

**Bildung braucht ...
gute Akustik**

**AACHENER TAG DER LUFTQUALITÄT
ZUKUNFTSRAUM SCHULE STATT BILDUNGS(BAU)KRISE**

Aachen, 14. September 2023



**HEINZ TROX
STIFTUNG**



Prof. Dr. Gunnar Grün

Professor für das Lehrgebiet »Bauphysik« an der Universität
Stuttgart, Institut für Akustik und Bauphysik IABP,
Stv. Institutsleiter Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP



**HEINZ TROX
STIFTUNG**

Prof. Dr. Gunnar Grün

Bildung braucht ... Gute Akustik!

Welchen Einfluss hat die Akustik auf die Konzentration der Lernenden und Lehrenden?

Dilemma bei schlechter Raumakustik

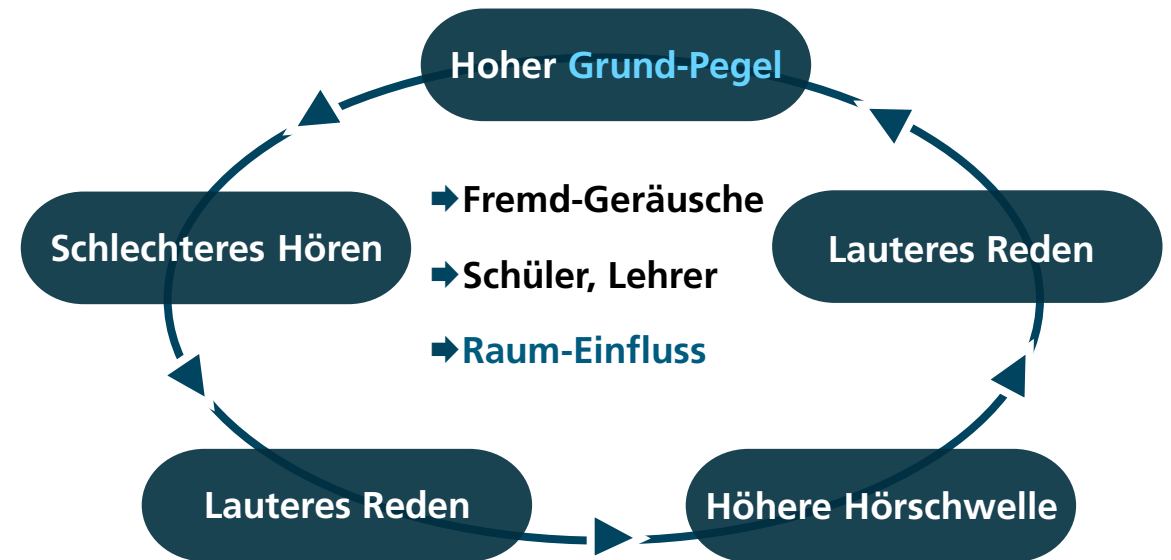
Beispiel Schule

Problem: → Schallharte Flächen

Folge: → Sprachverständlichkeit zu gering
→ Nachhallzeit zu groß

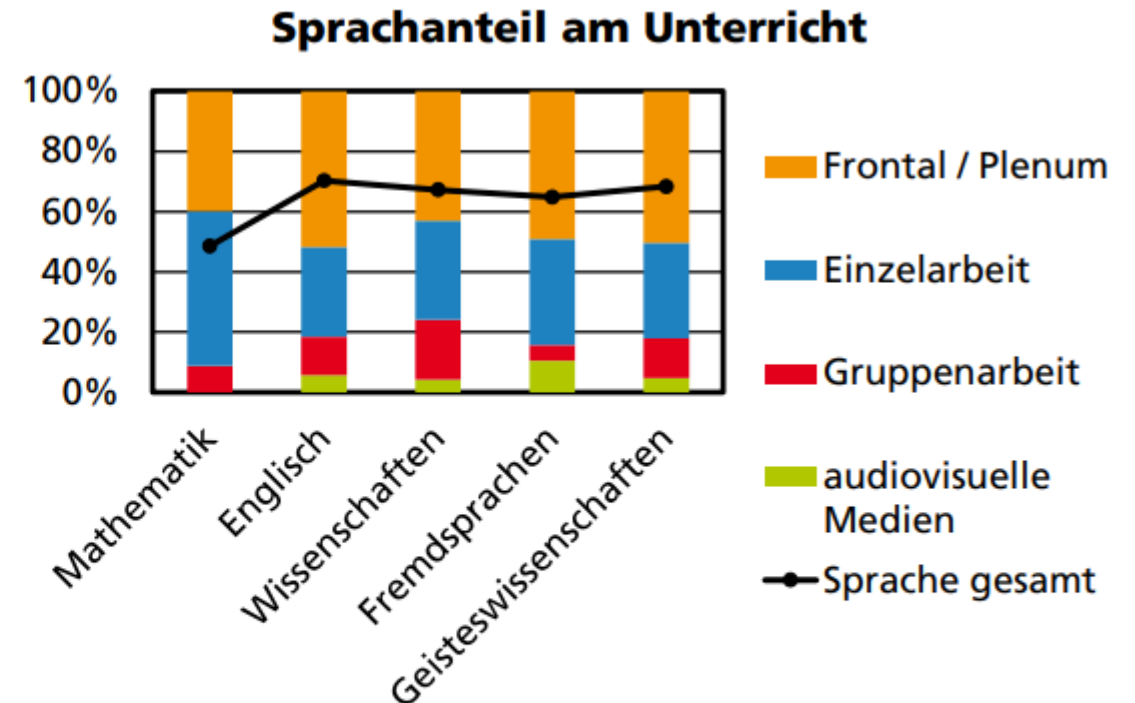


→ Ursache / Wirkungs-Spirale, + 10 dB (A)



Sprache bei der Wissensvermittlung im Klassenraum

- 50% bis 70% der Unterrichtszeit geschieht die Wissensvermittlung durch Sprache
 - Fazit 1: Sprachverstehen baut auf gute Akustik und ist für den Lernerfolg essentiell notwendig
 - Fazit 2: Lehrer*innen haben wegen hohen Sprachanteilen im Unterricht z.T. eine hohe Stimmbelastung: Krankheitsbedingte Ausfälle können durch geeignete Akustik reduziert werden



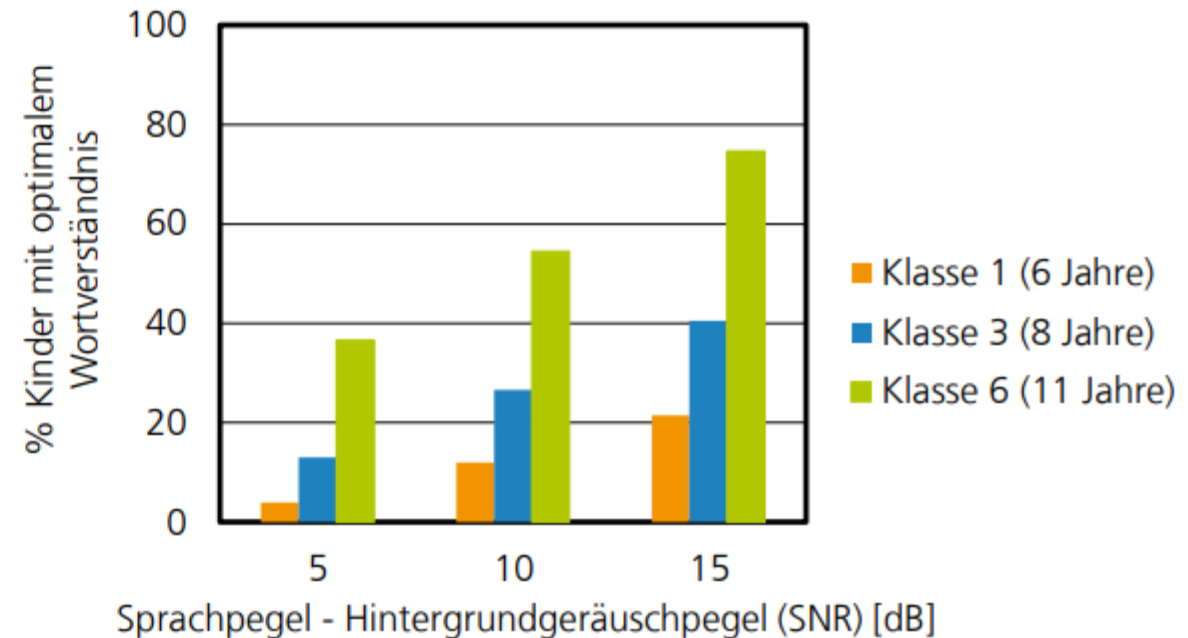
B. Shield, R. Conetta, J. Dockrell, D. Connolly, T. Cox, und C. Mydlarz, „A survey of acoustic conditions and noise levels in secondary school classrooms in England“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 137, Nr. 1, S. 177–188, Jan. 2015.

