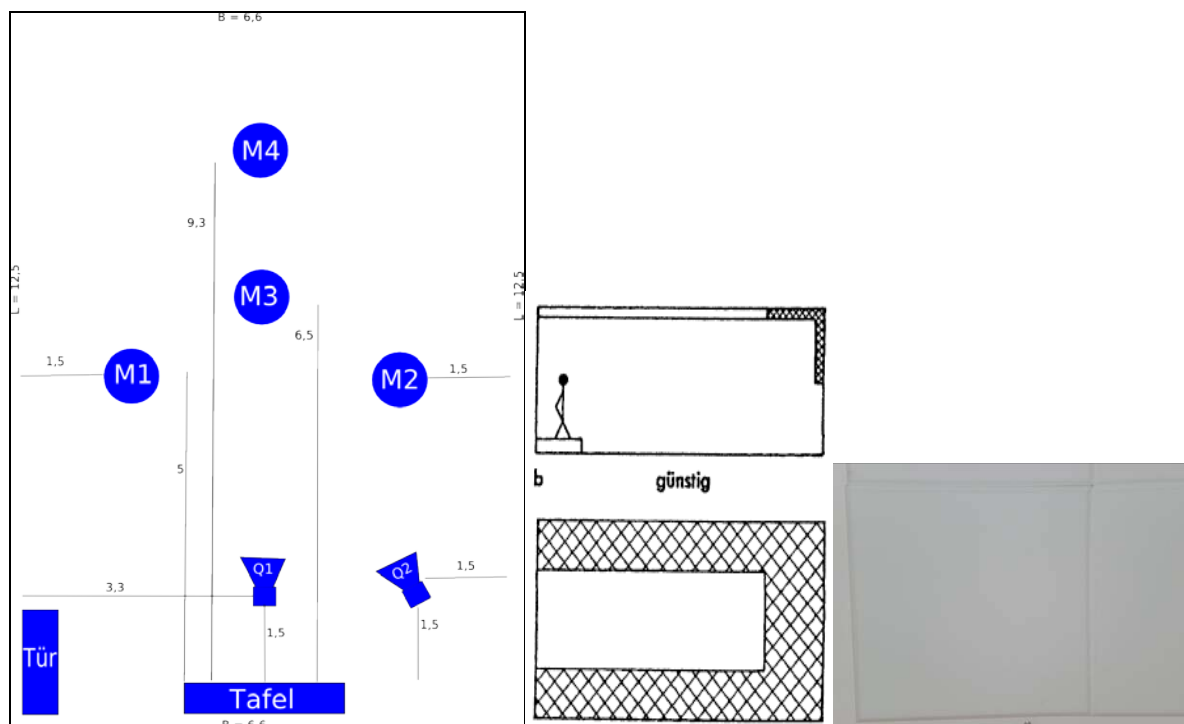
### 5.2.1. Messungen

#### Raum 3.38 (Altes Gebäude AG) (saniert)



#### Beschreibung:

Raum 3.38 (AG) ist ein Klassenraum (12,5 x 6,6 x 4,29m) für 22 Schüler mit normalem Putz und Parkettboden (Holz). Der Klassenraum wurde durch eine Akustikdecke (DIN 18041-gerechte Montierung) akustisch optimiert bzw. saniert. An der Decke ist ebenfalls ein Träger angebracht (6,6 x 0,7 x 0,68m), der aus dem Gesamtvolumen des Raumes herausgerechnet werden musste. Eine akustische Platte, wie unten auf dem Foto zu sehen ist, hat AusmaÙe von 60 cm x 60 cm und eine Dicke von 5 cm. An der gesamten Decke waren 91 Platten und an der Rückwand noch einmal 18 Platten montiert. Die Gesamtfläche der Akustikdecke beträgt also 39,24 m<sup>2</sup>. Die Vorhänge der Fenster waren während den Messungen geschlossen.



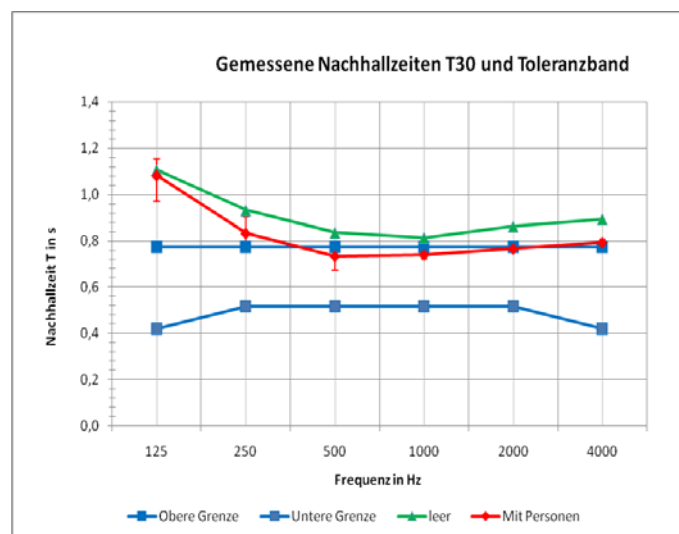
**Abb. 200:** Links: Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (Tafel-Wand-Entfernung war 23 cm). Mitte: Anordnung der Akustikdecke (Aufriss und Deckenuntersicht) im Raum nach einer Abbildung der DIN 18041. Rechts: Abbildung einer akustischen Platte



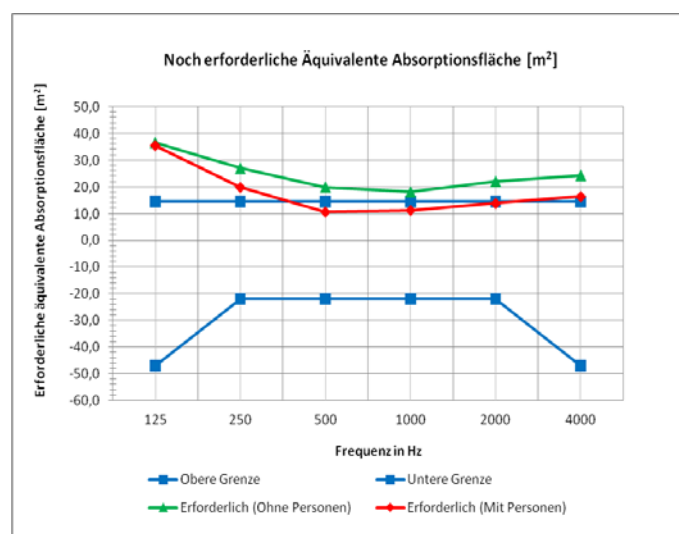
**Raum 3.38 (Altes Gebäude AG) (saniert)**



Grundgeräuschpegel [dBA]	33
Feuchtigkeit	55 %
Temperatur	26 °C
Messpegel [dB SPL]	90
Anzahl Schüler	22
L x B x H [m]	12,5 x 6,6 x 4,29
Volumen [m <sup>3</sup> ]	350,78
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,64 s



**Abb. 201:** Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)



**Abb. 202:** Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 94: Raumakustische Gütemaße

Raum 3.38 (leer)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub> [s], gemittelt</b>		1,11	0,93	0,84	0,81	0,86	0,89	0,79
$\sigma$		0,053	0,036	0,029	0,017	0,010	0,015	0,007
max		1,18	1,02	0,89	0,86	0,89	0,91	0,80
min		0,99	0,87	0,76	0,79	0,85	0,86	0,77
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,00	0,92	0,83	0,81	0,88	0,91	0,80
	$\sigma$	0,008	0,000	0,005	0,000	0,005	0,000	0,005
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,06	0,91	0,86	0,81	0,86	0,91	0,79
	$\sigma$	0,005	0,009	0,012	0,005	0,000	0,000	0,000
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,14	0,93	0,83	0,80	0,86	0,89	0,79
	$\sigma$	0,008	0,014	0,000	0,012	0,005	0,005	0,005
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,13	0,98	0,84	0,82	0,86	0,88	0,79
	$\sigma$	0,008	0,005	0,009	0,005	0,005	0,009	0,008
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,15	0,88	0,82	0,80	0,86	0,87	0,78
	$\sigma$	0,008	0,012	0,005	0,009	0,005	0,009	0,005
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,14	0,90	0,78	0,80	0,85	0,88	0,79
	$\sigma$	0,000	0,017	0,017	0,009	0,005	0,009	0,005
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,15	0,99	0,87	0,84	0,86	0,90	0,79
	$\sigma$	0,021	0,019	0,012	0,012	0,005	0,005	0,005
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,07	0,93	0,84	0,83	0,86	0,90	0,79
	$\sigma$	0,017	0,005	0,012	0,009	0,008	0,005	0,000
<b>EDT [s]</b>		1,16	0,93	0,77	0,78	0,84	0,84	0,68
$\sigma$		0,12	0,11	0,07	0,06	0,00	0,04	0,04
max		1,33	1,07	0,90	0,90	0,99	0,91	0,74
min		0,92	0,68	0,62	0,67	0,74	0,78	0,61
<b>C50 [%]</b>		-1,03	0,88	2,68	2,91	4,10	4,08	5,09
$\sigma$		1,75	2,18	1,49	0,55	1,13	0,59	0,63
max		1,60	4,90	4,90	4,10	6,40	5,40	6,60
min		-4,00	-1,80	-0,40	2,20	2,20	3,10	4,30
<b>D50 [s]</b>		44,29	54,46	64,79	66,13	71,58	71,79	76,33
$\sigma$		9,74	12,09	7,80	2,91	5,21	2,74	2,49
max		59,00	76,00	76,00	72,00	81,00	78,00	82,00
min		29,00	38,00	49,00	62,00	63,00	67,00	73,00
<b>STI</b>		0,66						
$\sigma$		0,02						
max		0,70						
min		0,64						
<b>RASTI</b>		0,68						
$\sigma$		0,02						
max		0,72						
min		0,64						
<b>%Alcons</b>		4,77						
$\sigma$		0,46						
max		5,30						
min		3,80						

Tabelle 95: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen		125	250	500	1000	2000	4000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub> [s]</b>		1,08	0,83	0,73	0,74	0,76	0,79
$\sigma$		0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
max		1,15	0,90	0,77	0,78	0,79	0,80
min		0,97	0,78	0,67	0,72	0,76	0,77
Max - T <sub>30</sub>		0,07	0,07	0,04	0,04	0,02	0,01
T <sub>30</sub> - min		0,11	0,05	0,06	0,02	0,01	0,03

### Raum 3.31 (Altes Gebäude AG)



#### Beschreibung:

Raum 3.31 (Altbau) ist ein normaler Klassenraum ( $12 \times 6,4 \times 4,26$  m) für 30 Schüler mit normalem Putz und Parkettboden (Holz). Dieser Raum war nicht akustisch optimiert. Auf dem Foto ist ein Einschnitt („Einkerbung“) um die Tür zu sehen. Dieser musste als zusätzliches Volumen von ( $3,3 \times 0,2 \times 4,26$  m) zum Gesamtvolumen hinzugerechnet werden.

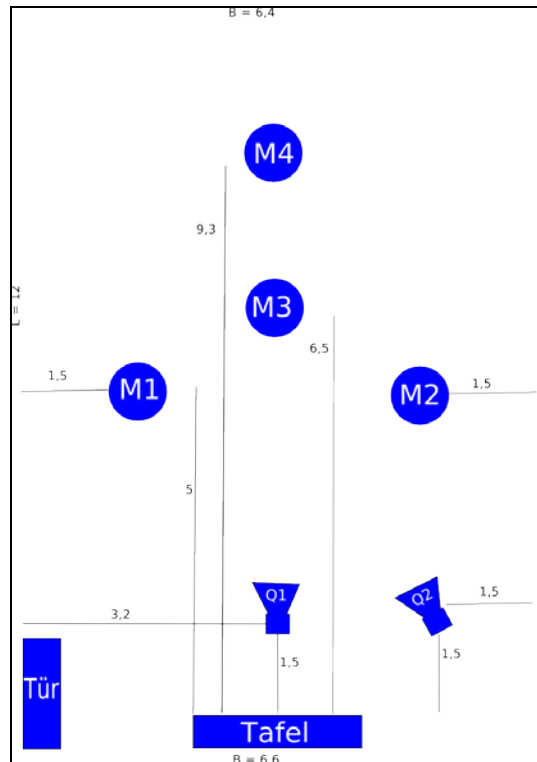
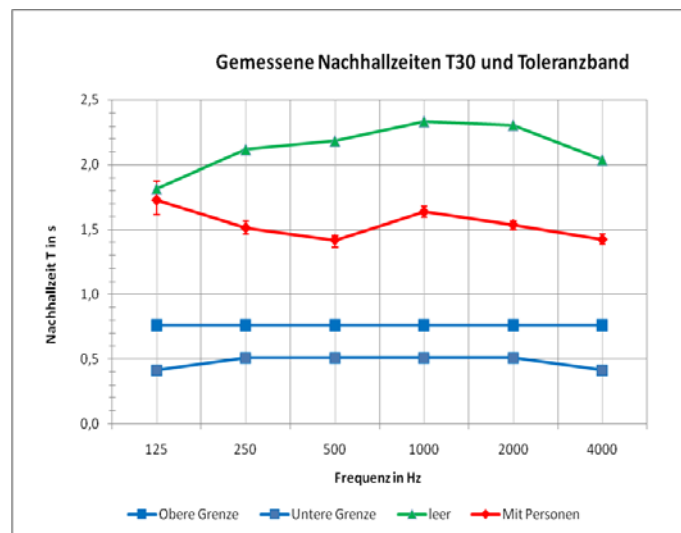


Abb. 203: Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (Tafel-Wand-Entfernung war 23 cm)

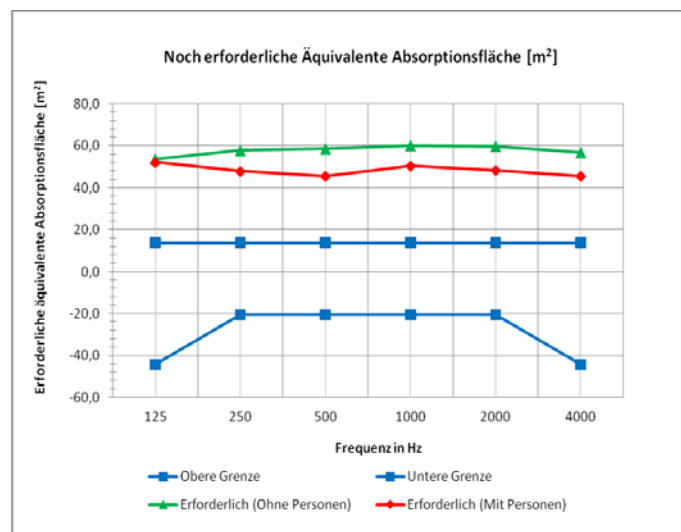
**Raum 3.31. (Altes Gebäude AG)**



Grundgeräuschpegel [dBA]	32,3
Feuchtigkeit	54 %
Temperatur	25 °C
Messpegel [dB SPL]	90
Anzahl Schüler	30
L x B x H [m]	12 x 6,4 x 4,26
Volumen [m <sup>3</sup> ]	324,35
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,63 s



**Abb. 204:** Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)



**Abb. 205:** Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 96: Raumakustische Gütemaße

Raum 3.31 (leer)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub>[s], gemittelt</b>		1,81	2,12	2,18	2,33	2,31	2,04	1,56
$\sigma$		0,079	0,059	0,051	0,049	0,049	0,059	0,056
Max		1,98	2,22	2,26	2,43	2,38	2,12	1,63
Min		1,69	2,02	2,05	2,25	2,23	1,96	1,46
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,74	2,16	2,19	2,33	2,28	2,01	1,55
	$\sigma$	0,009	0,008	0,021	0,009	0,008	0,008	0,009
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,80	2,03	2,07	2,32	2,28	2,01	1,54
	$\sigma$	0,005	0,012	0,024	0,005	0,012	0,014	0,005
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,95	2,09	2,18	2,27	2,25	1,97	1,48
	$\sigma$	0,036	0,046	0,026	0,026	0,017	0,005	0,012
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,78	2,07	2,19	2,30	2,29	1,97	1,48
	$\sigma$	0,026	0,029	0,008	0,017	0,026	0,008	0,008
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,81	2,12	2,24	2,41	2,37	2,11	1,62
	$\sigma$	0,012	0,012	0,016	0,016	0,005	0,008	0,012
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,78	2,11	2,21	2,39	2,37	2,11	1,62
	$\sigma$	0,017	0,031	0,009	0,022	0,009	0,009	0,005
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,73	2,14	2,19	2,33	2,30	2,05	1,56
	$\sigma$	0,042	0,009	0,009	0,028	0,042	0,052	0,039
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,92	2,22	2,21	2,32	2,32	2,06	1,60
	$\sigma$	0,036	0,000	0,017	0,051	0,052	0,059	0,036
<b>EDT[s]</b>		1,85	2,15	2,21	2,33	2,30	1,97	1,39
$\sigma$		0,27	0,24	0,15	0,08	0,00	0,05	0,06
Max		2,31	2,55	2,48	2,47	2,47	2,09	1,48
Min		1,36	1,72	1,91	2,19	2,09	1,88	1,27
<b>C50[dB]</b>		-3,45	-2,80	-3,90	-4,20	-2,91	-2,02	-0,38
$\sigma$		1,51	1,19	0,94	0,63	0,70	0,46	0,71
Max		-1,40	-1,20	-2,50	-3,20	-1,60	-1,20	0,60
Min		-6,60	-5,20	-5,50	-5,70	-4,00	-2,80	-2,00
<b>D50[%]</b>		31,46	34,79	29,21	27,46	34,00	38,58	47,92
$\sigma$		7,29	5,77	4,52	2,75	3,72	2,58	3,95
Max		43,00	43,00	36,00	32,00	41,00	43,00	53,00
Min		18,00	23,00	22,00	21,00	28,00	34,00	39,00
<b>STI</b>		0,46						
$\sigma$		0,01						
Max		0,47						
Min		0,45						
<b>RASTI</b>		0,43						
$\sigma$		0,01						
Max		0,46						
Min		0,41						
<b>%Alcons</b>		14,10						
$\sigma$		0,50						
Max		15,00						
Min		13,20						

Tabelle 97: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen		125	250	500	1000	2000	4000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub>[s]</b>		1,72	1,51	1,42	1,63	1,53	1,42
$\sigma$		0,07	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
Max		1,87	1,56	1,45	1,68	1,57	1,46
Min		1,61	1,46	1,36	1,59	1,50	1,38
Max - T <sub>30</sub>		0,15	0,05	0,03	0,05	0,03	0,04
T <sub>30</sub> - min		0,11	0,05	0,06	0,04	0,03	0,04

### Raum 3.26 (Altes Gebäude AG)



#### Beschreibung:

Raum 3.26 (Altes Gebäude) ist ein normaler Klassenraum (9 x 6,6 x 4,26 m) für 24 Schüler mit normalem Putz und Parkettboden (Holz).

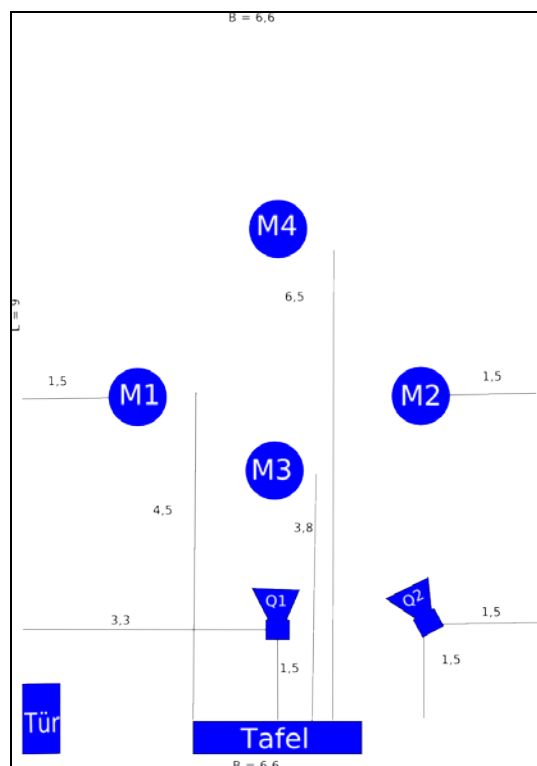
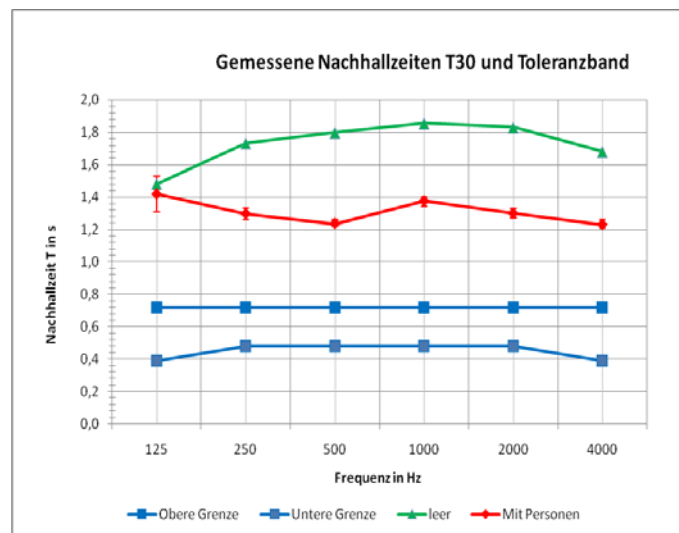


Abb. 206: Mikrofon- und Lautsprecherpositionen. Entfernung Tafel-Wand beträgt 23 cm.

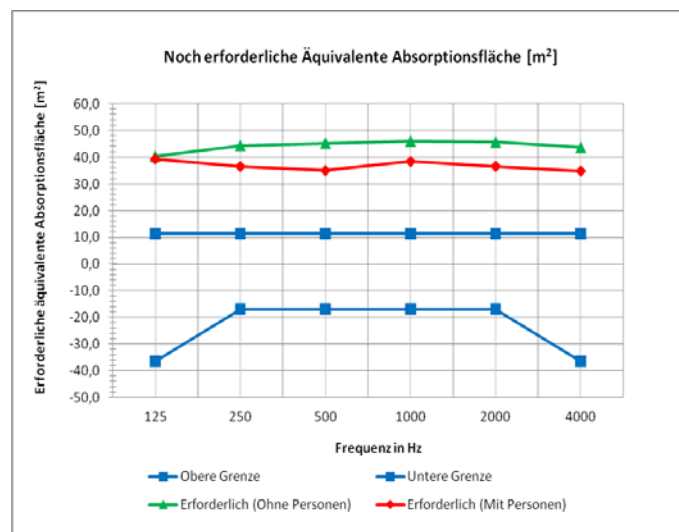
**Raum 3.26 (Altes Gebäude AG)**



Grundgeräuschpegel [dBA]	33,2
Feuchtigkeit	50 %
Temperatur	29 °C
Messpegel [dB SPL]	90
Anzahl Schüler	24
L x B x H [m]	9 x 6,6 x 4,26
Volumen [m <sup>3</sup> ]	253,04
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,60 s



**Abb. 207:** Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)



**Abb. 208:** Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 98: Raumakustische Gütemaße

Raum 3.26 (leer)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,48	1,73	1,80	1,86	1,83	1,68	1,29
	$\sigma$	0,062	0,032	0,028	0,022	0,026	0,026	0,019
	Max	1,60	1,80	1,85	1,90	1,89	1,74	1,33
	Min	1,36	1,67	1,76	1,80	1,78	1,64	1,25
M1Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,60	1,72	1,80	1,85	1,83	1,66	1,28
	$\sigma$	0,005	0,008	0,005	0,008	0,009	0,005	0,005
M2Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,48	1,76	1,84	1,88	1,84	1,69	1,28
	$\sigma$	0,005	0,014	0,014	0,019	0,014	0,008	0,005
M3Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,40	1,73	1,77	1,86	1,81	1,66	1,26
	$\sigma$	0,014	0,008	0,014	0,008	0,012	0,017	0,009
M4Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,51	1,73	1,79	1,85	1,83	1,67	1,29
	$\sigma$	0,000	0,017	0,016	0,012	0,005	0,009	0,005
M1Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,51	1,79	1,83	1,85	1,87	1,73	1,30
	$\sigma$	0,022	0,009	0,014	0,021	0,012	0,008	0,008
M2Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,48	1,68	1,79	1,88	1,85	1,69	1,32
	$\sigma$	0,012	0,009	0,021	0,017	0,019	0,008	0,008
M3Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,47	1,72	1,78	1,86	1,81	1,66	1,29
	$\sigma$	0,016	0,019	0,017	0,005	0,024	0,017	0,014
M4Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,40	1,72	1,78	1,83	1,81	1,68	1,30
	$\sigma$	0,028	0,026	0,019	0,025	0,016	0,017	0,012
	<b>EDT[s]</b>	1,55	1,60	1,80	1,87	1,83	1,70	1,20
	$\sigma$	0,21	0,12	0,06	0,05	0,00	0,05	0,04
	Max	1,96	1,83	1,91	1,98	1,89	1,76	1,27
	Min	1,23	1,38	1,67	1,76	1,70	1,58	1,13
	<b>C50[dB]</b>	-3,43	-1,58	-2,84	-2,69	-1,30	-0,86	0,64
	$\sigma$	1,80	1,06	1,27	1,12	0,88	1,08	0,80
	Max	-0,80	0,40	-0,60	-0,70	0,40	0,90	1,80
	Min	-6,20	-3,30	-4,60	-4,90	-3,00	-2,50	-0,80
	<b>D50[%]</b>	31,46	41,08	34,46	35,38	42,67	45,08	53,67
	$\sigma$	8,77	5,74	6,66	5,66	4,91	6,29	4,54
	Max	46,00	52,00	47,00	46,00	52,00	55,00	60,00
	Min	19,00	32,00	26,00	25,00	33,00	36,00	46,00
	<b>STI</b>	0,51						
	$\sigma$	0,02						
	Max	0,54						
	Min	0,47						
	<b>RASTI</b>	0,48						
	$\sigma$	0,03						
	Max	0,53						
	Min	0,43						
	<b>%Alcons</b>	11,08						
	$\sigma$	1,27						
	Max	13,60						
	Min	9,10						

Tabelle 99: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen		125	250	500	1000	2000	4000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,42	1,30	1,24	1,37	1,30	1,23
	$\sigma$	0,06	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
	Max	1,53	1,33	1,26	1,40	1,33	1,26
	Min	1,31	1,26	1,22	1,34	1,27	1,21
	Max - T <sub>30</sub>	0,11	0,04	0,02	0,02	0,03	0,03
	T <sub>30</sub> - min	0,11	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02

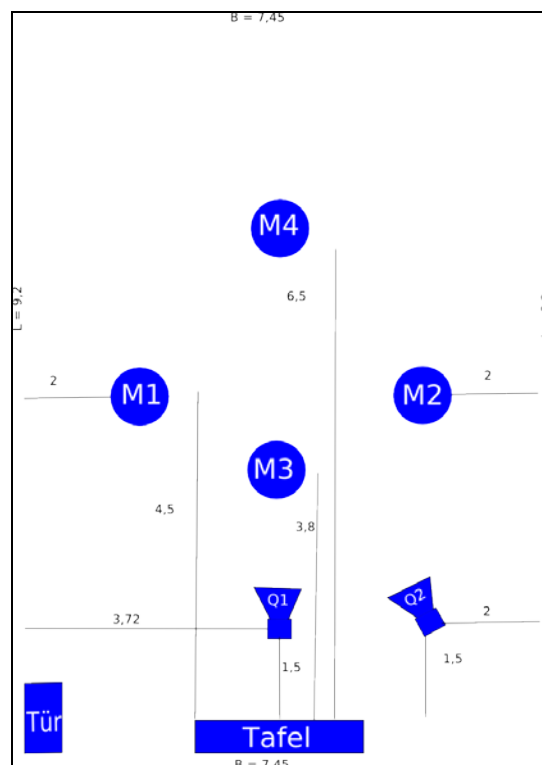


### Raum 2.05 (Neues Gebäude NB)



#### Beschreibung:

Raum 2.05 (Neues Gebäude) ist ein normaler Klassenraum (9,2 x 7,45 x 3,05 m) für 30 Schüler mit normalem Putz und Kunststoff-Bodenbelag.

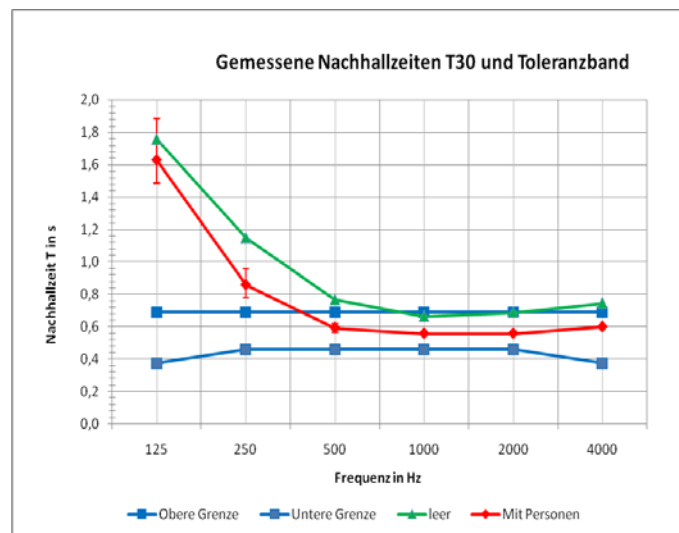


**Abb. 209:** Mikrofon- und Lautsprecherpositionen. Entfernung Tafel-Wand beträgt 27 cm.

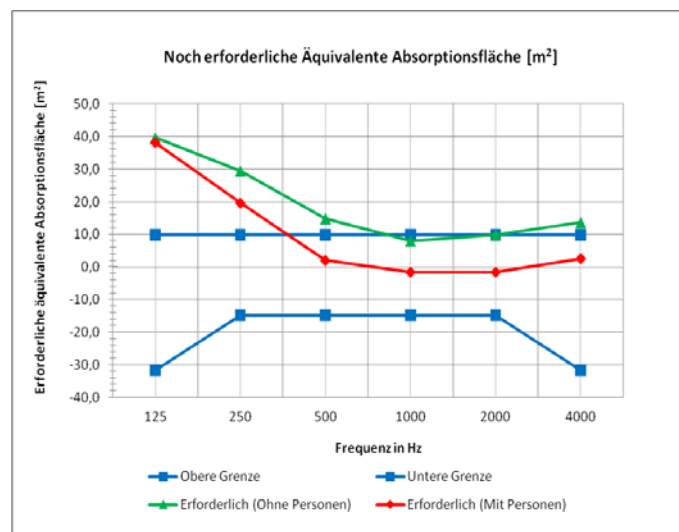
**Raum 2.05 (Neues Gebäude NB)**



Grundgeräuschpegel [dBA]	32,3
Feuchtigkeit	54 %
Temperatur	28 °C
Messpegel [dB SPL]	90
Anzahl Schüler	30
L x B x H [m]	9,2 x 7,45 x 3,05
Volumen [m <sup>3</sup> ]	209,04
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,57 s



**Abb. 210:** Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)



**Abb. 211:** Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 100: Raumakustische Gütemaße

Raum 2.05 (leer)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,76	1,15	0,77	0,66	0,69	0,75	0,73
	$\sigma$	0,131	0,075	0,025	0,013	0,011	0,014	0,016
	max	2,06	1,33	0,81	0,69	0,71	0,77	0,77
	min	1,59	1,01	0,72	0,64	0,67	0,72	0,70
M1Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,01	1,17	0,76	0,67	0,68	0,72	0,71
	$\sigma$	0,036	0,037	0,029	0,017	0,009	0,005	0,009
M2Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,77	1,11	0,77	0,66	0,69	0,75	0,72
	$\sigma$	0,019	0,024	0,021	0,017	0,009	0,008	0,009
M3Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,79	1,02	0,75	0,66	0,68	0,75	0,74
	$\sigma$	0,012	0,009	0,019	0,000	0,005	0,012	0,012
M4Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,88	1,20	0,80	0,67	0,70	0,76	0,75
	$\sigma$	0,014	0,019	0,009	0,000	0,005	0,012	0,012
M1Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,71	1,11	0,76	0,67	0,69	0,74	0,74
	$\sigma$	0,031	0,025	0,012	0,012	0,005	0,008	0,000
M2Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,63	1,17	0,77	0,66	0,69	0,76	0,74
	$\sigma$	0,033	0,021	0,012	0,000	0,005	0,005	0,005
M3Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,61	1,16	0,74	0,65	0,68	0,75	0,74
	$\sigma$	0,009	0,017	0,012	0,005	0,000	0,008	0,005
M4Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,66	1,26	0,79	0,67	0,69	0,74	0,74
	$\sigma$	0,050	0,073	0,012	0,012	0,008	0,008	0,005
	<b>EDT[s]</b>	1,33	0,88	0,73	0,62	0,62	0,64	0,61
	$\sigma$	0,15	0,11	0,06	0,05	0,00	0,06	0,05
	max	1,60	1,06	0,87	0,69	0,71	0,71	0,68
	min	1,06	0,69	0,60	0,53	0,54	0,49	0,49
	<b>C50[dB]</b>	0,08	2,83	3,24	4,40	5,67	5,63	5,93
	$\sigma$	2,33	1,38	1,06	0,78	1,24	1,43	1,38
	max	4,20	5,30	5,50	5,80	8,40	9,40	9,60
	min	-4,20	-0,30	1,20	2,80	4,40	4,10	4,40
	<b>D50[%]</b>	49,75	65,92	67,46	73,29	78,21	78,00	79,21
	$\sigma$	13,23	7,76	5,31	3,61	4,30	4,87	4,44
	max	72,00	80,00	78,00	79,00	87,00	90,00	90,00
	min	26,00	48,00	56,00	66,00	74,00	72,00	73,00
	<b>STI</b>	0,70						
	$\sigma$	0,02						
	max	0,73						
	min	0,68						
	<b>RASTI</b>	0,71						
	$\sigma$	0,02						
	max	0,75						
	min	0,69						
	<b>%Alcons</b>	3,98						
	$\sigma$	0,32						
	max	4,40						
	min	3,20						

Tabelle 101: : Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen		125	250	500	1000	2000	4000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,63	0,86	0,59	0,56	0,56	0,60
	$\sigma$	0,11	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01
	max	1,89	0,96	0,62	0,58	0,57	0,61
	min	1,48	0,78	0,56	0,54	0,55	0,58
	Max - T <sub>30</sub>	0,26	0,10	0,03	0,02	0,02	0,02
	T <sub>30</sub> - min	0,14	0,08	0,03	0,02	0,01	0,02

### Raum 2.13 (Neues Gebäude NB)



#### Beschreibung:

Raum 2.13 (Neues Gebäude) ist ein normaler Klassenraum (7,83 x 8,26 x 3,2 m) für 20 Schüler mit normalem Putz und Parkettboden (Holz). Über der Tür war eine Fensterfront angebracht

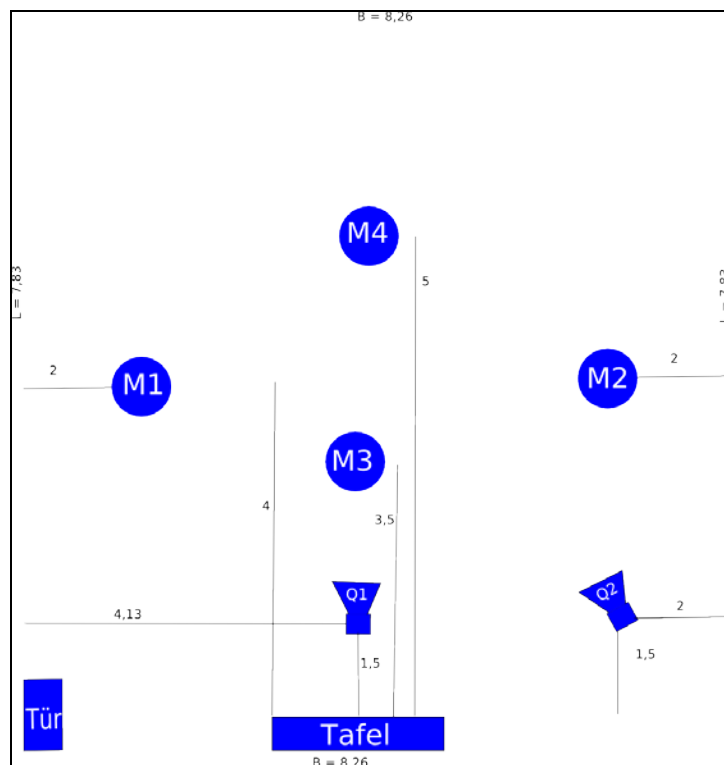


Abb. 212: Mikrofon- und Lautsprecherpositionen. Entfernung Tafel-Wand beträgt 27 cm.

