

Projekt Toningenieur

Sprachverständlichkeit in Vortragsräumen

Mario Schwarz

Graz, am 18. Juli 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	4
2	Einleitung	4
2.1	Notwendigkeit	4
2.2	Technische Einleitung	4
3	Theorie	5
3.1	STI aus Impulsantwort	6
3.1.1	Modulationsreduktion bedingt durch Nachhall	7
3.1.2	Modulationsreduktion gesamt	8
3.1.3	Bildung des STI	8
3.2	STI aus Messung mit sprachähnlichen Anregungssignalen	9
3.2.1	Prüfsignal / Modellierung der Sprache	9
3.2.2	Messung der MTF	10
3.2.3	Berücksichtigung von Verdeckung und absoluter Hörschwelle	10
3.2.4	Bildung des STI	11
3.3	Qualifizierung des STI	12
4	Messungen in der Volksschule Berliner Ring / Bestandsaufnahme	13
4.1	Messaufbau	13
4.2	Auswertung der Daten	14
4.2.1	Matlab-Scripte	14
4.2.2	Sprachsignalanalyse	17
4.2.3	Vergleich mit der Norm	17
4.2.4	Umgebungsgeräusuchanalyse	18
4.2.5	Spektren der aufgenommenen Messdaten	19
5	Implementierung der STI-Messung	19
5.1	STI aus Impulsantwort	20
5.1.1	Sweepgenerierung	20
5.1.2	Anregung mit dem log. Sweep	20
5.1.3	Ermittlung des STI aus der Impulsantwort	21
5.2	STI aus Messung mit sprachähnlichen Signalen	21
5.2.1	Generieren der Sprachsignale	21
5.2.2	Kalibrieren der Messung	22
5.2.3	Messung der MTF	24
5.2.4	Ermittlung des STI aus den aufgenommenen Daten	27

6	Messung des Speech Transmission Index STI - Ausführung	29
6.1	Messung des STI im CUBE	29
6.1.1	Aufbauplan, Maße	29
6.1.2	Messequipment	29
6.1.3	STI aus Impulsantwort	30
6.1.4	STI aus Messung mit Sprachähnlichen Signalen	31
6.1.5	Vergleich der Messungen	32
6.2	Ermittlung des STI für verschiedene Räume	32
6.3	Messung des STI in Klassenräumen der Volksschule Berliner Ring	35
6.3.1	Aufbauplan, Maße	35
6.3.2	Messequipment	35
6.3.3	STI aus Impulsantwort	36
6.3.4	STI aus Messung mit Sprachähnlichen Signalen	39
6.3.5	Vergleich der Messungen	42
7	Diskussion, Ausblick	42
7.1	Messungen, Messmethoden	42
7.2	Messung CUBE	43
7.3	Messung VS Berliner Ring	43
	Literaturverzeichnis	45
	Anhang	46

1 Aufgabenstellung

In diesem Projekt soll die Sprachverständlichkeit in mehreren Klassenräumen einer Grazer Volksschule gemessen und gegebenenfalls (in einem weiteren Schritt) einfache raumakustische Sanierungsmaßnahmen vorgeschlagen werden.

Dazu soll ein Messsystem zur Erfassung des Speech Transmission Index (STI) laut ÖNORM EN 60268-16 [1] auf Basis der Echtzeit-Programmiersprache *Pure Data* (*pd*) entwickelt werden. Weiters soll der STI über die Impulsantwort ermittelt werden können und die Ergebnisse der beiden Methoden verglichen werden.

2 Einleitung

2.1 Notwendigkeit

Internationale Studien zeigen, dass die Sprachverständlichkeit in vielen Schulklassen unzureichend ist und die SchülerInnen erhöhte Aufmerksamkeit allein für das Verstehen des Gesprochenen verwenden müssen.

Die Bedeutung einer zweckentsprechenden akustischen Qualität von „Alltagsräumen“ rückt zwar zunehmend ins allgemeine Bewusstsein, jedoch wird die besondere Dringlichkeit bei Klassenräumen unterschätzt. Während Erwachsene normale Sprache bei einem SNR von 0 dB verstehen können, ist das bei Kindern definitiv nicht der Fall [10]. Kinder können irrelevante Schallanteile nicht ignorieren. Ihr Gehirn ist noch nicht soweit ausgebildet, dass es Nachhall und direkten Schall zu einem zusammengehörenden Signal zusammenfassen kann [9]. Solche Studien machen klar deutlich, dass eine gute akustische Qualität maßgeblich an der Qualität des Lehrbetriebes entscheidend ist.

2.2 Technische Einleitung

Die Sprachverständlichkeit (speech intelligibility) wird primär durch die Nachhallzeit des Raumes (Reflexionen und störende Echos) und dem Signal-Störabstand (Grundgeräuschpegel, Ambient Noise) bestimmt. Bei einer optimalen Übertragung zwischen Quelle und Ort des Hörers wird am Hörort eine exakte Kopie des Quellsignals erhalten. In einem Raum ergeben sich neben dem direkten Schallpfad zahlreiche mögliche Übertragungspfade. Der Sprachfluss kann durch zeit- und frequenzabhängige Muster beschrieben werden,

die durch Reflexionen und Umgebungsgeräusche (Lärm) in ihrer detaillierten Struktur beeinträchtigt (verschmiert) werden.

Das Sprachmuster kann durch die Einhüllende des Intensitätsverlaufs beschrieben werden. Der Einfluss der störenden Komponenten kann durch Bestimmung der Modulationstransferfunktionen (MTF, Modulation Transfer Functions) ermittelt werden. Dabei wird die Modulationsreduktion zwischen Sende- und Empfangssignal (oktavbreit gefiltertes Weißes Rauschen mit dem Amplitudenmodulationsgrad $m = 1$) mittels der MTF frequenzselektiv erfasst. Die MTF wird für unterschiedliche Modulationsfrequenzen (0.63 bis 12.5 Hz in Terzabständen) jeweils in den einzelnen Oktavbänder (125 Hz bis 8 kHz) gemessen.

Für die Kombination der 98 MTFs werden jeweils die Modulationsreduktionsfaktoren berechnet und nach dem Algorithmus von Houtgast und Steeneken [7] zu einem Einzahlwert, dem Sprachübertragungsindex (STI Speech Transmission Index), zusammengefasst. Eine Verbesserung dieses Algorithmus beschreibt die ÖNORM EN 60268-16[1], den sogenannten "STI_r".

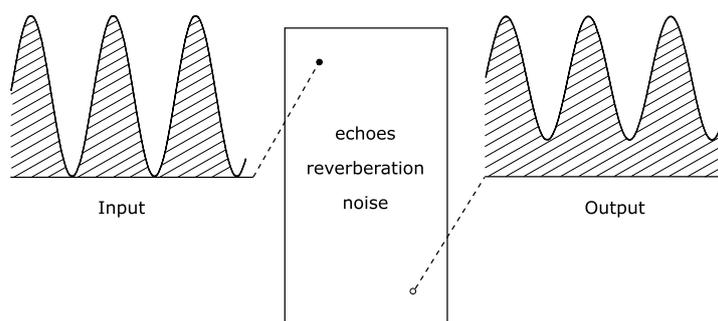
Der RASTI ist eine vereinfachte Form des STI und kann als Näherungsverfahren für die meisten Person-Person-Kommunikation in raumakustischen Anwendungen benutzt werden [1]. Die Analyse ist auf die Oktavbänder von 500 Hz und 2 kHz beschränkt.

Der Einsatz und die Erprobung der Applikation erfolgt durch Evaluierung des STI bzw. RASTI in mehreren Räumen, u.a. Klassenräumen der VS Berliner Ring. Neben den raumakustischen Daten außerhalb des Lehrbetriebes werden auch der Grundgeräuschpegel und der mittlere Nutzsignalpegel im Lehrbetrieb erhoben.

3 Theorie

Der STI ist eine Größe, welche die Übertragungsqualität für Sprache im Hinblick auf ihre Verständlichkeit beschreibt.

Die Bestimmung der Übertragungsqualität der Sprache bezüglich der Verständlichkeit beruht auf der Verringerung des Modulationsgrades eines Prüfsignals, das bei der Wiedergabe in einem Raum oder über einen Kommunikationskanal die Spracheigenschaften eines realen Sprechers simuliert. Das Prüfsignal wird von einer an der Sprecherposition angeordneten Schallquelle zu einem Messmikrofon an der Hörerposition übertragen, an der dann der Modulationsgrad einen verringerten Wert als der des originalen Prüfsignals hat.



Die Modulationsgradreduktion wird über die Modulationsübertragungsfunktion $m(F)$ bestimmt.

$$m(F) = \frac{m_o}{m_i} \quad (3.1)$$

Dabei ist:

m_o der Modulationsindex des gemessenen Signals.

m_i der Modulationsindex vom Eingangssignal.

Da hier der m_i immer gleich 1 ist, entspricht die Modulationsübertragungsfunktion dem Modulationsindex des gemessenen Signals.

Zur Bestimmung der MTF ($m(F)$) können entweder Sprachsignale, Impulsantworten oder spezielle Prüfsignale (sprachähnliche Signale) verwendet werden.

Im Rahmen dieses Projektes wird die MTF aus Impulsantworten und den speziellen Prüfsignalen gebildet und auf deren Äquivalenz untersucht.

3.1 STI aus Impulsantwort

Die Modulationsübertragungsfunktion ist mathematisch vollständig bestimmt, wenn die Nachhallzeiten pro Oktavband und das Signal-Rausch-Verhältnis bekannt sind.

3.1.1 Modulationsreduktion bedingt durch Nachhall

Der Modulationsreduktionsfaktor $m(F)$ bedingt durch den Nachhall kann somit über die Impulsantwort mit Gl.(3.2) berechnet werden [8].

$$m(F) = \frac{\left| \int_0^{\infty} e^{-i2\pi Ft} h^2(t) dt \right|}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (3.2)$$

Dabei ist:

$h(t)$ die Impulsantwort ohne Hintergrundrauschen.

Geht man von einem exponentiellen Abklingvorgang des Nachhalles aus, kann man die Gleichung (3.2) vereinfachen zu

$$m_{rev}(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi FT/13.8)^2}} \quad (3.3)$$

Dabei ist:

T ist die Anfangsnachhallzeit pro Oktavband (**E**arly **D**ecay **r**everberation **T**ime (f)) an der Stelle des Zuhörers im Fernfeld, d.h der Direktschall wird vernachlässigt.

F die jeweilige Modulationsfrequenz.

Die EDT ist definiert als 6 mal die Zeit, in der der Schallenergiepegel um -10 dB abfällt.

Die EDT wird pro Oktavband gemessen bzw. aus der Impulsantwort ermittelt. Es ergibt sich somit eine Matrix mit 7×14 Werten für m_{rev}

Modulationsreduktion bedingt durch Hintergrundgeräusch

Das Hintergrundgeräusch verursacht eine zusätzliche Modulationsreduktion.

$$m_n = \frac{1}{1 + 10^{-SNR/10}} \quad (3.4)$$

Dabei ist:

SNR der so genannte Signal-Rauschabstand in dB pro Oktavband.