Sprache bei der Wissensvermittlung im Klassenraum

- Die Sprachentwicklung ist stark altersabhängig:
 - Das Feldexperiment rechts zeigt den Anteil der Kinder mit optimalem Wortverstehen, wozu 95% der Wörter eines Tests richtig sein müssen
 - Mit SNR und Alter steigt das Sprachverständnis
 - SNR größer 20 dB ist für Erstklässler notwendig
 - 11 dB SNR wurden im Durchschnitt in den sehr gut ausgestatteten Klassenräumen der Studie gemessen (Nachhallzeit $T \sim 0,4$ s)

■ Beides, sehr niedrige Hintergrundgeräusche und kurze Nachhallzeiten werden benötigt

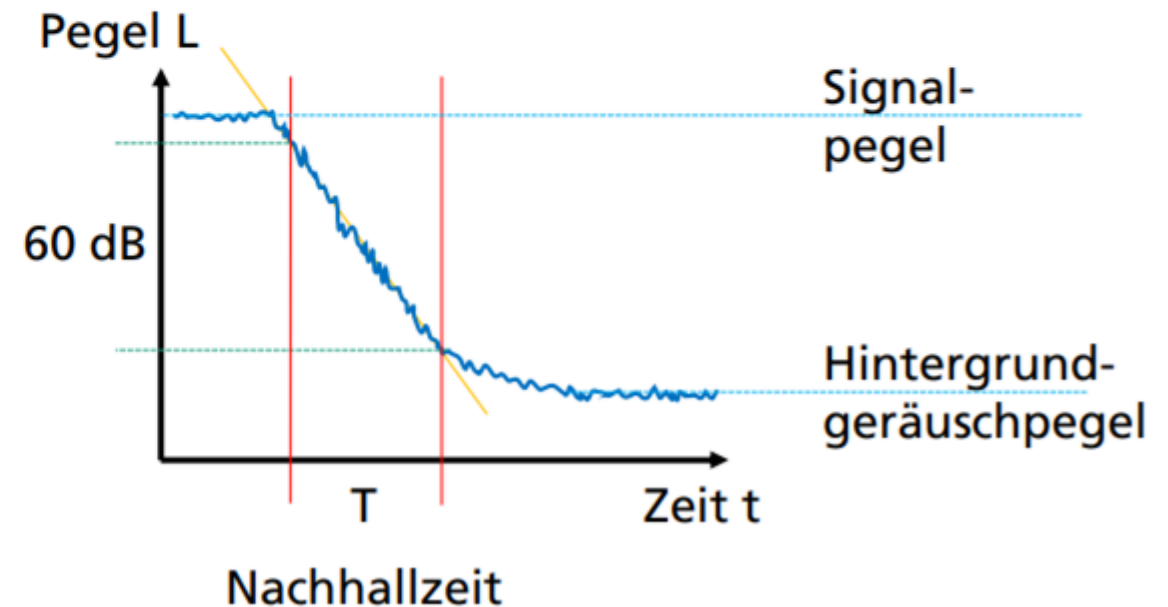
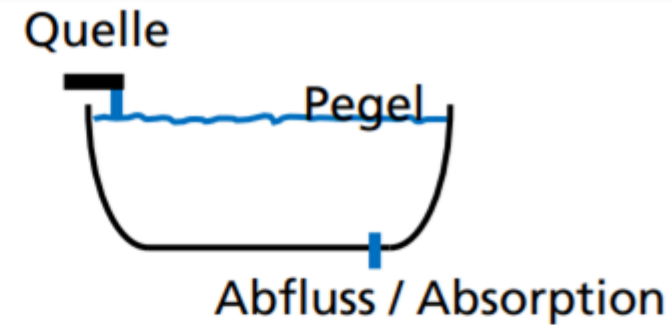
Sprachverstehen von normal entwickelnden Kindern



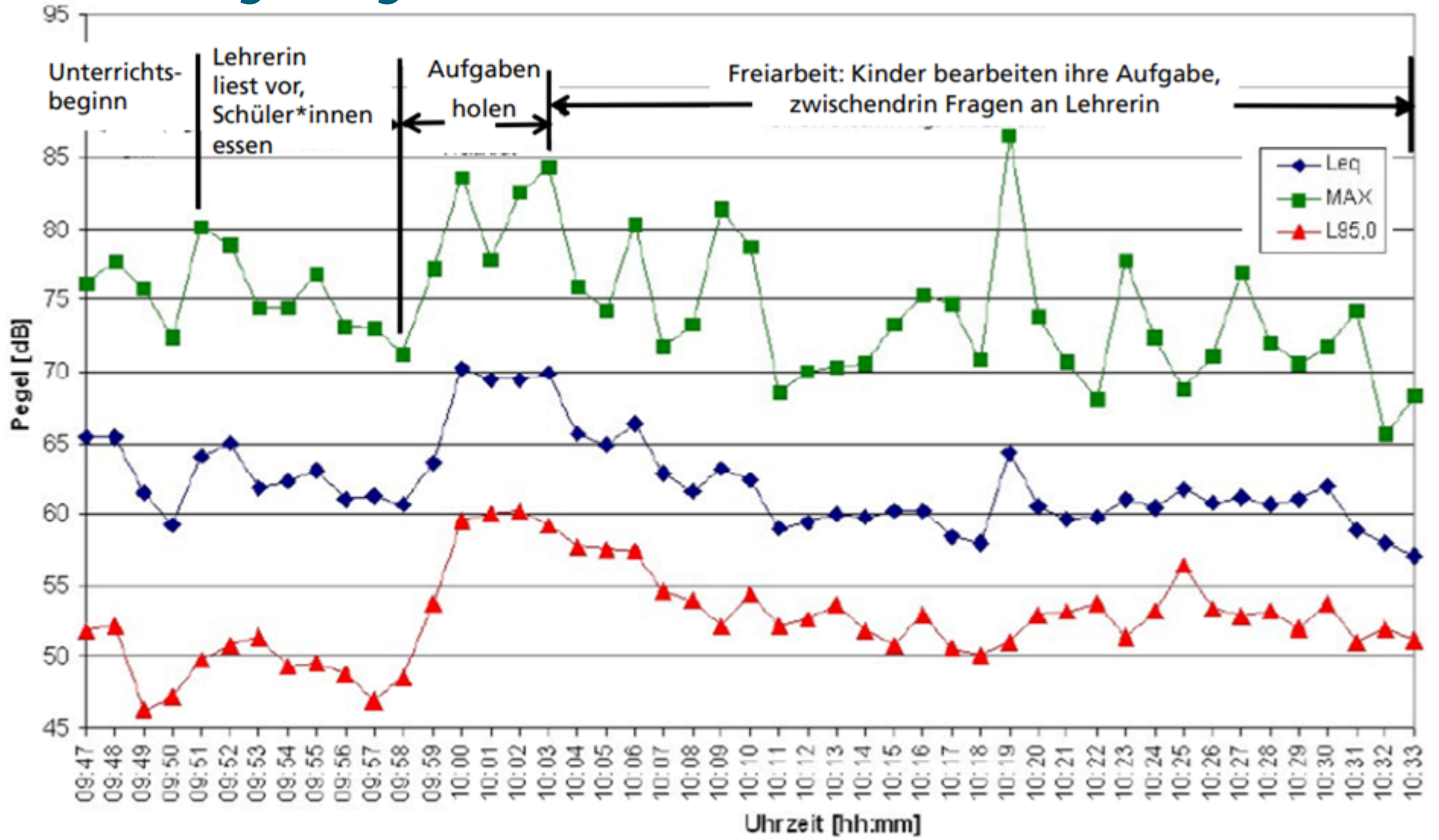
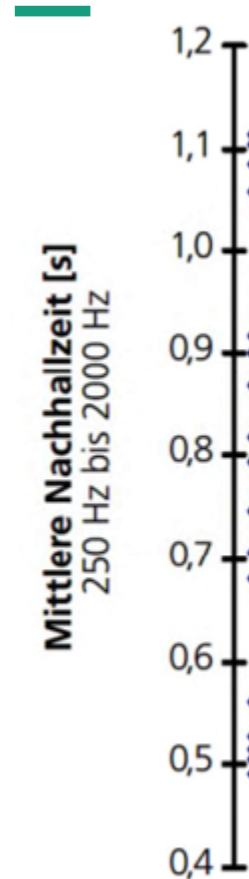
J. S. Bradley und H. Sato, „The intelligibility of speech in elementary school classrooms“, The Journal of the Acoustical Society of America, Bd. 123, Nr. 4, S. 2078–2086, Apr. 2008.