### Raum 2.13 (Neues Gebäude NB)



Grundgeräuschpegel [dBA]	30,4
Feuchtigkeit	55 %
Temperatur	28 °C
Messpegel [dB SPL]	80
Anzahl Schüler	20
L x B x H [m]	7,83 x 8,26 x 3,2
Volumen [m <sup>3</sup> ]	206,96
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,57 s

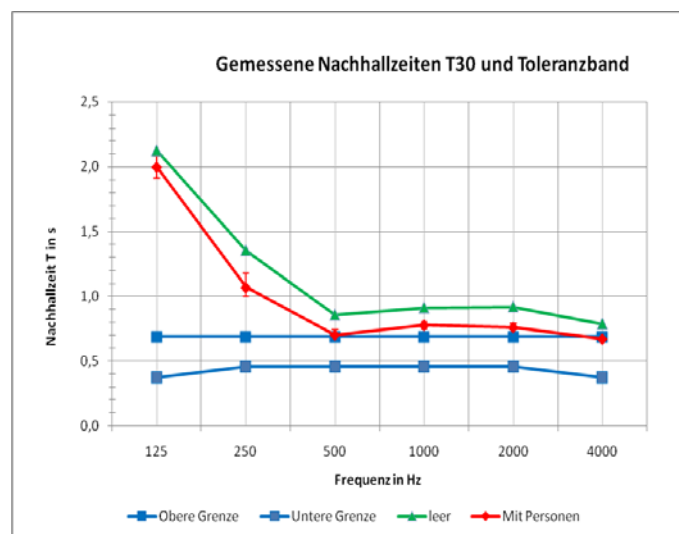


Abb. 213: Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)

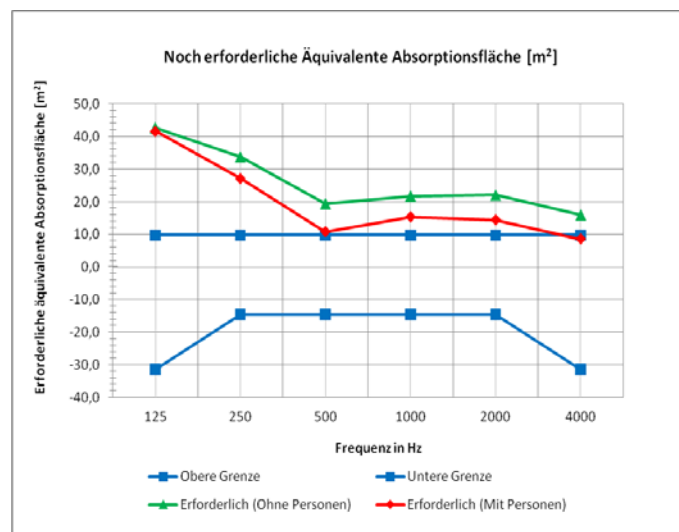


Abb. 214: Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 102: Raumakustische Gütemaße

Raum 2.13 (leer)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,13	1,35	0,86	0,91	0,92	0,79	0,74
	$\sigma$	0,054	0,084	0,025	0,020	0,018	0,008	0,013
	max	2,22	1,53	0,92	0,95	0,96	0,80	0,76
	min	2,03	1,24	0,82	0,87	0,89	0,77	0,71
M1Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,08	1,43	0,86	0,94	0,95	0,78	0,74
	$\sigma$	0,014	0,019	0,017	0,012	0,009	0,005	0,005
M2Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,21	1,38	0,86	0,90	0,90	0,78	0,73
	$\sigma$	0,012	0,009	0,009	0,008	0,005	0,000	0,005
M3Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,17	1,25	0,83	0,88	0,90	0,78	0,71
	$\sigma$	0,000	0,005	0,008	0,014	0,000	0,005	0,005
M4Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,03	1,40	0,91	0,91	0,91	0,79	0,74
	$\sigma$	0,000	0,008	0,008	0,009	0,009	0,000	0,005
M1Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,14	1,50	0,84	0,93	0,92	0,79	0,76
	$\sigma$	0,038	0,024	0,008	0,005	0,005	0,005	0,005
M2Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,14	1,32	0,85	0,92	0,91	0,78	0,74
	$\sigma$	0,024	0,005	0,005	0,014	0,005	0,005	0,005
M3Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,11	1,29	0,84	0,89	0,91	0,79	0,74
	$\sigma$	0,009	0,017	0,005	0,005	0,014	0,005	0,005
M4Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,12	1,26	0,86	0,92	0,94	0,80	0,74
	$\sigma$	0,008	0,014	0,009	0,008	0,008	0,000	0,000
	<b>EDT[s]</b>	1,72	1,06	0,83	0,92	0,89	0,71	0,61
	$\sigma$	0,16	0,14	0,07	0,03	0,00	0,03	0,05
	max	1,99	1,30	0,97	1,00	1,00	0,76	0,69
	min	1,50	0,82	0,70	0,87	0,76	0,63	0,52
	<b>C50[dB]</b>	-3,48	1,04	2,63	2,27	3,18	4,95	5,79
	$\sigma$	1,70	1,34	0,89	0,64	1,56	1,26	1,41
	max	-0,60	4,40	4,20	3,90	6,10	8,00	9,00
	min	-6,00	-0,20	1,00	1,50	1,10	3,50	4,20
	<b>D50[%]</b>	30,83	56,42	64,58	62,67	66,96	75,46	78,63
	$\sigma$	7,93	7,44	5,31	3,41	7,54	4,70	4,91
	max	46,00	75,00	74,00	71,00	81,00	86,00	89,00
	min	20,00	48,00	54,00	58,00	56,00	69,00	73,00
	<b>STI</b>	0,64						
	$\sigma$	0,02						
	max	0,70						
	min	0,62						
	<b>RASTI</b>	0,66						
	$\sigma$	0,03						
	max	0,72						
	min	0,62						
	<b>%Alcons</b>	5,23						
	$\sigma$	0,68						
	max	6,10						
	min	3,70						

Tabelle 103: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen		125	250	500	1000	2000	4000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,00	1,07	0,70	0,77	0,76	0,67
	$\sigma$	0,05	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01
	max	2,08	1,17	0,74	0,80	0,79	0,68
	min	1,91	1,00	0,68	0,75	0,74	0,66
	Max - T <sub>30</sub>	0,08	0,11	0,04	0,03	0,03	0,01
	T <sub>30</sub> - min	0,08	0,07	0,02	0,03	0,02	0,01

### Raum 2.06 (Neues Gebäude NB)



#### Beschreibung:

Raum 2.06 (Neues Gebäude) ist ein normaler Klassenraum (9,3 x 7,5 x 3,05 m) für 32 Schüler mit normalem Putz und Kunststoff-Bodenbelag.

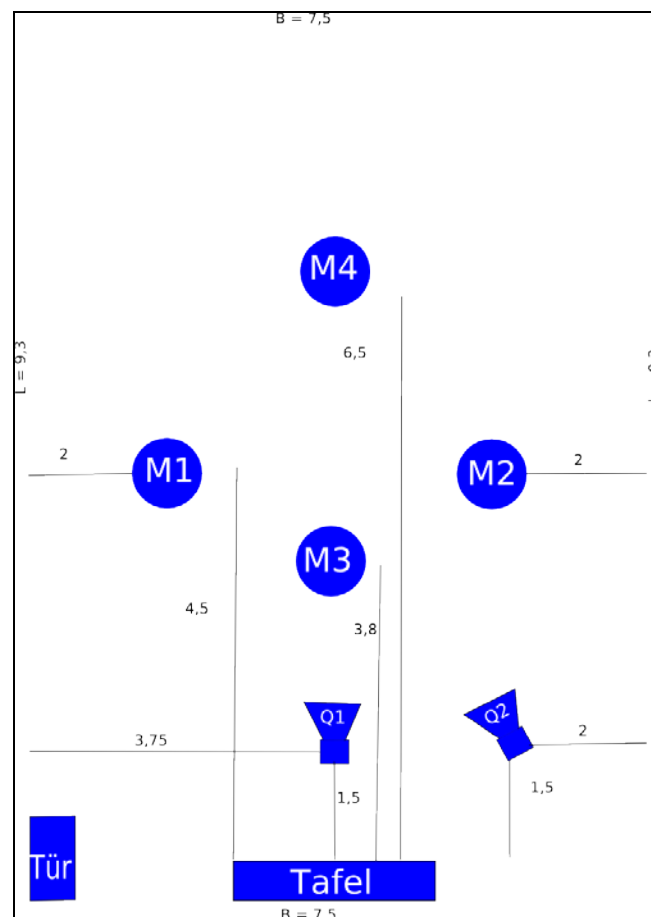


Abb. 215: Mikrofon- und Lautsprecherpositionen. Entfernung Tafel-Wand beträgt 28 cm.

## Raum 2.06 (Neues Gebäude NB)



Grundgeräuschpegel [dBA]	32,5
Feuchtigkeit	55 %
Temperatur	27 °C
Messpegel [dB SPL]	80
Anzahl Schüler	32
L x B x H [m]	9,3 x 7,5 x 3,05
Volumen [m <sup>3</sup> ]	212,73
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,57 s

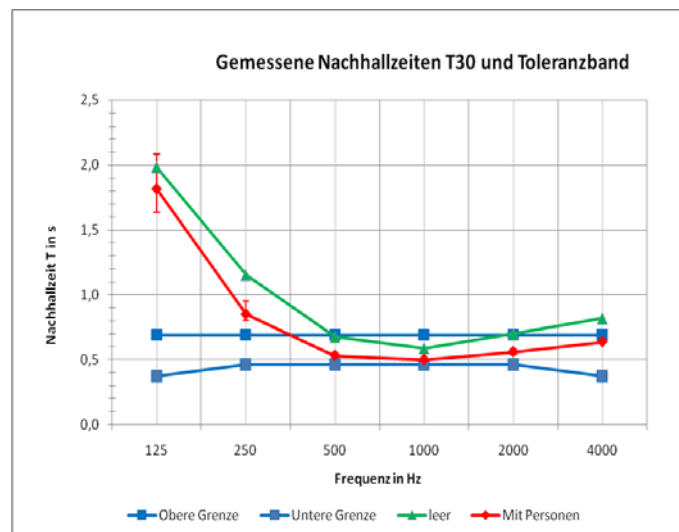


Abb. 216: Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)

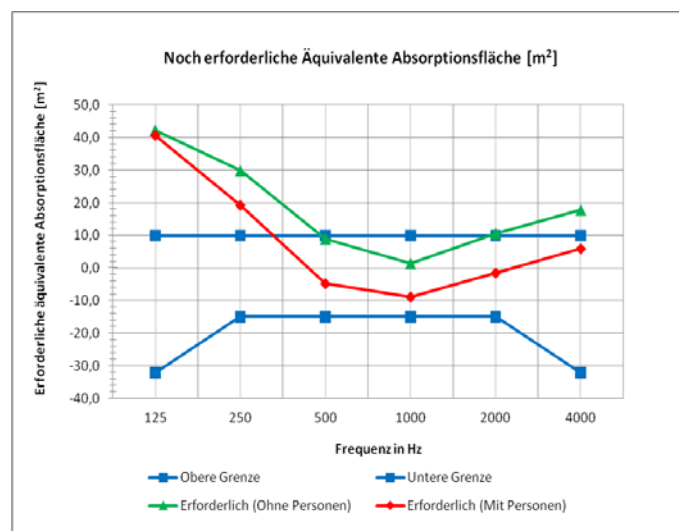


Abb. 217: Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)



Tabelle 104: Raumakustische Gütemaße

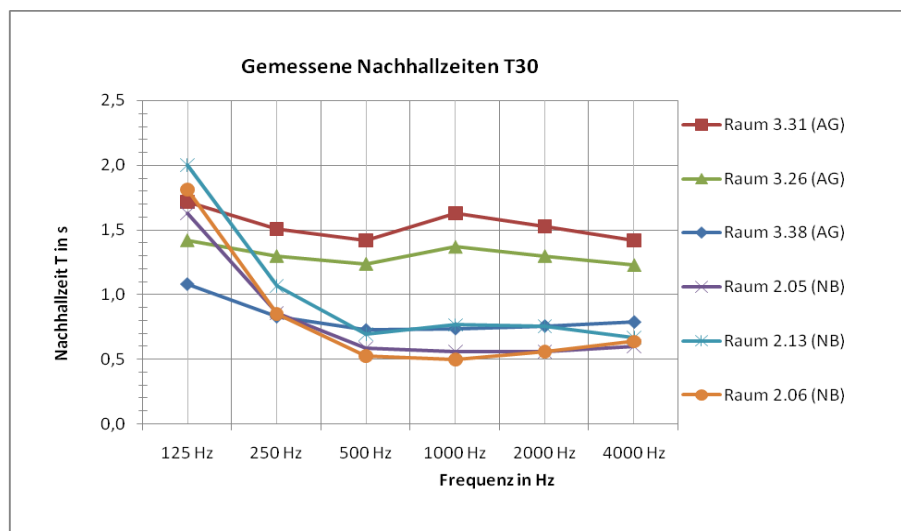
Raum 2.06 (leer)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,98	1,15	0,68	0,59	0,70	0,82	0,79
	$\sigma$	0,163	0,073	0,019	0,016	0,013	0,017	0,020
	max	2,31	1,35	0,71	0,62	0,73	0,86	0,82
	min	1,77	1,06	0,64	0,56	0,67	0,79	0,76
M1Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,77	1,23	0,66	0,61	0,70	0,80	0,76
	$\sigma$	0,005	0,064	0,005	0,009	0,005	0,000	0,000
M2Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,81	1,08	0,70	0,59	0,70	0,80	0,77
	$\sigma$	0,005	0,012	0,008	0,005	0,005	0,005	0,008
M3Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,97	1,14	0,66	0,57	0,69	0,81	0,79
	$\sigma$	0,008	0,009	0,009	0,005	0,000	0,000	0,005
M4Q1	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,88	1,23	0,68	0,60	0,70	0,82	0,82
	$\sigma$	0,031	0,087	0,005	0,005	0,005	0,000	0,005
M1Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,97	1,11	0,65	0,56	0,72	0,85	0,81
	$\sigma$	0,017	0,005	0,008	0,000	0,005	0,012	0,008
M2Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,03	1,13	0,68	0,58	0,68	0,81	0,80
	$\sigma$	0,021	0,005	0,009	0,009	0,008	0,005	0,005
M3Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,29	1,08	0,70	0,59	0,70	0,84	0,80
	$\sigma$	0,016	0,014	0,005	0,000	0,000	0,005	0,009
M4Q2	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	2,15	1,23	0,69	0,60	0,71	0,83	0,81
	$\sigma$	0,033	0,008	0,009	0,005	0,009	0,005	0,005
	<b>EDT[s]</b>	1,52	0,99	0,63	0,52	0,65	0,70	0,62
	$\sigma$	0,21	0,11	0,04	0,03	0,00	0,03	0,02
	max	1,95	1,21	0,71	0,59	0,76	0,77	0,65
	min	1,26	0,80	0,58	0,46	0,56	0,67	0,59
	<b>C50[dB]</b>	-1,28	1,67	4,72	6,30	5,37	5,35	5,99
	$\sigma$	1,77	0,97	0,94	1,08	1,23	1,01	1,25
	max	1,20	3,00	6,50	8,30	7,60	7,80	8,50
	min	-5,50	0,00	3,30	4,90	3,90	4,50	4,30
	<b>D50[%]</b>	42,21	60,75	75,17	80,54	77,04	77,17	79,67
	$\sigma$	8,97	5,73	4,06	3,79	4,61	3,75	4,33
	max	55,00	70,00	83,00	88,00	85,00	86,00	88,00
	min	21,00	50,00	69,00	75,00	71,00	74,00	73,00
	<b>STI</b>	0,69						
	$\sigma$	0,02						
	max	0,73						
	min	0,67						
	<b>RASTI</b>	0,72						
	$\sigma$	0,02						
	max	0,76						
	min	0,69						
	<b>%Alcons</b>	4,06						
	$\sigma$	0,36						
	max	4,50						
	min	3,30						

Tabelle 105: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

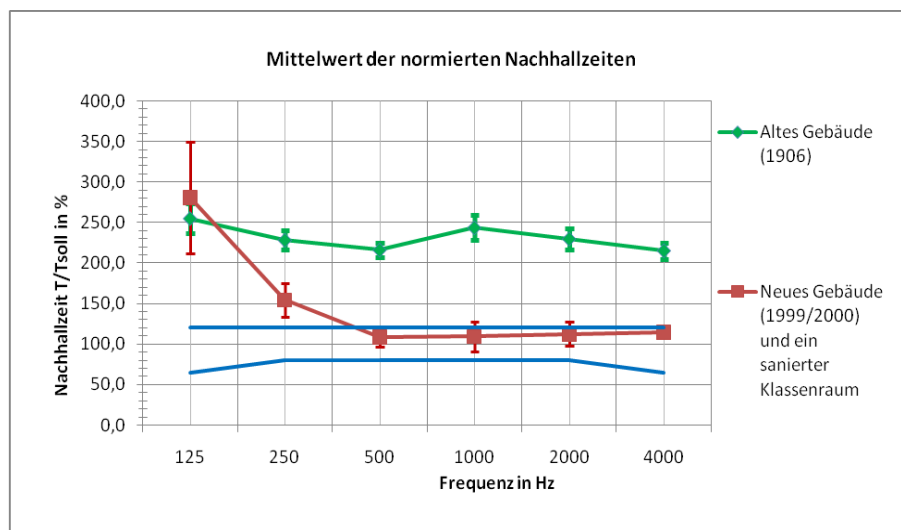
Mit Personen		125	250	500	1000	2000	4000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	1,81	0,85	0,53	0,50	0,56	0,64
	$\sigma$	0,14	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01
	max	2,09	0,95	0,55	0,52	0,58	0,66
	min	1,63	0,80	0,51	0,48	0,54	0,62
	Max - T <sub>30</sub>	0,27	0,10	0,02	0,02	0,02	0,02
	T <sub>30</sub> - min	0,18	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02

## 5.2.2. Zusammenfassung und Interpretation

Abb. 218 zeigt die Zusammenfassung der Nachhallzeitmessungen der Bundeshandelsakademie Grazbachgasse. Zu den hohen Frequenzen haben die Klassenräume des Neubaus eine deutlich niedrigere Nachhallzeit als die Klassenräume des Altbaus. Die Sanierung des Raums 3.38 (AG) hat dazu geführt, dass dieser die gleiche Nachhallzeit aufweist als die Klassenräume des Neubaus und sogar bei 125 Hz deutlich niedriger ist. Auch in der HAK-Grazbachgasse zeigen sich 2 Gruppen von Nachhallzeitverläufe: Gruppe A (mit konstantem Nachhallzeitverlauf über alle Frequenzen) und Gruppe B (Anstieg der Nachhallzeiten zu tiefen Frequenzen), ähnlich den Messergebnissen der Studie von Berliner Klassenräumen von Kirchner<sup>303</sup> (siehe Abb. 113 und 114, S. 121).



**Abb. 218:** Zusammenfassung der Nachhallzeitmessungen der Bundeshandelsakademie Grazbachgasse (Personen eingerechnet) (4 MP, 2 QP, N=24) (NB=Neues Gebäude, AG=Altes Gebäude). Raum 3.38 ist saniert.



**Abb. 219:** Auf die Sollnachhallzeit normierte Nachhallzeiten (Mittelwert und Standardabweichung) der Klassenräume und Toleranzband. (Werte: siehe Tabelle 108, 109 und 110) Bundeshandelsakademie Grazbachgasse. Raum 3.38 ist saniert(Personen vor Normierung eingerechnet).

<sup>303</sup> [KIRCHNER1].

Vergleicht man die Mittelwerte der Nachhallzeiten aus Tabelle 106 mit den Ergebnissen aus den Studien der Tabellen 32 und 33, so stellt man fest, dass die Klassenräume zu den aktuellen Studienergebnissen hohe Nachhallzeiten aufweisen. Raum 3.31 hat eine sehr hohe Nachhallzeit und nur Schick und Pekkarinen haben ausnahmsweise ähnlich hohe Werte gemessen.

**Tabelle 106:** Zusammenfassung aller Nachhallzeiten im besetzten Zustand (Personen eingerechnet) (AG=Altes Gebäude, NB=Neues Gebäude)

Raum	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	T30 Mittelwert [s]
Raum 3.38 (AG)	1,08	0,83	0,73	0,74	0,76	0,79	0,82
Raum 3.31 (AG)	1,72	1,51	1,42	1,63	1,53	1,42	1,54
Raum 3.26 (AG)	1,42	1,3	1,24	1,37	1,3	1,23	1,31
Raum 2.05 (NB)	1,63	0,86	0,59	0,56	0,56	0,6	0,80
Raum 2.13 (NB)	2	1,07	0,7	0,77	0,76	0,67	1,00
Raum 2.06 (NB)	1,81	0,85	0,53	0,5	0,56	0,64	0,82

Der Grundgeräuschpegel lag in allen Klassenräumen unter dem WHO-Grenzwert von 35 dB(A) (siehe Anhang B):

**Tabelle 107:** Grundgeräuschpegel der Klassenräume

Raum	Grundgeräuschpegel (dBA) (slow)
Raum 3.38 (AG)	33
Raum 3.31 (AG)	32,3
Raum 3.26 (AG)	33,2
Raum 2.05 (NB)	32,3
Raum 2.13 (NB)	30,4
Raum 2.06 (NB)	32,5

Laut Mackenzie<sup>304</sup> würde eine Nachhallzeitverbesserung von 0,7 s auf 0,4 s auch eine Grundgeräuschpegelminderung im unbesetzten Zustand von mindestens 4 dB(A) mit sich bringen (siehe Tabelle 12, S. 58).

Die Anzahl der Schüler in den Klassenräumen lag zwischen 20 und 32. Nach den Studienergebnissen von Shield (siehe Abb. 12, S. 22) liegt bei 18 Schülern der LAeq bei 60 dB(A) und der LA90 bei 50 dB(A) und für jeden weiteren Schüler ist mit einer Erhöhung des LAeq und des LA90 von 1 dB(A) zu rechnen. Somit kommt man auf einen LA90 von 52 bis 64 dB(A).

<sup>304</sup> [MACKENZIE].

**Tabelle 108:** Nachhallzeiten auf die Sollnachhallzeit normiert. (Personen vor Normierung eingerechnet)

Raum	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Raum 3.38 (AG)	1,69	1,30	1,14	1,16	1,19	1,23
Raum 3.31 (AG)	2,73	2,40	2,25	2,59	2,43	2,25
Raum 3.26 (AG)	2,37	2,17	2,07	2,28	2,17	2,05
Raum 2.05 (NB)	2,86	1,51	1,04	0,98	0,98	1,05
Raum 2.13 (NB)	3,51	1,88	1,23	1,35	1,33	1,18
Raum 2.06 (NB)	3,18	1,49	0,93	0,88	0,98	1,12

**Tabelle 109:** Mittelwert und Standardabweichung der normierten Nachhallzeiten des Alten Gebäudes (Personen vor Normierung eingerechnet) (ohne Raum 3.38)

<b>Mittelwert (AG)</b>	2,55	2,28	2,16	2,44	2,30	2,15
<b><math>\sigma</math></b>	0,18	0,12	0,09	0,15	0,13	0,10

**Tabelle 110:** Mittelwert und Standardabweichung der normierten Nachhallzeiten des Neuen Gebäudes (Personen vor Normierung eingerechnet) (mit Raum 3.38)

<b>Mittelwert (NB)</b>	2,81	1,54	1,08	1,09	1,12	1,15
<b><math>\sigma</math></b>	0,69	0,21	0,11	0,18	0,15	0,07

Im Folgenden soll nun untersucht werden, um wie viel sich der Lärmpegel und der Sprachaufwand des Lehrers oder der Lehrerin nach einer akustischen Sanierung senken wird. Es wurden die Erkenntnisse aus den Studien von Oberdörster und aus den Studien über den Lombard-Effekt (siehe Kapitel 2.2. und Kapitel 3.3.) angewandt.

**Tabelle 111:** Minderung des Lärmpegels im Unterricht durch raumakustische Sanierung. T30 ist der Mittelwert der Nachhallzeiten von 125 Hz bis 4000 Hz (Personen eingerechnet). A1 ist die äquivalente Absorptionsfläche des unbehandelten Raumes.  $\Delta A$  ist die zusätzlich einzubringende äquivalente Absorptionsfläche um die Sollnachhallzeit zu erreichen.  $\Delta L$  entspricht der physikalischen Senkung des Lärmpegels nach DIN 18041. Formeln siehe Kapitel 2.2.1.

Raum	T30 Mittelwert [s]	Raumvolumen [m <sup>3</sup> ]	Sollnachhallzeit [s]	A1 [m <sup>2</sup> ]	$\Delta A$ [m <sup>2</sup> ]	$\Delta L$ [dB] (physikalisch)
Raum 3.38 (AG)	0,82	350,78	0,64	68,73	19,51	1,1
Raum 3.31 (AG)	1,54	324,35	0,63	33,95	48,94	3,9
Raum 3.26 (AG)	1,31	253,04	0,6	31,10	36,80	3,4
Raum 2.05 (NB)	0,80	209,04	0,57	42,07	16,98	1,5
Raum 2.13 (NB)	1,00	206,96	0,57	33,49	24,97	2,4
Raum 2.06 (NB)	0,82	212,73	0,57	42,02	18,06	1,6

**Tabelle 112:** Physikalische nach DIN 18041 und tatsächliche Lärmpegelminderung  $\Delta L$  nach [OBERDOERSTER1] und [LAZARUS1] durch Reduzierung der Nachhallzeit auf die Sollnachhallzeit. (siehe Kapitel 2.2.)  $\Delta L_{\text{Lehrerstimme}}$  ist die Minderung des Sprachpegels von Lehrer/innen durch den Lombard-Effekt nach [SATO] aus dem Jahr 2008 (siehe Kapitel 3.3.)

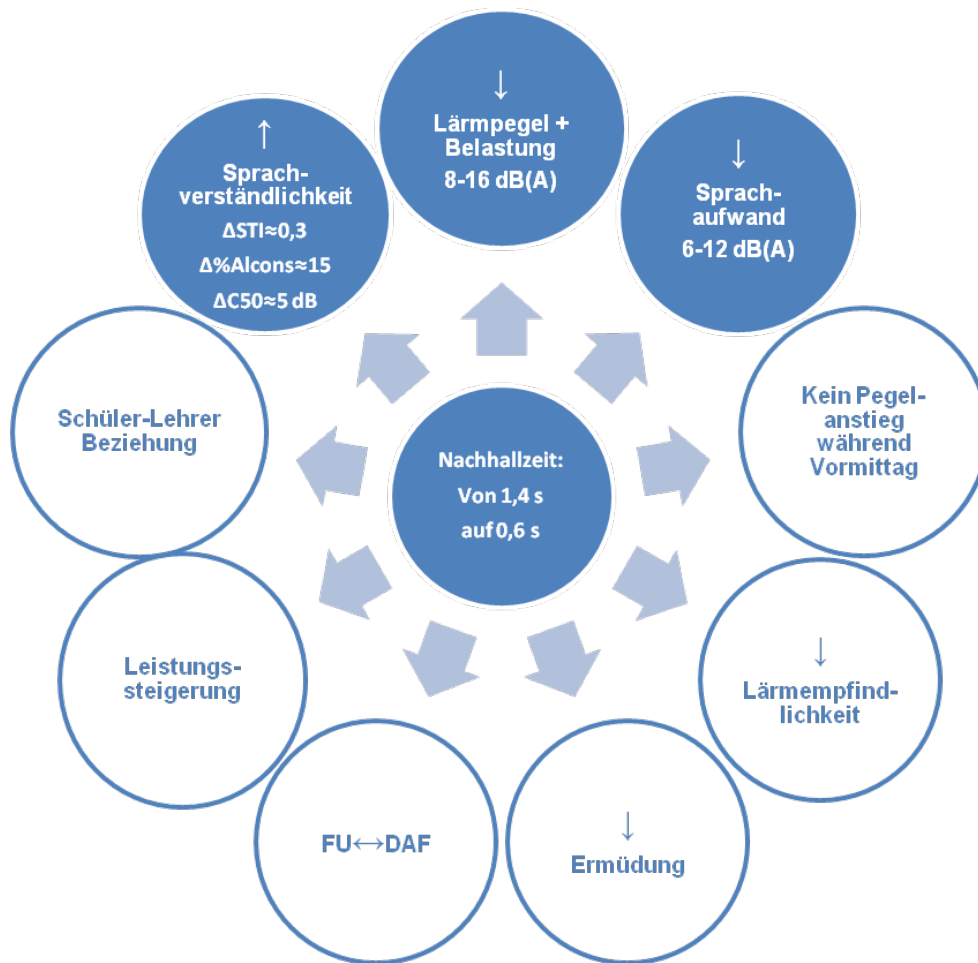
Raum	$\Delta L$ [dB] (physikalisch)	$\Delta L$ [dBA] (tatsächlich)		$\Delta L_{\text{Lehrerstimme}}$ [dBA] (0,72 dB pro $\text{dB}_{\text{LNA}}$ )	
		1dBA pro 0,1 s	2dBA pro 0,1 s	Minimal	Maximal
Raum 3.38 (AG)	1,1	1,8	3,6	1,3	2,6
Raum 3.31 (AG)	3,9	9,1	18,2	6,5	13,1
Raum 3.26 (AG)	3,4	7,1	14,2	5,1	10,2
Raum 2.05 (NB)	1,5	2,3	4,6	1,7	3,3
Raum 2.13 (NB)	2,4	4,3	8,5	3,1	6,1
Raum 2.06 (NB)	1,6	2,5	4,9	1,8	3,5

Tabelle 112 zeigt, dass durch eine akustische Sanierung Lärmpegelsenkungen im Unterricht zu erwarten sind, außerdem senkt sich der Stimmaufwand des Lehrers oder der Lehrerin um mindestens 5 dB(A) im Alten Gebäude (unsanierte Klassenräume), was fast einer Sprechanstrengungsstufe nach ISO 9921 entspricht (siehe Tabelle 31). Selbstverständlich können diese Pegelsenkungen durch eine Sanierung des Klassenraums nicht garantiert werden, da der Lärmpegel von vielen Faktoren im Unterricht abhängig ist: So gibt es Unterschiede im Lärmpegel zwischen den Schulen (siehe Abb. 11, S. 22) und den Lehrern (Abb. 13, S. 22), allerdings nicht zwischen den Schulzweigen (Tabelle 5, S. 23), ausserdem hat der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Luft und die Anzahl der Schüler im Klassenraum auch Einfluss auf den Lärmpegel (siehe Abb. 33, S. 37).

Für die Berechnung der Sprachpegelreduzierung wurde die Studie von Sato<sup>305</sup> benutzt, da diese Studie die aktuellste und umfangreichste Studie über den Lombard-Effekt bei Lehrer/innen war, die vorlag. Andere Studien geben eine höhere Steigung des Sprechpegels an (siehe Kapitel 3.3.).

Zusammenfassend kann die raumakustische Sanierung der nicht sanierten Klassenräume des Alten Gebäudes auf die Sollnachhallzeit folgende Effekte mit sich bringen:

<sup>305</sup> [SATO].



**Abb. 220:** Positive Effekte durch Sanierung der Klassenräume 3.31 und 3.26 des Alten Gebäudes ( $T=1,4$  s) auf die Sollnachhallzeit ( $T=0,6$  s). Einige Effekte, die transparent dargestellt sind, wurden in den Studien bei einer Reduzierung der Nachhallzeit auf unter 0,5 s beobachtet.

- Reduzierung des Lärmpegels (Arbeits- und Grundgeräuschpegel) im Klassenraum um 8 bis 16 dB(A). Reduzierung der Lärmbelastung der Lehrerin oder des Lehrers sowie Reduzierung der subjektiven Lärmbelastung der Schüler und Schülerinnen. (Kapitel 2.2.1)
- Zunahme der Sprachverständlichkeit (siehe Kapitel 3.2.1). Laut der Vorhersage von Oberdörster wird durch eine Reduzierung der Nachhallzeit von 1,4 s auf 0,6 s der STI-Wert (siehe Abb.94 S. 101) von 0,4 auf 0,7 verbessert. Laut Farrel-Becker-Formel kann sich der %Alcons-Wert von 19,5 auf 3,8 verbessern (S.103). Laut dem Vorhersagemodell von Bradley (siehe S. 96 und S. 97) kann sich der C50-Wert von -1,9 auf 3,3 dB verbessern. Die Verbesserung der subjektiven Sprachverständlichkeit ist stark abhängig vom Alter und von der Hörfähigkeit der Schüler, sowie vom SNR im Klassenraum. (siehe Kapitel 3.2.2, siehe auch S. 37)
- Reduzierung des Sprachaufwands des Lehrers oder der Lehrerin um 6 bis 12 dB(A). (siehe Kapitel 3.3.).

Die folgenden Effekte können durch eine Sanierung nicht garantiert werden da diese in den Studien erst bei einer Reduzierung der Nachhallzeit auf unter 0,5 s beobachtet wurden. Die

Sollnachhallzeit der Klassenräume laut DIN 18041 liegt jedoch bei 0,6 s. Da der Unterschied der gemessenen Nachhallzeit zu der Sollnachhallzeit jedoch sehr groß ist, ist anzunehmen dass diese Effekte durch eine Sanierung dennoch auftreten.

- Die Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels für nacheinander folgende Unterrichtsstunden über den Vormittag ist deutlich reduziert oder bleibt aus. (Abb. 25 und 26 S.30 bis S.31; Tabelle 13 und 14 S. 60)
- Reduzierung der Lärmempfindlichkeit des Lehrers oder der Lehrerin: Reduzierung der Steigung der Herzfrequenz in Abhängigkeit vom Lärmpegel im Klassenraum. (Reduzierung der Herzfrequenzreaktion auf den Stressor „Lärm“) (Abb. 50, S. 64)
- Ausgleich zwischen Ermüdungs- und Aktivierungsphasen (Herzfrequenz-Trendwerte) der Lehrerin oder des Lehrers (siehe Kapitel 2.2.) (Abb. 48 und Abb. 49 S. 63)
- Reduzierung oder Ausbleiben der Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels bei Wechsel zu differenzierten Arbeitsformen (Abb. 19, 20, 21 S. 27 und S. 28)
- Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Schüler (siehe Kapitel 2.2.2.)
- Verbesserung der Lehrer-Schüler-Beziehung („kommunikative Klima“) (siehe S. 65 bis 68)

## 5.3. Bundesbildungsanstalt für Kindergartenpädagogik (Grottenhofstrasse)

### 5.3.1. Messungen

#### Raum EG 95



#### Beschreibung:

Raum EG 95 ist ein normaler Klassenraum (10,65 x 5,05 x 2,88 m) für 26 Schüler mit normalem Putz und Parkettboden (Holz).

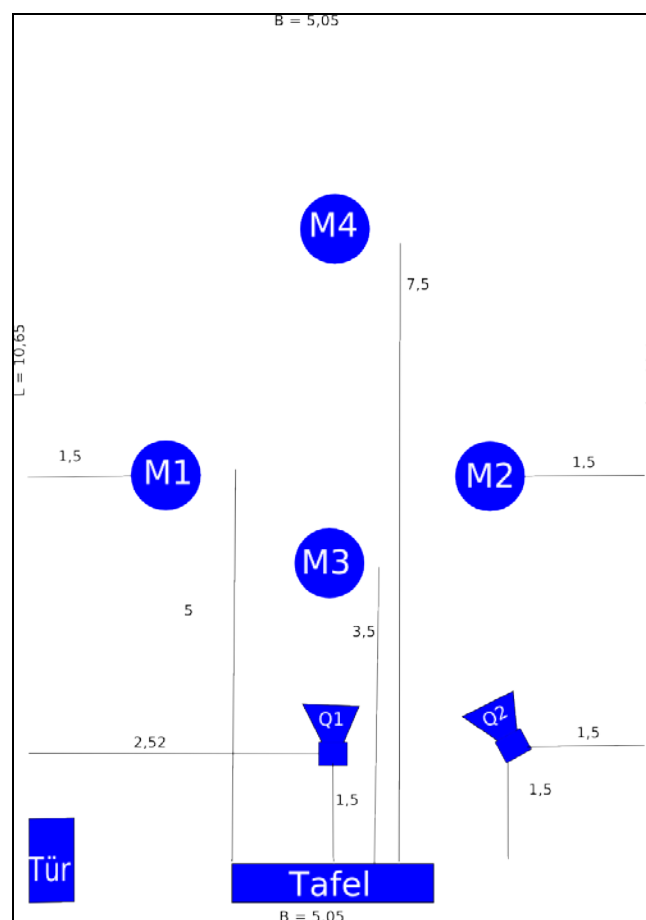


Abb. 221: Mikrofon- und Lautsprecherpositionen. Entfernung Tafel-Wand beträgt 3 cm.



