

AKUSTISCHE GESTALTUNG VON UNTERRICHTSRÄUMEN

Dr. Moritz Späh und Alexander Dickschen, M.Sc.

Auf Wissen bauen



AKUSTIK



ENERGIEEFFIZIENZ
UND RAUMKLIMA



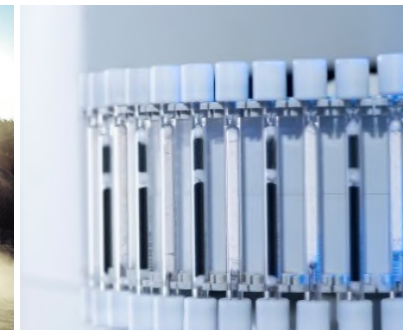
GANZHEITLICHE
BILANZIERUNG



HYGROTHERMIK



MINERALISCHE
WERKSTOFFE UND
BAUSTOFFRECYCLING



UMWELT, HYGIENE
UND SENSORIK

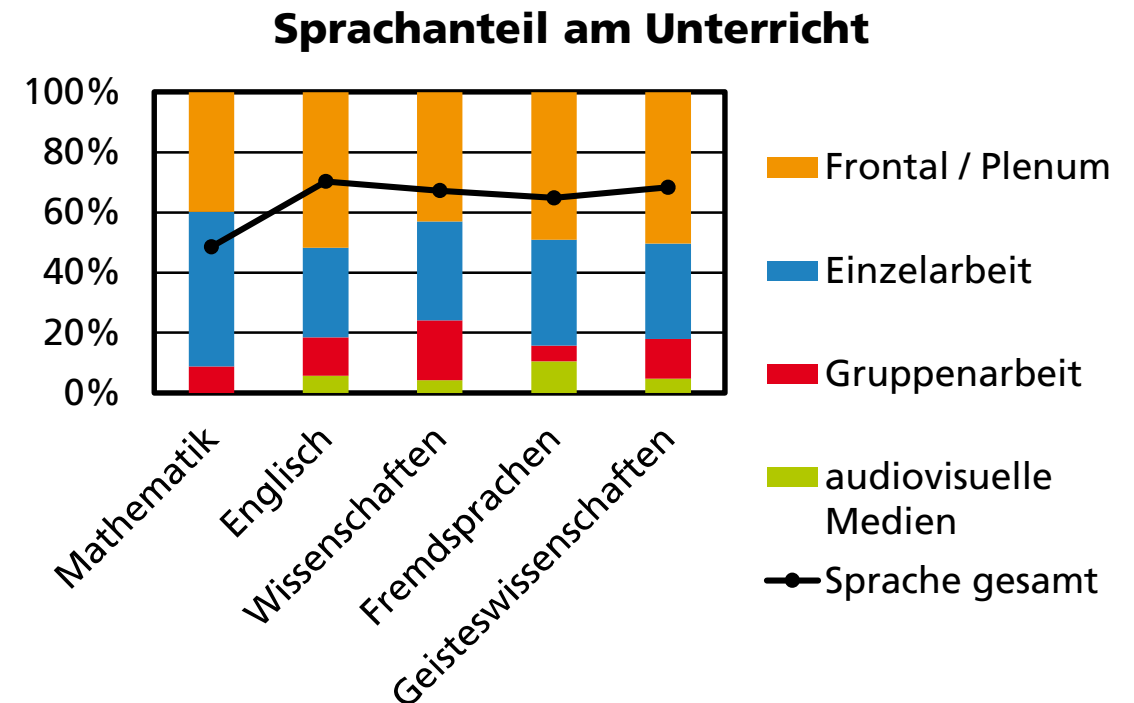
Gliederung

- Einige Fakten zu Schule, Sprache und Unterricht
- Damit alle mitkommen – Inklusion
- Hintergrundgeräusche, Nachhallzeiten und akustische Zusammenhänge
- Akustik im Klassenraum: No rocket science!
- Was wir noch herausfinden sollten



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

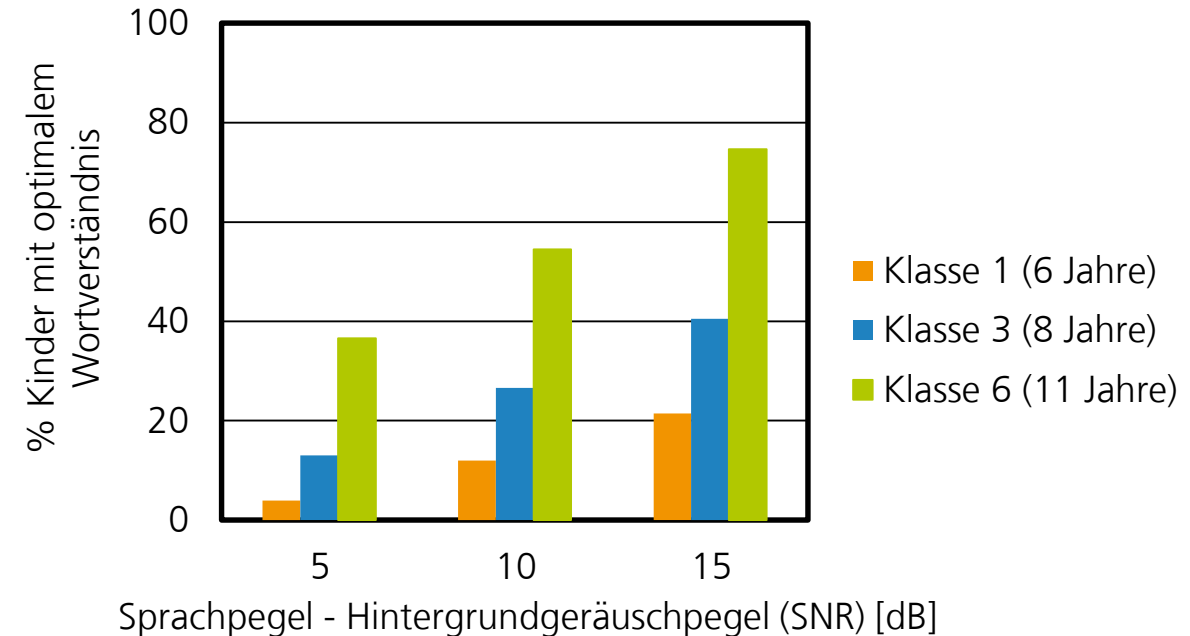


B. Shield, R. Conetta, J. Dockrell, D. Connolly, T. Cox, und C. Mydlarz, „A survey of acoustic conditions and noise levels in secondary school classrooms in England“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 137, Nr. 1, S. 177–188, Jan. 2015.