Dieser muss für jede Messposition ermittelt werden: Ausgehend von den festgelegten Schalldrücken in 1m Entfernung wird der Schalldruckpegel am Hörerort bzw. an den

Mikrofonpositionen berechnet. Der Schalldruck in realen Räumen kann wie folgt berechnet werden [12]:

$$L_p(v) = 10 \log \frac{P_{ak}}{P_0} + 10 \log \left(\frac{\gamma_L \Gamma_L(v)}{4\pi r_{LH}^2} + \frac{4}{A} \right) \quad (3.5)$$

Dabei ist:

- $L_p(v)$ der Schalldruck am Hörerort abhängig vom Winkel v ;
- P_{ak} die akustische Leistung des Lautsprechers $P_{ak} = \frac{p^2(r=1(m))4\pi}{412 \cdot \gamma_L}$;
- P_0 die Referenz-Schallleistung $P_0 = 10^{-12}$ W;
- $\Gamma_L(v)$ der Richtfaktor des Sprechers bzw. künstl. Mundes;
- r_{LH} die Entfernung Sprecher-Hörer;
- γ_L der Bündelungsgrad des Sprechers bzw. künstl. Mundes;
- A die äquivalente Absorptionsfläche

3.1.2 Modulationsreduktion gesamt

Wenn beide modulationsreduzierenden Größen vorhanden sind, so ergibt sich der Modulationsreduktionsfaktor m aus dem Produkt von Gl. (3.2) und Gl. (3.4).

$$m = m_{rev}(F) \cdot m_n = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi FT/13.8)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-SNR/10}} \quad (3.6)$$

Das bedeutet, dass zwei akustische Messungen notwendig sind, um den MTF zu bestimmen. Einerseits die Messung der Impulsantwort und andererseits die Messung des Signal-Rauschabstandes.

3.1.3 Bildung des STI

Die Umwandlung dieser 7×14 Matrix zum STI erfordert 5 Schritte:

- Transformation zum 'Scheinbaren Signal-Rauschabstand'
Jeder m -Wert wird in einen SNR_{app} umgewandelt

$$SNR_{app} = 10 \log [m/(1 - m)] \text{ dB} \quad (3.7)$$

- Wertbegrenzung auf Werte von -15 bis $+15$ dB
Werte außerhalb des Bereichs von -15 bis $+15$ dB werden begrenzt.

- Oktavbandspezifischer SNR_{app}
Aus den jeweils 14 Werten pro Oktavband wird ein Mittelwertwert gebildet. Daraus resultiert dann ein oktavbandspezifischer Signal-Rauschabstand SNR_{app_k}
- Gesamtmittelwertbildung zum $\overline{SNR_{app_k}}$

$$\overline{SNR_{app_k}} = \sum_{k=1}^7 w_k SNR_{app_k} \quad (3.8)$$

Dabei sind:

w_k die Gewichtungsfaktoren für Oktavbandmittenfrequenzen von 125 Hz bis 8 kHz, nämlich 0.13, 0.14, 0.11, 0.12, 0.19, 0.17 und 0.14.

- Umwandlung zum STI
Der Gesamtmittelwert des SNR fällt in einen Wertebereich zwischen -15 und +15 dB und wird folgendermaßen in den Zielwert, des STI umgewandelt:

$$STI = (\overline{SNR_{app_k}} + 15)/30 \quad (3.9)$$

3.2 STI aus Messung mit sprachähnlichen Anregungssignalen

Auch bei dieser Methode basiert die Bildung des STI auf die Erfassung der Modulationsübertragungsfunktion bzw. Modulationsreduktion. Die Messung der MTF wird mit einem der Sprache ähnlichen Signal durchgeführt.

3.2.1 Prüfsignal / Modellierung der Sprache

Aus dem Langzeitspektrum der Sprache ist der mittlere spektrale Inhalt bekannt. Untersuchungen für den zeitlichen Verlauf der Sprachelemente liefern Werte von 80 ms für kurze Explosivlaute und 1.6 s für lange Laute bzw. umgerechnet in Frequenzen 0.63 Hz bis 12.5 Hz. Sprache lässt sich daher modellieren als ein breitbandiges Rauschen zwischen 125 Hz und 8 kHz mit einer spektralen Gewichtung, das von den typischen „Phonemfrequenzen“ (0.63 Hz bis 12.5 Hz) moduliert wird.

Man nimmt gewichtetes Oktavbandrauschen (Gewichtung siehe Tabelle 1) und moduliert jedes dieser Oktavbänder mit den Phonemfrequenzen im Terzabstand. Es ergeben sich somit $14 \times 7 = 98$ Messsignale.

Wenn man nichtlineare Verzerrungen ausschließen kann, wie das bei diesen Betrachtungen weitgehend der Fall ist, vereinfacht sich die Messung dahingehend, dass das breitbandige gewichtete Rauschen (alle Oktavbänder zusammen) von den Phonemfrequenzen moduliert wird und erst bei der Auswertung die Einteilung in Oktavbändern vorgenommen wird.

Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
männlich	2.9	2.9	-0.8	-6.8	-12.8	-18.8	-24.8
weiblich	-	5.3	-1.9	-9.1	-15.8	-16.7	-18.0

Tab. 1: Oktavbandpegel bezogen auf den A-bewerteten Langzeit-Sprachpegel

3.2.2 Messung der MTF

Die Messsignale werden an der Sprecherposition mit einem künstlichem Mund in den Raum eingespielt und an verschiedenen Positionen mit Mikrofonen aufgezeichnet. Für jedes Messsignal wird die Abnahme des Modulationsgrades über die Modulationsübertragungsfunktion MTF ermittelt ($m_{i,f}$).

3.2.3 Berücksichtigung von Verdeckung und absoluter Hörschwelle

Die Verdeckung und die absolute Hörschwelle werden durch Nachbilden und Einfügen geeigneter Geräuschperioden berücksichtigt und verringern so das effektive Signal-Rausch-Verhältnis und die Modulationsübertragungsfunktion weiter. Dabei muss auch der Signalpegel in jedem der Frequenzbänder berücksichtigt werden.

Verdeckungseffekt

$$I_{am,i} = I_{i-1} \cdot amf \quad (3.10)$$

Dabei ist:

$I_{am,i}$ die Intensität der Tonverdeckung im Oktavband i ;

I_{i-1} die Intensität des Verdeckungssignals in Band $(i-1)$;

amf der Hörverdeckungsfaktor siehe Tabelle 2.

Dieser Faktor ergibt, angewandt auf die Intensität in einem Okavband den Verdeckungseffekt in einem Oktavband unmittelbar darüber.

Oktavpegel in dB	46-55	56-65	66-75	76-85	86-95	>95
Abfall der Verdeckung	-40	-35	-25	-20	-15	-10
Hörverdeckungsfaktor (amf)	0.0001	0.000316	0.003162	0.01	0.031622	0.1

Tab. 2: Oktavpegel -spezifischer Verdeckungsabfall und entsprechender Hörverdeckungsfaktor (amf)

Absolute Hörschwelle Das Nachbilden der absoluten Hörschwelle entspricht dem unteren Grenzwert des Verdeckungs-Geräuschpegels innerhalb jedes Oktavbandes ($I_{rs,i}$) und gilt nur, wenn die Intensität I_i der übliche Betriebspegel ist (siehe Tabelle 3)

Das Anwenden der Korrekturen für Verdeckung und Schwelle ergibt:

$$m'_{i,f} = m_{i,f} \cdot \frac{I_i}{I_i + I_{am,i} + I_{rs,i}} \quad (3.11)$$

Dabei ist:

$m_{i,f}$ der Modulationsindex für das Oktavband i und die Modulationsfrequenz f ;

$m'_{i,f}$ der korrigierte Index.

3.2.4 Bildung des STI

Das effektive Signal-Rausch-Verhältnis für das Oktavband i und die Modulationsfrequenz f wird dann:

$$SNR_{i,f} = 10 \log \left(\frac{m'_{i,f}}{1 - m'_{i,f}} \right) \text{ dB} \quad (3.12)$$

Nach dem STI-Konzept werden die Signal-Rausch-Verhältnisse im Bereich von -15 dB bis $+15$ dB linear auf Beiträge zur Verständlichkeit im Bereich von 0 bis 1 bezogen. Deshalb wird das effektive Signal-Rausch-Verhältnis nach folgender Gleichung in einen entsprechenden Übertragungsindex $TI_{i,f}$ (Oktavband i und Frequenz f) umgewandelt:

$$TI_{i,f} = \frac{SNR_{i,f} + shift}{range} \quad (3.13)$$

Dies ergibt $0 \leq TI_{i,f} \leq 1.0$, wenn *shift* 15 dB und *range* 30 dB betragen.

Alle 14 Übertragungsindizes für die Modulationsfrequenzen von 0.63 Hz bis 12.5 Hz ergeben sich für jedes Oktavband und werden für jedes Band gemittelt, um den Modulations-Übertragungsindex (MTI_i) für den Beitrag von Oktavband i zu ergeben, nämlich:

$$MTI_i = \frac{1}{14} \sum_{f=1}^{14} TI_{i,f} \quad (3.14)$$

Schließlich erhält man den überarbeiteten Sprach-Übertragungsindex STI_r , der den Verdeckungseffekt und die absolute Hörschwelle berücksichtigt, durch die bewertete Summierung der Modulations-Übertragungsindizes für alle sieben Oktavbänder und entsprechender Redundanzkorrektur.

$$STI_r = \sum_{n=1}^7 \alpha_n MTI_n - \sum_{n=1}^6 \beta_n \sqrt{MTI_n \times MTI_{(n+1)}} \quad (3.15)$$

Dabei sind:

α_n die Faktoren, welche die Oktav-Bewertungsfaktoren darstellen;

β_n die sogenannten Redundanz-Korrekturfaktoren

Die Redundanzkorrektur wird auf den Betrag der benachbarten Frequenzbänder bezogen.

Die optimalen Bewertungsfaktoren und Redundanzfaktoren für männliche und weibliche Stimmlage werden zusammen mit den Schwellen-Korrekturfaktoren in Tabelle 3 (siehe auch ÖNORM EN 60268-16 [1]) gezeigt.

3.3 Qualifizierung des STI

Die Qualifizierung des STI wird in der ISO Norm 9921:2002 [2] festgelegt.

STI	0 - 0.3	0.3 - 0.45	0.45 - 0.6	0.6 - 0.75	0.75 - 1
Qualität	schlecht	schwach	angemessen	gut	ausgezeichnet

Oktavband/Hz		125	250	500	1k	2k	4k	8k
männlich	α	0.085	0.127	0.23	0.233	0.309	0.244	0.173
	β	0.085	0.078	0.065	0.011	0.047	0.095	-
weiblich	α	-	0.117	0.223	0.216	0.328	0.25	0.194
	β	-	0.099	0.066	0.062	0.025	0.076	-
Hörschwellen- faktor in dB	$L_{rs,i}$	46	27	12	6.5	7.5	8	12

Tab. 3: Männl. und weibl. Bewertungsfaktoren für die einzelnen Oktavbänder



Abb. 1: Messungen in den Klassenräumen

4 Messungen in der Volksschule Berliner Ring / Bestandsaufnahme

Als erster Schritt wurden die Grundgeräuschpegel und die Nutzsinalpegel während des Lehrbetriebes in Klassenräumen der Volksschule Berliner Ring erfasst.