### Raum EG 95



Grundgeräuschpegel [dBA]	29
Feuchtigkeit	58 %
Temperatur	27 °C
Messpegel [dB SPL]	85
Anzahl Schüler	26
L x B x H [m]	10,65 x 5,05 x 2,88
Volumen [m <sup>3</sup> ]	154,89
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,53 s

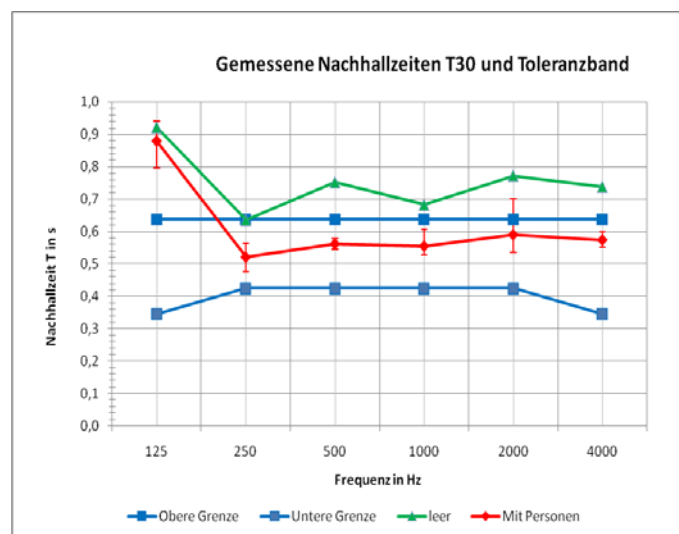


Abb. 222: Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)

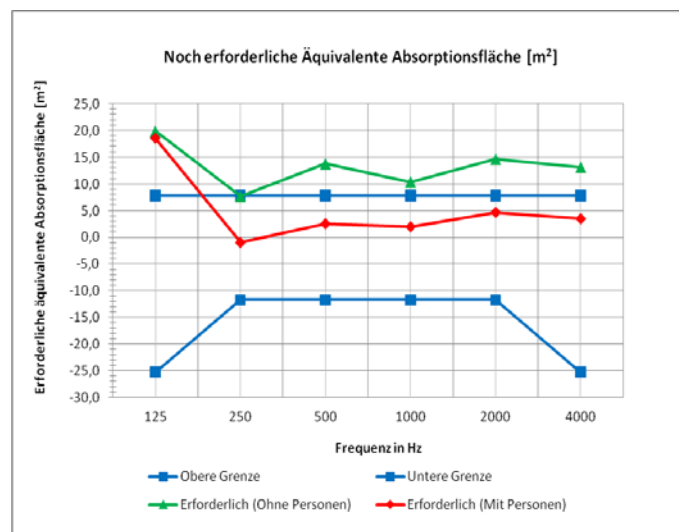


Abb. 223: Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 113: Raumakustische Gütemaße

Raum EG 95 (leer)								
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
	<b>T<sub>30</sub>[s], gemittelt</b>	0,92	0,63	0,75	0,68	0,77	0,74	0,67
	$\sigma$	0,050	0,034	0,015	0,034	0,077	0,024	0,015
	max	0,99	0,70	0,78	0,76	0,97	0,78	0,72
	min	0,83	0,57	0,72	0,64	0,68	0,70	0,65
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,92	0,64	0,76	0,76	0,96	0,78	0,66
	$\sigma$	0,000	0,008	0,008	0,005	0,008	0,005	0,005
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,88	0,61	0,76	0,69	0,77	0,74	0,68
	$\sigma$	0,005	0,005	0,014	0,005	0,005	0,000	0,005
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,98	0,59	0,77	0,67	0,76	0,75	0,66
	$\sigma$	0,000	0,012	0,008	0,009	0,008	0,005	0,005
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,97	0,66	0,76	0,70	0,79	0,76	0,68
	$\sigma$	0,005	0,005	0,012	0,005	0,014	0,012	0,005
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,84	0,59	0,75	0,66	0,75	0,73	0,68
	$\sigma$	0,012	0,022	0,008	0,016	0,021	0,012	0,009
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,90	0,65	0,73	0,66	0,73	0,73	0,68
	$\sigma$	0,005	0,012	0,008	0,005	0,017	0,019	0,029
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,90	0,65	0,74	0,65	0,72	0,71	0,67
	$\sigma$	0,005	0,012	0,005	0,005	0,005	0,005	0,008
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,99	0,69	0,74	0,65	0,70	0,71	0,67
	$\sigma$	0,005	0,008	0,008	0,005	0,012	0,009	0,012
	<b>EDT[s]</b>	0,72	0,46	0,54	0,47	0,54	0,58	0,49
	$\sigma$	0,18	0,10	0,13	0,07	0,00	0,07	0,08
	max	1,13	0,64	0,69	0,60	0,68	0,66	0,58
	min	0,53	0,27	0,28	0,36	0,31	0,42	0,32
	<b>C50[dB]</b>	1,05	5,55	5,92	6,09	5,43	5,07	5,96
	$\sigma$	2,50	2,13	1,81	1,24	1,87	1,23	1,38
	max	4,90	9,80	9,10	8,70	9,50	7,30	8,60
	min	-2,00	1,70	2,70	3,50	2,50	3,10	3,20
	<b>D50[%]</b>	55,17	77,08	78,96	79,96	76,83	76,00	79,21
	$\sigma$	13,64	8,95	6,66	4,57	6,96	4,98	4,98
	max	76,00	91,00	89,00	88,00	90,00	84,00	88,00
	min	38,00	58,00	65,00	69,00	64,00	67,00	68,00
	<b>STI</b>	0,75						
	$\sigma$	0,03						
	max	0,81						
	min	0,70						
	<b>RASTI</b>	0,76						
	$\sigma$	0,05						
	max	0,84						
	min	0,70						
	<b>%Alcons</b>	2,98						
	$\sigma$	0,50						
	max	3,80						
	min	2,10						

Tabelle 114: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

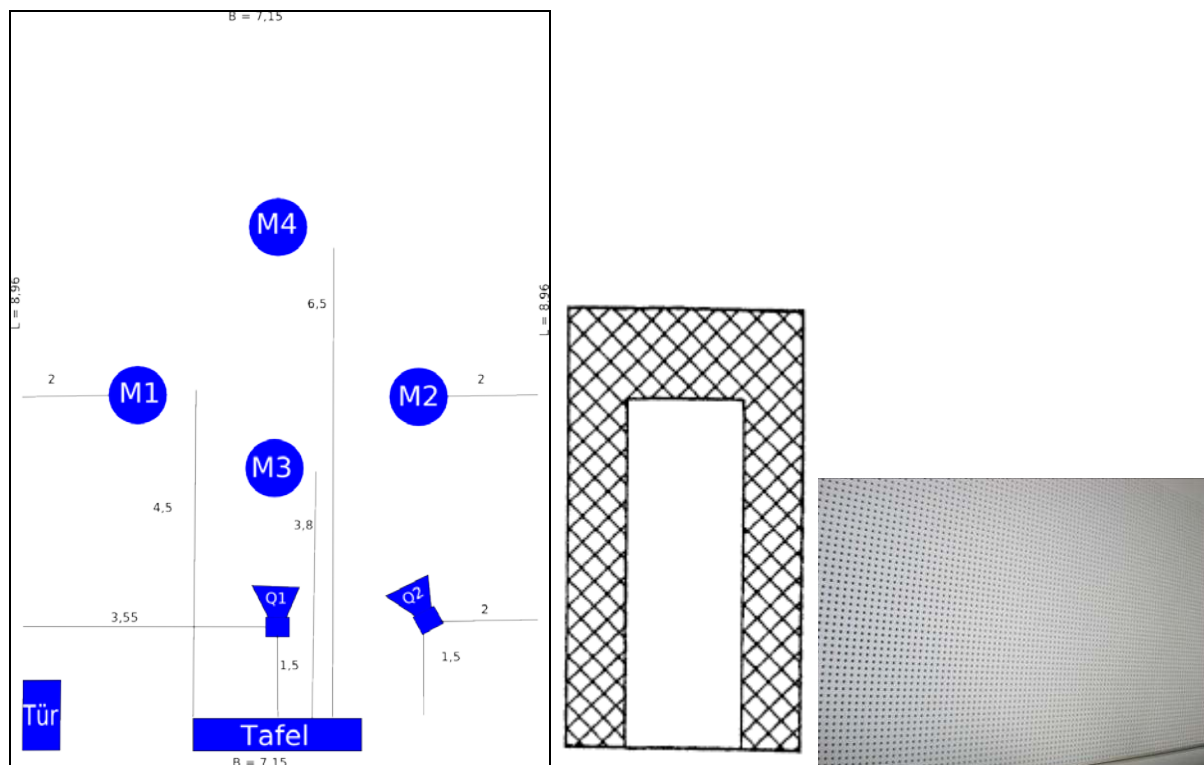
Mit Personen							
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
	<b>T<sub>30</sub>[s]</b>	0,88	0,52	0,56	0,55	0,59	0,57
	$\sigma$	0,05	0,02	0,01	0,02	0,04	0,01
	max	0,94	0,56	0,58	0,61	0,70	0,60
	min	0,80	0,48	0,54	0,53	0,54	0,55
	Max - T <sub>30</sub>	0,06	0,04	0,02	0,05	0,11	0,03
	T <sub>30</sub> - min	0,08	0,04	0,02	0,03	0,05	0,02

## Raum EG 04



### Beschreibung:

Raum EG 04 ist ein normaler Klassenraum (8,96 x 7,15 x 3 m) für 31 Schüler mit normalem Putz und Parkettboden (Holz). Die Decke war saniert (Akustikdecke). Die Anordnung der Akustikdecke entsprach dem Vorschlag der DIN 18041 für die Deckenanordnung (siehe Abbildungen).



**Abb. 224:** Links: Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (Tafel-Wand-Entfernung war 12 cm). Mitte: Anordnung der Akustikdecke (Deckenuntersicht) im Raum nach einer Abbildung der DIN 18041. Rechts: Abbildung eines Abschnitts der Akustikdecke

### Raum EG 04



Grundgeräuschpegel [dBA]	30,6
Feuchtigkeit	65 %
Temperatur	26 °C
Messpegel [dB SPL]	85
Anzahl Schüler	31
L x B x H [m]	8,96 x 7,15 x 3
Volumen [m <sup>3</sup> ]	192,19
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,56 s

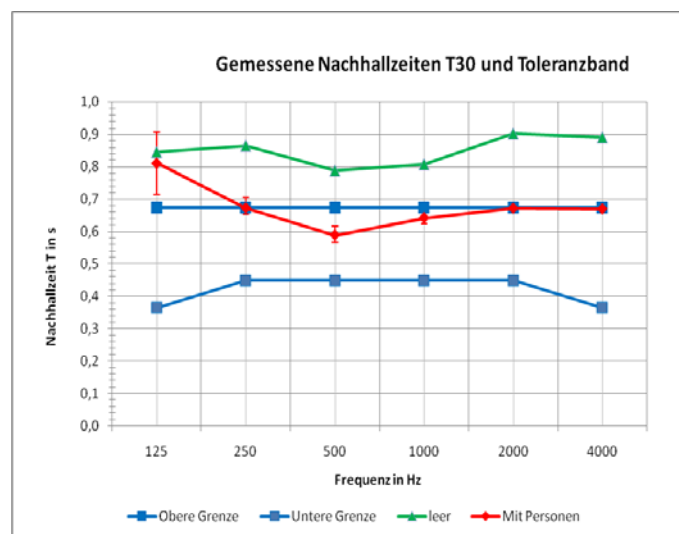


Abb. 225: Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)

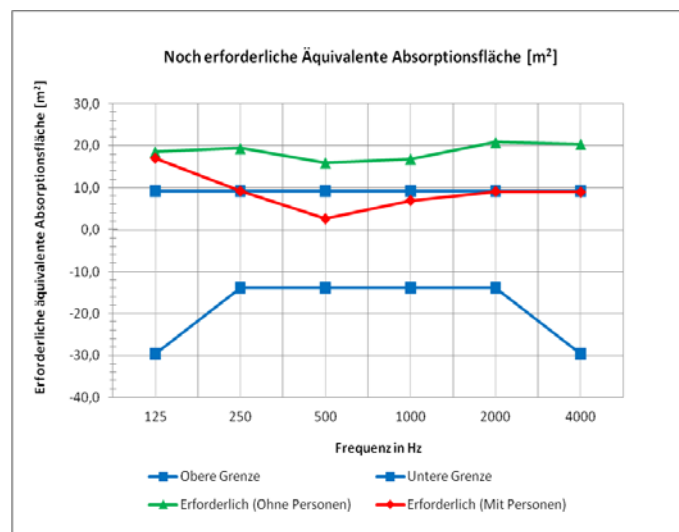


Abb. 226: Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 115: Raumakustische Gütemaße

Raum EG 04 (leer)								
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
	<b>T<sub>30</sub>[s], gemittelt</b>	0,85	0,87	0,79	0,81	0,90	0,89	0,79
	$\sigma$	0,053	0,022	0,025	0,017	0,012	0,009	0,008
	max	0,95	0,92	0,84	0,84	0,92	0,91	0,80
	min	0,74	0,83	0,75	0,78	0,88	0,87	0,77
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,82	0,87	0,83	0,81	0,90	0,88	0,78
	$\sigma$	0,016	0,008	0,008	0,024	0,008	0,005	0,005
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,83	0,87	0,80	0,82	0,88	0,89	0,78
	$\sigma$	0,000	0,005	0,021	0,009	0,005	0,005	0,005
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,83	0,89	0,79	0,83	0,91	0,88	0,78
	$\sigma$	0,009	0,016	0,008	0,012	0,009	0,005	0,005
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,94	0,84	0,77	0,80	0,89	0,90	0,79
	$\sigma$	0,005	0,009	0,012	0,005	0,005	0,005	0,000
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,85	0,86	0,75	0,80	0,90	0,89	0,79
	$\sigma$	0,000	0,017	0,005	0,005	0,012	0,012	0,005
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,88	0,87	0,81	0,82	0,92	0,89	0,79
	$\sigma$	0,009	0,036	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,75	0,85	0,78	0,81	0,91	0,90	0,79
	$\sigma$	0,014	0,016	0,008	0,009	0,005	0,005	0,005
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,87	0,86	0,77	0,78	0,90	0,90	0,79
	$\sigma$	0,005	0,000	0,008	0,005	0,005	0,005	0,012
	<b>EDT[s]</b>	0,59	0,70	0,77	0,78	0,91	0,84	0,73
	$\sigma$	0,09	0,07	0,13	0,06	0,00	0,03	0,02
	max	0,79	0,86	0,97	0,88	0,98	0,90	0,78
	min	0,48	0,57	0,58	0,63	0,82	0,79	0,70
	<b>C50[dB]</b>	4,11	2,86	2,79	3,50	2,70	3,28	3,98
	$\sigma$	1,85	1,27	1,17	0,72	1,15	0,73	0,73
	max	6,80	4,10	5,60	5,10	4,90	4,30	5,20
	min	0,90	-0,30	1,00	2,40	0,80	1,90	2,90
	<b>D50[%]</b>	71,67	65,13	65,46	69,04	64,79	67,96	71,29
	$\sigma$	9,50	6,86	6,20	3,66	5,99	3,55	3,43
	max	86,00	73,00	79,00	77,00	76,00	73,00	77,00
	min	56,00	48,00	55,00	63,00	54,00	61,00	66,00
	<b>STI</b>	0,68						
	$\sigma$	0,01						
	max	0,69						
	min	0,66						
	<b>RASTI</b>	0,66						
	$\sigma$	0,02						
	max	0,69						
	min	0,63						
	<b>%Alcons</b>	4,39						
	$\sigma$	0,21						
	max	4,70						
	min	4,00						

Tabelle 116: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

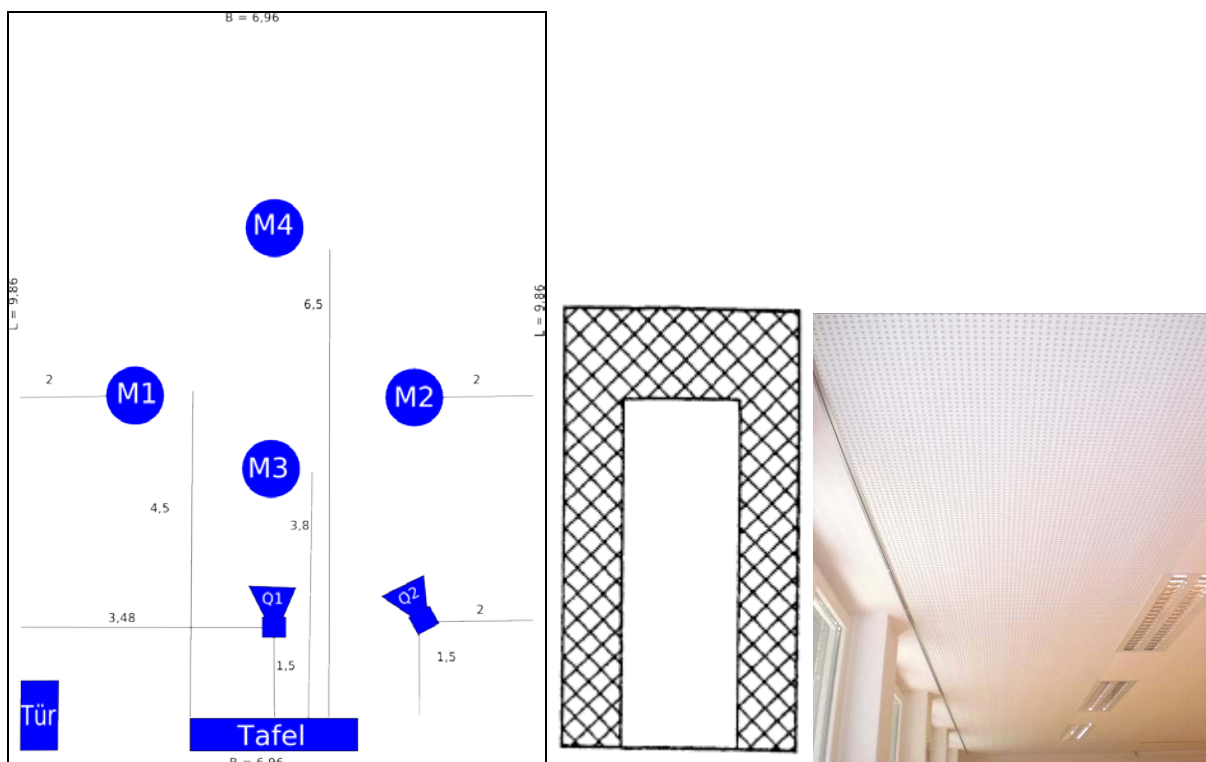
Mit Personen							
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
T <sub>30</sub> [s]		0,81	0,67	0,59	0,64	0,67	0,67
	$\sigma$	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
max		0,91	0,71	0,62	0,66	0,68	0,68
min		0,71	0,65	0,57	0,62	0,66	0,66
Max - T <sub>30</sub>		0,10	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01
T <sub>30</sub> - min		0,10	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01

## Raum UG 04



### Beschreibung:

Raum EG 04 ist ein normaler Klassenraum (9,86 x 6,96 x 2,88 m) für 32 Schüler mit normalem Putz und Parkettboden (Holz). Die Decke war saniert (Akustikdecke). Die Anordnung der Akustikdecke entsprach dem Vorschlag der DIN 18041 für die Deckenanordnung (siehe Abbildungen).



**Abb. 227:** Links: Mikrofon- und Lautsprecherpositionen (Tafel-Wand-Entfernung war 12 cm). Mitte: Anordnung der Akustikdecke (Deckenuntersicht) im Raum nach einer Abbildung der DIN 18041. Rechts: Abbildung eines Abschnitts der Akustikdecke

## Raum UG 04



Grundgeräuschpegel [dBA]	29,4
Feuchtigkeit	65 %
Temperatur	25 °C
Messpegel [dB SPL]	85
Anzahl Schüler	32
L x B x H [m]	9,86 x 6,96 x 2,88
Volumen [m <sup>3</sup> ]	197,64
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,56 s

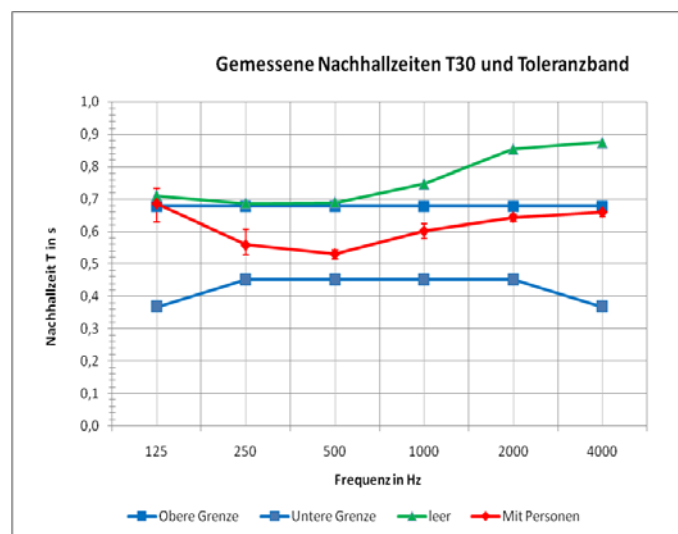


Abb. 228: Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (Personen eingerechnet)

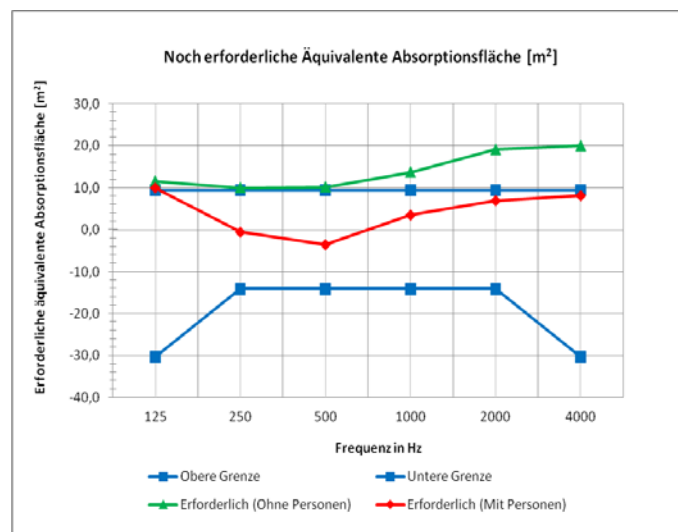


Abb. 229: Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 117: Raumakustische Gütemaße

Raum UG 04 (leer)								
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub>[s], gemittelt</b>		0,71	0,69	0,69	0,75	0,86	0,88	0,78
$\sigma$		0,033	0,029	0,014	0,020	0,014	0,013	0,011
max		0,76	0,76	0,71	0,78	0,87	0,90	0,81
min		0,65	0,64	0,66	0,71	0,83	0,85	0,76
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,74	0,69	0,68	0,75	0,84	0,87	0,79
	$\sigma$	0,005	0,005	0,012	0,005	0,000	0,005	0,008
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,70	0,72	0,69	0,73	0,87	0,89	0,78
	$\sigma$	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,70	0,68	0,69	0,76	0,85	0,86	0,78
	$\sigma$	0,009	0,012	0,005	0,009	0,014	0,009	0,005
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	0,66	0,68	0,69	0,76	0,85	0,88	0,79
	$\sigma$	0,005	0,005	0,005	0,022	0,014	0,005	0,017
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,75	0,74	0,71	0,75	0,85	0,89	0,79
	$\sigma$	0,005	0,012	0,005	0,005	0,012	0,005	0,005
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,75	0,66	0,69	0,75	0,87	0,86	0,77
	$\sigma$	0,005	0,000	0,008	0,005	0,005	0,005	0,005
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,68	0,66	0,67	0,71	0,85	0,88	0,78
	$\sigma$	0,005	0,012	0,014	0,005	0,012	0,012	0,005
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	0,71	0,67	0,69	0,76	0,87	0,88	0,77
	$\sigma$	0,012	0,008	0,017	0,022	0,005	0,009	0,008
<b>EDT[s]</b>		0,59	0,56	0,67	0,76	0,85	0,84	0,74
$\sigma$		0,16	0,10	0,04	0,06	0,00	0,03	0,03
max		0,77	0,70	0,73	0,83	0,96	0,90	0,77
min		0,30	0,32	0,57	0,61	0,78	0,78	0,68
<b>C50[dB]</b>		4,65	5,42	3,50	3,66	3,93	3,51	4,40
$\sigma$		2,46	1,67	0,95	0,71	0,85	0,84	0,93
max		8,80	9,20	5,40	5,40	5,30	4,50	5,50
min		1,50	3,00	2,10	2,80	2,50	1,80	2,60
<b>D50[%]</b>		73,04	77,04	68,92	69,79	70,92	69,08	73,13
$\sigma$		9,28	6,64	4,54	3,46	4,01	4,36	4,18
max		88,00	90,00	78,00	78,00	77,00	74,00	78,00
min		61,00	66,00	62,00	65,00	64,00	60,00	65,00
<b>STI</b>		0,70						
$\sigma$		0,01						
max		0,72						
min		0,67						
<b>RASTI</b>		0,68						
$\sigma$		0,02						
max		0,72						
min		0,65						
<b>%Alcons</b>		3,98						
$\sigma$		0,30						
max		4,50						
min		3,50						

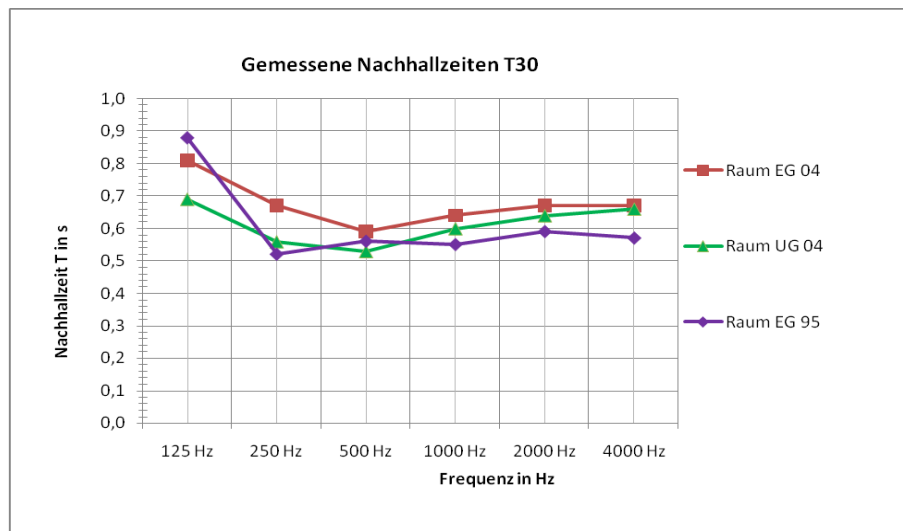
Tabelle 118: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen							
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub>[s]</b>		0,69	0,56	0,53	0,60	0,64	0,66
$\sigma$		0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
max		0,73	0,61	0,54	0,62	0,65	0,67
min		0,63	0,53	0,51	0,58	0,63	0,65
Max - T <sub>30</sub>		0,05	0,05	0,01	0,02	0,01	0,01
T <sub>30</sub> - min		0,06	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01

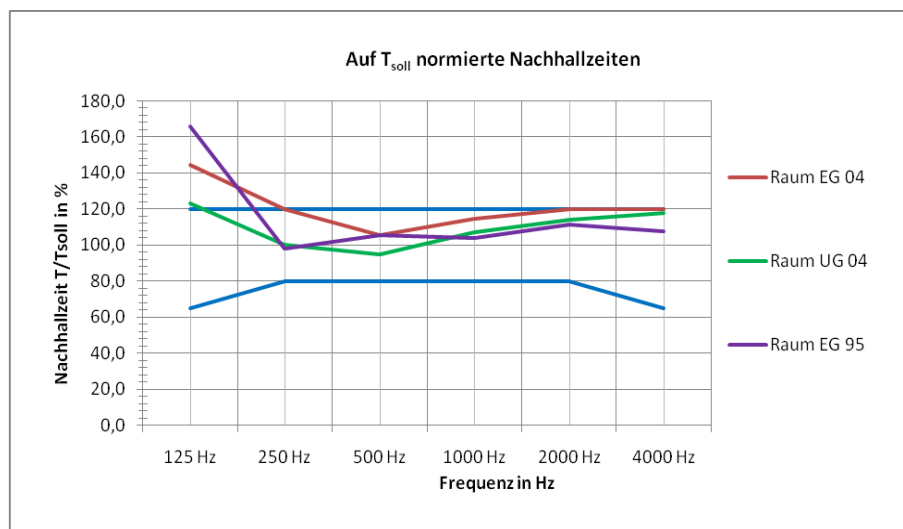


### 5.3.2. Zusammenfassung und Interpretation

Abb. 230 zeigt die Zusammenfassung der Nachhallzeitmessungen der Bundesbildungsanstalt für Kindergartenpädagogik Grottenhofstrasse. Im Vergleich zu den Messergebnissen der Studie von Berliner Klassenräumen von Kirchner<sup>306</sup> (siehe Abb. 113 und 114, S. 121) dominieren hier vor allem die Gruppe-B-Klassenräume mit einem Nachhallzeitanstieg zu den tiefen Frequenzen. Die Nachhallzeiten aller Räume liegen ab 250 Hz im Toleranzband.



**Abb. 230:** Zusammenfassung der Nachhallzeitmessungen der Bundesbildungsanstalt für Kindergartenpädagogik (Graz) (Personen eingerechnet) (4 MP, 2 QP, N=24)



**Abb. 231:** Auf die Sollnachhallzeit normierte Nachhallzeiten der Klassenräume und Toleranzband. (Werte: siehe Tabelle 121) Bundesbildungsanstalt für Kindergartenpädagogik (Graz)

Vergleicht man die Mittelwerte der Nachhallzeiten aus Tabelle 119 mit den Ergebnissen aus den Studien der Tabellen 32 und 33, so stellt man fest, dass die Klassenräume zu den aktuellen Studienergebnissen niedrige Nachhallzeiten aufweisen.

<sup>306</sup> [KIRCHNER1].

**Tabelle 119:** Zusammenfassung aller Nachhallzeiten im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Raum	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	T30 Mittelwert [s]
Raum EG 95	0,88	0,52	0,56	0,55	0,59	0,57	0,61
Raum EG 04	0,81	0,67	0,59	0,64	0,67	0,67	0,68
Raum UG 04	0,69	0,56	0,53	0,6	0,64	0,66	0,61

Der Grundgeräuschpegel lag in allen Klassenräumen deutlich unter dem WHO-Grenzwert von 35 dB(A) (siehe Anhang B), sogar deutlich unter 30 und entsprechen somit sogar den Bedingungen für hörbeeinträchtigte Schüler (Tabelle 19, S. 87):

**Tabelle 120:** Grundgeräuschpegel der Klassenräume

Raum	Grundgeräuschpegel (dBA) (slow)
Raum EG 95	29
Raum EG 04	30,6
Raum UG 04	29,4

Die Anzahl der Schüler in den Klassenräumen lag zwischen 26 und 32. Nach den Studienergebnissen von Shield (siehe Abb. 12, S. 22) liegt bei 18 Schülern der LAeq bei 60 dB(A) und der LA90 bei 50 dB(A) und für jeden weiteren Schüler ist mit einer Erhöhung des LAeq und des LA90 von 1 dB(A) zu rechnen. Somit kommt man auf einen LA90 von 58 bis 64 dB(A).

**Tabelle 121:** Nachhallzeiten auf die Sollnachhallzeit normiert. (Personen vor Normierung eingerechnet)

Raum	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Raum EG 95	1,66	0,98	1,06	1,04	1,11	1,08
Raum EG 04	1,45	1,20	1,05	1,14	1,20	1,20
Raum UG 04	1,23	1,00	0,95	1,07	1,14	1,18

Im Folgenden soll nun untersucht werden, um wieviel sich der Lärmpegel und der Sprachaufwand des Lehrers oder der Lehrerin nach einer akustischen Sanierung auf die Sollnachhallzeit senken wird. Es wurden die Erkenntnisse aus den Studien von Oberdörster und aus den Studien über den Lombard-Effekt (siehe Kapitel 2.2. und Kapitel 3.3.) angewandt.

**Tabelle 122:** Minderung des Lärmpegels im Unterricht durch raumakustische Sanierung. T30 ist der Mittelwert der Nachhallzeiten von 125 Hz bis 4000 Hz (Personen eingerechnet). A1 ist die äquivalente Absorptionsfläche des unbehandelten Raumes.  $\Delta A$  ist die zusätzlich einzubringende äquivalente Absorptionsfläche um die Sollnachhallzeit zu erreichen.  $\Delta L$  entspricht der physikalischen Senkung des Lärmpegels nach DIN 18041. Formeln siehe Kapitel 2.2.1.

Raum	T30 Mittelwert [s]	Raumvolumen [m <sup>3</sup> ]	Sollnachhallzeit [s]	A1 [m <sup>2</sup> ]	$\Delta A$ [m <sup>2</sup> ]	$\Delta L$ [dB] (physikalisch)
Raum EG 95	0,61	154,89	0,53	40,77	6,28	0,6
Raum EG 04	0,68	192,19	0,56	45,84	9,41	0,8
Raum UG 04	0,61	197,64	0,56	51,88	4,94	0,4

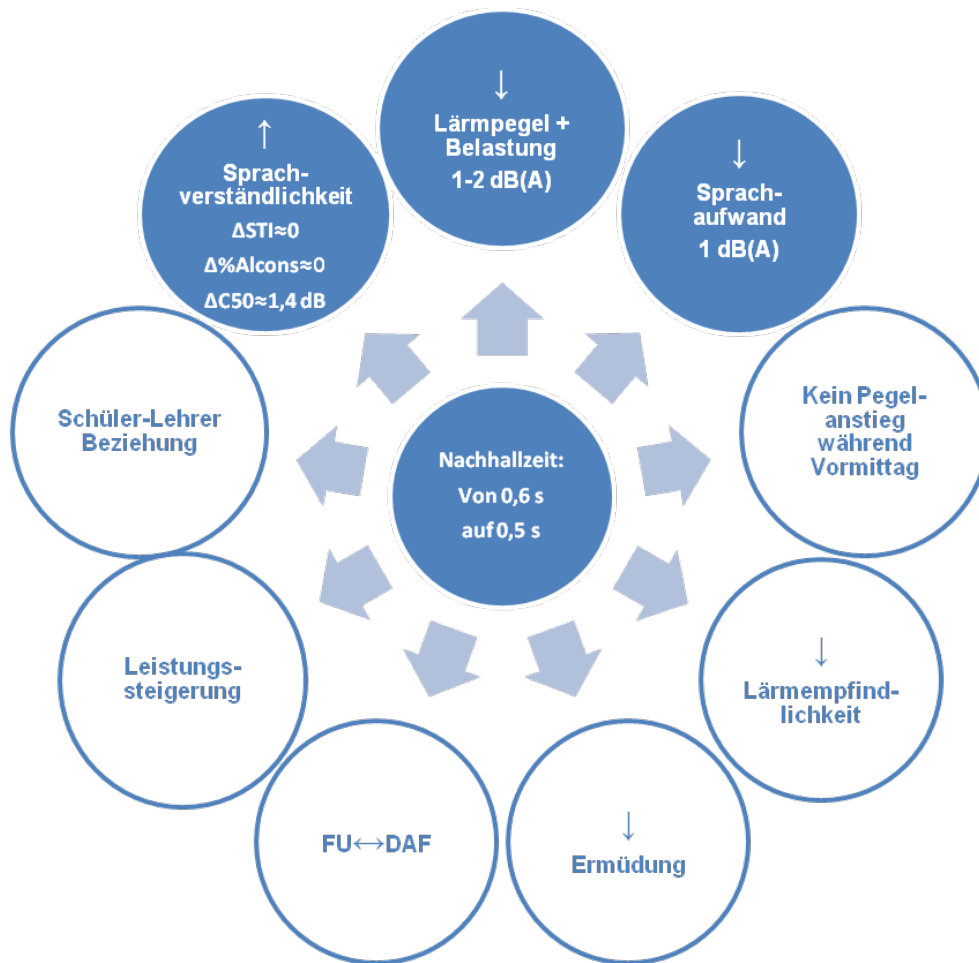
**Tabelle 123:** Physikalische nach DIN 18041 und tatsächliche Lärmpegelminderung  $\Delta L$  nach [OBERDOERSTER1] und [LAZARUS1] durch Reduzierung der Nachhallzeit auf die Sollnachhallzeit. (siehe Kapitel 2.2.)  $\Delta L_{\text{Lehrerstimme}}$  ist die Minderung des Sprachpegels von Lehrer/innen durch den Lombard-Effekt nach [SATO] aus dem Jahr 2008 (siehe Kapitel 3.3.)

Raum	$\Delta L$ [dB] (physikalisch)	$\Delta L$ [dBA] (tatsächlich)		$\Delta L_{\text{Lehrerstimme}}$ [dBA] (0,72 dB pro dB <sub>LNA</sub> )	
		1dBA pro 0,1 s	2dBA pro 0,1 s	Minimal	Maximal
Raum EG 95	0,6	0,8	1,6	0,6	1,2
Raum EG 04	0,8	1,2	2,3	0,8	1,7
Raum UG 04	0,4	0,5	1,1	0,4	0,8

Tabelle 123 zeigt, dass eine akustische Sanierung nicht mehr notwendig ist, da die Nachhallzeiten sich in der Nähe der Sollnachhallzeit befinden. Lärmpegelsenkungen im Unterricht werden somit nicht mehr durch eine Sanierung zu erwarten sein. Für die Berechnung der Sprachpegelreduzierung wurde die Studie von Sato<sup>307</sup> benutzt, da diese Studie die aktuellste und umfangreichste Studie über den Lombard-Effekt bei Lehrer/innen war, die vorlag. Andere Studien geben eine höhere Steigung des Sprechpegels an (siehe Kapitel 3.3.)

Grundsätzlich ist eine Sanierung der Klassenräume nicht mehr notwendig. Eine Sanierung der Klassenräume auf die Sollnachhallzeit 0,5 s könnte noch folgende Effekte mit sich bringen:

<sup>307</sup> [SATO].



**Abb. 232:** Positive Effekte durch zusätzliche Sanierung der Klassenräume auf die Sollnachhallzeit. Einige Effekte, die transparent dargestellt sind, wurden in den Studien bei einer Reduzierung der Nachhallzeit auf unter 0,5 s beobachtet.