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.

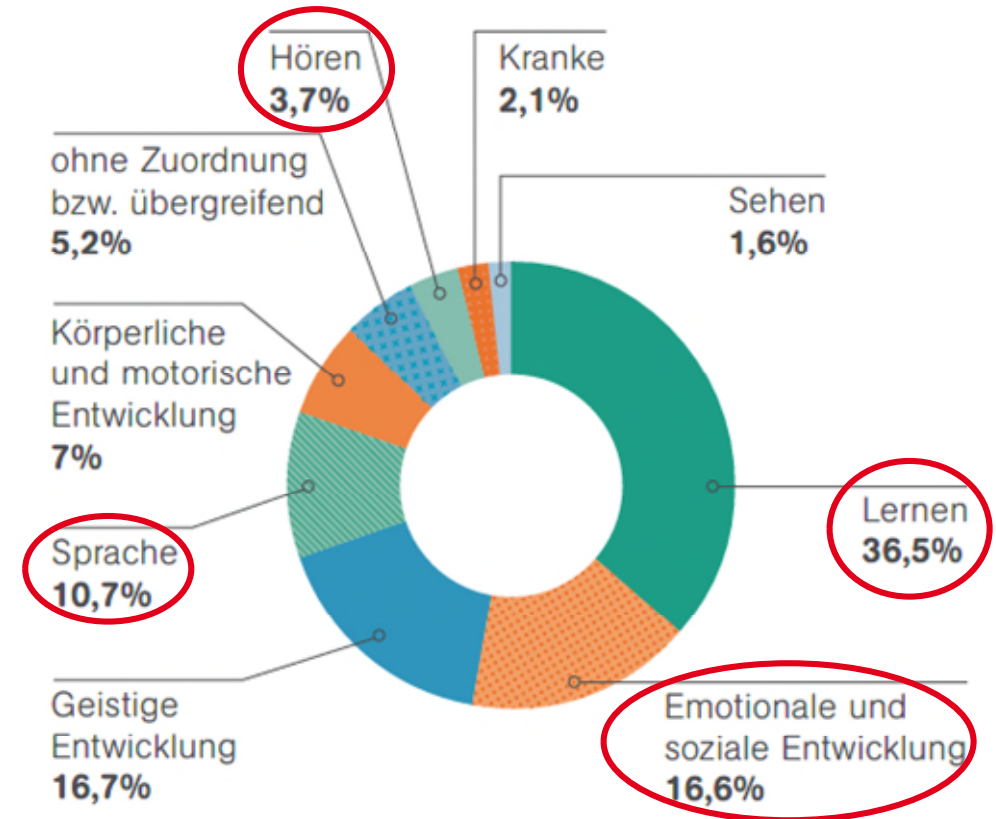
Migration und Mehrsprachigkeit

- Kinder mit mehreren Sprachen sind besonders auf gute Akustik angewiesen:
 - Das verwendete Vokabular in Schule und zu Hause weicht deutlich voneinander ab
 - Struktur der phonologischen Speicher in mehreren Sprachen muss separat gebildet werden, um Gehörtes verstehen und verarbeiten zu können
 - Störgeräusche erschweren diesen Prozess – erhöhte kognitive Anstrengung
- Etwa 25% der Bevölkerung in Deutschland hat einen Migrationshintergrund
 - ~ 788 000 ausländische Kinder, das sind 9% der Schulkinder, haben keinen deutschen Pass
 - Kinder mit Migrationshintergrund und deutschem Pass werden nicht statistisch erfasst

Inklusion

- Die UN-Behindertenrechtskonvention sichert seit 2009 Behinderten die Teilhabe am Regelschulsystem zu
- Anzahl der Schüler 2016/2017: ~0,5 Mio
- 67,5% der Schüler*innen (~337 000) mit sonderpädagogischem Förderbedarf sind besonders auf gute Akustik angewiesen
 - differenzierte Betrachtung notwendig!
- Bislang keine Differenzierung bezüglich Akustik für Inklusion jenseits DIN 18041:2016 – Forschungsbedarf
- Raumakustik ist nicht im Hilfsmittelverzeichnis der Krankenkassen enthalten, obwohl Hilfsmittel auf ruhige Schulen mit kurzer Nachhallzeit aufbauen