4.1 Messaufbau

Equipment: 4 Messmikrofone (Behringer), Mikrofonkalibrator, Presonus Firepod Mikrofonvorverstärker und A/D-Wandler, RME-Digiface, Laptop Dell mit Software Samplitude

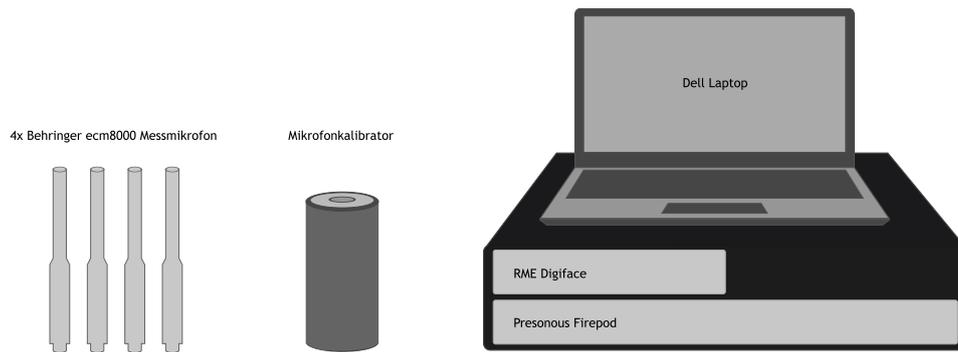


Abb. 2: Equipment

4.2 Auswertung der Daten

Die aufgenommenen Sound-Files mussten klassifiziert werden: Sprechen der Lehrerin, d.h. wenn die Lehrerin zu den Schülern spricht und Grundgeräuschpegel bzw. Hintergrundgeräusch, d.h. die Schüler sind bereit, der Lehrerin zuzuhören, wobei keine Lehrerstimme in den Soundfiles vorkommt.

Die relevanten Teile wurden also mit Markern versehen (Software: Samplitude). Diese Markerpositionen wurden als Textfile abgespeichert.

Es wurden mit Matlab die gewünschten Ausschnitte der *.wav-Files ausgelesen und entsprechend analysiert.

4.2.1 Matlab-Scripte

marker_auslesen.m Die Markerpositionen für die relevanten Abschnitte der Aufnahmen, die im *.txt-Format vorliegen, werden in Vektoren geschrieben.

einteilung.m Die Vektoren mit den Markerpositionen werden in verschiedene Szenarien eingeteilt.

Es gibt 3 Szenarien:

- Grundgeräusch
Schüler arbeiten selbständig; Sprechpausen des Lehrers

- Lehrerin-front
Lehrer/-in steht an der Tafel und spricht zu den Schülern
- Lehrerin_zTafel
Lehrer/-in spricht „zur Tafel“

Jede Spur der Soundfiles enthält einen Teile, in dem das Kalibratorsignal aufgezeichnet wurde. Anhand dieser Teile können die Schalldrücke bestimmt werden:

Diese Stellen werden in ein File eingelesen. Der Kalibrator gibt einen Sinuston mit 1 kHz und einen Schalldruck von 94 dB/SPL ab. Von diesem File x wird der Effektivwert gebildet

$$x_{eff} = \sqrt{x_i^2} \quad (4.1)$$

s in Matlab (Werte zwischen -1 und 1) ins Verhältnis gesetzt. Diese Faktoren (1 Faktor pro Mikrofon) werden zu den zu analysierenden Soundfiles multipliziert, um die tatsächlichen Schalldrücke zu erhalten.

$$kalib_faktor = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{94/20}}{\sqrt{x^2}} \quad (4.2)$$

struktur.m Aus den gesammelten Daten wird eine Struktur erstellt. (Siehe Abb. 3)

spek_anzeigen.m Das A-bewertete Terzbandspektrum eines gewünschten Szenarios und Klassenraums wird berechnet und grafisch dargestellt.

spek_anzeigen_sprache.m In diesem Skript werden sämtliche Terz- und Oktavbandspektren (A-bewertet und unbewertet) für das Szenario „Lehrerin-Front“, berechnet. Dar- aus wird eine weitere Struktur (siehe Abb. 4) gebildet.

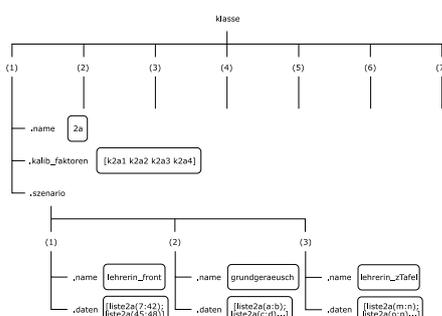


Abb. 3: Struktur 1

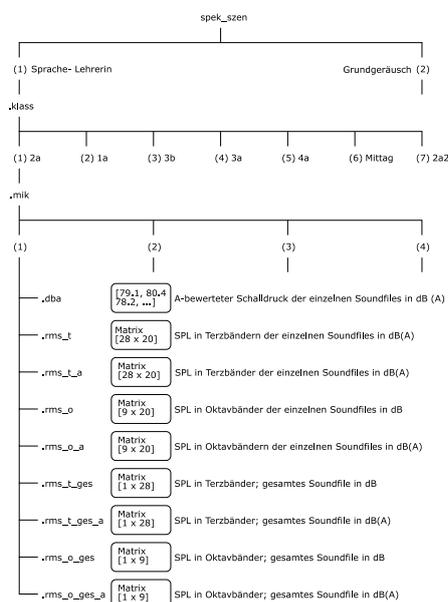


Abb. 4: Struktur 2

spek_anzeigen_geraeusch.m Siehe `spek_anzeigen_sprache.m`, anstatt der Sprachsignale werden hier die Geräuschdaten verarbeitet.

- `abewertung.m`
Diese Funktion berechnet die A bewerteten Schalldruckpegel in dB eines Signals.
- `terzfilterbank.m`
Berechnung des Terzbandspektrums eines Signals.
- `oktavfilterbank.m`
Berechnung des Oktavbandspektrums eines Signals.

plot_sprachspek.m Mit diesem Skript werden die Sprachspektren geplottet.

plot_geraeusch.m Mit diesem Skript werden die Geräuschspektren geplottet.

4.2.2 Sprachsignalanalyse

Es wurde überprüft, ob und wie unterschiedlich die 'Sprachausschnitte' zueinander sind. Dafür wurde von jedem Schnipsel das Terzbandspektrum berechnet.

Jeweils der Mittelwert der Spektren wird zur Gesamtmittelung herangezogen. In Abb.5 sieht man den Mittelwert über die verschiedenen Messpositionen der Oktavbandspektren pro Klassenraum und den Gesamtmittelwert.

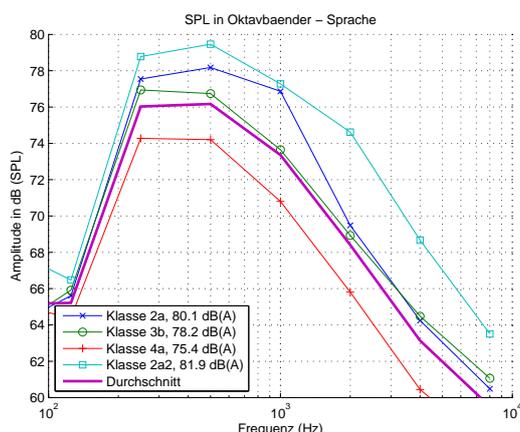


Abb. 5: Oktavbandanalyse der Sprachsignale

4.2.3 Vergleich mit der Norm

Zum Vergleich mit der in der ÖNORM EN 60268-16 festgelegtem Prüfsignal werden die ermittelten Oktavbandspektren (Mittelwert) aus der Messung in der Volksschule Berliner-Ring herangezogen.

Da die akustischen Eigenschaften der Klassenräume nicht ideal sind, sprechen die Lehrpersonen mit erheblich höherem Stimmaufwand als in der Literatur festgelegt ist (siehe Abb. 6)

Die Werte der gemessenen Sprachsignalen sind keine genauen Messwerte! Das relevante Mikrofon befand sich im Abstand von ca. 1-2 Metern, aber die Lehrpersonen bewegten sich immerzu um das Mikrofon herum. Somit kann keine Aussage über die absoluten Sprachsignalpegel getroffen werden. Jedoch kann aus den Messungen geschlossen werden, dass die Lehrpersonen mit einem Stimmaufwand sprechen, der als gesundheitsgefährdend einzustufen ist.

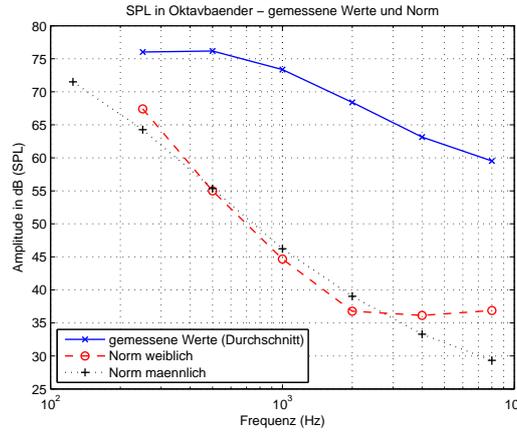


Abb. 6: Oktavbandspektrenvergleich: Messung mit Norm

Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Norm, männlich, SPL in dB	71.5	64.3	55.3	46.2	39	33.3	29.3
Norm, weiblich, SPL in dB	-	67.4	55	44.7	36.8	36.1	36.9
gemessen, weiblich SPL in dB *	-	76	76.1	73.4	68.4	63.1	59.5

Tab. 4: Oktavbandpegelvergleich: gemessene Werte - Norm

* In der VS Berliner Ring gibt es nur weibliches Lehrpersonal.

4.2.4 Umgebungsgeräuschanalyse

Das Hintergrundgeräusch wurde mit jeweils 4 Mikrofonen im Klassenraum erfasst. Als Hintergrundgeräusch werden jene Teile der Aufnahme verwendet, in denen keine Sprache vorkommt und die Schüler bereit sind, der Lehrerin zuzuhören. Diese Werte bestimmen unter anderen bei der Berechnung der MTF den Signal-Rauschabstand.

Es ergeben sich folgende Werte für den SPL in Oktavbänder in den Klassenräumen der Volksschule Berliner Ring:

Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
SPL/dB	66.9	72.7	70.9	68.3	66.3	64.6	62.1

Tab. 5: SPL in Oktavbänder - Hintergrundgeräusch

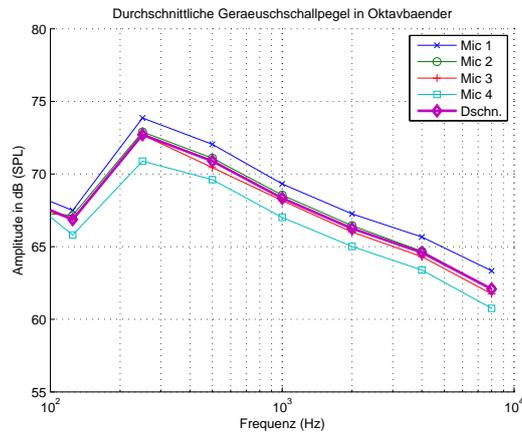


Abb. 7: Oktavbandanalyse der Geräuschpegel

4.2.5 Spektren der aufgenommenen Messdaten

Vergleich der Spektren Sprache - Geräusch (siehe Abb. 8)

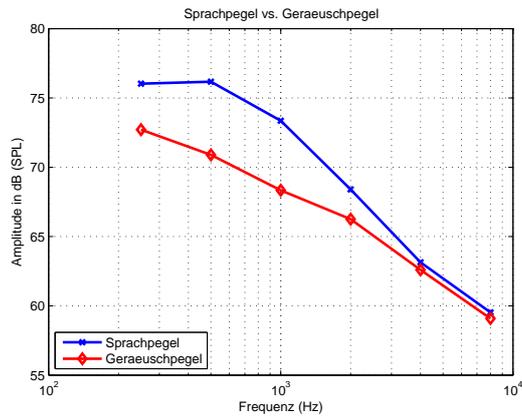


Abb. 8: SPL in Oktavbänder - Sprache vs. Hintergrundgeräusch

5 Implementierung der STI-Messung

Wie in Kapitel 3 beschrieben, gibt es verschiedene Methoden, den STI zu ermitteln.