- Reduzierung des Lärmpegels (Arbeits- und Grundgeräuschpegel) im Klassenraum um 1 bis 2 dB(A). Nach den Studien müsste eine Reduzierung der Lärmbelastung der Lehrerin oder des Lehrers sowie eine Reduzierung der subjektiven Lärmbelastung der Schüler und Schülerinnen auftreten. Durch die niedrige Lärmreduktion können diese Effekte wahrscheinlich nur schwer beobachtet werden. (Kapitel 2.2.1)
- Zunahme der Sprachverständlichkeit (siehe Kapitel 3.2.1). Laut der Vorhersage von Oberdörster (siehe Abb.94 S. 101) wird durch eine Reduzierung der Nachhallzeit von 0,6 s auf 0,5 s der STI-Wert von 0,73 auf 0,76 verbessert. Laut Farrel-Becker-Formel kann sich der %Alcons-Wert von 3,2 auf 2,7 verbessern. Laut dem Vorhersagemodell von Bradley (siehe S. 96 und S. 97) kann sich der C50-Wert von 3,3 auf 4,7 dB verbessern. Da die bestehende Sprachverständlichkeit ausgezeichnet ist, ist es fraglich ob durch die Senkung der Nachhallzeit auf 0,5s eine messbare Verbesserung eintreten kann. Insbesondere die hohen Frequenzen liegen im Toleranzband. Wahrscheinlich tritt keine statistisch signifikante Verbesserung der subjektiven Sprachverständlichkeit auf, außerdem ist diese stark abhängig vom Alter und von der Hörfähigkeit der Schüler, sowie vom SNR im Klassenraum.

- Reduzierung des Sprachaufwands des Lehrers oder der Lehrerin um 1 dB(A). (siehe Kapitel 3.3.)
- Die Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels für nacheinander folgende Unterrichtsstunden über den Vormittag ist deutlich reduziert oder bleibt aus. (Abb. 25 und 26 S.30 bis S.31; Tabelle 13 und 14 S. 60)
- Reduzierung der Lärmempfindlichkeit des Lehrers oder der Lehrerin: Reduzierung der Steigung der Herzfrequenz in Abhängigkeit vom Lärmpegel im Klassenraum. (Reduzierung der Herzfrequenzreaktion auf den Stressor „Lärm“) (Abb. 50, S. 64)
- Ausgleich zwischen Ermüdungs- und Aktivierungsphasen (Herzfrequenz-Trendwerte) der Lehrerin oder des Lehrers (siehe Kapitel 2.2.) (Abb. 48 und Abb. 49 S. 63)
- Reduzierung oder Ausbleiben der Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels bei Wechsel zu differenzierten Arbeitsformen (Abb. 19, 20, 21 S. 27 und S. 28)
- Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Schüler (siehe Kapitel 2.2.2.)
- Verbesserung der Lehrer-Schüler-Beziehung („kommunikative Klima“) (siehe S. 65 bis 68)

Es ist jedoch anzunehmen, dass eine zusätzliche Sanierung durch die schon recht gute Raumakustik der Klassenräume nur noch geringe Effekte hervorbringen wird. Aus ökonomischen Gründen wird sich eine Sanierung nicht lohnen. Es können jedoch noch zusätzliche pädagogische Maßnahmen zur Lärmreduzierung im Klassenraum empfohlen werden (siehe Kapitel 7).

## 5.4. Franz Jonas-Hauptschule (Trofaiach, Steiermark)

### 5.4.1. Messungen

Die Franz Jonas Hauptschule ist ein Schulgebäude aus dem Jahr 1974 mit sehr ähnlichen Klassenräumen, die sich in den Größenverhältnissen (8,5 x 8,5 x 3,15 m) nicht unterscheiden. Die Mikrofon- und Lautsprecherpositionen blieben deshalb in den 3 gemessenen Klassenräumen gleich. Die Decke (siehe Abbildung) hat ein Deckenträgergerippe aus Beton. Raum 39 (Gruppensprachenraum) wird für Fremdsprachenunterricht verwendet und unterliegt somit strengeren Bedingungen der DIN 18041 (-20% für  $T_{\text{soll}}$ ). In Raum 43 (2. Stock) sind neue Schallschutzfenster montiert worden. In jedem gemessenen Klassenraum war Teppichboden.

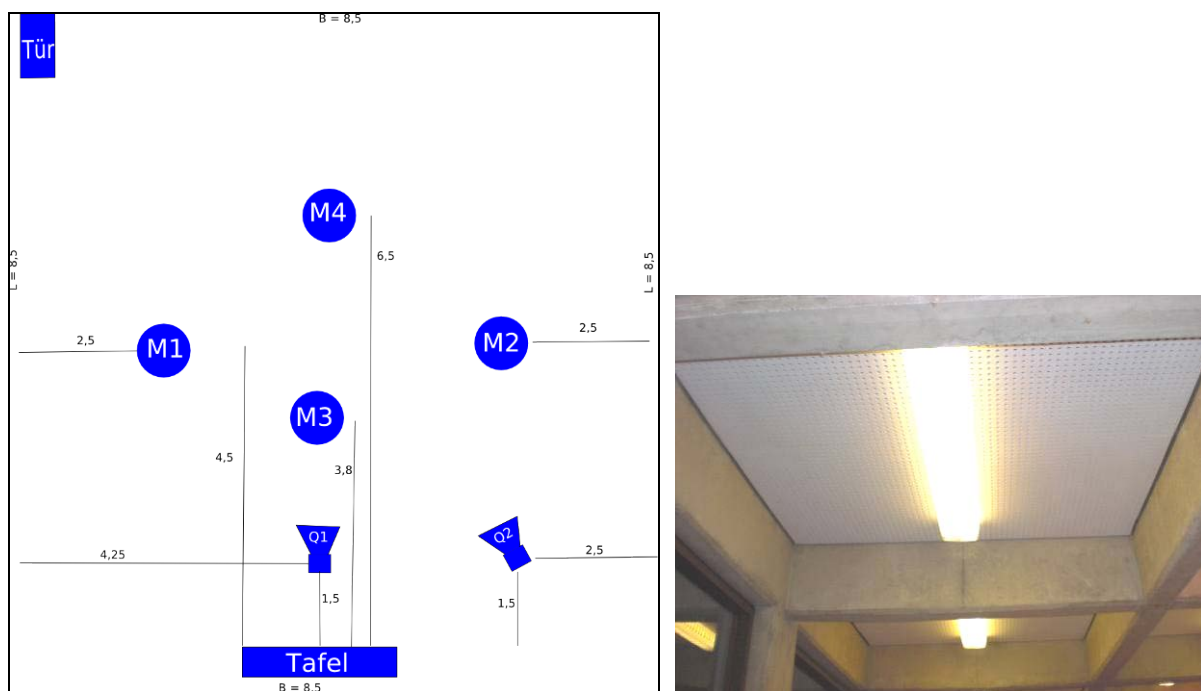
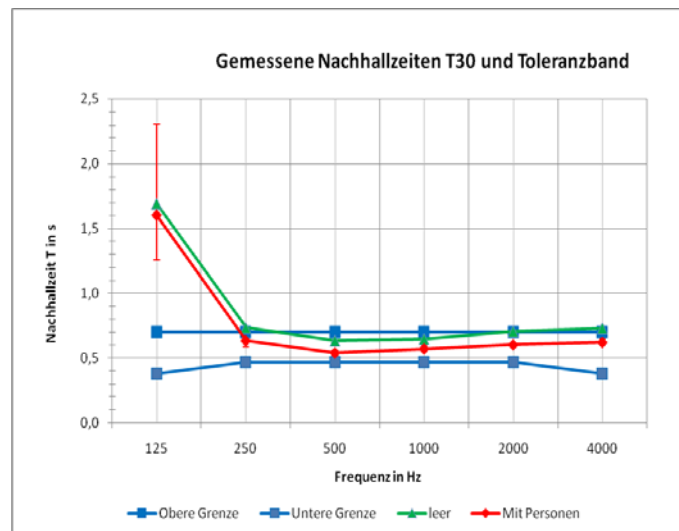


Abb. 233: Links: Mikrofon- und Lautsprecherpositionen. Rechts: Abbildung der Decke

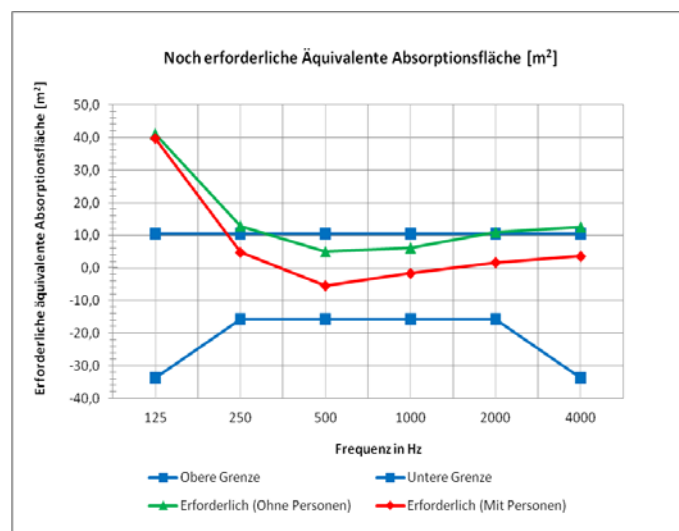
**Raum 32 (1. Stock, straßenseitig)**



Grundgeräuschpegel [dBA]	35 (Niederschlag, Regen)
Feuchtigkeit	61 %
Temperatur	24 °C
Messpegel [dB SPL]	85
Anzahl Schüler	24
L x B x H [m]	8,5 x 8,5 x 3,15
Volumen [m <sup>3</sup> ]	227,58
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,58 s



**Abb. 234:** Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)



**Abb. 235:** Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 124: Raumakustische Gütemaße

Raum 32 (leer)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub>[s], gemittelt</b>		1,69	0,73	0,63	0,65	0,71	0,73	0,69
$\sigma$		0,332	0,061	0,016	0,015	0,007	0,018	0,021
max		2,49	0,86	0,66	0,68	0,72	0,77	0,73
min		1,31	0,67	0,60	0,62	0,69	0,70	0,67
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,57	0,84	0,62	0,65	0,71	0,74	0,73
	$\sigma$	0,009	0,017	0,017	0,000	0,000	0,005	0,005
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,42	0,69	0,63	0,65	0,70	0,73	0,68
	$\sigma$	0,016	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,000
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,83	0,72	0,65	0,62	0,71	0,71	0,67
	$\sigma$	0,012	0,009	0,012	0,005	0,005	0,005	0,000
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,33	0,68	0,62	0,64	0,71	0,77	0,68
	$\sigma$	0,016	0,012	0,005	0,005	0,000	0,005	0,005
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,62	0,68	0,66	0,68	0,70	0,74	0,71
	$\sigma$	0,000	0,008	0,005	0,005	0,008	0,000	0,008
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,72	0,69	0,63	0,65	0,70	0,72	0,67
	$\sigma$	0,009	0,005	0,012	0,012	0,005	0,005	0,000
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	2,48	0,83	0,62	0,65	0,70	0,71	0,68
	$\sigma$	0,014	0,005	0,008	0,005	0,005	0,009	0,005
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,57	0,74	0,64	0,64	0,71	0,73	0,71
	$\sigma$	0,008	0,012	0,005	0,005	0,008	0,005	0,009
<b>EDT[s]</b>		1,27	0,73	0,59	0,64	0,67	0,63	0,54
$\sigma$		0,19	0,12	0,11	0,09	0,00	0,08	0,09
max		1,65	1,03	0,84	0,86	0,79	0,75	0,70
min		0,99	0,57	0,45	0,54	0,56	0,51	0,38
<b>C50[dB]</b>		-6,57	-1,02	0,40	0,93	1,73	2,03	2,61
$\sigma$		6,73	5,32	4,88	4,08	3,47	3,50	3,85
max		1,00	4,10	5,80	5,80	6,70	6,90	8,10
min		-20,40	-13,90	-11,60	-7,90	-5,20	-5,30	-5,20
<b>D50[%]</b>		25,79	47,96	53,67	55,63	59,08	60,75	63,13
$\sigma$		17,62	21,84	22,45	20,50	18,05	17,84	19,24
max		56,00	72,00	80,00	79,00	83,00	83,00	87,00
min		1,00	4,00	6,00	13,00	23,00	23,00	23,00
<b>STI</b>		0,70						
$\sigma$		0,02						
max		0,74						
min		0,68						
<b>RASTI</b>		0,72						
$\sigma$		0,02						
max		0,77						
min		0,70						
<b>%Alcons</b>		3,82						
$\sigma$		0,35						
max		4,30						
min		3,10						

Tabelle 125: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

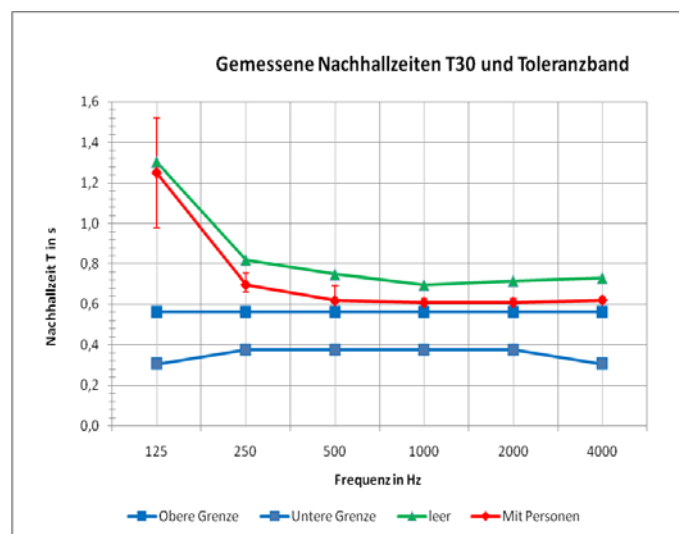
Mit Personen		125	250	500	1000	2000	4000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub>[s]</b>		1,60	0,63	0,54	0,57	0,60	0,62
$\sigma$		0,29	0,04	0,01	0,01	0,00	0,01
max		2,30	0,73	0,56	0,60	0,61	0,65
min		1,26	0,59	0,51	0,55	0,59	0,60
Max - T <sub>30</sub>		0,70	0,09	0,02	0,03	0,01	0,03
T <sub>30</sub> - min		0,34	0,05	0,02	0,02	0,01	0,02



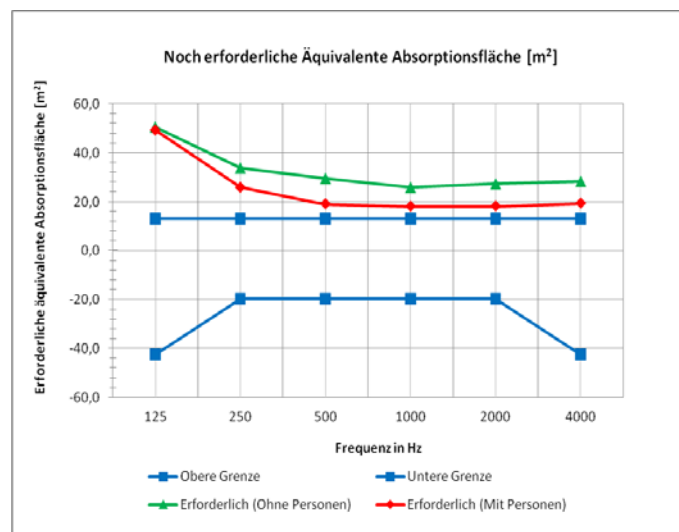
### Raum 39 (Gruppenraum Sprache)



Grundgeräuschpegel [dBA]	32,1
Feuchtigkeit	54 %
Temperatur	26 °C
Messpegel [dB SPL]	85
Anzahl Schüler	24
L x B x H [m]	8,57 x 8,5 x 3,15
Volumen [m <sup>3</sup> ]	229,46
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,47 s



**Abb. 236:** Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)



**Abb. 237:** Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 126: Raumakustische Gütemaße

Raum 39 (leer)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub>[s], gemittelt</b>		1,30	0,82	0,75	0,70	0,72	0,73	0,69
$\sigma$		0,204	0,033	0,043	0,015	0,013	0,012	0,018
max		1,60	0,90	0,86	0,72	0,74	0,75	0,74
min		1,01	0,77	0,69	0,67	0,69	0,71	0,66
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,02	0,83	0,74	0,69	0,73	0,74	0,70
	$\sigma$	0,014	0,000	0,005	0,005	0,009	0,008	0,009
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,17	0,81	0,75	0,70	0,73	0,72	0,68
	$\sigma$	0,012	0,005	0,019	0,009	0,005	0,009	0,005
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,52	0,80	0,72	0,71	0,72	0,74	0,69
	$\sigma$	0,005	0,021	0,025	0,008	0,005	0,005	0,009
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,59	0,79	0,70	0,68	0,72	0,75	0,72
	$\sigma$	0,005	0,008	0,012	0,012	0,005	0,005	0,012
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,13	0,80	0,74	0,71	0,71	0,73	0,70
	$\sigma$	0,024	0,025	0,005	0,005	0,009	0,000	0,000
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,12	0,82	0,71	0,69	0,70	0,72	0,68
	$\sigma$	0,012	0,012	0,005	0,005	0,008	0,008	0,005
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,46	0,89	0,84	0,71	0,71	0,72	0,67
	$\sigma$	0,019	0,014	0,017	0,012	0,009	0,005	0,009
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,41	0,82	0,78	0,68	0,71	0,72	0,70
	$\sigma$	0,017	0,012	0,014	0,008	0,005	0,005	0,008
<b>EDT[s]</b>		1,05	0,84	0,72	0,70	0,69	0,66	0,57
$\sigma$		0,18	0,12	0,06	0,06	0,00	0,08	0,07
max		1,26	1,04	0,83	0,84	0,79	0,79	0,66
min		0,73	0,64	0,59	0,57	0,50	0,49	0,38
<b>C50[dB]</b>		-10,73	-7,70	-5,99	-5,50	-4,49	-3,45	-2,37
$\sigma$		12,27	14,43	14,87	14,88	14,58	11,63	11,20
max		1,20	2,60	2,00	2,00	4,10	4,70	6,20
min		-49,30	-55,10	-54,70	-54,40	-53,90	-42,90	-40,60
<b>D50[%]</b>		18,88	30,58	38,08	40,83	45,25	45,63	49,96
$\sigma$		17,23	15,41	17,35	18,62	19,62	19,98	21,97
max		55,00	64,00	61,00	61,00	72,00	75,00	81,00
min		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>STI</b>		0,70						
$\sigma$		0,02						
max		0,74						
min		0,67						
<b>RASTI</b>		0,71						
$\sigma$		0,02						
max		0,74						
min		0,67						
<b>%Alcons</b>		3,91						
$\sigma$		0,41						
max		4,50						
min		3,20						

Tabelle 127: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Mit Personen		125	250	500	1000	2000	4000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub>[s]</b>		1,25	0,70	0,62	0,61	0,61	0,62
$\sigma$		0,19	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01
max		1,52	0,75	0,69	0,63	0,63	0,64
min		0,98	0,66	0,58	0,59	0,59	0,61
Max - T <sub>30</sub>		0,27	0,06	0,08	0,02	0,02	0,01
T <sub>30</sub> - min		0,27	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01

### Raum 43 (2. Stock)



Grundgeräuschpegel [dBA]	29,5
Feuchtigkeit	58 %
Temperatur	25 °C
Messpegel [dB SPL]	85
Anzahl Schüler	24
L x B x H [m]	8,6 x 8,5 x 3,16
Volumen [m <sup>3</sup> ]	230,99
T <sub>soll</sub> laut DIN 18041	0,59 s

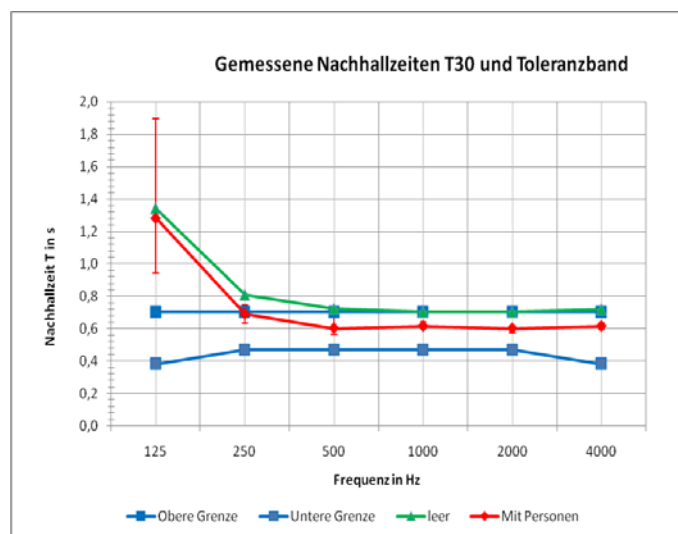


Abb. 238: Gemessene Nachhallzeit, Max-Min-Spannweite und berechnetes Toleranzband nach DIN 18041 (4 MP, 2 QP, N=24) (Personen eingerechnet)

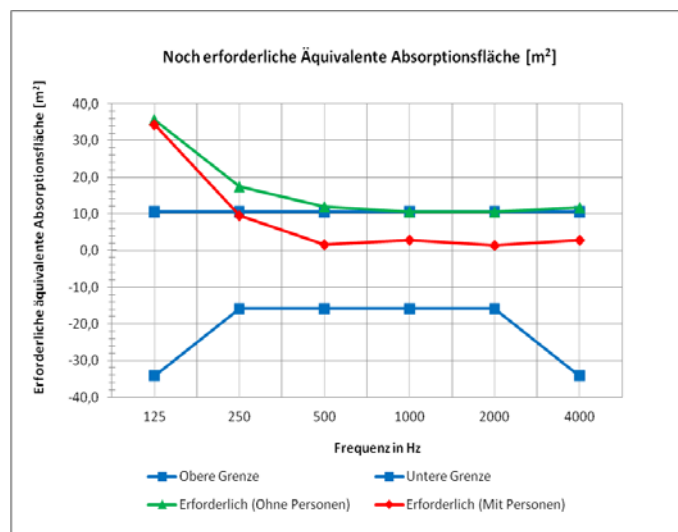


Abb. 239: Noch erforderliche Absorptionsfläche um T<sub>soll</sub> zu erreichen und Toleranzband. (Personen eingerechnet)

Tabelle 128: Raumakustische Gütemaße

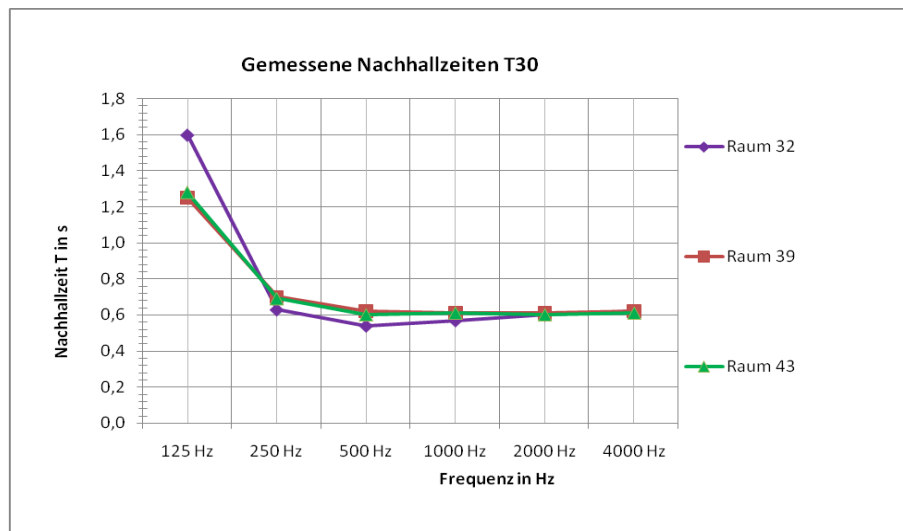
Raum 43 (leer)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>T<sub>30</sub> [s], gemittelt</b>		1,34	0,81	0,72	0,70	0,70	0,72	0,67
$\sigma$		0,301	0,044	0,040	0,015	0,013	0,017	0,014
Max		2,02	0,89	0,82	0,74	0,72	0,75	0,70
Min		0,97	0,73	0,67	0,68	0,67	0,69	0,65
M1Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,30	0,86	0,71	0,71	0,72	0,74	0,68
	$\sigma$	0,000	0,005	0,012	0,008	0,005	0,000	0,005
M2Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,21	0,78	0,67	0,71	0,71	0,73	0,66
	$\sigma$	0,000	0,005	0,000	0,000	0,005	0,009	0,005
M3Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,66	0,80	0,79	0,73	0,69	0,74	0,66
	$\sigma$	0,119	0,045	0,034	0,008	0,012	0,005	0,005
M4Q1	T <sub>30</sub> [s]	1,13	0,75	0,71	0,70	0,69	0,72	0,68
	$\sigma$	0,040	0,017	0,009	0,008	0,005	0,008	0,005
M1Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,96	0,80	0,73	0,71	0,72	0,72	0,69
	$\sigma$	0,049	0,005	0,005	0,005	0,000	0,005	0,005
M2Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,12	0,82	0,71	0,69	0,70	0,70	0,67
	$\sigma$	0,028	0,014	0,005	0,009	0,005	0,005	0,005
M3Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,33	0,88	0,78	0,71	0,70	0,71	0,65
	$\sigma$	0,078	0,005	0,008	0,005	0,005	0,005	0,005
M4Q2	T <sub>30</sub> [s]	1,03	0,79	0,70	0,68	0,71	0,70	0,66
	$\sigma$	0,040	0,000	0,005	0,005	0,005	0,005	0,008
<b>EDT [s]</b>		1,06	0,85	0,73	0,71	0,68	0,61	0,51
$\sigma$		0,20	0,08	0,08	0,07	0,00	0,08	0,08
Max		1,46	0,99	0,88	0,86	0,84	0,75	0,66
Min		0,78	0,70	0,60	0,60	0,58	0,43	0,35
<b>C50 [dB]</b>		-8,16	-4,80	-3,24	-1,86	-0,90	0,46	1,49
$\sigma$		9,21	11,14	11,26	11,25	11,18	9,35	8,96
Max		-0,80	2,10	4,10	3,90	5,20	5,90	7,00
Min		-45,90	-54,60	-54,80	-54,10	-53,10	-42,90	-39,60
<b>D50 [%]</b>		21,08	37,08	43,42	50,21	54,79	59,96	64,08
$\sigma$		13,42	20,32	19,21	18,13	17,66	17,56	18,59
Max		44,00	63,00	72,00	71,00	77,00	80,00	83,00
Min		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>STI</b>		0,70						
$\sigma$		0,02						
Max		0,73						
Min		0,67						
<b>RASTI</b>		0,70						
$\sigma$		0,02						
Max		0,75						
Min		0,67						
<b>%Alcons</b>		3,88						
$\sigma$		0,34						
Max		4,50						
Min		3,30						

Tabelle 129: Nachhallzeit im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

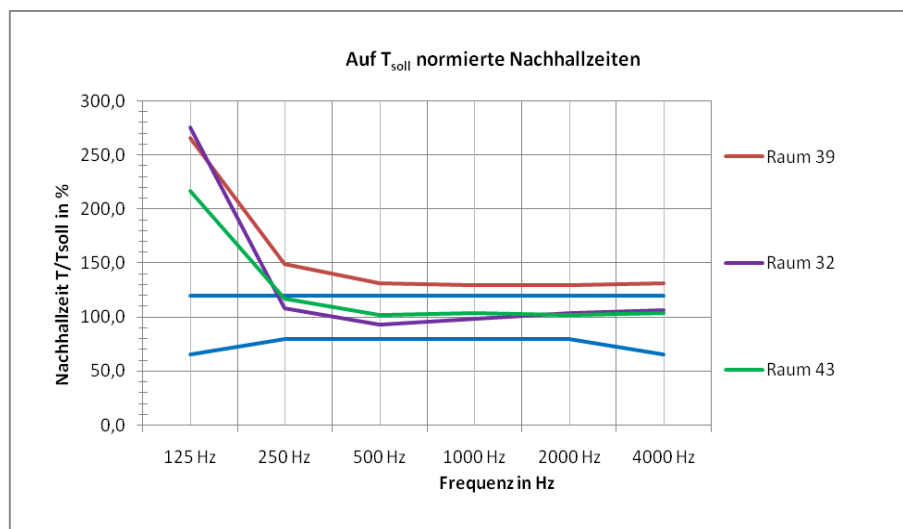
Mit Personen		125	250	500	1000	2000	4000
Frequenz (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
<b>T<sub>30</sub> [s]</b>		1,28	0,69	0,60	0,61	0,60	0,61
$\sigma$		0,27	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01
Max		1,90	0,75	0,67	0,64	0,61	0,64
Min		0,94	0,63	0,56	0,60	0,58	0,59
Max - T <sub>30</sub>		0,61	0,06	0,07	0,03	0,01	0,02
T <sub>30</sub> - min		0,34	0,06	0,04	0,02	0,02	0,02

## 5.4.2. Zusammenfassung und Interpretation

Abb. 240 zeigt die Zusammenfassung der Nachhallzeitmessungen der Franz-Jonas Hauptschule. Im Vergleich zu den Messergebnissen der Studie von Berliner Klassenräume von Kirchner<sup>308</sup> (siehe Abb. 113 und 114, S. 121) dominieren hier vor allem die Gruppe-B-Klassenräume mit einem Nachhallzeitanstieg zu den tiefen Frequenzen. Die Nachhallzeiten aller Räume liegen ab 250 Hz im Toleranzband.



**Abb. 240:** Zusammenfassung der Nachhallzeitmessungen der Franz Jonas Hauptschule (Trofaiach, Steiermark) (Personen eingerechnet) (4 MP, 2 QP, N=24)



**Abb. 241:** Auf die Sollnachhallzeit normierte Nachhallzeiten der Klassenräume und Toleranzband. (Werte: siehe Tabelle 133). Franz Jonas Hauptschule (Trofaiach, Steiermark). Raum 39 hat eine geringere Sollnachhallzeit(20%) (Personen vor Normierung eingerechnet)

<sup>308</sup> [KIRCHNER1].

Vergleicht man die Mittelwerte der Nachhallzeiten aus Tabelle 130 mit den Ergebnissen aus den Studien der Tabellen 32 und 33, so stellt man fest, dass die Klassenräume zu den aktuellen Studienergebnissen niedrige Nachhallzeiten aufweisen.

**Tabelle 130:** Zusammenfassung aller Nachhallzeiten im besetzten Zustand (Personen eingerechnet)

Raum	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	T30 Mittelwert [s]
Raum 32	1,6	0,63	0,54	0,57	0,6	0,62	0,76
Raum 39	1,25	0,7	0,62	0,61	0,61	0,62	0,74
Raum 43	1,28	0,69	0,6	0,61	0,6	0,61	0,73

Der Grundgeräuschpegel lag nur im Klassenraum 32 am WHO-Grenzwert von 35 dB(A) (siehe Anhang B). In Raum 43 zeigt sich die Wirkung der neuen Fenster: Der Grundgeräuschpegel ist hier deutlich unter 30 dB(A)!

**Tabelle 131:** Grundgeräuschpegel der Klassenräume

Raum	Grundgeräuschpegel (dBA) (slow)
Raum 32	35 (Geräusch durch Regen)
Raum 39	32,1
Raum 43	29,5 (Neue Fenster)

Laut Mackenzie<sup>309</sup> würde eine Nachhallzeitverbesserung von 0,7 s auf 0,4 s auch eine Grundgeräuschpegelminderung im unbesetzten Zustand von mindestens 4 dB(A) mit sich bringen (siehe Tabelle 12, Seite 58).

Die Anzahl der Schüler in den Klassenräumen lag bei 24 Personen in jedem Klassenraum. Nach den Studienergebnissen von Shield (siehe Abb. 12, S. 22) liegt bei 18 Schülern der LAeq bei 60 dB(A) und der LA90 bei 50 dB(A) und für jeden weiteren Schüler ist mit einer Erhöhung des LAeq und des LA90 von 1 dB(A) zu rechnen. Somit kommt man auf einen LA90 von 56 dB(A).

**Tabelle 132:** Nachhallzeiten auf die Sollnachhallzeit normiert. (Personen vor Normierung eingerechnet)  
Klassenraum 39 unterliegt strengeren Bedingungen für die Sollnachhallzeit (-20%)

Raum	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Raum 32	2,76	1,09	0,93	0,98	1,03	1,07
Raum 39	2,66	1,49	1,32	1,30	1,30	1,32
Raum 43	2,17	1,17	1,02	1,03	1,02	1,03

Im Folgenden soll nun untersucht werden, um wie viel sich der Lärmpegel und der Sprachaufwand des Lehrers oder der Lehrerin nach einer akustischen Sanierung auf die

<sup>309</sup> [MACKENZIE].

Sollnachhallzeit senken wird. Es wurden die Erkenntnisse aus den Studien von Oberdörster und aus den Studien über den Lombard-Effekt (siehe Kapitel 2.2. und Kapitel 3.3.) angewandt.

**Tabelle 133:** Minderung des Lärmpegels im Unterricht durch raumakustische Sanierung. T30 ist der Mittelwert der Nachhallzeiten von 125 Hz bis 4000 Hz (Personen eingerechnet). A1 ist die äquivalente Absorptionsfläche des unbehandelten Raumes.  $\Delta A$  ist die zusätzlich einzubringende äquivalente Absorptionsfläche um die Sollnachhallzeit zu erreichen.  $\Delta L$  entspricht der physikalischen Senkung des Lärmpegels nach DIN 18041. Formeln siehe Kapitel 2.2.1.

Raum	T30 Mittelwert [s]	Raumvolumen [m <sup>3</sup> ]	Sollnachhallzeit [s]	A1 [m <sup>2</sup> ]	$\Delta A$ [m <sup>2</sup> ]	$\Delta L$ [dB] (physikalisch)
Raum 32	0,76	227,58	0,58	48,21	14,96	1,2
Raum 39	0,74	229,46	0,47	50,26	28,34	1,9
Raum 43	0,73	230,99	0,59	50,83	12,20	0,9

**Tabelle 134:** Physikalische nach DIN 18041 und tatsächliche Lärmpegelminderung  $\Delta L$  nach [OBERDOERSTER1] und [LAZARUS1] durch Reduzierung der Nachhallzeit auf die Sollnachhallzeit. (siehe Kapitel 2.2.)  $\Delta L_{\text{Lehrerstimme}}$  ist die Minderung des Sprachpegels von Lehrer/innen durch den Lombard-Effekt nach [SATO] aus dem Jahr 2008 (siehe Kapitel 3.3.)

Raum	$\Delta L$ [dB] (physikalisch)	$\Delta L$ [dBA] (tatsächlich)		$\Delta L_{\text{Lehrerstimme}}$ [dBA] (0,72 dB pro dB <sub>LNA</sub> )	
		1dBA pro 0,1 s	2dBA pro 0,1 s	Minimal	Maximal
Raum 32	1,2	1,8	3,6	1,3	2,6
Raum 39	1,9	2,7	5,3	1,9	3,8
Raum 43	0,9	1,4	2,8	1,0	2,0

Tabelle 134 zeigt, dass eine akustische Sanierung nicht mehr notwendig ist, da die Nachhallzeiten sich in der Nähe der Sollnachhallzeit befinden. Lärmpegelsenkungen im Unterricht sind somit nicht mehr durch eine Sanierung zu erwarten. Nur eine Sanierung des Klassenraums 39, der einer strengeren Bedingung der Sollnachhallzeit unterliegt, bringt eine Lärmpegelminderung mit sich. Für die Berechnung der Sprachpegelreduzierung wurde die Studie von Sato<sup>310</sup> benutzt, da diese Studie die aktuellste und umfangreichste Studie über den Lombard-Effekt bei Lehrer/innen war, die vorlag. Andere Studien geben eine höhere Steigung des Sprachpegels an (siehe Kapitel 3.3.)

Eine Sanierung der Klassenräume auf die Sollnachhallzeit könnte noch folgende Effekte mit sich bringen:

<sup>310</sup> [SATO].



**Abb. 242:** Positive Effekte durch zusätzliche Sanierung der Klassenräume auf die Sollnachhallzeit. Einige Effekte, die transparent dargestellt sind, wurden in den Studien bei einer Reduzierung der Nachhallzeit auf unter 0,5s beobachtet.

- Reduzierung des Lärmpegels (Arbeits- und Grundgeräuschpegel) im Klassenraum um 2 bis 4 dB(A). Reduzierung der Lärmbelastung der Lehrerin oder des Lehrers sowie Reduzierung der subjektiven Lärmbelastung der Schüler und Schülerinnen. (Kapitel 2.2.1)
- Zunahme der Sprachverständlichkeit (siehe Kapitel 3.2.1). Laut Vorhersage von Oberdörster (siehe Abb. 94 S.101) wird durch eine Reduzierung der Nachhallzeit von 0,7s auf 0,5s der STI-Wert von 0,7 auf maximal 0,8 verbessert. Laut Farrel-Becker-Formel (S.103) wird sich der %Alcons-Wert von 3,8 auf 2,2 verbessern. Laut dem Vorhersagemodell von Bradley (siehe S. 96 und S. 97) wird sich der C50-Wert von 2,2 auf 4,7 dB verbessern. Die Verbesserung der subjektiven Sprachverständlichkeit ist stark abhängig vom Alter und von der Hörfähigkeit der Schüler, sowie vom SNR im Klassenraum. (siehe Kapitel 3.2.2)
- Reduzierung des Sprachaufwands des Lehrers oder der Lehrerin um 1 bis 3 dB(A). (siehe Kapitel 3.3.)