Nachhallzeiten und Hintergrundgeräusche

- Die Nachhallzeit ist die Zeit, die verstreicht bis der Schallpegel um 60 dB gefallen ist, nachdem die Quelle ausgeschaltet wurde.
- Der SNR ist der Signalpegel (z.B. einer sprechenden Person) abzüglich des Hintergrundgeräuschpegels (z.B. Schreibgeräusche der Schüler*innen)
- Die Nachhallzeit wird i.d.R. im unbesetzten Zustand gemessen, das Hintergrundgeräusch ist für die Sprachverständlichkeit während der Aktivität (z.B. Unterricht) wichtig



Nachhallzeiten und Hintergrundgeräusche



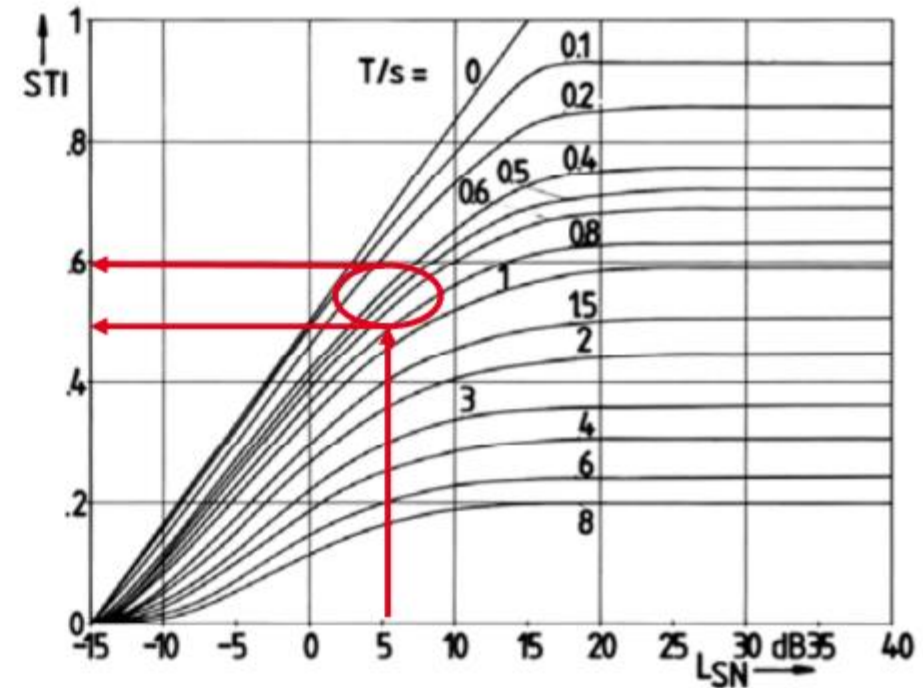
Leistner et al. 2006, Abbildung

Hintergrundgeräusche

- Eigene und veröffentlichte Messungen zeigen, dass das Hintergrundgeräusch L_{NA} praktisch nie unter 45 dB(A) liegt und maßgeblich durch Schüleraktivität bestimmt wird
- Sprachpegel von Lehrer*innen liegen typischerweise zwischen $L_{A,S,1m} = 60 \dots 66$ dB(A)
 - Daraus resultiert $SNR = 10 \dots 15$ dB je nach Sitzposition
 - realistischer: $SNR = 5 \dots 10$ dB aus Messungen
- Die DIN 18041:2016 nennt folgende Erfordernisse für optimale Sprachkommunikation
 - Muttersprache, $SNR = 10 \dots 20$ dB
 - Fremdsprache, $SNR = 15 \dots 30$ dB
 - Hörbehinderung, $SNR = 15 \dots 35$ dB
- In der Praxis ist zu erwarten, dass sich durchweg einstellige SNR realisieren, um jedes weitere Dezibel muss gekämpft werden. $SNR > 15$ dB werden in Klassenräumen ohne elektroakustische Unterstützung nicht gemessen.

Sprachverständlichkeit hängt von Nachhallzeit und Hintergrundgeräusch ab

- Der Speech Transmission Index (STI) ist ein psychoakustischer Parameter, der die Sprachverständlichkeit beurteilt
 - 0 – keine Sprachverständlichkeit
 - 1 – exzellente Sprachverständlichkeit
- Der STI bezieht sowohl Nachhall als auch den Hintergrundgeräuschpegel mit ein
 - $SNR = L_{SN} = L_{\text{Sprachsignal}} - L_{\text{noise}}$
- Bereiche für typische Klassenräume rechts ->
- Achtung: Daten des STI beziehen sich auf erwachsene Personen mit voll entwickelter Muttersprache! Davon kann erst in Sek II ausgegangen werden.



H. Lazarus, Hrsg., *Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation*. Berlin: Springer, 2007.

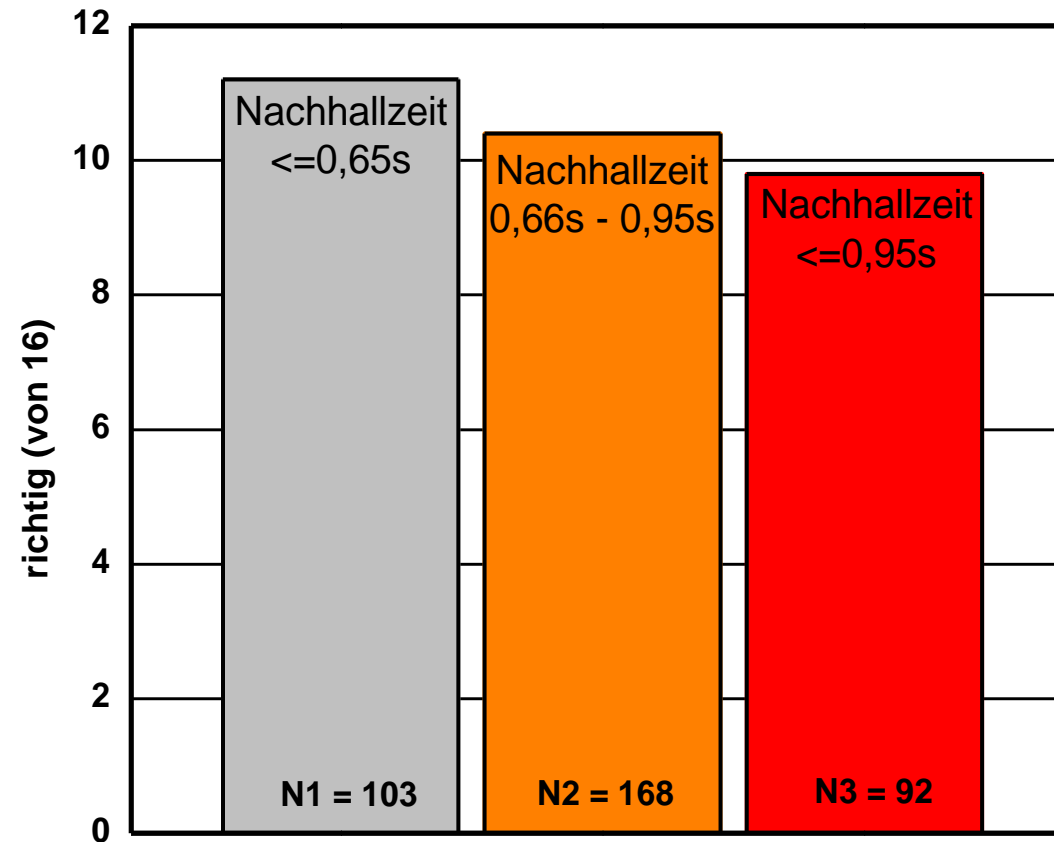
Grafik basiert auf Diffusfeldannahme und Muttersprache.