5.1 STI aus Impulsantwort

Die Impulsantwort wird mit der Methode nach Farina [5] ermittelt. Die Messung der Impulsantwort mit pd bzw. Matlab wurde im Rahmen der Diplomarbeit von Stefan Warum [14] implementiert. Ein Sinus-Sweep wird über einen Lautsprecher abgespielt und an verschiedenen Positionen im Raum aufgenommen. Daraus wird die Impulsantwort und die Nachhallzeiten in Oktavbändern ermittelt und weiters kann man daraus auf die Modulationsreduktion bedingt durch den Nachhall schließen. Zusätzlich wird der Signal-Rausch-Abstand gemessen, der eine zusätzliche Verminderung des Modulationsgrades bewirkt (siehe 3.1)

5.1.1 Sweepgenerierung

Der logarithmische Sweep wird mit dem Matlab-Skript *Sweepgenerierung.m* erzeugt. Das Signal wird als wav-File gespeichert. Die Länge des Files ist mit der Länge der zu erwartenden Nachhallzeit abzustimmen.

5.1.2 Anregung mit dem log. Sweep

Der zu messende Raum wird mit dem logarithmischen Sweep angeregt und die Systemantwort gemessen. Diese Anforderung kann mit dem pd-Patch *Messpatch.pd* erfüllt werden:

1. Gewünschten Sweep laden; Der vorher in Matlab erzeugte Sweep wird in einen Table eingelesen.
2. Maximallänge der RIR; Die geschätzte RIR wird hier festgelegt. Dieser Wert wird auch bei der Generierung verwendet und muss gleich groß sein.
3. Initialisierung; Alle Werte werden übernommen.
4. Messung; Die Messung wird gestartet. Mit den Parametern kann festgelegt werden, mit wievielen Lautsprechern der Sweep abgespielt wird (Default: 1) und wieviele Messwiederholungen durchgeführt werden (Default: 2). Die aufgenommenen Audiofiles werden im Ordner 'audiofiles' abgelegt.

5.1.3 Ermittlung des STI aus der Impulsantwort

Mit Matlab werden aus den aufgenommenen Systemantworten die Impulsantworten berechnet. Daraus kann die Modulationsübertragungsfunktion bzw. der Modulationsreduktionsfaktor abgeleitet werden (siehe Kapitel 3.1).

1. Impulsantwort, Early Decay Time

Skript: *Farina_Sweep_Deconvolution_EDT.m* berechnet die Early Time Decay für Oktavbänder zwischen 125 Hz und 8 kHz. und speichert sie als Variable *edt_60* pro Mikrofon in *edt_60_mic.x.mat*.

2. Modulationsreduktion aufgrund vom SNR

Skript: *mod_red_noise.m* berechnet die Modulationsreduktion bedingt durch den Signal-Rausch-Abstand. Eine Aufnahme vom Grundgeräuschpegel und eine Aufnahme vom Kalibratorsignal muss vorhanden sein, um die absoluten Werte des SNR zu ermitteln. In diesem Skript müssen die Abstände von Sprecher zu den Messpositionen (Hörerpositionen), der Winkel zur Hauptachse der Quelle, der Richtungsfaktor pro Mikrofon und der Bündelungsgrad der Quelle (bzw. des künstlichen Mundes), sowie der Absorptionsgrad und die Gesamtfläche (bzw. die äquivalente Absorptionsfläche) eingetragen werden. Als Ergebnis wird die Modulationsreduktion pro Oktavband als Vektor mit der Variable *mred_snr_m* (für männliche Sprache) und *mred_snr_w* für weibliches Sprachspektrum pro Mikrofon in *mred_snr_mic.x.mat* gespeichert.

3. Modulationsreduktion gesamt, Bildung des STI

Skript: *sti_aus_ir.m* berechnet den Modulationsgrad aufgrund von Nachhall, den gesamten Modulationsgrad und daraus den STI und speichert diesen Einzahlwert mit der Variable *sti_ir* pro Mikrofon in *sti_mic.x.mat*

5.2 STI aus Messung mit sprachähnlichen Signalen

Theoretische Betrachtungen siehe Kapitel 3.2.1.

5.2.1 Generieren der Sprachsignale

Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, wird die spektrale Gewichtung mit einem Filter erreicht. Die Filterkoeffizienten werden im Matlabskript *spec_koeff.m* berechnet.

Gegeben ist die spektrale Leistungsdichte pro Oktavband. Aus diesen Stützstellen des Spektrums wird durch kubische Spline-Interpolation ein Spektrum mit 4096 Punkten gebildet. Aus dem Spektrum wird mit Hilfe der inversen Fourier Transformation eine Impulsantwort gebildet (siehe Abbildung 9).

Mit Hilfe des Cepstrums kann ein minimalphasiges Eingangssignal berechnet werden, welches dasselbe Cepstrum besitzt wie das originale Eingangssignal [11].

$$y[n] = \text{real}\{\text{IFFT}[\log |\text{FFT}(x[n])|]\}$$

$$ym[n] = \text{real}\{\text{IFFT}[e^{\text{FFT}(w[n] \cdot y[n])}]\}$$

Dabei ist:

- $y[n]$ das reelle Cepstrum des Eingangssignals x ;
- $ym[n]$ das rekonstruierte minimalphasige "Eingangssignal";
- $w[n]$ die Fensterfunktion im Cepstralbereich.

$$w[n] = \begin{cases} 1; & n = 1 \\ 2; & 2 \leq n < N/2 \\ 1; & n = N/2 \\ 0; & n > N/2 \end{cases}$$

In unserem Fall ist das originale Eingangssignal nicht vorhanden. Jedoch ist der Absolutbetrag der Fouriertransformierten bekannt und somit kann das Cepstrum gebildet werden, von dem wiederum ein minimalphasiges Eingangssignal (in unserem Fall die gesuchte Impulsantwort) abgeleitet werden kann.

Mit Hilfe der Steiglitz-McBride-Iteration [13] werden aus der Impulsantwort die Filterkoeffizienten für ein IIR-Filter 6. Ordnung berechnet und in Form von 3 hintereinandergeschalteten Biquad-Filter in *pd* implementiert (siehe Abbildung 10).

5.2.2 Kalibrieren der Messung

Der *pd*-Patch *kalib.pd* ist zum Kalibrieren der Messung.

Eingangsstufe Ausgangspunkt ist ein definierter Schalldruck am Mikrofoneingang, erzeugt von einem Kalibrator. Dieser erzeugt ein Sinussignal von 1000 Hz, 94 dB(SPL).

5 Implementierung der STI-Messung

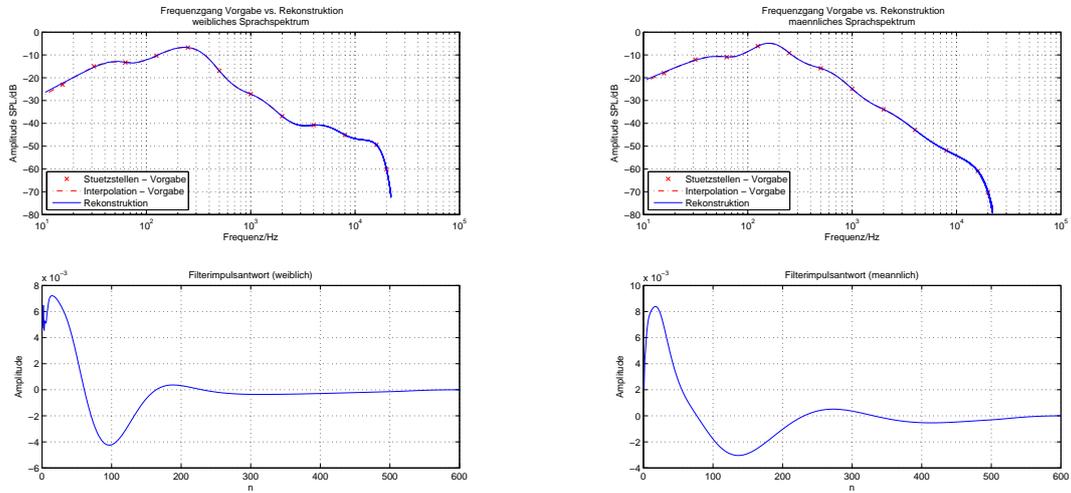


Abb. 9: Betrag der Übertragungsfunktionen und Impulsantworten der Filter

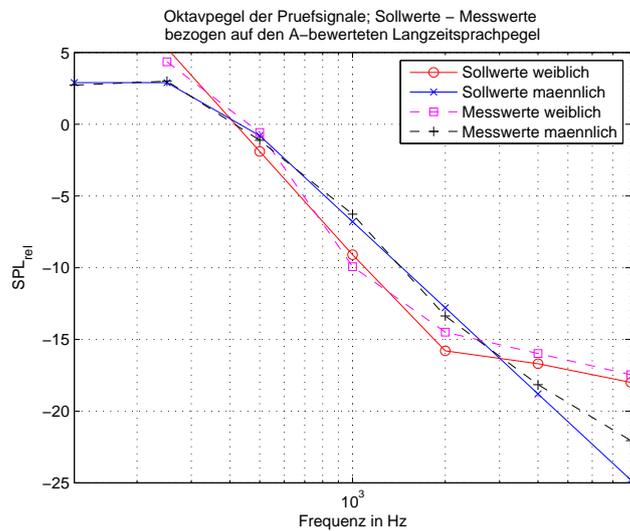


Abb. 10: Oktavbandanalyse der Messsignale

Weiters wird davon ausgegangen, dass am Eingang des Audiointerfaces der Mikrofon-Vorverstärker so eingestellt ist, dass ein gut ausgesteuertes Signal anliegt. Vom Eingangssignal wird der Effektivwert gebildet:

$$x(t) \rightarrow x^2(t) \rightarrow \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \rightarrow \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt} \quad (5.1)$$

Der Integrator wird mit einem Tiefpassfilter in Biquadstruktur realisiert. Die Zeitkonstante τ wurde mit 1 Sekunde festgelegt (Gl. 5.2).

$$\begin{aligned} y(n) &= (1 - a)x(n) + ay(n - 1) \quad x(n) \text{ für } n \geq 0 \equiv 0 \\ y(n) &= a^n y(0) \equiv e^{\left(\frac{-nT}{\tau}\right)} \quad y(0) = 1 \\ n \cdot \ln(a) &= -\frac{nT}{\tau} \\ \tau &= -\frac{T}{\ln(a)} = -\frac{1}{fs \cdot \ln(a)}; \quad \tau \approx 1 \text{ s}, fs = 44.1 \text{ kHz} \rightarrow a = 0.99998 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Anschließend wird der Wert in einen dB-Wert (bezogen auf p_0) umgerechnet und ausgegeben. Mit einem Fader wird die Eingangsverstärkung geregelt. Diese wird so gewählt, dass die Anzeige 94 dB liefert. (Der Wert kann natürlich beliebig eingestellt werden, aber es bietet sich an, dass die am Eingang anliegenden 94 dB auch in pd 94 dB entsprechen.) Wenn der Button *Wert übernehmen* gedrückt wird, wird die Eingangsverstärkung gesetzt.

Ausgangsstufe Die ÖNORM EN 60268-16 [1] schreibt einen Ausgangspegel von 60 dBA in 1 m Abstand vor. Die Ausgangsverstärkung wird für männliches und weibliches Sprachspektrum (siehe 3.2.1) kalibriert. Man stellt das Mikrofon 1 m vor den Lautsprecher (künstlicher Mund) und stellt die Ausgangsverstärkungen so ein, dass am Eingang der gewünschte Wert anliegt. Das Messsignal hat eine spektrale Verteilung laut Norm ([1]).