- 
- Die Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels für nacheinander folgende Unterrichtsstunden über den Vormittag ist deutlich reduziert oder bleibt aus. (Abb. 25 und 26 S.30 bis S.31; Tabelle 13 und 14 S. 60)
  - Reduzierung der Lärmempfindlichkeit des Lehrers oder der Lehrerin: Reduzierung der Steigung der Herzfrequenz in Abhängigkeit vom Lärmpegel im Klassenraum. (Reduzierung der Herzfrequenzreaktion auf den Stressor „Lärm“) (Abb. 50, S. 64)
  - Ausgleich zwischen Ermüdungs- und Aktivierungsphasen (Herzfrequenz-Trendwerte) der Lehrerin oder des Lehrers (siehe Kapitel 2.2.) (Abb. 48 und Abb. 49 S. 63)
  - Reduzierung oder Ausbleiben der Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels bei Wechsel zu differenzierten Arbeitsformen (Abb. 19, 20, 21 S. 27 und S. 28)
  - Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Schüler (siehe Kapitel 2.2.2.)
  - Verbesserung der Lehrer-Schüler-Beziehung („kommunikative Klima“) (siehe S. 65 bis 68)

## 6. Raumakustische Typisierung in Abhängigkeit vom Baujahr

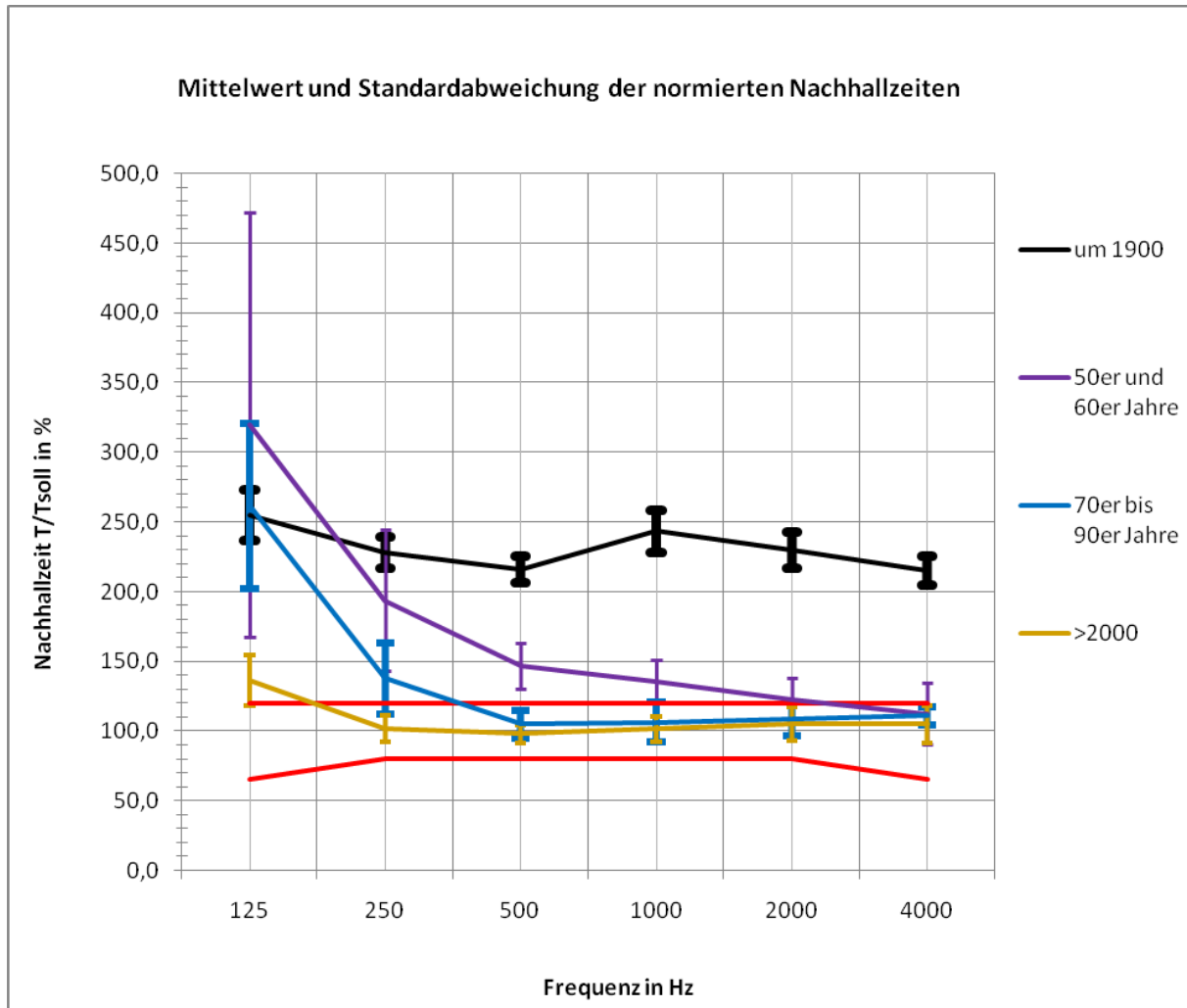
In diesem Kapitel wurde die Hypothese der raumakustischen Typisierung von Klassenräumen in Abhängigkeit von ihrem Baujahr verifiziert. Dabei wurden die Nachhallzeiten (Personen eingerechnet) der einzelnen Klassenräume auf ihre Sollnachhallzeit normiert, um nachher den Mittelwert und die Standardabweichung zum jeweiligen Baujahr zu bilden.

Der Klassenraum 3.38 (AG) des HAK Graz stammt zwar aus dem Jahr 1906, wurde jedoch mit relativ einfachen Maßnahmen 1999 saniert und somit der Gruppe der 90er Jahre zugeordnet. Er ist zugleich ein Beispiel, wie mit relativ geringem (Kosten-)Aufwand eine relevante Verbesserung der Raumakustik erreicht werden kann. Klassenraum 39 (Gruppenraum Sprache) der Hauptschule Trofaiach wurde auf die gewöhnliche Sollnachhallzeit der DIN 18041 normiert, da er zu seiner Entstehungszeit nicht in Hinblick auf die spezifische Bedingung des Fremdsprachenunterrichts, wofür er derzeit verwendet wird, konstruiert wurde.

**Tabelle 135:** Aufteilung der Klassenräume in Abhängigkeit vom Baujahr auf 4 Gruppen. AG=Altes Gebäude, NB=Neues Gebäude. BBA=Bundesbildungsanstalt

Schule	Raum	um 1900	50er und 60er Jahre	70er und 90er Jahre	>2000	
Grundschule Wiltz (L)	Raum 2 (AG)		■			
	Raum 4 (AG)		■			
	Raum 13 (AG)		■			
	Raum 14 (AG)		■			
	Raum 17 (AG)		■			
	Raum 21 (AG)		■			
	Raum 24 (AG)		■			
	Raum 25 (AG)		■			
	Raum 34 (AG)		■			
	Raum 35 (AG)		■			
	Raum 36 (AG)		■			
	Raum 2 (NB)					■
	Raum 4 (NB)					■
	BG Seebacher	Raum INF1		■		
Raum 6D			■			
Raum 8B			■			
HAK Graz	Raum 3.38 (AG)			■		
	Raum 3.31 (AG)	■				
	Raum 3.26 (AG)	■				
	Raum 2.05 (NB)			■		
	Raum 2.13 (NB)			■		
	Raum 2.06 (NB)			■		
Franz Hauptschule Trofaiach Jonas	Raum 32			■		
	Raum 39			■		
	Raum 43			■		

BBA Grottenhofstrasse	Raum EG 95				■
	Raum EG 04				■
	Raum UG 04				■
<b>Anzahl der KR</b>	<b>28</b>	<b>2</b>	<b>14</b>	<b>7</b>	<b>5</b>



**Abb. 243:** Mittelwert und Standardabweichung der normierten Nachhallzeiten aller Klassenräume (28 KR) in Abhängigkeit vom Baujahr. (1900: 2 KR), (50er und 60er: 14 KR), (70er und 90er: 7 KR), (>2000: 5 KR)

**Tabelle 136:** Mittelwert und Standardabweichung der Nachhallzeit für Klassenräume um 1900er Baujahr

Klassenräume um 1900 Baujahr						
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T30 Mittelwert	2,55	2,29	2,16	2,44	2,30	2,15
$\sigma$	0,18	0,11	0,09	0,16	0,13	0,10

**Tabelle 137:** Mittelwert und Standardabweichung der Nachhallzeit für Klassenräume der 50er und 60er Jahre

Klassenräume 50er und 60er Jahre						
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T30 Mittelwert	3,20	1,94	1,47	1,36	1,23	1,12
$\sigma$	1,53	0,50	0,16	0,15	0,16	0,22

**Tabelle 138:** Mittelwert und Standardabweichung der Nachhallzeit für Klassenräume der 70er und 90er Jahre

Klassenräume 70er bis 90 er Jahre						
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T30 Mittelwert	2,61	1,38	1,05	1,06	1,08	1,11
$\sigma$	0,60	0,25	0,10	0,14	0,12	0,07

**Tabelle 139:** Mittelwert und Standardabweichung der Nachhallzeit für Klassenräume die im 21. Jh. gebaut worden sind. (>2000)

Klassenräume >2000						
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T30 Mittelwert	1,36	1,02	0,98	1,02	1,05	1,05
$\sigma$	0,18	0,09	0,06	0,09	0,12	0,13

### Zusammenfassung und Interpretation

In Abb. 243 sieht man, dass sich die Raumakustik der Klassenräume im letzten Jahrhundert stetig verbessert hat. Um 1900 wurden bei der Konstruktion der Klassenräume die Anforderungen der Klassenraumakustik noch nicht beachtet. In diesem Zusammenhang ist sicherlich die völlig andere Schulkultur (Stichwort: Herbartianismus ) zu beachten, deren Merkmale z. B. lehrerzentrierter Frontalunterricht mit einer geringeren Beteiligung der Schüler/innen und eine wesentlich strengere Disziplin als in späteren Zeiten waren, womit naturgemäß eine geringere Lärmentwicklung im Klassenzimmer einherging. Auch die damalige Umweltsituation (weniger Verkehr, weniger Industrie etc., dadurch weniger Lärmemissionen) trug zu einem niedrigeren Lärmpegel bei. Die Entwicklung der Klassenräume lässt sich mit der Zeitgeschichte insofern verbinden, als während der Jahre der Nachkriegszeit und des Wiederaufbaus die Klassenraumakustik keine große Rolle spielte. Der eigentliche Bau einer Schule und die Anzahl an Klassenräumen waren für die damalige Zeit wichtiger als die Beachtung der individuellen Klassenraumakustik. In den 50er und 60er Jahren (Nachkriegszeit) hat sich die Geometrie der Klassenräume im Vergleich zu 1900 geändert, so ist vor allem die Höhe der Klassenräume kleiner geworden, jedoch wurde auch damals der Raumakustik wenig Beachtung geschenkt. Auch die Studie der Heriot Watt Universität Edinburgh<sup>311</sup> berichtet, dass die Schulbauten aus der Viktorianischen Zeit höhere Decken haben als die anderen Schulbauten. Der Grund hierfür liegt laut der Studie im Glauben der Menschen der damaligen Zeit, dass das Risiko an Infektionen in der Klasse durch die hohe Decke reduziert wird. Interessanterweise liegt der Krankenstand der Lehrer und Lehrerinnen laut dieser Studie in den Klassenräumen mit hohen Decken deutlich höher (siehe

<sup>311</sup> [MACKENZIE, S.11]

auch S. 119 und 120).<sup>312</sup> Auch Tiesler schreibt, dass alle Klassenräume, die innerhalb seiner Studie gemessen worden sind und eine Nachhallzeit grösser als 1 Sekunde hatten, aus dem Schulgebäude vom Baujahr 1896 stammen.<sup>313</sup> Anfang und Mitte der 70er Jahre fand ein Umdenken in Bezug auf die Klassenraumakustik statt. Das Jahr 1968 ist das Jahr der Studentenunruhen und des Prager Frühlings sowie der „antiautoritären Erziehungsbewegung“ und interessanterweise auch das Jahr der Entstehung der DIN 18041. Da 1968 die DIN 18041 eingeführt wurde, musste naturgemäß den Anforderungen der Raumakustik größeres Augenmerk geschenkt werden als bisher. Die DIN-Norm hat sich im modernen Bauwesen etabliert; im 21. Jahrhundert werden die Klassenräume streng nach den Bedingungen der DIN 18041:2004 gebaut. So ist z. B. auch die Sollnachhallzeit der DIN 18041 gegenüber der DIN 18041 aus dem Jahr 1968 geringer geworden (siehe Abbildung 82 und 83, S. 89).

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts und Anfang des 20. Jahrhunderts entstand die reformpädagogische Bewegung, die Kritik an der bislang vorherrschenden autoritären Erziehung in der Schule ausübte und den Wandel des Unterrichts zu differenzierten, schülerzentrierten Arbeitsformen einläutete. Die Reformpädagogen wenden sich gegen den damals vorherrschenden Herbartianismus. Die Umsetzung der Ideen dieser Bewegung dauerte jedoch bis in die 70er Jahre und erst heute ist der Frontalunterricht weitgehend abgelöst von den differenzierten Arbeitsformen (Gruppenarbeit, Projektarbeit). Die Entwicklung der Klassenraumakustik ist mit der Entwicklung des Unterrichts in Hinblick einer Berücksichtigung der Individualität des Schülers in Verbindung zu setzen: Ein „Massenunterricht“ in „Schulkasernen“<sup>314</sup> mit Klassenräumen von 60 Schülern findet im 21. Jh. nicht mehr statt, sondern im Wandel des Unterrichts zu differenzierten Arbeitsformen muss und wird dem einzelnen Schüler und seiner Hörumgebung mehr Beachtung geschenkt.

Luley<sup>315</sup> bietet in seinem Buch eine detaillierte Betrachtung der Geschichte des deutschen Schulbaus in der die reformpädagogische Bewegung für den Umschwung der Schulbauentwicklung eine wichtige Rolle spielte. Die reformpädagogischen Ideen wurden aber nach dem zweiten Weltkrieg, wie schon oben erwähnt worden ist, nur zögerlich umgesetzt. Die 60er und 70er Jahre kennzeichnen sich vor allem durch eine Vereinheitlichung der Bauweise durch Festlegung von Planungsbedingungen.<sup>316</sup> Interessanterweise entstand auch damals die DIN 18041 zum ersten Mal.

Die Forderung nach einer Verbesserung der Klassenraumakustik der letzten Jahre entsteht, sowie in Kapitel 1 beschrieben wurde, aber auch aus der Tatsache heraus, dass viele Kinder (eins von acht Kindern) unter Hörbeeinträchtigungen leiden.

In diesem Kapitel wurde festgestellt, dass eine raumakustische Typisierung der Klassenräume in Abhängigkeit vom Baujahr grundsätzlich möglich und auch zeitgeschichtlich erklärbar ist. Im nächsten Kapitel werden die Maßnahmen erläutert, die zu einer Verbesserung der Raumakustik und/oder zur Lärminderung im Klassenraum beitragen.

---

<sup>312</sup> [MACKENZIE, S.37]

<sup>313</sup> [TIESLER4]

<sup>314</sup> Siehe [LULEY]

<sup>315</sup> [LULEY, S.117]

<sup>316</sup> [LULEY, S.119]

## 7. Maßnahmen zur Verbesserung der Raumakustik und zur Lärmreduktion

*„Lärm ist der hörbare Müll unserer Zivilisation“*  
Herbert von Karajan

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Lärmsituation und die Situation der Klassenraumakustik beschrieben. Dieses Kapitel soll nun auf die möglichen Maßnahmen eingehen, die zu einer Verbesserung der Lärmsituation und/oder der Raumakustik im Klassenraum führen.

In der einschlägigen Literatur wird zwischen den technischen Maßnahmen und den pädagogischen Maßnahmen zur Verbesserung der akustischen Lernumgebung im Klassenraum unterschieden. Als technische Maßnahmen bezeichnet man das Einbringen von Absorbern in den Klassenraum, die im nächsten Kapitel genauer beschrieben werden. Die pädagogischen Maßnahmen sind sehr weitreichende Maßnahmen, die von der Zuhörförderung im Allgemeinen über das Einbringen von sogenannten Lärmampeln (Schallpegelmesser), dem Sanieren bzw. akustischen Gestalten des Klassenraumes bis zum Herstellen eigener Absorber im Physikunterricht reichen können. Die Sanierung durch Eigeninitiative (Selbsthilfeprojekte) werden in dieser Diplomarbeit unter die technischen Maßnahmen eingeordnet. Ein Beispiel für eine erfolgreiche Sanierung durch Eigeninitiative zeigt Klassenraum 3.38 der Handelsakademie Graz auf das in diesem Kapitel auch näher eingegangen wird.

### 7.1. Technische Maßnahmen

In der statistischen Raumakustik unter den Bedingungen eines diffusen Schallfeldes (gleichmäßige Energiedichte) ergibt sich die äquivalente Absorptionsfläche aus der Multiplikation des Absorptionsgrades  $\alpha$  eines Materials mit der tatsächlich eingebrachten Fläche  $S$ :

$$A = \alpha \cdot S$$

bzw.

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i$$

In der Theorie wäre also die noch erforderliche äquivalente Absorptionsfläche in ähnlicher Weise zu berechnen:

$$A_{erf} = \alpha \cdot S$$

Man unterscheidet zwischen porösen Absorbentien (Glas- oder Steinwolle, Filzprodukte, Stoffe, usw.) und Resonanzabsorbentien. In der Regel und in den meisten Studien werden in Klassenräumen Akustikdecken oder Wandabsorber verwendet, die aus einer Kombination aus porösen und Resonanzabsorbentien bestehen.<sup>317</sup> Die Preisspanne laut Schick für den Einbau einer einfachen Akustikdecke beginnt bei 25 € pro m<sup>2</sup>. Die Kosten für eine professionelle akustische Sanierung eines Klassenraums betragen etwa 1500 €<sup>318</sup> Laut Mommertz<sup>319</sup> können sich die Kosten je nach Material und Ausführung zwischen 25 € und 100 € pro m<sup>2</sup> belaufen. Die Wirksamkeit von Schallabsorbentien werden nach DIN EN ISO 352 ermittelt. Nach OENORM EN ISO 11654 unterscheidet man zwischen fünf verschiedenen Absorberklassen: A, B, C, D, E:

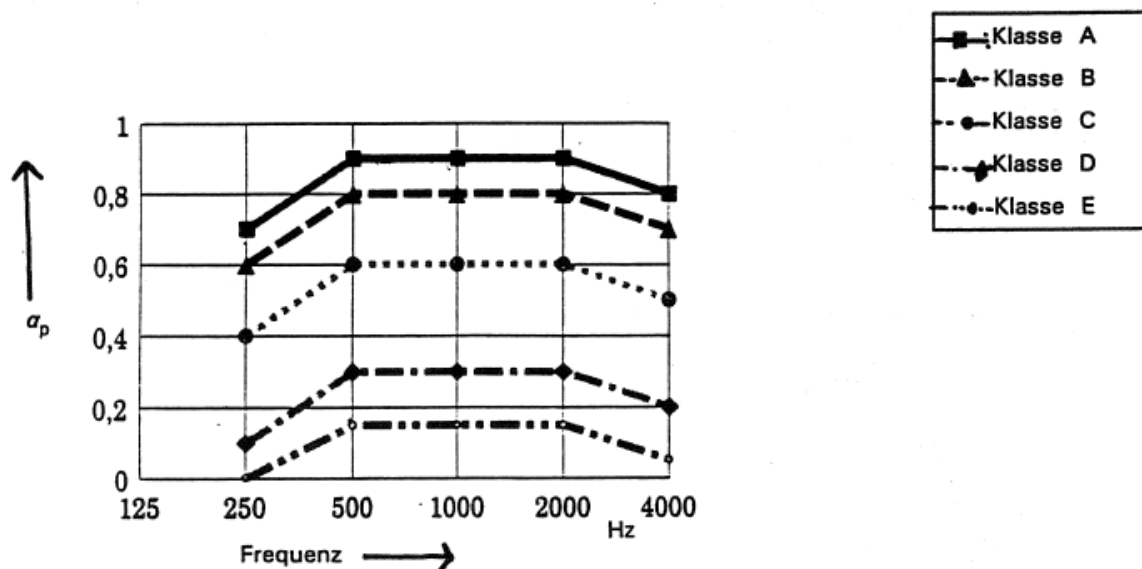


Abb. 244: Absorberklassen für praktische Absorptionsgrade nach DIN 11654 [OENORM EN ISO 11654]

<sup>317</sup> [SCHICK2, S.7].

<sup>318</sup> [SCHICK2, S.7], aus dem Jahre 2007.

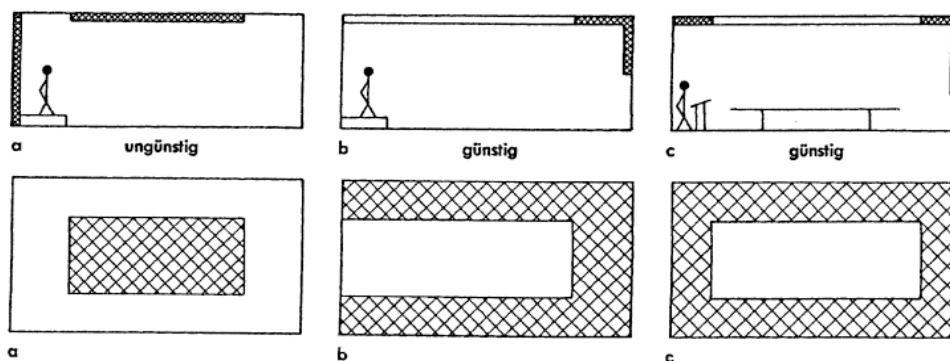
<sup>319</sup> [MOMMERTZ3, S.109].

Die bewerteten (frequenzunabhängige) Schallabsorptionsgrade (Einzahlwerte) nach der Norm:

**Tabelle 140:** nach [OENORM EN ISO 11654]

Schallabsorberklasse	$\alpha_w$
A	0,90 ; 0,95 ; 1,00
B	0,80 ; 0,85
C	0,60 ; 0,65 ; 0,70 ; 0,75
D	0,30 ; 0,35 ; 0,40 ; 0,45 ; 0,50 ; 0,55
E	0,25 ; 0,20 ; 0,15
Nicht klassifiziert	0,10 ; 0,05 ; 0,00

Die DIN 18041 listet auch Abschätzungen der notwendigen Einbaufläche eines gewählten Absorptionsgrades für Klassenräume auf. Grundsätzlich sollen laut DIN 18041 die absorbierenden Flächen gleichmäßig auf die Raumbooberflächen verteilt werden. Günstige Verteilungen für die Installation von Absorbern an der Decke und Rückwand von Klassenräumen sind in der Norm enthalten. Wegen den ersten Reflektionen muss der Deckenspiegel reflektieren und darf nicht vollständig (wie in Bild a zu sehen ist) mit Absorbern verkleidet werden. Durch Absorber an der Rückwand werden Flatterechos verhindert.



**Abb. 245:** Günstige und ungünstige Verteilungen von Schallabsorptionsflächen für Klassenräume nach [DIN18041]. (Oben: Aufrisse, Unten: Deckenuntersichten)

Wie in Kapitel 3 schon erwähnt wurde, gibt DIN 18041 keine Nachhallzeitanforderungen für die Raumgruppe B an, unter die Treppenhäuser und Flure fallen. Allerdings liefert die DIN 18041 Orientierungswerte für den Anteil an absorbierender Deckenbelegung in Fluren und Treppenhäusern in Abhängigkeit vom verwendeten Schallabsorptionsgrad:

**Tabelle 141:** Absorbierende Flächenbelegung von Treppenhäusern und Fluren in Abhängigkeit zum Absorptionsgrad

Schallabsorptionsgrad $\alpha$	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2
Zu verkleidende Fläche von Fluren und Treppenhäuser	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1



Beispiel: Bei Verwendung eines Absorbers der Absorptionsklasse A empfiehlt DIN 18041 eine 20%-ige Flächenbelegung des Flures oder des Treppenhauses.

In der Praxis muss für jeden Klassenraum geprüft werden, wie viel Absorberfläche notwendig ist, um die Sollnachhallzeit zu erreichen. Untersuchungen über die tatsächlich erzielten Schallabsorptionsgrade (aus der äquivalenten Absorptionsfläche) von Akustikdecken in Klassenräumen von Uygun<sup>320</sup> haben gezeigt, dass die erzielten Schallabsorptionsgrade sich wesentlich von den Laborwerten aus den Hallraummessungen unterscheiden, wie die folgende Tabelle einiger Akustikdecken zeigt:

**Tabelle 142:** Vergleich des bewerteten Absorptionsgrades zwischen Hallraummessungen und Praxismessungen nach [UYGUN]. Unterschied in % wurde hinzugefügt.

Akustikdecke	$\alpha_w$ E-200-Hallraummessung <sup>321</sup>	$\alpha_w$ H=200 mm Praxismessung	Unterschied
OWA „Schlicht“	0,15	0,05	- 66 %
OWA „Universal“	0,55	0,4	-27 %
OWA „Sternbild“	0,7	0,55	-21 %
OWA „Cosmos plus“	0,8	0,55	-31 %
Ecophon „Focus D“	0,9	0,5	-44 %

Klassenräume können auch durch Selbsthilfeaktionen der Schüler, Eltern oder Lehrer/innen raumakustisch saniert werden. Rickes<sup>322</sup> geht in seiner Publikation auf diese Selbsthilfeprojekte ein und zählt hierfür mehrere Aspekte auf, die berücksichtigt werden müssen, damit solche Projekte erfolgreich sind:

- Die Teilnehmer müssen alle unfallversichert sein
- Verwendete Materialien müssen die erforderlichen akustischen Eigenschaften besitzen (absorbierend). Es darf kein Styropor verwendet werden.
- Der Arbeits- und Gesundheitsschutz ist zu beachten: keine alte Mineralwolle verwenden. Nur Melaninharzschaum!
- Die Materialien müssen schwer entflammbar sein (Klasse A bzw. B1 nach DIN 4102). Es soll Silikonkleber verwendet werden und kein marktgängiger Klebstoff.
- Die Denkmalschutzanforderungen müssen berücksichtigt werden.
- Die Kosten müssen beachtet werden; am besten B-Ware verwenden.
- Die Deckenbelegungen nach DIN 18041 müssen beachtet werden.
- Alle aufgehängten Decken müssen ordnungsgemäß befestigt sein.
- Offene, nicht belegte Regale sollen vermieden werden.

Es dürfen ebenfalls keine Eierkartons verwendet werden, abgesehen davon, dass sie leicht entflammbar sind, haben sie nur ein sehr beschränktes Absorptionsverhalten.<sup>323</sup>

<sup>320</sup> [UYGUN].

<sup>321</sup> Messung im Hallraum nach DIN EN ISO 354 Typ E-200: Der Abstand Hallraumboden zur Akustikdecke beträgt 200 mm.

<sup>322</sup> [RICKES2].

<sup>323</sup> Siehe z.B. <http://www.sengpielaudio.com/Eierkartons.pdf>. Webseite von E. Sengspiel.

Abb. 246 zeigt den Vergleich zwischen der Nachhallzeit des Klassenraums 3.38 vor der Sanierung und nach der Sanierung durch Selbsthilfemaßnahme, sowie der Nachhallzeit eines nicht sanierten Klassenraums 3.31 ähnlicher Geometrie und gleichem Baujahr. Dabei wurden 109 Akustikplatten (60 cm x 60 cm) mit der Dicke von 5 cm an der Decke sowie an die Rückwand montiert. Die Montage entsprach Abbildung 233 (b) (Siehe auch Abb. 200 auf S. 216). Die äquivalente Absorptionsfläche der Akustikplatten konnte mit Hilfe der Schallabsorptionsgrade der Akustikplatten aus dem Produktkatalog berechnet werden.

**Tabelle 143:** Schallabsorptionsgrad  $\alpha_s$  Akustik Dekorplatte S 041<sup>324</sup> mit 60 mm Dicke.

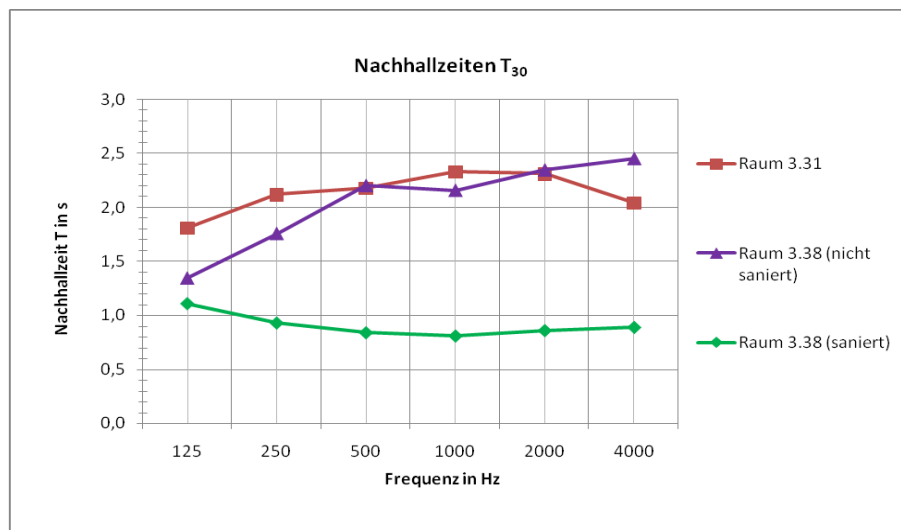
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha_s$	0,23	0,73	1,06	1,11	1,06	1,03

**Tabelle 144:** Äquivalente Absorptionsfläche der 109 Akustikplatten.

Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Äquivalente Absorptionsfläche [m <sup>2</sup> ]	9,02	28,64	41,59	43,55	41,59	40,41

**Tabelle 145:** Errechnete Nachhallzeit des Klasserraumes 3.38 vor der Sanierung, gemessene Nachhallzeit des Klassenraumes 3.38 nach der Sanierung und gemessene Nachhallzeit des Klassenraums 3.31. (Im leeren Zustand) (Formeln, siehe S. 133).

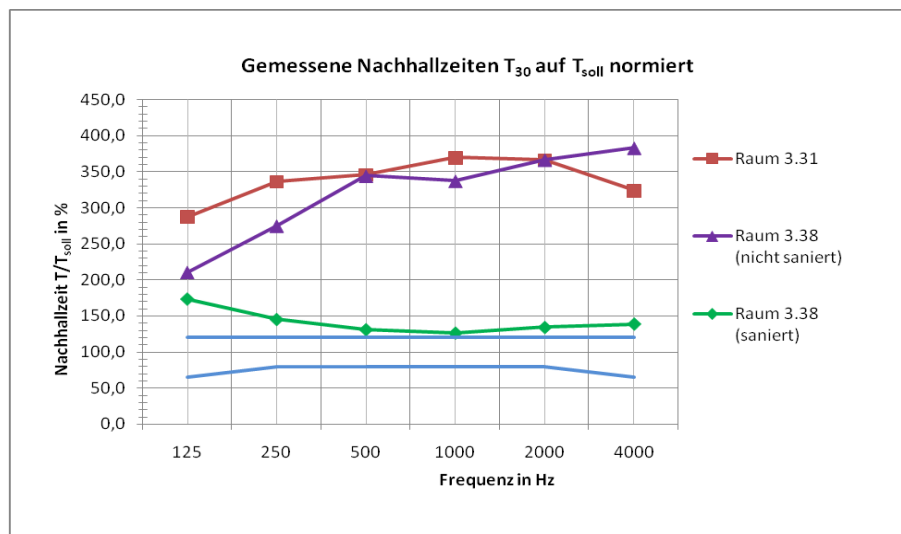
	Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	Mittelwert
Raum 3.38	T30 (nicht saniert) [s]	1,35	1,76	2,20	2,16	2,35	2,45	2,04
Raum 3.38	T30 (saniert) [s]	1,11	0,93	0,84	0,81	0,86	0,89	0,89
Raum 3.31	T30 [s]	1,81	2,12	2,18	2,33	2,31	2,04	2,13



**Abb. 246:** Gemessene Nachhallzeiten der Räume 3.38 und 3.31 sowie errechnete Nachhallzeit des nicht sanierten Raumes 3.38. (Im leeren Zustand) (Formeln, siehe S. 133)

Abb. 246 zeigt, dass Raum 3.31 und Raum 3.38 (vor Sanierung) einen ähnlichen Nachhallzeitverlauf haben.

<sup>324</sup> Produktkatalog 2009/10 der Firma Baustoff + Metall GmbH (<http://www.baustoff-metall.com>) (S.110)



**Abb. 247:** Errechnete Nachhallzeit des Klassenraums 3.38 vor Sanierung, gemessene Nachhallzeit des sanierten Klassenraums 3.38 (12,5 x 6,6 x 4,29) und gemessene Nachhallzeit des nicht sanierten Klassenraums 3.31 (12 x 6,4 x 4,26) der Bundeshandelsakademie Grazbachgasse (HAK). (Leerer Zustand). Das Toleranzband ist in blau eingezeichnet. (Alle Nachhallzeiten sind auf die Sollnachhallzeit normiert)

Auch wenn sich die Nachhallzeit im sanierten und unbesetzten Fall nicht im Toleranzband befindet, so liegt die Differenz zu der errechneten Nachhallzeit des nicht sanierten Klassenraums 3.38 bei durchschnittlich 1,14 s im leeren Zustand. Die Differenz zwischen der Nachhallzeit des sanierten Klassenraums 3.38 und der Nachhallzeit des nicht sanierten Klassenraums 3.31 liegt ebenfalls bei durchschnittlich 1,22 s im leeren Zustand.

Es soll nun untersucht werden um wie viel der Lärmpegel im besetzten Klassenraum 3.38 durch die Sanierung gesenkt wird. Es werden 22 Schüler eingerechnet.

**Tabelle 146:** Errechnete Nachhallzeit des Klassenraums 3.38 vor der Sanierung und gemessene Nachhallzeit des Klassenraums 3.38 nach der Sanierung. In beiden Fällen ist die äquivalente Absorptionsfläche von 22 Schüler eingerechnet (Formeln, siehe S. 133)

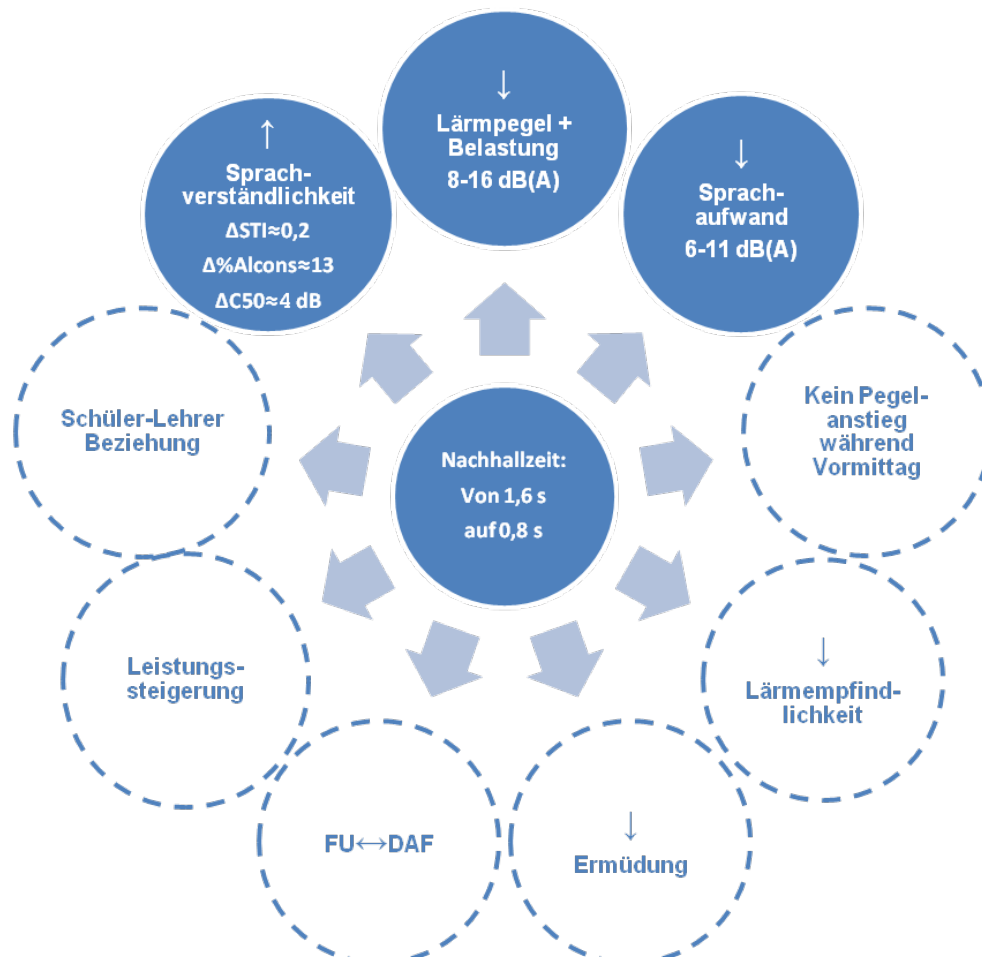
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	Mittelwert
T30 nicht saniert [s]	1,31	1,43	1,58	1,72	1,73	1,82	1,6
T30 saniert [s]	1,08	0,83	0,73	0,74	0,76	0,79	0,82

**Tabelle 147:** Physikalischer nach DIN 18041 und tatsächlicher Lärmpegelunterschied  $\Delta L$  nach [OBERDOERSTER1] und [LAZARUS1] durch Reduzierung der errechneten Nachhallzeit des Raumes 3.38 vor der Sanierung auf die gemessene Nachhallzeit des Raumes 3.38 nach der Sanierung (siehe Kapitel 2.2.)  $\Delta L_{\text{Lehrerstimme}}$  ist die Minderung des Sprachpegels von Lehrer/innen durch den Lombard-Effekt nach [SATO] aus dem Jahr 2008 (siehe Kapitel 3.3.) (22 Schüler eingerechnet)

$\Delta L$ [dB] (physikalisch)	$\Delta L$ [dBA] (tatsächlich)		$\Delta L_{\text{Lehrerstimme}}$ [dBA] (0,72 dB pro $\text{dB}_{\text{LNA}}$ )	
	1dBA pro 0,1 s	2dBA pro 0,1 s	Minimal	Maximal
2,9	7,8	15,6	5,6	11,2

Die Sanierung der Klassenraums 3.38 führt zu einer tatsächlichen minimalen Lärmpegelsenkung von 7,8 dB(A) sowie zu einer minimalen Minderung des Lehrersprachpegels von 5,6 dB(A) was in etwa einer Sprechanstrengungsstufe nach ISO 9921 entspricht.