Auswirkung der Nachhallzeiten in Klassenräumen

Chronische Wirkungen unterschiedlich langer Nachhallzeiten auf kognitive Grundfunktionen

Leistung von Zweitklässlern beim Kategorisieren von Lauten.

(Test unter gleichen Nachhallbedingungen)

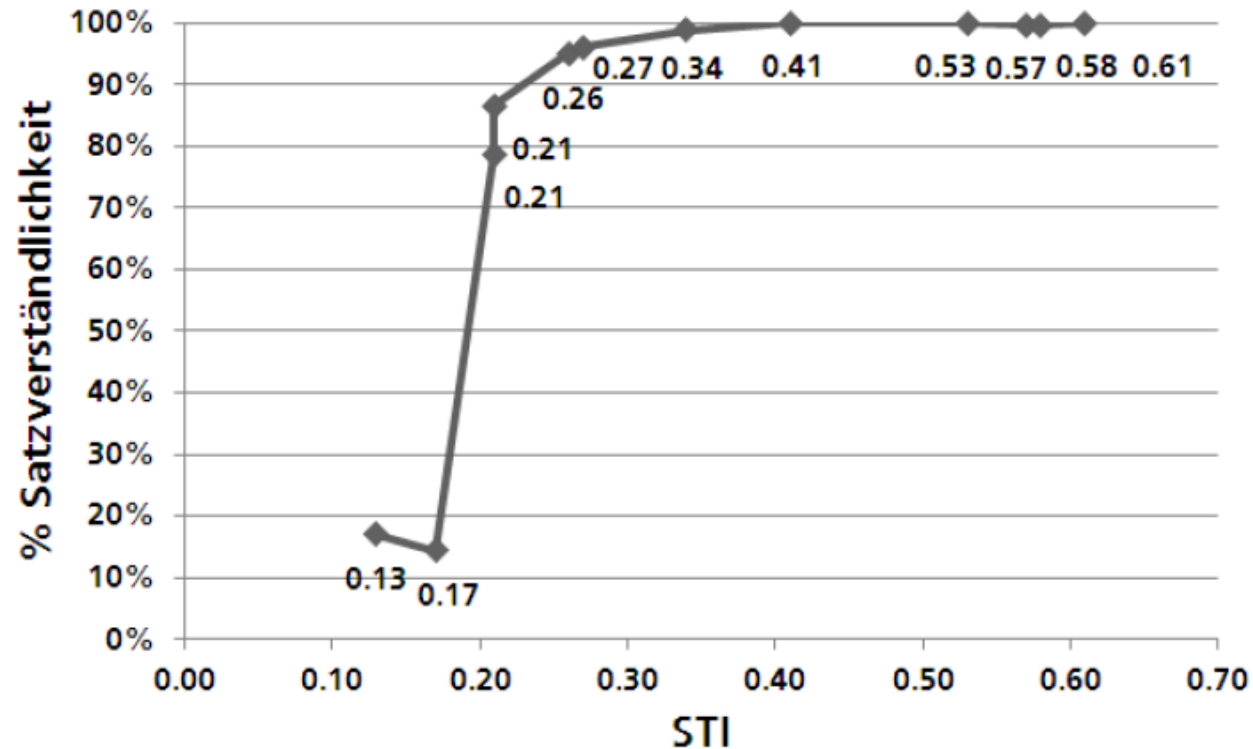


Besser: niedrige Nachhallzeit

Zusammenhänge des Speech Transmission Index (STI)

Individuelle Satzverständlichkeit

Zusammenhang zwischen STI und individueller Satzverständlichkeit ($r=.766$, $p<.01$).

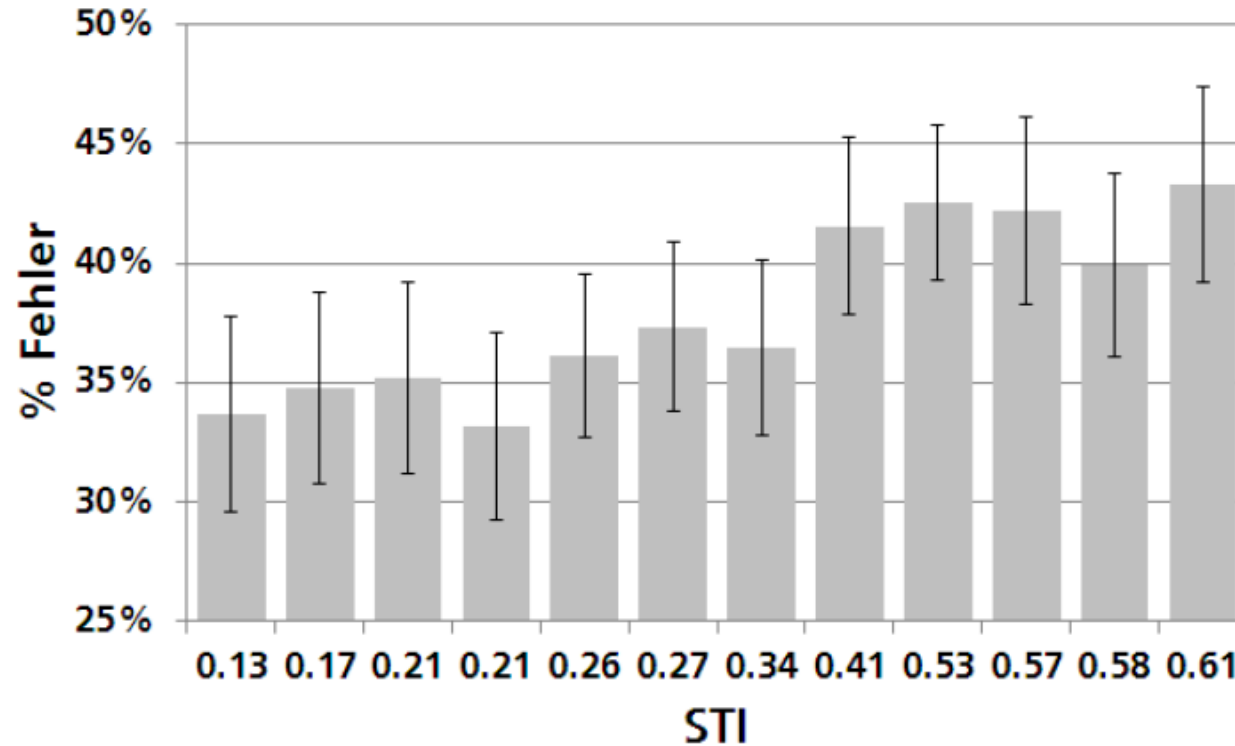


Besser: hoher STI

Zusammenhänge des Speech Transmission Index (STI)

Individuelle kognitive Leistung

Zusammenhang zwischen STI und individueller kognitiver Leistungsfähigkeit ($r=.903$, $p<.01$).