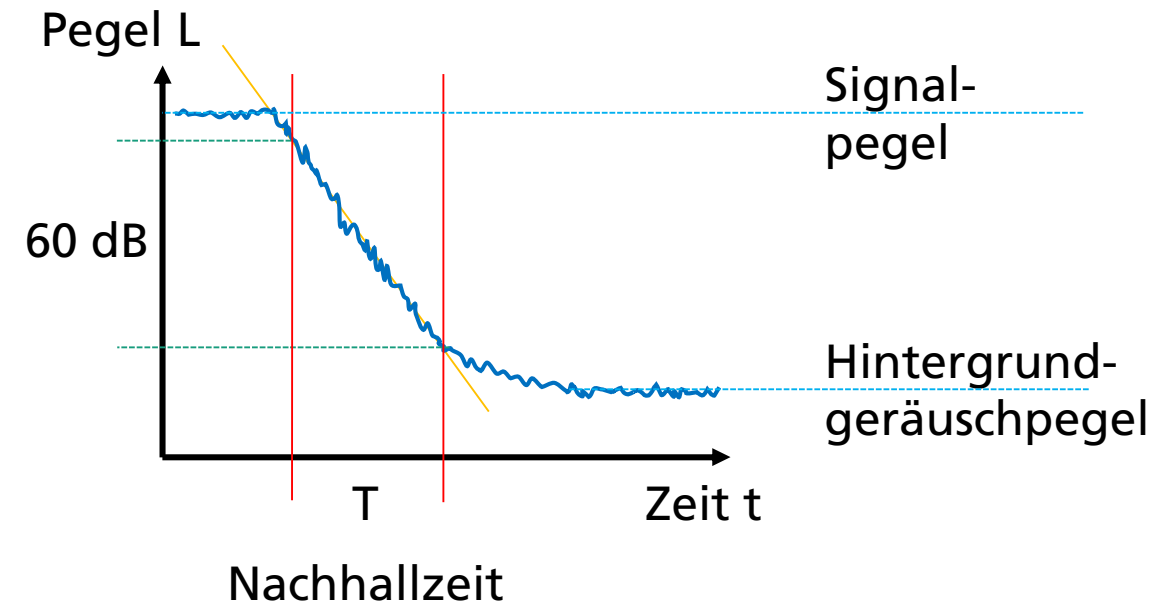
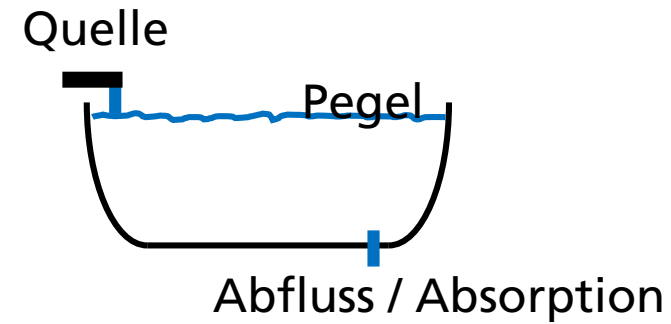
Förderbedarfe von Kindern und Jugendlichen mit diagnostiziertem sonderpädagogischem Förderbedarf bundesweit im Schuljahr 2016/17 (in Prozent)



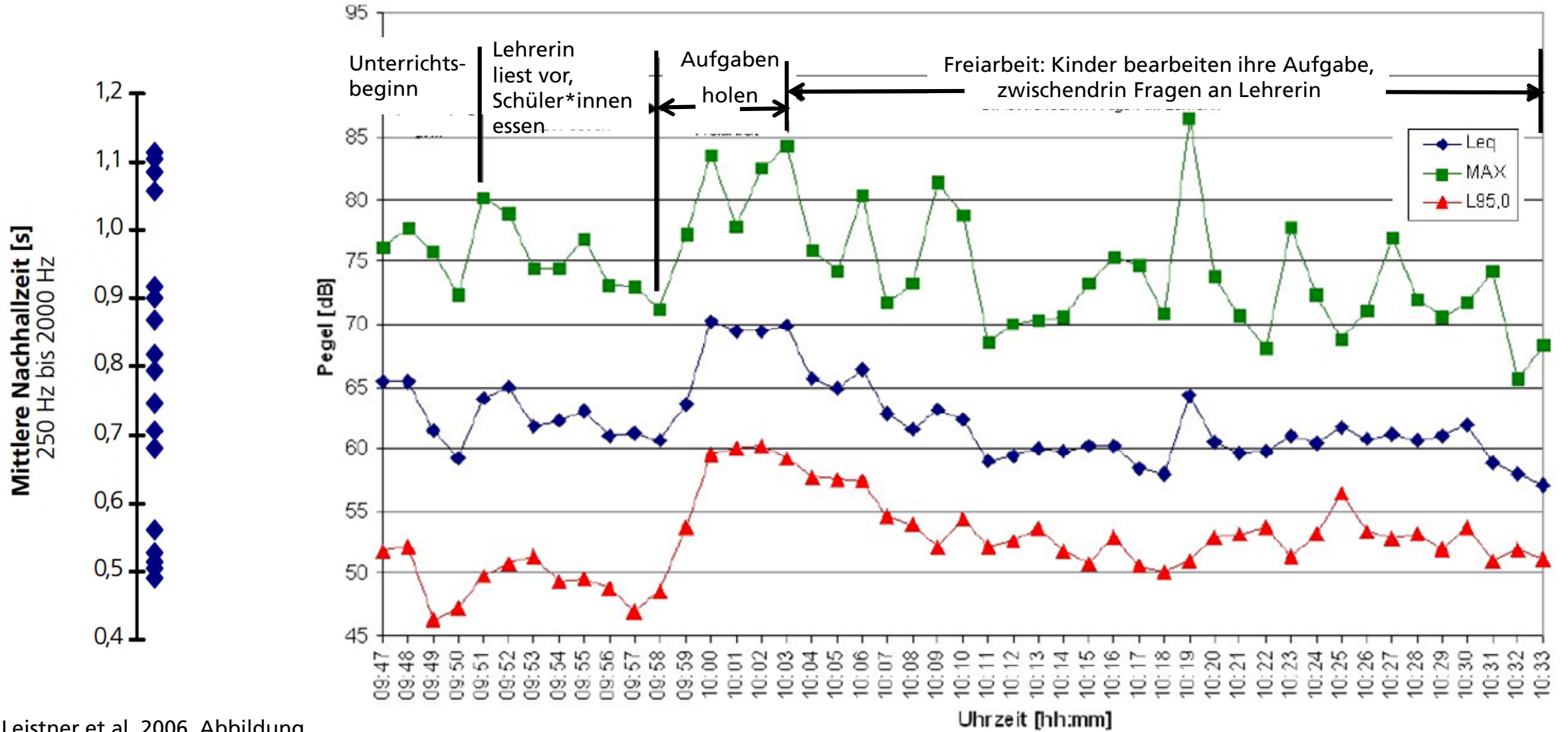
Quelle: Aktion Mensch, Inklusion in Deutschland – die Fakten