5.2.3 Messung der MTF

Der pd-Patch *mtf-messung* erfüllt die Vorgaben gemäß ÖNORM EN60268-16. Man kann zwischen verschiedenen spektralen Verteilungen wählen, zwischen männlichem oder weiblichem Sprachspektrum gemäß der Norm [1] (siehe Tabelle 1).

Die Anregungssignale bestehen aus weißem Rauschen mit spektraler Gewichtung laut Norm [1] und werden mit den Phonemfrequenzen im Terzbandabstand moduliert. Es ergeben sich somit pro Messung 14 Messsignale und um eine Standardabweichung ≤ 0.02 zu erreichen, hat jedes Messsignal eine Dauer von 15 s. Eine Messung dauert somit ca. 3 min 30 s. Blockschaltbild siehe Abbildung 11.

Die aufgenommenen Messsignale liegen nach der Messung als wav-Files vor.

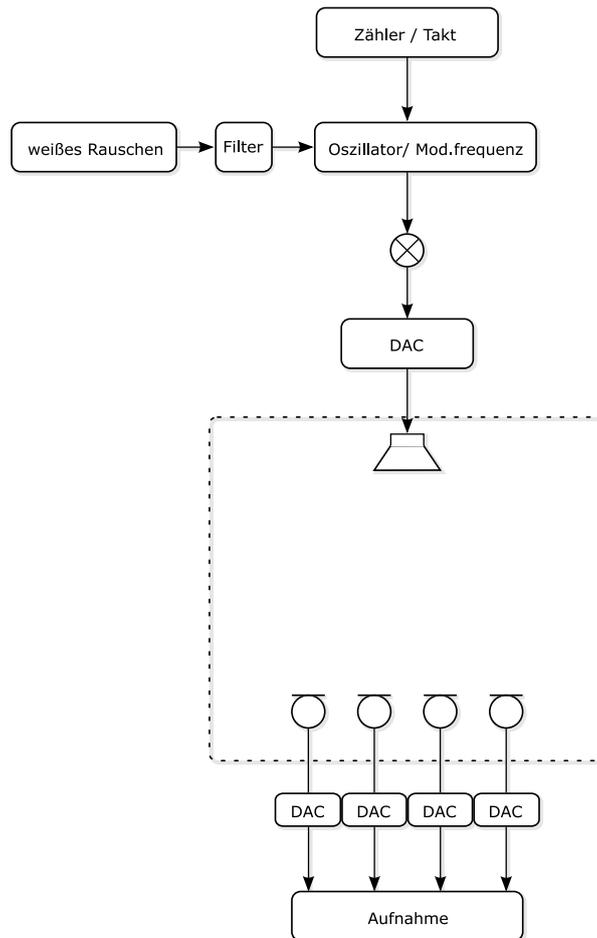


Abb. 11: Blockschaltbild MTF-Messung

DSP-Bereich Die Audioverarbeitung von pd wird hier ein- bzw. ausgeschaltet und das verwendete Betriebssystem muss hier bestimmt werden, um die Werte der Kalibrierung korrekt zu übernehmen.

Bereich Signallängen Festlegung der Messdauer pro Messsignal (sollte ca. 15 Sekunden betragen).

Bereich Anzahl der Messpositionen Anzahl der Messpositionen (von 1 bis 4) wird festgelegt.

Bereich Anregungssignal Es kann männliches oder weibliches Langzeit-Sprachspektrum gewählt werden.

Bereich Initialisieren Es werden alle eingestellten Werte übernommen.

Bereich Messung Die Messung wird hier gestartet, sobald der On-Knopf grün ist (d.h. dass alle Werte übernommen bzw. initialisiert sind). Es kann auch jederzeit mit betätigen des Off-Knopfes die Messung abgebrochen werden, das Fortsetzen an der Stelle der Unterbrechung ist nicht möglich. Die Messung muss neu initialisiert und gestartet werden. Weiters kann die aktuelle Position der Messung verfolgt werden.

subpatches

- *zeitablauf*

Beinhaltet einen Aufwärtszähler, der für den Wechsel der Modulationsfrequenzen zuständig ist.

- *am-logik*

Hier wird ein Sinussignal mit der jeweiligen Modulationsfrequenz erzeugt. Nach Ablauf der eingestellten Signaldauer wird der Zähler inkrementiert und somit zur nächsten Frequenz gewechselt.

- *rausch_traeger*

In diesem Subpatch wird das spektral-gewichtete Rauschen erzeugt (siehe Kapitel 3.2.1) und mit der Modulationsfrequenz moduliert. Im Amplitudenbereich ist die Modulationsfunktion die Quadratwurzel der gewünschten Intensitätshüllkurve:

$$\sqrt{1 + \cos(2\pi \cdot f_m t)}$$

- *play_rec*

In *play_rec* befindet sich die Steuerung zum Abspielen und Aufnehmen der Signale. Vom Patch *kalib.pd* werden hier die Werte für die Ausgangsverstärkung bzw. Eingangsverstärkung übernommen.

- *wav-maker*

Es werden hier die aufgenommenen Signale in *.wav Dateien geschrieben. Die darin enthaltene Namensgebung wird von der AM-Logik gesteuert.

5.2.4 Ermittlung des STI aus den aufgenommenen Daten

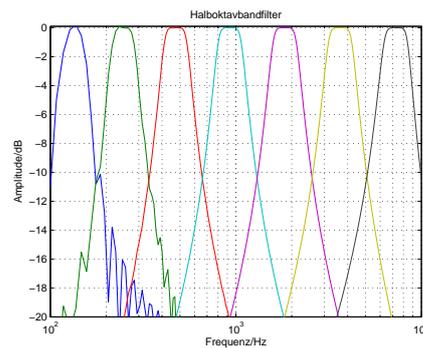
Die aufgenommenen Messdaten (14 Files pro Mikrofon) liegen in Form von wav-Files vor. Mit *Matlab* wird daraus der jeweilige Modulations(reduktions)faktor berechnet und zum STI zusammengefasst.

1. Ermittlung der MTF

Skript: *mtf_aus_messsignal*. Berechnet den Modulationsreduktionsfaktor aus den aufgenommenen wav-Files und speichert diese in Form einer Matrix für jedes Mikrofon. Die Berechnung findet in der Matlab-Funktion *short_fft* statt:

- Halboktavbandfilter

Das Signal wird in Bänder mit einer Bandbreite von einer halben Oktave aufgeteilt [1]. Die Funktion *h_octdsgn* berechnet die Filterkoeffizienten für dieses Halboktavbandfilter.



- Energieverlauf

Über den Energieverlauf kann man auf den Modulationsindex schließen. Dazu wird über die Hilberttransformation die Einhüllende des zu analysierenden

Signals gebildet und der Energieverlauf ermittelt. Dieser Energieverlauf wird in Blöcke unterteilt und davon jeweils die FFT berechnet. Aus dem Mittelwert dieser Spektren wird der Modulationsindex ermittelt (Gleichung 5.3).

$$m = \frac{E(1)}{2 E(F)} \quad (5.3)$$

Dabei ist:

$E(1)$ der Gleichanteil und daher der erste FFT-Bin im Spektralbereich;

$E(F)$ der Wechselanteil, im Spektrum jener Bin, der der Modulationsfrequenz entspricht.

Man erhält somit pro Mikrofon eine Matrix der Dimension 14x9 mit den Modulationsfaktoren.

2. Ermittlung der Oktavbandpegel

Mit dem Skript *okbandpegel.m* werden die Oktavbandpegel der aufgenommenen Messignale ermittelt und gespeichert. Diese werden zur Ermittlung des Hörverdeckungsfaktors benötigt (siehe Kapitel 3.2.3). Dazu muss das aufgenommene Signal vom Kalibrator vorliegen, um die tatsächlichen Schalldruckpegel ermitteln zu können (siehe Kapitel 4.2.1).

3. Ermittlung vom Hörverdeckungsfaktor

Mit dem Matlabskript *hoerverd_fak.m* wird aus den Oktavbandpegeln der Faktor zur Korrektur des Modulationsindex berechnet (siehe Kapitel 3.2.3) und gespeichert.

4. Zusammenfassen zum STI

Das Matlabskript *sti_rs* fasst die Modulationsreduktionsfaktoren gemäß ÖNORM EN 60268 – 16 [1] zu einem Einzahlwert, dem **S**peech **T**ransmission **I**ndex zusammen.

6 Messung des Speech Transmission Index STI - Ausführung

6.1 Messung des STI im CUBE

6.1.1 Aufbauplan, Maße

Siehe Abb. 12

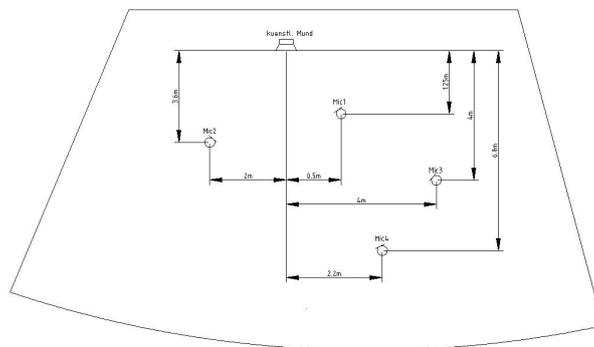


Abb. 12: Mikrofonpositionen im CUBE

Die Summe der Begrenzungsflächen (wird als Würfel approximiert):

$$S = 388 \text{ m}^2.$$

Der Absorptionsgrad pro Oktavband ergibt sich zu:

$$\alpha = [0.226, 0.302, 0.294, 0.245, 0.225, 0.234, 0.306]$$

Die Werte wurden aus der Diplomarbeit von Imre Csonka übernommen (siehe [4]).

6.1.2 Messequipment

- Künstlicher Mund

Der künstliche Mund (Abb. 13) der Firma G.R.A.S. simuliert eine Abstrahlcharakteristik ähnlich einem Sprecher (siehe [6]). Daten für die Abstrahlcharakteristik sind im Manual nicht enthalten. Deshalb wurden die Daten für den Richtfaktor und den daraus abgeleiteten Bündelungsgrad aus [15] genommen.



Abb. 13: Künstlicher Mund der Firma G.R.A.S

- 4 Messmikrofone; Firma: Behringer; Typ: ECM 8000; Kugelcharakteristik
- ACER Laptop; Audiointerface: RME DSP Hammerfall; Presonus Mikrofonvorverstärker; Software: *pd*

6.1.3 STI aus Impulsantwort

(siehe Kapitel 3.1)

Modulationsreduktion aufgrund von Nachhall (Gleichung 3.3)

$$m_{rev}(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi FT/13.8)^2}}$$

Die Anfangsnachhallzeiten in Sekunden pro Oktavband und Messposition im CUBE sind in Tab. 6 aufgelistet.

Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Mic 1	0.4	0.3	0.26	0.29	0.35	0.19	0.16
Mic 2	0.4	0.42	0.5	0.54	0.57	0.54	0.4
Mic 3	0.48	0.47	0.47	0.57	0.6	0.56	0.44
Mic 4	0.35	0.53	0.5	0.59	0.6	0.58	0.4

Tab. 6: Anfangsnachhallzeiten EDT; CUBE

Die daraus resultierenden Modulationsreduktionsfaktoren (als Beispiel für das Mikrofon 3) sind im Anhang in der Tabelle 32 zu sehen.