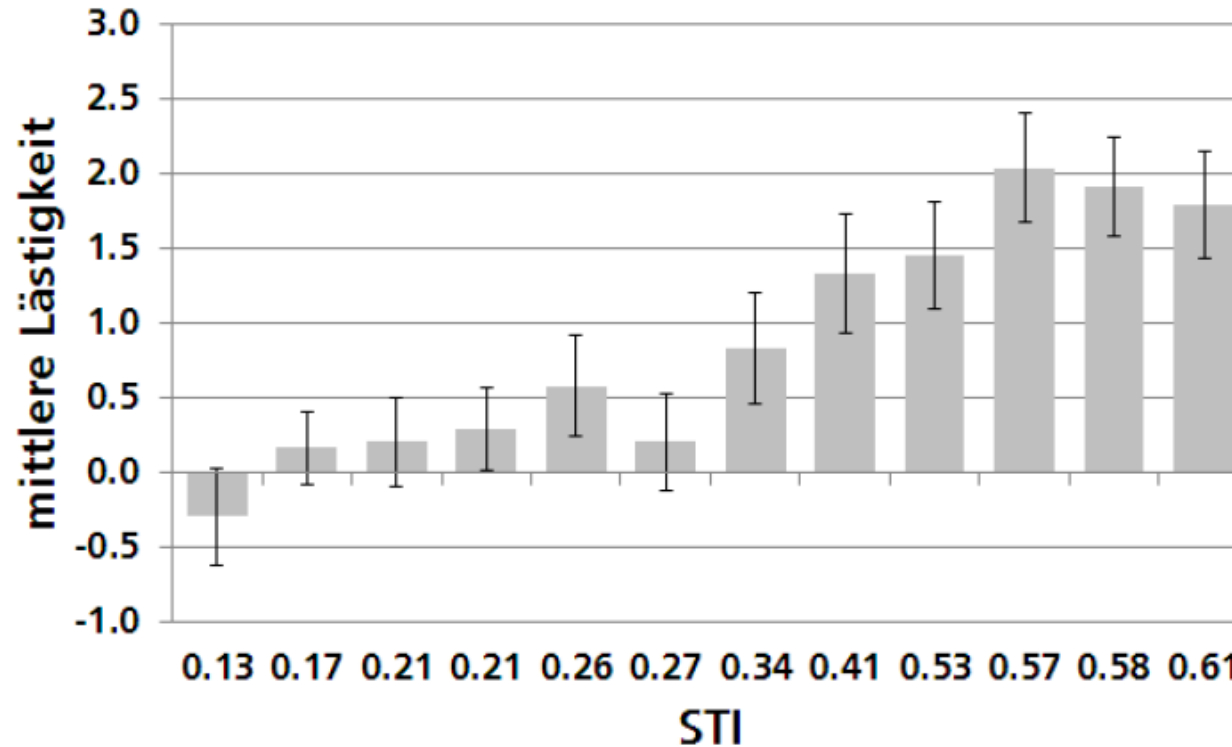
Besser: niedriger STI

Mittelwerte und Standardfehler der prozentualen Fehlerraten bei Bearbeitung einer Kurzzeitgedächtnisaufgabe

Zusammenhänge des Speech Transmission Index (STI)

Individuell empfundene Lästigkeit

**Zusammenhang
zwischen STI und
individuell
empfundener
Lästigkeit ($r=.918$,
 $p<.01$).**



Besser: niedriger STI

Mittelwerte und Standardfehler der Lästigkeitsurteile (7-stufige Urteilsskala: -3 bis 3) während der Aufgabenbearbeitung

Schlussfolgerungen hinsichtlich Nachhallzeit und SNR

- Der SNR muss für Sprachverständlichkeit hoch sein
 - Bei Messungen im Schulbetrieb zeigt sich oft, dass $\text{SNR} < 10 \text{ dB}$ ist, was i.d.R. zu niedrig ist
 - Die Hintergrundgeräusche sind im Unterricht oft zu hoch und schwieriger zu messen
- Die Nachhallzeit muss beachtet werden, ist aber nicht die alleinige Stellschraube
 - Eine kurze Nachhallzeit senkt einerseits die Aktivitätspegel
 - Andererseits reduziert sie den Nutzsprachpegel im Diffusfeld, sodass SNR fällt, wenn Störquellen näher am Empfänger liegen als die Schallquelle
 - Weitere Untersuchungen zu Inklusion und Akustik werden dringend benötigt, um Sonderpädagogik mit Regelschule in Einklang zu bringen

Möglichkeiten für bessere Klassenraumakustik: no rocket science!

■ Hintergrundgeräusche minimieren

Trennbauteile (Türen, Fenster) passend wählen / sanieren

Technische Installationen wie Lüftung passend auslegen

Geräte (Beamer,...) so leise wie möglich wählen

Teppichboden gegen Stuhlrücken und Getrappel

Leise Stühle (Filzgleiter),...

■ Nachhallzeit einstellen

Absorptionsfläche für gute Resultate auf Decke + Seitenwände + Rückwand verteilen (das ist Stand der Technik!)

■ Organisation

Schülerzahl klein halten

Kurze Distanz zwischen Sprecher und Zuhörer

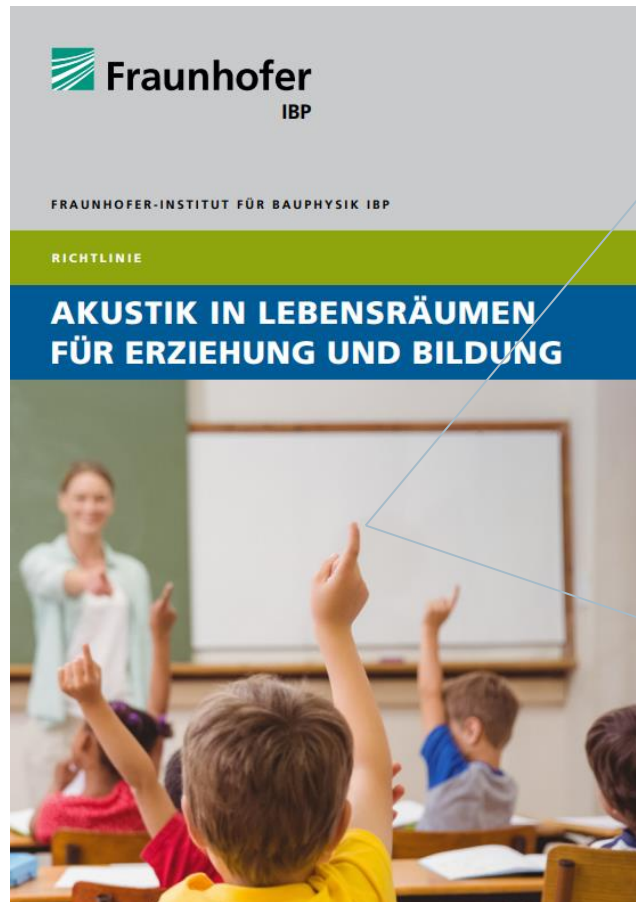
■ Lärmpräventionsprogramme

Einheitliches Vorgehen der Lehrkräfte bzgl. Lärm

Klare »Spielregeln« für alle Kinder vereinbaren

Akustik in Lebensräumen für Erziehung und Bildung

Anforderungen, Gestaltungs- und Umsetzungshinweise



Nutzungs- bzw. Raumkategorien und Anforderungen



Schulen



Raumakustik

**Klassen-, Musik-,
Fach- und Laborräume**

Die Anforderung an die Nachhallzeit T ist vom
Volumen V abhängig.

V bis 200 m³ $T \leq 0,5$ s

200 m³ V 400 m³ $T \leq 0,6$ s

Lernlandschaften

Anforderungen wie für Klassenräume; zusätzlich
müssen einzelne Lernzonen voneinander mit
mobilen Schallschirmen getrennt werden. Deren
Höhe soll 1,6 m nicht unterschreiten.