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



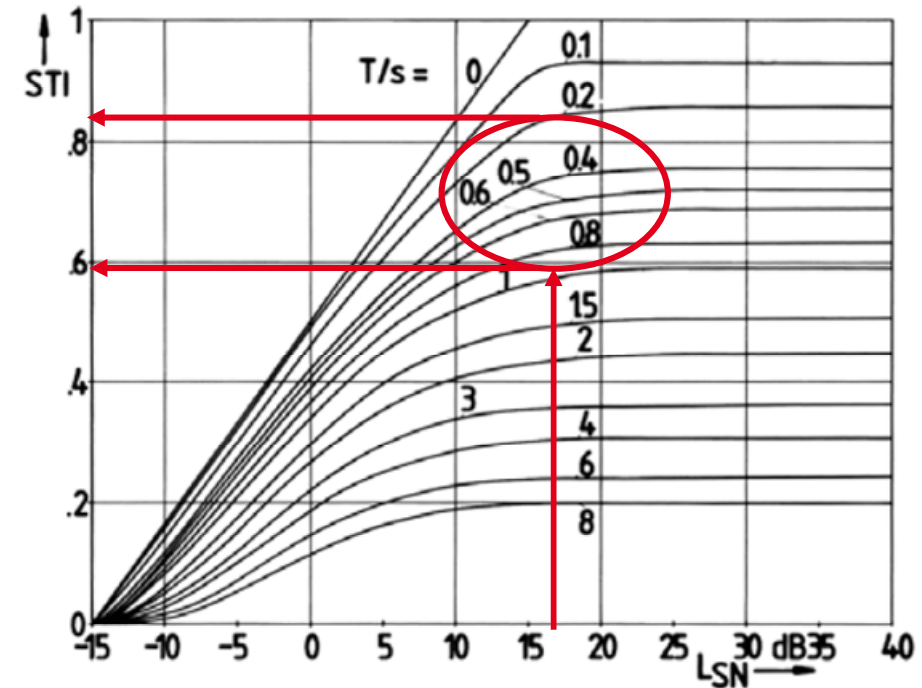
Nachhallzeiten und Hintergrundgeräusche



Leistner et al. 2006, Abbildung

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.

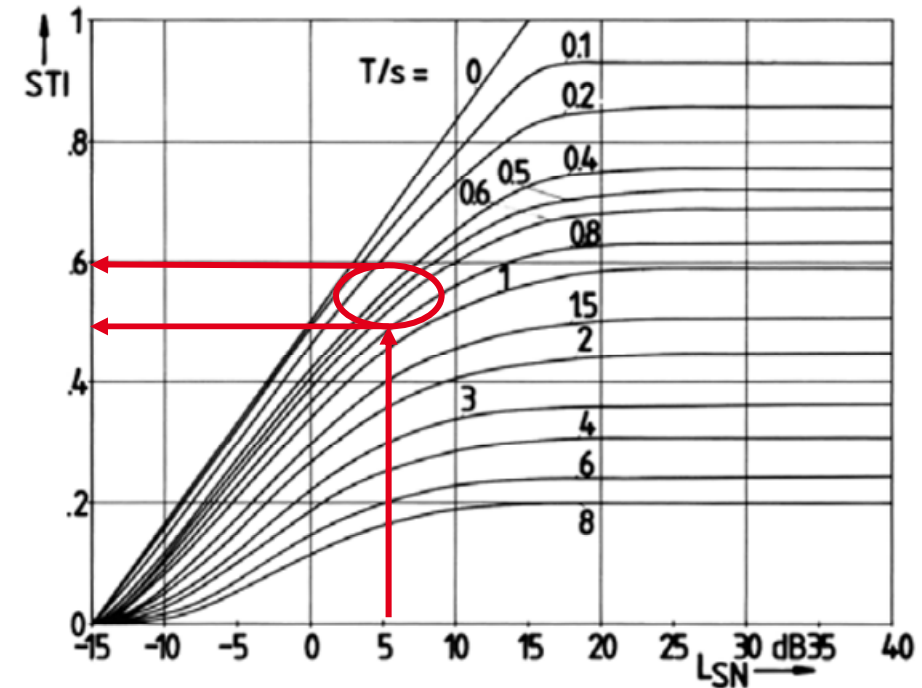


H. Lazarus, Hrsg., *Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation*. Berlin: Springer, 2007.

Grafik basiert auf Diffusfeldannahme und Muttersprache.

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.

Anforderungen nach Norm

- Die Anforderungen an die Nachhallzeit T der DIN 18041:2016 sind volumenabhängig
 - Beispiel für Klassenraum 230 m³:

	A1	A2	A3	A4	A5
Nutzungsbeispiel	Musik	Sprache / Vortrag	Unterricht / Kommunikation	Unterricht / Kommunikation inklusive	Sport
Nachhallzeit $T_{250-2000 \text{ Hz}}$ [s]	1,13	0,73	0,59	0,47	0,77
$L_{NA,Bau}$ [dB(A)]	30	35	35	35	40
$L_{NA,Betrieb}$ [dB(A)]	30	35	35	35	40
L_{NA} [dB(A)]	?	?	?	?	?

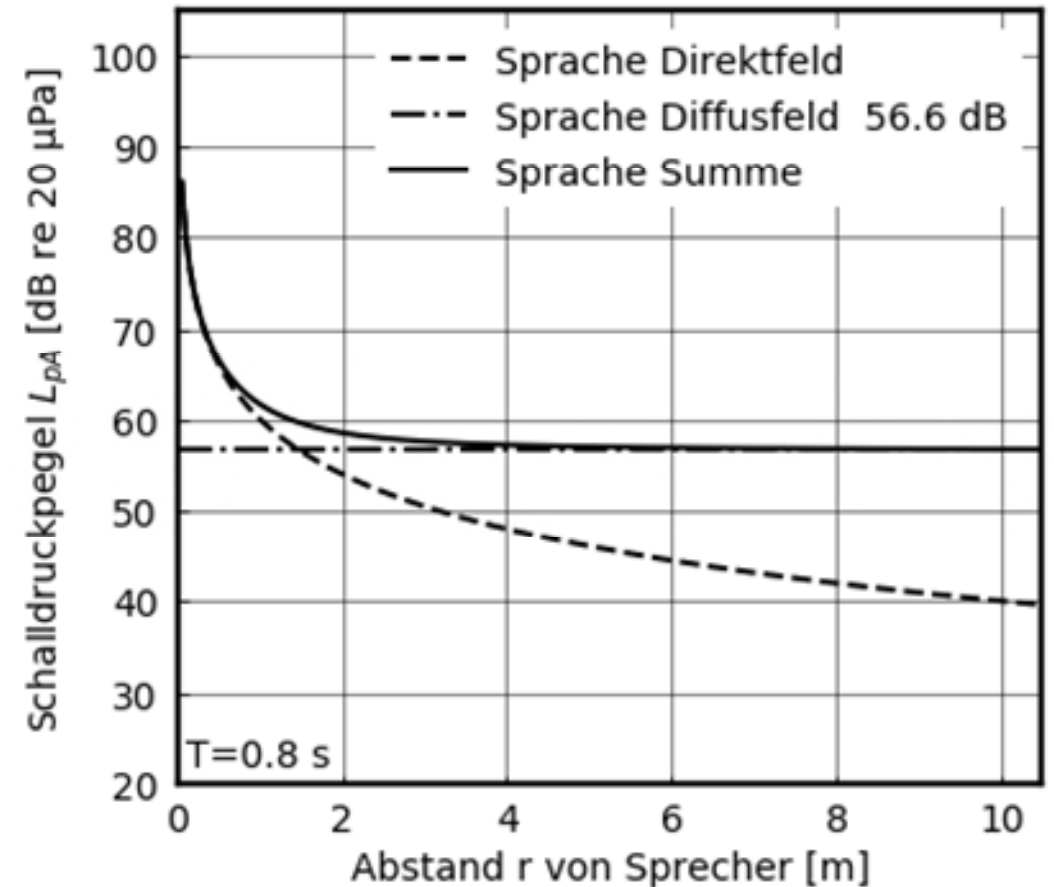
- $L_{NA,Bau}$ und $L_{NA,Betrieb}$ sind Störgeräuschpegel ohne Nutzergeräusche.
- L_{NA} enthält sämtliche Störgeräusche, die auf den Zuhörer einwirken.

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.

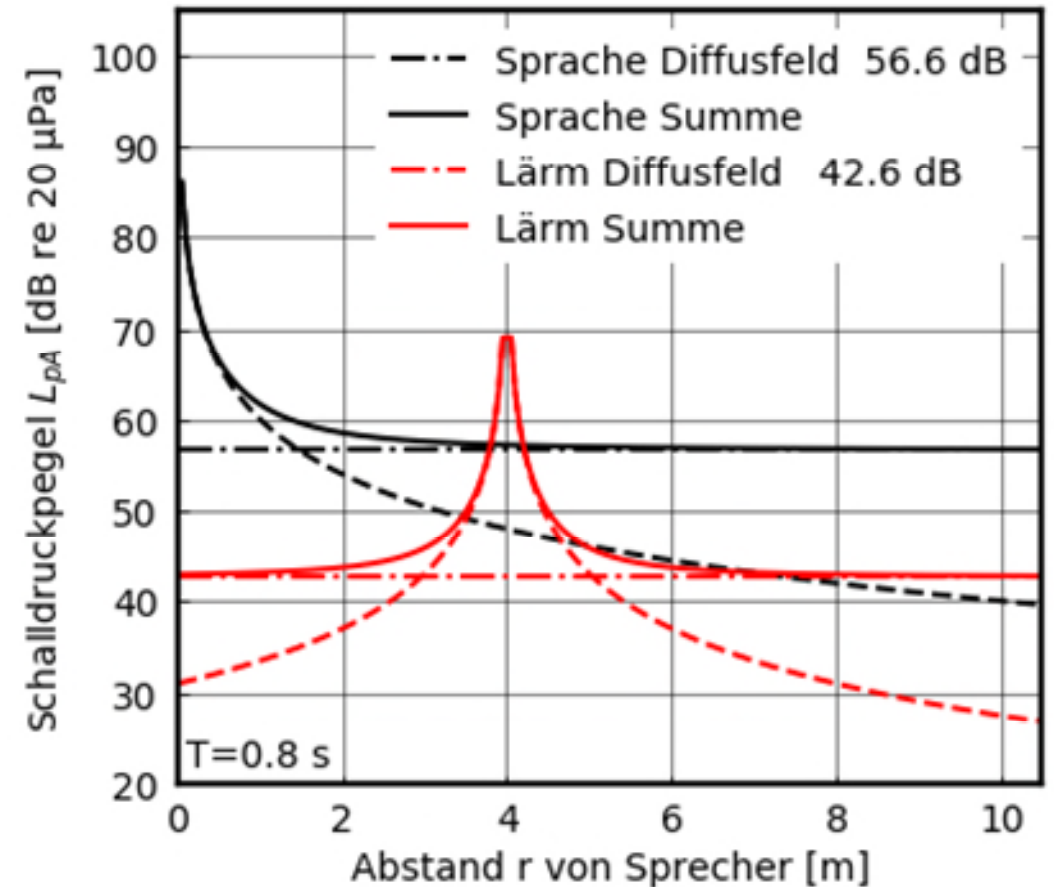
Wie sind Nachhallzeit und SNR verbunden?