Modulationsreduktion aufgrund des Signal-Rausch-Abstandes

$$L_p(v) = 10 \log \frac{P_{ak}}{P_0} + 10 \log \left(\frac{\gamma_L \Gamma_L(v)}{4\pi r_{LH}^2} + \frac{4}{A} \right)$$

$$P_{ak} = \frac{p^2(r=1) \cdot 4\pi}{412 \cdot \gamma_L}$$

$$m_n = \frac{1}{1 + 10^{-SNR/10}} = (1 \quad 0.99 \quad 0.99 \quad 0.98 \quad 0.91 \quad 0.91 \quad 0.67 \quad 0.28)$$

Modulationsreduktion gesamt

$$m_{ges} = m_{rev}(F) \cdot m_n = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi FT/13.8)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-SNR/10}}$$

Es ergeben sich 14x8 Modulationsreduktionsfaktoren pro Mikrofon.

Bildung des STI Die Zusammenfassung der Modulationsreduktionsfaktoren und die Umrechnungen zur Bildung des STI (siehe Kapitel 3.1.3) ergeben folgende Werte, siehe Tabelle 7

Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 4
0.76	0.63	0.62	0.62

Tab. 7: STI aus IR; CUBE

6.1.4 STI aus Messung mit Sprachähnlichen Signalen

1. MTF

Der Modulationsreduktionsfaktor pro Oktavband und Modulationsfrequenz wird berechnet (siehe Anhang, Tabelle 33, MTF's für Mikrofon 3).

2. Oktavbandpegel

Die Werte für die Oktavbandpegel an den Messpositionen: Tabelle 8

3. Hörverdeckungsfaktor

Die Faktoren zur Korrektur der Modulationsreduktionsfaktoren bedingt durch Verdeckung und absoluter Hörschwelle: Tabelle 9

Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Mic 1	72.1	72.4	68.3	63.2	56.3	51.1	47.1
Mic 2	45.7	50.4	48.1	43.6	40.2	31.4	27.6
Mic 3	45.5	50.5	48	44.5	40.9	31.6	27.5
Mic 4	48.2	49.1	47	43.6	40.9	30.6	27.7

Tab. 8: Oktavbandpegel an den Messpositionen; CUBE

Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Mic 1	0.998	0.997	0.997	0.997	0.999	0.999	0.999
Mic 2	0.484	0.905	0.999	0.999	0.999	0.995	0.973
Mic 3	0.480	0.905	0.999	0.999	0.999	0.996	0.973
Mic 4	0.626	0.994	0.999	0.999	0.999	0.995	0.974

Tab. 9: Modulationsreduktionsfaktoren bedingt durch Verdeckung und absoluter Hörschwelle

4. STI

Es ergeben sich folgende Werte für den STI (Tabelle 10)

Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 4
0.97	0.57	0.58	0.6

Tab. 10: STI aus direkter Messung; CUBE

6.1.5 Vergleich der Messungen

Siehe Tabelle 11

6.2 Ermittlung des STI für verschiedene Räume

Mithilfe der “Raum in Raum”-Simulation im CUBE ist es möglich, Räume mit verschiedenen Nachhallzeiten zu simulieren (siehe Tabelle 12)

Die Ermittlung des jeweiligen STI ergibt folgende Werte (Abb. 14)

	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 4
STI aus IR	0.76	0.63	0.62	0.62
STI aus RS	0.97	0.57	0.58	0.6

Tab. 11: Vergleich der Messmethoden; CUBE

T₆₀/s							
Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Raum trocken	0.61	0.59	0.52	0.64	0.65	0.65	0.55
Raum 1	1.25	0.96	0.92	0.92	0.83	0.69	0.55
Raum 2	1.31	1.12	1.1	1.01	0.86	0.7	0.54
Raum 3	1.36	1.17	1.16	1.09	0.93	0.72	0.55
Raum 4	1.38	1.26	1.22	1.18	1	0.75	0.56
Raum 5	1.53	1.51	1.42	1.41	1.21	0.82	0.56
Raum 6	1.58	1.63	1.58	1.55	1.45	0.87	0.58

Tab. 12: Nachhallzeiten für verschiedene virtuelle Räume

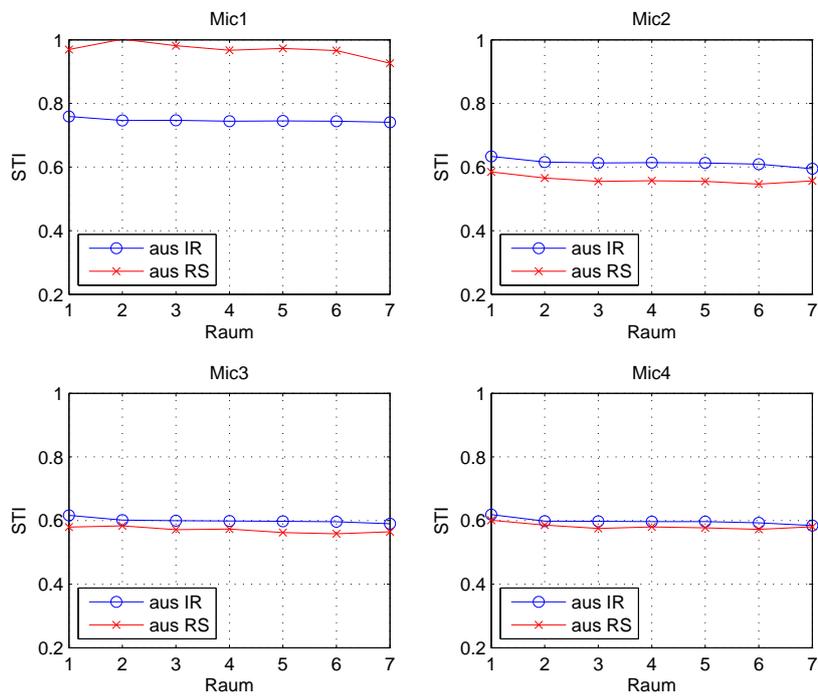


Abb. 14: STI in verschiedenen virtuellen Räumen

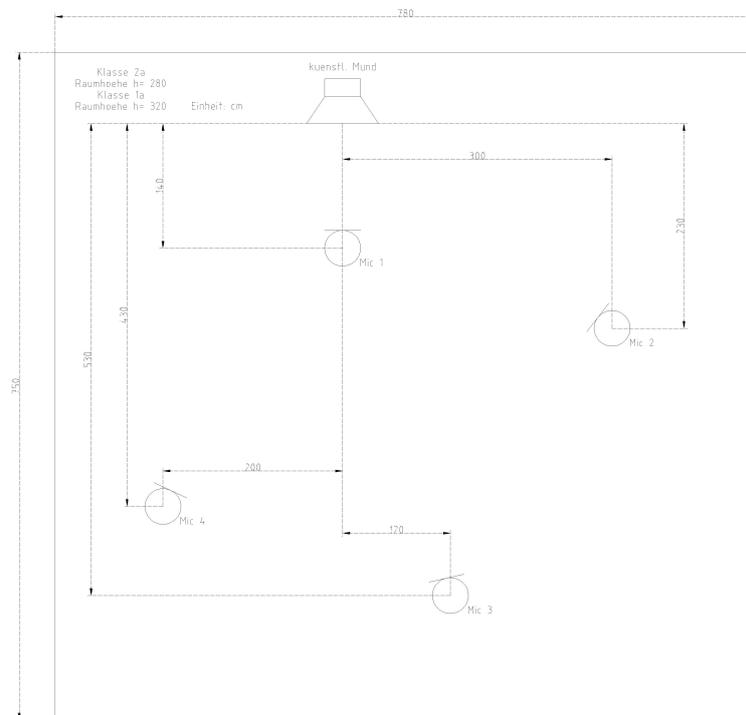


Abb. 15: Messanordnung, VS Berliner Ring

6.3 Messung des STI in Klassenzimmern der Volksschule Berliner Ring

Es wurde für 2 Klassenzimmern der Volksschule Berliner Ring der STI ermittelt. Der Unterschied der Räume liegt in der Raumhöhe, die durch eine zusätzliche abgehängte Decke in der Klasse 2a um 50 cm niedriger ist als in der Klasse 1a.

6.3.1 Aufbauplan, Maße

Abbildung 15

6.3.2 Messequipment

Equipment ident mit jener der Messung im Cube, siehe Kapitel 6.1.2.

6.3.3 STI aus Impulsantwort

Modulationsreduktion aufgrund von Nachhall (siehe Gleichung 3.3)

$$m_{rev}(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi FT/13.8)^2}}$$

Die mittleren Nachhallzeiten T_{60} und die Anfangsnachhallzeiten in Sekunden pro Oktavband und Messposition in den Klassenräumen der Volksschule Berliner Ring sind in den Tabellen 13 und 14 ersichtlich.

Klasse 1a							
Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Mic 1	0.6	0.69	0.55	0.55	0.49	0.47	0.34
Mic 2	0.98	0.82	0.76	0.8	0.77	0.7	0.65
Mic 3	0.9	0.95	0.75	0.82	0.81	0.7	0.58
Mic 4	0.96	0.78	0.73	0.8	0.76	0.75	0.57
T_{60mean}/s	1.03	0.92	0.84	0.81	0.761	0.74	0.65

Tab. 13: Anfangsnachhallzeiten Klasse 1a

Klasse 2a							
Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Mic 1	0.59	0.52	0.38	0.3	0.22	0.12	0.07
Mic 2	0.46	0.49	0.54	0.48	0.43	0.37	0.32
Mic 3	0.81	0.55	0.5	0.4	0.37	0.35	0.29
Mic 4	0.6	0.63	0.54	0.43	0.4	0.36	0.27
T_{60mean}/s	0.89	0.62	0.53	0.48	0.44	0.4	0.4

Tab. 14: Anfangsnachhallzeiten Klasse 2a

Modulationsreduktion aufgrund des Signal-Rausch-Abstandes (unbesetzter Raum)

Aus der Nachhallzeitformel von *Sabine* wird die äquivalente Absorptionsfläche ($A = \alpha \cdot S$) berechnet (siehe Gleichung 6.1, Tabelle 15)

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{\alpha \cdot S} \rightarrow A = \alpha \cdot S = 0.161 \frac{V}{T_{60}} \quad (6.1)$$

Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
α_{1a}	0.14	0.15	0.17	0.17	0.18	0.19	0.22
A_{1a}	29.2	32.9	35.91	37.3	39.56	40.85	46.29
α_{2a}	0.15	0.21	0.24	0.27	0.3	0.32	0.33
A_{2a}	23.91	34.28	40	44.56	48.43	52.75	53.83

Tab. 15: Äquivalente Absorbtiionsflächen; VS Berliner Ring

Mit aus 3.1.1 bekannten Formeln ergeben sich die Modulationsreduktionsfaktoren aufgrund des Signal-Rausch-Abstandes (siehe Tabelle 16).

$$L_p(v) = 10 \log \frac{P_{ak}}{P_0} + 10 \log \left(\frac{\gamma_L \Gamma_L(v)}{4\pi r_{LH}^2} + \frac{4}{A} \right)$$

$$P_{ak} = \frac{p^2(r=1) \cdot 4\pi}{412 \cdot \gamma_L}$$

$$m_n = \frac{1}{1 + 10^{-SNR/10}}$$

Oktavband/Hz	250	500	1k	2k	4k	8k
$m_{n,Mic1}$	1	0.99	0.99	0.98	0.95	0.84
$m_{n,Mic2}$	1	0.99	0.99	0.97	0.91	0.68
$m_{n,Mic3}$	1	0.99	0.99	0.97	0.91	0.67
$m_{n,Mic4}$	1	0.99	0.99	0.97	0.91	0.68

Tab. 16: Modulationsreduktionsfaktoren aufgrund SNR; VS Berliner Ring

Modulationsreduktion aufgrund des Signal-Rausch-Abstandes im Lehrbetrieb Für das Hintergrundgeräusch wurden hier die gemessenen Werte aus 4.2.4 eingesetzt (Tabelle 17).