**Lehrerzimmer, Büros,
Besprechungsräume, Bibliotheken**

Nachhallzeit $T \leq 0,6$ s

<https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/broschueren/ak/akustik-in-lebensraeumen.pdf>

Raumakustik

Die Nachhallzeit (Nhz) ist einer der wichtigsten raumakustischen Parameter

Übliche Berechnung: Sabine'sche Nachhallzeit

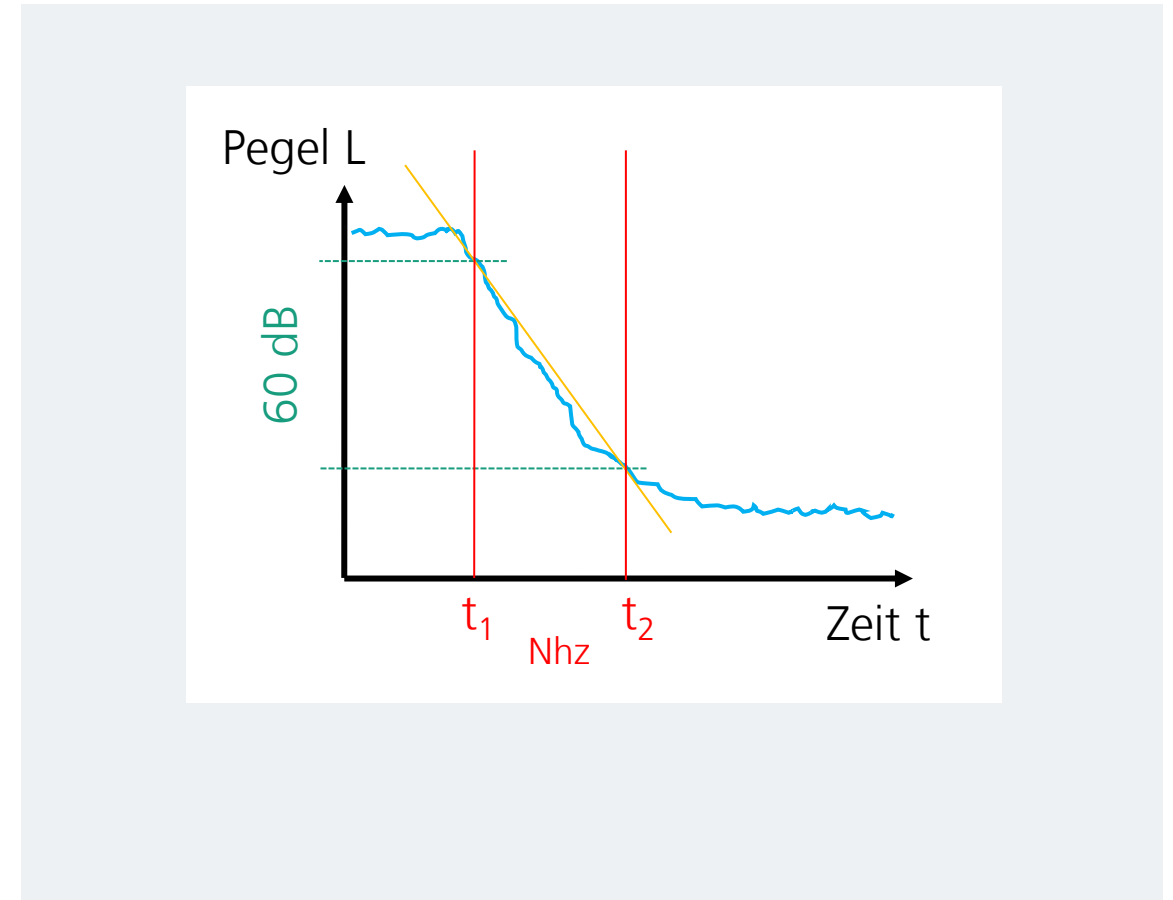
$$T_{60} = 0.163 \frac{V}{S \cdot \bar{\alpha}} = 0.163 \frac{V}{A}$$

- Raumvolumen
- Äquivalente Absorptionsfläche (A) aus
- Raumbofläche (S) und
- Absorptionsgrad (α) der Oberflächen
- Absorptionsfläche (A) von weiteren Objekten

Voraussetzungen

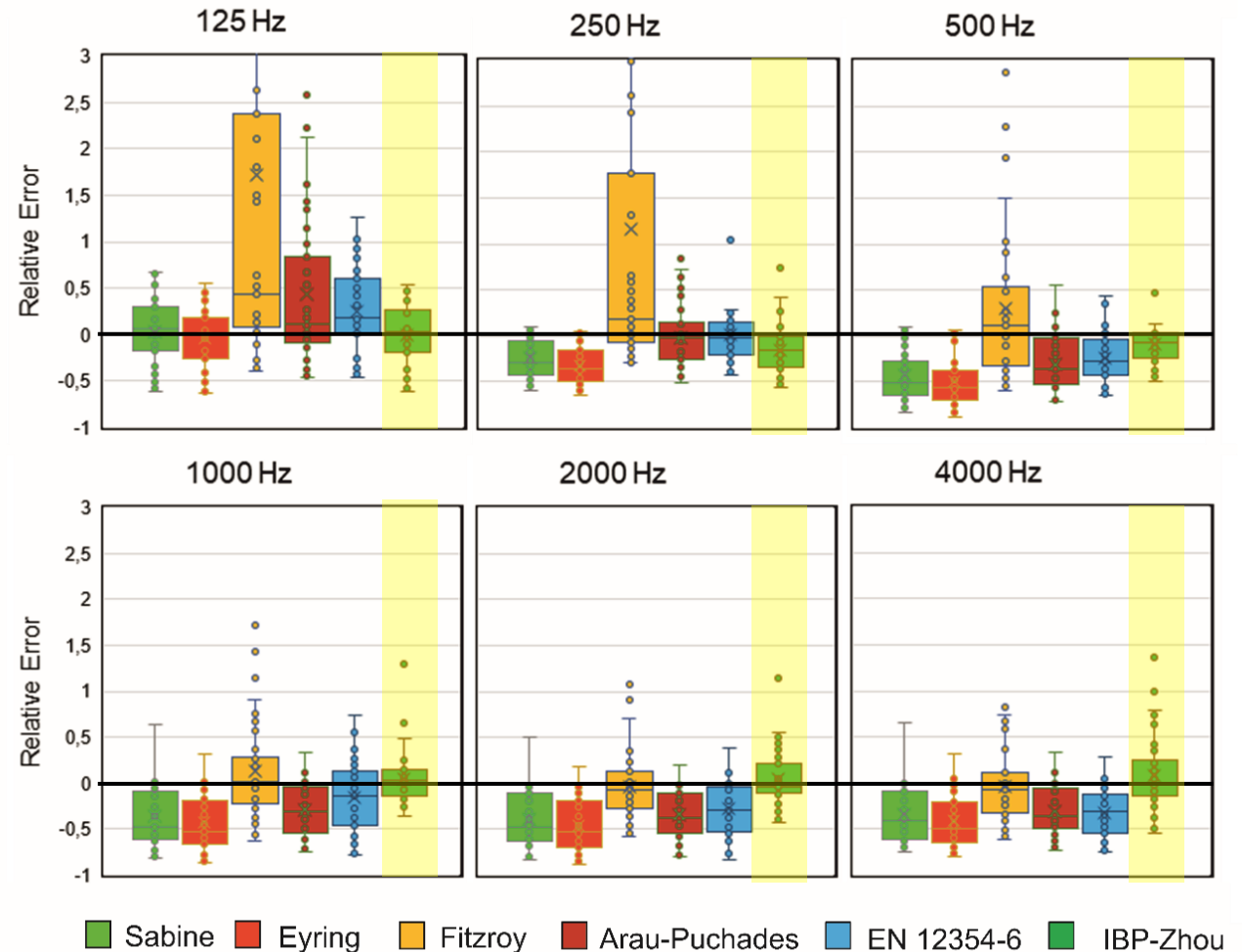
- Diffuses Schallfeld
- Zwischen längster und kürzester Raumseite darf der Faktor 5 nicht überschritten werden
- Die Absorption muss auf alle Raumboflächen nahezu gleichmäßig verteilt sein d.h. der mittlere Absorptionsgrad soll sich in allen Raumrichtungen weniger als der Faktor 3 unterscheiden (DIN 18041:16)
- **Bei nicht-diffusem Schallfeld verlängert sich die gemessene Nachhallzeit.**

Dies kann das Rechenmodell nach Sabine nicht abbilden.