Die Sanierung des Klassenraums 3.38 durch Selbsthilfemaßnahme kann zusammenfassend noch folgende Effekte gebracht haben:



**Abb. 248:** Positive Effekte die möglicherweise die Sanierung des Klassenraums 3.38 hervorgebracht hat. Einige Effekte, die transparent dargestellt sind, wurden in den Studien bei einer Reduzierung der Nachhallzeit auf unter 0,5 s beobachtet und können durch diese Sanierung wahrscheinlich nicht beobachtet werden.

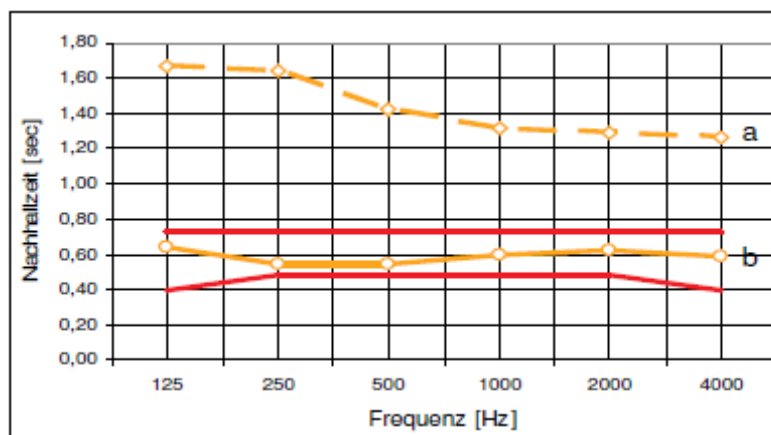
- Reduzierung des Lärmpegels (Arbeits- und Grundgeräuschpegel) im Klassenraum um 8 bis 16 dB(A). Reduzierung der Lärmbelastung der Lehrerin oder des Lehrers sowie Reduzierung der subjektiven Lärmbelastung der Schüler und Schülerinnen. (Kapitel 2.2.1)
- Zunahme der Sprachverständlichkeit (siehe Kapitel 3.2.1). Laut Vorhersage von Oberdörster (siehe Abb. 94 S.101) wird durch eine Reduzierung der Nachhallzeit von 1,6s auf 0,8s der STI-Wert von 0,4 auf 0,6 verbessert. Laut Farrel-Becker-Formel kann sich der %Alcons-Wert von 19,5 auf 6,6 verbessern (S.103). Laut dem Vorhersagemodell von Bradley (siehe S. 95 und S.96) kann sich der C50-Wert von -2,6 auf +1,3 verbessern. Die Verbesserung der subjektiven Sprachverständlichkeit ist stark abhängig vom Alter und von der Hörfähigkeit der Schüler, sowie vom SNR im Klassenraum. (siehe Kapitel 3.2.2)
- Reduzierung des Sprachaufwands des Lehrers oder der Lehrerin um 6 bis 11 dB(A). (siehe Kapitel 3.3.).

Die folgenden Effekte können durch die Sanierung nicht garantiert werden, da diese in den Studien erst bei einer Reduzierung der Nachhallzeit auf  $<0,5$  s beobachtet wurden. Da der Unterschied der Nachhallzeit zwischen dem sanierten Klassenraum und dem nicht sanierten Klassenraum jedoch sehr groß ist, ist anzunehmen dass die Effekte durch diese Sanierung dennoch auftreten können.

- Die Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels für nacheinander folgende Unterrichtsstunden über den Vormittag ist deutlich reduziert oder bleibt aus. (Abb. 25 und 26 S.30 bis S.31; Tabelle 13 und 14 S. 60)
- Reduzierung der Lärmempfindlichkeit des Lehrers oder der Lehrerin: Reduzierung der Steigung der Herzfrequenz in Abhängigkeit vom Lärmpegel im Klassenraum. (Reduzierung der Herzfrequenzreaktion auf den Stressor „Lärm“) (Abb. 50, S. 64)
- Ausgleich zwischen Ermüdungs- und Aktivierungsphasen (Herzfrequenz-Trendwerte) der Lehrerin oder des Lehrers (siehe Kapitel 2.2.) (Abb. 48 und Abb. 49 S. 63)
- Reduzierung oder Ausbleiben der Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels bei Wechsel zu differenzierten Arbeitsformen (Abb. 19, 20, 21 S. 27 und S. 28)
- Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Schüler (siehe Kapitel 2.2.2.)
- Verbesserung der Lehrer-Schüler-Beziehung („kommunikative Klima“) (siehe S. 65 bis 68)

Die Kosten der Akustikplatten (etwa 10 Euro pro m<sup>2</sup>) für diese Sanierung belaufen sich laut Angaben des Produktkatalogs<sup>325</sup> auf etwa 400 Euro. Der Maximalpreis der Akustikplatten für ein Dezibel<sup>326</sup> Lärmpegelsenkung (tatsächlich und minimal) beläuft sich in etwa auf 52 Euro, der Minimalpreis beträgt etwa 26 Euro. Der Maximalpreis der Akustikplatten für ein Dezibel<sup>327</sup> Lehrersprechpegelsenkung (minimal) beläuft sich in etwa auf 72 Euro, der Minimalpreis beträgt etwa 36 Euro.

Diese Selbsthilfemaßnahmen sind zur Reduzierung der Nachhallzeiten bei hohen Frequenzen gut geeignet. Für die Nachhallzeiten der tiefen Frequenzen wirken diese Maßnahmen meistens nicht und es muss professionelle Hilfe in Anspruch genommen werden. Ausreichend niedrige Nachhallzeiten in der 250 Hz Oktave sind laut Untersuchungen in Unterrichtsräumen von Mommertz<sup>328</sup> für die Sprachverständlichkeit erwartungsgemäß sehr wichtig. Damit Akustiksysteme (Akustikdecken) im tieffrequenten Bereich wirksam sind, müssen sie in einer Bauhöhe von 20 bis 40 cm von der Decke angebracht werden. Dies ist laut Kautsch<sup>329</sup> in Schulaltbauten der Jahre 1950 bis 1970 oft nicht möglich, da die Raumhöhe nicht ausreichend ist. An der TU Graz wurde in einem Forschungsprojekt ein neuartiger aufgespritzter und verputzter Zellulose-Kompaktabsorber entwickelt und in einem Klassenraum des Grazer Keplergymnasiums erprobt. Ein Vorteil dieses Absorbers liegt einerseits in seinen guten akustischen Eigenschaften (gleichmäßiger Nachhallverlauf über den gesamten Frequenzbereich, siehe Abbildung), andererseits in seinem positiven thermisch-hygrischen Verhalten. Dieser Absorber kann außerdem an gekrümmtem Untergrund angewendet werden. Genauere Details sind aus Graber<sup>330</sup> oder Kautsch<sup>331</sup> zu entnehmen.



**Abb. 249:** Nachhallzeit eines Klassenraums im Bundesrealgymnasium Keplerstrasse Graz vor (a) und nach (b) der Sanierung mit Zellulose-Kompaktabsorber mit Berücksichtigung von 32 Personen. [GRABER2]

<sup>325</sup> Produktkatalog 2009/10 der Firma Baustoff + Metall GmbH (<http://www.baustoff-metall.com>) (S.110)

<sup>326</sup> 1 dB(A)

<sup>327</sup> 1 dB(A)

<sup>328</sup> [MOMMERTZ4].

<sup>329</sup> [KAUTSCH1, S. 2].

<sup>330</sup> [GRABER2].

<sup>331</sup> [KAUTSCH2].

## 7.2. Pädagogische Maßnahmen

In dieser Diplomarbeit werden unter pädagogischen Maßnahmen alle pädagogischen Interventionen zur Lärminderung<sup>332</sup> aus der Literatur verstanden, die die Kinder dazu verleiten sollen, sich im Klassenraum oder innerhalb der Schule leiser zu verhalten. Diese Maßnahmen, die nicht immer erfolgreich sind, sind in der Literatur nur Teilaspekte (Bausteine) eines ganzen Handlungsmodells zur Förderung des Hörens und Zuhörens in Schulen.<sup>333</sup> Die Hör- und Zuhörbedingungen z. B. im Klassenraum oder in der Schule, die der Einzelne vorfindet, werden im Modell von Hagen als „sozialer Hörraum“ bezeichnet. Weitere Handlungsdimensionen sind in folgender Abbildung dargestellt:

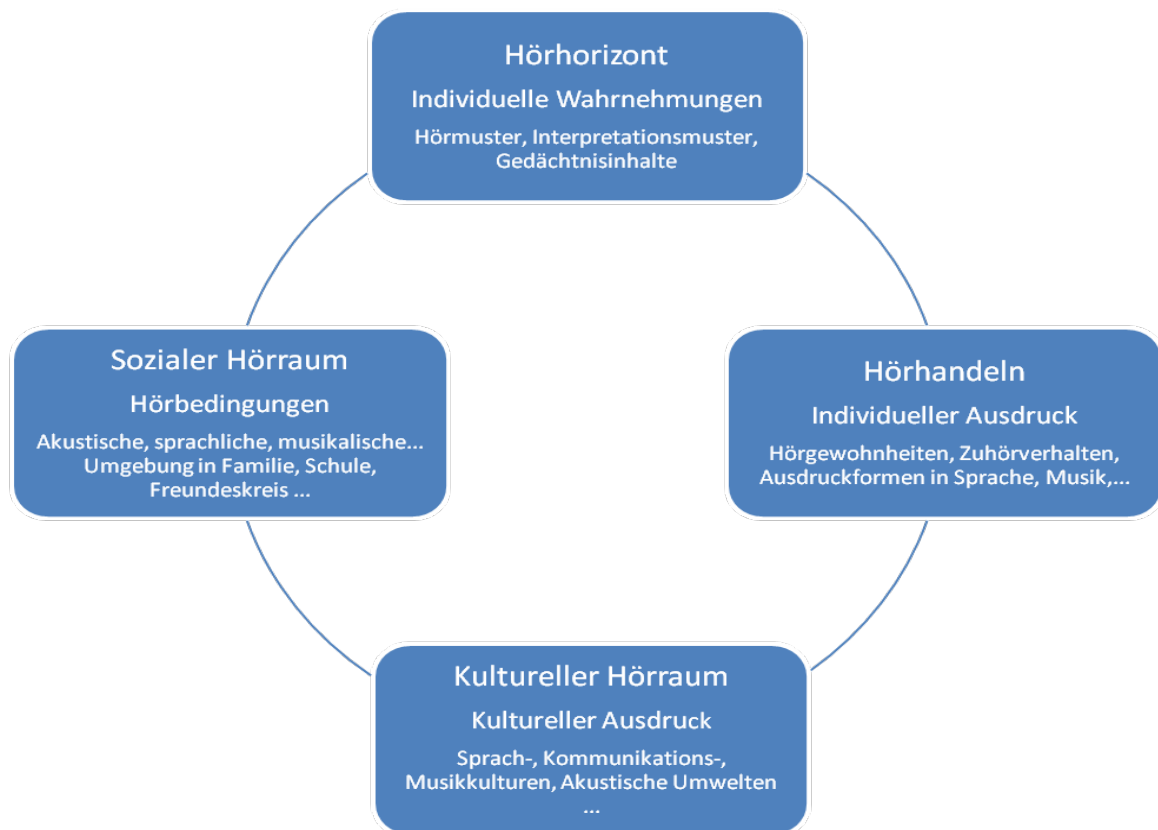


Abb. 250: Handlungsmodell „Zuhörförderung“ nach [HAGEN, S. 92]

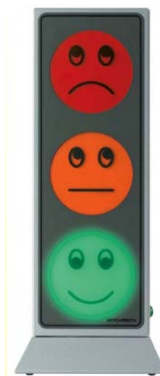
Unter „Hörhandeln“ versteht Hagen die Hörgewohnheiten als handelnde Auswahl aus den Angeboten sowie das Verhalten zur Gestaltung dieser Hörbedingungen (individuelle Zuhörverhalten). „Der Hörhorizont bezeichnet die Hör- und Interpretationsmuster sowie die

<sup>332</sup> [SCHOENWÄELDER1].

<sup>333</sup> [HAGEN].

*Gedächtnisinhalte, die zum Erkennen und Bewerten von Höreindrücken zur Verfügung stehen*“<sup>334</sup> Wiederholende und strukturierte Hörerfahrungen, wie sie zum Beispiel in einem „Klangparcours“ gezeigt werden, erweitern den Hörhorizont. Als vierte Dimension bleibt das kulturelle Angebot (Musik, Theater, Bildende Kunst,...), das das Zuhören fördern kann. Das Handlungsmodell von Hagen wurde innerhalb des Projektes „GanzOhrSein“<sup>335</sup> der Ludwig-Maximilians Universität München in 14 Schulen angewendet und evaluiert.<sup>336</sup> Die Schwerpunkte dieses Projektes lagen in einer Wahrnehmungsschulung und in einer Auseinandersetzung mit der Gestaltbarkeit von Hör- und Zuhörsituationen. Die Bausteine waren Hörclubs, in denen das Zuhören im Mittelpunkt stand, Radio, Sprechen und Sprache, Klangumwelt (Unterrichtsraum), Theater, Musik und Bildende Kunst.<sup>337</sup> Roos<sup>338</sup> zeigt zahlreiche Gestaltungsmöglichkeiten („Schallschutz“ von Türen und Fenstern durch Eigeninitiative verbessern), die in der Deutschen Schule Mailand (DSM) Anwendung fanden, jedoch laut Aussagen des Autors wenig Effekte auf die Raumakustik hatten. Sie sollten die Kinder vor allem für die akustische Umwelt sensibilisieren. Für diese Diplomarbeit bleibt festzuhalten, dass laut Aussagen von Hagen<sup>339</sup> über die Auswertungen der Evaluierung die Maßnahmen im Projekt Verbesserungen im sozialen Umgang, im zuhörförderlichen Lehrerverhalten und im Lärmverhalten der Klasse hervorbrachten.

Roos und Schönwälder<sup>340</sup> erwähnen in ihrer Publikation die erfolgreiche Anwendung des „SoundEar“, ähnlich der bekannten Lärmampel (siehe Abbildung), die aufleuchtet, falls der Lärmpegel einen bestimmten Wert überschreitet.



**Abb. 251:** Lärmampel: Rot >75 dB(A), Gelb >65 dB(A), Grün <65 dB(A) [GAEBELEIN1], [GAEBELEIN2]

---

<sup>334</sup> [HAGEN, S. 89].

<sup>335</sup> Siehe auch: <http://www.ganzohrsein.de>.

<sup>336</sup> [HAGEN], Siehe auch [Hagen2].

<sup>337</sup> [HAGEN2].

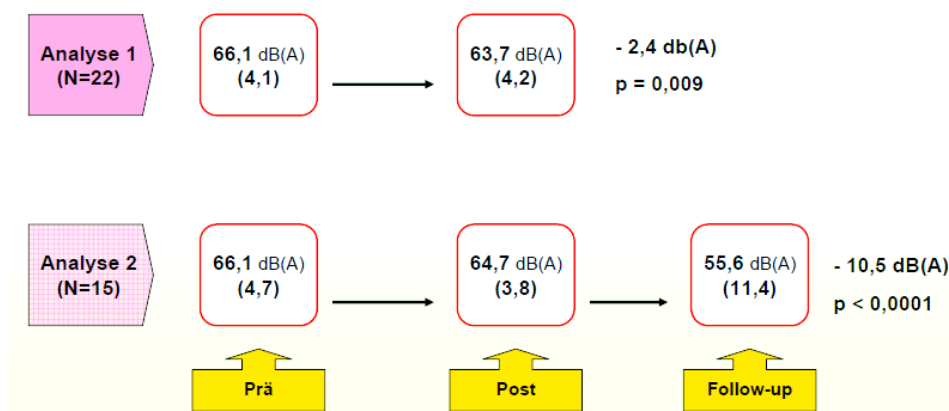
<sup>338</sup> [ROOS].

<sup>339</sup> [HAGEN, S. 212].

<sup>340</sup> [ROOS, S. 175], [SCHOENWAEELDER1, S. 120].



In einem Teilprojekt (TP Berlin) eines umfangreichen Projektes der Jahre 2004 bis 2007 namens „LANGE LEHREN – Gesundheit und Leistungsfähigkeit im Lehrberuf erhalten und fördern“ der TU Dresden, der Universitätsklinik Freiburg sowie zahlreicher anderer Projektpartner<sup>341</sup>, wurde der Einsatz einer „Lärmampel“ während dem Unterricht von Zweitklässlern bei 37 Lehrer/innen innerhalb der Dauer von 9 Wochen (1. Schulhalbjahr) evaluiert.<sup>342</sup> Eine weitere Follow-up-Phase (Nachhaltigkeitsphase) wurde angehängt (2. Schulhalbjahr). Jede Messung vor und nach dem Lärmampeleinsatz (Prä- und Postphase) und am Ende der Nachhaltigkeitsphase (Follow-up) erfolgte über 2 Unterrichtsstunden (2 mal 45 Minuten) als  $L_{Aeq,45min}$ . Für die Prä- und Postmessung wurden 22 Lehrer/innen ausgewertet, für die Prä-, Post- und Follow-up-Messung wurden 15 Lehrer/innen ausgewertet. Die Unterschiede zwischen den Schallpegel sind in folgender Abbildung ersichtlich:



**Abb. 252:** Schallpegeländerung  $L_{Aeq,45min}$  im Unterricht durch Lärmampeleinsatz bei 37 Lehrer/innen. [GAEBELEIN2]

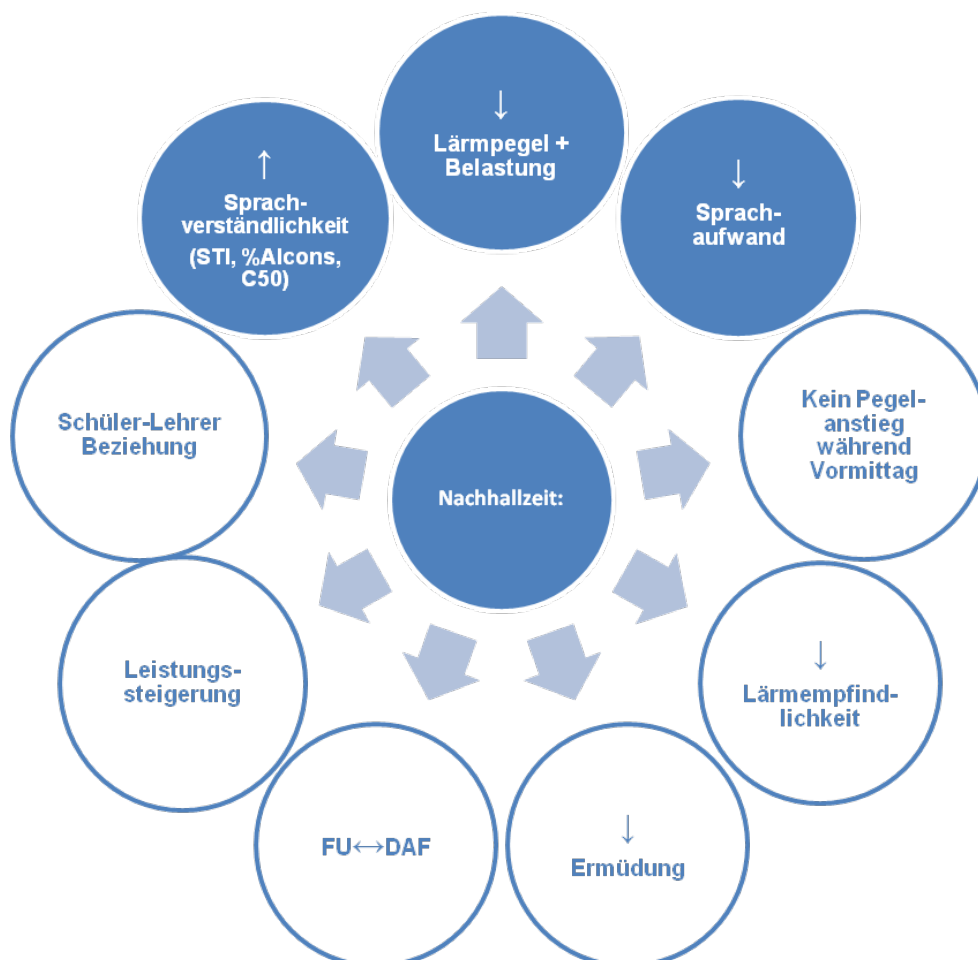
Die Post-Messung (nach 9 Wochen) zeigte eine Lärmpegelminderung von 2,4 dB(A), die Follow-up-Messung (nach 2. Schulhalbjahr) zeigte eine Lärmpegelminderung von 10,5 dB(A). Die Lärmampel hat also Einfluss auf das Lärmverhalten von Kindern im Unterricht.

<sup>341</sup> Siehe <http://www.tu-dresden.de/medlefo/content/>

<sup>342</sup> [GAEBELEIN1], [GAEBELEIN2].

## 8. Schlussfolgerung und Ausblick

Raumakustische Maßnahmen zur Verringerung der Nachhallzeit im Klassenraum können zusammenfassend folgende positive Effekte mit sich bringen:



**Abb. 253:** Positive Effekte durch Reduzierung der Nachhallzeit im Klassenraum

- Senkung des Lärmpegels (Arbeitsgeräuschpegel und Grundgeräuschpegel) im Klassenraum
- Zunahme der Sprachverständlichkeit
- Reduzierung der Lärmbelastung der Lehrerin oder des Lehrers
- Reduzierung der subjektiven Lärmbelastung der Schülerinnen und Schüler
- Abnahme des Sprachaufwands der Lehrer/innen.

- Reduzierung oder Ausbleiben der Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels für nacheinander folgende Unterrichtsstunden über den Vormittag
- Reduzierung der Lärmempfindlichkeit des Lehrers oder Lehrerin: Reduzierung der Steigung der mittleren Beanspruchung in Abhängigkeit vom Lärmpegel im Klassenraum. (Reduzierung der Herzfrequenzreaktion auf den Stressor „Lärm“)
- Ausgleich zwischen Ermüdungs- und Aktivierungsphasen der Lehrerin oder des Lehrers
- Reduzierung der Zunahme des Arbeits- und Grundgeräuschpegels bei Wechsel zu differenzierten Arbeitsformen
- Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Schüler
- Verbesserung der Lehrer-Schüler-Beziehung

Der Lärmpegel im Klassenraum ist noch zusätzlich von folgenden Variablen abhängig:



**Abb. 254:** Variablen, die den Lärmpegel beeinflussen können. Der Lärmpegel ist nicht abhängig vom Schulzweig!

Die Messungen an vier Schulen in dieser Diplomarbeit haben gezeigt, dass eine grobe akustische Typisierung von Klassenräumen in Abhängigkeit vom Baujahr möglich ist. Außerdem wurde versucht eine Verbindung zwischen der historischen Entwicklung des Unterrichts und der Klassenraumakustik zu bilden. Dieser Datensatz könnte in zukünftigen Projekten noch erweitert werden.

Aufbauend auf diese Diplomarbeit sind verschiedene weiterführende Module vorstellbar:

### ***Messtechnikmodul***

Entwickeln einer Anleitung zur normgerechten Durchführung von akustischen Messungen im Rahmen von Projektunterricht mit der Idee, die Nutzer (Lehrer und Schüler) zu ermächtigen, die Messung der akustischen Parameter selber durchführen zu können.

### ***Absorbermodul***

Dieses Modul würde sich mit der Dimensionierung und dem Bau von geeigneten Absorbern beschäftigen. Für verschiedene Szenarien (Selbstbau im Unterricht, Bau durch ortsansässige Handwerker, Bau durch facheinschlägige Firmen) soll außerdem eine Kostenschätzung oder eine Marktstudie erstellt werden. Es muss die Frage geklärt werden, wie bei einer Sanierung vorzugehen ist und ob in einem ersten Schritt die Geometrie des Klassenraumes an heutige Verhältnisse anzupassen ist.

### ***Umsetzungsmodul***

Dieses Modul besteht aus der Umsetzung von technischen oder pädagogischen Maßnahmen: Es sollen die baurechtlichen Fragen geklärt werden sowie Finanzierungsmöglichkeiten diskutiert werden. Geeignetes Informations- und Schulungsmaterial (Peer-System) bzw. pädagogische Maßnahmen (z. B. Bau und Installation von Lärmampeln) könnten entwickelt werden.

### ***Evaluierungsmodul***

Dieses Modul besteht aus der Dokumentation der Ergebnisse und der Evaluierung der Maßnahmen und der Projekte.

## 9. Literaturverzeichnis

[2003/10/EG] *Richtlinie 2003/10/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Februar 2003 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Lärm).*

[86/188/EWG] *Richtlinie 86/188/EWG des Rates vom 12. Mai 1986 über den Schutz des Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Lärm am Arbeitsplatz.*

[ANSI S12.60. 2002] American National Standards Institute inc., *Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, And Guidelines For Schools.* 2002.

[AHNERT] AHNERT S.: *Beschallungstechnik, Grundlagen und Praxis*, Hirzel Verlag, 1993

[AIOE1] Arbeitsinspektion Österreich. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit. *Arbeitsstätten, Lärm Überblick.* [Online] 2006.  
[http://www.arbeitsinspektion.gv.at/NR/rdonlyres/0AEF13B2-B26F-4598-B8A7-1C9B39E4F0FE/0/Laerm\\_Wirkungen\\_und\\_Gefahren\\_fuer\\_Gesundheit.pdf](http://www.arbeitsinspektion.gv.at/NR/rdonlyres/0AEF13B2-B26F-4598-B8A7-1C9B39E4F0FE/0/Laerm_Wirkungen_und_Gefahren_fuer_Gesundheit.pdf).

[AIOE2] Arbeitsinspektion Österreich. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit. *Arbeitsstätten, Lärm Überblick.* [Online] 2006.  
[http://www.arbeitsinspektion.gv.at/NR/rdonlyres/0EA6A80F-0398-48D9-A578-BBA852E5E769/0/Massnahmen\\_zur\\_Laermminderung\\_und\\_Schutzziele.pdf](http://www.arbeitsinspektion.gv.at/NR/rdonlyres/0EA6A80F-0398-48D9-A578-BBA852E5E769/0/Massnahmen_zur_Laermminderung_und_Schutzziele.pdf).

[ASA] *Position on the Use of Sound Amplification in the Classroom.* Acoustical Society of America, [online] 2008. <http://asa.aip.org/amplification.pdf>

[AUVA] ALLGEMEINE UNFALLVERSICHERUNGSANSTALT: Soziale Unfallversicherung, 2007, <http://www.auva.at> (9. 5. 2009)

[BABISCH1] BABISCH W.: *Gesundheitliche Wirkungen von Umweltlärm. Ein Beitrag zur Standortbestimmung.* Zeitschrift für Lärmbekämpfung. 2000, 47, S. 95-102.

[BABISCH2] BABISCH W.: *Lärmwirkungen bei Kindern und Erwachsenen - Qualitätsziele.* [Hrsg.] BFI Bundesinstitut für Risikobewertung, Berlin 2004, [http://www.bfr.bund.de/cm/232/laermwirkungen\\_bei\\_kindern\\_und\\_erwachsenen\\_qualitaetsziele.pdf](http://www.bfr.bund.de/cm/232/laermwirkungen_bei_kindern_und_erwachsenen_qualitaetsziele.pdf), 2004.

[BARTSCH] BARTSCH H.J.: *Taschenbuch Mathematischer Formeln.* Fachbuchverlag Leipzig 19. Auflage.2001

[BADDELEY] BADDELEY A.: *Essentials of human memory. Kapitel 3: Working Memory.* Oxford Psychology Press, Oxford 1999.

- [BERG] BERG D., IMHOF M: *Zuhören lernen - Lernen durch Zuhören*. [Buchverf.] F. Sedlak. *Persönlichkeitsentwicklung und Gemeinschaftsförderung*. Wien, 1996, S. 39-53. zit.n.[KLATTE8]
- [BERNDT1] BERNDT J., SCHOENWALDER H.G., STROEVER F. et al.: *Belastung und Beanspruchung von Lehrerinnen und Lehrern*. [Buchverf.] Schick A., Meis M., Klatte M. et al. *Hören in Schulen. Beiträge zur psychologischen Akustik. Ergebnisse des neunten Oldenburger Symposiums zur psychologischen Akustik*. Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg, Oldenburg 2003, S. 289-313.
- [BERNDT2] BERNDT Jörg, STROEVER Frauke, TIESLER Gerhart: *Ein gesunder Geist in einem gesunden Körper*. Jahrbuch der Lehrerforschung und Bildungsarbeit Bd.3. Juventa, 2002.
- [BIRNSTINGL] BIRNSTINGL S., FELLNER M. und GRAF F.: *DAGA. Measurements of Room Acoustic Parameters in Auditoriums by Simulating the Audience by Molton Cloth*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2003.
- [BISTAFA] BISTAFA S., BRADLEY J: *Predicting reverberation times in a simulated classroom*, in: JASA 2000, 108 (4).
- [BISTAFA2] BISTAFA S., BRADLEY J.: *Revisiting Algorithms for predicting the Articulation Loss of Consonants (Alcons)* in: JAES Vol.: 48, No. 6, 2000
- [BISTRUP] BISTRUP M. L., HYGGE S., KEIDING L. et al.: *Health effects of noise on children and perception of the risk of noise*. [Hrsg.] Marie Louise Bistrup, National Institute of Public Health, Dänemark, Kopenhagen 2001. [online]  
<http://www.si-folkesundhed.dk/upload/health-effects-noise-children.pdf>
- [BORMANN] BORMANN V., HEINECKE-SCHMITT R., FUDER G. *Sprachverständlichkeit in Schulen bei Hörminderung*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2003.
- [BRADLEY1] BRADLEY J. S.: *Auditorium acoustics measures from pistol shots*, in: JASA 1985, 80(1), S. 199-205.
- [BRADLEY2] BRADLEY J. S.: *Speech intelligibility studies in classrooms*, in: JASA 1986, 80(3).
- [BRADLEY3] BRADLEY J. S., SATO H.: *Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms*, in: JASA. 2008, 123, S. 2064-2077.
- [BRADLEY4] BRADLEY J. S., SATO H.: *The intelligibility of speech in elementary school classrooms*, in: JASA. 2008, 123(4), S. 2078-2086.
- [BRAKE] BRAKE P., BUSBY S.: *Noise levels in New Zealand junior classrooms: their impact on hearing and teaching*, in: New Zealand Medical Journal, 1994, 107 n. 985, S. 357-358.

[BRAND1] BRAND T., BUSCHERMOEHLE M.: *Moderne Verfahren der Audiometrie*. [Buchverf.] HörTech GmbH. *Materialien zum Intensivkurs: Audiologische Technik für Einsteiger*, Oldenburg 2008.

[BRAND2] BRAND T., BEUTELMANN R., WAGENER K.: *Sprachverständlichkeit und Raumakustik aus audiologischer Sicht*, in: Schick A., Klatte M., Meis M. et al.: *Hören in Schulen. Ergebnisse des neunten Oldenburger Symposiums zur psychologischen Akustik*. Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg, Oldenburg 2003. S.203-214

[BRONSTEIN] BRONSTEIN I.N., SEMENDJAJEW K.A., MUSIOL G., MÜHLIG H.: *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch. 5. Auflage, 2001.

[BRUEL&KJAER] *Application Note: Measuring Speech Intelligibility Using DIRAC — Type 7841*. [Online] 2003. <http://www.bksv.com/doc/bo0506.pdf>.

[BUILDING] Building Bulletin 93. 2003. [Online] 2003. [http://www.teachernet.gov.uk/\\_doc/5649/ACF12DC.pdf](http://www.teachernet.gov.uk/_doc/5649/ACF12DC.pdf).

[CHIBICI] CHIBICI Bernd: *Die Lärmspirale. Vom Umgang mit einer immer lauterer Welt*. Verlaghaus der Ärzte GmbH, Wien 2007.

[DAVIS] DAVIS C.: *Measurement of %ALcons*, in: JAES, 1986, Vol.: 34 No.11

[DIN 18031] DIN 18031. 1983: *Umgebungsbedingungen in Schulräumen. Grundlagen für die Bewertung. Fachbericht*. Deutsches Institut für Normung, 1983.

[DIN 18041] DIN 18041. 2004: *Hörsamkeit in kleinen bis mittelgrossen Räumen*. : Deutsches Institut für Normung, 2004.

[DIN 4109] DIN 4109. 1989: *Schallschutz im Hochbau. Anforderungen und Nachweise*. : Deutsches Institut für Normung, 1989.

[ECOPHON] Ecophon 2006: *Mit allen Sinnen lernen. Akustische Ergonomie in Bildungsstätten*. Saint-Gobain Ecophon GmbH, Lübeck 2006.

[EVANS1] EVANS G. W., LEPORE S. J.: *Non-auditory Effects of Noise on Children: A Critical Review*, in: Children's Environments, 1993, 10, S. 42-72.

[EVANS2] EVANS G., MAXWELL L.: *Chronic noise exposure and reading deficits. The mediating effects of language acquisition*, in: Environment and Behavior Vol.29 No.5, Sage Publications Inc. 1997

[FASOLD] FASOLD W., VERES E.: *Schallschutz + Raumakustik in der Praxis*. Huss-Medien GmbH Berlin Verlag Bauwesen, Berlin 2003.

[FINITZO] FINITZO-HEIBER T., TILLMANN T.: *Room acoustic effects on monosyllabic word discrimination ability for normal and hearing impaired children*, in: Journal of Speech and Hearing Research. 1978, 21, S. 440-458.

[FUCHS] FUCHS V. Helmug: *Weniger Lärm in Kommunikations- und Schulungsräumen*, in: Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 2006, 2, S. 47-56.

[GAEBELEIN1] ZUEHR-GAEBELEIN M.: *Lärmampeinsatz in der Grundschule – ein Ansatz zur Lärmreduktion im Schulalltag*. Projektpräsentation Handlungsanleitung. Verbundprojekt „LANGE LEHREN“ IGES TU Dresden, 2007. [http://www.tu-dresden.de/medlefo//dateien/TP%20Berlin%20\(Handlungsanleitung%20Laermampeinsatz%2006.11.2007\).pdf](http://www.tu-dresden.de/medlefo//dateien/TP%20Berlin%20(Handlungsanleitung%20Laermampeinsatz%2006.11.2007).pdf)

[GAEBELEIN2] KULIK M., NOLTING H.D., ZUEHR-GAEBELEIN M., et al.: Evaluation des Projekts Lärmampeinsatz in der Grundschule. Projektpräsentation Evaluation. Verbundprojekt „LANGE LEHREN“ IGES TU Dresden, 2007. [http://www.tu-dresden.de/medlefo//dateien/TP%20Berlin%20\(Evaluation%20Laermampel%2006.11.2007\).pdf](http://www.tu-dresden.de/medlefo//dateien/TP%20Berlin%20(Evaluation%20Laermampel%2006.11.2007).pdf)

[GARDNER] GARDNER M. B.: *Effect of Noise on Listening Levels in Conference Telephony*, in: JASA, 1964, 36(12), S. 2354-2362.

[GRABER] GRABER G., WESELAK W.: *Skriptum zur Vorlesung Raumakustik*. TU Graz, Graz 2007/2008.

[GRABER2] GRABER G., DROTTLEFF H., EGGER J., et al.: *Entwicklung eines verputzten Zelluloseabsorbers*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2006, S.209-210

[GREEN] GREEN K., PASTERNAK B. S., SHORE, R. E.: *Effects of aircraft noise on reading ability of school-age children*, in: Arch. Environm. Health 1982, 37, S. 24-31. zit. n. [MASCHKE1]

[GUNDERMANN] GUNDERMANN H., LUETH, C.: *Zur Problematik der Stimmleistung bei Lehrern während des Unterrichts*, in: Folia Phoniatica. 1964, 16, S. 243-248.

[GUSKI1] GUSKI R.: *Der Begriff "Lärm" in der Lärmforschung*, in: Kampf dem Lärm, 1976, 23, Heft 2, S. 42-50.

[GUSKI2] GUSKI R., WUEHLER K.: *Sprachliche Kommunikation am Arbeitsplatz und Geräuschbelastung*, in: Zeitschrift für Lärmbekämpfung. 1989, 36, S. 31-36.

[HAGEN] HAGEN M. Förderung des Hörens und Zuhörens in der Schule. Begründung, Entwicklung und Evaluation eines Handlungsmodells. Inaugural-Dissertation Ludwig Maximilians-Universität München. 2003. [http://edoc.ub.uni-muenchen.de/2239/1/Hagen\\_Mechthild.pdf](http://edoc.ub.uni-muenchen.de/2239/1/Hagen_Mechthild.pdf)

[HAGEN2] HAGEN M., HEMMER-SCHANZE C., HUBER L. et al.: GanzOhrSein – ein Projekt zur Hör- und Zuhörförderung an Schulen, in Schick A., Klante M., Meis M. et al: *Hören in Schulen. Beiträge zur psychologischen Akustik. Ergebnisse des neunten oldenburger Symposiums zur psychologischen Akustik*. Bibliotheks- und Informationssystem der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Oldenburg 2003, S.359-377

[HAINES] HAINES M. M., STANSFELD S. A., JOB R. F. S. et al.: *Chronic aircraft noise exposure, stress responses, mental health and cognitive performance in school children*, in: Psychological Medicine 31, S. 265-277 Cambridge University Press 2001.

[HECKER] Hecker, R.: *Lärmbelastung in der Schule*, in: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft. 1994, 48 (2), S. 90-98.



[HELLBRUECK1] HELLBRUECK J., SONOKO K., NAMBA S. : *Irrelevant Background Speech and human performance. Is there long-term habituation?*, in: J. Acoust. Soc. Japan, 17(5), 1996.

[HELLBRUECK2] HELLBRUECK Jürgen: *DAGA 2007. Wahrnehmung und Wirkung von Schall - Akustik zwischen Physik und Psychologie.* , in: DAGA Fortschritte der Akustik 2007, S. 17-22.

[HEUSDEN] HEUSDEN E. van, PLOMB R., POLS L. C. W.: *Effect of Ambient Noise on the vocal output and the preferred listening level of conversational speech*, in: Applied Acoustics 1979, 12, S. 31-43.

[HODGSON1] HODGSON M.: *Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classrooms*, in: JASA 1999, 106, S. 1810-1819.

[HODGSON2] HODGSON M., REMPEL R., KENNEDY S.: *Measurement and prediction of typical speech and background-noise levels in university classrooms during lectures*, in: JASA, 1999, 105, S. 226-233.

[HOTTER1]: HOTTER E., ZOLLNERITSCH J.. *Lärm in der Schule*. Verlag Leykam, Graz, 2009. (PDF-Datei)

[HOTTER2]: HOTTER E., ZOLLNERITSCH J.: *Lärm in der Schule. Ein Arbeitsbuch*. Verlag Leykam, Graz, 2008.

[HOUTGAST] HOUTGAST T.: *The effect of ambient noise on speech intelligibility*, in: Applied Acoustics. 1981, 14, S. 15-25.

[HYGGE] HYGGE S.: *Classroom Experiments on the Effects of Different Noise Sources and Sound Levels on Long-term Recall and Recognition in Children*, in: Applied Cognitive Psychology. 2003, 17, S. 895-914.

[ISING1] ISING H., Plath P., Rebentisch E., et al.: *Lärmbeurteilung - Gehörschäden. Wirkungen von Lärm auf das Gehörorgan - Effekte, Mechanismen, Prävention* -. [Hrsg.] BAuA. Dortmund, 1996.

[ISING2] ISING H., SUST Ch., REBENTISCH E.: *Lärmbeurteilung - Extra-aurale Wirkungen. Auswirkungen von Lärm auf Gesundheit, Leistung und Kommunikation. Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse Nr. 98*. [Hrsg.] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund 1996.

[ISO 1999] ISO 1999:1990-01: *Bestimmung der berufsbedingten Lärmexposition und Einschätzung der lärmbedingten Hörschädigung*.: International Organization for Standardization (ISO), 1990. zit. n. [VDI 2058 Bl.2]

[JONES] JONES D. M., MACKEN W. J.: *Irrelevant Tones Produce an Irrelevant Speech Effect: Implications for Phonological Coding in Working Memory*, in: Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition. 1993, 19/2, S. 369-381.

[JOSSERAND] JOSSERAND P., OCCELLI M. 1989: *Réduire le bruit en milieu scolaire*, in: Proceedings 8th Symposium on Environmental Acoustics. 1989, S. 161-164. zit. n. [KLATTE8]

[KALIVODA] KALIVODA M. T., STEINER J. W. [Hrsg.]: *Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik*. Springer Verlag, Wien 1998.

[KAUTSCH1] KAUTSCH P., HENGESBERGER H.: Lärminderung in Schulen, in: Fachmagazin: Sichere Arbeit [Hrsg.] Allgemeine Unfallversicherungsanstalt. Bohmann Verlagsgruppe, 2007/2 S.11. [http://www.sicherearbeit.at/downloads/download\\_2848.pdf](http://www.sicherearbeit.at/downloads/download_2848.pdf)

[KAUTSCH2] KAUTSCH P., DROTTLEFF H., EGGER J., GRABER G. et al.: Aufgespritzte und verputzte Zellulose-Kompaktabsorber. Untersuchungen zur grundsätzlichen Eignung aufgespritzter und verputzter, hygrophil aktivierender Zellulose-Schallabsorber. [http://www.hausderzukunft.at/nw\\_pdf/0652\\_zellulose\\_kompaktabsorber.pdf](http://www.hausderzukunft.at/nw_pdf/0652_zellulose_kompaktabsorber.pdf)

[KAMPS] KAMPS P., OBERDÖRSTER M.: *Akustik in Klassenzimmern*, in: Huber L., Kahlert J., Klante M.: *Die akustisch gestaltete Schule. Auf der Suche nach dem guten Ton*. Verlag Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2002, S. 89-100.

[KIRCHNER1] KIRCHNER T., SAND v.d. F. *Studie zur Raumakustik in Berliner Schulräumen*. Technische Universität Ilmenau, Akustikbüro Rahe-Kraft GbR, Berlin. [http://www.rahe-kraft.de/cms/klassenraumakustik/Studie\\_Klassenraumakustik.pdf](http://www.rahe-kraft.de/cms/klassenraumakustik/Studie_Klassenraumakustik.pdf)

[KIRCHNER2] KIRCHNER T. *Studie zur Raumakustik in Fluren und Speisesälen in Berliner Schulen*. Akustikbüro Rahe-Kraft, GbR, Berlin. [http://www.rahe-kraft.de/cms/klassenraumakustik/Studie\\_VerkehrsflaechenInSchulen.pdf](http://www.rahe-kraft.de/cms/klassenraumakustik/Studie_VerkehrsflaechenInSchulen.pdf)

[KLATTE1] KLATTE M., MEIS M., JANOTT C. et al.: *Zum Einfluss der Sprachverständlichkeit auf kognitive Leistungen: Eine Studie mit Grundschulkindern*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2002, S. 474-475.

[KLATTE2] KLATTE M., HELLBRUECK J.: *Der "Irrelevant Speech Effect": Wirkungen von Hintergrundschaall auf das Arbeitsgedächtnis*, in: Z. für Lärmbekämpfung. 1993, 40, S. 91-98.

[KLATTE3] KLATTE M., JANOTT C.: *Zur Bedeutung der Sprachverständlichkeit in Klassenräumen. Eine Untersuchung mit Grundschulkindern*, in: Huber L., Kahlert J. und Klante M.: *Die akustisch gestaltete Schule. Auf der Suche nach dem guten Ton*. Verlag Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2002, S. 74-86.

[KLATTE4] KLATTE M., MEIS M., NOCKE C., et al: *Einblicke. Akustik in Schulen: Können Sie denn nicht zuhören?!* In: Einblicke, 2002, 35. <http://www.psychologie.uni-oldenburg.de/maria.klatte/Forschungsgebiete/laerminschulen.pdf>

[KLATTE5a] KLATTE M., SUKOWSKI H., MEIS M., et al.: *Effects of irrelevant speech and traffic noise on speech perception and phonological short-term memory in children aged 6 to 7 years*, in: CFA/DAGA 2004, S. 193-194.

[KLATTE5b] KLATTE M., MEIS M., NOCKE C. et al.: Können Sie denn nicht zuhören?! Akustische Bedingungen in Schulen und ihre Auswirkungen auf Lernende und Lehrende, in: Schick A., Klante M., Meis M. et al.: *Hören in Schulen. Beiträge zur psychologischen Akustik. Ergebnisse des neunten oldenburger Symposiums zur psychologischen Akustik*. Bibliotheks- und Informationssystem der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Oldenburg 2003, S. 233-252.

[KLATTE6] KLATTE M., BASTIAN J., MEIS M. et al.: *Wirkungen von Hintergrundgeräuschen und Nachhall auf Sprachverstehen und Arbeitsgedächtnis in verschiedenen Altersgruppen*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2007

[KLATTE7] KLATTE M., KILCHER H., HELLBRUECK J.: *Wirkungen der zeitlichen Struktur von Hintergrundsall auf das Arbeitsgedächtnis und ihre theoretischen und praktischen Implikationen*, in: Zeitschrift für Experimentelle Psychologie. 1995, Bd. XLII, 4, S. 517-544.

[KLATTE8] KLATTE M., MEIS M., SCHICK A.: *Lärm in Schulen - Auswirkungen auf kognitive Leistungen von Kindern*, in: Huber L., Kahlert J. und Klatte M. [Hrsg.]: *Die akustisch gestaltete Schule. Auf der Suche nach dem guten Ton*. Edition Zuhören. Verlag Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2002, Bd. III, S. 19-42.

[KLATTE9] KLATTE M., SCHICK A., MEIS M.: *Wirkungen von Lärm und Nachhall auf Kinder: Ergebnisse aus Labor- und Feldstudien*. Präsentation vom 29.5.2008 für den Bayerischen Lehrer- und Lehrerinnenverband (BLLV)  
[http://www.bllv.de/cms/fileadmin/Dateien/Land-PDF/Aktion/Laerm/Praesentation1\\_Klatte.pdf](http://www.bllv.de/cms/fileadmin/Dateien/Land-PDF/Aktion/Laerm/Praesentation1_Klatte.pdf)

[KORN] KORN T. S.: *Effect of Psychological Feedback on Conversational Noise Reduction in Rooms*, in: JASA. 1954, 26(5), S. 793-794.

[KOSZARNY1] KOSZARNY Z., JANKOWSKA D.: *Determination of acoustic climate inside elementary*, in: Roczniki Panstwowego Zakladu Higieny. 1995, 46, S. 305-314. zit. n. [SCHICK1]

[KOSZARNY2] KOSZARNY Z., JANKOWSKA D.: *Determination of acoustic climate inside high schools in comparison with elementary schools*, in: Roczniki Panstwowego Zakladu Higieny. 1996, 47, S. 423-439. zit. n. [SCHICK1]

[KRYUKOVA] KRYUKOVA A., ABRAMCHUK T.: *The Noise Effect on the Fatiguability of Schoolchildren*. International Symposium on Health Effects of Industrial Noise, 1991. zit. n. [SCHICK1]

[LAZARUS1] LAZARUS H., SUST A. Charlotte, STECKEL R. et al.: [Hrsg.]: *Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Springer Verlag, Berlin – Heidelberg 2007.

[LAZARUS2] LAZARUS R., LAUNIER R.: *Stressbezogene Transaktionen zwischen Personen und Umwelt*, in: Jürgen R. NITSCH: *Stress*. Hans Huber Verlag, Bern – Stuttgart – Wien 1981.

[LAZARUS3] LAZARUS-MAINKA G., LEUSHACKE L.: *Die Belastungen von Sprecher und Hörer während einer sprachlichen Kommunikation unter Geräuscheinwirkung*, in: Psychologie und Praxis: Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie. 1985, 29(3), S. 107-115.

[LEISTNER] LEISTNER P., HELLBRUECK J., KLATTE M. et al.: *Lärm in der schulischen Umwelt und kognitive Leistungen bei Grundschulkindern*. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS. Stuttgart, Eichstätt, Oldenburg, 2006.  
<http://bwplus.fzk.de/berichte/SBer/ZO3W23004+23005SBer.pdf>

- [LEXIKON] Lexikon der Psychologie. 2001. Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg – Berlin 2001.
- [LOMBARD] Lombard, E.: *Le signe de l'élévation de la voix*, in : *Annales des maladies de l'oreille, du larynx du nez et du pharynx*. 1911, 37, S. 101-119.
- [LULEY] LULEY M.: „*Eine kleine Geschichte des deutschen Schulbaus*“. Erziehungskonzeptionen und Praxis. Peter Lang Europäischer Verlag der Wissenschaften.
- [MACHNER] MACHNER R., TIESLER G.: *Akustische Ergonomie - Theorie und Wirklichkeit einer optimalen Klassenraumakustik*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2008, S. 719-720.
- [MACKENZIE] MACKENZIE D. J., AIREY S.: *Classroom Acoustics. A Research Project*. Heriot-Watt University, Edinburgh 1999.
- [MARKIDES] MARKIDES A.: *Speech levels and speech-to-noise ratios*, in: *British Journal of Audiology*. 1986, 20, S. 115-120.
- [MASCHKE1] MASCHKE C., HECHT K.: *Lärmexposition und Gesundheit bei Kindern und Jugendlichen. Grundlagen und Forschungsergebnisse. Deutscher Fluglärmdienst* [online] [http://www.dfld.de/Downloads/Maschke\\_Hecht.pdf](http://www.dfld.de/Downloads/Maschke_Hecht.pdf)
- [MASCHKE2] MASCHKE C., WIDMANN U.: *Schallwirkungen beim Menschen*, in: MUELLER G. und MOESER M.. *Taschenbuch der Technischen Akustik*. Springer Verlag, Berlin 2004, S. 81-102
- [MEIS] MEIS M., UYGUN A., JANOTT C., et al. : *Zur Wirkung von aktiven und passiven raumakustischen Maßnahmen auf die Geräuschwahrnehmung und Lebensqualität von Schülern: Ergebnisse einer prospektiven Längsschnittstudie*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2003, S. 630-631.
- [MEIS2] MEIS M., BECKER B., HOFFMANN S., et al.: *Wie bewerten Schüler ihre Lernumgebung? Ergebnisse eines Feldexperimentes zur Sanierung von Klassenräumen aus einer ganzheitlichen Perspektive*, in DAGA Fortschritte der Akustik 2005, S. 439-440
- [MOMMERTZ] MOMMERTZ E., ENGEL G.: *Besser leise lernen*. Trockenbau Akustik, 2002, 11.
- [MOMMERTZ2] MOMMERTZ E.: *Akustische Planung von Schulneubauten an ausgewählten Beispielen*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2005, S.353-354.
- [MOMMERTZ3] MOMMERTZ E.: *Muss es im Unterricht immer so laut sein? Bauliche Massnahmen zur Lärmreduzierung* in: Huber L., Kahlert J. und Klante M. [Hrsg.]: *Die akustisch gestaltete Schule. Auf der Suche nach dem guten Ton*. Edition Zuhören. Verlag Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2002, Bd. III, S. 101-116
- [MOMMERTZ4] MOMMERTZ E., REENTS P., GRABER G.: *Bedeutung kurzer Nachhallzeiten bei tiefen Frequenzen für die raumakustische Qualität in Unterrichtsräumen*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2006, S.575-576.

[MUELLER] MUELLER G., MOESER.: *Taschenbuch der Technischen Akustik*. 3. Auflage : Springer Verlag, Berlin – Heidelberg 2004. S.81-101

[NEUMAN] NEUMAN A. C., HOCHBERG I.: *Children's perception of speech on reverberation*, in: JASA 1983, 73, S. 2145-2149.

[NITSCH] NITSCH J.: *Stresstheoretische Modellvorstellungen*, in: Nitsch J. R. : *Stress*. Huber Verlag, Bern – Stuttgart –Wien 1981. S.52.

[NIU] NIU W.: *Effects of various white noise levels on psychological cognition of school children*, in: Chinese J. of Preventive Medicine, 1990, 26, S. 344-346. zit. n. [SCHICK1]

[ÖAL-RL Nr.3] ÖAL-Richtlinie Nr.3 (Bl.2). 1990. *Schalltechnische Grundlagen für die Beurteilung von Lärm. Lärm am Arbeitsplatz*. Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung (ÖAL), Wien 1990.

[ÖAL-RL Nr.6/18] ÖAL-Richtlinie Nr.6/181991*Die Wirkungen des Lärms auf den Menschen. Beurteilungshilfen für den Arzt*. Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung (ÖAL), Wien 1991.

[OBERDOERSTER1] OBERDOERSTER M., TIESLER G.: *Akustische Ergonomie der Schule*. [Hrsg.] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Fb1071, Wirtschaftsverlag NW, Dortmund – Berlin – Dresden 2006.

[OBERDOERSTER2] OBERDOERSTER M., TIESLER G.: *"Modern Teaching" needs modern conditions - room acoustics as an ergonomic factor*, in: International Congress on Acoustics (ICA). ICA 2007, S. 1-5.

[OBERDOERSTER3] : OBERDOERSTER M., TIESLER G.: *Raumakustische Ergonomie der Schule - eine Voraussetzung für "modernen" Unterricht*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2006, S. 569-570.

[OBERDOERSTER4] OBERDOERSTER M., TIESLER G.: *Seid bitte leise - Akustisch-ergonomische Arbeitsbedingungen für effizienten Unterricht*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2005, S. 355-356.

[OENORM EN ISO 3382]. OENORM EN ISO 3382. 1999: *Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter.*: Österreichisches Normungsinstitut, Wien 1999.

[OENORM B 8115-2]. OENORM B 8115-2. 2006: *Schallschutz und Raumakustik im Hochbau. Teil 2: Anforderungen an den Schallschutz.*: Österreichisches Normungsinstitut Wien, 2006.

[OENORM B 8115-3] OENORM B 8115-3. 2005: *Schallschutz und Raumakustik im Hochbau Teil 3: Raumakustik.*: Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2005.

[OENORM EN ISO 140-4] OENORM EN ISO 140-4. 1999: *Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen. Teil 4: Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden.*: Österreichisches Normungsinstitut, Wien 1999.

[OENORM EN ISO 9921] OENORM EN ISO 9921. 2003: *Ergonomie - Beurteilung der Sprachkommunikation.* : Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2003.

[OENORM EN ISO 11654] OENORM EN ISO 11654:1997: *Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden. Bewertung der Schallabsorption.* Österreichisches Normungsinstitut, Wien 1997

[OEVE] OEVE/OENORM EN 60268-16. 2004: *Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex.*: Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2004.

[OLSEN] OLSEN Wayne O.: *Average Speech Levels and Spectra in various Speaking/Listening conditions: A summary of Pearsons, Bennett, Fidell (1977) Report*, in: American Journal of Audiology. 1998, Vol. 7.

[PAPULA] PAPULA L.: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3*, Vieweg Verlag 2001.

[PEARSONS] PEARSONS K. S., BENNET R. L., FIDELL S. [Hrsg.]: *Speech levels in various noise environments.* Office of Health and Ecological Effects. Office of Research and Development. US Environmental Protection Agency, Washington DC 1977. EPA - 600/1-77-025.

[PEKKARINEN1] PEKKARINEN E., VILJANEN V.: *Effect of Sound-Absorbing Treatment on Speech Discrimination in Room*, in: Audiology. 1990, 29, S. 219-227.

[PEKKARINEN2] PEKKARINEN E., VILJANEN V.: *Acoustic conditions for speech communication in classrooms*, in: Scandinavian Audiology. 1991, 20, S. 257-263.

[PICKETT] PICKETT J. M.: *Limits of Direct Speech Communication in Noise*, in: JASA. 1958, 30(4), S. 278-281.

[RICKES] RICKES O., SCHMITZ A.: *Beeinträchtigt die Raumakustik der Schulgebäude die Gesundheit der Lehrkräfte?* in: DAGA Fortschritte der Akustik 2005, S. 343-344.

[RICKES2] RICKES O., GEMES A., HELFMANN H.: *Reduzierung des Lärmbelastung in Schulen durch Verbesserung der Raumakustik.* Gewerkschaft Erziehung und Wissenschaft Darmstadt, Staatliches Schulamt für den Landkreis Darmstadt-Dieburg und die Stadt Darmstadt, Unfallkasse Hessen. 2006  
<http://www.fluesterndesklassenzimmer.de/pdf/Selbsthilfe.pdf>

[RITTERSTAEDT] RITTERSTAEDT U., PAULSEN R., KASKA J.: *Geräuschsituation in und um Schulen unter Berücksichtigung der Belastung der Lehrer unter Lärm.* Westdeutscher Verlag, Opladen 1980.

[ROBERT KOCH] Robert KOCH-Institut: *BZGA. 2008. Erkennen - Bewerten - Handeln: Zur Gesundheit von Kindern und Jugendlichen in Deutschland.* [Hrsg.] Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung (bzga), Robert Koch-Institut ,Berlin – Köln 2008.  
[http://www.kindergesundheit-info.de/fileadmin/fileadmin-kgs/pdf/KiGGS\\_GPA.pdf](http://www.kindergesundheit-info.de/fileadmin/fileadmin-kgs/pdf/KiGGS_GPA.pdf)

[ROOS] ROOS U. *Akustisch gestaltete Schule. Ein Projekt zur Schulentwicklung in der Deutschen Schule Mailand*, in: [Buchverf.]Huber L., Kahlert J. und Klatte M. *Die akustische*

*gestaltete Schule. Auf der Suche nach dem guten Ton.* Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2002, S. 172-189.

[ROTHLAND] ROTHLAND M.: *Belastung und Beanspruchung im Lehrerberuf: Modelle, Befunde, Interventionen.* VS Verlag, 2007.

[RUDOW] RUDOW B.: *Die Arbeit des Lehrers. Zur Psychologie der Lehrertätigkeit, Lehrerbelastung und Lehrergesundheit.* Verlag Hans Huber, Bern, Göttingen, Toronto, Seattle, 1994.

[SANSOUCI]: SAN SOUCI S., GUERRA L., TEICHNER N.: *Classroom acoustics: Current and future criteria for the assessment of acoustics for learning*, in: Convention Paper 6794, AES 2006.

[SATO] SATO H., BRADLEY J. S.: *Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms*, in: JASA. 2008, 123 (4), S. 2064-2077.

[SCHICK1] SCHICK A., KLATTE M., MEIS M.: *Die Lärmbelastung von Lehrern und Schülern - ein Forschungsstandbericht*, in: Zeitschrift für Lärmbekämpfung. 1999, 46(3), S. 77-87.

[SCHICK2] SCHICK A., KLATTE M., SCHMITZ A.: *Lärminderung in Schulen. Umwelt und Geologie.* Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie [Hrsg.], Wiesbaden 2007. Bd. Heft 4. [http://www.hlug.de/medien/laerm/dokumente/Laermschutz\\_Heft\\_4.pdf](http://www.hlug.de/medien/laerm/dokumente/Laermschutz_Heft_4.pdf)

[SCHOENWAELDER1] SCHOENWAELDER H. G., BERNDT J., STROEVER F. et al.: *Lärm in Bildungsstätten - Ursachen und Minderung.* [Hrsg.] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA): Wirtschaftsverlag NW, Dortmund – Berlin – Dresden 2005. [http://www.baua.de/nn\\_8514/sid\\_8E679F9A8A51C52B9F5616F48C926786/de/Publikationen/Forschungsberichte/2004/Fb1030,xv=vt.pdf](http://www.baua.de/nn_8514/sid_8E679F9A8A51C52B9F5616F48C926786/de/Publikationen/Forschungsberichte/2004/Fb1030,xv=vt.pdf)

[SCHOENWAELDER2] SCHOENWAELDER H.G., BERNDT J., STROEVER F. et al.: *Belastung und Beanspruchung von Lehrerinnen und Lehrern.* [Hrsg.] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 2003

[SCHULZ] SCHULZ B., KLIMT F.: *Schule und Lärm*, in: Öffentliches Gesundheitswesen. 1979, 41, S. 191-200. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1979

[SENNHEISER] Fa. Sennheiser. *Nachhallzeit und Diskrimination: Auswirkungen.* Wedemark, 1997. zit. n. [SCHICK1]

[SHIELD] SHIELDS B., DOCKRELL J. E.: *External and internal noise surveys of London primary schools*, in: JASA. 2003, 115 (2), S. 730-738.

[SORA] SORA, Institute for Social Research and Analysis, Klinische Abt. Arbeitsmedizin AKH Wien.: *LehrerIn 2000. Arbeitszeit, Zufriedenheit, Beanspruchungen und Gesundheit der LehrerInnen in Österreich.* Im Auftrag von Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Bundesministerium für öffentliche Leistung und Sport, Gewerkschaft Öffentlicher Dienst. Wien, Oktober 2000. <http://www.bmukk.gv.at/medienpool/16164/lehrerin2000.pdf>

[SPRENG] SPRENG M.: *Die Wirkung von Lärm auf die Sprachentwicklung des Kindes*, in: Huber L., Kahlert J., Klante M.: *Die akustisch gestaltete Schule. Auf der Suche nach dem guten Ton*. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2002, S. 43-60.

[STANSFELD] STANSFELD S.A., BERGLUND B., CLARK C. et al.: (RANCH STUDY) *Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: a cross-national study*, in: Lancet. 2005, 365, S. 1942-1948.

[SUST1] SUST C. A., LAZARUS H.: *Lärmbeurteilung - Schule, Aus- und Weiterbildung. Auswirkungen von Geräuschen mittlerer Intensität in Schule, Aus- und Weiterbildung. Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse Nr.103*. [Hrsg.] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund 1997.

[SUST2] SUST C. A., LAZARUS Hans: *Die Wirkung von Lärm auf das Verständnis gesprochener Sprache*, in: Schick A., Meis M., Klante M. et al. *Hören in Schulen. Beiträge zur psychologischen Akustik. Ergebnisse des neunten Oldenburger Symposiums zur psychologischen Akustik*. Oldenburg : Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg, 2003, S. 191-202.

[TENNHARDT] TENNHARDT Hans-Peter: *Ein Beitrag zum Wissensstand und der Normung im Bereich der Klassenraumakustik*, in: Schick A., Klante M., Meis M., et al. *Hören in Schulen. Beiträge zur Psychologischen Akustik. Ergebnisse des neunten Oldenburger Symposiums zur psychologischen Akustik*. Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg, Oldenburg 2003.

[TIESLER1] TIESLER G.: *Die Last mit dem Lärm - Arbeitsalltag von Lehrern und Schülern*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2005, S. 341-342.

[TIESLER2] TIESLER G.: *Lärm in der Schule - Ein vermeidbarer Belastungsfaktor?* DAGA Fortschritte der Akustik 2003, S.632-633.

[TIESLER3] TIESLER G.: *Lärm in Schulen - subjektive Empfindung oder Realität?* [Buchverf.] Huber L., Kahlert J. und Klante M.. *Die akustische gestaltete Schule. Auf der Suche nach dem guten Ton*. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2002, S. 61-73.

[TIESLER4] TIESLER Gerhart: *Leise lernt leichter*. Trockenbau Akustik. 2005, 4.

[TIESLER5] TIESLER G., MACHNER R.: *Lärmstress im Klassenraum - Ergonomie der Schule*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2008, S. 721-722.

[TIESLER6] TIESLER G., OBERDOERSTER M.: *Lärm ein Stressor? - Raumakustische Ergonomie der Schule*, in: DAGA Fortschritte der Akustik 2006, S. 567-568.

[TIESLER7] TIESLER G. OBERDOERSTER M.: *Lärm in Bildungsstätten, Broschüre*. Herausgegeben von Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Dortmund 2006. [Online]: <http://www.inqa.de/Inqa/Navigation/publikationen.html>

[TIESLER8] TIESLER G.: *Noise - a stressor? Acoustic ergonomic of schools*. International Congress on Acoustics (ICA), 2007, S. 1-6.

[TIESLER9] TIESLER G., BERNDT J., STROEVER F.: *Laut = Laut? Eine orientierende Untersuchung zu Lärm in Schulen*, in: Beetz-Rahm S.; Denner L., Riecke-Baulecke T.:



*Jahrbuch für Lehrerforschung und Bildungsarbeit. Bd.3*, Juventa, Weinheim und München, 2002, S. 247-262.

[UYGUN] UYGUN A., WACK R.: *Die Auswirkung unterschiedlicher Decken- und Wandkonzepte auf die Klassenraumakustik*, in DAGA Fortschritte der Akustik 2008, S.723-724.

[VDI 2058 B1.2] VDI 2058 B1.2. 1988: *Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung*. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf 1988.

[VDI 2058 B1.3] VDI 2058 B1.3. 1999: *Beurteilung von Lärm am Arbeitsplatz unter Berücksichtigung unterschiedlicher Tätigkeiten*. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1999.

[VOLV] *Verordnung über den Schutz der Arbeitnehmer/innen vor der Gefährdung durch Lärm und Vibrationen (Verordnung Lärm und Vibrationen - VOLV)*, 2006.

[WALTZMAN] WALTZMAN S. B., LEVITT H.: *Speech interference level as a predictor of face-to-face communication in noise*, in: *JASA*. 1978, 63(2), S. 581-590.

[WEBSTER] WEBSTER J. C., KLUMPP R. G.: *Effects of Ambient Noise and Nearby Talkers on a Face-to-Face Communication Task*, in: *JASA*. 1962, 34(7), S. 936-941.

[WHITLOCK] WHITLOCK J., DODD G.: *Classroom acoustics - reverberation and the cafe effect... is the Lombard effect the key?* , in: International Congress on acoustics Madrid, ICA 2007.

[WHO]. *Guidelines for community noise*. Genf 1999. [online]  
<http://www.who.int/docstore/peh/noise/guidelines2.html>  
<http://whqlibdoc.who.int/hq/1999/a68672.pdf>

[YACULLO] YACULLO W. S., HAWKINS D. B.: *Speech recognition in noise and reverberation by school-age children.*, in: *Audiology*. 1987, 26, S. 235-246.

## 10. Anhang A: Details zu den Studien

### Details zu den Studien:

[GUNDERMANN] führten Messungen in 4 allgemeinbildenden Polytechnischen Oberschulen in Klassen von 1-10 mit durchschnittlich 30 Schülern und 100 Lehrern durch. Es sollten 3 Größen gemessen werden: 1. Die Lautstärke der Lehrerstimme, wie sie gewöhnlich im Unterricht hörbar ist, 2. die erhöhte Lautstärke und 3. der Störlärm, der sich laut Angabe aus „Bänkeknarren, Stühlescharren, unruhigen Bewegungen, unterrichtsfremdem Schwatzen, Außenlärm“ zusammensetzt. Diese Studie wurde innerhalb einer Studie zur Ausarbeitung eines Stimmeignungstestes für Lehrer durchgeführt.

[SCHULZ] führten Lärmpegelmessungen (mittlerer Schallpegel und Lärmspektren) während des Unterrichts, während den Pausen in Fluren und Treppenhäusern und in leeren Klassenräumen in vier Hamburger Schulen durch. Der Lärm wurde laut Aussagen der Autoren vor allem durch die Schüler erzeugt und weniger von Außengeräuschen oder Verkehrsgeräuschen.

[RITTERSTAEDT] untersuchten in 7 Schulen (17 KR) die Nachhallzeiten und die Unterrichtsgeräuschpegel. Dabei verwendeten sie die Meßgrößen:

LATM = der höchste während der Taktzeit aufgetretene Pegel (Takt: 3s) in A-Frequenzbewertung.

LAFm = über Messzeit gemittelte Pegel

LAF95 = Pegel, die 95 % der Messzeit überschritten werden mit Fast-Zeitkonstante

LAF1 = Pegel, die 1% der Messzeit überschritten werden mit Fast-Zeitkonstante.

Außerdem wurde der Lärmpegel in Pausenhöfen und Umgebung der 7 Schulen gemessen.

[MARKIDES] beschäftigte sich mit dem Sprachpegel von Lehrern und Schülern in Schulen für Schwerhörige sowie mit dem Hintergrundgeräusch dieser Gebäude.

In [PEARSONS, S. 27] wurden neben der Messung des Sprachpegels und der Sprachspektren des Lehrers bei unterschiedlicher Sprechanstrengung auch Messungen des Hintergrundgeräusches in jeweils zwei Schulen mit 20 Klassenräumen durchgeführt. Typische Besetzungen waren 23 Schüler. Die Fenster wurden normalerweise geschlossen. Die Werte wurden aus [PEARSONS] oder [OLSEN] entnommen. Der vom Lehrer eingehaltene SNR war 15 dB(A) in Schule I und 16 dB(A) in Schule II.

**Tabelle 148:** Mittlere Sprachpegel und mittlerer Hintergrundgeräuschpegel (während Unterrichts) in dB(A) für 20 KR in 2 Schulen, mit Standardabweichungen [OLSEN].

	Hintergrundgeräusch	Sprache 1m	Sprache 2m	Sprache 7m
Schule I	48 ( $\sigma = 2$ )	69 ( $\sigma = 4$ )	62 ( $\sigma = 5$ )	57 ( $\sigma = 4$ )
Schule II	51 ( $\sigma = 2$ )	73 ( $\sigma = 4$ )	66 ( $\sigma = 5$ )	62 ( $\sigma = 6$ )

In [PEKKARINEN2] wurde die Nachhallzeit, der Hintergrundgeräuschpegel und RASTI-Wert für Klassenräume im besetzten und unbesetzten Zustand gemessen. Im unbesetzten Zustand entstand das Hintergrundgeräusch, vor allem durch die Ventilation und durch Verkehrslärm.  $L_{Aeq}$  war in 15 von 24 besetzten Klassenräumen größer als 65 dB(A). Der SNR war in den meisten Klassenräumen größer als 15 dB(A).

Ziel von [HECKER] war es die Höhe der Lärmbelastung von Lehrern und Schülern während des Unterrichts zu ermitteln. Dabei wurde die Lärmemission  $L_{ASeq, 45min}^{343}$  für 5 Unterrichtsstunden von 8 Klassen (Altersgruppe: 14 bis 15 Jahren) gemessen. Während den Messungen waren 15 Schüler anwesend. Die Mikrofonpositionen 1 und 3 sollten die Immissionen der Lehrer repräsentieren (sie waren auf die Schüler gerichtet). Die Mikrofone 2 und 4 standen an einem zentralen Schülersitzplatz (sie waren auf die Lehrer gerichtet). Mikrofone 5 und 6 standen an Randsitzplätzen von Schülern, siehe [HECKER]. Außerdem wurde noch die Lärmemission in einer Sporthalle sowie in einem Arbeitsraum für Holzverarbeitung (5-min Takt) gemessen.

[HODGSON2] führten Messungen an 3-4 Positionen in 18 Vorlesungen von 11 Vorlesungsräumen der University of British Columbia durch. Dabei erstellten sie ein Modell, das unterschiedliche Lärmquellen in einem Vorlesungsraum vorhersagen soll.

Die berühmte und oft zitierte Studie der Heriot-Watt Universität Edinburgh [MACKENZIE] führte akustische Messungen sowie auch Sprachverständlichkeitstests mit WIP<sup>344</sup> in 70 Unterrichtsräumen von Primärschulen (Altersgruppe: 5 und 11 Jahren) in Schottland, England und Nordirland durch. Einige Unterrichtsräume wurden auch raumakustisch durch die Firma ECOPHON saniert.

[SCHOENWAELDER2] ist eine Untersuchung der beruflichen Belastung von Lehrerinnen (N=108) und Lehrern (N=70) an 3 Grundschulen und 2 Schulen der Sekundarstufe in Bremen, die auch die Lärmbelastung durch Schallpegelmessungen berücksichtigte. Eine Befragung der Lärmbelastung mittels Fragebogen konnte auf 1159 Lehrer/innen ausgeweitet werden.

[SCHOENWAELDER1] ist eine ebenfalls sehr bekannte Studie, in der 30 Klassenräume von vier Grundschulen und einer Schule der Sekundarstufe I raumakustische Messungen durchgeführt worden sind. Außerdem wurden in insgesamt 565 Unterrichtsstunden (1. bis 10. Schuljahr) alle geräuschwirksamen Ereignisse durch zwei Beobachter registriert. Es stellte sich heraus, dass die ersten und die letzten 5 Minuten jeder Unterrichtsstunde für organisatorische Aktivitäten genutzt wurden. Deshalb führte Schönwälder eine verkürzte Unterrichtsstunde von 35 min ( $L_{Aeq-k}$ ) ein.

[OBERDOERSTER1] hat Messungen an zwei Grundschulen „Stichnathstrasse“ (1.-4. Jahrgang, je 2 Klassen) (EG:  $RT > 0,5s$ , OG:  $RT < 0,5s$ ) und einer Baumberge-Schule (2. Klasse) jeweils vor und nach einer akustischen Sanierung durchgeführt.

---

<sup>343</sup> S = Slow.

<sup>344</sup> *Word Intelligibility by Picture Identification* ist ein Test, der die subjektive Qualität von Sprachübertragung (Sprachverständlichkeit) bestimmen soll. Dieser Test sowie auch der im deutschen Raum bekannte OIKi (Oldenburger Kinderreimtest) ist wegen der Bildarstellung auch für Kinder geeignet (siehe Kapitel 3).

**[LEISTNER]** untersuchte aus einer Auswahl von 60 Klassenräumen die Raumakustik von 21 Klassenräumen aus 8 Stuttgarter Grundschulen. Außerdem wurde kognitionspsychologische Untersuchungen (Lesen, Rechtschreiben, Lautdiskrimination, Anweisungsverständnis) durchgeführt und auf die Abhängigkeit der Nachhallzeit bezogen.

**[SHIELD]** führte Schallpegelmessungen in der Umgebung von 142 Schulen und in 140 Klassenräumen von 15 Schulen in London durch.

**[BRADLEY2]** führte akustische Messungen, Schallpegelmessungen und Sprachverständlichkeitstests in 10 besetzten Klassenräumen in Canada durch.

**[BRADLEY3], [SATO]** führte Schallpegelmessungen während dem Unterricht in 41 Klassenräumen in Ottawa und Umgebung durch. Dabei wurde auch der Lombard-Effekt des Lehrers bzw. Lehrerin gemessen.

## 11. Anhang B: Tabellen

**Tabelle 149:** „Guideline values“ der Weltgesundheitsorganisation (WHO) für Lärm [WHO, S. 47].  
Übersetzung nach [BABISCH].

Umweltbereich	Kritische Effekte	Mittelungspegel	Zeitbasis [Stunden]	Maximalpegel L <sub>max, fast</sub> [dB(A)]
		Leq [dB(A)]		
Wohnbereich (außen)	Erhebliche Belästigung (tags und abends)	55	16	-
	Mäßige Belästigung (tags und abends)	50	16	-
Wohnung (innen)	Sprachverständlichkeit und mäßige Belästigung (tags und abends) Schlafstörung, nachts	35	16	
Schlafraum (außerhalb)	Schlafstörung, Fenster offen (Messwerte vor dem Fenster)	45	8	60
Klassenraum (Schule), Vorschule (innen)	Sprachverständlichkeit, Störung von Informationsaufnahme, Mitteilungen und Kommunikation	35	Unterricht	-
Vorschule, Schlafräume (innen)	Schlafstörung	30	Ruhezeit	45
Schule, Spielplatz (außen)	Störung und Belästigung (Externe Quellen)	55	Spielzeit	-
Krankenhaus: Patientenräume (innen) Personalräume (innen)	Schlafstörung (nachts)			
	Schlafstörung (tags und nachts)	30	8	40
Krankenhaus, Behandlungsräume (innen)	Störung von Ruhe und Erholung	(#1)		
Industrielle und kommerzielle Bereiche, Einkaufspassagen (innen und außen)	Gehörschäden	70	24	110
Unterhaltungsveranstaltungen, Festivals,	Gehörschäden (Besucher: <5 Mal pro Jahr)	100	4	110
Öffentliche Veranstaltungen (innen und außen)	Gehörschäden	85	1	110
Musik über Kopf-/Ohrhörer	Gehörschäden (Freifeld-Messwert)	85 (#4)	1	110
Impulslärm von Spielzeug, Feuerwerk und Schusswaffen	Gehörschäden (Kinder)			120 (#2)
	Gehörschäden (Erwachsene)			140 (#2)

Parklandschaften, Erholungs- und Naturschutzgebiete	Zerstörung der Ruhe	(#3)		
---	---------------------	------	--	--

#1: So niedrig wie möglich

#2: Spitzenschalldruckpegel (Zeitbewertung „peak“, nicht Maximalpegel mit Zeitbewertung „fast“), in 100 mm Entfernung vom Ohr gemessen

#3: Bestehende ruhige Außenbereiche sollten geschützt werden und das Verhältnis von eindringenden Fremdgeräuschen und natürlichen Hintergrundgeräuschen sollte niedrig gehalten werden

#4: Unter dem Kopfhörer, auf Freifeld-Werte bezogen

**Tabelle 150:** Maßnahmen zur Lärminderung nach [VOLV]. Zusammenfassung aus Arbeitsinspektion Österreich, 2006 [AIÖE1].

Schutzziel	Lärmexposition	Beschreibung
<b>Beeinträchtigungen vermeiden</b> allgemeine Minimierung § 9 Abs. 1, 2 VOLV	<b>so niedrig wie möglich!</b>	Unter Berücksichtigung des Standes der Technik und der Verfügbarkeit von geeigneten technischen Mitteln ist Lärm auf das niedrigste in der Praxis vertretbare Niveau zu senken.
<b>Beeinträchtigungen mindern, vegetative Lärmwirkung vermeiden</b> Unterschreitung der Grenzwerte für bestimmte Räume § 5 VOLV	<b>L<sub>A,r</sub> maximal 50 dB</b>  <b>L<sub>A,r</sub> maximal 65 dB</b>	In Räumen mit überwiegend geistigen Tätigkeiten und in Aufenthalts-, Bereitschafts-, Sanitäts- und Wohnräumen ist die psychonervale Störwirkung von Lärm so niedrig wie möglich zu halten.  Für einfache Bürotätigkeiten und vergleichbaren Tätigkeiten ist die vegetative Lärmwirkung zu vermeiden und die sprachliche Verständigung zu gewährleisten.
<b>Beanspruchungen des Gehörs vermeiden</b> Unterschreitung der Auslösewerte (folgt aus allgemeiner Minimierung) § 9 Abs. 1, 2 VOLV	L <sub>A,EX,8h</sub> möglichst < 80 dB  L <sub>C,peak</sub> möglichst < 135 dB	Auslösewerte sind möglichst zu unterschreiten, wenn dies nicht möglich ist, ist den Arbeitnehmer/innen Gehörschutz zur Verfügung zu stellen und ausführliche Information und Unterweisung (§ 8 Abs. 1 VOLV) erforderlich.
<b>statistisch relevante Gehörgefährdungen vermeiden</b> Unterschreitung der Expositionsgrenzwerte § 3 Abs. 1 Z 3 VOLV	L <sub>A,EX,8h</sub> <b>maximal 85 dB</b>  L <sub>C,peak</sub> <b>maximal 137 dB</b>	Die persönliche Lärmexposition darf die Expositionsgrenzwerte nicht überschreiten. Wenn die Expositionsgrenzwerte unterschritten sind, ist ein systematisches Maßnahmenprogramm gemäß §§ 10 bis 13 VOLV festzulegen und durchzuführen. Ziel: Unterschreitung der Expositionsgrenzwerte im Arbeitsbereich. Ist dies nicht möglich darf persönliche Schutzausrüstung (§ 14 Abs. 1 VOLV) als letzte Maßnahme nach den Maßnahmen gemäß §§ 10 bis 13 VOLV angewandt werden.

## 12. Anhang C: Anleitung für Nachhallzeitmessungen in Klassenräumen

Laut DIN 3382 müssen 3-4 Mikrofonstellungen mit mindestens 2 Quellenpositionen verwendet werden. Das Raumvolumen soll von den Messpunkten zweckentsprechend überdeckt sein, d.h. die Sitzpositionen der Schüler müssen möglichst gut abgedeckt sein. Die Quellenpositionen müssen die typischen Steh- oder Sitzpositionen der Lehrer/innen möglichst gut abbilden. Die Mikrofonpositionen müssen mindestens 1 Meter (Viertel-Wellenlänge) von einer reflektierenden Oberfläche entfernt sein ein Minimalabstand  $d_{\min}$  von der Quelle haben:

$$d_{\min} = 2\sqrt{\frac{V}{cT}}$$

Die Mikrofonstellungen müssen außerdem mindestens eine halbe Wellenlänge d.h. für 125 Hz mindestens 1,37 Meter (2m) voneinander entfernt sein. Die Mikrofonhöhe soll 1,2 Meter über dem Fussboden (durchschnittliche Ohrhöhe in Sitzposition) betragen. Die Lautsprecherhöhe beträgt in fast allen Studien 1,5 Meter vom Fussboden. Der Frequenzumfang für die raumakustische Bewertung von Klassenräume liegt in der DIN 18041 und in allen Studien zwischen 125 Hz und 4000 Hz in Oktavbänder. Für das Verfahren des abgeschalteten Rauschens ist an jedem Messpunkt mindestens 3 Messungen notwendig, die gemittelt werden. Die ISO 3382 gibt keine Angaben zu Wiederholungen bei Sine-Sweep-Messungen. Zwei Erkenntnisse dieser Diplomarbeit sind, dass ein starres Mikrofon- und Lautsprechermodell in Klassenräumen nicht anwendbar ist, sondern von Raum zu Raum variiert werden muss und dass Messungen wiederholt werden sollen um Fehlerquellen festzustellen.

Im Prüfbericht müssen folgende Informationen enthalten sein:

- Name und Ort des Raumes
- Grundriss des Raumes (Raummaße)
- Raumvolumen, Temperatur und relative Feuchtigkeit
- Besetzungszustand (viel Personen)
- Nutzungsart (Unterricht)
- Typ und Aufstellung (Skizze) der Lautsprecher und der Mikrofone
- Beschreibung des Materials der Wände und Decke sowie der Form
- Besonderheiten und Probleme
- Grundgeräuschpegel

Störquellen für Nachhallzeitmessungen können sein: Lärmimmissionen von außen (Straßenlärm, Schreien (Sprechen) von Kindern und anderen Personen, Staubsauger, Leuchtstofflampen,...), resonierende Wände oder Gegenstände, Raummoden, Fehler in der Messkette,... Auswirkungen dieser Störquellen können unter anderem große Minimum-Maximum-Spannweiten der Nachhallzeiten zwischen den einzelnen Mikrofonpositionen im einzelnen Oktavband sein sowie große Abweichungen zwischen den 3 Messungen an einem einzelnen Messpunkt. Ab folgenden Grenzwerten soll der Raum auf mögliche Störquellen untersucht werden:

Min-Max-Spannweite: 0,5-0,6 s

Standardabweichung an einem Messpunkt: größer 0,06 (insbesondere bei 125 bis 500 Hz)

# 13. Anhang D: Regressionsberechnung und Messwerttabellen für Grundschule Wiltz/Luxemburg

## Korrelationskoeffizient r einer zweidimensionalen Stichprobe<sup>345</sup>

Der Korrelationskoeffizient (Pearson) kennzeichnet den Grad der Abhängigkeit zwischen den Merkmalen X und Y von Messreihen  $(x_i, y_i)$ .

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y}$$

mit der Kovarianz:

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

Varianzen:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$r = \pm 1$  lineare Abhängigkeit 100%

$r = 0$  keine lineare Abhängigkeit

$r > 0$  gleichläufige lineare Abhängigkeit

$r < 0$  gegenläufige lineare Abhängigkeit

Das Bestimmtheitsmaß ist das Quadrat des Korrelationskoeffizienten (Pearson):

$$B = R^2 = r^2$$

---

<sup>345</sup> [BARTSCH], [BRONSTEIN], [PAPULA]



## Lineare Regression

Bei starker linearer Korrelation stellt die lineare Regression den analytischen Zusammenhang zwischen den Variablen her. Dabei geht man davon aus dass die Zufallsgröße Y in der Grundgesamtheit normalverteilt ist.

Eine Regressionsgerade (Ausgleichsgerade) wird gesucht:

$$y = f(x) = a + bx_i$$

so dass der Fehlerquadrat minimal wird (Methode der kleinsten Quadrate)

$$Q = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2 \rightarrow \min$$

Schätzwerte (Näherungswerte) :

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad a = \bar{y} - b\bar{x}$$

*Beispiel:*

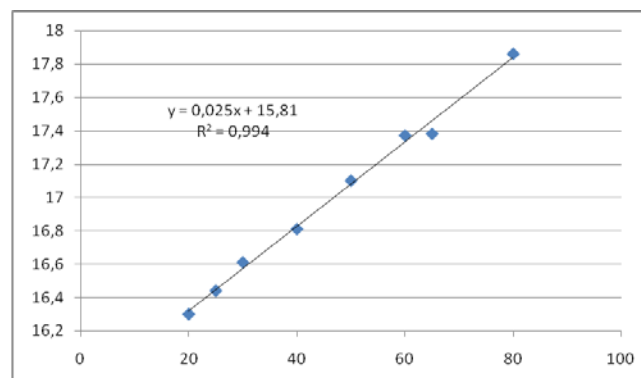
x	20	25	30	40	50	60	65	80
y	16,3	16,44	16,61	16,81	17,1	17,37	17,38	17,86

$$b = 0,0253107$$

$$a = 15,8131275$$

$$r = 0,997374293$$

$$R^2 = 0,99475548$$



**Nachhallzeit der Klassenräume mit Bühnenmolton. Äquivalente Absorptionsfläche des Bühnenmoltons:**

	F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Raum 2	$T_{30\text{molton}}$ [s]	1,17	0,81	0,68	0,56	0,49	0,42	0,37
	$A_{\text{molton}}$ [m <sup>2</sup> ]	3,60	4,79	7,33	11,49	15,64	13,71	14,79
Raum 2 NB	$T_{30\text{molton}}$ [s]	0,76	0,56	0,50	0,48	0,52	0,51	0,45
	$A_{\text{molton}}$ [m <sup>2</sup> ]	1,46	4,99	10,40	10,40	6,06	5,97	6,35
Raum 4	$T_{30\text{molton}}$ [s]	1,88	0,90	0,73	0,57	0,47	0,42	0,39
	$A_{\text{molton}}$ [m <sup>2</sup> ]	1,86	6,60	8,28	13,70	15,74	12,83	14,47
Raum 4 NB	$T_{30\text{molton}}$ [s]	0,64	0,53	0,49	0,47	0,49	0,50	0,43
	$A_{\text{molton}}$ [m <sup>2</sup> ]	1,97	5,23	11,48	12,78	9,91	8,04	8,67
Raum 13	$T_{30\text{molton}}$ [s]	1,79	1,12	0,74	0,63	0,56	0,45	0,38
	$A_{\text{molton}}$ [m <sup>2</sup> ]	2,57	10,01	12,22	14,22	13,81	14,85	16,46
Raum 14	$T_{30\text{molton}}$ [s]	2,71	1,32	0,72	0,62	0,55	0,46	0,41
	$A_{\text{molton}}$ [m <sup>2</sup> ]	3,41	9,19	9,96	10,87	12,27	10,63	10,66
Raum 17	$T_{30\text{molton}}$ [s]	2,32	1,30	0,73	0,61	0,51	0,44	0,38
	$A_{\text{molton}}$ [m <sup>2</sup> ]	4,77	8,37	9,23	11,58	12,56	11,03	11,63
Raum 21	$T_{30\text{molton}}$ [s]	1,89	1,42	0,83	0,67	0,58	0,54	0,48
	$A_{\text{molton}}$ [m <sup>2</sup> ]	1,71	1,14	8,40	11,19	13,51	13,86	14,80
Raum 24	$T_{30\text{molton}}$ [s]	2,05	1,20	0,85	0,67	0,57	0,51	0,45
	$A_{\text{molton}}$ [m <sup>2</sup> ]	1,19	3,21	7,81	11,00	11,81	10,61	12,21
Raum 25	$T_{30\text{molton}}$ [s]	1,63	1,05	0,81	0,68	0,62	0,55	0,47
	$A_{\text{molton}}$ [m <sup>2</sup> ]	1,83	4,37	8,09	11,20	13,07	14,46	16,10
Raum 34	$T_{30\text{molton}}$ [s]	0,80	0,68	0,62	0,55	0,54	0,48	0,42
	$A_{\text{molton}}$ [m <sup>2</sup> ]	1,01	8,09	9,41	12,21	11,78	12,72	14,20
Raum 35	$T_{30\text{molton}}$ [s]	1,21	0,87	0,60	0,51	0,48	0,47	0,42
	$A_{\text{molton}}$ [m <sup>2</sup> ]	4,36	9,50	12,06	15,07	14,87	13,79	14,48
Raum 36	$T_{30\text{molton}}$ [s]	0,82	0,63	0,57	0,50	0,48	0,46	0,42
	$A_{\text{molton}}$ [m <sup>2</sup> ]	1,89	10,24	14,66	14,83	14,94	15,05	14,95
Mittelwert	$A_{\text{molton}}$ [m <sup>2</sup> ]	2,43	6,60	9,95	12,35	12,77	12,12	13,06
	$\sigma$	1,17	2,76	2,06	1,54	2,53	2,64	2,89
	Min	1,01	1,14	7,33	10,40	6,06	5,97	6,35
	Max	4,77	10,24	14,66	15,07	15,74	15,05	16,46

Raum	Anzahl an Schüler	Volumen [m <sup>3</sup> ]
Raum 2	14	198,9
Raum 2 NB	15	213,31
Raum 4	16	184,14
Raum 4 NB	15	211,2
Raum 13	16	187,1
Raum 14	15	187,1
Raum 17	13	187,2
Raum 21	15	162,36
Raum 24	12	193,05
Raum 25	14	193,05
Raum 34	13	105,56
Raum 35	14	105,56
Raum 36	16	146,16
Raum 23	13	193,05
Mittelwert	14,4	
$\sigma$	1,2	

**Äquivalente Absorptionsfläche des Moltons pro Schüler/in in allen Klassenräumen:**

Raum	Anzahl an Schüler	$A_{\text{molton}} [\text{m}^2]/\text{Anzahl Schüler}$						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Raum 2	14	0,26	0,34	0,52	0,82	1,12	0,98	1,06
Raum 2 NB	15	0,10	0,33	0,69	0,69	0,40	0,40	0,42
Raum 4	16	0,12	0,41	0,52	0,86	0,98	0,80	0,90
Raum 4 NB	15	0,13	0,35	0,77	0,85	0,66	0,54	0,58
Raum 13	16	0,16	0,63	0,76	0,89	0,86	0,93	1,03
Raum 14	15	0,23	0,61	0,66	0,72	0,82	0,71	0,71
Raum 17	13	0,37	0,64	0,71	0,89	0,97	0,85	0,89
Raum 21	15	0,11	0,08	0,56	0,75	0,90	0,92	0,99
Raum 24	12	0,10	0,27	0,65	0,92	0,98	0,88	1,02
Raum 25	14	0,13	0,31	0,58	0,80	0,93	1,03	1,15
Raum 34	13	0,08	0,62	0,72	0,94	0,91	0,98	1,09
Raum 35	14	0,31	0,68	0,86	1,08	1,06	0,98	1,03
Raum 36	16	0,12	0,64	0,92	0,93	0,93	0,94	0,93
Mittelwert		0,17	0,46	0,69	0,86	0,89	0,84	0,91
$\sigma$		0,088	0,184	0,118	0,099	0,176	0,182	0,205
Min		0,08	0,08	0,52	0,69	0,40	0,40	0,42
Max		0,37	0,68	0,92	1,08	1,12	1,03	1,15

	Raum	Nachhallzeit (räumlicher Mittelwert) T30 [s]						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
leer	Raum 2 AG	1,35	0,92	0,81	0,7	0,64	0,51	0,45
	Raum 4 AG	2,13	1,13	0,92	0,77	0,63	0,51	0,48
	Raum 13 AG	2,11	1,78	1,06	0,9	0,75	0,58	0,48
	Raum 14 AG	3,91	2,21	0,95	0,8	0,71	0,55	0,48
	Raum 17 AG	3,78	2,09	0,95	0,81	0,66	0,53	0,45
	Raum 21 AG	2,16	1,51	1,13	0,94	0,83	0,76	0,66
	Raum 24 AG	2,23	1,37	1,08	0,88	0,73	0,62	0,55
	Raum 25 AG	1,8	1,23	1,03	0,9	0,84	0,74	0,62
	Raum 34 AG	0,84	1,01	0,94	0,91	0,86	0,75	0,65
	Raum 35 AG	1,76	1,69	1,04	0,93	0,83	0,76	0,65
	Raum 36 AG	0,88	0,87	0,88	0,73	0,69	0,65	0,57
	Raum 2 NB	0,79	0,61	0,59	0,56	0,57	0,56	0,49
	Raum 4 NB	0,66	0,58	0,59	0,57	0,57	0,57	0,48
	$\sigma$		1,00	0,51	0,16	0,12	0,10	0,09
Mittelwert		1,88	1,31	0,92	0,80	0,72	0,62	0,54
Molton	Raum 2 AG	1,17	0,81	0,68	0,56	0,49	0,42	0,37
	Raum 4 AG	1,88	0,9	0,73	0,57	0,47	0,42	0,39
	Raum 13 AG	1,79	1,12	0,74	0,63	0,56	0,45	0,38
	Raum 14 AG	2,71	1,32	0,72	0,62	0,55	0,46	0,41
	Raum 17 AG	2,32	1,3	0,73	0,61	0,51	0,44	0,38
	Raum 21 AG	1,89	1,42	0,83	0,67	0,58	0,54	0,48
	Raum 24 AG	2,05	1,2	0,85	0,67	0,57	0,51	0,45
	Raum 25 AG	1,63	1,05	0,81	0,68	0,62	0,55	0,47
	Raum 34 AG	0,8	0,68	0,62	0,55	0,54	0,48	0,42
	Raum 35 AG	1,21	0,87	0,6	0,51	0,48	0,47	0,42
	Raum 36 AG	0,82	0,63	0,57	0,5	0,48	0,46	0,42
	Raum 2 NB	0,76	0,56	0,5	0,48	0,52	0,51	0,45
	Raum 4 NB	0,64	0,53	0,49	0,47	0,49	0,5	0,43
	$\sigma$		0,64	0,29	0,11	0,07	0,04	0,04
Mittelwert		1,51	0,95	0,68	0,58	0,53	0,48	0,42

Autoren	Frequenzen in Hz.						
Sato & Bradley	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>
$A_{\text{Schüler}} [\text{m}^2]$	1,67	2,06	4,81	9,50	8,43	6,35	
$A_{\text{Schüler}} / \text{Schüler} [\text{m}^2/\text{Person}]$	0,08	0,1	0,23	0,46	0,41	0,31	
Mommertz (volle Besetzung)	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>
$A_{\text{Schüler}} / \text{Schüler}$	0,20	0,30	0,40	0,40	0,40	0,40	
Mommertz (halbe Besetzung)	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>
$A_{\text{Schüler}} / \text{Schüler}$	0,35	0,35	0,55	0,55	0,55	0,55	
DIN 18041	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>
$A_{\text{Schüler}} / \text{Schüler}$	0,05	0,33	0,43	0,32	0,38	0,37	

Raum	$T_{30\text{mittel, leer}} [\text{s}]$	$T_{30\text{mittel, molton}} [\text{s}]$	Delta
Raum 2 AG	0,768571429	0,642857143	-0,12571429
Raum 4 AG	0,938571429	0,765714286	-0,17285714
Raum 13 AG	1,094285714	0,81	-0,28428571
Raum 14 AG	1,372857143	0,97	-0,40285714
Raum 17 AG	1,324285714	0,898571429	-0,42571429
Raum 21 AG	1,141428571	0,915714286	-0,22571429
Raum 24 AG	1,065714286	0,9	-0,16571429
Raum 25 AG	1,022857143	0,83	-0,19285714
Raum 34 AG	0,851428571	0,584285714	-0,26714286
Raum 35 AG	1,094285714	0,651428571	-0,44285714
Raum 36 AG	0,752857143	0,554285714	-0,19857143
Raum 2 NB	0,595714286	0,54	-0,05571429
Raum 4 NB	0,574285714	0,507142857	-0,06714286

### Nachhallzeiten der besetzten Klassenräume und äquivalente Absorptionsfläche der Schüler/innen:

	F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Raum 2	$T_{30 \text{ unocc.}} [\text{s}]$	2,15	1,64	0,78	0,66	0,57	0,46	0,4
	$T_{30 \text{ occ.}} [\text{s}]$	3,35	2,1	0,77	0,62	0,52	0,42	0,36
	$A_{\text{Schüler}} [\text{m}^2]$	NULL	NULL	0,53	3,13	5,40	6,63	8,90
Raum 2 NB	$T_{30 \text{ unocc.}} [\text{s}]$	0,68	0,53	0,55	0,53	0,53	0,5	0,42
	$T_{30 \text{ occ.}} [\text{s}]$	0,65	0,52	0,52	0,5	0,5	0,47	0,4
	$A_{\text{Schüler}} [\text{m}^2]$	2,33	1,25	3,60	3,89	3,89	4,38	4,09
Raum 13	$T_{30 \text{ unocc.}} [\text{s}]$	2,47	1,44	1,01	0,87	0,72	0,56	0,46
	$T_{30 \text{ occ.}} [\text{s}]$	2,77	1,18	0,82	0,67	0,58	0,47	0,4
	$A_{\text{Schüler}} [\text{m}^2]$	NULL	4,61	6,91	10,34	10,10	10,30	9,82
Raum 21	$T_{30 \text{ unocc.}} [\text{s}]$	1,29	1,07	0,93	0,82	0,77	0,69	0,58
	$T_{30 \text{ occ.}} [\text{s}]$	1,16	0,92	0,75	0,64	0,56	0,52	0,46
	$A_{\text{Schüler}} [\text{m}^2]$	2,27	3,98	6,75	8,97	12,73	12,39	11,76
Raum 23	$T_{30 \text{ unocc.}} [\text{s}]$	1,78	1,4	0,92	0,81	0,67	0,54	0,46
	$T_{30 \text{ occ.}} [\text{s}]$	1,67	1,25	0,84	0,71	0,6	0,5	0,43
	$A_{\text{Schüler}} [\text{m}^2]$	1,15	2,66	3,22	5,40	5,41	4,60	4,71
Raum 24	$T_{30 \text{ unocc.}} [\text{s}]$	1,77	1,09	0,9	0,8	0,68	0,57	0,49
	$T_{30 \text{ occ.}} [\text{s}]$	1,46	0,95	0,76	0,64	0,55	0,5	0,45
	$A_{\text{Schüler}} [\text{m}^2]$	3,73	4,20	6,36	9,71	10,80	7,63	5,64
Raum 25	$T_{30 \text{ unocc.}} [\text{s}]$	1,8	1,23	1,02	0,9	0,83	0,73	0,62
	$T_{30 \text{ occ.}} [\text{s}]$	2,46	1,26	0,92	0,79	0,69	0,59	0,5
	$A_{\text{Schüler}} [\text{m}^2]$	NULL	NULL	3,31	4,81	7,60	10,10	12,03
Raum 36	$T_{30 \text{ unocc.}} [\text{s}]$	0,7	0,67	0,68	0,62	0,62	0,57	0,47
	$T_{30 \text{ occ.}} [\text{s}]$	0,66	0,57	0,52	0,48	0,46	0,44	0,39
	$A_{\text{Schüler}} [\text{m}^2]$	2,04	6,16	10,65	11,07	13,20	12,20	10,27
Mittelwert	2,30	3,81	5,17	7,16	8,64	8,53	8,40	
$\sigma$	0,83	1,54	2,92	2,97	3,33	2,98	2,96	
Min	1,15	1,25	0,53	3,13	3,89	4,38	4,09	
Max	3,73	6,16	10,65	11,07	13,20	12,39	12,03	

	F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Raum 2	A <sub>schüler</sub> / Schüler	NULL	NULL	0,04	0,22	0,39	0,47	0,64
Raum 2 NB	A <sub>schüler</sub> / Schüler	0,16	0,08	0,24	0,26	0,26	0,29	0,27
Raum 13	A <sub>schüler</sub> / Schüler	NULL	0,29	0,43	0,65	0,63	0,64	0,61
Raum 21	A <sub>schüler</sub> / Schüler	0,15	0,27	0,45	0,60	0,85	0,83	0,78
Raum 23	A <sub>schüler</sub> / Schüler	0,09	0,20	0,25	0,42	0,42	0,35	0,36
Raum 24	A <sub>schüler</sub> / Schüler	0,31	0,35	0,53	0,81	0,90	0,64	0,47
Raum 25	A <sub>schüler</sub> / Schüler	NULL	NULL	0,24	0,34	0,54	0,72	0,86
Raum 36	A <sub>schüler</sub> / Schüler	0,13	0,39	0,67	0,69	0,83	0,76	0,64
	Mittelwert	0,17	0,26	0,35	0,50	0,60	0,59	0,58
	σ	0,076	0,099	0,187	0,203	0,224	0,182	0,188
	Min	0,09	0,08	0,04	0,22	0,26	0,29	0,27
	Max	0,31	0,39	0,67	0,81	0,90	0,83	0,86

### Nachhallzeiten von Fluren:

Flur	F [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EG (AG)	T <sub>30</sub> [s]	6,88	4,26	3,39	2,85	2,18	1,44	1,04
1. Stock (AG)	T <sub>30</sub> [s]	6,86	6,11	3,34	2,88	2,18	1,45	1,04
2. Stock (AG)	T <sub>30</sub> [s]	10,83	4,71	3,36	2,94	2,28	1,49	1,03
3. Stock (AG)	T <sub>30</sub> [s]	1,02	1,45	1,6	1,59	1,42	1,16	0,91
EG (NB)	T <sub>30</sub> [s]	1,26	1,52	1,4	1,24	1,01	0,8	0,61
Empfehlung	T <sub>30</sub> [s]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

### STI und Alcons

T30(leer)											
Raum	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Mittelwert	STI	%Alcons	Farrel-Becker
Raum 2	1,35	0,92	0,81	0,70	0,64	0,51	0,45	0,77	0,72	3,45	3,45
Raum 2 NB	0,79	0,61	0,59	0,56	0,57	0,56	0,49	0,60	0,76	2,74	2,77
Raum 4	2,13	1,13	0,92	0,77	0,63	0,51	0,48	0,94	0,70	3,78	3,84
Raum 4 NB	0,66	0,58	0,59	0,57	0,57	0,57	0,48	0,57	0,77	2,72	2,63
Raum 13	2,11	1,78	1,06	0,90	0,75	0,58	0,48	1,09	0,65	5,04	5,04
Raum 14	3,91	2,21	0,95	0,80	0,71	0,55	0,48	1,37	0,66	4,67	4,77
Raum 17	3,78	2,09	0,95	0,81	0,66	0,53	0,45	1,32	0,68	4,31	4,28
Raum 21	2,16	1,51	1,13	0,94	0,83	0,76	0,66	1,14	0,63	5,56	5,61
Raum 24	2,23	1,37	1,08	0,88	0,73	0,62	0,55	1,06	0,66	4,85	4,77
Raum 25	1,80	1,23	1,03	0,90	0,84	0,74	0,62	1,02	0,64	5,38	5,32
Raum 34	0,84	1,01	0,94	0,91	0,86	0,75	0,65	0,85	0,66	4,71	4,77
Raum 35	1,76	1,69	1,04	0,93	0,83	0,76	0,65	1,10	0,64	5,35	5,32
Raum 36	0,88	0,87	0,88	0,73	0,69	0,65	0,57	0,75	0,70	3,95	3,84

EDT (leer)									
Raum	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Mittelwert	
Raum 2	1,12	0,80	0,72	0,67	0,56	0,42	0,37	0,66	
Raum 2 NB	0,59	0,52	0,56	0,57	0,53	0,52	0,42	0,53	
Raum 4	1,26	1,00	0,89	0,73	0,54	0,45	0,42	0,75	
Raum 4 NB	0,53	0,54	0,59	0,54	0,50	0,49	0,39	0,51	
Raum 13	1,77	1,32	1,03	0,91	0,75	0,54	0,47	0,97	
Raum 14	2,30	1,46	0,90	0,83	0,65	0,48	0,42	1,01	
Raum 17	2,15	1,12	0,91	0,79	0,66	0,51	0,42	0,94	
Raum 21	1,88	1,22	1,03	0,89	0,78	0,71	0,60	1,01	
Raum 24	1,73	1,16	1,06	0,84	0,66	0,57	0,49	0,93	
Raum 25	1,68	1,10	0,96	0,91	0,81	0,70	0,57	0,96	
Raum 34	0,83	0,92	0,89	0,85	0,83	0,72	0,59	0,80	
Raum 35	1,05	1,22	0,93	0,87	0,80	0,74	0,61	0,89	
Raum 36	0,79	0,77	0,82	0,67	0,64	0,61	0,52	0,69	

**Schallpegelverteilungen (dBA, fast, Sekundentakt) während Pausen am Morgen, Mittag und Nachmittag vom 20.4.2009 bis 24.4.2009:**

**Erdgeschoss (EG), 1. Stock und 2. Stock des Alten Gebäudes**

Untergrenze	Obergrenze	Häufigkeit	Relative Häufigkeit	Dichte
30	31	0	0,000	0,000
31	32	0	0,000	0,000
32	33	0	0,000	0,000
33	34	4	0,002	0,002
34	35	3	0,002	0,002
35	36	4	0,002	0,002
36	37	5	0,003	0,003
37	38	9	0,005	0,005
38	39	13	0,008	0,008
39	40	17	0,010	0,010
40	41	32	0,019	0,019
41	42	23	0,013	0,013
42	43	22	0,013	0,013
43	44	15	0,009	0,009
44	45	5	0,003	0,003
45	46	5	0,003	0,003
46	47	6	0,003	0,003
47	48	9	0,005	0,005
48	49	14	0,008	0,008
49	50	16	0,009	0,009
50	51	16	0,009	0,009
51	52	33	0,019	0,019
52	53	25	0,015	0,015
53	54	53	0,031	0,031
54	55	50	0,029	0,029
55	56	35	0,020	0,020
56	57	47	0,027	0,027
57	58	55	0,032	0,032
58	59	52	0,030	0,030
59	60	42	0,024	0,024
60	61	43	0,025	0,025
61	62	57	0,033	0,033
62	63	54	0,031	0,031
63	64	54	0,031	0,031
64	65	62	0,036	0,036
65	66	73	0,042	0,042
66	67	73	0,042	0,042
67	68	62	0,036	0,036
68	69	71	0,041	0,041
69	70	73	0,042	0,042
70	71	78	0,045	0,045
71	72	56	0,033	0,033
72	73	72	0,042	0,042
73	74	46	0,027	0,027
74	75	56	0,033	0,033
75	76	39	0,023	0,023
76	77	26	0,015	0,015
77	78	16	0,009	0,009
78	79	22	0,013	0,013
79	80	18	0,010	0,010
80	81	6	0,003	0,003
81	82	10	0,006	0,006
82	83	9	0,005	0,005
83	84	6	0,003	0,003
84	85	3	0,002	0,002
85	86	5	0,003	0,003
86	87	2	0,001	0,001
87	88	3	0,002	0,002
88	89	8	0,005	0,005
89	90	0	0,000	0,000
90	91	2	0,001	0,001
91	92	0	0,000	0,000
92	93	0	0,000	0,000
93	94	0	0,000	0,000
94	95	3	0,002	0,002
95	96	2	0,001	0,001
96	97	0	0,000	0,000

**3.Stock des Alten Gebäudes und Erdgeschoss (EG) des Neuen Gebäudes (NB)**

Untergrenze	Obergrenze	Häufigkeit	Relative Häufigkeit	Dichte
30	31	0	0,000	0,000
31	32	0	0,000	0,000
32	33	0	0,000	0,000
33	34	0	0,000	0,000
34	35	1	0,001	0,001
35	36	0	0,000	0,000
36	37	0	0,000	0,000
37	38	4	0,002	0,002
38	39	12	0,007	0,007
39	40	12	0,007	0,007
40	41	31	0,018	0,018
41	42	27	0,016	0,016
42	43	35	0,021	0,021
43	44	25	0,015	0,015
44	45	18	0,011	0,011
45	46	19	0,011	0,011
46	47	14	0,008	0,008
47	48	21	0,012	0,012
48	49	31	0,018	0,018
49	50	24	0,014	0,014
50	51	23	0,014	0,014
51	52	19	0,011	0,011
52	53	30	0,018	0,018
53	54	31	0,018	0,018
54	55	25	0,015	0,015
55	56	20	0,012	0,012
56	57	39	0,023	0,023
57	58	39	0,023	0,023
58	59	50	0,029	0,029
59	60	38	0,022	0,022
60	61	48	0,028	0,028
61	62	50	0,029	0,029
62	63	69	0,041	0,041
63	64	71	0,042	0,042
64	65	76	0,045	0,045
65	66	66	0,039	0,039
66	67	79	0,046	0,046
67	68	64	0,038	0,038
68	69	64	0,038	0,038
69	70	67	0,039	0,039
70	71	60	0,035	0,035
71	72	65	0,038	0,038
72	73	46	0,027	0,027
73	74	44	0,026	0,026
74	75	43	0,025	0,025
75	76	32	0,019	0,019
76	77	30	0,018	0,018
77	78	31	0,018	0,018
78	79	22	0,013	0,013
79	80	14	0,008	0,008
80	81	13	0,008	0,008
81	82	12	0,007	0,007
82	83	10	0,006	0,006
83	84	5	0,003	0,003
84	85	6	0,004	0,004
85	86	3	0,002	0,002
86	87	2	0,001	0,001
87	88	2	0,001	0,001
88	89	5	0,003	0,003
89	90	1	0,001	0,001
90	91	1	0,001	0,001
91	92	3	0,002	0,002
92	93	6	0,004	0,004
93	94	3	0,002	0,002
94	95	0	0,000	0,000
95	96	2	0,001	0,001
96	97	0	0,000	0,000

## Untersuchungen im Sonderunterrichtsraum (Raum 1 Altes Gebäude):

Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche um $T_{\text{soll}}$ zu erreichen							
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A [m <sup>2</sup> ]	30,2	22,9	19,5	15,3	13,8	10,4	6,9

Nachhallzeit im Klassenraum mit Bühnenmolton T30 Menge A							
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T 30 in s	1,19	0,72	0,60	0,50	0,46	0,43	0,39

Äquivalente Absorptionsfläche von Bühnenmolton Menge A							
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A [m <sup>2</sup> ]	0,0	1,7	3,2	4,9	6,5	5,8	6,5
A/Person	0,0	0,3	0,5	0,8	1,1	1,0	1,1

Nachhallzeit im Klassenraum mit Bühnenmolton T30 Menge B							
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T 30 in s	1,09	0,72	0,58	0,51	0,46	0,42	0,39

Äquivalente Absorptionsfläche von Bühnenmolton Menge B							
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A [m <sup>2</sup> ]	0,6	1,7	4,2	4,2	6,5	6,8	6,5
A/Person	0,1	0,3	0,7	0,7	1,1	1,1	1,1

Nachhallzeit im Klassenraum mit 5 Schüler T30							
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T 30 in s	0,76	0,67	0,54	0,48	0,47	0,42	0,39

Äquivalente Absorptionsfläche von Schüler							
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A [m <sup>2</sup> ]	7,7	3,5	6,5	6,4	5,7	6,8	6,5
A/Person	1,3	0,6	1,1	1,1	0,9	1,1	1,1

Äquivalente Absorptionsfläche von Schüler laut Sato&Bradley							
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A/Person	0,08	0,1	0,23	0,46	0,41	0,31	

Äquivalente Absorptionsfläche von Schüler laut DIN 18041							
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A/Person	0,05	0,33	0,43	0,32	0,38	0,37	

Äquivalente Absorptionsfläche von Schüler laut Mommertz (halbvolle Besetzung)							
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A/Person	0,35	0,35	0,55	0,55	0,55	0,55	

Äquivalente Absorptionsfläche von Schüler laut Mommertz (volle Besetzung)							
Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A/Person	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	



**Fotos der Klassenräume 2 AG, 13 AG und 25 AG im besetzten Zustand und mit Bühnenmolton**