Modulationsreduktion gesamt, unbesetzt Siehe Tabellen 18, 19

Modulationsreduktion gesamt, Lehrbetrieb Siehe Tabellen 20 und 21

Oktavband/Hz	250	500	1k	2k	4k	8k
$m_{n,Mic1}$	0.1709	0.0270	0.0084	0.0015	0.0005	0.0004
$m_{n,Mic2}$	0.1254	0.0175	0.0065	0.0009	0.0003	0.0002
$m_{n,Mic3}$	0.1220	0.0169	0.0063	0.0008	0.0003	0.0002
$m_{n,Mic4}$	0.1231	0.0171	0.0063	0.0008	0.0003	0.0002

Tab. 17: Modulationsreduktionsfaktoren aufgrund vom SNR; VS Berliner Ring, besetzter Zustand

Klasse 1a						
Oktavband/Hz	250	500	1k	2k	4k	8k
$m_{ges,Mic1}$	0.7648	0.8164	0.8159	0.8247	0.7870	0.7217
$m_{ges,Mic1}$	0.7132	0.7370	0.7206	0.6976	0.6530	0.4664
$m_{ges,Mic1}$	0.6667	0.7401	0.7118	0.6808	0.6481	0.4836
$m_{ges,Mic1}$	0.7299	0.7494	0.7204	0.6995	0.6335	0.4914

Tab. 18: Gesamtmodulationsreduktion, Klasse 1a

Klasse 2a						
Oktavband/Hz	250	500	1k	2k	4k	8k
$m_{ges,Mic1}$	0.8303	0.8790	0.9044	0.9231	0.9224	0.8335
$m_{ges,Mic2}$	0.8411	0.8229	0.8414	0.8358	0.7851	0.5758
$m_{ges,Mic3}$	0.8192	0.8360	0.8688	0.8556	0.7884	0.5836
$m_{ges,Mic4}$	0.7884	0.8198	0.8588	0.8474	0.7844	0.5977

Tab. 19: Gesamtmodulationsreduktion, Klasse 2a

Klasse 1a						
Oktavband/Hz	250	500	1k	2k	4k	8k
$m_{ges,Mic1}$	0.1085	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307
$m_{ges,Mic2}$	0.0736	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307
$m_{ges,Mic3}$	0.0677	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307
$m_{ges,Mic4}$	0.0741	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307

Tab. 20: MRED gesamt 1a, Lehrbetrieb

Klasse 1a						
Oktavband/Hz	250	500	1k	2k	4k	8k
$m_{ges,Mic1}$	0.1224	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307
$m_{ges,Mic2}$	0.0915	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307
$m_{ges,Mic3}$	0.0852	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307
$m_{ges,Mic4}$	0.0812	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307	0.0307

Tab. 21: MRED gesamt 2a, Lehrbetrieb

Bildung des STI, unbesetzt Die Zusammenfassung der Modulationsreduktionsfaktoren und die Umrechnungen zur Bildung des STI (siehe Kapitel 3.1.3) ergeben folgende Werte (Tabelle ??).

	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 4
1a	0.6676	0.5871	0.5810	0.5900
2a	0.7647	0.6701	0.6776	0.6691

Tab. 22: STI aus Impulsantwort, VS Berliner Ring

Bildung des STI, Lehrbetrieb Während des Lehrbetriebes ergeben sich folgende Werte für den STI (Tabelle 23)

	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 4
1a	0.0923	0.0837	0.0819	0.0838
2a	0.0951	0.0885	0.0869	0.0858

Tab. 23: STI, VS Berliner Ring, Lehrbetrieb

6.3.4 STI aus Messung mit Sprachähnlichen Signalen

1. MTF

In den Tabellen 34 und 35 sind als Beispiel die Modulationsreduktionsfaktoren für das Mikrofon 3 zu sehen.

2. Oktavbandpegel

Die Werte für die Oktavbandpegel in dB an den Messpositionen sind in den Tabellen 24 und 25 angeführt.

Klasse 1a							
Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Mic 1	64.92	70.68	65.95	56.70	52.37	50.23	48.63
Mic 2	44.44	53.43	50.78	42.86	39.14	34.50	30.18
Mic 3	47.6	55.84	51.86	42.83	40.65	35	30.20
Mic 4	45.31	55.73	52.67	43.65	40.53	34.5	30.6

Tab. 24: Oktavbandpegel, Klasse 1a

Klasse 2a							
Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Mic 1	65.13	70.65	65.55	56.66	52.18	50.13	48.54
Mic 2	42.14	54.35	50.62	41.89	38.04	31.85	28.81
Mic 3	45.12	56.19	51.13	41.69	38.61	32.73	28.83
Mic 4	43.57	56.77	49.21	42.15	38.78	32.8	30.02

Tab. 25: Oktavbandpegel, Klasse 2a

Setzt man diese Werte ins Verhältnis mit dem gemessenen Hintergrundgeräusch, so erhält man den tatsächlichen Signal-Rauschabstand (Tabellen 26, 27)

Klasse 1a							
Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Mic 1	-1.98	-1.52	-4.95	-11.6	-13.93	-14.37	-13.47
Mic 2	-22.46	-18.77	-20.12	-25.44	-27.16	-30.1	-31.92
Mic 3	-19.3	-16.36	-19.04	-25.47	-25.65	-29.6	-31.9
Mic 4	-21.59	-16.47	-18.23	-24.65	-25.77	-30.1	-31.5

Tab. 26: SNR, Klasse 1a

Die Modulationsreduktionsfaktoren werden zur Bildung zum STI in einen Scheinbaren Signal-Rauschabstand (SNR_{app}) umgerechnet (siehe 3.2.4). Wenn der SNR_{app} einen Wert kleiner als -15dB annimmt, ergibt das einen STI-Wert von 0. Das bedeutet, dass in den Klassenräumen während des Unterrichts die Sprachverständlichkeit als schlecht einzustufen ist. Bei diesen Werten jedoch wurde die Richtcharakteristik des menschlichen Gehörs nicht berücksichtigt, welche die Sprachverständlichkeit

Klasse 1a							
Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Mic 1	-1.77	-1.55	-5.35	-11.64	-14.12	-14.47	-13.56
Mic 2	-24.76	-17.85	-20.29	-26.41	-28.26	-32.75	-33.29
Mic 3	-21.78	-16.01	-19.77	-26.61	-27.69	-31.87	-33.27
Mic 4	-23.33	-15.43	-21.69	-26.15	-27.52	-31.8	-32.08

Tab. 27: SNR, Klasse 2a

zwar erhöht, aber diese warhscheinlich höchstens als “schwach“ eingestuft werden könnte.

3. Hörverdeckungsfaktor

Die Faktoren zur Korrektur der Modulationsreduktionsfaktoren bedingt durch Verdeckung und absoluter Hörschwelle ergeben sich zu (Tabelle 28 und 29)

Klasse 1a							
Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Mic 1	0.9873	0.9996	0.9968	0.9091	0.9997	0.9998	0.9997
Mic 2	0.4113	0.9977	0.9998	0.9997	0.9993	0.9978	0.9850
Mic 3	0.5909	0.9986	0.9090	0.9997	0.9995	0.9980	0.9851
Mic 4	0.4603	0.9080	0.9090	0.9997	0.9995	0.9978	0.9864

Tab. 28: Korrekturfaktoren, Klasse 1a

Klasse 2a							
Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Mic 1	0.9879	0.9091	0.9968	0.9091	0.9997	0.9998	0.9997
Mic 2	0.2914	0.9982	0.9998	0.9996	0.9991	0.9959	0.9796
Mic 3	0.4493	0.9081	0.9996	0.9996	0.9992	0.9966	0.9797
Mic 4	0.3636	0.9989	0.9995	0.9996	0.9993	0.9967	0.9845

Tab. 29: Korrekturfaktoren, Klasse 2a

4. STI

Es ergeben sich folgende Werte für den STI in unbesetzten Klassenräumen, ersichtlich in Tabelle 30.

	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 4
1a	0.89	0.54	0.56	0.55
2a	0.88	0.64	0.61	0.63

Tab. 30: STI, VS Berliner Ring, unbesetzt

6.3.5 Vergleich der Messungen

Siehe Tabelle 31

		Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 4
Klasse 1a	STI aus IR	0.67	0.59	0.59	0.59
	STI aus RS	0.89	0.54	0.56	0.55
Klasse 2a	STI aus IR	0.76	0.67	0.68	0.67
	STI aus RS	0.88	0.64	0.61	0.63

Tab. 31: Vergleich der Messmethoden

7 Diskussion, Ausblick

7.1 Messungen, Messmethoden

Die Ermittlung des STI aus der Impulsantwort bringt sehr ähnliche Ergebnisse wie jene aus der Messung nach der Norm [1]. Die Voraussetzung dafür ist, dass man sich im diffusen Schallfeld befindet. Bei allen Messungen im Rahmen dieses Projektes ist das an der Mikrofonposition "Mic 1" sicher nicht der Fall, deshalb ergeben hier die Messungen einen größeren Unterschied. Das direkte Schallfeld kann zwar in die Berechnung miteinbezogen werden, doch dazu ist die Kenntnis des Bündelungsgrades von Sprecher und Hörer notwendig.

Die Ermittlung des STI aus Anregung mit sprachähnlichen Signalen hat zudem noch weitere Vorteile, insofern, als dass keine Daten von den Raumabmessungen, noch von den Richtcharakteristika vorliegen müssen. Z.B. wurden zur Bestimmung der Abnahme der Schallpegel (siehe 3.1.1) nicht die exakten Bündelungsgradwerte für den künstlichen Mund zur Berechnung verwendet, weil diese nicht vorhanden waren.

In allen Messungen wurden Kugelmikrofone als Empfänger eingesetzt. Um noch exaktere Ergebnisse zu erzielen, müssten hier künstliche Nachbildungen des menschlichen Hörapparates eingesetzt werden. Das würde die Messwerte für den STI etwas verbessern.

7.2 Messung CUBE

Die Messung im CUBE mit der "Raum in Raum" Simulation sollte eigentlich zeigen, dass sich der STI mit Zunahme der Nachhallzeit verschlechtert.

Wie in Kapitel 6.2 ersichtlich, ist das nur sehr geringfügig der Fall. Das Ergebnis ist darauf zurückzuführen, dass der künstliche Raum nicht stark genug angeregt wird um eine Verschlechterung des STI hervorzurufen.

7.3 Messung VS Berliner Ring

Die Messungen in der Volksschule Berliner Ring zeigen, dass durch geeignete Maßnahmen eine Erhöhung der Sprachverständlichkeit möglich ist. In Klassenraum der 2a wurde durch eine abgehängte Decke der Raum akustisch etwas verbessert und daher ergeben die Messungen des STI auch höhere Werte (siehe Abbildung 16).

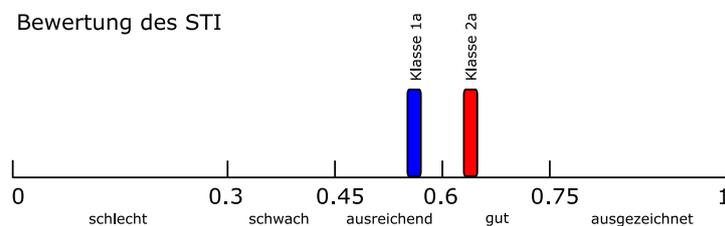


Abb. 16: STI, VS Berliner Ring

Diese Messungen berücksichtigen jedoch nicht die in Kapitel 4.2.4 ermittelten Hintergrundgeräusche. Wenn man diese mit in die Messung einbezieht, ergibt sich eine Sprachverständlichkeit, die eindeutig mit "Schlecht" (siehe 3.3) für beide Klassen zu bewerten ist. Die Folge davon ist, dass die Lehrpersonen mit einem deutlich höheren Stimmaufwand sprechen müssen und dadurch auch sie die Leittragenden der schlechten akustischen Situation in den Klassenräumen sind.