- Wirkung von Nachhallzeit im Klassenraum
- Lehrer*in spricht mit normaler Sprachlautstärke
 - Direktfeld
 - Diffusfeld
 - Hallradius ist Schnittpunkt aus Direktfeld und Diffusfeld
- Keine weitere Störquelle betrachtet



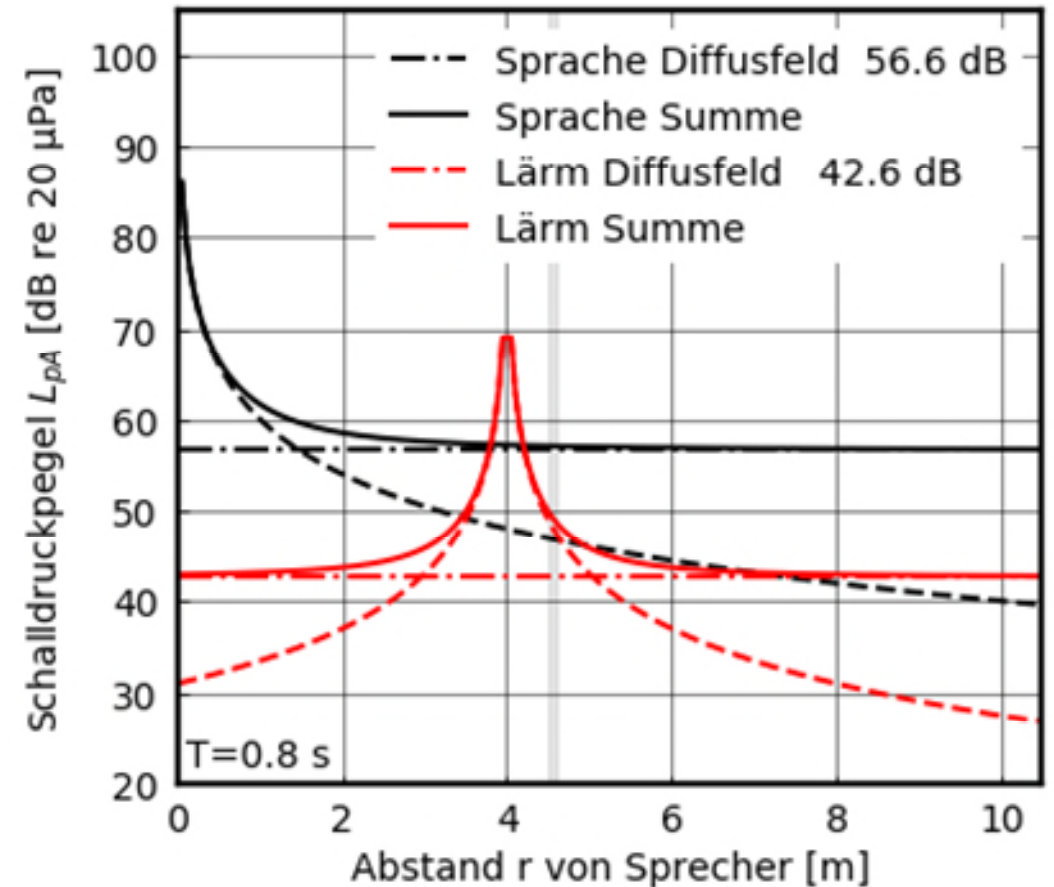
Wie sind Nachhallzeit und SNR verbunden?

- Wirkung von Nachhallzeit im Klassenraum
- Lehrer*in spricht mit normaler Sprachlautstärke
 - Direktfeld
 - Diffusfeld
 - Hallradius ist Schnittpunkt aus Direktfeld und Diffusfeld
- Eine Störquelle 4 m von Lehrer*in entfernt
 - Flüstern
 - Hat ebenfalls Direktfeld und Diffusfeld
 - Diffusfeld: $\text{SNR} = 56,6 - 42,6 \text{ dB} = 14 \text{ dB}$
 - Gilt aber nur weit weg von Störquelle!



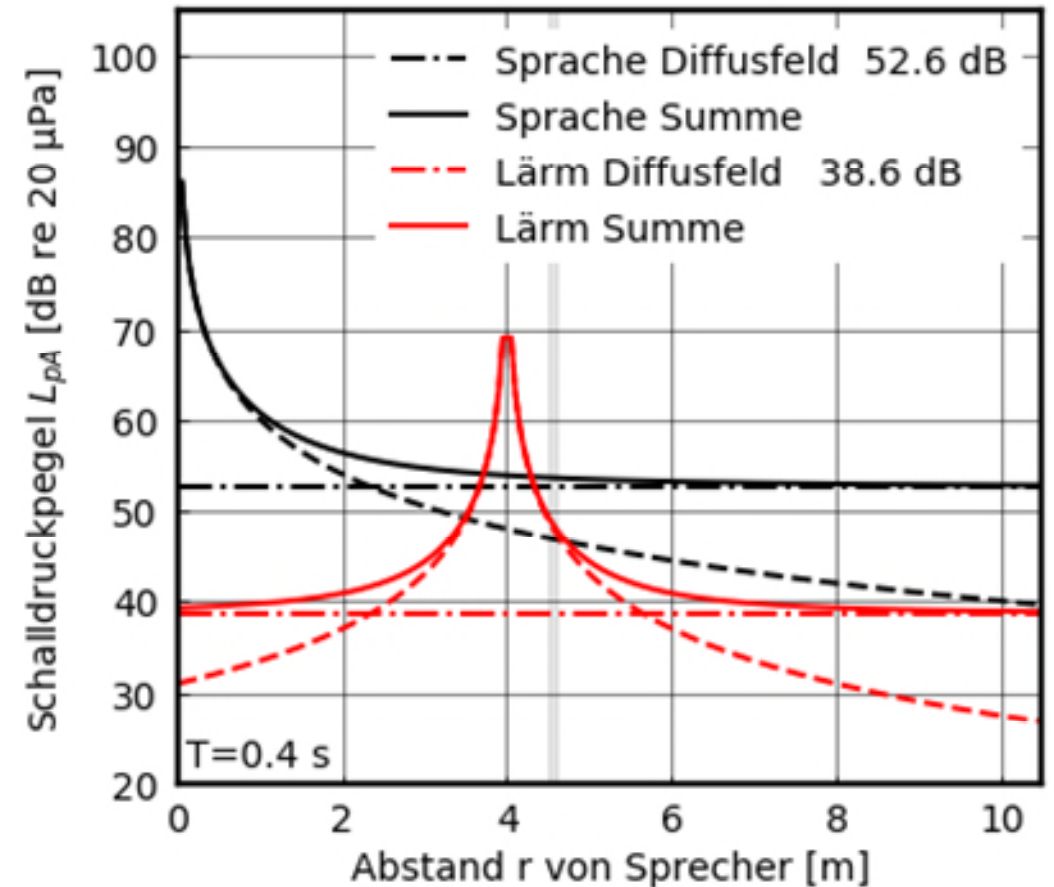
Wie sind Nachhallzeit und SNR verbunden?

- Wirkung von Nachhallzeit im Klassenraum
- Lehrer*in spricht mit normaler Sprachlautstärke
 - Direktfeld
 - Diffusfeld
 - Hallradius ist Schnittpunkt aus Direktfeld und Diffusfeld
- Eine Störquelle 4 m von Lehrer*in entfernt
 - Hat ebenfalls Direktfeld und Diffusfeld
 - Diffusfeld: $\text{SNR} = 56,6 - 42,6 \text{ dB} = 14 \text{ dB}$
 - Gilt aber nur weit weg von Störquelle!
 - Nächster Platz bei 4,5 m: $\text{SNR} = 7,2 \text{ dB}$



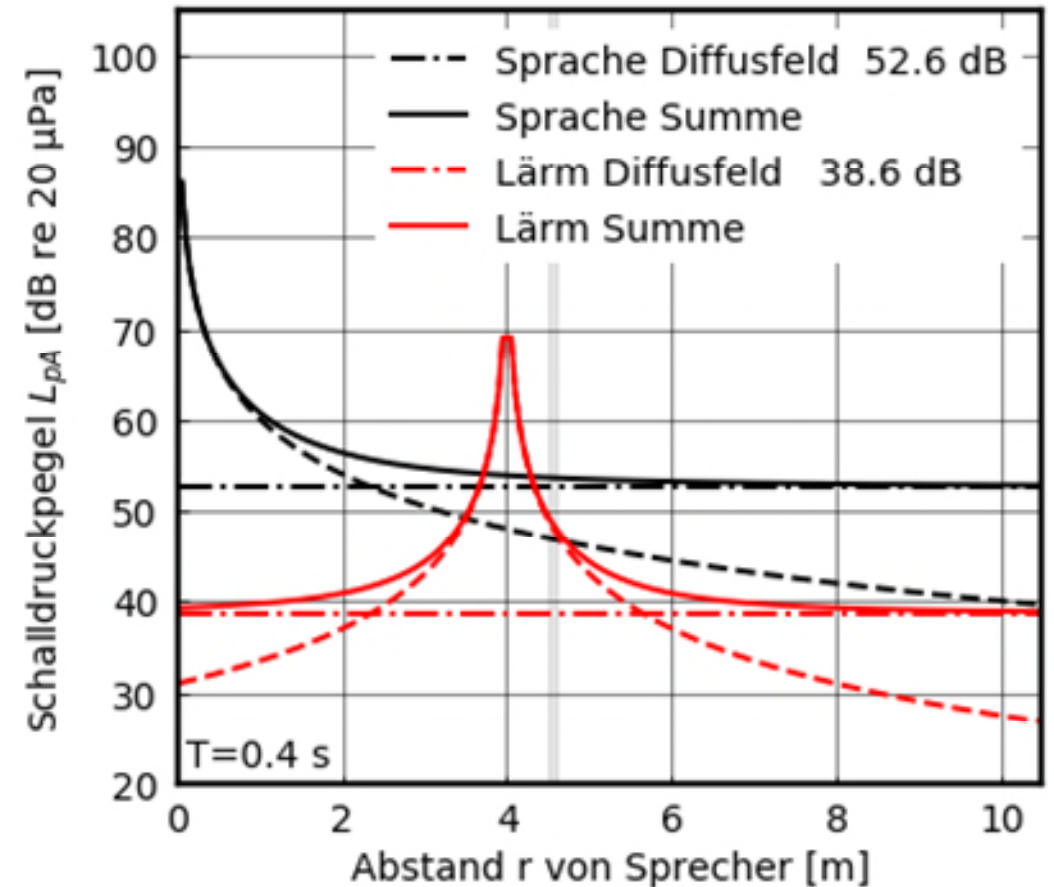
Wie sind Nachhallzeit und SNR verbunden?

- Was passiert, wenn die Nachhallzeit gesenkt wird?
 - 0,8 s -> 0,4 s
- Diffusfeld sinkt um 4 dB für Lärm und Sprache
 - Sprache 56,6 dB -> 52,6 dB
 - Lärm 42,6 dB -> 38,6 dB
 - Diffusfeld: SNR = 14 dB (bleibt)
 - Nächster Platz bei 4,5 m: SNR = 4,2 dB (-3,0 dB!)
- SNR wird kleiner für kürzere Nachhallzeit, solange der Sprecher weiter entfernt ist vom Zuhörer als die Lärmquelle



Wie sind Nachhallzeit und SNR verbunden?

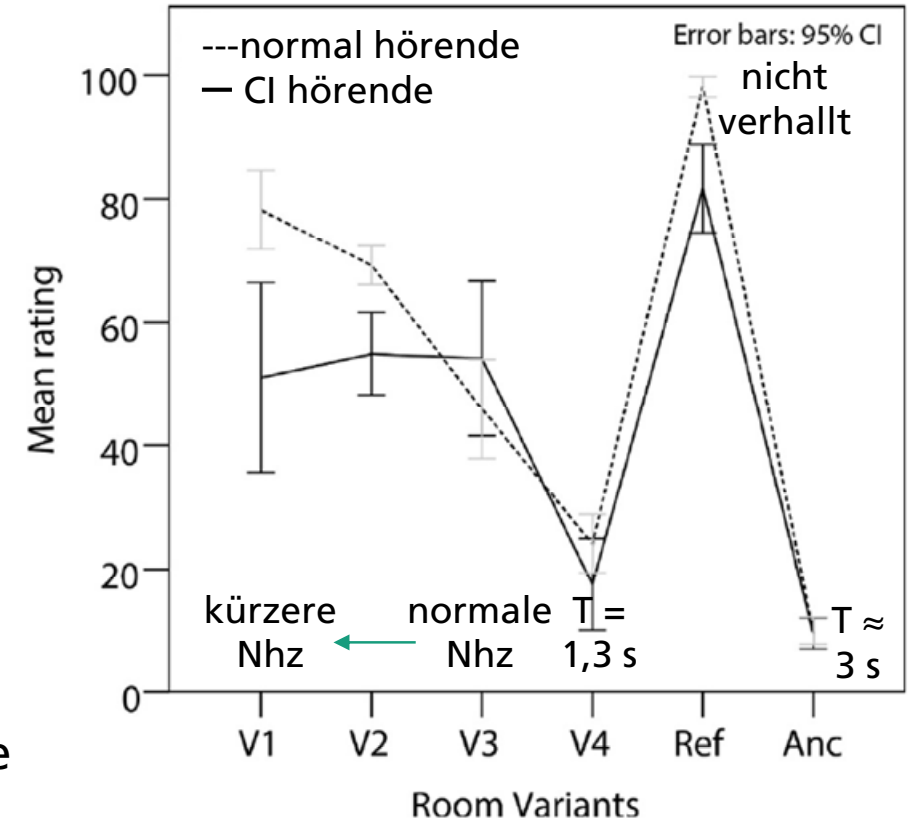
- Erst wenn die Nutzschaallquelle näher ist als die Störschaallquelle wirkt sich eine Nachhallzeit-Senkung positiv aus.
- Nachhallreduktion sollte immer mit Blick auf den SNR erfolgen, um die Sprachverständlichkeit zu maximieren.
- Eine kürzere Nachhallzeit kann Vorteile bringen, wenn weitgehend diffuse Quellen den Lärm bestimmen, z.B. Straßenverkehrslärm, der durch die gesamte Fassadenfläche eindringt.
- Es gibt Hinweise, dass sich Schüler*innen bei kürzeren Nachhallzeiten ruhiger verhalten.



Inklusion

Nachhallzeit für Cochlea Implantat (CI) Nutzer

- DIN 18041 (A4) sieht für Inklusion gegenüber Normalunterricht etwas kürzere Nachhallzeiten vor.
- Eurich et al. (2019) testeten den Sprachkomfort von Schwerhörigen mit CI für Konditionen der DIN 18041
 - vier Nachhallzeiten von simulierten Räumen (Nachhallzeit $T < T_{A4} / T_{A4} = 0,46 / T_{A3} = 0,57 / 1,3$ s)
 - variierte Sprecher-Zuhörer-Distanzen bei T_{A4} (V2) (1 m / 3,5 m / 6 m / 8,5 m)
- Es konnte mit CI kein signifikanter Unterschied zwischen den kurzen Nachhallzeiten festgestellt werden, nur für sehr lange Nachhallzeiten (V4: $T = 1,3$ s).
- Lediglich eine Sprecher-Zuhörer-Distanz von 1 m zeigte signifikant besseren Sprachkomfort mit CI.



B. Eurich, T. Klenzner, und M. Oehler, „Impact of room acoustic parameters on speech and music perception among participants with cochlear implants“, *Hearing research*, Bd. 377, S. 122–132, 2019.

Zusammenfassung zu Nachhallzeiten 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

Zusammenfassung

- Schule benötigt verständliche Sprache
- Bestandsklassenzimmer zeigen oft zu hohe Nutzergeräusche und ungeeignete Nachhallzeiten für hohe Sprachverständlichkeit
- Akustik sollte zur Sprachentwicklung (Alter/Migration) passen
 - Daher macht es Sinn, zwischen Grundschulen und weiterführenden Schulen akustisch zu differenzieren (bislang nicht Stand der Technik!)
- Inklusion erfordert niedrige Hintergrundgeräusche und zum Teil elektroakustische Hilfsmittel – differenziertere Betrachtung notwendig
- Maßnahmen helfen Lehrer*innen hohe Stimmbelastung zu senken
- Sprachverständlichkeit ist nicht gleich Lernfortschritt – hier gibt es Forschungsbedarf in Deutschland!



Besten Dank für Ihr Interesse. Haben Sie Fragen?

Moritz Späh
Gruppenleiter Raumakustik
Abteilung Akustik
moritz.spaeh@ibp.fraunhofer.de

Alexander Dickschen
Raumakustik
Abteilung Akustik
alexander.dickschen@ibp.fraunhofer.de

Wir danken der
Heinz Trox Wissenschafts gGmbH
für die Unterstützung
der zugrunde liegenden Recherche.