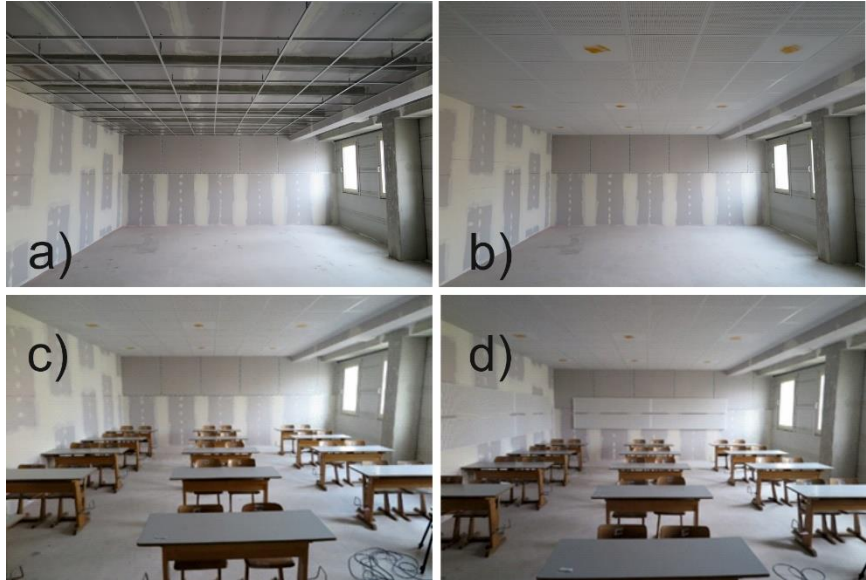
Vergleich Messung – Rechnung in drei Räumen

- Verschiedene Berechnungsmodelle
- Vergleich Messung – Rechnung von 43 Raumsituationen mit verschiedener Ausstattung in drei verschiedenen Laborräumen von IBP und Knauf
- Sabine und weitere Berechnungen liefern zu kurze Nachhallzeiten (mittlerer Fehler negativ)
- Fitzroy liefert tief-frequent zu lange Nachhallzeiten mit großem Fehler
- **Neues Modell IBP-Zhou mit bester Übereinstimmung zu Messungen**
(Mittelwerte bei 0, geringe Streuung des rel. Fehlers)

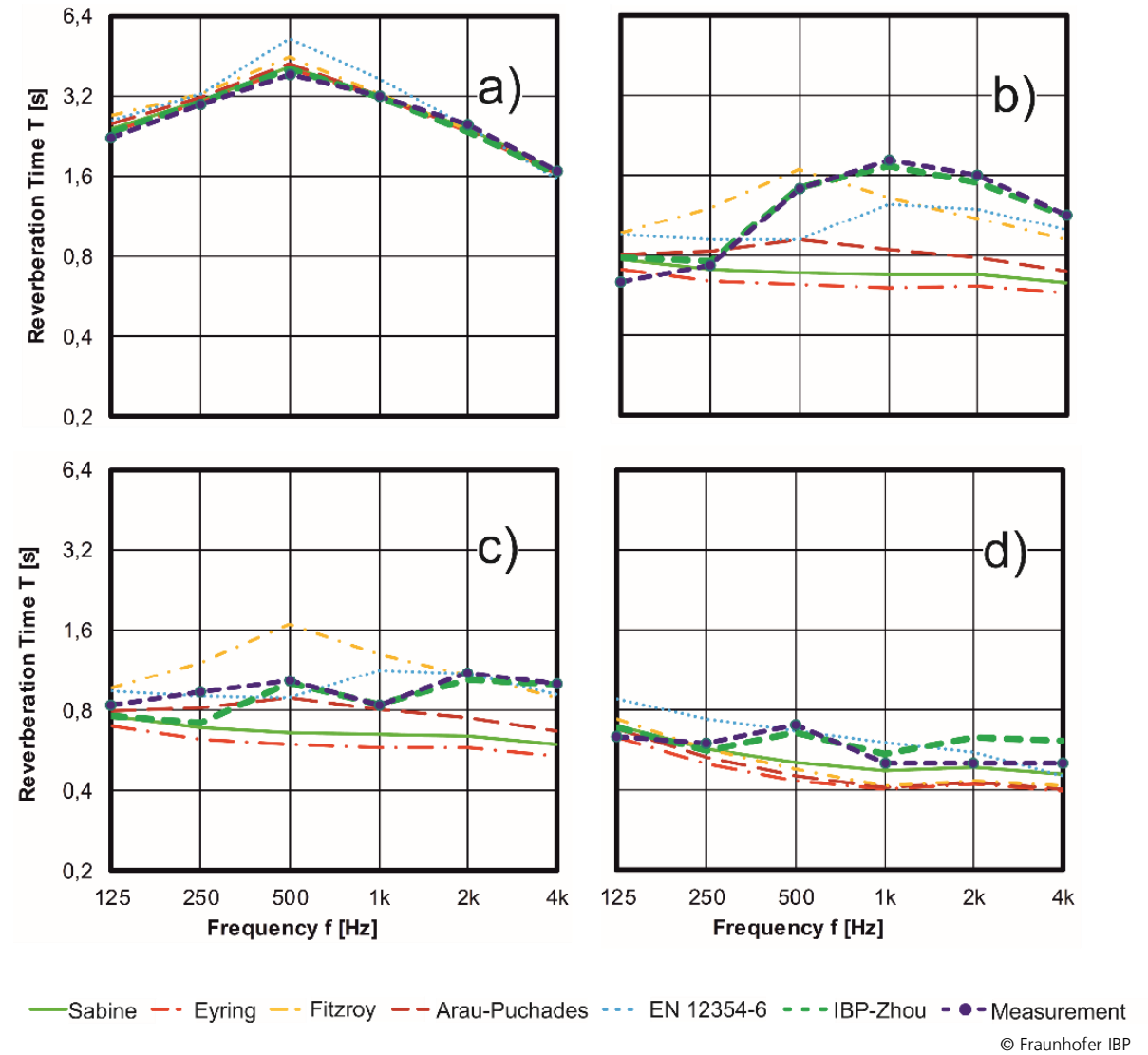


= Neuer Stand des Wissens!

Beispiel Klassenraum



- Vergleich verschiedener Berechnungsmodelle
- Vergleich verschiedener Raumausstattungen
- Neues Modell IBP-Zhou mit bester Übereinstimmung zu Messungen



Berechnung und Bewertung von Nachhallzeiten

Web-App <https://pro.reverberate.de/>



Web-Applikation zur Berechnung der Nachhallzeit in Räumen auf Grundlage des neuen, am Fraunhofer IBP entwickelten Berechnungsmodells



Flexible **Raumgeometrie** sowie Anordnung absorbierender Oberflächen im Raum



Berücksichtigung der **Absorptionsverteilung** im Raum sowie weitere Vorteile im Gegensatz zu klassischen raumakustischen Berechnungen nach Sabine



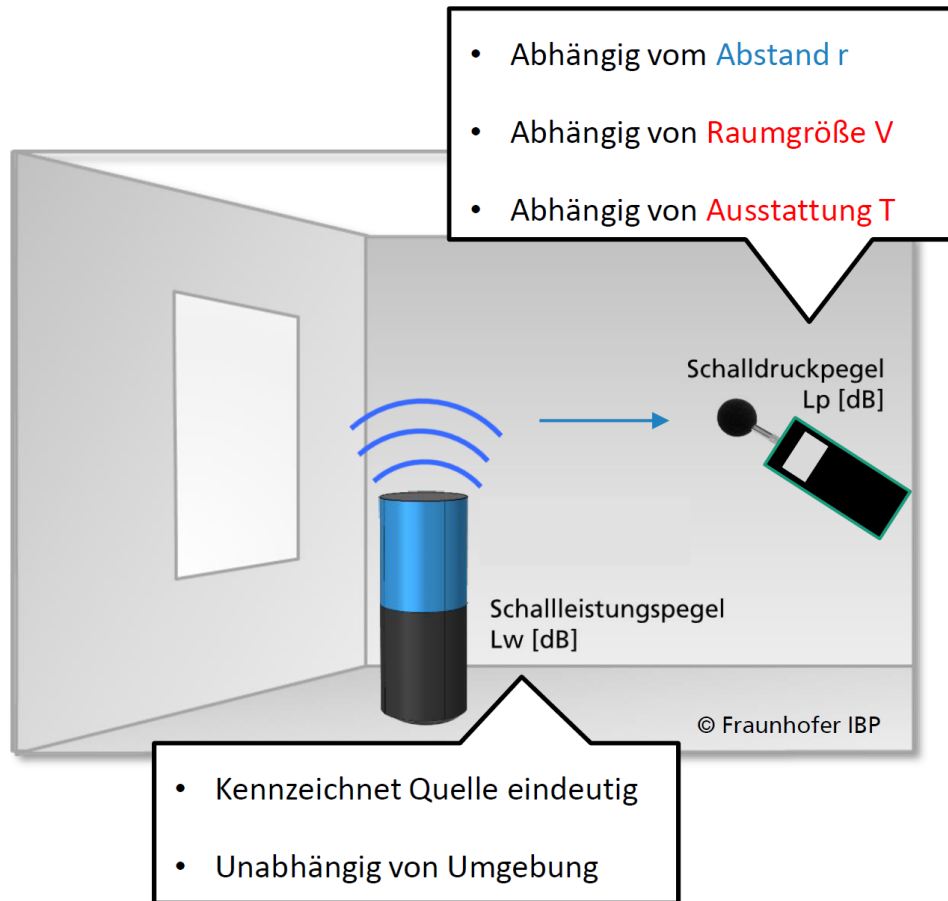
Einordnung der **frequenzabhängigen Nachhallzeiten** entsprechend der akustischen Anforderungen nach DIN 18041