Die akustische Qualität in kleinen bis mittelgroßen Räumen wird durch die Neufassung der DIN 18041 [3] im Jahre 2004 verbindlich geregelt. Die Norm gibt für Kommunikationsräume, abhängig von ihrer Größe und dem Nutzungszweck, die Richtwerte bezüglich Nachhallzeit und Frequenzverlauf vor (siehe Abbildung 17).

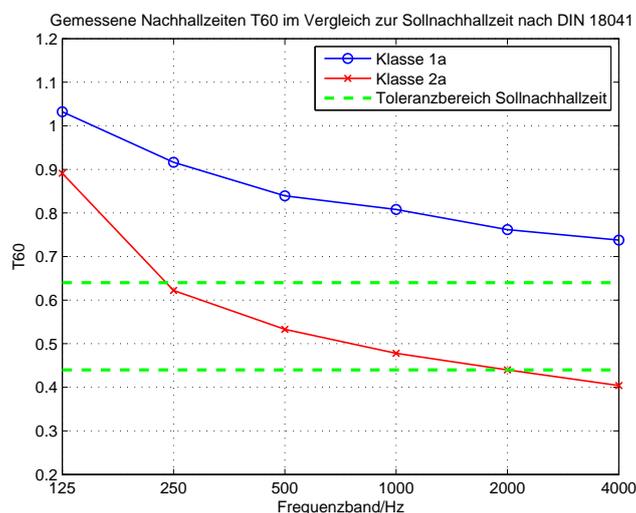


Abb. 17: Nachhallzeiten, Sollbereich vs. Istzustand

In der Klasse 2a, also in jener mit der schallabsorbierenden Decke, wird die Soll-Nachhallzeit zumindest in den höheren Frequenzbändern eingehalten. In der Klasse 1a ist sie hingegen in allen Frequenzbändern zu hoch (siehe 17).

Generell empfiehlt die DIN 18041 für die Deckenbelegung von Kommunikationsräume eine Kombination von hochwirksamen Absorbern mit einem reflektierenden Mittelfeld. Bei Räumen bis 250 m^3 (Klasse 1a, 187 m^3 ; Klasse 2a, 164 m^3) ist hingegen kein Reflektor notwendig, da auch bei vollflächiger Deckenbelegung keine Überdämpfung des Raumes zu befürchten ist. Um auch im tieffrequenten Bereich die Nachhallzeit zu verringern, können sogenannte Plattenabsorber zielführend sein. Eine akustische Bedämpfung der Rückwand sollte zusätzlich zur Verminderung beitragen.

Hinsichtlich der Erhebung der Geräuschpegel ergibt sich die Frage, inwieweit die Einhaltung der DIN 18041 als ausreichende Grundlage für die Akustik in Klassenräumen zu bewerten ist. Aus den Messungen könnte man durchaus schließen, dass die Einhaltung der Norm das Mindeste sein sollte, wenn es um die Verbesserung der akustischen Qualität in Klassenräumen geht.

Literatur

- [1] Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex. Ident mit IEC 60268-16:2003.
- [2] Ergonomie - beurteilung der sprachkommunikation, 2002.
- [3] Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen, 2004.
- [4] Imre Csonka. Schallquellenpositionierung mit Hilfe des Zeitumkehrspiegels. *Diplomarbeit, IEM*, 2006.
- [5] Angelo Farina. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. <http://pcfarina.eng.unipr.it>.
- [6] G.R.A.S. Mouth simulator type 44AA. <http://www.grasinfo.dk>.
- [7] T. Houtgast and H.J.M. Steeneken. A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. *J. Acoust. Soc. Am.*, 77 (3), March, 1985.
- [8] Petra Larm and Valtteri Hongisto. Experimental comparison between speech transmission index, rapid speech transmission index, and speech intelligibility index. *J. Acoust. Soc. Am.*, 119(2), February:1106–1117, 2006.
- [9] Litkovsky. Developmental changes in the precedence effect: Estimates of minimal audible angle. *J. Acoust. Soc. Am.*, 102:1739–1745, 1997.
- [10] Peggy B. Nelson. The ASA classroom acoustics effort. *Acoustics Today*, October, 2005.
- [11] Oppenheim and Schaffer. *Digital Signal Processing*. Prentice-Hall, 1975.
- [12] Alois Sontacchi. Beschallungstechnik. *Vorlesungsunterlagen, IEM Graz*.
- [13] K. Steiglitz and L. McBride. A technique for the identification of linear systems. *IEEE Trans. Automatic Control*, 10(4): 461–464, 1965.
- [14] Stefan Warum. Messung von Aussenohrübertragungsfunktionen und direktionalen Raumimpulsantworten als Basis der Auralisation realer Räume. *Diplomarbeit, IEM*, 2003.

- [15] W.T.Chu and A.C.C.Warnock. Detailed Directivity of Sound Fields Around Human Talkers. *IRC-RR-104*, 2002. <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/rr/rr104/rr104.pdf>.

Anhang

Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$f_1 = 0.63$ Hz	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.99
$f_2 = 0.8$ Hz	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.9798	0.98
$f_3 = 1$ Hz	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.98
$f_4 = 1.25$ Hz	0.96	0.96	0.96	0.95	0.94	0.95	0.96
$f_5 = 1.6$ Hz	0.94	0.94	0.94	0.92	0.91	0.92	0.95
$f_6 = 2$ Hz	0.91	0.92	0.92	0.89	0.88	0.89	0.93
$f_7 = 2.5$ Hz	0.88	0.88	0.88	0.84	0.82	0.84	0.89
$f_8 = 3.15$ Hz	0.82	0.83	0.83	0.77	0.76	0.78	0.84
$f_9 = 4$ Hz	0.75	0.76	0.76	0.69	0.67	0.73	0.77
$f_{10} = 5$ Hz	0.67	0.68	0.68	0.61	0.59	0.61	0.7
$f_{11} = 6.3$ Hz	0.58	0.59	0.59	0.52	0.50	0.5	0.62
$f_{12} = 8$ Hz	0.49	0.5	0.5	0.4	0.41	0.44	0.52
$f_{13} = 10$ Hz	0.41	0.42	0.42	0.35	0.34	0.36	0.4
$f_{14} = 12.5$ Hz	0.34	0.35	0.35	0.29	0.28	0.29	0.36

Tab. 32: Modulationsreduktion m_{rev} bedingt durch Nachhall: CUBE

Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$f_1 = 0.63$ Hz	0.97	0.96	0.94	0.93	0.90	0.66	0.30
$f_2 = 0.8$ Hz	1.03	0.95	0.96	0.93	0.8	0.68	0.33
$f_3 = 1$ Hz	0.98	0.93	0.92	0.92	0.87	0.67	0.31
$f_4 = 1.25$ Hz	0.96	0.95	0.94	0.89	0.88	0.66	0.3
$f_5 = 1.6$ Hz	0.91	0.92	0.9	0.88	0.83	0.64	0.3
$f_6 = 2$ Hz	0.9	0.82	0.88	0.86	0.84	0.61	0.29
$f_7 = 2.5$ Hz	0.84	0.81	0.82	0.78	0.78	0.57	0.28
$f_8 = 3.15$ Hz	0.76	0.74	0.74	0.71	0.67	0.52	0.26
$f_9 = 4$ Hz	0.82	0.71	0.71	0.66	0.65	0.46	0.23
$f_{10} = 5$ Hz	0.69	0.66	0.55	0.60	0.55	0.42	0.21
$f_{11} = 6.3$ Hz	0.71	0.58	0.46	0.51	0.44	0.35	0.2
$f_{12} = 8$ Hz	0.58	0.49	0.41	0.45	0.30	0.31	0.17
$f_{13} = 10$ Hz	0.54	0.38	0.34	0.44	0.25	0.27	0.14
$f_{14} = 12.5$ Hz	0.49	0.31	0.32	0.37	0.32	0.24	0.12

Tab. 33: Modulationsreduktionsfaktoren aus Messung mit sprachähnlichem Anregungssignal ohne Korrektur: Mic3, CUBE

Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$f_1 = 0.63$ Hz	0.91	0.98	0.97	0.92	0.89	0.82	0.57
$f_2 = 0.8$ Hz	0.95	0.93	0.99	0.92	0.91	0.82	0.52
$f_3 = 1$ Hz	0.79	0.84	0.91	0.88	0.87	0.80	0.56
$f_4 = 1.25$ Hz	0.80	0.91	0.92	0.89	0.83	0.77	0.54
$f_5 = 1.6$ Hz	0.79	0.82	0.88	0.82	0.78	0.74	0.53
$f_6 = 2$ Hz	0.76	0.80	0.78	0.73	0.75	0.71	0.49
$f_7 = 2.5$ Hz	0.59	0.68	0.77	0.65	0.69	0.65	0.46
$f_8 = 3.15$ Hz	0.53	0.61	0.71	0.57	0.62	0.59	0.42
$f_9 = 4$ Hz	0.43	0.55	0.71	0.50	0.51	0.52	0.37
$f_{10} = 5$ Hz	0.40	0.44	0.66	0.41	0.46	0.46	0.32
$f_{11} = 6.3$ Hz	0.58	0.34	0.55	0.33	0.39	0.39	0.26
$f_{12} = 8$ Hz	0.48	0.29	0.48	0.32	0.38	0.32	0.21
$f_{13} = 10$ Hz	0.46	0.28	0.39	0.24	0.32	0.23	0.17
$f_{14} = 12.5$ Hz	0.40	0.27	0.22	0.19	0.24	0.18	0.11

Tab. 34: Modulationsreduktionsfaktoren aus Messung mit sprachähnlichem Anregungssignal ohne Korrektur: Mic3, Volksschule Berliner Ring, Klasse 1a

Oktavband/Hz	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$f_1 = 0.63$ Hz	0.90	0.94	0.92	0.92	0.90	0.78	0.45
$f_2 = 0.8$ Hz	1.01	0.93	0.96	0.92	0.90	0.76	0.44
$f_3 = 1$ Hz	0.89	0.93	0.92	0.91	0.89	0.79	0.43
$f_4 = 1.25$ Hz	1.01	0.86	0.90	0.91	0.95	0.79	0.46
$f_5 = 1.6$ Hz	0.87	0.92	0.92	0.91	0.92	0.77	0.44
$f_6 = 2$ Hz	0.89	0.84	0.90	0.92	0.86	0.77	0.44
$f_7 = 2.5$ Hz	0.84	0.83	0.82	0.81	0.82	0.72	0.41
$f_8 = 3.15$ Hz	0.71	0.75	0.73	0.77	0.77	0.70	0.40
$f_9 = 4$ Hz	0.76	0.65	0.72	0.70	0.71	0.64	0.37
$f_{10} = 5$ Hz	0.67	0.61	0.57	0.65	0.613	0.60	0.35
$f_{11} = 6.3$ Hz	0.54	0.50	0.51	0.58	0.50	0.56	0.31
$f_{12} = 8$ Hz	0.39	0.44	0.41	0.50	0.33	0.45	0.27
$f_{13} = 10$ Hz	0.30	0.38	0.37	0.41	0.23	0.42	0.24
$f_{14} = 12.5$ Hz	0.23	0.36	0.24	0.36	0.21	0.39	0.23

Tab. 35: Modulationsreduktionsfaktoren aus Messung mit sprachähnlichem Anregungssignal ohne Korrektur: Mic3, Volksschule Berliner Ring, Klasse 2a