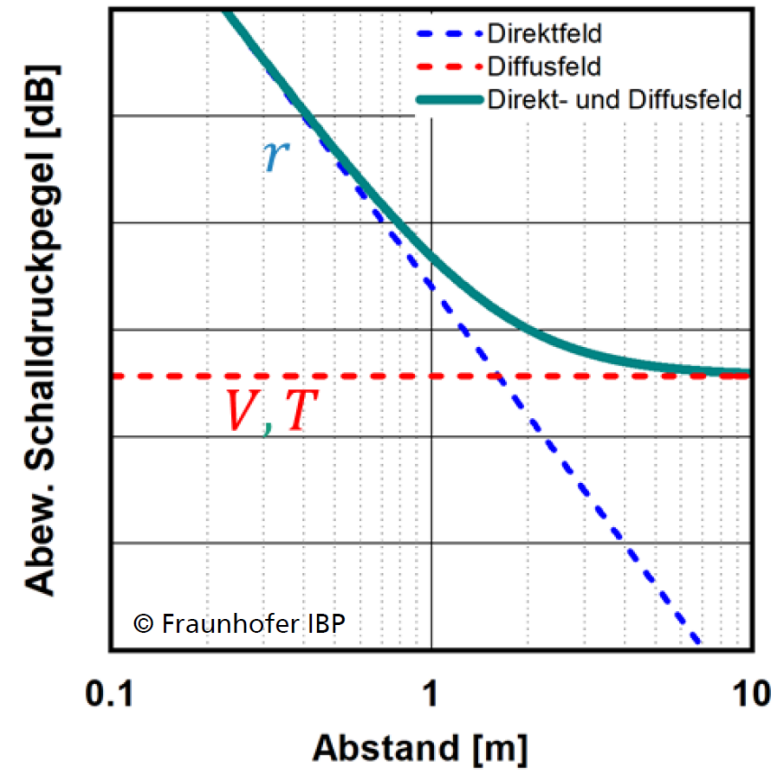
Export der berechneten Nachhallzeiten und Abklingkurven sowie der normativen **Bewertung als PDF-Dokument**



Schalleistungspegel und Schalldruck im Raum

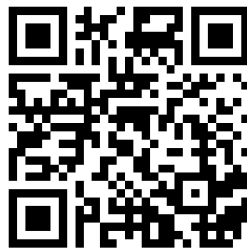


$$L_{p,Raum} = L_w + kor(r, V, T)$$



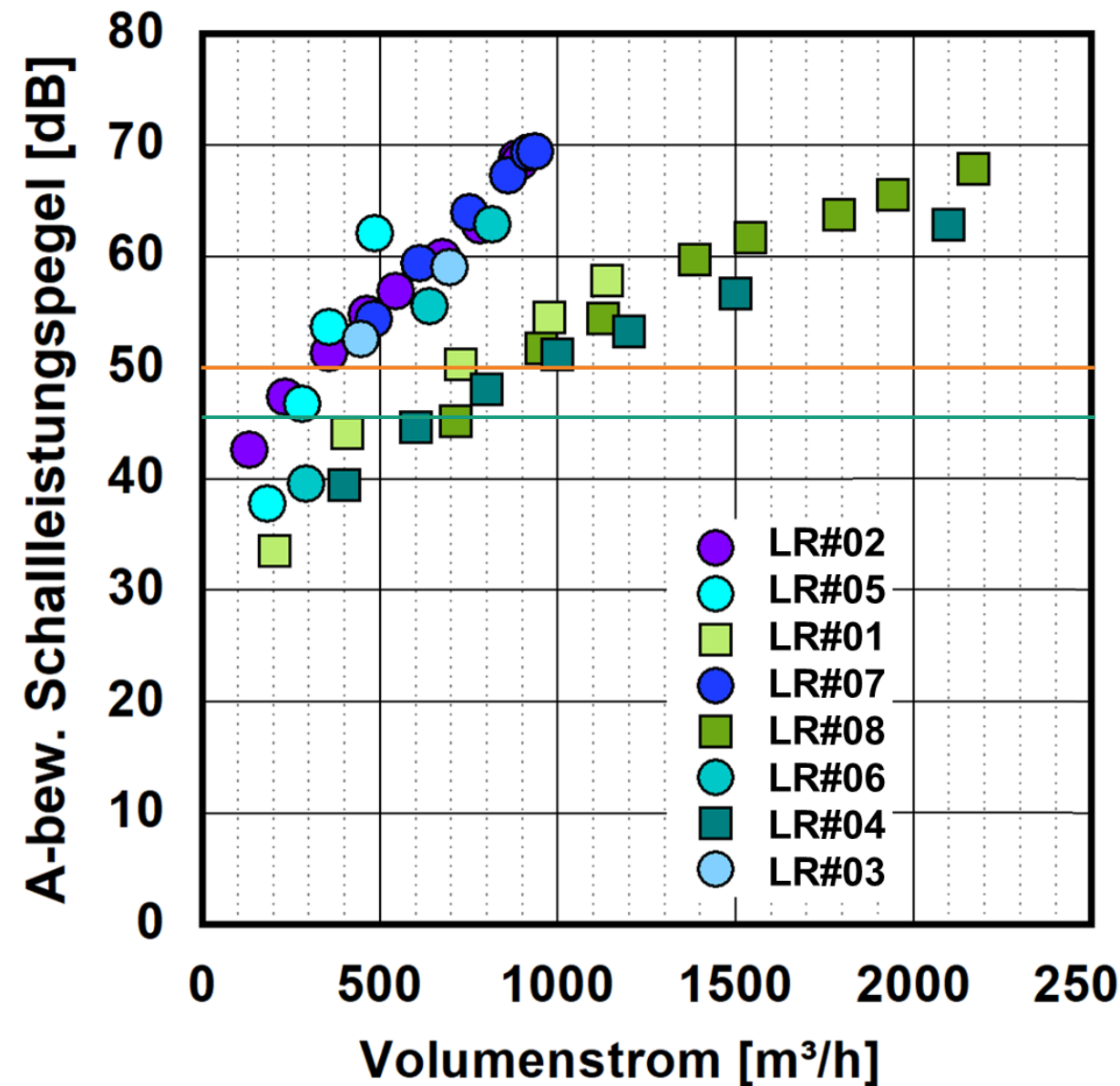
Akustische Charakterisierung von Lüftungsgeräten

- Messung der **Schalleistung** in Abhängigkeit der verschiedenen Betriebsstufen der Lüftungsgeräte.
- Akustische Optimierung der Lüftungsgeräte z. B. mittels einer »akustischen Kamera« oder einem Laservibrometer.



Akustische Charakterisierung von Raumluftreinigern

- Messung der **Schalleistung** in Abhängigkeit der verschiedenen Betriebsstufen der Raumluftreiniger.
 - **Schalleistungspegel** bei vielen Geräten über 55 dB(A)
 - Empfehlung Fraunhofer IBP:
 - **$L_w \leq 50$ dB(A)** – für Großraumbüros, Gaststätten, Verkaufsräume, Umgebungen mit entsprechend höheren Hintergrundgeräuschen und Raumvolumina > 200 m³
 - **$L_w \leq 45$ dB(A)** - Für Einzelbüros, Klassenzimmer, Konferenzräume, ...



Vielen Dank!

Prof. Dr. Gunnar Grün
Stv. Institutsleiter
Tel. +49 8024 643-228
gunnar.gruen@ibp.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Fraunhofer Str. 10
83626 Valley
www.ibp.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP