
BACHELORARBEIT

AKUSTISCHE BESTANDSAUFNAHME DER
TU-HÖRSÄLE INFFELDGASSE

abgegeben am
07. Januar 2019
Technische Universität Graz

von
Clemens Frischmann, 01573166
Robert Hofer, 01531629
Klaus Schiller, 01330536

Betreuerin:
DI Jamilla Balint

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.

Graz, am

(Unterschrift)

(Unterschrift)

(Unterschrift)

Es sind stets Personen männlichen und weiblichen Geschlechts gleichermaßen gemeint. Aus Gründen der einfacheren Lesbarkeit wird in der Arbeit nur die männliche Form verwendet.

Abstract

Ziel der Arbeit war die Anforderungen an die Akustik eines Hörsaals zu definieren. Dazu wurde überprüft, ob die in Normen genannten akustischen Gütemaße und deren Grenzwerte für die Beurteilung der Sprachverständlichkeit ausreichen. Es wurden siebzehn Hörsäle vermessen und ausgewertet, um den statistischen Informationswert zu erhöhen.

Die Hörsäle wurden sowohl subjektiv evaluiert, als auch objektiv vermessen. Die Ergebnisse beider Bewertungen wurden verglichen, um die Sollbereiche auf ihre Relevanz bei Hörsälen zu untersuchen. Für einen besseren Vergleich wurden weitere Gütemaße aus verschiedener Literatur herangezogen. Mehrere Grenzwerte von Gütemaßen wurden an den Raumtyp „Hörsaal“ angepasst, und es wurde ein Netzdiagramm entworfen, um die Ergebnisse verständlich darzustellen. Der Anlagepegel beziehungsweise der Hintergrundgeräuschpegel spielt eine wichtige Rolle bei der Sprachverständlichkeit. Außerdem besteht eine Volumensabhängigkeit der Grenzwerte von Gütemaßen.

Für jeden der siebzehn Hörsäle wurde ein akustisches Datenblatt angefertigt. Anhand dieser wurde festgestellt, dass bei sieben Hörsälen der Technischen Universität Graz, Campus Inffeldgasse, Sanierungsbedarf besteht.

The aim of this work was to define acoustic requirements, which a lecture hall has to fulfill. Therefore the quality levels of established standards and their recommended target values were reviewed. To increase the statistical power seventeen lecture halls were measured and analyzed. The lecture halls were subjectively evaluated as well as objectively measured. Both outcomes were compared to evaluate, if the standardized required ranges of quality levels apply. To increase the significance, more quality levels out of various publications were used to describe speech intelligibility. Some required ranges were adapted to suite intelligible lecture halls. A radar chart was designed to present the result in a understandable manner.

Standardized service equipment sound pressure level or background noise level plays an important role in speech intelligibility. Furthermore the required ranges of quality levels are dependent on the room volume.

For each of the seventeen lecture halls a data sheet was designed. The results show, that seven out of seventeen lecture halls require acoustic redevelopment.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Motivation	7
1.2	Aufgabenstellung/Zielsetzung	7
1.3	Vorgehensweise	8
2	Grundlagen und Theorie	9
2.1	Gütemaße	9
2.1.1	Nachhallzeit	10
2.1.2	Deutlichkeitsgrad D_{50}	11
2.1.3	Schwerpunktszeit t_s	12
2.1.4	Artikulationsverlust Al_{cons}	12
2.1.5	Sprachübertragungsindex STI	13
2.1.6	Bassverhältnis BR	14
2.2	Normen	15
2.2.1	Schallquelle und Quellpositionen	15
2.2.2	Mikrofone und Mikrofonpositionen	16
2.2.3	Der Prüfbericht	17
2.2.4	Anlagengeräuschpegel	18
2.2.5	Optimale Nachhallzeit für Sprache	19
2.3	Messmethoden	20
2.3.1	Subjektive Evaluierung	20
2.3.2	Objektive Messung	24
2.4	Einberechnung des Publikums	29
2.4.1	Berechnung der Nachhallzeit	29
2.4.2	Berechnung der notwendigen äquivalenten Absorptionsfläche	31
3	Messungen und Auswertung	33
3.1	Messungen	33
3.1.1	Messablaufplan	33
3.1.2	Messung	37
3.2	Auswertung	40
3.2.1	Vergleich der Messwerte mittels Netzdiagramm	40
3.2.2	Auswertung mittels MATLAB	44
3.2.3	Auswertung der Plots	46
4	Fazit	52
4.1	Erkenntnisse	52
4.2	Ausblick	56
A	Äquivalente Absorptionsflächen	63
B	Messprotokoll	64
C	Datenblätter	67
D	Messprotokollvorlage	137

1

Einleitung

1.1 Motivation

Die ursprüngliche Intention, diese Arbeit zu verfassen, lag im Interesse an der Thematik Raumakustik. Dazu bot sich das Thema *Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse* an, welches von unserer Betreuerin DI Jamilla Balint vorgeschlagen wurde. Hier galt es, unser erarbeitetes Wissen aus der Vorlesung *Raumakustik VO* und der *Raumakustik Laborübung* der TU Graz zu vereinen und so weitere Erfahrungen zu sammeln.

Vor allem die *Raumakustik-Laborübung* weckte unser Interesse an der Materie, sodass das Thema von uns als Bachelor-Arbeit aufgegriffen wurde.

Da es allgemein sehr viele verschiedene Meinungen zur Akustik diverser Hörsäle des Campus Inffeldgasse gibt, sollten wir diese Behauptungen aufnehmen und prüfen. Mittels dieser Arbeit sollte folglich eingeschätzt werden, welche der Hörsäle Bedarf haben, akustisch verbessert zu werden, und welche Hörsäle über eine ausreichende Akustik verfügen.

1.2 Aufgabenstellung/Zielsetzung

Gegenstand der Arbeit ist die raumakustische Vermessung der Hörsäle der TU-Graz am Campus Inffeldgasse. Die Messungen werden objektiv und subjektiv durchgeführt und anschließend verglichen. Mit Hilfe der Messergebnisse soll für jeden Hörsaal ein Datenblatt erstellt werden, um auf einen Blick die wichtigsten Parameter hinsichtlich raumakustischer Qualitäten ersichtlich zu machen. Da es für Hörsäle laut unserer Recherchen keinen spezifischen Bereich für Gütemaße gibt, soll im Rahmen der Arbeit, anhand der Auswertung von subjektiven und objektiven Ergebnissen, untersucht werden, ob die Normbereiche der Gütemaße auch für diese Art von Räumen gültig sind. Falls nicht, sollen neue Wertebereiche definiert werden, die für Hörsäle gelten. Anhand der Ergebnisse soll ein Überblick über die Qualität der Inffeld-Hörsäle geschaffen werden. Weiters soll der Verlauf der Messungen dokumentiert und dadurch ein Messablaufplan erstellt werden.

Es soll beurteilt werden, ob mit Einhaltung der optimalen Nachhallzeit immer ein idealer Hörsaal gegeben ist.

1.3 Vorgehensweise

Um eine Arbeit dieser Größe mit Erfolg abschließen zu können, ist neben dem technischen Vorwissen unter anderem auch regelmäßige Absprache gefragt, um alle Hörsäle im geplanten Zeitfenster messen zu können. Dazu wurde zu Beginn der Arbeit ein Zeitplan erstellt, welcher auch in den meisten Fällen eingehalten werden konnte. Die wichtigsten Punkte vom Anfang der Arbeit bis zur Vollendung waren wie folgt:

1. Literaturrecherche
2. Reservierung der Räume und Einholen der Zugangsberechtigung
3. Messung der Hörsäle(Genauer Ablauf der Messung siehe Kapitel "Messung des Hsi13")
4. Auswertung der objektiven Messergebnisse mithilfe von Matlab
5. Erstellung der Datenblätter für jeden Raum
6. Vergleich der objektiven und subjektiven Messergebnisse
7. Bestimmung der zusätzlich benötigten äquivalenten Absorptionsfläche
8. Präsentation der Ergebnisse

2

Grundlagen und Theorie

2.1 Gütemaße

Wie beschreibt man seine Umgebung am besten bezüglich ihrer akustischen Eigenschaften? Schon früh hat man versucht, Klangeigenschaften festzuhalten und zu kategorisieren. Dies gelang aber vorerst nur begrenzt, da die Akustik ein schwer zu erfassendes, subjektiv empfundenes, physikalisches Phänomen ist. Zuerst versuchte man, Raumklangeigenschaften mit Worten wie „hallig“ oder „klirrend“ zu beschreiben und einfache Größen, wie Raumvolumen und Abklingzeiten, zu messen. Erst später beschrieb man die auftretenden akustischen Ereignisse als Energiebilanzen, geometrisch als Schallstrahlen und über wellentheoretische Zusammenhänge. Die Frage, die sich stellt, ist, welche Informationen einem diese Werte über den Raum und dessen Akustik geben. Um einen Zusammenhang zwischen den gehörten Eindrücken und den gemessenen Größen zu finden, verglich man subjektive Klangbeschreibungen mit gemessenen und gerechneten Werten. Diese empirisch ermittelten Größen wurden in Kategorien, wie Sprache oder Musik, gegliedert und als „raumakustische Gütemaße“ bezeichnet.

Die Schwierigkeiten bei der akustischen Beschreibung von Räumen liegen darin, dass jeder Mensch in seiner Physiologie verschieden aufgebaut ist und dadurch Signale anders verarbeitet werden. Weiters spielen das gegebene Umfeld, definiert durch Raumdimensionen, Materialien im Raum und Hintergrundgeräusche, eine große Rolle. So können zum Beispiel Raummoden die gemessenen Daten verfälschen. Ist dies der Fall, müssen sie bei der Auswertung der Gütemaße berücksichtigt werden. Eine hier hilfreiche Größe ist die Schröderfrequenz. Sie gibt an, ab welcher Frequenz die Modendichte so hoch ist, dass Moden nicht mehr einzeln wahrgenommen werden können.

Es stellt sich nun die Frage, welche Gütemaße wir zur Beschreibung der Sprachverständlichkeit bei Hörsälen verwenden sollen. Während unserer Recherchen fiel uns auf, dass viele der für Sprachverständlichkeit verwendeten Gütemaße nicht explizit für Hörsäle definiert sind, sondern meist für Musik- oder Mehrzweckräumlichkeiten gelten. Die Gültigkeit dieser Gütemaße soll im Rahmen dieser Arbeit überprüft werden. Stellt sich heraus, dass die Wertebereiche für Hörsäle nicht gelten, sollen diese Sollbereiche angepasst werden. Auch Wertebereiche, die explizit für Sprache gelten, wie zum Beispiel der des Sprachübertragungsindex, sollen auf ihre Gültigkeit bei Hörsälen überprüft werden. Um diese Sollwertebereiche zu überprüfen und gegebenenfalls neu zu definieren, entschieden wir uns, subjektive Bewertungen mit gemessenen Gütemaßen zu vergleichen. Um das Hörereignis und die akustischen Eigenschaften eines Raumes sprachrelevant zu beschreiben, wurden folgende Adjektive verwendet (siehe Tabelle 2.1).

Nun wurden zu den Adjektiven passende Gütemaße gewählt. Welche Gütemaße von uns herangezogen wurden und mit welchen subjektiv beschreibenden Eigenschaften diese verglichen wurden, wird in diesem Kapitel genauer erläutert. Zudem werden existierende Sollwertebereiche für jedes Gütemaß genannt und erläutert.

scharf	-	dumpf
hell	-	dunkel
verständlich	-	unverständlich
hallig	-	trocken
brummend	-	klirrend
direkt	-	einhüllend
laut	-	leise

Tabelle 2.1: Adjektive zur subjektiven Evaluierung eines Raumes

2.1.1 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit ist das älteste und wohl signifikanteste akustische Merkmal eines Raumes, welches Wallace Clement Sabine bereits 1923 beschrieb. Sie ist definiert als die Zeit, in der die räumlich gemittelte Energiedichte in einem geschlossenen Raum um $60dB$ abfällt [1]. Sabine beschrieb das Verhalten der Nachhallzeit abhängig von der Schallgeschwindigkeit c , vom Rauminvolumen V und dessen äquivalenter Absorptionsfläche A (siehe Gleichung 2.1).

$$T = \frac{55,3}{c} \cdot \frac{V}{A} = \frac{55,3}{c} \cdot \frac{V}{S \cdot \alpha} \quad (2.1)$$

T ... Nachhallzeit in s

c ... Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in $\frac{m}{s}$

V ... Volumen in m^3

A ... Äquivalente Absorptionsfläche in m^2

S ... Oberfläche in m^2

α ... Schallabsorbtionsgrad

Betrachtet man die um den Absorbtionsgrad erweiterte Gleichung 2.1, erkennt man, dass bei einem maximalen Absorbtionsgrad $\alpha = 1$ ein Wert für die Nachhallzeit $T \neq 0$ resultiert. Da ein Absorbtionsgrad $\alpha = 1$ aber Freifeldbedingungen beschreibt und somit theoretisch keine Reflexionen existieren, weicht Sabines Beschreibung hier von der Wirklichkeit ab.

Carl Ferdinand Eyring erkannte dieses Problem und definierte 1930 eine Gleichung zur Berechnung der Nachhallzeit, basierend auf Gleichung 2.1 von Sabine, die diesen Fehler kompensiert (siehe Gleichung 2.2)[2].

$$T = \frac{55,3}{c} \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha)} \quad (2.2)$$

Ein Dynamikbereich welcher eine Messung des Pegelabfalls von $60dB$ zulässt, ist kaum realisierbar. Als gängige Methode hat sich deshalb die Messung eines kleineren Pegelabfalls mit anschließender Extrapolation auf $60dB$ etabliert. Es sollte für die Nachhallzeit immer T_N (abhängig von dem zur Verfügung stehenden Signal-Rauschabstand) und die EDT berechnet werden, da es abhängig von den Eigenschaften des Raumes zu Abweichungen zwischen den Nachhallzeiten kommen kann. Diese Abweichungen kommen zustande, wenn die Abklingkurve gekrümmt ist. Das bedeutet, dass der Energiedichteabfall langsam beginnt und dann schneller wird oder umgekehrt. Die EDT ist in solchen Fällen der wahrgenommenen Nachhallzeit ähnlicher, da der Halleindruck stark vom Beginn des Energiedichteabfalls abhängt[3].

Nachhallzeit T_N

Man unterscheidet zwischen T_{60} , T_{30} und T_{20} . Dabei werden die verschiedenen Pegelabfälle ($60dB$, $30dB$, $20dB$) jeweils auf $60dB$ extrapoliert. Für die Messung der Nachhallzeit muss der Signal-Rauschabstand (SNR) mindestens dem Auswertebereich N plus $15dB$ betragen. Die Nachhallzeit T_N wird immer ab $-5dB$ der Abklingkurve gemessen, und es muss mindestens $10dB$ Abstand zum Hintergrundgeräuschpegel eingehalten werden, um dessen Einfluss zu minimieren. So muss z.B. für T_{20} der SNR $35dB$ betragen[3].

Early decay time EDT

Die Nachhallzeit EDT ist die Zeit, in welcher die mittlere Schallenergie um $10dB$ abfällt, extrapoliert auf $60dB$. Gemessen wird diese von $0dB$ bis $-10dB$ der Abklingkurve. Die ersten $10dB$ der Abklingkurve sind für die Nachhallzeitempfindung ausschlaggebend, daher ist die EDT , wie zuvor erwähnt, für die subjektive Beschreibung eines Raumes aussagekräftiger als die T_{20} .

Als Sollbereich wurde der Normbereich aus der ÖNORM B 8115-3 verwendet [4]. Diese Norm wird in Abschnitt 2.2 näher erläutert. Um diesen Wertebereich auf seine Gültigkeit bei Hörsälen zu überprüfen, wurde er mit den Evaluierungsergebnissen von hallig - trocken verglichen.

2.1.2 Deutlichkeitsgrad D_{50}

Der Deutlichkeitsgrad D_{50} (auch als Deutlichkeit D bezeichnet) wurde 1953 von Rolf Thiele definiert und ist das Verhältnis zwischen der eintreffenden Schallenergie der ersten $50ms$ und der Gesamtenergie (siehe Gleichung 2.3)[5]. Dadurch ist ein Vergleich mit den Adjektiven einhüllend - direkt passend.

$$D_{50} = \frac{W_{0...50}}{W_{0...∞}} = \frac{\int_0^{50} p^2(t)dt}{\int_0^{∞} p^2(t)dt} \quad (2.3)$$

D_{50} ... Deutlichkeitsgrad in %

$W_{0...50}$... Energie der ersten $50ms$ in J

$W_{0...∞}$... Gesamtenergie in J

$p(t)$... Impulsantwort

Thiele hat einen Wertebereich für den Deutlichkeitsgrad drei Jahre später in einer Publikation zusammen mit Meyer festgelegt. Dieser liegt zwischen 38% und 76% und war weniger ein Sollbereich als eine Sammlung üblicher Werte der Deutlichkeit auf Zuschauerpositionen verschiedener Säle für Musik und Sprache. Im Laufe der Zeit wurde der Sollbereich je nach Verwendungszweck immer wieder angepasst. So sollte dieser für Sprache, laut einer Publikation 1984 von Schmidt und Reichardt, größer als 50% sein. Dieser Wert ist noch heute oft in diversen Literaturen vorzufinden. Ahnert und Tennhardt beziehen die Angabe auf die Verständlichkeit von Sprache, wonach der Deutlichkeitsgrad größer als 39% sein sollte. Die neueste Publikation für den Sollbereich von D_{50} ist die ÖNORM EN ISO 3382-1 [3], in welcher der Idealbereich des Deutlichkeitsgrades in Konzert- und Mehrzweckshallen zwischen 30% und 70% liegen sollte [6].

2.1.3 Schwerpunktszeit t_s

Die von Ralf Kürer 1971 definierte Schwerpunktszeit wird aus dem Flächenschwerpunktssatz abgeleitet und ist ein Maß für die Durchsichtigkeit. Wie in Abbildung 2.1 zu sehen, wird sie aus dem zeitlichen Abstand des Flächenschwerpunkts zur Ordinate gebildet. Je später die Schwerpunktszeit, desto räumlicher ist der akustische Eindruck am Hörerplatz, wodurch ein Vergleich mit den Adjektiven hallig - trocken gewählt wurde. t_s bezieht sich aus der quadrierten Impulsantwort und ist wie folgt definiert (siehe Gleichung 2.4)[7].

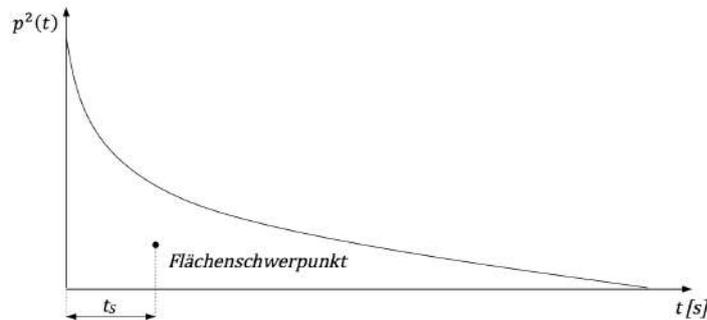


Abbildung 2.1: Schwerpunktszeit, dargestellt als Flächenschwerpunkt der quadrierten Impulsantwort

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.4)$$

t_s ... Schwerpunktszeit in s

$p(t)$... Impulsantwort

Die Wertebereiche für Sprachverständlichkeit variieren zwischen verschiedenen Literaturen. Zum Beispiel soll die Schwerpunktszeit laut Ahnert und Tennhard zwischen 60ms und 80ms liegen [7]. Kürer hingegen definiert einen Optimalwert in Abhängigkeit von der Nachhallzeit (siehe Gleichung 2.5)[8].

$$t_{s,opt} = \frac{T}{13,8} \quad (2.5)$$

$t_{s,opt}$... optimale Schwerpunktszeit in s

T ... Nachhallzeit in s

2.1.4 Artikulationsverlust Al_{cons}

Victor Peutz definierte den Artikulationsverlust als eine Größe zur Bewertung der Sprachverständlichkeit. Je höher der Wert, desto unverständlicher sind Konsonanten beim Hörer. Wie in der empirisch ermittelten Gleichung 2.6 zu sehen ist, besteht eine Abstandsabhängigkeit. Der Abstand zwischen Schallquelle und Empfänger wird auf die Richtentfernung normiert. So spielt nicht nur der Abstand zwischen Sprecher und Hörer eine Rolle, sondern es werden auch die Abstrahleigenschaften der Quelle und der Hallradius berücksichtigt. Weiters finden sich die Nachhallzeit und das Raumvolumen (durch den Hallradius) in Gleichung 2.6 [9].

$$Al_{cons} \approx 0,652 \cdot \left(\frac{r_{LH}}{r_R}\right)^2 \cdot T \approx 200 \cdot \frac{r_{LH}^2 \cdot T^2}{\gamma \cdot V} \quad (2.6)$$

Al_{cons} ... Artikulationsverlust in %

r_{LH} ... Abstand zwischen Schallquelle und Hörer in m

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

r_H ... Hallradius in m

γ ... Bündelungsgrad der Schallquelle

V ... Raumvolumen in m^3

Laut Peutz sind die Sollwertebereiche des Artikulationsverlusts abhängig von der Verfassung von Sprecher und Zuhörer. Zum Beispiel muss der Artikulationsverlust bei einem verschnupften Sprecher niedriger sein, um seine Botschaft zu verstehen, als bei einem gesunden. Auch der Inhalt des Gesprochenen spielt laut Peutz eine große Rolle. Zum Beispiel versteht man einen Hilferuf auch unter schlechten akustischen Voraussetzungen. Soll aber ein komplizierter Inhalt übermittelt werden, gibt es höhere Ansprüche an die Akustik. Da in dieser Arbeit Hörsäle evaluiert werden, gingen wir von schwierigem Inhalt aus. Die Verfassung von Sprecher und Hörer wurde als schlecht angenommen. Mit diesen Annahmen muss der Artikulationsverlust unterhalb einer Grenze von

$$Al_{cons} \leq 15\%$$

liegen, um Konsonantenverständlichkeit zu garantieren [9].

2.1.5 Sprachübertragungsindex STI

Der von Tammo Houtgast and Herman JM Steeneken 1985 definierte „Speech Transmission Index“ (STI) beschreibt das Übertragungsverhalten eines Raumes für Sprache. Betrachtet wird hierbei die Modulationsverringerng zwischen Schallquelle und Empfänger. Für das Verfahren werden sieben für Sprache wichtige Frequenzbänder, von $125Hz$ bis $8000Hz$ jeweils mit 14 Modulationsfrequenzen zwischen $0,63Hz$ und $12,5Hz$, moduliert. Die Modulationsfrequenzen entsprechen dabei einer spektralen Gewichtung, die das Rauschsignal an menschliche Sprache anpasst. Die Sprachverständlichkeit nimmt durch steigende Nachhallzeit und Störgeräusche ab. Das STI -Verfahren schreibt vor, dass die Signal-Stör-Abstände auf $\pm 15dB$ beschränkt sein müssen, wobei bei $-15dB$ Sprache völlig unverständlich übertragen wird und ab $15dB$ keine Verbesserung der Verständlichkeit erzielt werden kann [10]. Der Modulationsreduktionsfaktor wird wie folgt berechnet:

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{(1 + (2\pi F \cdot \frac{T}{13,80})^2)}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-\left(\frac{SNR}{10dB}\right)}} \quad (2.7)$$

$m(F)$... Modulationsreduktionsfaktor

F ... Modulationsfrequenz in Hz

T ... Nachhallzeit in s

SNR ... Signal-Rausch-Abstand in dB

Daraus können nun die jeweiligen wirksamen Signal-Stör-Verhältnisse berechnet werden. (Siehe 2.8)

$$X_i = 10 \log \frac{m_i}{1 - m_i} \quad (2.8)$$

X_i ... wirksame Signal-Stör-Verhältnisse in dB

m_i ... Modulationsreduktionsfaktoren

Die berechneten Werte werden in Oktaven getrennt und gemittelt, wodurch man dann die MTI (Modulation Transfer Indices) erhält.

$$MTI = \frac{X_{average} + 15}{30} \quad (2.9)$$

MTI ... Modulation Transfer Indices

$X_{average}$... gemittelte wirksame Signal-Stör-Verhältnisse in dB

Nach der Frequenzgewichtung im jeweiligem Frequenzband ergibt sich der Sprachübertragungsindex STI .

Wie Manfred Robert Schröder 1981 zeigte, kann der STI auch direkt aus der Raumimpulsantwort berechnet werden. Dadurch gewann der Sprachübertragungsindex an Relevanz, da seine Messung so mit weit weniger Aufwand verbunden war. Die Fouriertransformation der quadrierten Impulsantwort (Zähler) wird auf die Gesamtenergie der Impulsantwort (Nenner) normiert. So lassen sich die Modulationsfaktoren $m(F)$ ohne die aufwändige 98-Signale Messung errechnen (siehe Gleichung 2.10)[10].

$$m(F) = \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) e^{-j2\pi Ft} dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (2.10)$$

$m(F)$... Modulationsreduktionsfaktor

$h(t)$... Impulsantwort

F ... Modulationsfrequenz in Hz

t ... Integrationsvariable Zeit in s

Die weitere Berechnung wird analog zum klassischen Verfahren durchgeführt.

Die Einteilung des STI in Verständlichkeitsklassen wurde von Houtgast und Steeneken wie folgt vorgenommen [10]:

0	<	STI	<	0,30	schlecht
0,30	<	STI	<	0,45	schwach
0,45	<	STI	<	0,60	angemessen
0,60	<	STI	<	0,75	gut
0,75	<	STI	<	1	ausgezeichnet

2.1.6 Bassverhältnis BR

Das Bassverhältnis beschreibt die Klangfarbe des Nachhalls und berechnet sich aus dem Verhältnis der bandbegrenzten Nachhallzeiten von $125Hz$ und $250Hz$ zu $500Hz$ und $1000Hz$:

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}} \quad (2.11)$$

BR ... Bassverhältnis

T_X ... Nachhallzeit des jeweiligen Frequenzbandes X in s

Aufgrund des Abfalls der Sensibilität des menschlichen Gehörs zu tieferen Frequenzen hin sind Verhältnisse von $1 \leq BR \leq 1,3$ für Musik wünschenswert, um eine gewisse Wärme zu erzeugen. Bei Sprache hingegen sind hohe Frequenzen wichtiger für die Verständlichkeit als tiefe. So definierten Ahnert und Tennhardt die Grenzen für Sprache als $0,9 \leq BR \leq 1$ [7].

2.2 Normen

Ziel jeder wissenschaftlichen Arbeit ist es, die gewonnenen Erkenntnisse und daraus gewonnenen Schlussfolgerungen so genau und reproduzierbar wie möglich zu gestalten. Vor allem in praktischen Themengebieten wie akustischen Messungen, welche großen Einflussfaktoren, wie etwa Raumdimensionen, Messpositionen, Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit, ausgesetzt sind, ist dies daher besonders wichtig.

Herangezogen wurde von uns die ÖNORM EN ISO 3382 und die ÖNORM B 8115-3.

Ebenfalls wurde die OIB Richtlinie 5 und die darin zitierte ISO 10052 verwendet.

Dieses Kapitel beinhaltet die wichtigsten Punkte der Norm 3382-2 sowie Teile in die weiteren, oben genannten Normen.

2.2.1 Schallquelle und Quellpositionen

Die ÖNORM EN ISO 3382-1 schreibt vor, ungerichtete Schallquellen zu verwenden, welche möglichst kugelförmig abstrahlen. Zulässige Abweichungen von kugelförmiger Abstrahlung werden in Tabelle 2.2 als Oktavband gemittelttes Bündelungsmaß dargestellt [3].

Frequenz in Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Höchstabweichung in dB	± 1	± 1	± 1	± 3	± 5	± 6

Tabelle 2.2: Höchstzulässige Abweichungen der Schallquelle von kugelförmiger Abstrahlung in dB laut ÖNORM EN ISO 3382-1 [3]

Bei direkter Messung der Nachhallzeit muss die Schallquelle einen gewissen Dynamikbereich erzeugen können. Wie in Unterabschnitt 2.1.1 beschrieben wird, muss abhängig von der gemessenen Nachhallzeit ein Pegelabstand zum Hintergrundgeräusch von $35dB$, $45dB$ oder $75dB$ eingehalten werden. Dieser Pegelabstand wird als *Signal-Rausch-Abstand* bezeichnet, abgekürzt *SNR*. Werden pseudostatistische Folgen gemessen, darf der Maximalpegel niedriger sein, da durch synchrone Mittelung ebenfalls ein ausreichender *SNR* erreicht werden kann [3].

Das akustische Zentrum der Schallquelle soll $1,5m$ über dem Boden liegen, um tieffrequente Veränderungen der Ausgangsleistung der Schallquelle im Frequenzbereich der Messung zu vermeiden.

Die Schallquelle befindet sich an jener Stelle, welche üblicherweise von Aufführenden im Raum aufgesucht werden. Üblicherweise werden mindestens drei Senderstellungen gewählt, in kleinen

Hörsälen, an denen es nur eine Sprecherposition gibt, genügt eine Quelle. Im Großteil unserer Messungen wurden von uns zwei verschiedene Senderpositionen (Tafel, Pult) gewählt, um alle Möglichkeiten abzudecken [3].

2.2.2 Mikrofone und Mikrofonpositionen

"Das Messgerät muss den in IEC 61672-1 an ein Schallpegelmessgerät vom Typ 1 gestellten Anforderungen genügen. Das Mikrofon sollte so klein wie möglich sein, um das Schallfeld wenig zu beeinflussen. Vorzugsweise weist es einen Membrandurchmesser von höchstens 13mm auf. Mikrofone mit Membrandurchmessern bis zu 26mm sind zulässig, wenn es sich um reine Druckempfänger handelt oder sie als Freifeldmikrofone mit einem Diffusor-Vorsatz ausgestattet sind, womit sich bei diffusem Schalleinfall eine frequenzunabhängige Übertragungscharakteristik ergibt." [3]

„Die verschiedenen Messgrößen sind keine statistischen Merkmale des gesamten Zuhörerraums, sie schwanken vielmehr systematisch von Sitzplatz zu Sitzplatz. Es ist daher wichtig, eine angemessene Anzahl von Sender- und Empfängerpositionen einzubeziehen, um den Gesamttraum zu charakterisieren.“ [3]

Die Anzahl der Mikrofonpositionen in Abhängigkeit der Sitzplatzanzahl wird in Tabelle 2.3 dargestellt.

Anzahl an Sitzplätzen	Mindestanzahl an Mikrofonpositionen
500	6
1000	8
2000	10

Tabelle 2.3: Mindestanzahl der Empfängerpositionen laut ÖNORM EN ISO 3382-1 [3]

Wie aus obiger Tabelle ersichtlich ist, werden bei bis zu 500 Sitzplätzen mindestens sechs Mikrofonpositionen eingesetzt. Diese werden so gewählt, dass die übliche Raumnutzung repräsentativ aufgenommen wird. Die Positionen sollten dabei möglichst asymmetrisch im Raum verteilt werden. Dadurch werden eventuell entstandene Raummoden an verschiedenen Punkten abgegriffen und eine resultierende Verfälschung der Messung verhindert. Die Mikrofonkapsel befindet sich auf der gedachten Höhe des menschlichen Ohres in Sitzposition und ist mit $1,2\text{m}$ definiert.

"Die Mikrofonpositionen müssen mindestens eine halbe Wellenlänge voneinander entfernt sein, d.h. im üblichen Frequenzbereich etwa 2m ." [3]

"Der Abstand jeder Mikrofonposition zur nächstgelegenen reflektierenden Oberfläche, einschließlich des Bodens, muss mindestens ein Viertel der Wellenlänge betragen, d.h. üblicherweise etwa 1m ." [3]

An dieser Stelle ist zu diskutieren, dass der in der Norm erwähnte "übliche Frequenzbereich" (Kapitel 4.3 -Messpositionen in ÖNORM EN IS 3382-1 [3]) mit den Forderungen nach $\frac{\lambda}{2}$ bezüglich der Mikrofonabstände und $\frac{\lambda}{4}$ bezüglich der Abstände von Mikrofon zur nächstgelegenen Begrenzungsfläche eine Frequenz von 85Hz ergibt. Will ein durchaus realistischer Frequenzbereich bis 65Hz gemessen werden, müsste der Mindestabstand zwischen Mikrofonen $\frac{\lambda}{2} = 2,7\text{m}$ betragen. Ein Problem entsteht, wenn kleine Hörsäle vermessen werden sollen, da ein Abstand von $2,7\text{m}$ oft nicht eingehalten werden kann, wenn, wie von der Norm gefordert, 6 Mikrofonpositionen verwendet werden.

In diesem Fall kann als Randbedingung die Schröder Frequenz mit einbezogen werden. Diese gibt jene Frequenz an, oberhalb welcher mit keinen einzeln auftretenden, störenden Moden mehr zu rechnen ist.

Im Beispiel des Hörsaals FSI2 (siehe Anhang C Abschnitt HSFSI2) mit Volumen $V = 257m^3$ und geschätzter Nachhallzeit $T = 1,1s$ resultiert $f_{Schröder} = 131Hz$. In diesem Fall könnte auch auf Mindestabstände von $\frac{\lambda}{2} = 1,3m$ und $\frac{\lambda}{4} = 0,65m$ zurückgegriffen werden, wenn alle aus der Messung resultierenden Werte ab der Frequenz $f_{Schröder} = 131Hz$ betrachtet werden.

Der Abstand von Mikrophon zu Quelle muss groß genug gewählt werden, um im Diffusfeld zu liegen. Innerhalb des Hallradius r_H überwiegt die Energiedichte des Direktschalls, am Hallradius sind Direktanteil und stationärer Anteil gleich ausgeprägt.

Der Hallradius r_H ist wie folgt definiert:

$$r_H = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{T}} \quad (2.12)$$

r_H ... Hallradius in m

V ... Raumvolumen in m^3

T ... Nachhallzeit in s

Mit Gleichung 2.13, welche dem doppelten Hallradius r_H entspricht, lässt sich der Mindestabstand in Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit berechnen. Diese Formel wurde aus der ÖNORM EN ISO 3382-2 entnommen [11].

$$a = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}} \quad (2.13)$$

a ... Mindestabstand Mikrophon-Quelle in m

V ... Raumvolumen in m^3

T ... ein Schätzwert der erwarteten Nachhallzeit in s

c ... Schallgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$

2.2.3 Der Prüfbericht

Die Erstellung eines Prüfberichtes ist bei jeder Messung wichtig. Dieser ist vor jeder Messung auszufüllen und dient der Reproduzierbarkeit. Laut ÖNORM EN ISO 3382-1 muss dieser folgende Angaben enthalten [3]:

- a Angabe, dass die Messungen in Übereinstimmung mit diesem Teil der ISO 3382 durchgeführt wurden.
- b Bezeichnung und Ort des untersuchten Raumes
- c Grundriss des Raumes, mit Angabe des Maßstabs

- d Volumen des Raumes
- e Bei Räumen mit Sprach- und Musikdarbietungen, die Anzahl und Art der Sitze
- f Beschreibung der Form und des Materials der Raumwände und Decke
- g Besetzungszustand während der Messungen und Anzahl der anwesenden Personen
- h Bedingungen bezüglich veränderlicher Einrichtungen
- i Bei Theatern, ob Sicherheitsvorhang offen oder geschlossen war
- j Falls erforderlich, eine Beschreibung der Bühnenaustattung
- k Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit während der Messung
- l Beschreibung des Messgeräts und der Schallquelle
- m Beschreibung des eingesetzten Schallsignals
- n Gewählte Messpunktdichte einschließlich der Einzelheiten zu Sender- und Mikrofonpositionen, eingezeichnet in einen Plan
- o Datum der Messung und Bezeichnung der die Messung durchführenden Organisation

2.2.4 Anlagengeräuschpegel

Da alle gemessenen Hörsäle mit Beamer und Lüftung ausgestattet und diese auch in den meisten Fällen während der Vorlesungen eingeschaltet sind, ist der Grundgeräuschpegel von den technischen Installationen abhängig. Daher wurde als Grundgeräuschpegel der Anlagengeräuschpegel $L_{Aeq,nT}$ nach OIB-Richtlinie 5 (Schallschutz) verwendet. OIB-Richtlinie 5 besagt, dass der Wert von $L_{Aeq,nT} = 30dB$ für Aufenthaltsräume mit dem Schutzziel Konzentration nicht überschritten werden darf [12].

Der Anlagengeräuschpegel lässt sich laut ISO 10052 aus dem äquivalenten Dauerschallpegel, welcher in jedem Hörsaal gemessen wurde, errechnen(siehe Gleichung 2.14)[13].

$$L_{Aeq,nT} = L_{Aeq} - k \tag{2.14}$$

$L_{Aeq,nT}$... Anlagengeräuschpegel in dB

L_{Aeq} ... äquivalente Dauerschallpegel in dB

k ... Das Nachhallmaß in dB

Das Nachhallmaß k wird aus dem arithmetischen Mittelwert der Nachhallzeit berechnet, gemessen in Oktavbändern $500Hz$, $1kHz$, $2kHz$ (siehe Gleichung 2.15).

$$k = 10 \cdot \log_{\frac{1}{3}}[(T_{500} + T_{1000} + T_{2000})/T_0] \quad (2.15)$$

T_x ... Nachhallzeit des jeweiligen Oktavbandes in s

T_0 ... Bezugsnachhallzeit ($T_0 = 0,5s$)

2.2.5 Optimale Nachhallzeit für Sprache

In der ÖNORM B 8115-3 wird die optimale Nachhallzeit beschrieben [4]. Sie ist neben dem Volumen auch vom gewünschten Verwendungszweck abhängig (siehe Abbildung 2.2).

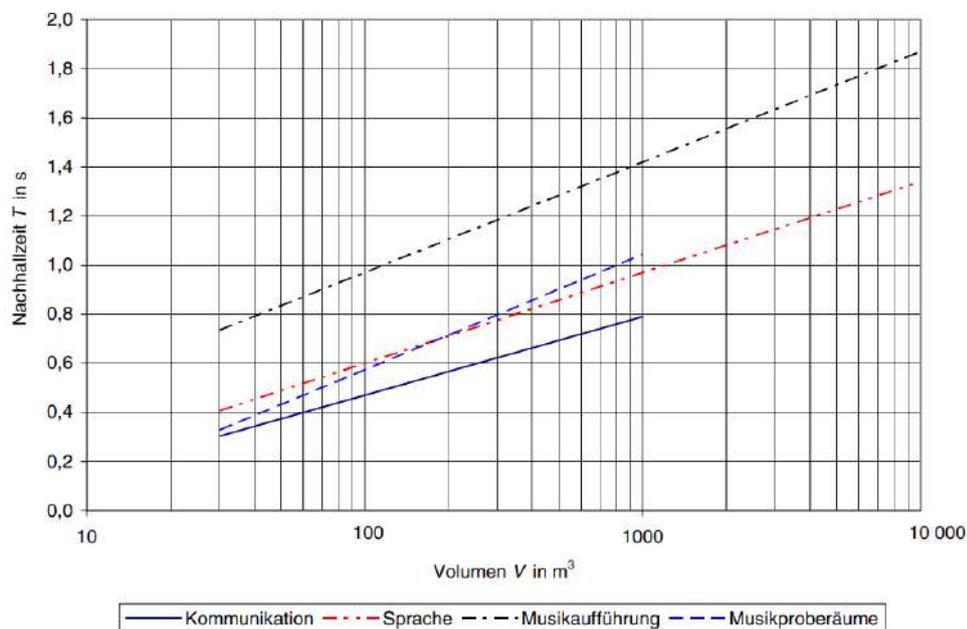


Abbildung 2.2: Optimale Nachhallzeit in Abhängigkeit von Raumvolumen und Verwendungszweck laut ÖNORM B 8115-3 [4]

Gleichung 2.16 beschreibt den Verwendungszweck Sprache [4].

$$T_{opt} = 0,37 \cdot \log\left(\frac{V}{m^3}\right) - 0,14 \quad (2.16)$$

T_{opt} ... Optimale Nachhallzeit in s .

V ... Raumvolumen in m^3 .

Diese Gleichung gilt laut Norm unter anderem für Hörsäle und Vortragsräume mit einem Volumen von $30m^3$ bis $10.000m^3$ [4].

Der zulässige Toleranzbereich wird frequenzabhängig in Abbildung 2.3 dargestellt.

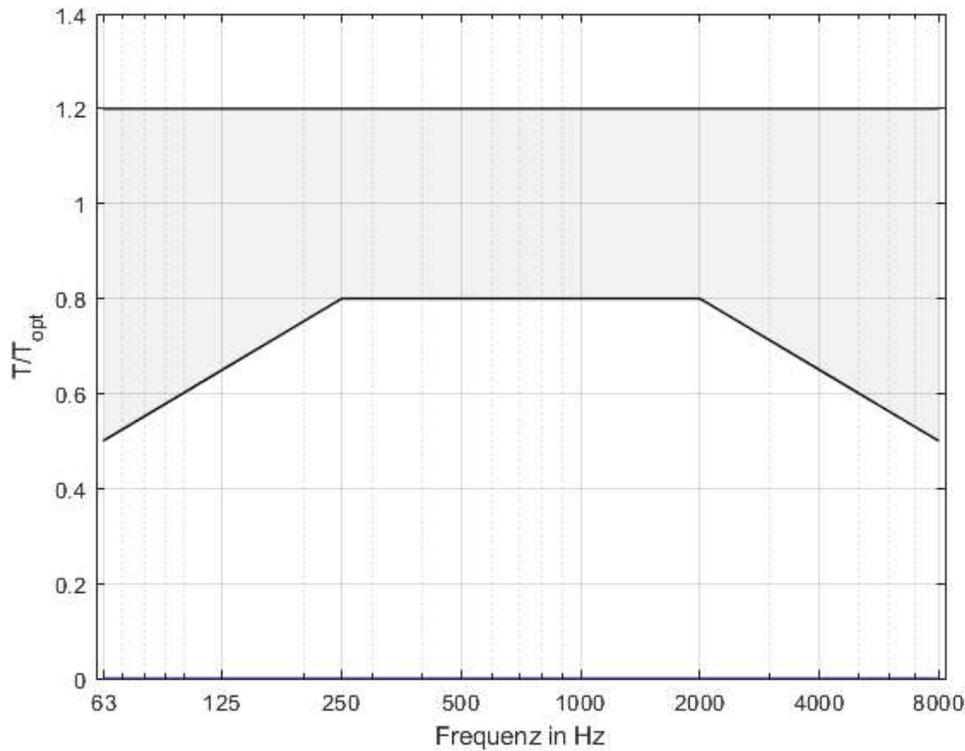


Abbildung 2.3: Zulässige Abweichungen von der optimalen Nachhallzeit für Hörsäle laut ÖNORM B 8115-3 [4]

2.3 Messmethoden

In diesem Kapitel werden die verwendeten Messmethoden erklärt. Um die Wertebereiche der Gütemaße einzuschränken, ist ein Vergleich von objektiven und subjektiven Messungen notwendig (siehe Abschnitt 2.1).

Es gibt bereits Einschränkungen für Gütemaße in vielen Literaturen und Normen, diese gelten allerdings meist nur für Klassenräume und Aufführungsräume. Durch den Vergleich soll geprüft werden, ob diese existierenden Einschränkungen für Hörsäle gültig sind.

2.3.1 Subjektive Evaluierung

Zur subjektiven Evaluierung der Hörsäle wird ein Sprachsignal über einen Studiomonitor abgespielt und von uns mit einem Evaluierungsbogen beurteilt. Verwendet wurde Charles Darwins „Das Feuerland“, gesprochen von Thomas Dehler. Ein schon bekannter Text wird auch bei unzureichender Akustik verstanden, deshalb wurde darauf geachtet, bei jeder Evaluierung eine andere Stelle des Hörbuchs zu verwenden.

Signalweg

Wie in Abbildung 2.4 zu erkennen, wird das Sprachsignal über eine Soundkarte auf einen Studiomonitor übertragen. Anschließend wird das vom Raum beeinflusste Sprachsignal von den Hörern wahrgenommen und bewertet.

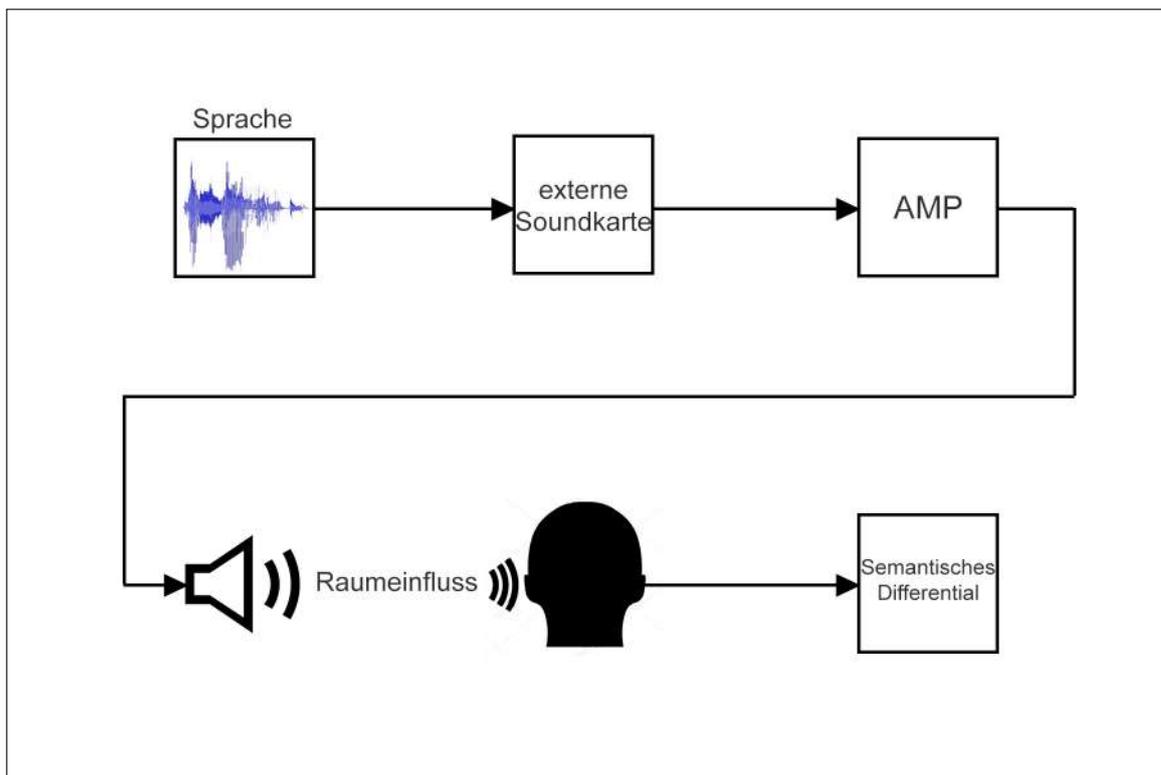


Abbildung 2.4: Signalweg der subjektiven Messung

Einpegeln

Laut einem Artikel von Wayne O. Olsen [14] liegen die Pegel für Sprache wie in Abbildung 2.5 dargestellt. In dieser Tabelle sind jeweils drei Werte eingetragen. Der erste ist der Pegel in $dB(A)$, der zweite in eckiger Klammer der ungewichtete Schalldruckpegel und der dritte in runden Klammern ist die Standardabweichung der Mittelung dieser Werte.

	Casual	Normal	Raised	Loud	Shouted
Females	50[54] (4)	55[58] (4)	63[65] (4)	71[72] (6)	82[82] (7)
Males	52[56] (4)	58[61] (4)	65[68] (5)	76[77] (6)	89[89] (7)
Children	53[56] (5)	58[61] (5)	65[67] (7)	74[75] (9)	82[82] (9)

Note. All values are rounded to the nearest dB. From Table I and Figures 16, 17, and 18 in Pearsons et al. (1977).

Abbildung 2.5: Sprachpegel laut Pearson, Bennett and Fidell (1977) Report in $dB(A)$ [14]

Olsen gab in seiner Zusammenfassung eine Tabelle (siehe Abbildung 2.5) für Männer und Frauen zwischen 13 und 60 Jahren sowie Kinder unter 13 Jahren und deren Sprachpegel an. Gemessen wurde in Klassenzimmern, Wohnungen in städtischer und vorstädtischer Umgebung, vier verschiedenen Spitälern sowie Bahnhöfen und Flughäfen [14].

Es gibt verschiedene Möglichkeiten einzupegeln. Man kann auf einen konstanten Pegel einpegeln, der bei allen Messungen gleich eingestellt wird, oder auf einen dynamischen, der vom Hintergrundgeräuschpegel abhängt. Im Fall des dynamischen Messpegels wird angenommen, dass ein Sprecher immer $15dB$ über dem Grundgeräuschpegel spricht. Bei der Annahme eines konstanten Messpegels wird davon ausgegangen, dass ein Vortragender in einem Hörsaal automatisch mit angehobener Stimmlautstärke spricht.

In dieser Arbeit wird ein konstanter Messpegel verwendet. Für angehobene Sprachlautstärke bei einer männlichen Stimme entspricht dieser laut Olsen $L_{S,A,1m} = 65dB(A)$ [14]. Dieser Pegel deckt sich annähernd mit dem in ÖNORM EN ISO 9921 genannten, erhobenen Sprachpegel von $L_{S,A,1m} = 66dB(A)$ [15]. Das Einpegeln ist in 1m Entfernung durchzuführen.

Semantisches Differential

Um die Eindrücke jedes Hörsaals vergleichbar festzuhalten, wurde ein Evaluierungsbogen entworfen. Wie in Abbildung 2.6 dargestellt, wurden so verschiedene Klangeigenschaften bewertet.

	3	2	1	0	1	2	3	
scharf								dumpf
hell								dunkel
verständlich								unverständlich
hallig								trocken
brummend								klirrend
direkt								einhängend
Stimme laut								leise
Hintergrund laut								leise

Abbildung 2.6: Vorlage des verwendeten Evaluierungsbogens

Evaluierung im HSi13

Wir haben uns dafür entschieden, den von uns am schlechtesten empfundenen Hörsaal genauer zu betrachten. Dafür wurde der Fragebogen in Abbildung 2.7 entworfen, um eine genauere Evaluierung von mehreren Personen zu ermöglichen. Dabei wurde von jedem Studenten die Sitzposition angekreuzt und je nach dem Empfinden die jeweilige Frage beantwortet.

**Evaluierung der Sprachverständlichkeit des HS i13, im Zuge der
Bachelorarbeit
„Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“**

Markieren Sie bitte Ihre Sitzposition mit einem [x]:

PLATZ

1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	1
2																							2
3																							3
4																							4
5																							5
6																							6
7																							7
8																							8
9																							9
10																							10
11																							11
12																							12
13																							13
14																							14
15	1	2	3	4	5	6	7	8	9		14	15	16	17	18	19	15						

Wie gut ist der Vortragende akustisch zu verstehen?
(Schulnoten 1-5):

1	2	3	4	5

Wie laut empfinden Sie den Hintergrund?
(1=leise; 5=laut):

1	2	3	4	5

Wie empfinden Sie den Nachhall?
(1=trocken; 5=hallig):

1	2	3	4	5

Fragebogen bitte beim Verlassen des Hörsaales abgeben.
Danke für Ihre Mithilfe!

Abbildung 2.7: Evaluierungsbogen des HSi13

2.3.2 Objektive Messung

Zur objektiven Bewertung der Hörsäle werden die in Abschnitt 2.1 genannten Gütemaße benötigt. Diese werden über die Übertragungsfunktion des Raums berechnet. Um die Raumimpulsantwort $h(t)$ zu erhalten, gibt es verschiedene Messverfahren. In diesem Kapitel werden die von uns gewählten Messverfahren vorgestellt und auf deren Eigenschaften eingegangen.

Signalweg

Der grundsätzliche Signalweg unseres Messaufbaus in jedem Hörsaal ist in Abbildung 2.8 zu sehen. Das Messsignal wird von der Messsoftware generiert und über eine externe Soundkarte dem Verstärker zugeführt. Anschließend wird das Signal über ein SpeakOn Kabel zur Schallquelle geleitet. Das vom Raum beeinflusste Signal wird von zwei Mikrofonen aufgenommen und gelangt über die Soundkarte in die Messsoftware zurück, wo die Auswertung des Ein- und Ausgangssignals zur Raumimpulsantwort stattfindet.

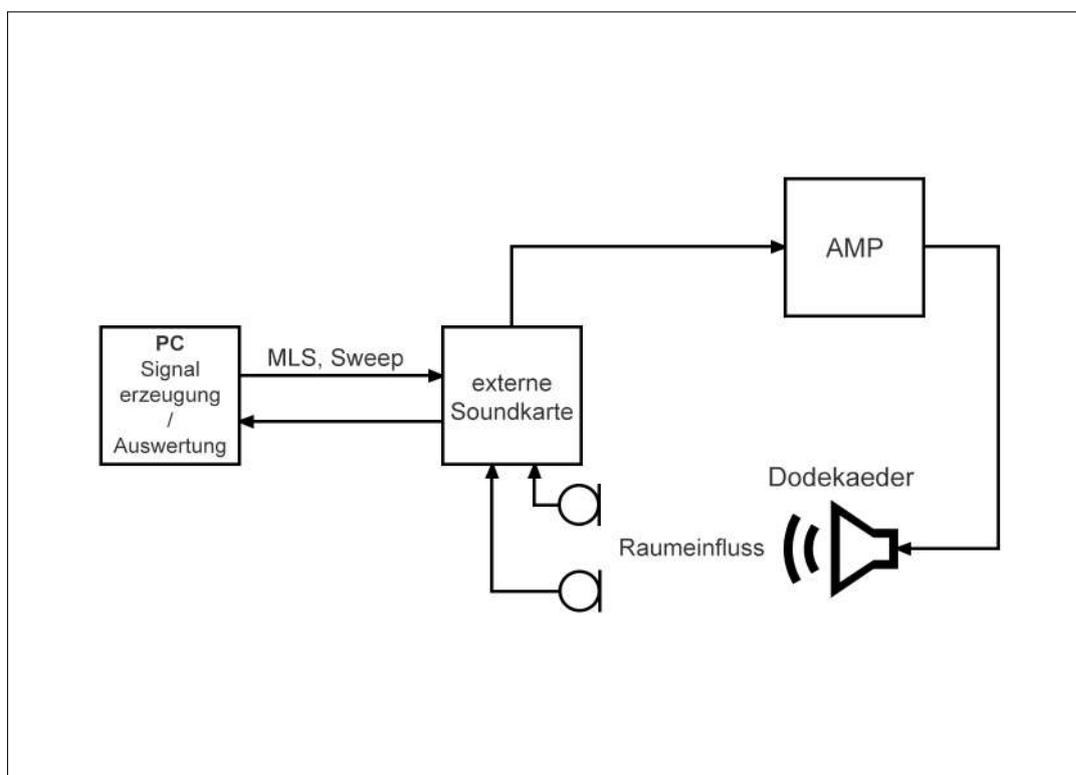


Abbildung 2.8: Signalweg der objektiven Messung

Schallquelle

Als Schallquelle wurde der Dodekaeder-Lautsprecher (Lautsprecher mit 12 Membranen) Nor276 von Norsonic verwendet, welcher die Anforderungen zur Messung der Nachhallzeit nach ÖNORM 3382-1 erfüllt [16][3]. Die 12 Membrane werden gebraucht, um die Abstrahlcharakteristik einer Kugelquelle zu imitieren. Dabei ist die Annahme der Kugelquelle nur bis zu einer Frequenz von 500Hz gültig, da, wie in Abbildung 2.9 zu sehen ist, nur bis zu dieser Frequenz ein Bündelungsmaß (Directivity Index) von $DI \approx 0\text{dB}$ gegeben ist.

Oberhalb von 500Hz nimmt eine einzelne Lautsprechermembran immer mehr die Abstrahlcharakteristik einer Keule an. Diese Eigenschaft muss bei der Berechnung des Artikulationsverlustes

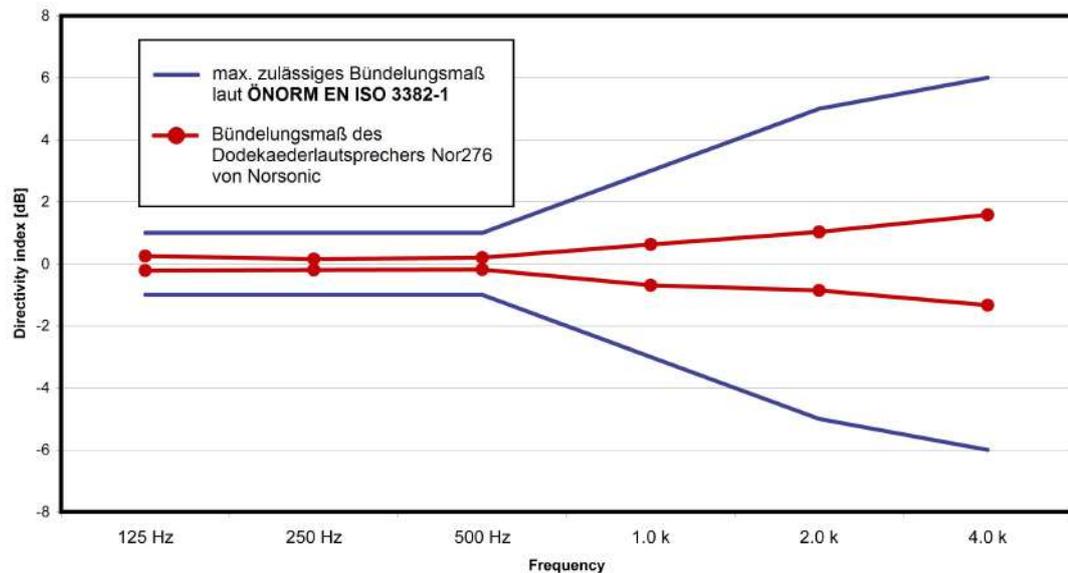


Abbildung 2.9: Frequenzabhängiges Bündelungsmaß des Norsonic Dodekaeder-Lautsprechers [16]

berücksichtigt werden. Dabei wird, wie in Gleichung 2.6 zu sehen, der Bündelungsgrad benötigt. Dieser kann mit Gleichung 2.17 aus dem Bündelungsmaß berechnet werden.

$$DI = 10 \log(\gamma) \quad (2.17)$$

DI... Directivity Index (Bündelungsmaß) in dB

γ ... Bündelungsgrad

Die von uns verwendeten, aus dem Bündelungsmaß berechneten Werte für den Bündelungsgrad sind in Tabelle 2.4 zu sehen.

f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
γ	1	1	1	1	1,2	1,3	1,5	1,7	2

Tabelle 2.4: Verwendete Werte des Bündelungsgrades

Auswahl der Messsignale

Raumakustische Systemidentifikationen können mit verschiedenen Messsignalen durchgeführt werden. Die gängigsten Methoden sind der lineare oder exponentielle Sweep, die Messung mittels impulsförmiger Anregung, wie etwa mit einer Schreckschusspistole, das Verfahren abgeschaltetes Rauschen oder die Messung mit Pseudozufallsfolgen, wie zum Beispiel der MLS (Maximum Length Sequence). Wir haben uns für die Messung mittels exponentiellem Sweep und MLS-Signal entschieden, da eine Kombination dieser beiden gut reproduzierbaren Signale eine solide Grundlage bietet, um aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten.

Die MLS-Methode zeichnet sich durch ihre Unempfindlichkeit gegenüber Rauschen und transienten Störgeräuschen aus. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass hohe SNR-Werte auch durch vergleichsweise geringe Pegel erreicht werden können, da eine Verdopplung der MLS-Länge des Signals einen theoretischen SNR-Gewinn von $3dB$ hervorruft. Dies erfordert pro Messung jedoch ein Vielfaches der Messdauer eines Sweeps. Nachteilig wirkt sich die Empfindlichkeit gegenüber nichtlinearen Verzerrungen aus [17][18].

Der exponentielle Sweep besteht aus einem Sinus, welcher die Frequenz mit der Zeit erhöht. Diese Methode zur Systemidentifikation ist unempfindlich gegenüber nichtlinearen Verzerrungen. Hohe SNR-Werte können bei kurzen Messzeiten erreicht werden, allerdings ist auf zeitvariante und transiente Störungen zu achten, da hier der exponentielle Sweep eine hohe Empfindlichkeit zeigt [19].

Auf den folgenden Seiten wird die Auswertung zur Impulsantwort der von uns verwendeten Messsignale beschrieben.

Raumimpulsantwort mittels MLS

Die *Kreuzkorrelation* eines Signals ist gegeben als:

$$r_{xy}[n] = (h * r_{xx})[n] \quad (2.18)$$

$r_{xx}[n]$... Autokorrelation
 $h[n]$... Übertragungsfunktion des Raumes
 $r_{xy}[n]$... Kreuzkorrelation

Die Indizes x und y stehen für das Ein- und Ausgangssignal eines Systems. Gleichung 2.18 besagt, dass die Kreuzkorrelation des Ein- und Ausgangssignals eines Systems gleich der Faltung der Übertragungsfunktion $h[n]$ mit der Autokorrelation des Eingangssignals ist. Weiters ist bekannt, dass die Autokorrelation eines völlig dekorrelierten Signals der Einheitsimpuls ist.

$$r_{xx}[n] = \delta[n] \quad (2.19)$$

$r_{xx}[n]$... Autokorrelation
 $\delta[n]$... Einheitsimpuls

Für dekorrelierte Signale gilt:

$$r_{xy}[n] = h[n] \quad (2.20)$$

$r_{xy}[n]$.. Kreuzkorrelation
 $h[n]$...Übertragungsfunktion

Es ist also möglich, mit einem deterministischen, dekorrelierten Signal über die Kreuzkorrelation auf die Impulsantwort zu schließen. Solche Signale sind Pseudo-Zufallsfolgen.

Eine dieser Folgen ist die *Maximum Length Sequence* (MLS). Ihre Autokorrelation bildet einen Einheitsimpuls mit einem kleinen Offset, wobei L die Länge des Signals und N die Ordnung der Folge darstellt.

$$L = 2^N - 1 \quad (2.21)$$

$$r_{xx}[n] = \delta[n] - \frac{1}{L+1} \quad (2.22)$$

Setzt man nun dies in Gleichung 2.18 ein, folgt

$$r_{xy}[n] = h[n] - \frac{1}{L+1} \sum_{n=0}^{N-1} h[n] = h[n] - \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{N-1} h[n] + \frac{1}{L(L+1)} \sum_{n=0}^{N-1} h[n]. \quad (2.23)$$

Sei nun \bar{h} der Mittelwert der Impulsantwort, so kann man Gleichung 2.23 zu Folgendem zusammenfassen:

$$r_{xy}[n] = h[n] - \bar{h} \left(1 - \frac{1}{L+1} \right) \quad (2.24)$$

Es gibt einige Methoden, auf die Kreuzkorrelation zu schließen. Eine der verbreitetsten ist die *Fast Hadamard Transformation*. So kann über Umformung der MLS-Matrix auf die Kreuzkorrelation geschlossen werden, wobei \mathbf{P}_1 und \mathbf{P}_2 Permutationsmatrizen und \mathbf{S}_1 und \mathbf{S}_2 Begrenzungsmatrizen sind. \mathbf{H}_{2^n} stellt die Hadarmardmatrix dar und \mathbf{Y} wie gewohnt die Ausgangsmatrix [20].

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{Y}} = \frac{1}{L+1} \mathbf{P}_2 (\mathbf{S}_2 [\mathbf{H}_{2^n} \{ \mathbf{S}_1 (\mathbf{P}_1 \mathbf{Y}) \}]) \quad (2.25)$$

Eine MLS-Periode muss länger sein als die erwartete Raumimpulsantwort, um die gesamte Impulsantwort aufzeichnen zu können.

Raumimpulsantwort mittels exponentiellem Sweep

Allgemein kann ein Sweep wie folgt angeschrieben werden:

$$x(t) = \sin(f(t)) \quad (2.26)$$

Der Vorteil eines exponentiellen Sweeps gegenüber eines linearen ist, dass das Argument $f(t)$ von einer Exponentialfunktion abhängt. Das bedeutet, jede Oktave nimmt gleich viel Zeit in Anspruch und tiefe Frequenzen sind energiereicher und regen so den Raum besser an.

Der exponentielle Sweep hat folgende Form:

$$x(t) = \sin \left(\omega_1 \cdot \tau \left(e^{t/\tau} - 1 \right) \right) \quad (2.27)$$

$$\tau = \frac{T}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \quad (2.28)$$

t ... Laufende Zeit in s

T ... Sweeplänge in s

τ ... Zeitkonstante in s

ω_1 ... Startfrequenz in rad

ω_2 ... Endfrequenz in rad

τ ist abhängig von der Startfrequenz ω_1 und der Endfrequenz ω_2 und bestimmt so die Dauer und den abgedeckten Frequenzbereich der Sweeps. Die Aufprägung der Raumeigenschaften kann als Faltung von Signal $x(t)$ und Raumimpulsantwort $h(t)$ im Zeitbereich oder einfacher als

Multiplikation im Frequenzbereich (Fouriertransformation) betrachtet werden.

$$\underline{Y}(\omega) = \underline{X}(\omega)\underline{H}(\omega) \quad (2.29)$$

$\underline{X}(\omega), \underline{H}(\omega)$... Fouriertransformierte von $x(t)$ und $h(t)$

Durch Umformen kann nun auf die komplexe Impulsantwort im Frequenzbereich geschlossen werden.

$$\underline{H}(\omega) = \underline{Y}(\omega)\underline{X}^{-1}(\omega) \quad (2.30)$$

Um den inversen exponentiellen Sweep $\underline{X}^{-1}(\omega)$ zu erhalten, kann folgender Zusammenhang verwendet werden,

$$\underline{X}^{-1}(\omega) = \mathcal{F}\{g(t)x(-t)\} \quad (2.31)$$

wobei $g(t)$ einen Abfall von $6dB/okt$ pro s darstellt. Nun kann durch Rücktransformation die Impulsantwort berechnet werden.

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1}\{\underline{H}(\omega)\} \quad (2.32)$$

Vergleich beider Methoden

Zur Veranschaulichung der beiden Methoden werden die Abklingkurven des HSi4 in Abbildung 2.10 und des HSi1 in Abbildung 2.11 dargestellt:

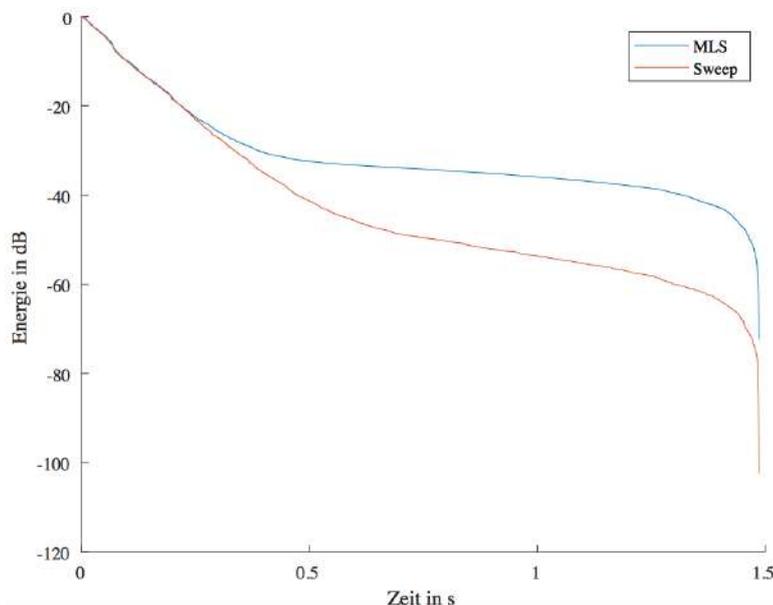


Abbildung 2.10: Vergleich der Abklingvorgänge von MLS und Sweep am Beispiel des HSi4

Laut einem Artikel von Guidorzi liegt der SNR des exponentiellen Sweeps, bei gleicher Länge, etwa $15dB$ über dem der MLS [18]. Auffällig war, dass manche Kurven des exponentiellen Sweeps teilweise sehr große Abweichungen von der MLS-Kurve aufwiesen. Dabei waren Unterschiede von bis zu $30dB$ erkennbar.

Der SNR lässt sich auf den Abbildungen insofern abschätzen, als dass die annähernd lineare

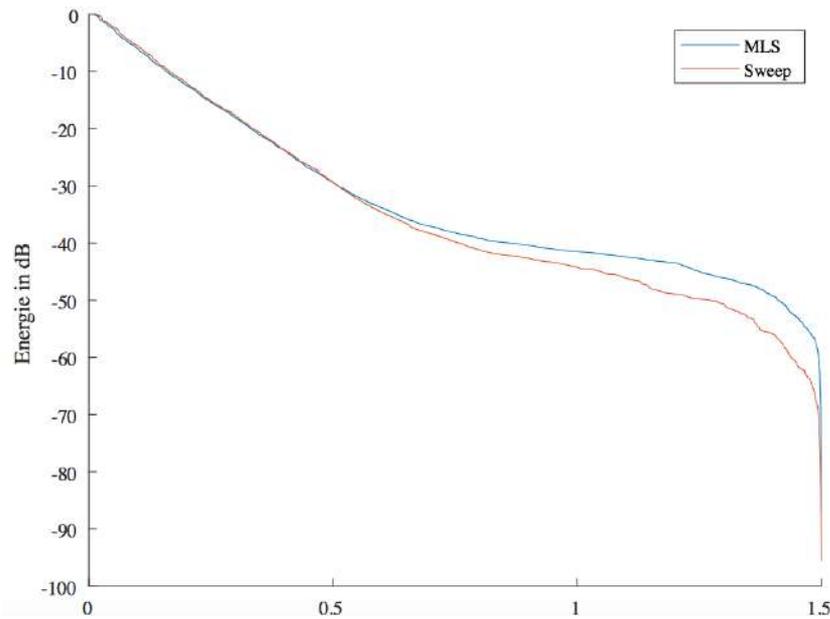


Abbildung 2.11: Vergleich der Abklingvorgänge von MLS und Sweep am Beispiel des HSi1

Abklingkurve im Bereich des Grundgeräuschpegels langsam abflacht.

Vergleicht man die Abklingkurven von HSi4 und HSi1 (siehe Abbildung 2.10 und 2.11), so erkennt man die Unterschiede des SNR. Die Messung des Hörsaals i4 wurde mit einer MLS 16. Ordnung durchgeführt, die des HSi1 mit 18. Ordnung. Die MLS-Folge 18. Ordnung ist viermal so lang wie die 16. Ordnung. Die Messung mittels Sweep wurde bei beiden Abklingkurven gleich durchgeführt (2 cycles zu je 9,42s). Dadurch erkennt man eine Verbesserung des SNR. Diese Verbesserung von ca. 15dB stimmt nicht mit der Theorie überein, da dort eine SNR-Verbesserung von 3dB pro Verdopplung beschrieben ist, was somit einer Gesamtsteigerung von 6dB bei Erhöhen der Ordnung von 16. auf 18. entspricht. Das ist darauf zurückzuführen, dass es sich bei diesem Vergleich um zwei verschiedene Hörsäle und somit unterschiedliche Messbedingungen handelt.

2.4 Einberechnung des Publikums

2.4.1 Berechnung der Nachhallzeit

Die Einberechnung des Publikums ist für uns von Interesse, da alle in dieser Arbeit beschriebenen Messungen im unbesetzten Zustand stattgefunden haben. Da Messungen bei voll besetzten Hörsälen den Rahmen der Arbeit sprengen würden, wurde die Berechnung der Nachhallzeit mithilfe der Nachhallzeitformel nach Sabine realisiert (siehe Gleichung 2.1) [1].

Aus der Umkehrung dieser Formel ist die äquivalente Absorptionsfläche des leeren Raumes berechenbar, welche für die spätere Ermittlung der Nachhallzeit im besetzten Raum notwendig ist. Da sich bei Besetzung des Hörsaals durch Personen die äquivalente Absorptionsfläche erhöht (angenommen, dass der Schallabsorptionsgrad $\alpha_{\text{Publikum}} > \alpha_{\text{Bestuhlung}}$), muss diese zur gesamten äquivalenten Absorptionsfläche addiert werden. Weil die äquivalente Absorptionsfläche der Bestuhlung $A_{\text{Bestuhlung}}$ bei einem voll besetztem Raum nicht mehr wirksam ist, muss die Differenz von äquivalenter Absorptionsfläche des Publikums A_{Publikum} und Bestuhlung $A_{\text{Bestuhlung}}$, zu A_{ges} addiert werden.

Abhängig von der verwendeten Quelle ist in der Literatur entweder der Schallabsorptionsgrad α oder die äquivalente Absorptionsfläche A gegeben. Bei unseren Berechnungen bezogen wir die Absorptionswerte aus den Unterlagen der Raumakustik-Laborübung (siehe Anhang A) und hatten somit die folgenden Werte der äquivalenten Absorptionsflächen vorliegen (siehe Tabelle 2.5 und 2.6). Sollte in der Literatur der Schallabsorptionsgrad gegeben sein, kann man die äquivalente Absorptionsfläche mithilfe Gleichung 2.33 berechnen.

$$A = \alpha \cdot S \tag{2.33}$$

- A... Äquivalente Schallabsorbtiionsfläche in m^2
- α ... Schallabsorbtiionsgrad
- S... Fläche m^2

Mit Gleichung 2.34 kann für eine beliebige Anzahl von Personen k die Nachhallzeit berechnet werden.

$$T = 0,161 \left[\frac{s}{m} \right] \cdot \frac{V}{A_{ges} + k \cdot (A_{Publikum} - A_{Bestuhlung})} \tag{2.34}$$

- V... Raumvolumen in m^3
- k... Anzahl der besetzten Sitzplätze
- A_{ges} ... Gesamte äquivalente Absorptionsfläche im unbesetzten Zustand
- $A_{Publikum}$... Äquivalente Absorptionsfläche des Publikums
- $A_{Bestuhlung}$... Äquivalente Absorptionsfläche der Bestuhlung

	Schallabsorbtiionsfläche A in m^2					
Frequenzband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Klappstuhl, Sitz und Rücken aus Sperrholz	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03

Tabelle 2.5: Äquivalente Schallabsorbtiionsflächen für Bestuhlung aus Sperrholz

Die Absorptionseigenschaften bei Personen sind unter anderem abhängig von Körperhaltung und Kleidung. Da alle Hörsäle beheizt sind, wurde angenommen, dass keine dicke Kleidung getragen wird, was den Absorptionsgrad einer Person erhöhen würde. Weiters wurde angenommen, dass die Personen sitzen. Daher wurde als allgemein gültiger Wert die äquivalenten Absorptionsfläche von männlichen Personen im Anzug und jene von weiblichen Personen im Sommerkleid arithmetisch gemittelt (siehe Tabelle 2.6).

	Schallabsorbtiionsfläche A in m^2					
Frequenzband in Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Männliche Person im Anzug	0,15	0,23	0,56	0,78	0,88	0,89
Weibliche Person im Sommerkleid	0,05	0,10	0,17	0,37	0,47	0,58
Mittelwert	0,10	0,16	0,36	0,57	0,67	0,73

Tabelle 2.6: Äquivalente Schallabsorbtiionsflächen für Publikum (Sitzend)

In Abbildung 2.12 ist am Beispiel von HSi11 neben dem Toleranzband der optimalen Nachhallzeit und der EDT die Nachhallzeit T_{20} zu sehen. Dabei sind auf der Abszisse die Oktavbänder von $63Hz - 8000Hz$ abgebildet, wobei die Einberechnung des Publikums nur zwischen $125Hz - 4000Hz$ gemacht werden kann, da wie in Anhang A ersichtlich, die äquivalente Absorptionsfläche von Personen nur in diesem Bereich angegeben ist. Auf der Ordinate ist die Nachhallzeit

in s abgebildet. Wie in der vorhin genannten Grafik ersichtlich, sinkt wegen des hohen Absorptionsgrades von Personen im Vergleich zu Holzstühlen die Nachhallzeit mit steigender Besetzung des Hörsaals.

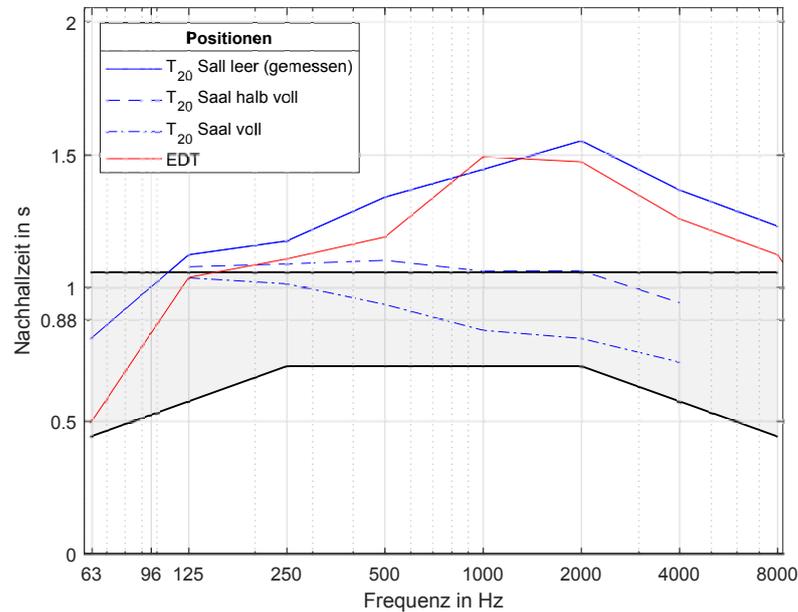


Abbildung 2.12: T_{20} in verschiedenen Besetzungszuständen, EDT und Toleranzband der Nachhallzeit des HSi11

2.4.2 Berechnung der notwendigen äquivalenten Absorptionsfläche

Die eingebauten absorbierenden Elemente sind in manchen Hörsälen nicht ausreichend, was durch zusätzliche Absorber kompensiert werden kann. Die zusätzlich benötigte äquivalente Absorptionsfläche kann wiederum mithilfe von Gleichung 2.1 berechnet werden.

Wie in Gleichung 2.35 beschrieben, soll die Summe der aktuellen äquivalenten Absorptionsfläche und jener des Absorbers gleich der optimalen äquivalenten Absorptionsfläche sein, welche aus Gleichung 2.16 abgeleitet werden kann.

$$A_{ist} + A_{abs} = A_{soll} \quad (2.35)$$

A_{ist} ... Durchschnittliche äquivalente Absorptionsfläche des Raumes in m^2

A_{abs} ... Äquivalente Absorptionsfläche des Absorbers in m^2

A_{soll} ... Optimale äquivalente Absorptionsfläche in m^2

Durch Umformung und Anwendung von Formel 2.1 erhält man Gleichung 2.36.

$$A_{abs} = 0,161 \cdot V \cdot \frac{T_{ist} - T_{soll}}{T_{ist} \cdot T_{soll}} \quad (2.36)$$

T_{ist} ... Nachhallzeit des Raumes

T_{soll} ... Gewünschte Nachhallzeit des Raumes

Damit ist es möglich, die zusätzlich erforderliche äquivalente Absorptionsfläche zu berechnen. Es ist sinnvoll, diese Berechnung in jedem Frequenzband zu erstellen, da der Absorptionsgrad eines Schallabsorbers frequenzabhängig ist. Die zusätzlich erforderliche äquivalente Absorptionsfläche in m^2 (Ordinate) in Abhängigkeit der Frequenz in Hz (Abszisse) und des Besetzungszustandes (Farbe) ist in Abbildung 2.13 am Beispiel von HSi11 zu sehen. Da in diesem Hörsal Materialien verbaut sind, welche für tiefe Frequenzen gut absorbieren, ist im Frequenzband von $63Hz$ keine zusätzliche äquivalente Absorptionsfläche erforderlich.

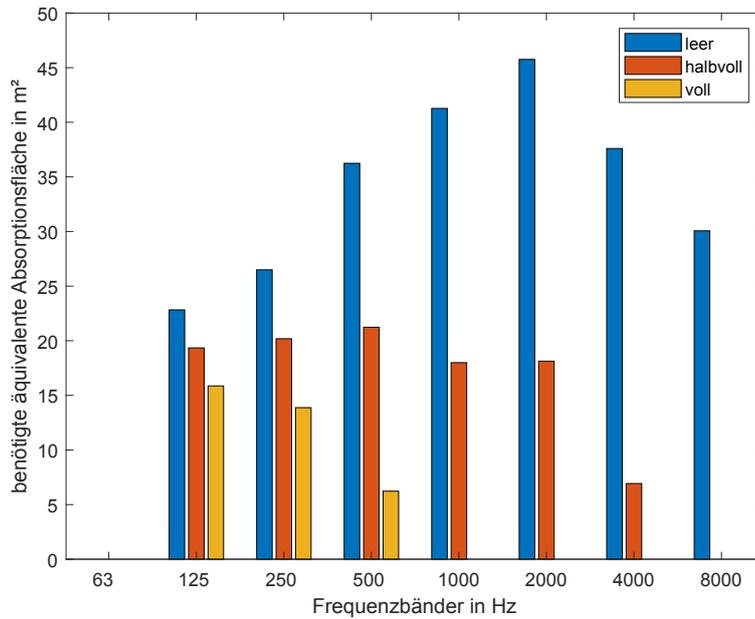


Abbildung 2.13: Zusätzlich notwendige äquivalente Absorptionsfläche im HSi11

3

Messungen und Auswertung

3.1 Messungen

In diesem Kapitel werden alle Schritte für die Messung eines Hörsaales erklärt.

Essentiell für eine erfolgreiche Messung ist eine penible Strukturierung des Messablaufes, um keine relevanten Aspekte auszulassen. Gemessen wurde stets an den Wochenenden. Dies hatte vor allem logistische Gründe, da an den Wochenenden die Hörsäle selten belegt waren. Außerdem wurden am Wochenende Störungen von außen durch den Universitätsbetrieb minimiert.

Die enthaltenen Seiten beschreiben in Unterabschnitt 3.1.1 einen Messablaufplan, in welchem der Vorgang einer raumakustischen Messung übersichtlich erläutert wird.

Anschließend wird in Unterabschnitt 3.1.2 am Beispiel des Hörsaals i13 auf die objektive Messung und die subjektive Evaluierung eingegangen.

3.1.1 Messablaufplan

- Vor dem Start der Messung sollte man sich über den gewünschten Raum informieren.
 - Verfügbarkeit
 - Zugang ins Gebäude und zum gewünschten Raum
- Checkliste: Kontrolle, ob alle für die Messung notwendigen Gegenstände mitgenommen werden (siehe Anhang D).
- Die Raummaße mit dem im Kleinteilekoffer dafür vorgesehenen Entfernungsmesser abmessen und dadurch das Raumvolumen bestimmen. Die berechneten Werte sollen dann in das Messprotokoll eingetragen werden (siehe Anhang D).
- Aufbau der Messausrüstung
- Erste Testmessung durchführen. Mithilfe deren Auswertung soll die mittlere Nachhallzeit eingeschätzt und der SNR kontrolliert werden. Durch die Nachhallzeit kann man die Schröderfrequenz sowie die Abstände zwischen Quelle und Mikrofonen berechnen (siehe Gleichung 3.1). Bei der Kontrolle des SNR soll darauf geachtet werden, dass dieser hoch genug ist, um die gewünschte Nachhallzeit zu berechnen.
- Überlegung der Sender- und Empfängerpositionen. Dafür sollen auf einem Grundrissplan des Raumes die Mikrofonpositionen eingezeichnet werden, sodass sie gut im Raum verteilt sind und die erforderlichen Mindestabstände eingehalten werden. Die Schallquellen sollen dort platziert werden, wo sich der Sender auch beim Normalbetrieb befindet. Die erforderlichen Abstände berechnet man wie folgt:

- o Mindestabstand Mikrofon - Lautsprecher:

$$a = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}} \quad (3.1)$$

V... Berechnetes Volumen des Hörsaals [m^3]

c... Schallgeschwindigkeit ($\approx 340 \frac{m}{s}$)

T... Geschätzte gemittelte Nachhallzeit aus Testmessung im Frequenzbereich $125Hz$ - $4kHz$

a... Abstand zwischen Mikrofon und Lautsprecher

- o Abstand Mikrofon - Wand: $\lambda / 4 \hat{=} 1m$
- o Abstand Lautsprecher - Wand: $\lambda / 2 \hat{=} 2m$
- Den Hintergrundgeräuschpegel mit dem Schallpegelmessgerät messen ("XL2 Audio and Acoustic Analyzer" von NTi Audio). Damit wird der äquivalente Dauerschallpegel L_{Aeq} über 10 Sekunden gemessen. Die Messung soll an 3 Positionen durchgeführt werden und zur Vermeidung von Körperschall soll ein Stativ verwendet werden. Zuvor ist es notwendig, das Mikrofon zu kalibrieren.
- Messeinstellung bei WinMLS vor Beginn der Messung:
 - o Einstellung der Quelle:
Input: Soundkarte (Mikrofoneingang), Output: Soundkarte (Ausgang)
 - o Programmauswahl:
Bei WinMLS kann zwischen 1- und 2-Kanal-Messungen gewählt werden. Für 2-Kanal-Messungen wählt man „Impulse/Frequency Response Advanced“ (siehe Abbildung 3.1).

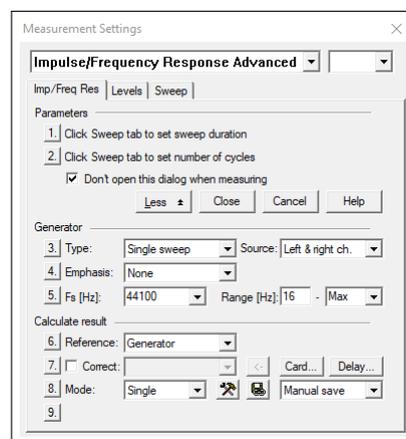


Abbildung 3.1: Einstellung des Messprogrammes bei WinMLS

- o Kalibrierung
 - Mikrofon in den Kalibrator stecken
 - Kanal wählen
 - Im Fenster „Input Level Calibration for Channel X“ den Button „Calibrate“ betätigen
 - Kalibrierwerte des Kalibrators eingeben (siehe Abbildung 3.2)

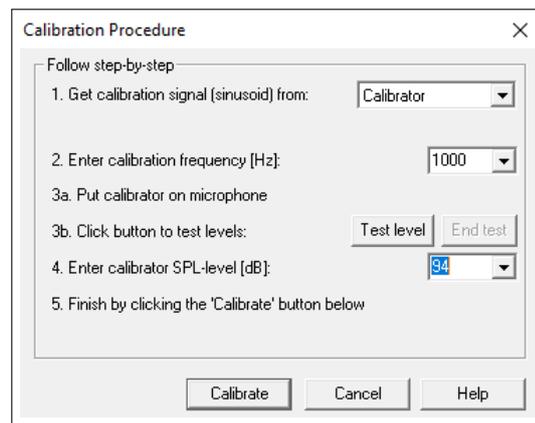


Abbildung 3.2: Einstellungen für die Kalibrierung bei WinMLS

- Denselben Vorgang für den zweiten Kanal wiederholen, falls dieser verwendet wird.
- Eigentliche Messung:
 - a) Einstellungen in WinMLS
 - Signaltyp wählen (siehe Abbildung 3.3)
 - Samplingfrequenz im Programm auf die der Soundkarte einstellen

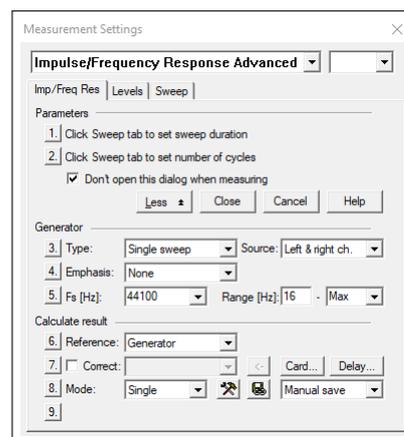


Abbildung 3.3: Wahl der Messmethode bei WinMLS

- a) Messung mit MLS (Maximum length sequence)(siehe Abbildung 3.4)
 - Die Länge der MLS kann wie in Gleichung 3.2 berechnet werden. Beachten sollte man, dass die Impulsantwort innerhalb einer Periode Platz finden muss. Der SNR kann mit Verlängerung des MLS-Signals verbessert werden. Eine Verdopplung der Länge entspricht einer Verbesserung des SNR um $3dB$.

$$l = 2^N - 1 \quad (3.2)$$

l... Länge der MLS in Samples

N... Ordnung der MLS

Für kleine Räume wird üblicherweise eine MLS 16. Ordnung verwendet, wodurch man mit einer Samplingfrequenz von $44,1\text{kHz}$ eine Periodenlänge von $1,48\text{s}$ erhält (siehe Gleichung 3.3), was für kleine Räume in der Regel ausreichend ist.

$$T = \frac{l}{Fs} = \frac{2^N - 1}{Fs} = \frac{2^{16} - 1}{44100\text{Hz}} = 1,48\text{s} \quad (3.3)$$

T... Periodendauer der MLS in s

Fs...Samplingfrequenz in Hz

Mit einer MLS 17. Ordnung erhält man eine Periodenlänge von $2,97\text{s}$. Mit der Länge der Periodendauer erhöht sich natürlich auch die Messdauer, wenn die Anzahl der Zyklen erhalten bleiben soll, um den Einfluss der Zeitvarianz zu minimieren. Die Ordnung muss so gewählt werden, dass die Impulsantwort kürzer als die MLS-Länge ist, und soll so lang gewählt werden, dass der SNR ausreicht.

- Lautstärke des Systems einstellen: Dabei soll diese so laut wie möglich sein, um eine hohe Differenz zwischen Signal- und Hintergrundpegel zu erhalten (Hoher SNR), ohne zu übersteuern.
- Precycles (Vorzyklen) werden eingestellt, um den Raum anzuregen, ohne eine Messung aufzuzeichnen. So kann eine Messung des Abklingverhaltens durchgeführt werden, ohne das Anklingverhalten miteinzubeziehen.
- 16 - 64 Cycles (Zyklen) verwenden (je nach gewünschter Messdauer). Je mehr Zyklen verwendet werden, desto weniger Einfluss spielt die Zeitvarianz.

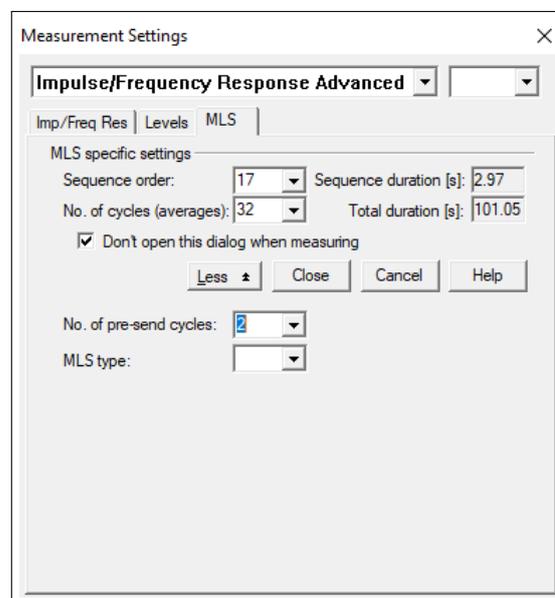


Abbildung 3.4: Einstellung der Werte bei Messung mit MLS

b) Messung mit Sweep (siehe Abbildung 3.5)

- Sweeppdauer ca. 10s (Wegen hoher Belastung der Membran des Lautsprechers sollte die Dauer des Sweeps nicht länger sein.)
- 2-5 Measurement cycles (Messzyklen)
- Limitierung der Raumimpulsantwort auf $1,5\text{s}$ aufheben (Durch Entfernen des Häkchens auf der Einstellungsseite)

Bei der Messung soll im Prüfbericht die Tabelle der Abstände zwischen Schallquelle und der Mikrofone ausgefüllt werden. Weiters dient dieses Dokument als Checkliste, um die Übersicht über den Messfortschritt zu behalten (siehe Anhang D).

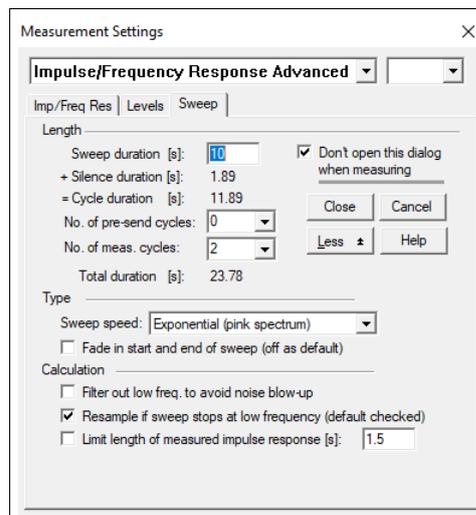


Abbildung 3.5: Einstellung der Werte bei Messung mit Sweep

- b Während der Messung sollten sich so wenig Personen wie möglich im zu messenden Raum aufhalten. Die Mikrofone sollen auf den vorab festgelegten Positionen aufgestellt werden. Durch Betätigen des grünen „Go“ Buttons wird die Messung gestartet. An jeder Mikrofonposition sollte man die genaue Entfernung zwischen Mikrofon- und Empfängerposition ausmessen und im Protokoll notieren. Bei „Ausreißern“ oder unrealistischen Werten ist es empfehlenswert, die Messung zu wiederholen.
- Vor Verlassen des Messraumes soll eine zweite Checkliste ausgefüllt werden, sodass sichergestellt werden kann, die vollständige Messausrüstung wieder zurückzubringen.

3.1.2 Messung

Im folgenden Abschnitt wird die praktische Durchführung eines Messablaufes am Beispiel von Hörsaal i13 beschrieben. Variationen des Messablaufs kamen bei kleinen Hörsälen vor, wo aus Platzgründen nur eine Quellposition verwendet wurde.

Mithilfe der Raummaße konnte ein Raumvolumen von $1533m^3$ ermittelt werden. Bei der Auswertung der Testmessung wurde eine mittlere Nachhallzeit von $1,8s$ ermittelt. Damit können die Schröderfrequenz sowie die minimalen Abstände zwischen den Quell- und Mikrofonpositionen berechnet werden. Bei der Messung im Hsi13 wurden Mikrofone und der Lautsprecher wie in Abbildung 3.7 positioniert.

Berechnung der Quell- und Mikrofonpositionen:

- Abstand Mikrofon - Lautsprecher:

$$a = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1533 \text{m}^3}{340 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,8 \text{s}}} = 3,17 \text{m} \quad (3.4)$$

a ... Mindestabstand zwischen Mikrofon und Lautsprecher in m

V ... Raumvolumen in m^3

c ... Schallgeschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

T ... mittlere Nachhallzeit der Testmessung in s

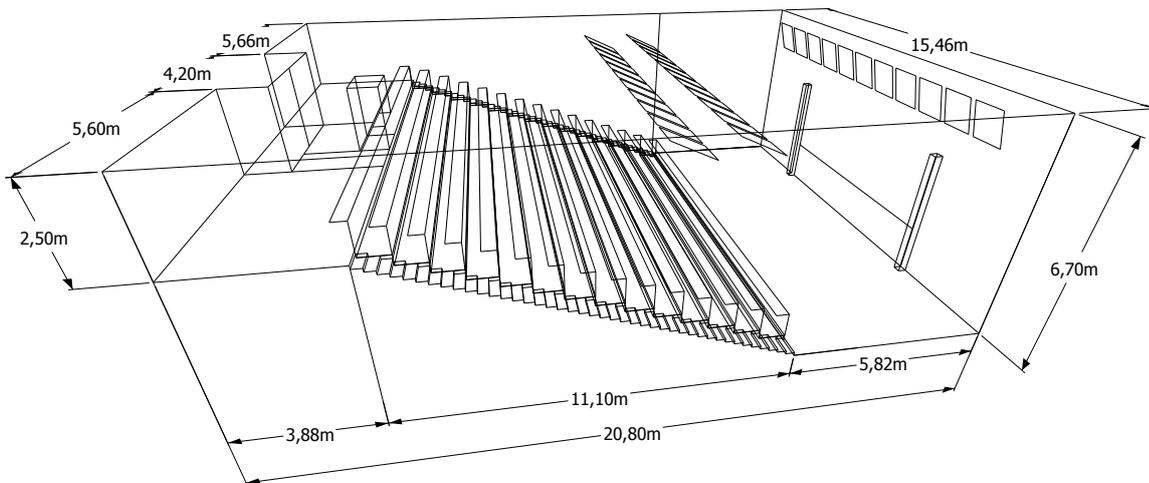


Abbildung 3.6: 3D-Modell des Hsi13 mit Bemaßung

- Abstand Mikrofon - Wand: $\frac{\lambda}{4} \hat{=} 1 \text{m}$
- Abstand Lautsprecher - Wand: $\frac{\lambda}{2} \hat{=} 2 \text{m}$

Berechnung der optimalen Nachhallzeit für Sprache:

$$T_{opt} = (0,37 \cdot \lg \frac{V}{\text{m}^3} - 0,14)[\text{s}] = (0,37 \cdot \lg \frac{1533 \text{m}^3}{\text{m}^3} - 0,14)[\text{s}] = 1,03 \text{s} \quad (3.5)$$

Berechnung der Schröderfrequenz:

$$f_{Schröder} = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} = 2000 \cdot \sqrt{\frac{1,8 \text{s}}{1533 \text{m}^3}} = 69 \text{Hz} \quad (3.6)$$

Der Dauerschallpegel L_{Aeq} wurde mit einer Messdauer von 10s an drei Stellen im Hörsaal gemessen. Für unsere Messungen verwendeten wir den „XL2 Audio and Acoustic Analyzer“ von NTi Audio. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.1 ersichtliche.

Der Grundgeräuschpegel beim unbesetzten Raum ist größtenteils von der Schallabstrahlung des Beamers abhängig. Deshalb wurde auch in der Mitte des Hörsaals, unmittelbar unterhalb des Beamers der lauteste Grundgeräuschpegel gemessen.

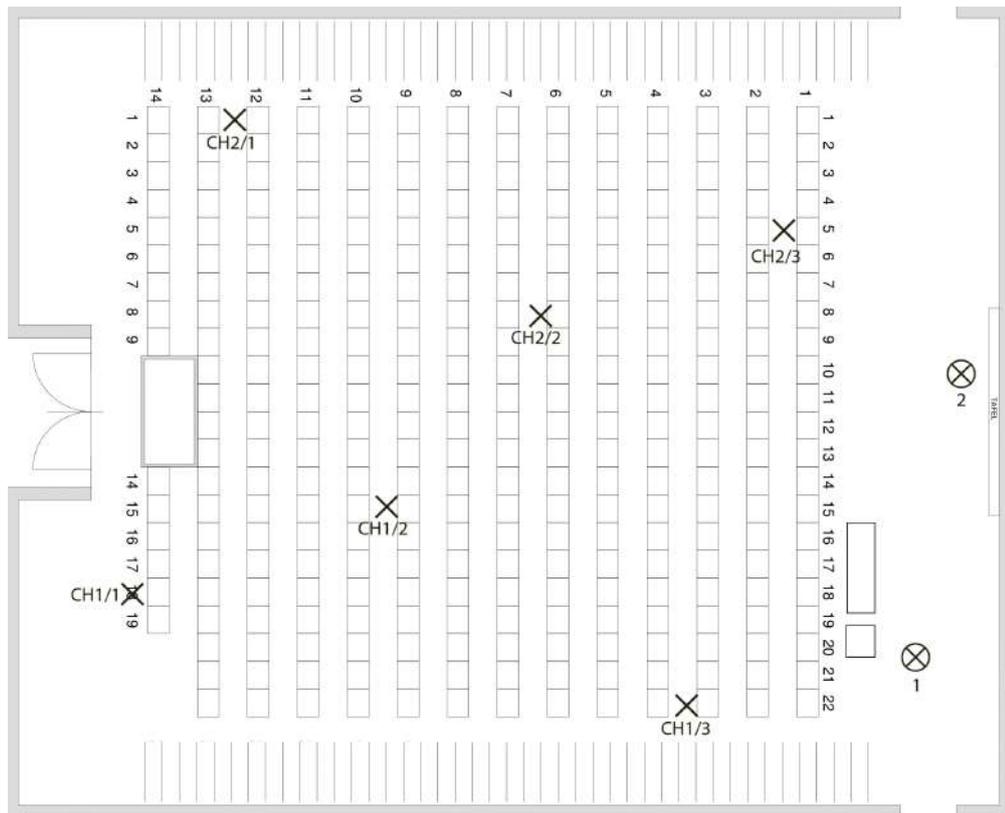


Abbildung 3.7: Grundriss des HSi13 mit Quell- und Messpositionen

Position	Dauerschallpegel in $dB(A)$
Vorne	$L_{Aeq1} = 35,1$
Mitte	$L_{Aeq2} = 37,4$
Hinten	$L_{Aeq3} = 33,0$

Tabelle 3.1: Messwerte des A-bewerteten Dauerschallpegels L_{Aeq}

Für die subjektive Messung wurde der Studiomonitor eingepgelt (siehe Unterabschnitt 2.3.1) und das semantische Differential ausgefüllt. Bei einer Mittelung dieser Evaluierungsbögen erhält man folgendes Ergebnis (siehe Abbildung 3.8):

Für die Berechnung des Artikulationsverlustes ist der Abstand zwischen Schallquelle und Mikrofon erforderlich. Dieser wurde deshalb bei jeder Messposition festgehalten und im Messprotokoll notiert. Um zusätzlich die Übersicht zu behalten, wurde die Tabelle auch als Checkliste verwendet. Außerdem wurden in der Tabelle auch die Einstellung am Verstärker und die Messmethode notiert. Das Messprotokoll befindet sich im Anhang B.

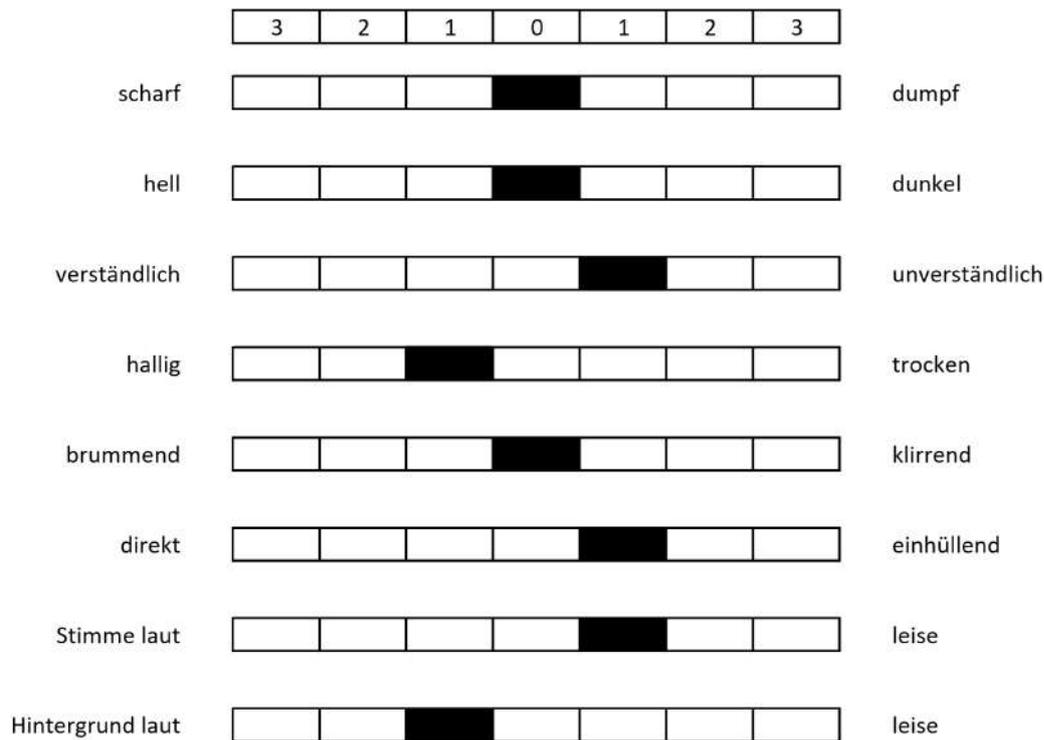


Abbildung 3.8: Gemittelttes semantisches Differential von HSi13

3.2 Auswertung

In diesem Kapitel wird erläutert, wie die Messergebnisse dargestellt und ausgewertet wurden. In Unterabschnitt 3.2.1 soll vorab erklärt werden, wie die Sollbereiche definiert wurden, die in den Plots zu sehen sind. Anschließend wird in Unterabschnitt 3.2.2 die Vorgehensweise während der Auswertung in MATLAB gezeigt. In Unterabschnitt 3.2.3 werden die dargestellten Gütemaße anhand des HSi13 diskutiert.

3.2.1 Vergleich der Messwerte mittels Netzdiagramm

Wie in Abschnitt 2.1 bereits erklärt wurde, sollen die objektiven und subjektiven Ergebnisse verglichen werden, um die Gültigkeit der Sollwertebereiche der Gütemaße bei Hörsälen zu überprüfen. Um die Werte zu vergleichen wurde ein Netzdiagramm entworfen. In ihm werden pro Achse ein Gütemaß und das Ergebnis der dazu passenden subjektiven Evaluierung dargestellt. Dazu muss eine Skalierung der subjektiven Werte vorgenommen werden, da diese immer zwischen -3 und 3 liegen, die Wertebereiche der Gütemaße aber stark variieren. Zusätzlich sollten sich die Optimalwerte der objektiven und subjektiven Ergebnisse überdecken, um den Vergleich der Ergebnisse zu vereinfachen. Es soll nun geklärt werden, ob ein subjektiv angenehmer Hörsaal innerhalb der in Abschnitt 2.1 genannten Sollbereiche der Gütemaße liegt und ein schlecht verständlicher außerhalb. Dazu wurde eine Rangliste der Hörsäle aus den Evaluierungsergebnissen erstellt (siehe Tabelle 3.2).

Zum Reihens der Hörsäle wird der jeweilige gemittelte Evaluierungsbogen eines Hörsaals mit den optimalen Werten verglichen. Die Abweichungen werden zu einer Gesamtabweichung summiert, woraus sich die Reihenfolge in der Rangliste ergibt. Eine geringere Abweichung von den Optimalwerten bedeutet eine bessere Platzierung.

Nach dem Vergleich stellte sich heraus, dass einige der Sollbereiche abgeändert werden sollten. Welche das sind und warum sie geändert wurden, wird in den folgenden Unterpunkten geklärt.

Die Nachhallzeiten T_N , EDT und der Artikulationsverlust Al_{cons} werden nicht genannt, da bei ihnen die in Abschnitt 2.1 erklärten Sollbereiche ihre Gültigkeit erwiesen. Für den Anlagengeräuschpegel wurde die in Unterabschnitt 2.2.4 genannte Schranke der OIB Richtlinie 5 gewählt [12].

Platzierung	Hörsaal
1	HSi2
1	HSi6
2	HSi3
3	HSi10
4	HSi5
4	HSi4
5	HSi1
5	HSi14
6	HSi15
7	HSi8
7	FSi2
8	HSi7
9	FSi1
10	HSi9
11	HSi12
12	HSi11
13	HSi13

Tabelle 3.2: Subjektive Rangliste der Hörsäle

Deutlichkeitsgrad: Der Sollbereich des Deutlichkeitsgrads hat sich im Laufe der Zeit stark verändert, wie in Unterabschnitt 2.1.2 gezeigt. Es ist zu beachten, dass diese Wertebereiche oft nicht explizit für Sprache gelten. Nach einem Vergleich der Messdaten mit den Evaluierungsergebnissen ergab sich als sinnvolle Schranke ein Wert von 50%, welche mit der von Schmidt und Reichardt übereinstimmt. Der Deutlichkeitsgrad soll also laut unseren Messungen für Hörsäle wie folgt liegen.

$$D_{50} \geq 50\%$$

Schwerpunktszeit: Bei der Schwerpunktszeit wurden in Unterabschnitt 2.1.3 zwei verschiedene Sollbereiche genannt. Die Berechnung des Optimalwerts nach Kürer [8] erwies sich für Hörsäle nach dem Vergleich als bessere Lösung, wenn als Nachhallzeit T die optimale Nachhallzeit T_{opt} nach ÖNORM EN ISO 8115-3 [4] verwendet wurde. Da hier allerdings kein Bereich, sondern ein Wert genannt wird, kombinierten wir beide Angaben. Wenn bei der Berechnung nach Kürer ein Wert von $t_{s,opt} = 70ms$ resultiert, sollen die Grenzen von Ahnert und Tennhard eingehalten werden ($60ms \leq t_{s,opt} \leq 80ms$). Somit darf die Schwerpunktszeit $\pm 14,3\%$ von der optimalen $t_{s,opt}$ abweichen.

$$\frac{6}{7} \cdot t_{s,opt} \leq t_s \leq \frac{8}{7} \cdot t_{s,opt} \quad \text{wobei} \quad t_{s,opt} = \frac{T_{opt}}{13,8}$$

In Abbildung 3.9 ist ein Netzdiagramm mit allen beschriebenen Eigenschaften zu sehen. Die grüne Fläche bildet den Sollbereich für objektive Ergebnisse. Die rote Fläche ist der frequenzabhängige Wert des jeweiligen Gütemaßes. Die blaue, strichlierte Linie stellt die gemittelten Werte der subjektiven Evaluierung dar. Die Sollwerte der Evaluierung decken sich mit den Optimalwerten der objektiven Messung.

Das in Abbildung 3.9 dargestellte Netzdiagramm des HSi4 gilt als Beispiel eines sowohl subjektiv als auch objektiv verständlichen Hörsaals. Es ist zu erkennen, dass nur der objektive und der subjektive Wert der Anlagegeräuschpegels $L_{Aeq,nT}$ die Grenzen des Sollbereich nicht einhalten. Alle anderen Werte der Gütemaße und Evaluierungen sind innerhalb des Sollbereichs beziehungsweise nahe dem Optimalwert.

Vergleicht man diesen Hörsaal mit dem in Abbildung 3.10 abgebildeten HSi8, so erkennt man, dass dieser im Gegensatz zum HSi4 eine hohe spektrale Spreizung aufweist. Es sei hier erwähnt, dass beide Hörsäle über 39 Sitzplätze verfügen und somit zu den kleinen Sälen gehören. Da alle objektiven Werte komplett oder teilweise außerhalb des Sollbereichs sind, möchte man den HSi8 als unverständlich bewerten. Betrachtet man allerdings den Sprachübertragungsindex STI fällt auf, dass die Werte der Messung und der subjektiven Evaluierung weit auseinanderliegen. Der Hörsaal wurde für die Sprachverständlichkeit subjektiv als gut bewertet.

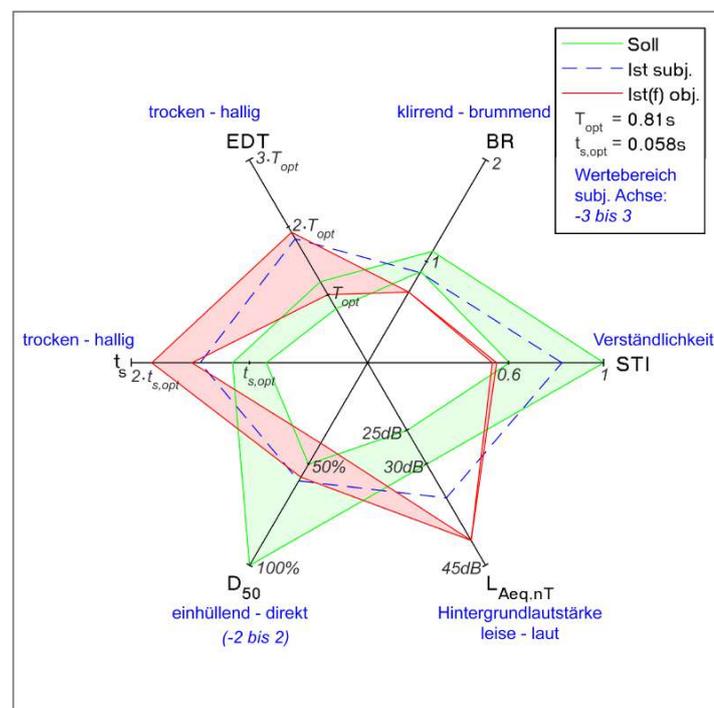


Abbildung 3.10: Netzdiagramm von HSi8

3.2.2 Auswertung mittels MATLAB

Zur Auswertung der Raumimpulsantworten wurde eine MATLAB-Funktion entworfen, welche die Gütemaße errechnet und darstellt. Dabei wurde die ITA-Toolbox der Universität Aachen [21] verwendet, um die Daten einzulesen und auszuwerten. Verschiedene Nachhallzeiten (T_{20} , T_{30} , EDT), die Schwerpunktszeit t_s , der Deutlichkeitsgrad D_{50} und das Bassverhältnis BR wurden mit dieser Toolbox errechnet. Der Code, um auf andere Gütemaße zu schließen sowie diese zu mitteln und darzustellen, wurde eigenständig geschrieben. Die Mittelungen der Gütemaße wurden ausschließlich arithmetisch durchgeführt und für alle Maße wurde ein über die Positionen gemittelter Frequenzgang berechnet. Im Funktionsheader werden alle möglichen Ausführungsarten kurz beschrieben und erklärt, wie diese abrufbar sind. Ziel der Funktion ist die Auswertung aller Hörsäle so einfach wie möglich allgemein durchzuführen. Dabei werden die Funktionen für jeden Hörsaal einmal aufgerufen und so alle nötigen Gütemaße berechnet und dargestellt. Es besteht die Möglichkeit, durch leichtes Ändern des Codes, eine allgemeine Auswertungsfunktion zu erhalten. Die Änderungen sind nötig, da zum jetzigen Zeitpunkt alle Lese- und Speicherordner zum Einlesen und Exportieren der Daten richtig benannt und entweder 12 oder 24 Impulsantworten geladen werden müssen.

Einlesen der Messdaten

Die Raumimpulsantworten eines Hörsaals werden mit der Funktion `ita_read()` geladen und in eine Matrix `IR()` gespeichert. Da alle Impulsantworten nach demselben Schema benannt sind (z.B. handelt es sich bei `m1_2` um den Chanel zwei der ersten Messung), ist es möglich, mit einer for-Schleife den Pfad der Dateien zu bilden (siehe Algorithmus 1).

Algorithmus 1: Einlesen der Messdaten mittels der ITA-Toolbox [21]

Input: Raumimpulsantworten

Output: Matrix aus ITA-Dateien der Impulsantworten

for alle Messungen do

 | Erstellen des Dateipfads;

 | Einlesen der Messdaten in eine Matrix via `ita_read(Dateipfad)`;

Errechnen der Gütemaße

In Algorithmus 2 ist der Code zum Errechnen der Nachhallzeiten T_{20} , T_{30} und EDT , der Schwerpunktszeit t_s sowie des Deutlichkeitsgrades D_{50} beschrieben. Diese Gütemaße werden mit dem Befehl `ita_roomacoustics()` ermittelt.

Algorithmus 2: Berechnen der Gütemaße mittels der ITA-Toolbox [21]

Input: Matrix der Impulsantworten

Output: Matrix der Gütemaße T_{20} , T_{30} , EDT , t_s und D_{50} frequenzabhängig

if Terzbänder then

 | setze die Anzahl der Frequenzbänder auf 25;

else

 | setze die Anzahl der Frequenzbänder auf neun;

for alle Messungen do

 | Berechnen der Gütemaße abhängig von der Anzahl der Frequenzbänder via

 | `ita_roomacoustics()`;

 | Speichern der Rückgabe-Structs in eine Matrix;

Das Bassverhältnis BR wurde auch mit der ITA-Toolbox berechnet. Die Werte für den Speech-Transmission-Index wurden mit einer separaten Funktion, wie in Unterabschnitt 2.1.5 erläutert, berechnet. Deren Initialisierung ist in Algorithmus 3 zu sehen.

Algorithmus 3: Berechnen von STI und BR mittels der ITA-Toolbox [21]

Input: Matrix der Impulsantworten

Output: jeweils ein Vektor der Gütemaße STI und BR

for alle Messungen do

```

| Berechnung des  $STI$  via der Funktion  $STI()$ ;           /* Berechnung nach */
| ;                                           /* Unterabschnitt 2.1.5 */
| Berechnung von  $BR$  via  $ita\_roomacoustics\_tonal\_color()$ ;
| Speichern der Rückgabewerte in einen Vektor;
```

Der Artikulationsverlust Al_{cons} wurde mithilfe der dokumentierten Abstände zwischen Messlautsprecher und Mikrofon über Gleichung 2.6 berechnet (siehe Algorithmus 4). Die eben genannte Dokumentation der Abstände ist am Beispiel HSi13 in Anhang B zu sehen.

Algorithmus 4: Berechnen des Artikulationsverlusts

Input: Abstand zwischen Messlautsprecher und Mikrofon und Nachhallzeit T_{20} pro Messposition, Raumvolumen

Output: Matrix der frequenzabhängigen Werte von Al_{cons}

Vektorinitialisierung der Bündelungsgrade des Messlautsprechers;

for alle Messungen do

```

| Berechnen von  $Al_{cons}$  über Gleichung 2.6;
| for alle Frequenzbänder do
|   if  $Al_{cons} > 100\%$  then
|     |  $Al_{cons}$  auf einen Maximalwert von 100% setzen;
|   else
|     | keine Änderungen vornehmen;
```

Erstellen der Plots

Wir haben uns entschieden, alle Plots ohne Hilfe der ITA-Toolbox auszugeben, da so Normbereiche und zusätzliche Werte einfacher hinzugefügt werden können. Wie die Abbildungen erstellt wurden, wird am Beispiel der Nachhallzeit gezeigt (siehe Algorithmus 5) und ist so bei allen anderen Frequenzgängen durchgeführt worden.

Als erstes wurde mit dem Befehl `figure()` die Größe und somit auch das Verhältnis von Schrift- zur Plotgröße definiert. Anschließend wurde der Frequenzverlauf der T_{20} mit logarithmischer Abszisse gezeichnet. Mit der Funktion `shadedplot()` wurde eine graue Fläche dargestellt, die dem Sollbereich nach ÖNORM B 8115-3 entspricht [4]. Nachdem die restlichen Kurven für verschiedene Besetzungszustände sowie die EDT gezeichnet wurden, konnten die Achsen beschriftet werden. Der Wert der optimalen Nachhallzeit und die Schröderfrequenz wurden in die Achsen eingezeichnet. Anschließend wurde eine Legende eingefügt und der Plot gespeichert.

Algorithmus 5: Erstellen des Plots der Nachhallzeiten

Input: gemittelte Nachhallzeiten T_{20} , $T_{20,voll}$, $T_{20,halbvoll}$ und EDT , Frequenzbandvektor, Schröderfrequenz, optimale Nachhallzeit T_{opt}

Output: Darstellung der Inputs in einem logarithmischen Plot

Definieren der Ploteigenschaften mit `figure()`;

Zeichnen der Kurve für T_{20} mit `semilogx()`;

Definieren der Eckpunkte des Normbereichs abhängig von T_{opt} ;

Zeichnen des Normbereichs mit `shadedplot()`;

Zeichnen aller Kurven mit `semilogx()`;

Beschriften der Achsen mit `xlabel()` und `ylabel()`;

Achsenanzeigebereich abhängig vom Maximum von T_{20} mit `axis()`;

Einzeichnen von T_{opt} in die Ordinate via `set()`;

Einzeichnen der Schröderfrequenz in die Abszisse via `set()`;

Erstellen der Legende mit `legend()`;

Erstellen der Speicherpfads;

Speichern als Vektorgrafik mit `saveas()`;

Löschen der temporären Variablen mit `clearvars()`;

3.2.3 Auswertung der Plots

Die Auswertung der Plots wird am Beispiel HSi13 gezeigt und erklärt. Sie wurde analog für alle Hörsäle vorgenommen. Die Ergebnisse aller Hörsäle sind, als Datenblätter zusammengefasst, in Anhang C zu finden.

Nachhallzeit T_{20}

Durch das große Raumvolumen und die im Raum verbauten Materialien weicht die maximale Nachhallzeit im leeren Hörsaal mit $T_{20,max} = 2,05s$ deutlich von der optimalen Nachhallzeit von $T_{opt} = 1,04s$ ab und liegt ab $125Hz$ außerhalb des Toleranzbereichs.

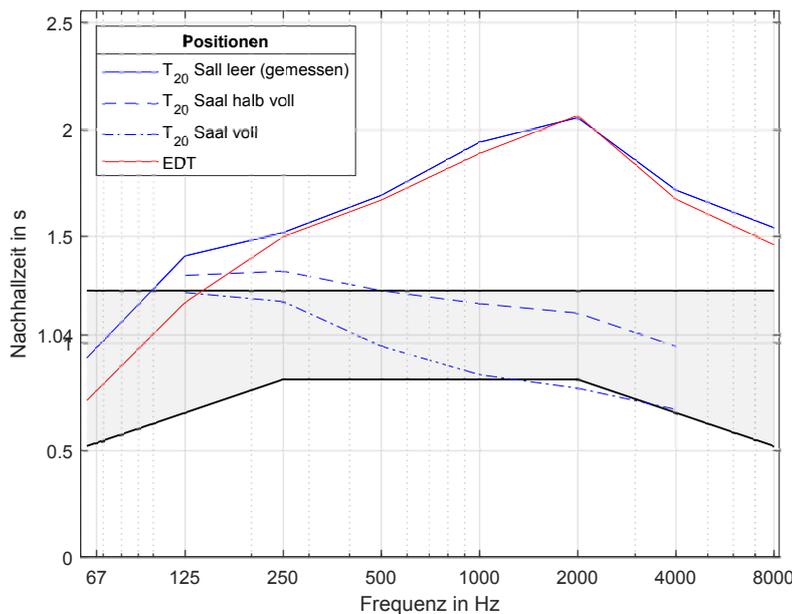


Abbildung 3.11: Nachhallzeit T_{20} bei verschiedenen Besetzungszuständen und EDT von HSi13

Betrachtet man aber den Hörsaal im besetzten Zustand, so befindet sich die Nachhallzeit großteils innerhalb des Toleranzbandes. Diese deutliche Verbesserung ist auf den hohen Absorptionsgrad des Publikums um $2k\text{Hz}$ zurückzuführen. Auch die Nachhallzeit EDT liegt außerhalb des Toleranzbereiches, wie in Abbildung 3.11 ersichtlich ist. Im niederfrequenten Bereich weicht die EDT von der T_{20} ab. Ist die Nachhallzeit EDT niedriger als die T_{20} , so ist die Abklingkurve konvex gekrümmt. Die Nachhallzeitempfindung gleicht der EDT.

Artikulationsverlust Al_{cons}

Wie in Gleichung 2.6 erkenntlich, ist der Al_{cons} abhängig vom Quadrat des Abstandes zwischen Quelle und Empfänger. Je weiter entfernt der Hörer vom Sprecher ist, desto mehr Einfluss hat der Raum auf die Verständlichkeit. Dadurch variiert dieser Wert bei großen Sälen stark für verschiedene Messpositionen. In Abbildung 3.12 ist der Artikulationsverlust an drei verschiedenen Positionen im HSi13 abgebildet. Alle dargestellten Kurven sind aus den Messergebnissen des exponentiellen Sweeps errechnet. Der blaue Frequenzgang (aus Legende: Senderposition 2, Empfängerposition 1, Channel 2) ist an einer Mikrofonposition gemessen, die sich im Hörsaal hinten befand (siehe Abbildung 3.7). Die grüne Linie ist an einer Messposition in der dritten Reihe aufgenommen und befindet sich im Gegensatz zu den anderen Kurven im Toleranzband. Es ist somit deutlich erkennbar, dass der Artikulationsverlust zu den hinteren Rängen stark zunimmt. Die Werte liegen bei den für Konsonanten relevanten Frequenzbändern um $Al_{cons} = 95\%$. Diese Werte sind für einen Hörsaal in einem unzulässigen Bereich.

Wir haben uns trotz der starken Positionsabhängigkeit dafür entschieden, eine arithmetische Mittlung durchzuführen, um einen Verlauf pro Hörsaal zu erhalten, da so ein Vergleich besser realisierbar ist. In Abbildung 3.13 erkennt man, dass der gemittelte Verlauf über den gesamten Frequenzbereich außerhalb des Sollbereichs liegt. Ein ungewöhnlich hoher Artikulationsverlust tritt dann auf, wenn die Nachhallzeit im Vergleich zur volumsabhängigen optimalen Nachhallzeit T_{opt} sehr hoch ist. Im Falle des HSi13 ist das durch die Raumgröße in Verbindung mit den kaum absorbierenden Oberflächen erklärbar. Eine Verkürzung der Nachhallzeit würde also auch eine Verbesserung des Artikulationsverlustes mit sich bringen.

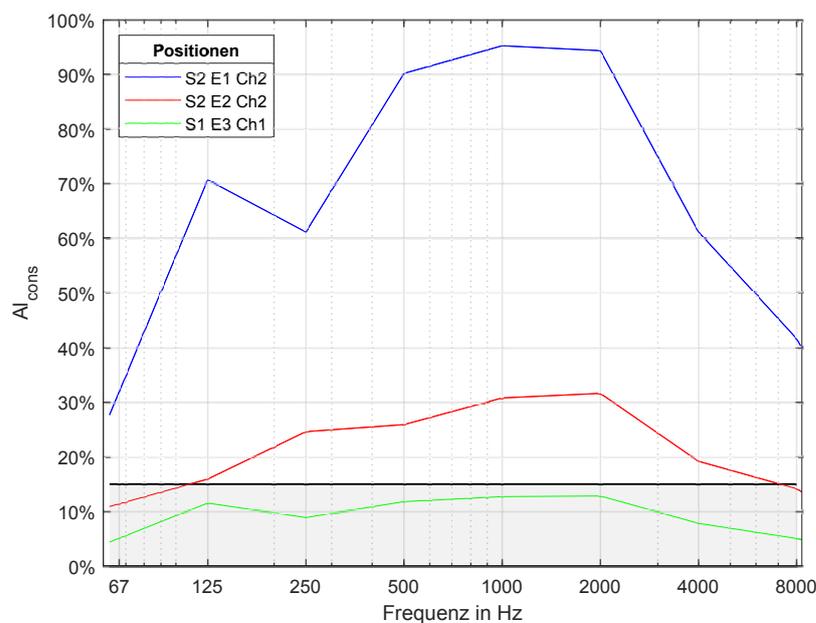


Abbildung 3.12: Artikulationsverlust Al_{cons} an drei Messpositionen im HSi13

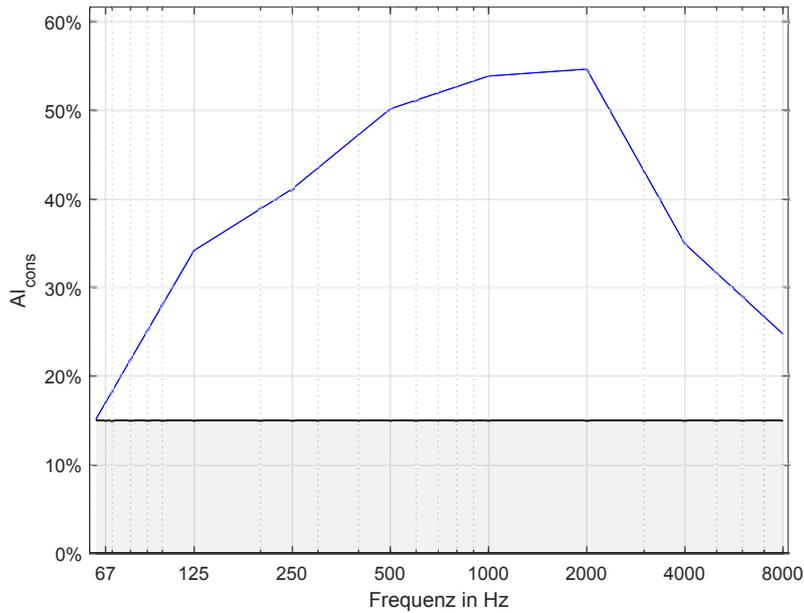


Abbildung 3.13: Gemittelter Artikulationsverlust Al_{cons} von HS13

Deutlichkeitsgrad D_{50}

Der Deutlichkeitsgrad nach Thiele, gemittelt über alle Positionen, liegt großteils unterhalb der Grenze für gute Verständlichkeit von 50%. Das bedeutet, dass über die Hälfte der Schallenergie später als 50ms nach dem Direktschall beim Hörer eintrifft. Somit ist der Energieanteil der Nachhallfahne im Vergleich zu den frühen Reflexionen zu hoch.

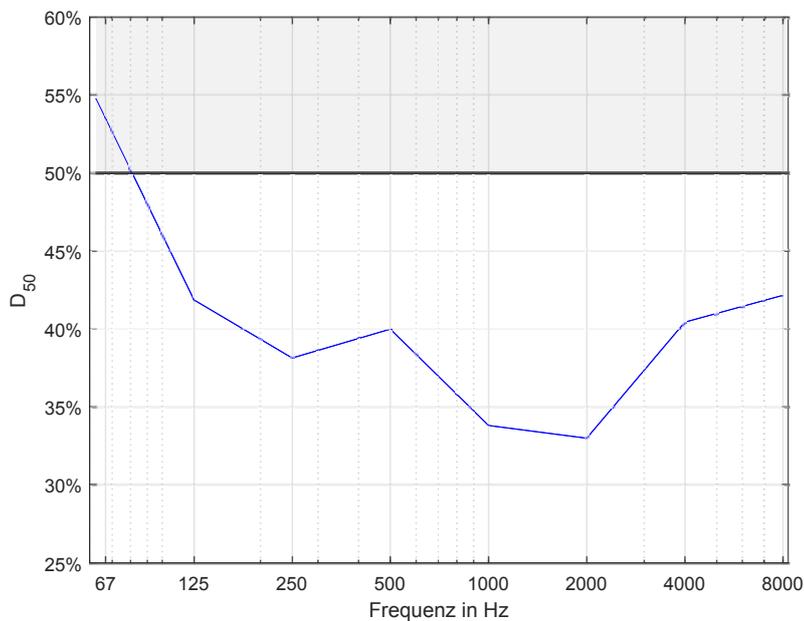


Abbildung 3.14: Gemittelter Deutlichkeitsgrad D_{50} von HS13

Obwohl im HSi13 Glasreflektoren zur Lenkung der frühen Reflexionen in Richtung der Zuhörer verbaut sind, müssen für eine Verbesserung des Deutlichkeitsgrads weitere Maßnahmen getroffen werden. Dies kann durch Verringern der Nachhallzeit gelingen, da so die Energie früher Reflexionen im Vergleich zur Gesamtenergie steigt.

Schwerpunktszeit t_s

Die Schwerpunktszeit ist für den normierten Frequenzbereich von 500Hz bis 4kHz zu hoch (siehe Abbildung 3.15). Bei 2kHz beträgt die maximale Schwerpunktszeit $t_{s,max} = 0,14\text{s}$, wobei der Optimalwert bei $t_{s,opt} = 0,075\text{s}$ liegt. Ein Flächenschwerpunkt bei 140ms beschreibt eine sehr langsam sinkende Abklingkurve. Die Energie, die in den Raum abgegeben wird, wird von den Raumbegrenzungsflächen nur sehr langsam absorbiert und bleibt für lange Zeit im Raum stehen. Bringt man absorbierende Materialien ein, verkürzt sich die Abklingzeit und somit auch die Schwerpunktszeit.

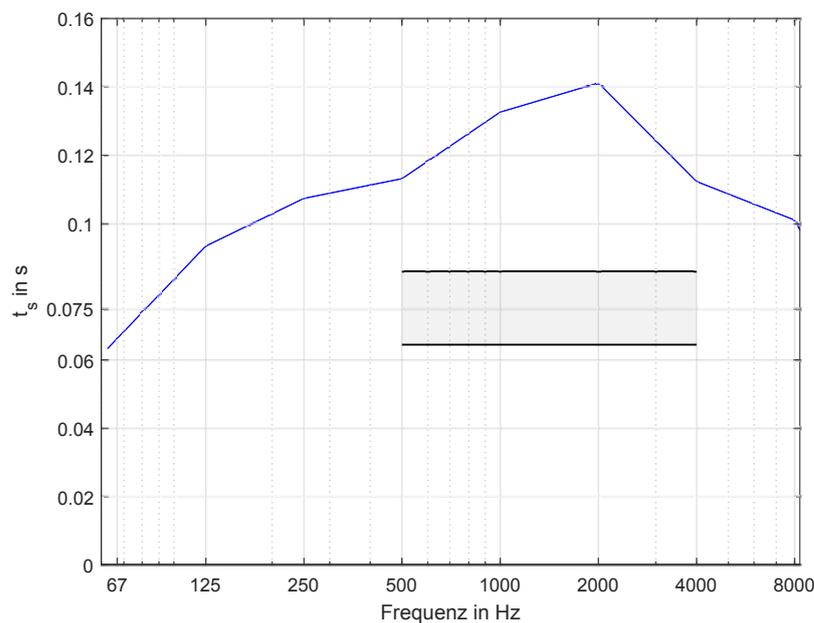


Abbildung 3.15: Gemittelte Schwerpunktszeit t_s von HSi13

Netzdiagramm

Wie in Abbildung 3.16 zu sehen ist, weicht sowohl die rote, objektive Fläche als auch die blaue, subjektive Linie stark vom grünen Sollbereich und somit von den Optimalwerten ab. Weiters erkennt man, dass die Werte der Nachhallzeit EDT eine hohe spektrale Spreizung besitzen. Diese Eigenschaft in Verbindung mit einem Bassverhältnis $BR < 1$ weist auf einen zu hohen frequenzansteigenden Verlauf der Nachhallzeit. Im Falle des Hörsaals i13 befindet sich keine im Netzdiagramm genannte Größe im Toleranzbereich. Wie in Tabelle 3.2 eingetragen, wurde dieser Hörsaal subjektiv am schlechtesten beurteilt.

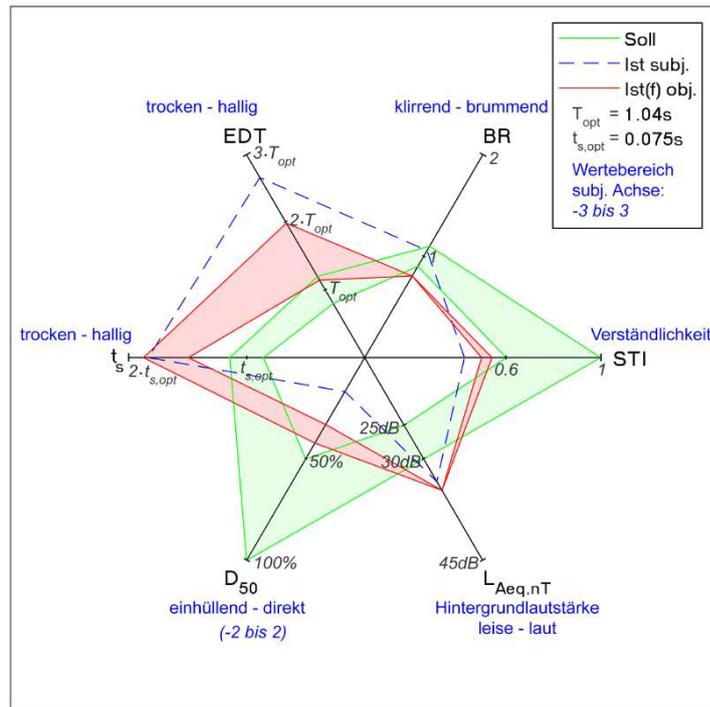


Abbildung 3.16: Netzdiagramm von HSi13

Optimierung

Wie in den vorherigen Unterabschnitten beschrieben, können durch Senken der Nachhallzeit alle genannten Gütemaße verbessert werden. Dies ist nicht verallgemeinerbar, da hier nur der Fall des HSi13 beschrieben wird.

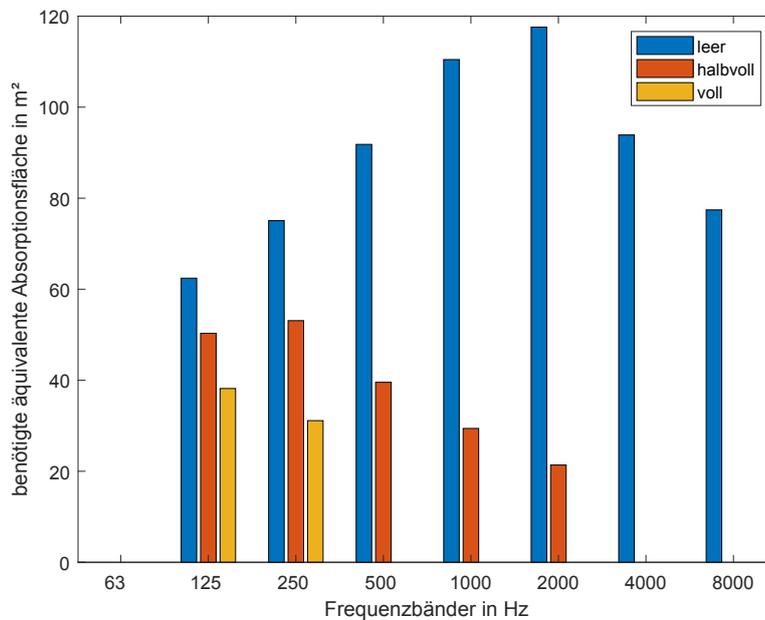


Abbildung 3.17: Äquivalente Absorptionsfläche HSi13

Um eine Sanierung durchzuführen, muss die Menge des benötigten Absorbermaterials berechnet werden. Auf die Frequenzabhängigkeit ist hier besonders zu achten, da durch zu starkes Dämpfen der Nachhallzeit die Verständlichkeit verschlechtert wird. In Abbildung 3.17 ist die theoretisch benötigte äquivalente Absorptionsfläche der verschiedenen Frequenzbänder zu sehen. Mit diesen Werten kann ein geeignetes Absorbermaterial beziehungsweise eine Kombination verschiedener gewählt und der Hörsaal verbessert werden.

Befragung des Publikums

Um eine allgemeine subjektive Beurteilung eines Hörsaales zu erhalten und unsere subjektiven Ergebnisse vergleichen zu können, wurde ein Evaluierungsbogen (siehe Abbildung 2.7) zur Bestimmung der Qualität des Hörsaals verfasst. Mithilfe von drei Fragen über Sprachverständlichkeit und Hintergrundgeräuschpegel soll von den Besuchern einer Vorlesung im HSi13 der Hörsaal beurteilt werden. Der Vortragende war männlich und verwendete kein Mikrofon, was den gleichen Bedingungen wie bei unserer Beurteilung entspricht. Erstellt wurde die Tabelle durch Bildung der Summe der jeweiligen Werte (Schulnoten von 1-5) und Mittelung durch die Anzahl der abgegebenen Stimmen.

	Probanden	Akustisch	Hintergrund	Nachhall
Reihe 1-5	65	1,93	2,75	3,07
Reihe 6-15	28	2,21	2,86	3,00
Gesamt	93	2,07	2,80	3,03

Tabelle 3.4: Auswertung der Evaluierung des HSi13

Wie in Tabelle 3.4 ersichtlich ist, waren die Testpersonen nicht gleichmäßig im Hörsaal verteilt. Über 60% der Zuhörer befanden sich in den vorderen 5 Reihen. Da der Artikulationsverlust mit der Entfernung zunimmt, ist die Sprachverständlichkeit in der Nähe des Sprechers am besten. Deshalb erhielten wir eine gute akustische Beurteilung für den HSi13. Zusätzlich sinkt die Nachhallzeit im Hörsaal mit steigender Anzahl von Zuhörern. Da wir bei unserer subjektiven Messung im mittleren bis hinteren Teil des Hörsaals positioniert waren und im leerem Raum das Semantische Differential erarbeitet haben, ist ein fehlerfreier Vergleich zwischen den Messergebnissen nicht möglich. Es ist jedoch auf den ersten Blick erkennbar, dass der Hörsaal i13 von uns als subjektiv schlechter beurteilt wurde.

4

Fazit

4.1 Erkenntnisse

Beim Vergleich der Messergebnisse wurde festgestellt, dass objektive Messwerte und subjektive Evaluierungen nicht immer korrelierten. Daraus wurde abgeleitet, dass die akustische Qualität eines Hörsaales außer von den Gütemaßen noch von weiteren Faktoren abhängig ist. Erweitert man Tabelle 3.2 mit den Raumvolumen der jeweiligen Hörsäle, so stellt man einen Zusammenhang zwischen Platzierung und dem Volumen fest. Dabei haben große Hörsäle eine schlechtere Platzierung als kleine. Eine Ausnahme bildet dabei Hörsaal i2, der sich trotz eines Raumvolumens von über $500m^3$ auf dem ersten Platz der subjektiven Rangliste befindet. Da dieser Hörsaal erst kürzlich akustisch saniert wurde, ist eine gute Akustik nicht verwunderlich.

Der Einfluss des Raumvolumens auf die Sprachverständlichkeit wurde beim Vergleich der Netzdiagramme von HSi8 und HSi9 festgestellt (siehe Abbildung 4.1 und 4.2). Bei deren Betrachtung stellt man fest, dass die Werte der subjektiven Evaluierung, bei großer Ähnlichkeit der objektiven Messwerte, teilweise stark variieren. Beide Hörsäle befinden sich im gleichen Gebäude und die gleichen Materialien wurden für die Raumbegrenzungsflächen verwendet. Den einzigen für die Raumakustik relevanten Unterschied findet man beim Vergleich der Raumvolumina ($V_{HSi8} = 363m^3$, $V_{HSi9} = 643m^3$).

Während die Messwerte des STI in den beiden vorhin genannten Abbildungen im gleichen Bereich liegen, gibt es deutliche Unterschiede bei der jeweiligen subjektiven Beurteilung (siehe orange Markierung in Abbildung 4.1 und 4.2). Dieselbe Auffälligkeit liegt beim Vergleich der Adjektive „einhüllend - direkt“ mit dem Deutlichkeitsgrad D_{50} vor. Ein Zusammenhang zwischen Raumvolumen und Verständlichkeit bei Sprache eines Hörsaales ist erkennbar. In kleinen Hörsälen wird der Sprecher noch verstanden, auch wenn die Gütemaße außerhalb der von uns definierten Grenzen liegen.

Mit der Raumgröße steigt die Forderung, dass sich die Gütemaße nahe des Idealwerts befinden.

Die Hörsäle wurden bei unseren subjektiven Evaluierungen nur für einseitige Kommunikation untersucht. Besonders kleine Hörsäle werden nicht nur für Vorlesungen, sondern auch für Diskussionen und Seminare verwendet, bei denen es mehrere Sprecher gibt. Der Einfluss der Gütemaße und des Raumvolumens bei beidseitiger Kommunikation wurde in dieser Arbeit jedoch nicht behandelt.

Platzierung	Hörsaal	Raumvolumen in m^3
1	HSi2	558,8
1	HSi6	290,0
2	HSi3	287,0
3	HSi10	219,0
4	HSi5	292,0
4	HSi4	169,0
5	HSi1	470,3
5	HSi14	265,0
6	HSi15	201,0
7	HSi8	363,0
7	FSI12	257,0
8	HSi7	884,0
9	FSI1	532,0
10	HSi9	643,0
11	HSi12	765,9
12	HSi11	581,0
13	HSi13	1533,0

Tabelle 4.1: Subjektive Rangliste der Hörsäle mit Raumvolumen

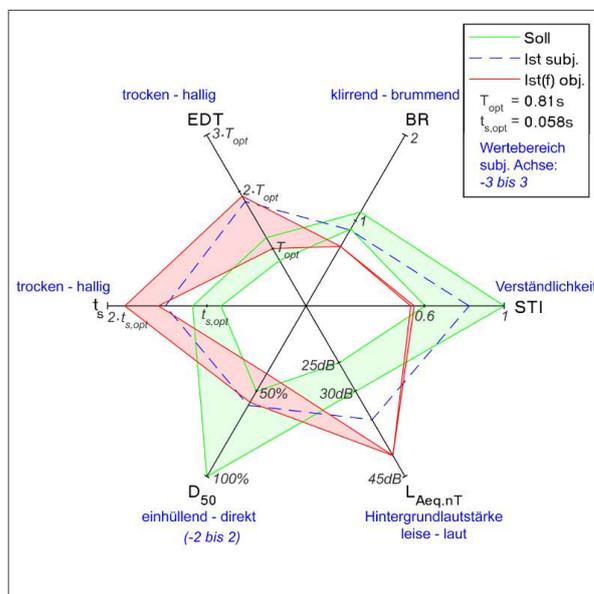


Abbildung 4.1: Netzdiagramm des HSi8

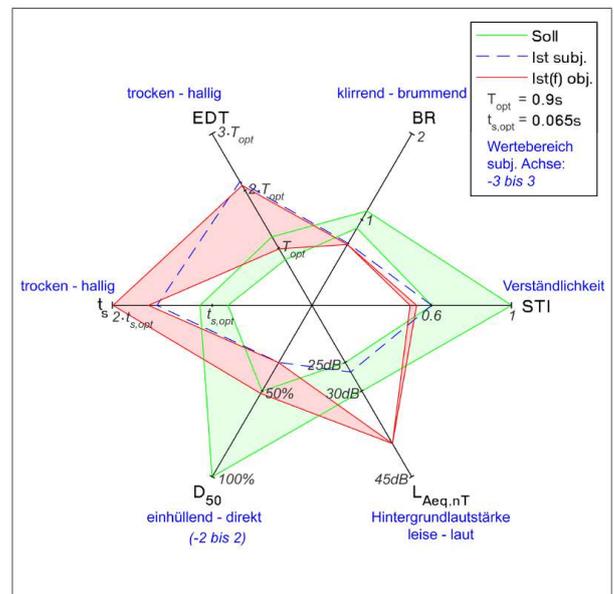


Abbildung 4.2: Netzdiagramm des HSi9

Weiters erkennt man beim Vergleich der beiden Abbildungen, dass ein volumensabhängiger Zusammenhang zwischen Anlagengeräuschpegel und dessen Lautstärkeempfindung herrscht. Hier ist dieser Zusammenhang aber indirekt. Je größer der Hörsaal, desto leiser wird das Hintergrundgeräusch empfunden. In den Hörsälen i8 und i9 sind die gleichen Beamer verbaut. Daraus resultiert ein ähnlicher Anlagengeräuschpegel $L_{Aeq,nT}$ (siehe Tabelle 4.2). Der Unterschied von $\Delta L_{Aeq,nT} = 2,1 dB(A)$ entsteht durch den Größenunterschied der Hörsäle. Je größer der Hörsaal, desto weiter entfernt sind die vorderen und hinteren Sitzreihen von Beamer und Lüftung. Daraus resultiert ein kleinerer Dauerschallpegel L_{Aeq} und somit ein kleinerer Anlagengeräuschpegel. Während den Messungen und Evaluierungen der Hörsäle wurde bemerkt, dass der Anlagengeräuschpegel ein sehr wichtiges Maß zur Beurteilung von Hörsälen ist. Der Unterschied der Verständlichkeit bei an- und ausgeschalteten Geräten ist enorm.

Mit steigendem Anlagengeräuschpegel verschlechtert sich die Sprachverständlichkeit.

Dies wird bei Raumplanungen selten berücksichtigt. In Tabelle 4.2 erkennt man, dass kein Hörsaal die von der OIB Richtlinie 5 definierte Grenze von $L_{Aeq,nT} \leq 30dB(A)$ einhält. Mit einer Reduzierung des Anlagengeräuschpegels würde sich die Sprachverständlichkeit in allen Hörsälen verbessern.

Hörsaal	$L_{Aeq,nT}$ in $dB(A)$
HSi1	40.30
HSi2	37.95
HSi3	33.99
HSi4	38.41
HSi5	35.55
HSi6	34.74
HSi7	34.53
HSi8	41.28
HSi9	39.18
HSi10	37.44
HSi11	37.36
HSi12	33.30
HSi13	34.64
HSi14	35.30
HSi15	36.99
HSFS11	32.96
HSFS12	30.10

Tabelle 4.2: Anlagengeräuschpegel der Hörsäle

Rangliste der Hörsäle

Wie bereits in Unterabschnitt 3.2.1 erwähnt, wurden mithilfe Tabelle 3.2 die Messergebnisse mit der subjektiven Evaluierung verglichen.

Tabelle 4.3, 4.4 und 4.5 wurden aus den objektiven Messergebnissen erstellt. Dabei betrachtete man die Abweichung der Nachhallzeit eines Hörsaals von der optimalen Nachhallzeit. Dafür wurden die Nachhallzeiten über alle Frequenzbänder gemittelt. Da die Nachhallzeit von der Anzahl der Personen im Raum abhängig ist, wurde je nach Besetzungszustand eine Rangliste erstellt.

Reicht die Nachhallzeit aus, um einen Hörsaal nach seiner Sprachverständlichkeit zu beurteilen? Betrachtet man die objektive Rangliste des unbesetzten Zustands (siehe Tabelle 4.3) und vergleicht diese mit der subjektiven, ist eine starke Ähnlichkeit der Platzierungen zu erkennen. Man könnte also sagen, dass die Nachhallzeit ausreicht, um Räume zu bewerten. Die in Abschnitt 4.1 erklärten Zusammenhänge zeigen allerdings, dass das Raumvolumen und der Anlagenpegel beziehungsweise der Hintergrundgeräuschpegel eine große Rolle spielen.

In Abbildung 4.1 und 4.2 erkennt man, dass bei ähnlicher Abweichung der gemessenen und empfundenen Nachhallzeit von der optimalen die Verständlichkeit sehr verschieden ist. Dies liegt, wie zuvor erwähnt, an der Volumsabhängigkeit.

Die Nachhallzeit bietet eine gute Grundlage für Hörsaalbewertungen, aber es müssen sowohl Raumvolumen als auch Anlagepegel berücksichtigt werden.

Wie bereits erwähnt, wird die Nachhallzeit durch die Anwesenheit von Publikum gesenkt. Liegt die Nachhallzeit im unbesetzten Raum im Toleranzbereich, so kann der Raum bei Besetzung zu trocken werden, wie am Beispiel des HSi7 ersichtlich ist (siehe Abbildung 4.3). Bereits im zur Hälfte gefüllten Raum ist die Nachhallzeit, außer im Frequenzband um $125Hz$, zu tief.

In Räumen mit geringer Nachhallzeit ist weniger Schallenergie in den Reflexionen. Dadurch muss ein Vortragender die Lautstärke der Stimme anheben, um die fehlende Energie durch mehr Direktschall zu kompensieren.

Langes Sprechen mit erhöhter Lautstärke ist gesundheitsgefährdend, da es Stimmstörungen verursachen kann. Dieses Risiko ist durch eine elektroakustische Anlage vermeidbar, wie sie in einigen Hörsälen vorzufinden ist. Die einwandfreie Funktion dabei ist eine wichtige Voraussetzung. In der Praxis kommt es öfters zu Störungen der Anlage, wodurch die Anhebung der Stimme des Vortragenden notwendig ist. Eine weitere Fehlerquelle bildet die Positionierung des Mikrofons. Dadurch wird die Funktion der elektroakustischen Anlage beeinträchtigt und die Sprachverständlichkeit ist nicht mehr gegeben.

Besonders bei großen Hörsälen ist eine elektroakustische Anlage zur Verstärkung der Stimme erforderlich. Eine Schulungsmöglichkeit diesbezüglich wäre für Vortragende wünschenswert.

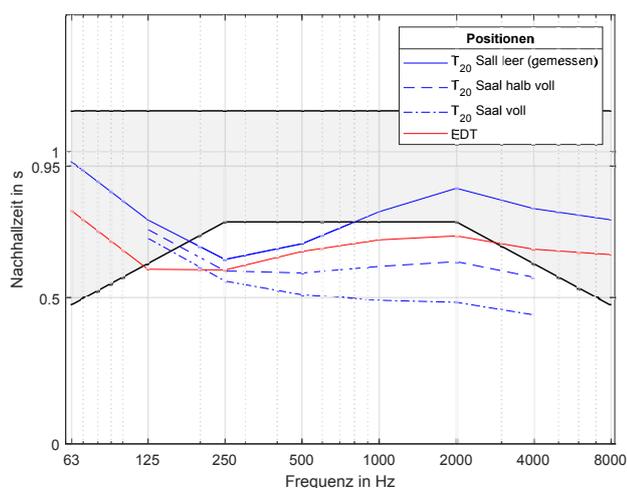


Abbildung 4.3: Nachhallzeit T_{20} bei verschiedenen Besetzungszuständen und EDT von HS*i*7

Platzierung	Hörsaal	Abweichung von T_{opt}
1	HSi14	0,1%
2	HSi6	0,7%
3	HSi10	1,8%
4	HSi5	2,6%
5	HSi3	9,5%
6	HSi4	10,2%
7	HSi2	12,6%
8	HSi1	13,9%
9	HSi15	19,4%
10	HSi7	20,1%
11	HSi13	39,9%
12	HSi11	42,3%
13	HSi8	45,2%
14	HSiFSI2	49,4%
15	HSi12	52,9%
16	HSi9	57,3%
17	HSiFSI1	81,3%

Tabelle 4.3: Objektive Rangliste der Hörsäle im leeren Zustand

Platzierung	Hörsaal	Abweichung von T_{opt}
1	HSi15	0,1%
2	HSi1	8,1%
3	HSi10	10,5%
4	HSi2	13,7%
5	HSi13	15,7%
6	HSi6	16,2%
7	HSi5	17,2%
8	HSi14	17,3%
9	HSi11	19,8%
10	HSi4	21,8%
11	HSi12	21,9%
12	HSi3	29,3%
13	HSi8	31,3%
14	HSiFSI2	33,9%
15	HSi7	34,8%
16	HSi9	42,5%
17	HSiFSI1	54,9%

Tabelle 4.4: Objektive Rangliste der Hörsäle im halbvollen Zustand

Platzierung	Hörsaal	Abweichung von T_{opt}
1	HSi12	0,4%
2	HSi11	1,3%
3	HSi13	7,7%
4	HSi15	9,8%
5	HSi8	14,5%
6	HSi10	20,2%
7	HSi9	20,7%
8	HSi14	23,0%
9	HSi1	23,1%
10	HSiFSI2	23,7%
11	HSi2	23,8%
12	HSi6	25,3%
13	HSi5	25,4%
14	HSi4	30,9%
15	HSi3	39,5%
16	HSiFSI1	40,5%
17	HSi7	44,0%

Tabelle 4.5: Objektive Rangliste der Hörsäle im vollen Zustand

4.2 Ausblick

Anhand der dargebrachten Ergebnisse soll entschieden werden, bei welchen Hörsälen eine akustische Sanierung nötig ist. Dabei stützte man sich auf die Ranglisten. Aus den objektiven Ranglisten wurde die des leeren Zustands mit hoher Priorität betrachtet, da auch im leicht besetzten Zustand Sprachverständlichkeit gegeben sein muss. In der verwendeten objektiven Rangliste (siehe Tabelle 4.3) erkennt man, dass zwischen den Platzierungen 10 (HSi7) und 11 (HSi13) ein Sprung der prozentualen Abweichung von 9,1% geschieht. Diese Rangliste basiert auf der Abweichung der Nachhallzeit T_{20} von der optimalen $T_{20,opt}$. ÖNORM B 8115-3 [4] besagt, dass eine Abweichung von 20% vertretbar ist. Man erkennt, dass die Nachhallzeit des HSi7 diese Forderung mit einer gemittelten Abweichung von 20,1% gerade nicht einhält. Die Nachhallzeit des HSi13 ist mit einer gemittelten Abweichung von 39,9% deutlich außerhalb des Toleranzbereichs.

Die in Abschnitt 4.1 behandelte Volumsabhängigkeit wird hier nicht berücksichtigt, da diese nur unter Annahme von einseitiger Kommunikation untersucht wurde. Bei der Sanierung soll aber

auch beidseitige Kommunikation berücksichtigt werden.

Der Anlagengeräuschpegel kann getrennt von der raumakustischen Sanierung behandelt werden, da ein Beamergehäuse auch im Nachhinein installiert werden kann und sich eine Dämpfung des Lüftungspegels als schwierig erweist.

Aus diesen Gründen wurde beschlossen, dass die sieben letzten Hörsäle aus Tabelle 4.3 einer Sanierung unterzogen werden sollten.

Zu sanierende Hörsäle:

HSi8, HSi9, HSi11, HSi12, HSi13, HSFSI1, HSFSI2.

Durch die Auseinandersetzung mit dem Themengebiet kamen Fragen zum Vorschein, welche im Rahmen der Arbeit nicht geklärt werden konnten. Manche dieser Fragen bieten eine Grundlage für Folgearbeiten im Fachgebiet der Raumakustik.

- a Welche Anforderungen an die Akustik bestehen, wenn mehrere Sprecher im Saal sind?
- b Wie können die zu sanierenden Hörsäle optimiert werden?
- c Wie schneidet der Campus Inffeldgasse akustisch im Vergleich zu den restlichen Hörsälen der TU Graz ab?
- d Wie verständlich sind die Hörsäle der TU Graz im Vergleich zu anderen Universitäten?
- e Wie kann der Anlagenpegel in Hörsälen minimiert werden?

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schwerpunktszeit, dargestellt als Flächenschwerpunkt der quadrierten Impulsantwort	12
2.2	Optimale Nachhallzeit in Abhängigkeit von Raumvolumen und Verwendungszweck laut ÖNORM B 8115-3 [4]	19
2.3	Zulässige Abweichungen von der optimalen Nachhallzeit für Hörsäle laut ÖNORM B 8115-3 [4]	20
2.4	Signalweg der subjektiven Messung	21
2.5	Sprachpegel laut Pearson, Bennett and Fidell (1977) Report in $dB(A)$ [14]	21
2.6	Vorlage des verwendeten Evaluierungsbogens	22
2.7	Evaluierungsbogen des HSi13	23
2.8	Signalweg der objektiven Messung	24
2.9	Frequenzabhängiges Bündelungsmaß des Norsonic Dodekaeder-Lautsprechers [16]	25
2.10	Vergleich der Abklingvorgänge von MLS und Sweep am Beispiel des HSi4	28
2.11	Vergleich der Abklingvorgänge von MLS und Sweep am Beispiel des HSi1	29
2.12	T_{20} in verschiedenen Besetzungszuständen, EDT und Toleranzband der Nachhallzeit des HSi11	31
2.13	Zusätzlich notwendige äquivalente Absorptionsfläche im HSi11	32
3.1	Einstellung des Messprogrammes bei WinMLS	34
3.2	Einstellungen für die Kalibrierung bei WinMLS	35
3.3	Wahl der Messmethode bei WinMLS	35
3.4	Einstellung der Werte bei Messung mit MLS	36
3.5	Einstellung der Werte bei Messung mit Sweep	37
3.6	3D-Modell des Hsi13 mit Bemaßung	38
3.7	Grundriss des HSi13 mit Quell- und Messpositionen	39
3.8	Gemittelttes semantisches Differential von HSi13	40
3.9	Netzdiagramm von HSi4	42
3.10	Netzdiagramm von HSi8	43
3.11	Nachhallzeit T_{20} bei verschiedenen Besetzungszuständen und EDT von HSi13 . .	46
3.12	Artikulationsverlust Al_{cons} an drei Messpositionen im HSi13	47
3.13	Gemittelter Artikulationsverlust Al_{cons} von HSi13	48
3.14	Gemittelter Deutlichkeitsgrad D_{50} von HSi13	48
3.15	Gemittelte Schwerpunktszeit t_s von HSi13	49
3.16	Netzdiagramm von Hsi13	50
3.17	Äquivalente Absorptionsfläche HSi13	50
4.1	Netzdiagramm des HSi8	53
4.2	Netzdiagramm des HSi9	53
4.3	Nachhallzeit T_{20} bei verschiedenen Besetzungszuständen und EDT von HSi7 . .	55

Tabellenverzeichnis

2.1	Adjektive zur subjektiven Evaluierung eines Raumes	10
2.2	Höchstzulässige Abweichungen der Schallquelle von kugelförmiger Abstrahlung in dB laut ÖNORM EN ISO 3382-1 [3]	15
2.3	Mindestanzahl der Empfängerpositionen laut ÖNORM EN ISO 3382-1 [3]	16
2.4	Verwendete Werte des Bündelungsgrades	25
2.5	Äquivalente Schallabsorbtionsflächen für Bestuhlung aus Sperrholz	30
2.6	Äquivalente Schallabsorbtionsflächen für Publikum (Sitzend)	30
3.1	Messwerte des A-bewerteten Dauerschallpegels L_{Aeq}	39
3.2	Subjektive Rangliste der Hörsäle	41
3.3	Im Netzdiagramm dargestellte Frequenzbänder der objektiven Messwerte	42
3.4	Auswertung der Evaluierung des HSi13	51
4.1	Subjektive Rangliste der Hörsäle mit Raumvolumen	53
4.2	Anlagengeräuschpegel der Hörsäle	54
4.3	Objektive Rangliste der Hörsäle im leeren Zustand	55
4.4	Objektive Rangliste der Hörsäle im halbvollen Zustand	56
4.5	Objektive Rangliste der Hörsäle im vollen Zustand	56

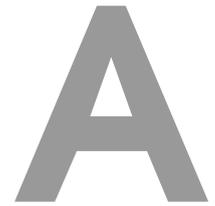
Liste der Algorithmen

1	Einlesen der Messdaten mittels der ITA-Toolbox [21]	44
2	Berechnen der Gütemaße mittels der ITA-Toolbox [21]	44
3	Berechnen von <i>STI</i> und <i>BR</i> mittels der ITA-Toolbox [21]	45
4	Berechnen des Artikulationsverlusts	45
5	Erstellen des Plots der Nachhallzeiten	46

Literaturverzeichnis

- [1] SABINE, W. C. ; EGAN, M. D.: *Collected papers on acoustics*. (1994)
- [2] EYRING, C. F.: Reverberation time in “dead” rooms. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 1 (1930), Nr. 2A, S. 217–241
- [3] ÖNORM EN ISO : 3382-1: 2009 Akustik–Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume. (2009)
- [4] ÖNORM B. : 8115-3, Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 3. (2002)
- [5] THIELE, R. : Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in räumen. In: *Acta Acustica United with Acustica* 3 (1953), Nr. 4, S. 291–302
- [6] KAAK, S. : Zur Standardisierung der Akustik musikalischer Aufführungsräume. (2013)
- [7] WEINZIERL, S. : Handbuch der Audiotechnik. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, (2008) (VDI-Buch). – ISBN 978–3–540–34300–4
- [8] KÜRER, R. : Einfaches Messverfahren zur Bestimmung der „Schwerpunktzeit“ raumakustischer Impulsantworten (A simple measuring procedure for determining the “center time” of room acoustical impulse responses) 7th Intern. In: *Congress on Acoustics, Budapest*, (1971)
- [9] PEUTZ, V. : Articulation loss of consonants as a criterion for speech transmission in a room. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 19 (1971), Nr. 11, 915–919. http://scantekinc.com/files/PDFs/Norsonic/Loudspeaker_Amplifier_and_Tapping_Machine.pdf
- [10] HOUTGAST, T. ; STEENEKEN, H. ; AHNERT, W. ; BRAIDA, L. ; DRULLMAN, R. ; FESTEN, J. ; JACOB, K. ; MAPP, P. ; MCMANUS, S. ; PAYTON, K. u. a.: Past, present and future of the Speech Transmission Index. Soesterberg: TNO, (2002)
- [11] ÖNORM EN ISO : 3382-2: Akustik–Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen. In: *Berlin: Beuth-Verlag* (2008)
- [12] ÖSTERREICHISCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK: OIB Richtlinie 5. (Ausgabe März 2015)
- [13] ÖNORM, EN ISO : 10052: Akustik–Messung der Luftschalldämmung und Trittschalldämmung und des Schalls von haustechnischen Anlagen in Gebäuden–Kurzverfahren. (2010)
- [14] OLSEN, W. O.: Average speech levels and spectra in various speaking/listening conditions: A summary of the Pearson, Bennett, & Fidell (1977) report. In: *American Journal of Audiology* 7 (1998), Nr. 2, S. 21–25
- [15] ÖNORM EN ISO: 9921: Ergonomie - Beurteilung der Sprachkommunikation. (2004-02-01)
- [16] NORSONIC: Noise Excitation Equipment for Building Acoustics Measurements: Loudspeaker Systems Nor275 and Nor276 Loudspeaker Systems Nor275 and Nor276 Power Amplifier Nor280 Tapping Machine Nor277: Product Data.
- [17] DUNN, C. ; HAWKSFORD, M. J.: Distortion immunity of MLS-derived impulse response measurements. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 41 (1993), Nr. 5, S. 314–335
- [18] GUIDORZI, P. ; BARBARESI, L. ; D’ORAZIO, D. ; GARAI, M. : Impulse responses measured with MLS or Swept-Sine signals applied to architectural acoustics: an in-depth analysis of the two methods and some case studies of measurements inside theaters. In: *Energy Procedia* 78 (2015), S. 1611–1616

- [19] FARINA, A. : Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. In: *Audio Engineering Society Convention 108* Audio Engineering Society, (2000)
- [20] BORISH, J. ; ANGELL, J. B.: An efficient algorithm for measuring the impulse response using pseudorandom noise. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 31 (1983), Nr. 7/8, S. 478–488
- [21] BERZBORN, M. ; BOMHARDT, R. ; KLEIN, J. ; RICHTER, J.-G. ; VORLÄNDER, M. : The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing 43th Annual German Congress on Acoustics, Kiel (Germany), (6 Mar 2017 - 9 Mar 2017)



Äquivalente Absorptionsflächen

Die folgende Tabelle stammt von DI Dr. Franz Graf und wurde in der Lehrveranstaltung „Raumakustik, Labor“ ausgehändigt.

7. Personen und Gestühl

Stühle, auf 1 Stück bezogen	Äquivalente Schallabsorptionsfläche A in m^2						
Klappstuhl, Sitz und Rücken aus Sperrholz	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03	
Klappstuhl, Sitz und Rücken mit Kunstlederbezug	0,09	0,13	0,15	0,15	0,11	0,07	
Klappstuhl, Sitz und Rücken mit Stoffbezug	0,10	0,23	0,23	0,22	0,19	0,18	
Klappstuhl, Sitz und Rücken mit Velourbezug, gepolstert	0,14	0,23	0,35	0,39	0,37	0,38	
Einzelpersonen							
Männliche Personen im Anzug (6 m^2 je Person)	stehend· sitzend	0,15	0,23	0,61	0,97	1,14	1,14
		0,15	0,23	0,56	0,78	0,88	0,89
Weibliche Person im Sommerkleid (6 m^2 je Person)	stehend sitzend	0,05	0,10	0,23	0,40	0,58	0,77
		0,05	0,10	0,17	0,37	0,47	0,58

B

Messprotokoll

Prüfbericht

Anmerkungen

Es sind 33 Glasreflektoren in drei Reihen an der Decke verbaut, um die frühen Reflexionen an den Zuhörerplätzen zu verstärken.

Raumbezeichnung und Ort:	HSi13, Inffeldgasse 16b, 8010 Graz
Grundriss (Anhang)	
Volumen:	1533m ³
Anzahl/Art der Sitze:	303 Klappsitze, Holz
Form/Material d. Raumwände/Flächen:	Boden: Vollholz Parkett Wände und Decke: Aluverkleidung Hinter der Tafel: Rigips
Besetzung/Anzahl Personen anwesend:	1
Bedingungen veränderlicher Einrichtungen	Subjektive Evaluierung: eingeschalten Objektive Messung: ausgeschalten
(Sicherheitsvorhang)	
(Beschreibung Bühne/Konzertzimmer)	
Temperatur [C°]: Luftfeuchte [%]:	23,2°C 58,4%
Beschreibung: 1.) Messgerät 2.) Schallquelle 3.) Mikrofon	1.) Schallpegelmesser: XL2 Audio and Acoustic Analyzer von NTi Audio 2.) Nor276 Dodekaeder von Norsonic 3.) AKG C480
Beschreibung Schallsignal:	MLS Exponentieller Sweep
(Messpunktdichte)	6 Mikrofon- und 2 Quellpositionen

Volumen	$V = 1533 \text{ m}^3$
Nachhallzeit	$T = 1,8 \text{ s}$

Grundgeräuschpegel (im Nutzbetrieb, z.B. mit Beamer EIN):

$L_{Aeq1} = 35,1 \text{ dB(A)}$	vorne
$L_{Aeq2} = 37,4 \text{ dB(A)}$	mittig
$L_{Aeq3} = 33,0 \text{ dB(A)}$	hinten

Schröderfrequenz:

$$f_{\text{Schröder}} = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} = 69 \text{ Hz}$$

Optimale Nachhallzeit nach ÖNORM 8115-3:

$$T_{\text{opt}} = 0,37 \log\left(\frac{V}{\text{m}^3}\right) - 0,14 = 1,03 \text{ s}$$

Mindestabstände nach ÖNORM EN ISO 3382-1 bzw. 3382-2 :

Wand ↔ Empfänger = 1 m
Empfänger ↔ Empfänger = 2 m
Sender ↔ Empfänger = $2 \sqrt{\frac{V}{c * T}} = 3,17 \text{ m}$

Sender ↔ Empfänger (+20cm Box)		Verstärker	Messmethode	durchgeführt
E1 S1	ch1 ↔ S1 = 14,97 m	-10dB	MLS	Ø
	ch2 ↔ S1 = 16,16 m	-20dB	Sweep	Ø
E1 S2	ch1 ↔ S2 = 16,84 m	-25dB	Sweep	Ø
	ch2 ↔ S2 = 14,74 m	-10dB	MLS	Ø
E2 S2	ch1 ↔ S2 = 11,68 m	-10dB	MLS	Ø
	ch2 ↔ S2 = 8,37 m	-25dB	Sweep	Ø
E2 S1	ch1 ↔ S1 = 10,25 m	-25dB	Sweep	Ø
	ch2 ↔ S1 = 9,25 m	-10dB	MLS	Ø
E3 S1	ch1 ↔ S1 = 5,21 m	-15dB	MLS	Ø
	ch2 ↔ S1 = 7,97 m	-25dB	Sweep	Ø
E3 S2	ch1 ↔ S2 = 9,49 m	-25dB	Sweep	Ø
	ch2 ↔ S2 = 4,63 m	-15dB	MLS	Ø

E....Empfängerposition S....Senderposition



Datenblätter

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



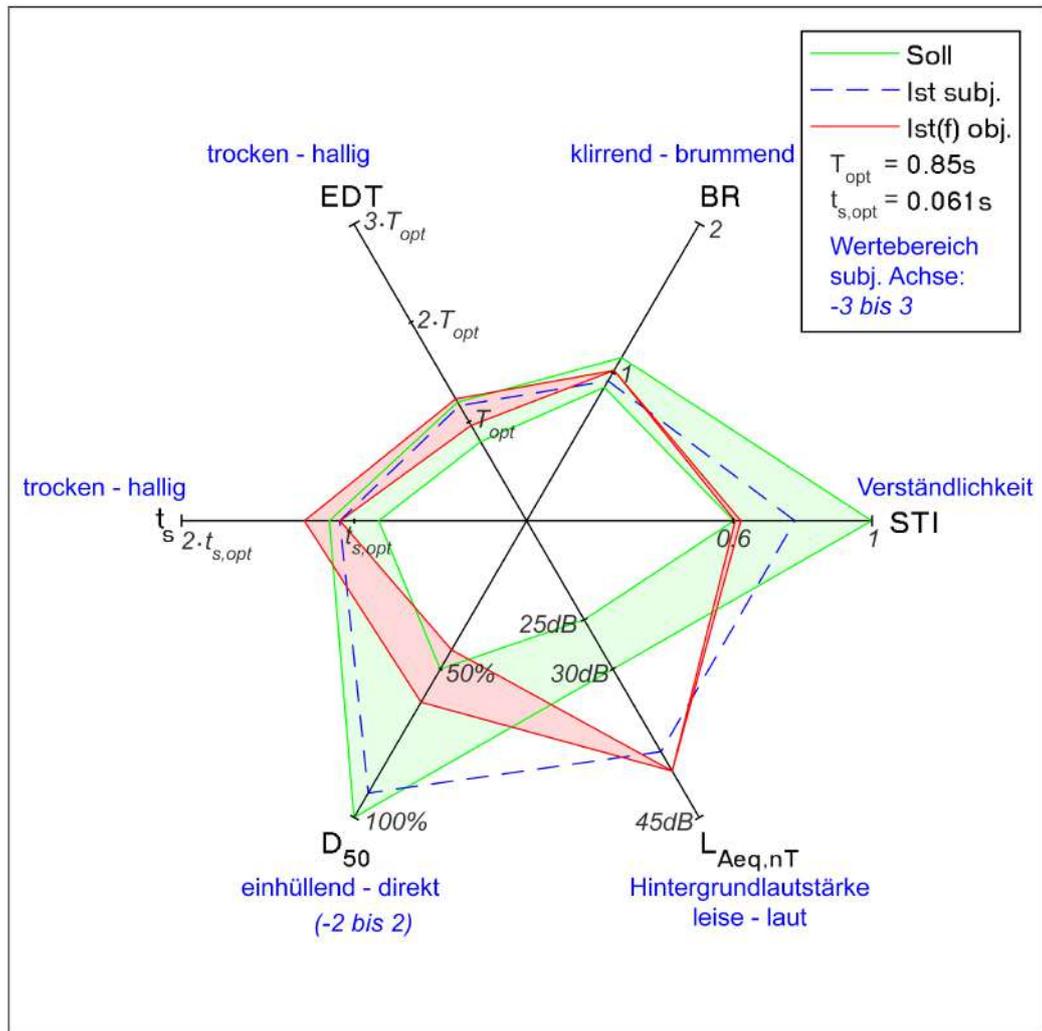
DATENBLATT HSi1



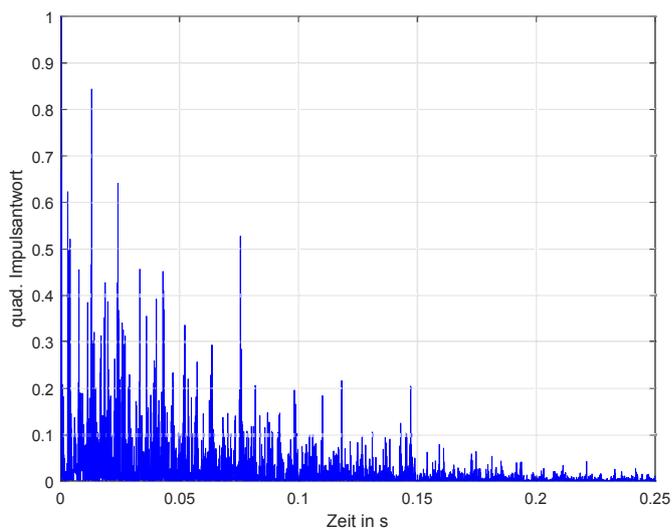
INFFELDGASSE 18

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

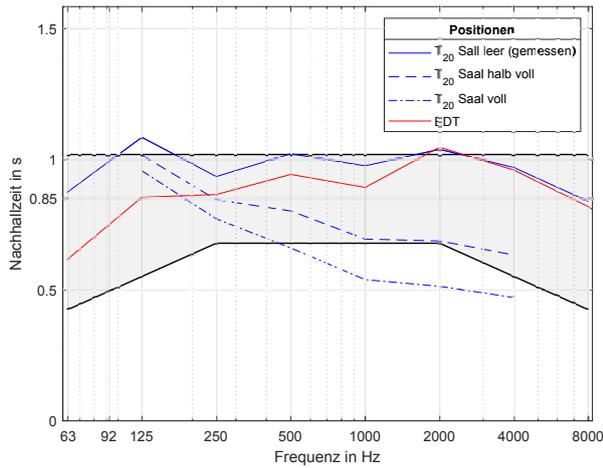
Sommersemester 2018



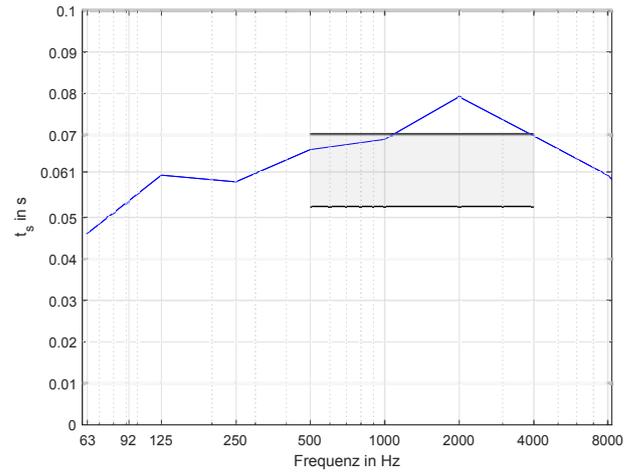
EDT... Anfangsnachhallzeit $L_{Aeq,nT}$... Anlagengeräuschpegel t_s ... Schwerpunktszeit
 D_{50} ... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis



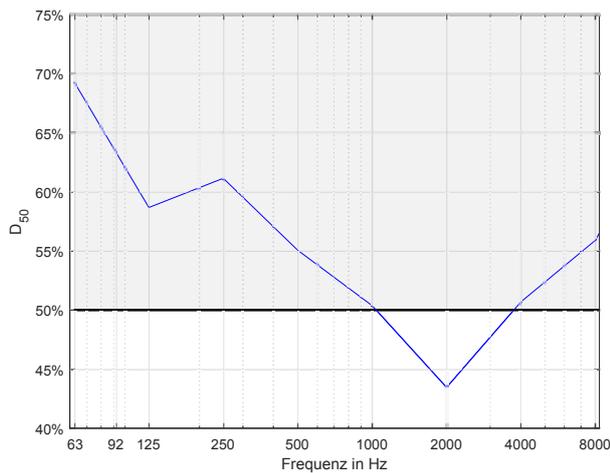
Messbedingungen	
Datum	11.05.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	470,3 m ³
Temperatur	22,1 °C
Luftfeuchtigkeit	55,2%
LAeq	40,6 dB(A)
Bestuhlung	117 Sitze Holz
Boden	Parkett
Wände	Holz, Rigips
Decke	Rigips
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Nein



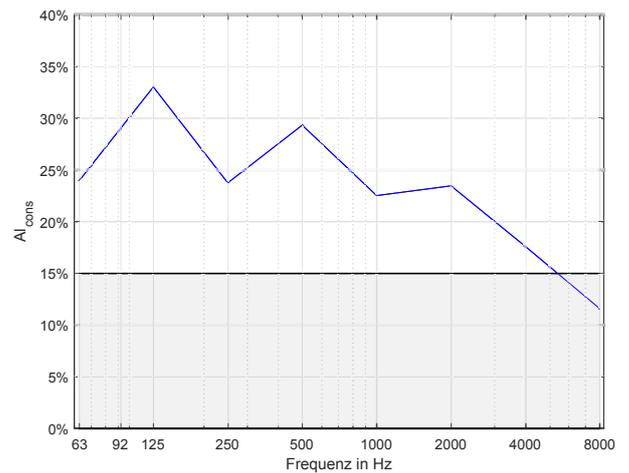
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.87	1.08	0.93	1.02	0.97	1.04	0.97	0.84
T_{20} halbvoll in s	–	1.02	0.85	0.80	0.69	0.69	0.63	–
T_{20} voll in s	–	0.96	0.77	0.66	0.54	0.51	0.47	–
EDT in s	0.62	0.85	0.87	0.94	0.89	1.05	0.96	0.82



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.046	0.060	0.059	0.066	0.069	0.079	0.070	0.060



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	69	59	61	55	50	43	51	56



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	24	33	24	29	23	23	18	12

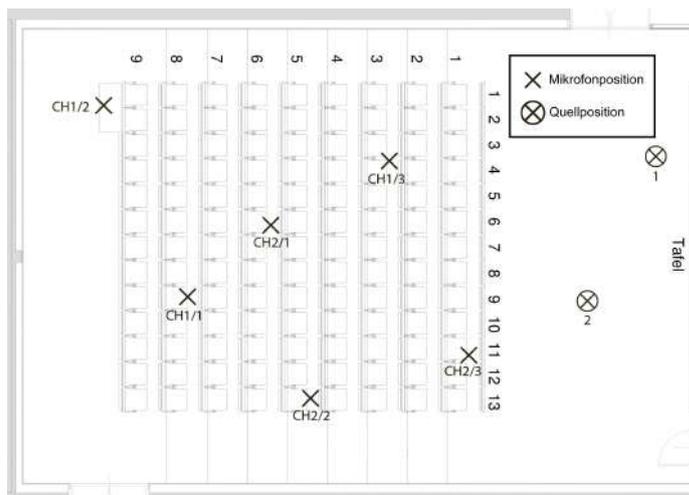
Diskussion:

Im Hörsaal HSi1 befinden sich die Nachhallzeiten am oberen Ende des Toleranzbandes, welches bei $f = 125Hz$ und $f = 2kHz$ überschritten wird. Durch den hohen Absorptionsgrad von Publikum bei $f = 2kHz$ wird die zu lange Nachhallzeit der hohen Frequenzen ausgeglichen und ist bei voller Besetzung teilweise zu kurz. Die Sprachverständlichkeit ist in jedem Besetzungszustand an jeder Hörerposition gewährleistet. Die im Hörsaal verbauten technischen Anlagen erzeugen einen Grundgeräuschpegel, der sich oberhalb des maximal zulässigen Grenzwertes befindet.

Fazit:

Leisere technische Anlagen würden die Sprachverständlichkeit zusätzlich verbessern.

	Positionen	f in Hz							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	1.03	1.03	0.98	1.00	0.97	1.04	0.99	0.82
	Ch2/1	0.95	1.10	0.90	1.02	1.02	1.03	0.96	0.83
	Ch1/2	0.80	1.01	0.78	1.05	0.97	1.02	0.97	0.86
	Ch2/2	0.82	1.10	0.85	1.02	0.99	1.05	0.95	0.84
	Ch1/3	0.66	1.07	1.03	1.05	0.94	1.03	0.96	0.83
	Ch2/3	0.98	1.18	1.06	0.98	0.97	1.06	0.98	0.85
EDT in s	Ch1/1	0.45	0.75	0.77	1.04	0.95	1.09	0.94	0.84
	Ch2/1	0.40	0.67	0.77	0.85	0.83	1.04	0.99	0.81
	Ch1/2	0.67	1.16	0.86	0.92	1.01	1.09	1.00	0.86
	Ch2/2	0.69	0.76	0.86	1.01	0.85	1.04	0.92	0.83
	Ch1/3	0.65	0.88	0.97	0.94	0.85	1.02	0.94	0.80
	Ch2/3	0.84	0.91	0.97	0.90	0.87	1.00	0.96	0.78
t_s in s	Ch1/1	0.051	0.064	0.057	0.074	0.073	0.087	0.073	0.066
	Ch2/1	0.043	0.059	0.057	0.064	0.068	0.079	0.075	0.064
	Ch1/2	0.046	0.056	0.059	0.076	0.077	0.083	0.069	0.056
	Ch2/2	0.043	0.065	0.053	0.071	0.070	0.079	0.069	0.060
	Ch1/3	0.048	0.052	0.069	0.059	0.064	0.076	0.072	0.064
	Ch2/3	0.045	0.066	0.057	0.054	0.062	0.071	0.061	0.052
$A_{I_{cons}}$ in %	Ch1/1	42.66	37.11	34.33	32.12	26.17	27.97	22.16	13.13
	Ch2/1	27.68	36.48	24.42	31.14	26.06	24.72	18.29	12.30
	Ch1/2	23.75	38.57	23.47	42.80	28.32	29.60	23.02	15.58
	Ch2/2	28.55	53.52	31.47	45.43	35.49	37.19	26.29	18.08
	Ch1/3	7.04	11.93	11.70	10.43	7.59	8.38	6.41	4.09
	Ch2/3	13.89	20.46	17.09	14.00	11.46	12.90	9.38	6.28
D_{50} in %	Ch1/1	54.56	49.71	65.99	52.74	45.35	38.33	48.74	51.66
	Ch2/1	77.23	56.74	58.13	56.18	54.18	45.03	47.23	51.58
	Ch1/2	74.03	72.61	62.96	41.67	46.77	39.44	52.29	59.32
	Ch2/2	74.36	46.19	68.55	51.49	45.75	43.16	49.32	56.17
	Ch1/3	57.28	69.42	49.00	62.44	54.71	45.59	48.51	53.01
	Ch2/3	78.09	57.46	62.32	65.95	55.63	49.36	58.23	63.79



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.61	1.02
Ch2/1	0.61	0.99
Ch1/2	0.61	0.89
Ch2/2	0.61	0.97
Ch1/3	0.61	1.06
Ch2/3	0.63	1.15

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



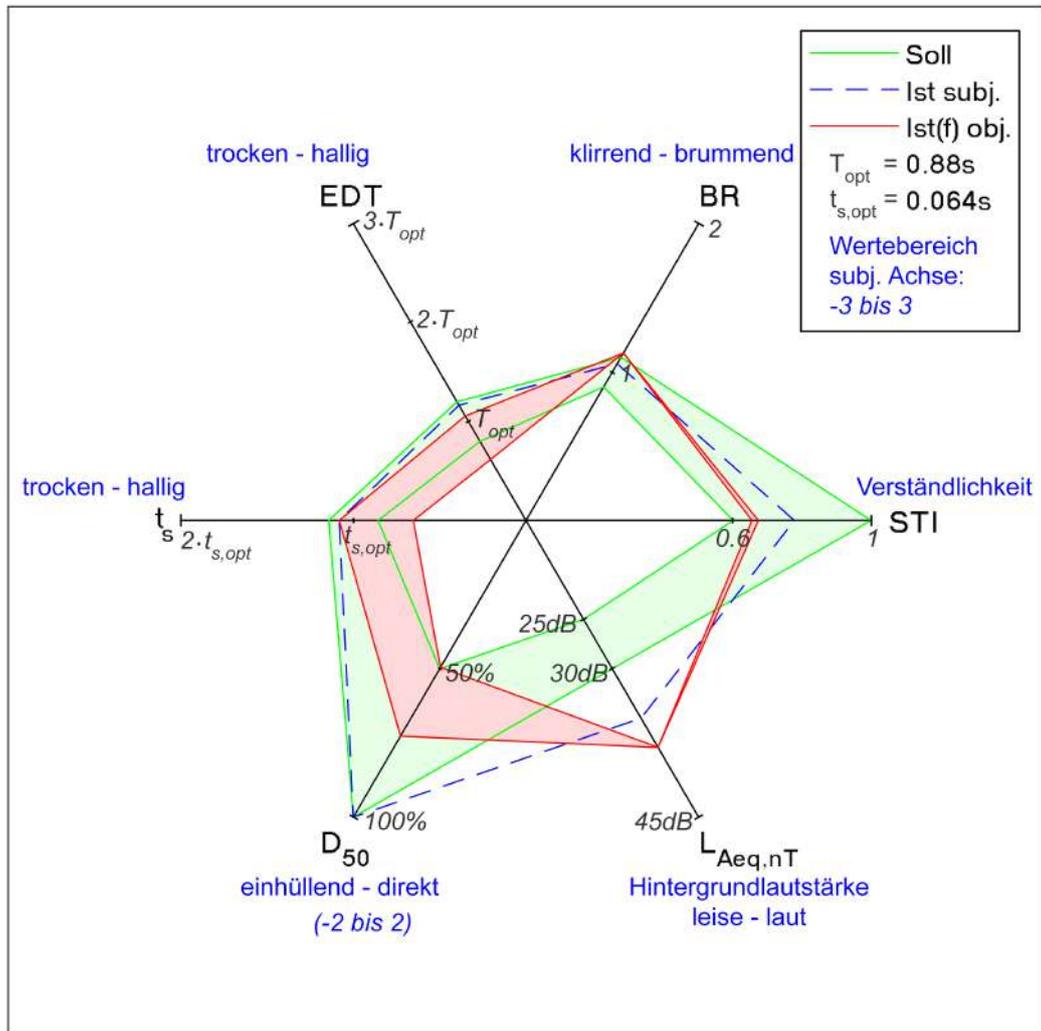
DATENBLATT HSi2



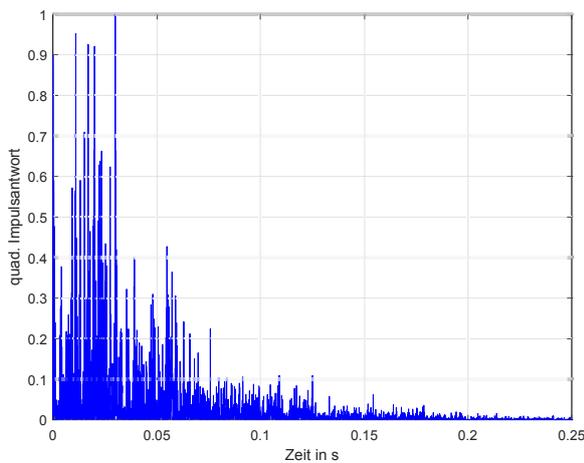
INFFELDGASSE 12

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

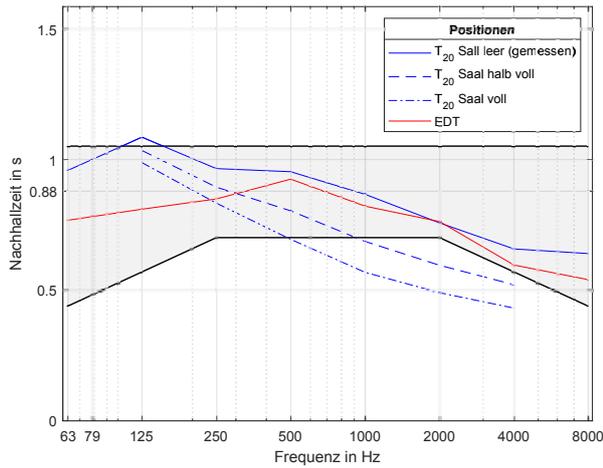
Sommersemester 2018



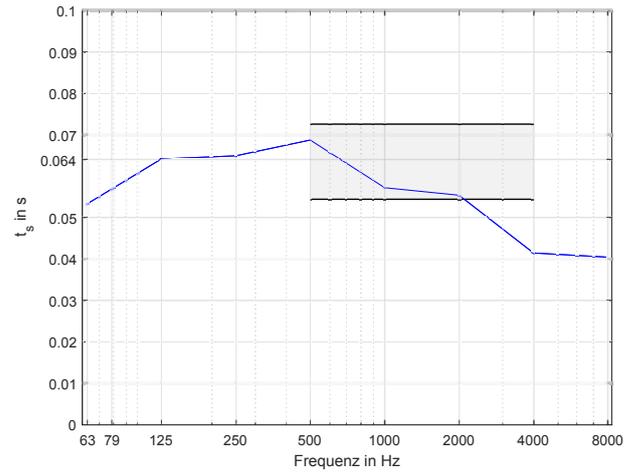
EDT... Anfangsnachhallzeit LAeq,nT... Anlagengeräuschpegel ts... Schwerpunktszeit
 D50... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältniss



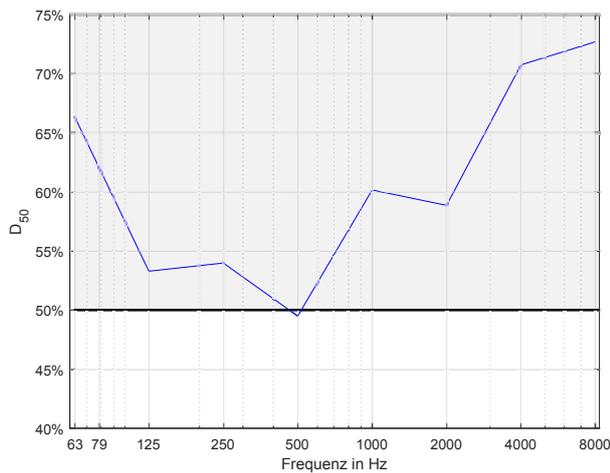
Messbedingungen	
Datum	25.05.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	558,8 m ³
Temperatur	22,7°C
Luftfeuchtigkeit	48,5%
LAeq	38,2 dB(A)
Bestuhlung	78 Sitze Holz
Boden	Spannteppich
Wände	Holz, Fensterfront
Decke	Rigips
Absorber	Lochplatten/ Schlitzabsorber
Reflektoren	Holzreflektoren



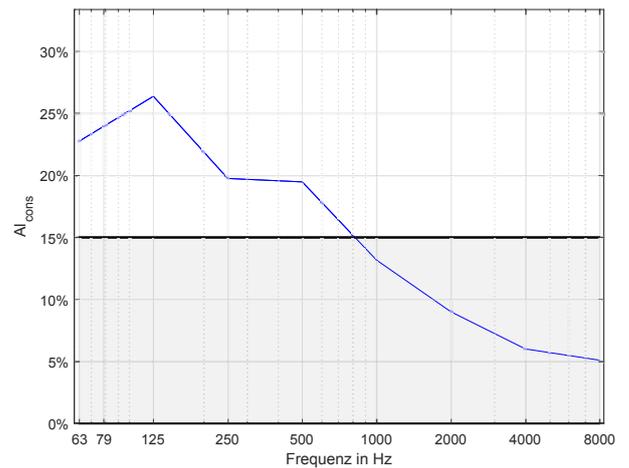
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.96	1.09	0.97	0.95	0.87	0.76	0.66	0.64
T_{20} halbvoll in s	–	1.04	0.89	0.80	0.69	0.60	0.52	–
T_{20} voll in s	–	0.99	0.83	0.69	0.57	0.49	0.43	–
EDT in s	0.77	0.81	0.85	0.93	0.82	0.76	0.60	0.54



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.053	0.064	0.065	0.069	0.057	0.055	0.041	0.040



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	66	53	54	50	60	59	71	73



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	23	26	20	19	13	9	6	5

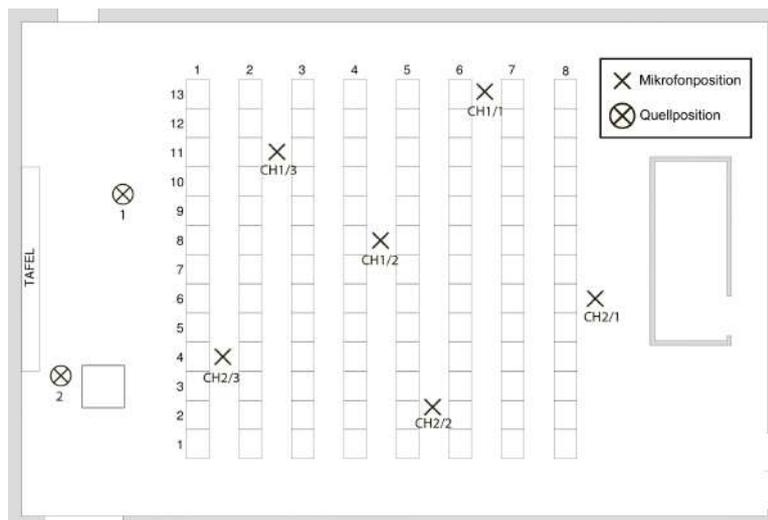
Diskussion:

Im Hörsaal i2 sinkt mit steigender Frequenz die Nachhallzeit und ist außer im Frequenzband von $f = 125Hz$ innerhalb des Toleranzbereiches. Im Hörsaal sind bei Besetzung die Mitten- und Höhenfrequenzen überdämpft, was sich negativ auf die Sprachverständlichkeit auswirkt. Die im Hörsaal verbauten technischen Anlagen erzeugen einen Grundgeräuschpegel, der sich oberhalb des maximal zulässigen Grenzwertes befindet.

Fazit:

Wegen der kurzen Nachhallzeit bei hohen Frequenzen ist bei voller Besetzung die Verwendung einer elektroakustischen Anlage empfohlen. Leisere technische Anlagen wären zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit hilfreich.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	1.12	1.25	0.93	0.91	0.86	0.74	0.66	0.66
	Ch2/1	1.21	1.08	1.02	0.99	0.89	0.76	0.67	0.66
	Ch1/2	0.83	0.96	0.93	0.98	0.86	0.76	0.64	0.63
	Ch2/2	0.76	1.15	1.00	0.97	0.86	0.74	0.66	0.65
	Ch1/3	0.89	1.05	0.92	1.01	0.85	0.78	0.64	0.62
	Ch2/3	0.94	1.03	0.99	0.86	0.87	0.76	0.67	0.62
EDT in s	Ch1/1	0.62	0.70	0.86	0.87	0.87	0.81	0.63	0.56
	Ch2/1	0.94	0.77	0.74	0.99	0.79	0.72	0.58	0.50
	Ch1/2	0.69	0.83	0.97	0.86	0.79	0.72	0.63	0.58
	Ch2/2	0.79	0.72	0.82	0.92	0.82	0.74	0.63	0.59
	Ch1/3	0.82	0.92	0.83	0.87	0.85	0.78	0.52	0.43
	Ch2/3	0.74	0.93	0.86	1.05	0.82	0.81	0.59	0.58
t_s in s	Ch1/1	0.054	0.059	0.062	0.066	0.059	0.059	0.040	0.041
	Ch2/1	0.057	0.061	0.057	0.077	0.060	0.053	0.043	0.038
	Ch1/2	0.050	0.071	0.075	0.071	0.059	0.054	0.046	0.044
	Ch2/2	0.053	0.055	0.065	0.071	0.061	0.059	0.047	0.046
	Ch1/3	0.054	0.075	0.065	0.065	0.054	0.052	0.035	0.034
	Ch2/3	0.052	0.064	0.065	0.063	0.050	0.055	0.037	0.039
$A_{I_{cons}}$ in %	Ch1/1	40.89	49.54	27.75	26.80	19.74	13.06	9.13	7.99
	Ch2/1	49.05	38.60	33.95	31.50	21.65	14.57	9.73	8.32
	Ch1/2	11.70	15.18	14.93	17.09	10.56	7.57	4.74	4.03
	Ch2/2	14.45	32.41	24.50	23.08	15.14	10.23	7.19	6.07
	Ch1/3	14.19	15.53	10.86	13.49	7.71	5.61	3.29	2.75
	Ch2/3	6.34	7.15	6.66	5.04	4.30	3.03	2.05	1.52
D_{50} in %	Ch1/1	65.65	57.20	57.08	55.04	59.67	55.22	71.46	72.15
	Ch2/1	66.13	56.33	60.61	45.44	58.25	62.80	70.14	77.91
	Ch1/2	69.36	43.75	41.85	41.54	57.94	62.79	64.41	67.51
	Ch2/2	67.34	66.36	62.75	43.39	58.15	52.08	67.98	67.54
	Ch1/3	63.35	37.94	48.64	54.55	63.06	62.29	75.52	78.60
	Ch2/3	66.61	58.25	53.04	57.12	63.95	58.05	74.96	72.46



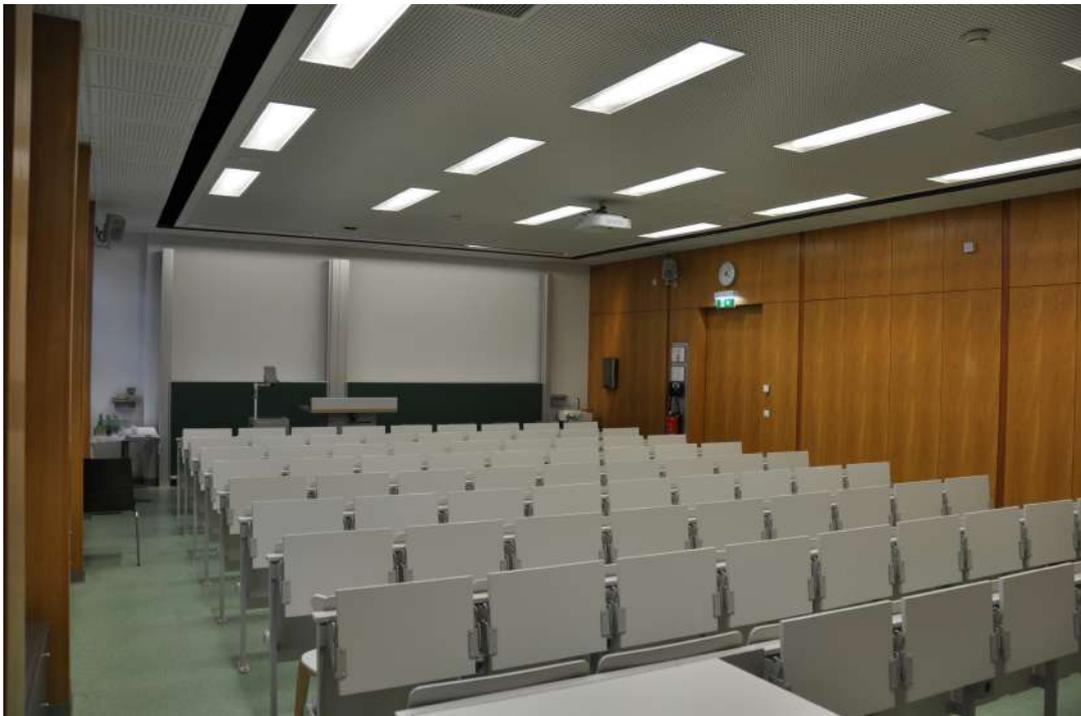
Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.66	1.23
Ch2/1	0.67	1.12
Ch1/2	0.65	1.03
Ch2/2	0.66	1.17
Ch1/3	0.66	1.05
Ch2/3	0.66	1.17

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



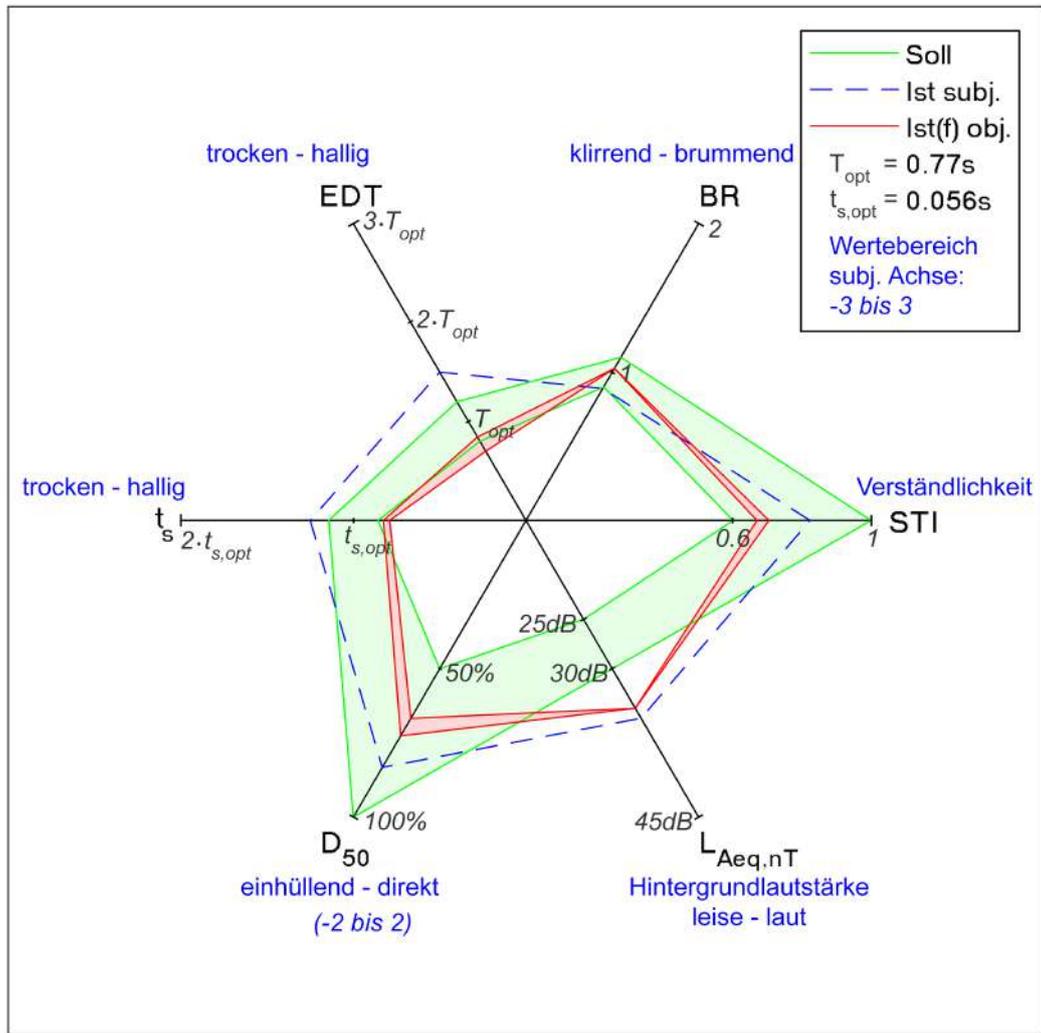
DATENBLATT HSi3



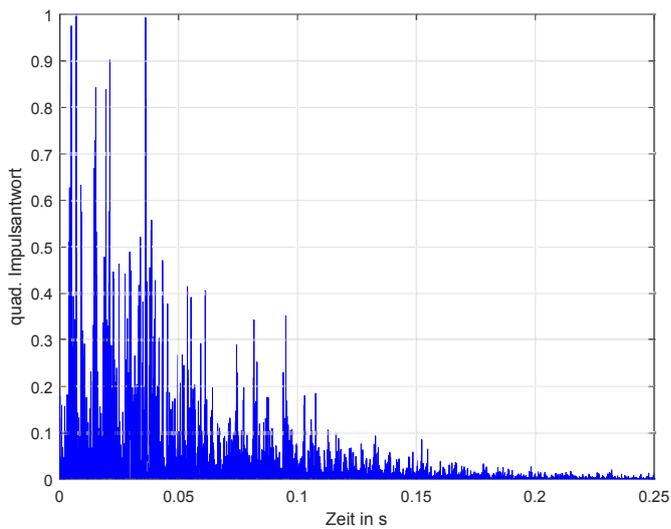
INFFELDGASSE 25/D

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

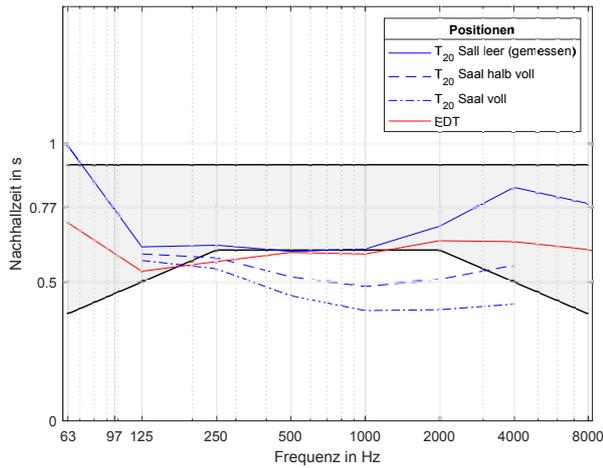
Sommersemester 2018



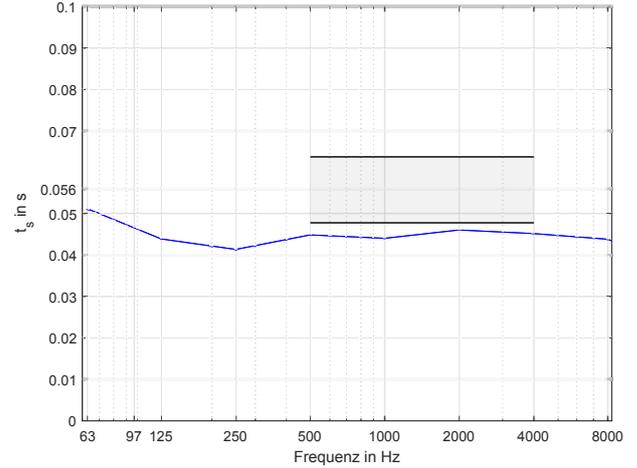
EDT... Anfangsnachhallzeit *L_{Aeq,nT}*... Anlagengeräuschpegel *t_s*... Schwerpunktszeit
D₅₀... Deutlichkeitsgrad *STI*... Sprachübertragungsindex *BR*... Bassverhältnis



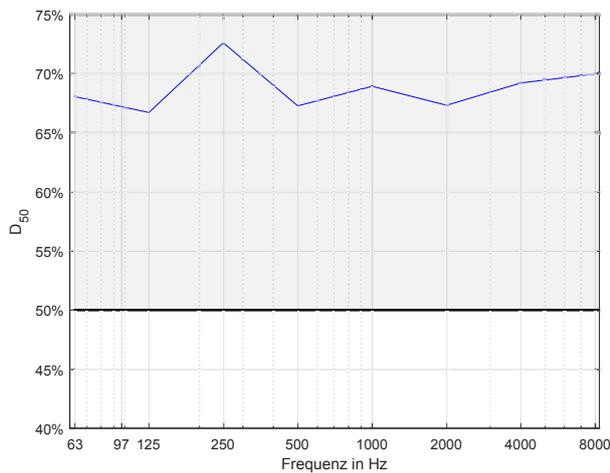
Messbedingungen	
Datum	19.05.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	287 m ³
Temperatur	21,9 °C
Luftfeuchtigkeit	48,5%
L _{Aeq}	34,1 dB(A)
Bestuhlung	78 Sitze Holz
Boden	PVC
Wände	Holz, Fenster
Decke	Rigips
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Nein



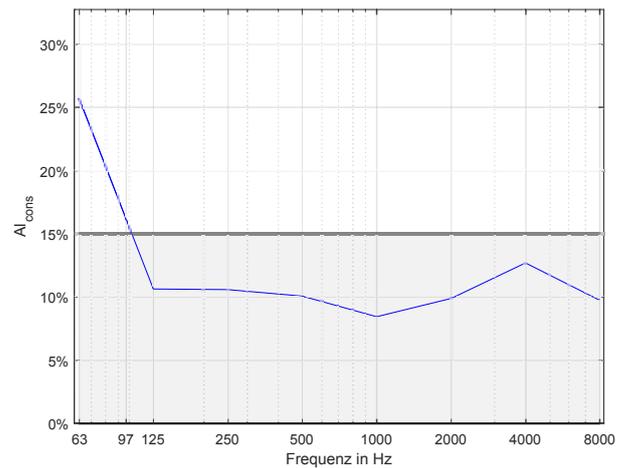
Nachhallzeiten								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.99	0.63	0.63	0.61	0.62	0.70	0.84	0.78
T_{20} halbvoll in s	–	0.60	0.59	0.52	0.48	0.51	0.56	–
T_{20} voll in s	–	0.58	0.55	0.45	0.40	0.40	0.42	–
EDT in s	0.71	0.54	0.57	0.61	0.60	0.65	0.65	0.62



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.051	0.044	0.041	0.045	0.044	0.046	0.045	0.044



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	68	67	73	67	69	67	69	70



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	26	11	11	10	8	10	13	10

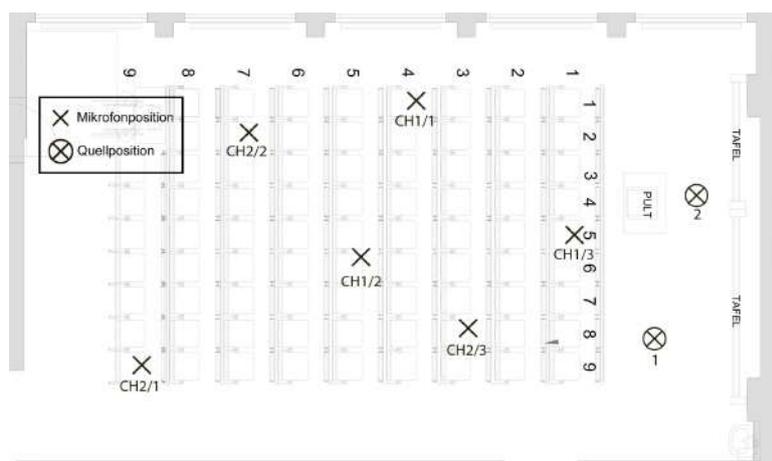
Diskussion:

Im Hörsaal i3 befindet sich der Sprachübertragungsindex, der Deutlichkeitsgrad sowie der Artikulationsverlust (außer im Frequenzband von $f = 63\text{Hz}$) innerhalb des Toleranzbandes. Dadurch ist die Sprachverständlichkeit im gesamten Auditorium gewährleistet. Die Schwerpunktszeit ist außerhalb des Toleranzbandes, was durch die kurze Nachhallzeit erklärbar ist. Die im Hörsaal verbauten Anlagen erzeugen einen Grundgeräuschpegel, der sich oberhalb des maximal zulässigen Grenzwertes befindet.

Fazit:

Trotz der kurzen Nachhallzeit ist der Vortragende wegen des geringes Volumens im gesamten Auditorium verständlich. Eine elektroakustische Anlage ist nicht notwendig. Leisere technische Anlagen wären zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit hilfreich.

	Positionen	f in Hz							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	1.13	0.66	0.65	0.61	0.61	0.71	0.84	0.78
	Ch2/1	1.03	0.64	0.61	0.63	0.63	0.70	0.85	0.80
	Ch1/2	0.97	0.71	0.64	0.61	0.61	0.71	0.88	0.78
	Ch2/2	0.85	0.62	0.64	0.63	0.63	0.70	0.86	0.80
	Ch1/3	0.93	0.59	0.64	0.60	0.60	0.70	0.82	0.76
	Ch2/3	1.05	0.54	0.62	0.59	0.64	0.69	0.80	0.77
EDT in s	Ch1/1	0.85	0.53	0.74	0.66	0.58	0.60	0.62	0.59
	Ch2/1	0.69	0.52	0.66	0.68	0.70	0.71	0.68	0.68
	Ch1/2	0.68	0.65	0.42	0.58	0.62	0.69	0.69	0.66
	Ch2/2	0.47	0.52	0.62	0.65	0.66	0.72	0.75	0.71
	Ch1/3	0.80	0.51	0.39	0.52	0.48	0.54	0.51	0.49
	Ch2/3	0.81	0.50	0.60	0.54	0.58	0.63	0.63	0.57
t_s in s	Ch1/1	0.058	0.041	0.050	0.048	0.040	0.041	0.045	0.043
	Ch2/1	0.054	0.052	0.052	0.055	0.051	0.055	0.049	0.048
	Ch1/2	0.046	0.041	0.036	0.049	0.047	0.051	0.047	0.048
	Ch2/2	0.045	0.051	0.043	0.049	0.056	0.057	0.053	0.052
	Ch1/3	0.049	0.036	0.027	0.029	0.031	0.034	0.034	0.033
	Ch2/3	0.055	0.042	0.040	0.039	0.041	0.039	0.043	0.038
$A_{I_{cons}}$ in %	Ch1/1	24.43	8.07	7.80	7.19	5.90	7.41	9.06	6.83
	Ch2/1	61.33	24.09	23.56	23.82	19.20	22.04	28.37	22.38
	Ch1/2	20.57	11.01	8.71	7.80	6.72	8.41	11.29	7.96
	Ch2/2	29.58	15.68	16.80	15.77	13.15	15.22	19.83	15.22
	Ch1/3	3.80	1.50	1.77	1.54	1.32	1.65	1.95	1.47
	Ch2/3	14.79	3.54	4.96	4.40	4.44	4.65	5.76	4.61
D_{50} in %	Ch1/1	57.44	67.77	65.86	66.62	74.33	71.85	69.18	70.34
	Ch2/1	67.20	60.24	64.10	57.75	64.63	61.18	66.04	66.04
	Ch1/2	74.99	69.45	81.82	63.23	63.60	62.85	68.62	67.07
	Ch2/2	75.01	63.86	67.75	63.39	57.12	55.85	62.30	62.73
	Ch1/3	65.71	77.96	85.64	80.71	81.98	79.74	79.49	79.27
	Ch2/3	68.07	61.04	70.51	71.95	71.95	72.52	69.68	74.42



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.70	1.07
Ch2/1	0.69	1.00
Ch1/2	0.70	1.10
Ch2/2	0.67	1.02
Ch1/3	0.75	1.02
Ch2/3	0.71	0.94

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



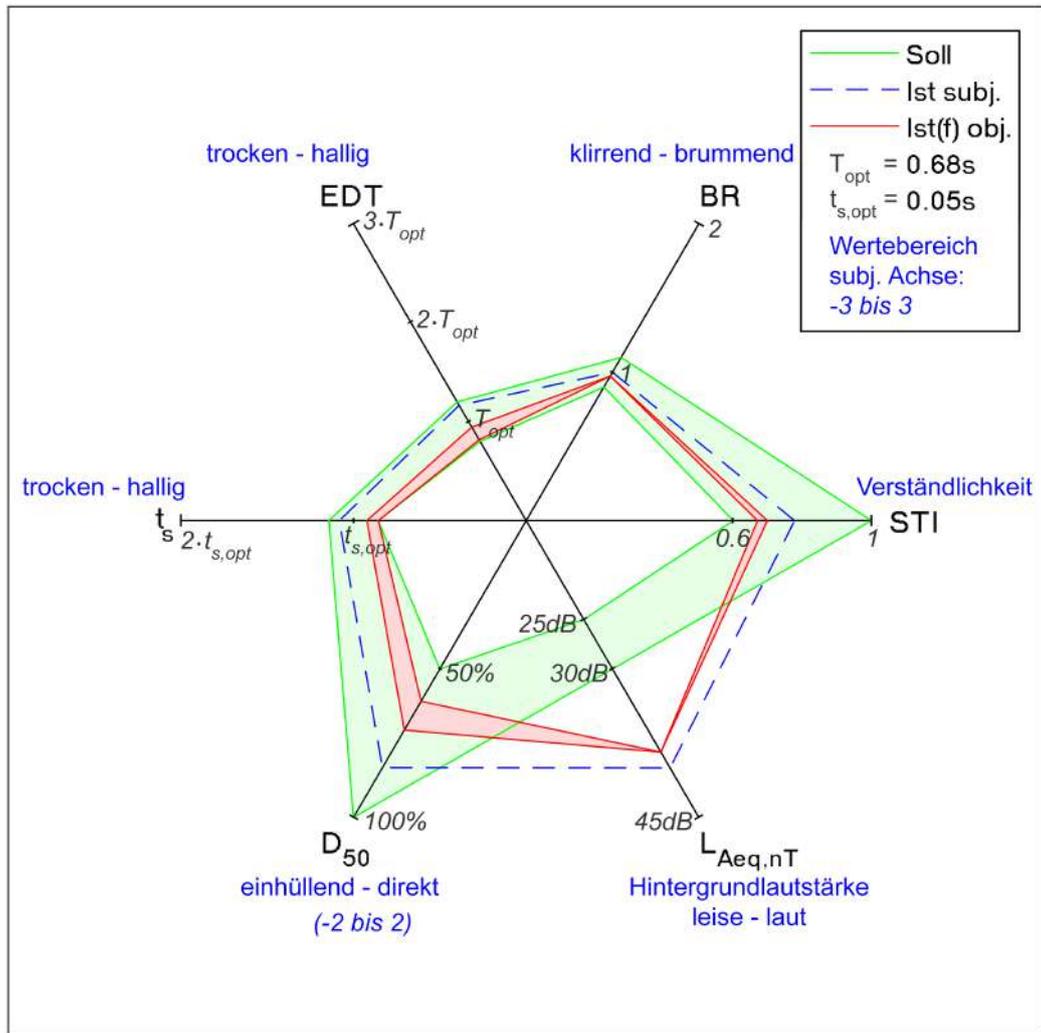
DATENBLATT HSi4



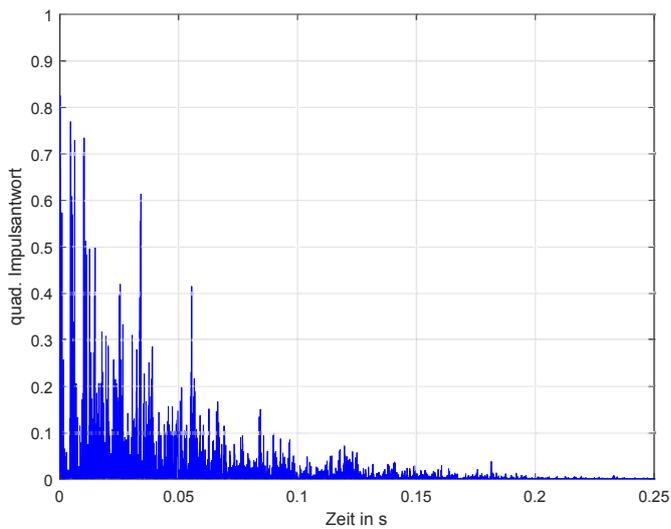
INFFELDASSE 25/D

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

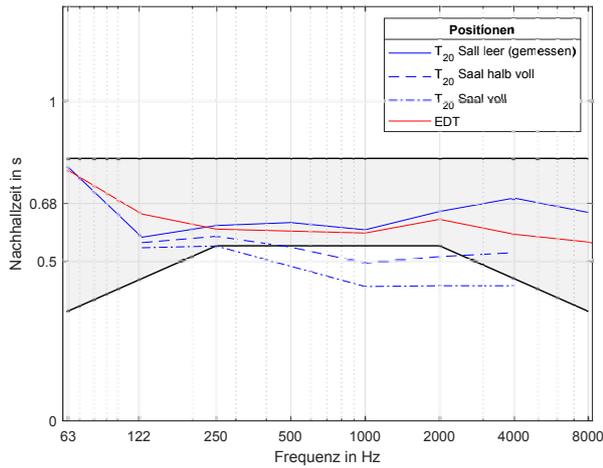
Sommersemester 2018



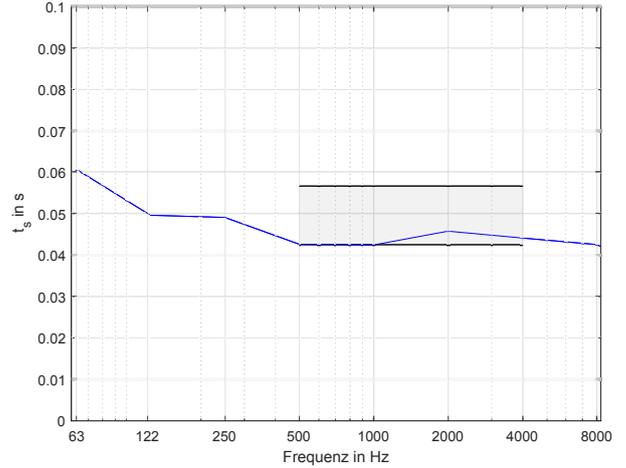
EDT ... Anfangsnachhallzeit $L_{Aeq,nT}$... Anlagengeräuschpegel t_s ... Schwerpunktszeit
 D_{50} ... Deutlichkeitsgrad STI ... Sprachübertragungsindex BR ... Bassverhältnis



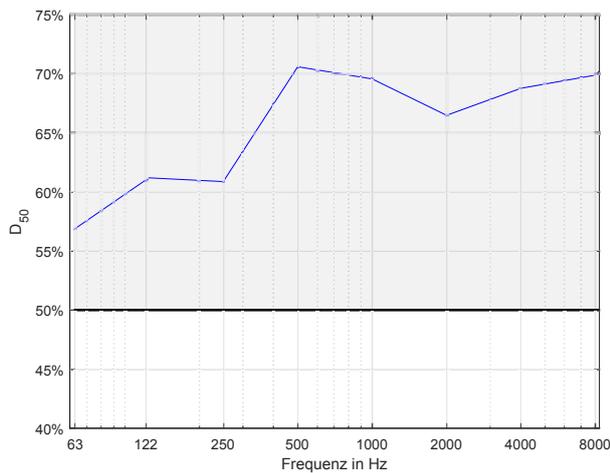
Messbedingungen	
Datum	19.05.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	169 m ³
Temperatur	21,6°C
Luftfeuchtigkeit	48,8%
LAeq	38,5 dB(A)
Bestuhlung	36 Sitze Holz
Boden	PVC
Wände	Holz, Fensterfront
Decke	Rigips
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Nein



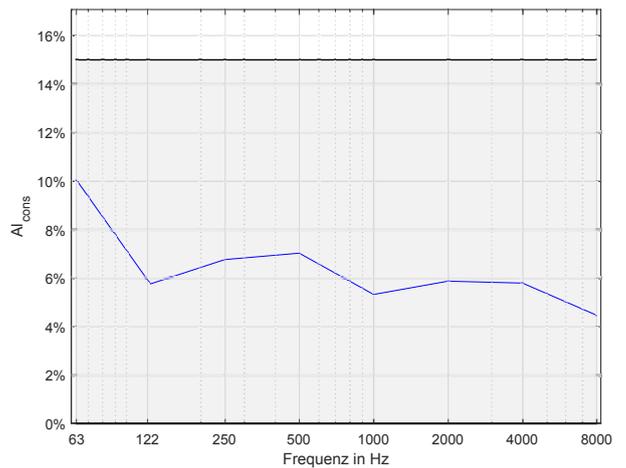
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.80	0.57	0.61	0.62	0.60	0.65	0.70	0.65
T_{20} halbvoll in s	–	0.56	0.58	0.54	0.49	0.51	0.53	–
T_{20} voll in s	–	0.54	0.55	0.48	0.42	0.42	0.42	–
EDT in s	0.79	0.65	0.60	0.59	0.59	0.63	0.58	0.56



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.061	0.050	0.049	0.043	0.042	0.046	0.044	0.043



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	57	61	61	71	70	66	69	70



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	10	6	7	7	5	6	6	4

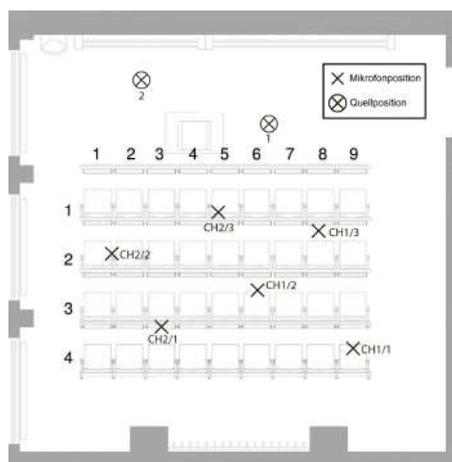
Diskussion:

Die berechneten objektiven Werte des HSi4 liegen abgesehen vom $L_{Aeq,nT}$ im definierten Sollbereich. Die Nachhallzeiten liegen mit Publikum etwas unter dem Toleranzband, wodurch sich eine trockene Charakteristik im Saal einstellt. Aufgrund der kleinen Raumabmessungen reicht der Direktschall an allen Plätzen aus, um eine gute Verständlichkeit zu gewährleisten. Die im Hörsaal verbauten Anlagen erzeugen einen Grundgeräuschpegel, der sich oberhalb des maximal zulässigen Grenzwertes befindet.

Fazit:

Trotz der tendenziell kurzen Nachhallzeit im besetzten Zustand ist der Vortragende aufgrund der geringen Raumgröße gut zu verstehen. Leisere technische Anlagen wären zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit hilfreich.

	Positionen	f in Hz							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	0.51	0.55	0.65	0.65	0.62	0.66	0.69	0.65
	Ch2/1	0.59	0.60	0.58	0.64	0.58	0.65	0.69	0.64
	Ch1/2	0.85	0.60	0.60	0.61	0.58	0.63	0.69	0.66
	Ch2/2	0.76	0.52	0.64	0.59	0.61	0.68	0.69	0.65
	Ch1/3	1.10	0.60	0.62	0.62	0.61	0.67	0.69	0.64
	Ch2/3	0.97	0.57	0.58	0.60	0.60	0.65	0.72	0.68
EDT in s	Ch1/1	0.93	0.77	0.62	0.61	0.56	0.65	0.59	0.57
	Ch2/1	1.16	0.75	0.71	0.64	0.68	0.65	0.63	0.62
	Ch1/2	0.75	0.59	0.65	0.52	0.59	0.63	0.59	0.58
	Ch2/2	0.67	0.57	0.54	0.59	0.57	0.58	0.61	0.58
	Ch1/3	0.53	0.68	0.51	0.58	0.54	0.61	0.54	0.51
	Ch2/3	0.67	0.53	0.57	0.62	0.59	0.66	0.54	0.51
t_s in s	Ch1/1	0.074	0.050	0.058	0.046	0.046	0.048	0.048	0.046
	Ch2/1	0.096	0.057	0.056	0.046	0.048	0.048	0.050	0.049
	Ch1/2	0.054	0.047	0.048	0.043	0.044	0.049	0.046	0.045
	Ch2/2	0.045	0.053	0.047	0.039	0.042	0.042	0.042	0.040
	Ch1/3	0.050	0.045	0.043	0.041	0.035	0.042	0.038	0.037
	Ch2/3	0.046	0.046	0.043	0.041	0.040	0.046	0.041	0.038
A_{cons} in %	Ch1/1	8.82	9.55	12.94	13.20	10.06	10.34	9.97	7.69
	Ch2/1	8.78	8.69	8.20	9.99	6.77	7.94	7.84	5.98
	Ch1/2	10.75	5.26	5.61	5.69	4.18	4.56	4.90	3.86
	Ch2/2	11.20	4.30	7.16	5.95	5.22	6.04	5.61	4.26
	Ch1/3	13.92	4.29	4.11	4.63	3.51	3.98	3.90	3.00
	Ch2/3	6.97	2.49	2.57	2.71	2.21	2.38	2.54	1.99
D_{50} in %	Ch1/1	47.09	58.66	43.58	70.92	66.60	64.19	64.62	65.31
	Ch2/1	29.69	59.97	60.41	68.30	63.50	63.13	62.43	63.24
	Ch1/2	57.62	69.28	64.23	68.80	67.71	65.65	68.53	67.77
	Ch2/2	69.74	54.01	67.40	74.06	68.47	70.81	69.75	71.56
	Ch1/3	63.77	65.74	67.55	70.35	77.19	70.15	73.03	74.97
	Ch2/3	73.27	59.52	62.10	71.09	73.87	64.97	74.23	76.43



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.69	0.95
Ch2/1	0.69	0.97
Ch1/2	0.70	1.01
Ch2/2	0.71	0.96
Ch1/3	0.72	0.99
Ch2/3	0.71	0.96

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



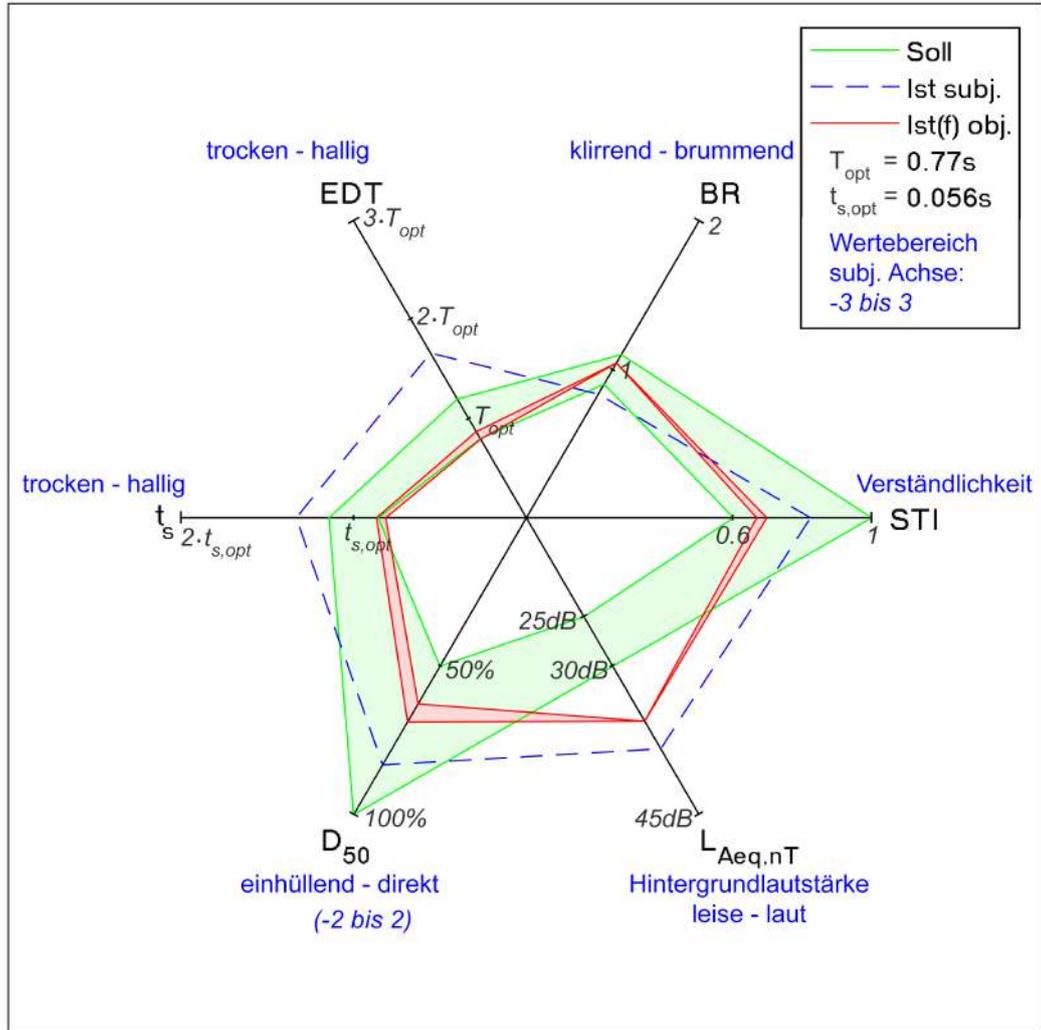
DATENBLATT HSI5



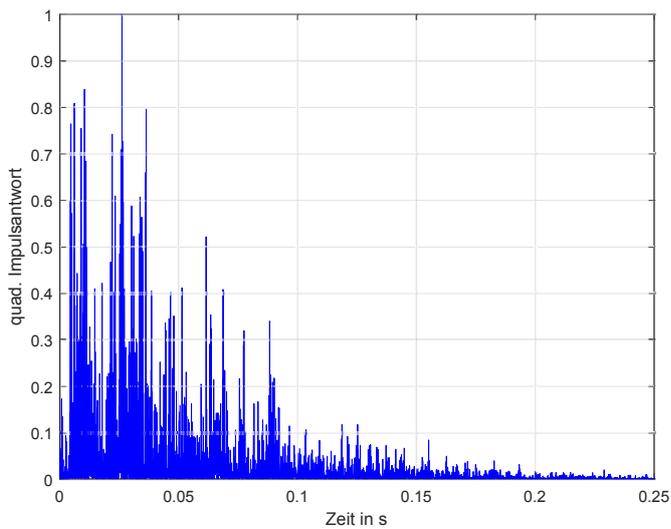
INFFELDGASSE 25/D

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

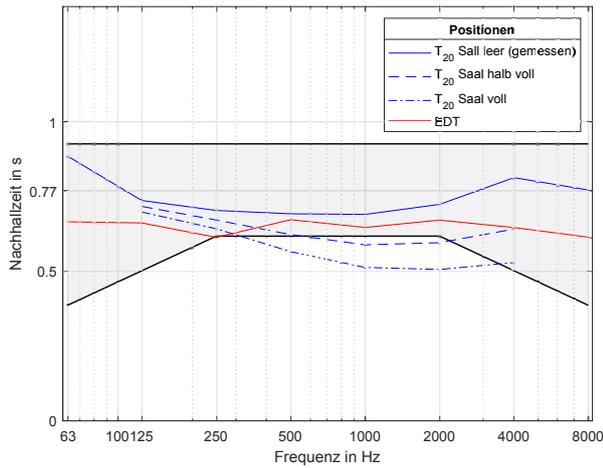
Sommersemester 2018



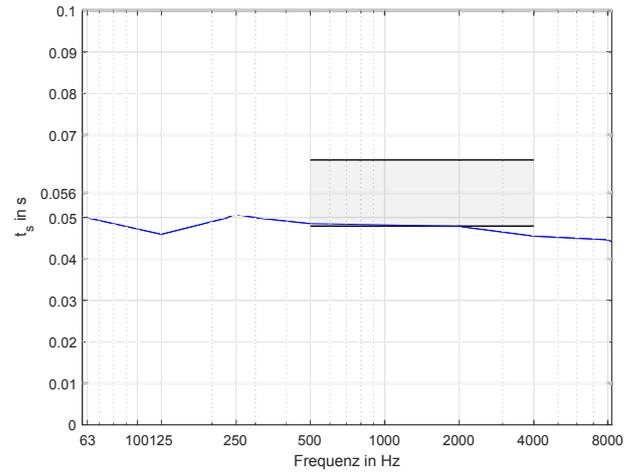
EDT... Anfangsnachhallzeit $L_{Aeq,nT}$... Anlagengeräuschpegel t_s ... Schwerpunktszeit
 D_{50} ... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis



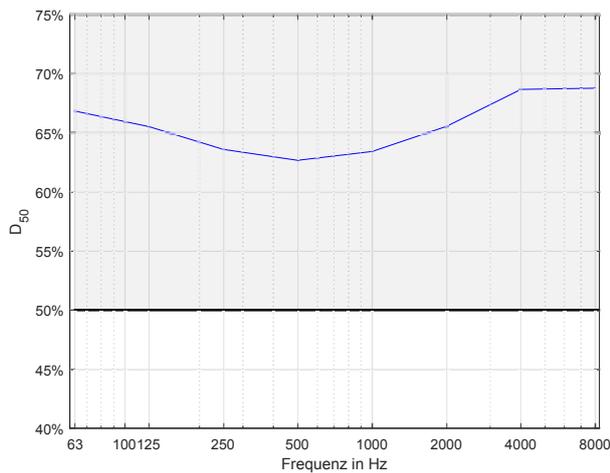
Messbedingungen	
Datum	19.05.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	292 m ³
Temperatur	22,3°C
Luftfeuchtigkeit	48,6%
L _{Aeq}	35,7 dB(A)
Bestuhlung	44 Sessel Holz
Boden	PVC
Wände	Holz, Fenster
Decke	Rigips
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Nein



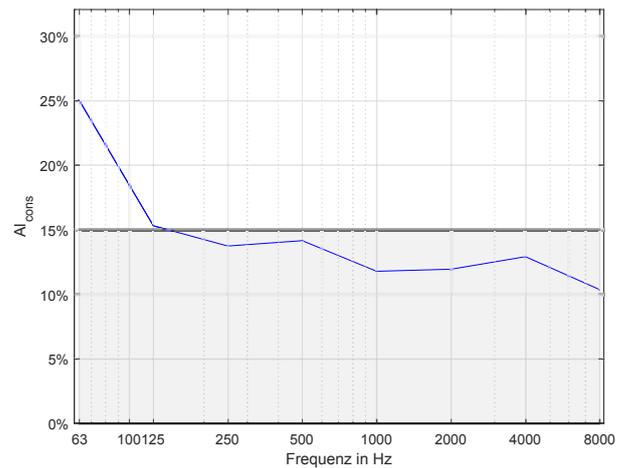
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.89	0.74	0.70	0.69	0.69	0.72	0.81	0.77
T_{20} halbvoll in s	–	0.72	0.67	0.62	0.59	0.60	0.64	–
T_{20} voll in s	–	0.70	0.64	0.57	0.51	0.51	0.53	–
EDT in s	0.67	0.66	0.61	0.67	0.65	0.67	0.65	0.61



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.050	0.046	0.050	0.049	0.048	0.048	0.046	0.045



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	67	66	64	63	63	66	69	69



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	25	15	14	14	12	12	13	10

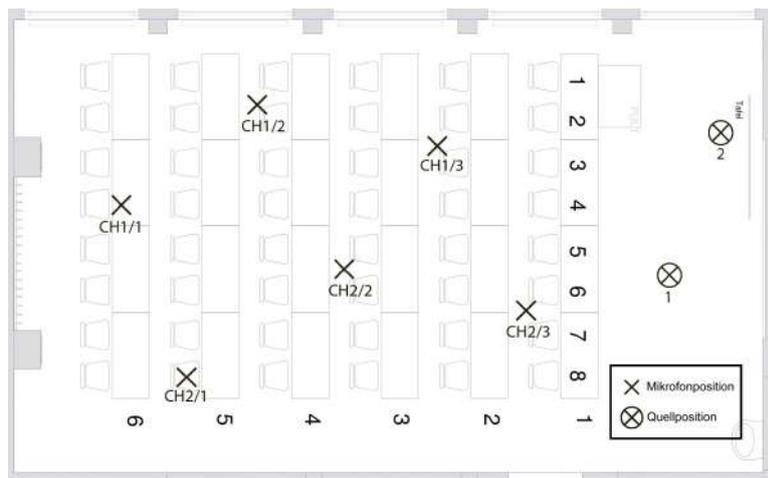
Diskussion:

Die gemessenen Gütemaße liegen zum Großteil im Sollbereich, wodurch sich eine gute Sprachverständlichkeit einstellt. Der Hintergrundpegel, welcher durch den Beamer verursacht wird, liegt über der von der Norm vorgegebenen Grenzen. In den hinteren beiden Reihen steigt der Artikulationsverlust bei tieferen Frequenzen, wodurch die Sprachverständlichkeit sinkt. Durch den Einsatz einer elektroakustischen Verstärkung kann dem in voller Besetzung entgegengewirkt werden.

Fazit:

Der Hörsaal HSi5 überzeugt durch gute Sprachverständlichkeit. Eine elektroakustische Verstärkung ist vor allem in voller Besetzung ratsam, um auch die hinteren Ränge hinreichend zu erreichen.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	1.03	0.70	0.64	0.70	0.69	0.72	0.80	0.77
	Ch2/1	0.71	0.71	0.75	0.71	0.71	0.73	0.81	0.77
	Ch1/2	0.95	0.71	0.65	0.65	0.69	0.74	0.83	0.78
	Ch2/2	0.90	0.66	0.68	0.71	0.70	0.73	0.83	0.79
	Ch1/3	1.03	0.91	0.74	0.71	0.69	0.71	0.82	0.76
	Ch2/3	0.70	0.73	0.76	0.67	0.67	0.71	0.79	0.75
EDT in s	Ch1/1	0.72	0.60	0.56	0.61	0.72	0.68	0.67	0.67
	Ch2/1	0.73	0.64	0.61	0.68	0.73	0.69	0.70	0.69
	Ch1/2	0.49	0.79	0.60	0.77	0.65	0.71	0.70	0.66
	Ch2/2	0.63	0.66	0.70	0.74	0.65	0.72	0.65	0.61
	Ch1/3	0.69	0.62	0.66	0.69	0.58	0.64	0.60	0.56
	Ch2/3	0.73	0.67	0.56	0.55	0.56	0.59	0.56	0.50
t_s in s	Ch1/1	0.067	0.039	0.046	0.061	0.057	0.053	0.050	0.052
	Ch2/1	0.050	0.046	0.056	0.057	0.054	0.054	0.051	0.052
	Ch1/2	0.044	0.049	0.057	0.052	0.055	0.053	0.051	0.051
	Ch2/2	0.039	0.048	0.055	0.047	0.050	0.052	0.049	0.044
	Ch1/3	0.056	0.050	0.050	0.039	0.038	0.041	0.042	0.037
	Ch2/3	0.043	0.043	0.040	0.035	0.037	0.035	0.029	0.032
$A_{I_{cons}}$ in %	Ch1/1	64.34	29.51	24.97	29.77	23.82	24.30	25.61	21.14
	Ch2/1	21.04	21.01	22.92	20.82	17.12	16.68	18.05	14.52
	Ch1/2	32.92	19.14	15.15	15.41	14.42	15.31	16.65	12.84
	Ch2/2	15.67	8.47	9.17	9.94	8.13	8.03	8.96	7.31
	Ch1/3	13.44	10.64	6.88	6.30	5.01	4.95	5.75	4.34
	Ch2/3	3.02	3.18	3.45	2.79	2.30	2.48	2.58	2.09
D_{50} in %	Ch1/1	44.76	70.09	74.09	48.66	56.09	62.54	64.66	62.63
	Ch2/1	71.21	66.33	59.63	53.47	58.35	58.92	65.53	63.09
	Ch1/2	72.75	69.98	55.43	63.67	57.15	61.69	64.08	62.31
	Ch2/2	76.75	62.10	57.64	64.29	59.72	61.14	65.40	70.58
	Ch1/3	62.02	60.01	61.28	71.56	76.33	71.49	73.20	77.09
	Ch2/3	73.61	64.65	73.54	74.42	72.91	77.52	79.16	76.94



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.69	0.97
Ch2/1	0.67	1.03
Ch1/2	0.67	1.01
Ch2/2	0.68	0.95
Ch1/3	0.70	1.18
Ch2/3	0.73	1.11

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



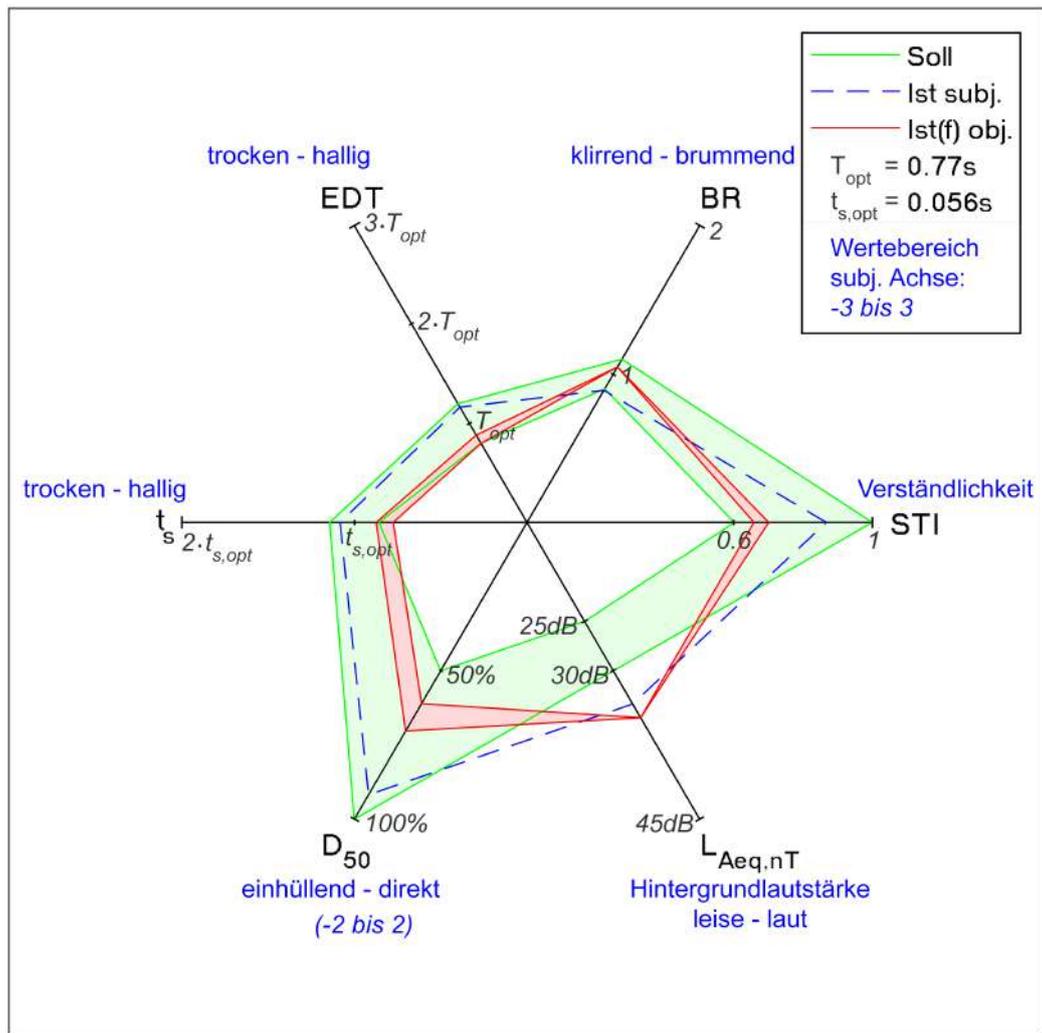
DATENBLATT HSi6



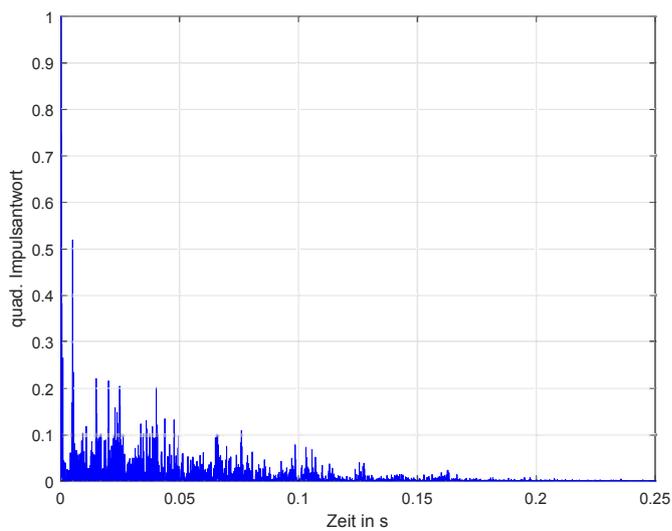
INFFELDGASSE 25/D

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

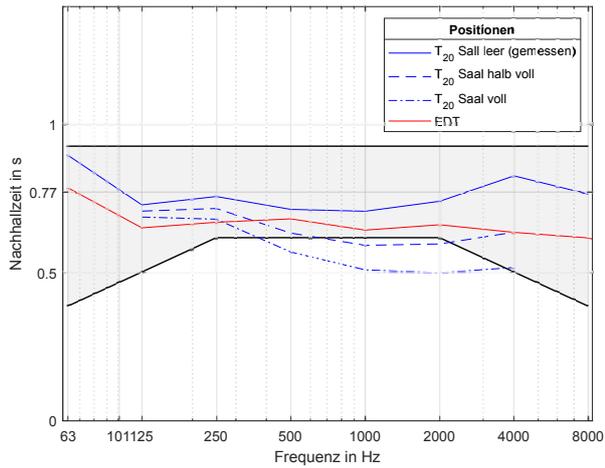
Sommersemester 2018



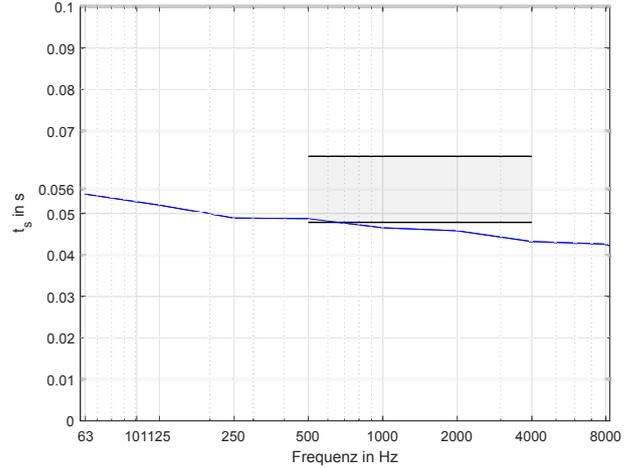
EDT... Anfangsnachhallzeit *L_{Aeq,nT}*... Anlagengeräuschpegel *t_s*... Schwerpunktszeit
D₅₀... Deutlichkeitsgrad *STI*... Sprachübertragungsindex *BR*... Bassverhältnis



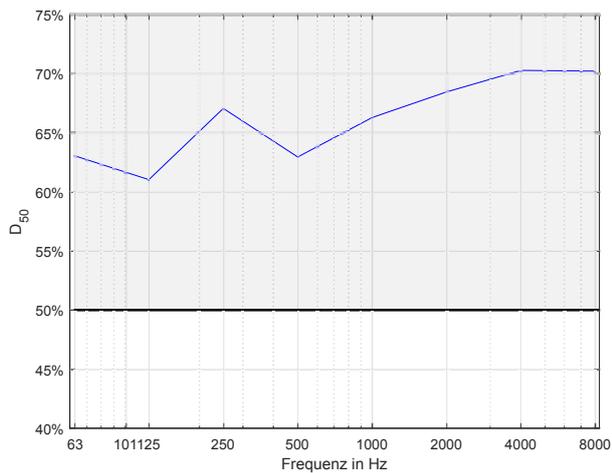
Messbedingungen	
Datum	19.05.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	290 m ³
Temperatur	22 °C
Luftfeuchtigkeit	52%
L _{Aeq}	34,9 dB(A)
Bestuhlung	48 Sessel Holz
Boden	PVC
Wände	Holz, Fensterfront
Decke	Rigips
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Nein



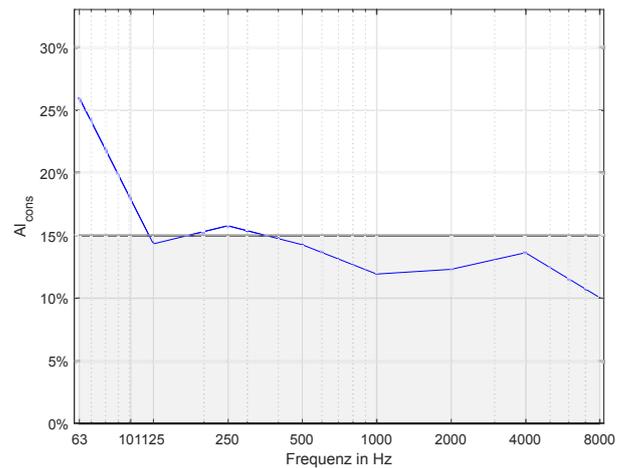
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.90	0.73	0.76	0.71	0.71	0.74	0.83	0.76
T_{20} halbvoll in s	–	0.71	0.72	0.63	0.59	0.60	0.64	–
T_{20} voll in s	–	0.69	0.68	0.57	0.51	0.50	0.52	–
EDT in s	0.79	0.65	0.67	0.68	0.64	0.66	0.63	0.62



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.055	0.052	0.049	0.049	0.047	0.046	0.043	0.043



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	63	61	67	63	66	68	70	70



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	26	14	16	14	12	12	14	10

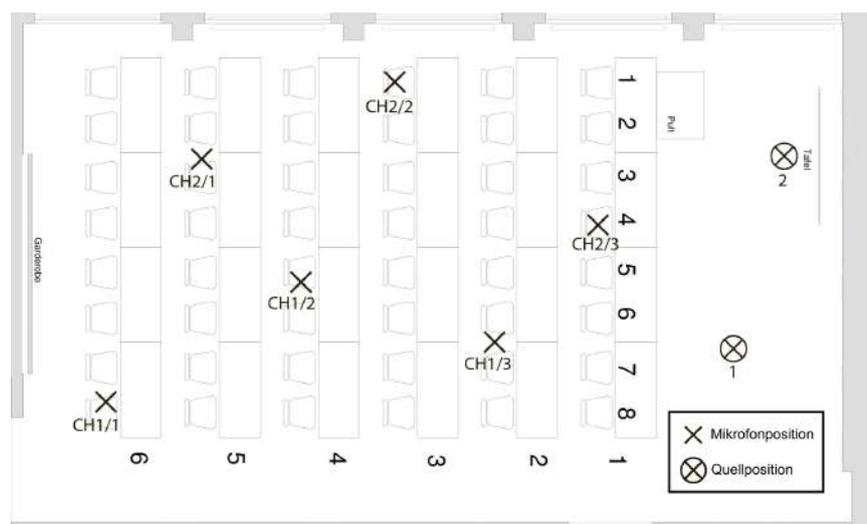
Diskussion:

Die berechneten Gütemaße im Hörsaal i6 liegen innerhalb des Sollbereichs. Der Hintergrundpegel, welcher durch den Beamer verursacht wird, weicht leicht von der Norm ab. Frequenzen zwischen $f = 500Hz$ und $f = 1kHz$ werden durch das Publikum zu stark bedämpft, wodurch der Raum tendenziell trocken wird.

Fazit:

Der Hörsaal ist in seiner Akustik gesamt in Ordnung, durch Senken des Anlagenpegels, verursacht durch den Beamer, kann die Verständlichkeit jedoch erhöht werden.

	Positionen	f in Hz							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	1.13	0.66	0.65	0.61	0.61	0.71	0.84	0.78
	Ch2/1	1.03	0.64	0.61	0.63	0.63	0.70	0.85	0.80
	Ch1/2	0.97	0.71	0.64	0.61	0.61	0.71	0.88	0.78
	Ch2/2	0.85	0.62	0.64	0.63	0.63	0.70	0.86	0.80
	Ch1/3	0.93	0.59	0.64	0.60	0.60	0.70	0.82	0.76
	Ch2/3	1.05	0.54	0.62	0.59	0.64	0.69	0.80	0.77
EDT in s	Ch1/1	0.85	0.53	0.74	0.66	0.58	0.60	0.62	0.59
	Ch2/1	0.69	0.52	0.66	0.68	0.70	0.71	0.68	0.68
	Ch1/2	0.68	0.65	0.42	0.58	0.62	0.69	0.69	0.66
	Ch2/2	0.47	0.52	0.62	0.65	0.66	0.72	0.75	0.71
	Ch1/3	0.80	0.51	0.39	0.52	0.48	0.54	0.51	0.49
	Ch2/3	0.81	0.50	0.60	0.54	0.58	0.63	0.63	0.57
t_s in s	Ch1/1	0.058	0.041	0.050	0.048	0.040	0.041	0.045	0.043
	Ch2/1	0.054	0.052	0.052	0.055	0.051	0.055	0.049	0.048
	Ch1/2	0.046	0.041	0.036	0.049	0.047	0.051	0.047	0.048
	Ch2/2	0.045	0.051	0.043	0.049	0.056	0.057	0.053	0.052
	Ch1/3	0.049	0.036	0.027	0.029	0.031	0.034	0.034	0.033
	Ch2/3	0.055	0.042	0.040	0.039	0.041	0.039	0.043	0.038
$A_{I_{cons}}$ in %	Ch1/1	24.43	8.07	7.80	7.19	5.90	7.41	9.06	6.83
	Ch2/1	61.33	24.09	23.56	23.82	19.20	22.04	28.37	22.38
	Ch1/2	20.57	11.01	8.71	7.80	6.72	8.41	11.29	7.96
	Ch2/2	29.58	15.68	16.80	15.77	13.15	15.22	19.83	15.22
	Ch1/3	3.80	1.50	1.77	1.54	1.32	1.65	1.95	1.47
	Ch2/3	14.79	3.54	4.96	4.40	4.44	4.65	5.76	4.61
D_{50} in %	Ch1/1	57.44	67.77	65.86	66.62	74.33	71.85	69.18	70.34
	Ch2/1	67.20	60.24	64.10	57.75	64.63	61.18	66.04	66.04
	Ch1/2	74.99	69.45	81.82	63.23	63.60	62.85	68.62	67.07
	Ch2/2	75.01	63.86	67.75	63.39	57.12	55.85	62.30	62.73
	Ch1/3	65.71	77.96	85.64	80.71	81.98	79.74	79.49	79.27
	Ch2/3	68.07	61.04	70.51	71.95	71.95	72.52	69.68	74.42



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.70	1.07
Ch2/1	0.69	1.00
Ch1/2	0.70	1.10
Ch2/2	0.67	1.02
Ch1/3	0.75	1.02
Ch2/3	0.71	0.94

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



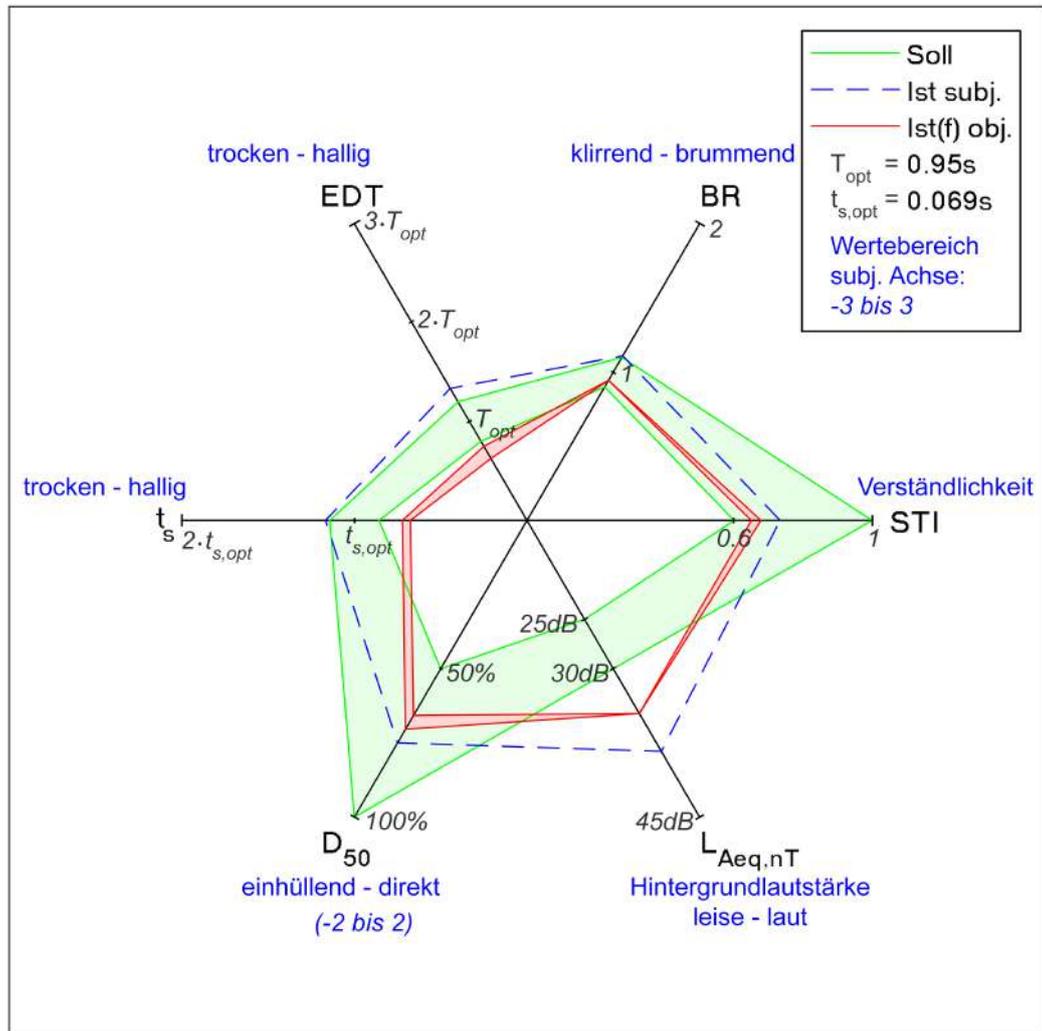
DATENBLATT HSI7



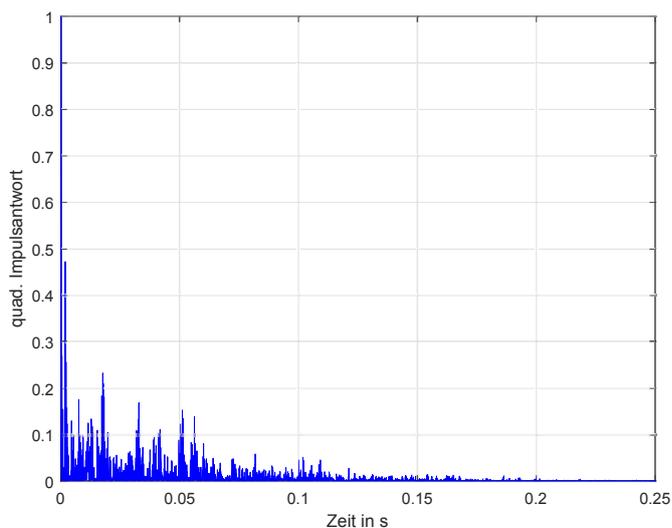
INFFELDASSE 25/D

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

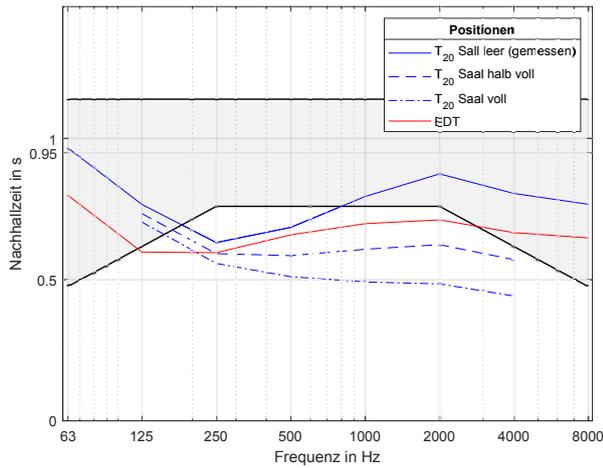
Sommersemester 2018



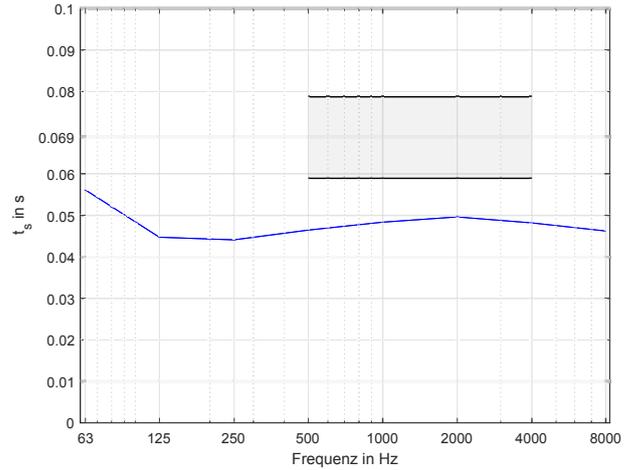
EDT... Anfangsnachhallzeit $L_{Aeq,nT}$... Anlagengeräuschpegel t_s ... Schwerpunktszeit
 D_{50} ... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis



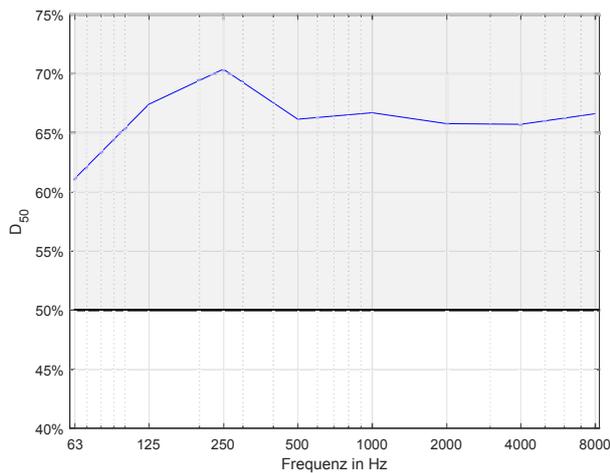
Messbedingungen	
Datum	20.05.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	884 m ³
Temperatur	24°C
Luftfeuchtigkeit	46,6%
L_{Aeq}	34,7 dB(A)
Bestuhlung	206 Sitze Holz
Boden	PVC
Wände	Holz
Decke	Rigips
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Ja



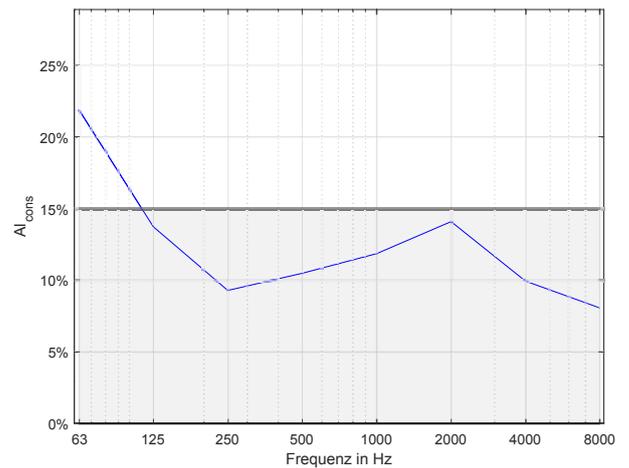
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.97	0.77	0.63	0.69	0.80	0.88	0.81	0.77
T_{20} halbvoll in s	–	0.73	0.59	0.59	0.61	0.62	0.57	–
T_{20} voll in s	–	0.70	0.56	0.51	0.49	0.49	0.44	–
EDT in s	0.80	0.60	0.60	0.66	0.70	0.71	0.67	0.65



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.056	0.045	0.044	0.047	0.048	0.050	0.048	0.046



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	61	67	70	66	67	66	66	67



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	22	14	9	10	12	14	10	8

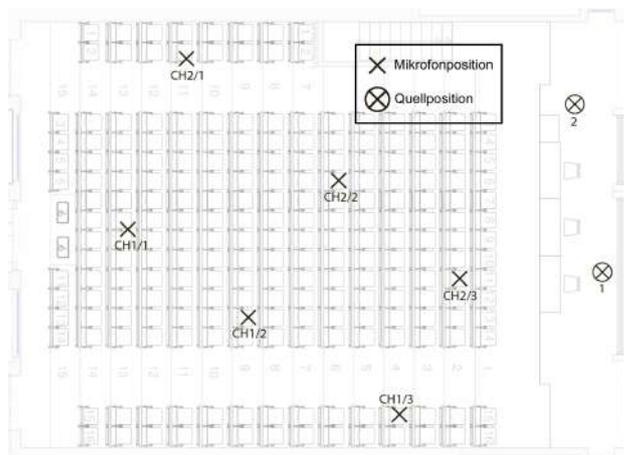
Diskussion:

Der Hörsaal i7 ist mit 206 Sitzen der größte im Gebäude 25/D. Auffällig ist die kurze Nachhallzeit im halb- und voll besetzten Zustand, wodurch der Aufwand die hinteren Reihen genügend zu erreichen steigt. Durch eine Verstärkung kann diese Eigenschaft kompensiert werden.

Fazit:

Eine zu kurze Nachhallzeit ist bezogen auf diese Raumgröße nicht unproblematisch, es empfiehlt sich in jedem Fall der Einsatz eines Mikrofons. Durch Beachtung dieser Eigenschaft ist eine gute Verständlichkeit gegeben.

	Positionen	f in Hz							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	1.03	0.81	0.75	0.71	0.84	1.02	0.86	0.85
	Ch2/1	1.06	0.79	0.63	0.72	0.84	0.95	0.87	0.82
	Ch1/2	0.96	0.76	0.61	0.70	0.80	0.86	0.83	0.78
	Ch2/2	0.72	0.70	0.63	0.67	0.77	0.81	0.76	0.73
	Ch1/3	1.11	0.74	0.60	0.63	0.79	0.80	0.77	0.73
	Ch2/3	0.93	0.79	0.56	0.69	0.73	0.80	0.74	0.69
EDT in s	Ch1/1	0.95	0.49	0.60	0.77	0.87	0.73	0.75	0.73
	Ch2/1	0.72	0.66	0.68	0.80	0.68	0.81	0.68	0.72
	Ch1/2	0.97	0.49	0.47	0.65	0.69	0.73	0.69	0.67
	Ch2/2	0.90	0.71	0.61	0.66	0.69	0.65	0.72	0.65
	Ch1/3	0.58	0.73	0.60	0.59	0.56	0.70	0.61	0.60
	Ch2/3	0.69	0.50	0.60	0.47	0.70	0.64	0.54	0.52
t_s in s	Ch1/1	0.061	0.044	0.050	0.060	0.062	0.058	0.054	0.058
	Ch2/1	0.052	0.049	0.051	0.053	0.046	0.053	0.055	0.051
	Ch1/2	0.076	0.040	0.042	0.049	0.054	0.050	0.052	0.049
	Ch2/2	0.054	0.055	0.041	0.046	0.046	0.045	0.046	0.043
	Ch1/3	0.047	0.043	0.041	0.039	0.039	0.046	0.045	0.041
	Ch2/3	0.047	0.038	0.039	0.032	0.042	0.045	0.038	0.035
$A_{I_{cons}}$ in %	Ch1/1	42.30	26.43	22.26	19.87	23.44	31.71	19.47	16.80
	Ch2/1	38.02	24.82	13.30	17.49	19.86	23.37	17.06	13.39
	Ch1/2	21.89	13.80	8.87	11.76	12.77	13.93	11.17	8.63
	Ch2/2	6.59	6.07	4.82	5.49	5.90	6.12	4.68	3.81
	Ch1/3	18.06	7.64	5.02	5.96	7.05	6.98	5.48	4.39
	Ch2/3	4.54	3.65	1.49	2.39	2.15	2.47	1.82	1.40
D_{50} in %	Ch1/1	59.26	77.35	67.28	55.41	55.93	58.73	61.33	56.88
	Ch2/1	63.67	57.79	61.53	60.20	66.85	62.15	56.39	59.74
	Ch1/2	40.96	72.61	74.05	61.40	64.37	65.80	62.37	64.60
	Ch2/2	64.93	58.93	70.88	68.82	66.79	70.76	69.13	68.04
	Ch1/3	70.58	63.13	71.21	69.72	76.59	69.10	70.39	73.52
	Ch2/3	67.25	74.68	77.33	81.39	69.66	68.12	74.73	76.96



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.67	1.01
Ch2/1	0.66	0.91
Ch1/2	0.69	0.91
Ch2/2	0.69	0.93
Ch1/3	0.71	0.95
Ch2/3	0.72	0.96

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



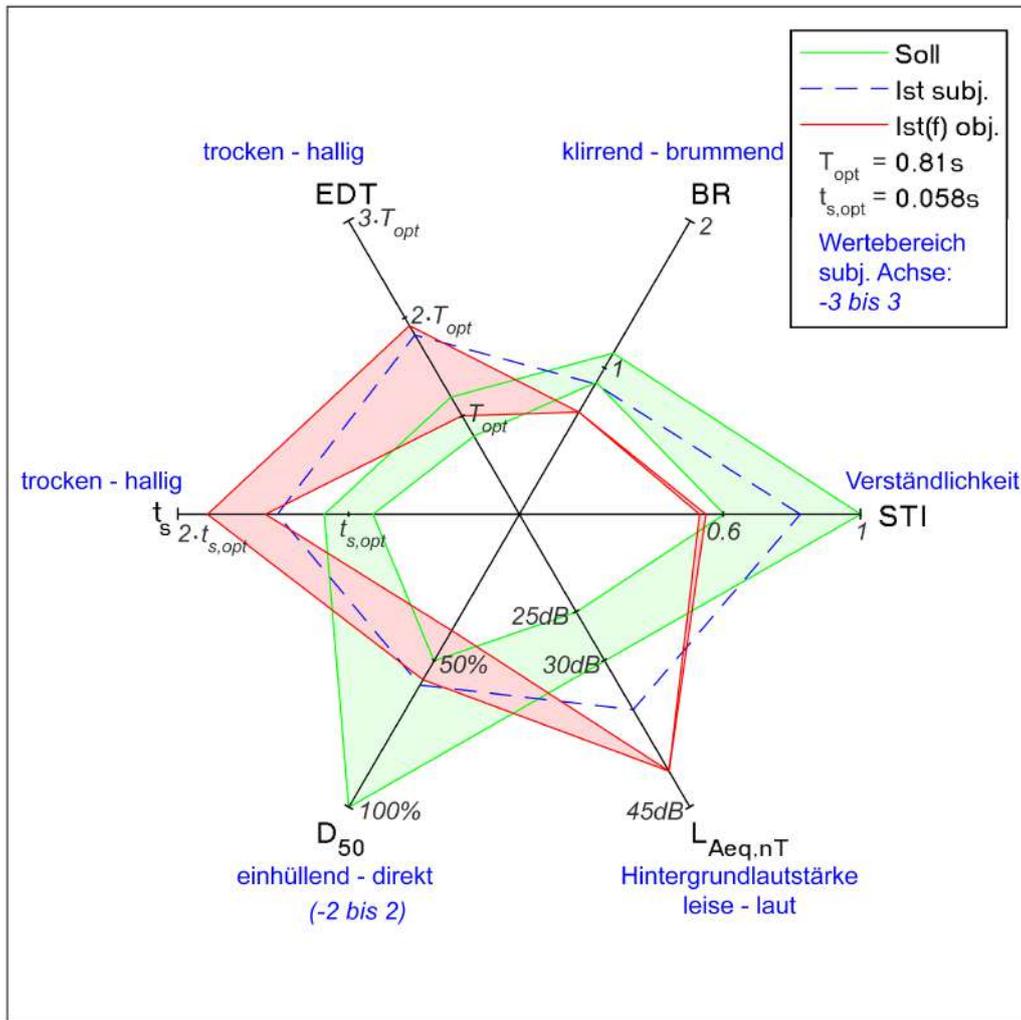
DATENBLATT HSi8



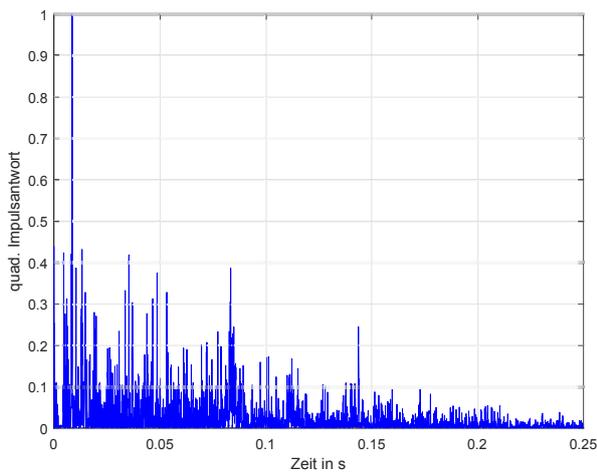
INFFELDGASSE 13

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

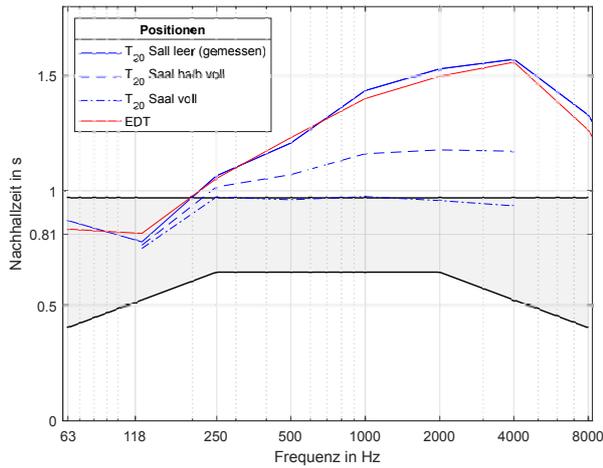
Sommersemester 2018



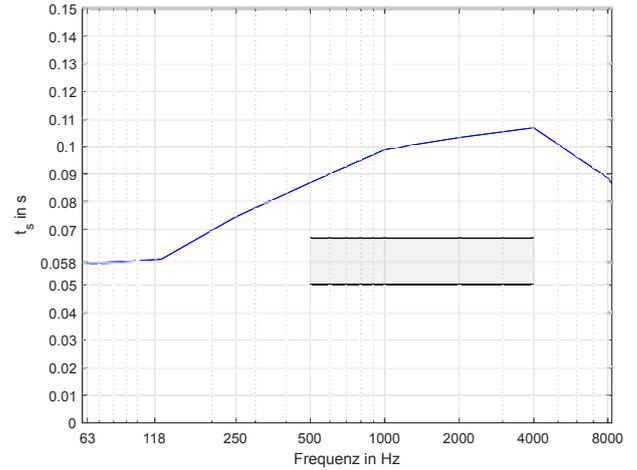
EDT... Anfangsnachhallzeit *L_{Aeq,nT}*... Anlagengeräuschpegel *t_s*... Schwerpunktszeit
D₅₀... Deutlichkeitsgrad *STI*... Sprachübertragungsindex *BR*... Bassverhältnis



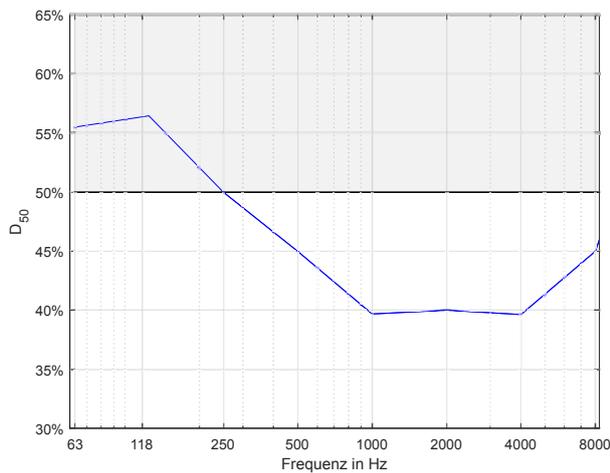
Messbedingungen	
Datum	08.06.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	363 m ³
Temperatur	24,6°C
Luftfeuchtigkeit	60,7%
L _{Aeq}	41,7 dB(A)
Bestuhlung	40 Sessel Holz
Boden	Parkett
Wände	Feinlochvertäfelung, Fenster
Decke	Feinlochvertäfelung
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Nein



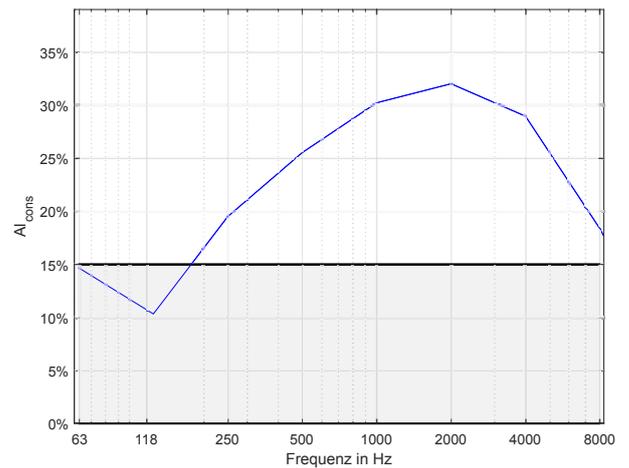
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.87	0.78	1.06	1.21	1.43	1.53	1.57	1.33
T_{20} halbvoll in s	—	0.76	1.02	1.07	1.16	1.18	1.17	—
T_{20} voll in s	—	0.75	0.97	0.96	0.97	0.96	0.93	—
EDT in s	0.83	0.81	1.05	1.23	1.40	1.50	1.56	1.26



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.057	0.059	0.075	0.087	0.099	0.103	0.107	0.089



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	55	56	50	45	40	40	40	45



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	15	10	20	26	30	32	29	18

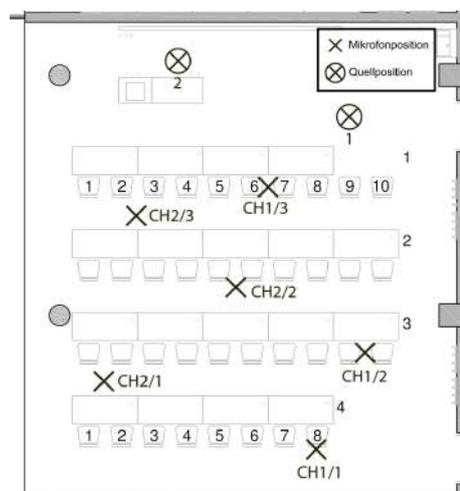
Diskussion:

Im HSi8 gibt es sehr große Differenzen bezüglich optimaler und errechneter Werte. Die Nachhallzeit übersteigt nahezu in jedem Frequenzband die Toleranzgrenze, womit der Artikulationsverlust zu hoch ausfällt. Ebenfalls am Deutlichkeitsgrad D_{50} ist erkennbar, dass die Akustik im Raum unzureichend ausfällt.

Fazit:

Durch stark abweichende Werte entsteht im HSi8 eine Akustik, welche es dem Vortragenden erschwert, alle Studenten in gleichem Maße zu erreichen. Die Werte deuten darauf hin, dass eine akustische Sanierung erforderlich ist.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	0.91	0.80	0.99	1.19	1.46	1.53	1.59	1.31
	Ch2/1	0.94	0.66	1.05	1.19	1.42	1.57	1.55	1.37
	Ch1/2	0.73	0.80	1.11	1.21	1.44	1.51	1.58	1.29
	Ch2/2	0.98	0.81	1.13	1.29	1.44	1.54	1.57	1.35
	Ch1/3	0.88	0.76	1.08	1.19	1.44	1.50	1.55	1.31
	Ch2/3	0.78	0.84	1.04	1.18	1.40	1.52	1.59	1.34
EDT in s	Ch1/1	0.92	0.83	0.94	1.23	1.35	1.51	1.59	1.26
	Ch2/1	1.04	0.89	1.12	1.20	1.38	1.53	1.55	1.31
	Ch1/2	0.74	0.77	0.88	1.30	1.35	1.45	1.54	1.27
	Ch2/2	0.84	0.74	1.12	1.26	1.43	1.53	1.64	1.26
	Ch1/3	0.85	0.89	1.27	1.21	1.50	1.45	1.50	1.23
	Ch2/3	0.61	0.76	0.98	1.19	1.40	1.51	1.53	1.24
t_s in s	Ch1/1	0.069	0.064	0.074	0.100	0.102	0.106	0.111	0.095
	Ch2/1	0.066	0.069	0.095	0.092	0.103	0.108	0.113	0.096
	Ch1/2	0.057	0.048	0.060	0.085	0.097	0.102	0.104	0.084
	Ch2/2	0.049	0.052	0.086	0.083	0.100	0.111	0.118	0.093
	Ch1/3	0.049	0.068	0.057	0.074	0.091	0.091	0.092	0.080
	Ch2/3	0.055	0.055	0.076	0.087	0.100	0.101	0.103	0.083
A_{cons} in %	Ch1/1	26.30	19.71	28.98	42.63	53.48	54.12	50.65	30.29
	Ch2/1	26.77	12.94	32.91	42.49	50.23	56.67	47.58	33.10
	Ch1/2	14.38	12.11	24.36	29.44	34.34	35.41	33.11	19.72
	Ch2/2	11.87	7.95	15.54	20.09	21.06	22.24	20.06	13.03
	Ch1/3	2.75	2.15	4.20	5.24	6.30	6.24	5.76	3.65
	Ch2/3	5.99	7.19	11.19	13.45	16.11	17.61	16.77	10.47
D_{50} in %	Ch1/1	48.27	50.38	47.88	34.08	37.63	40.37	39.77	40.83
	Ch2/1	47.78	48.01	29.44	41.75	35.31	37.08	36.60	40.44
	Ch1/2	58.14	70.47	64.75	48.60	40.33	38.91	40.71	48.46
	Ch2/2	63.33	62.31	44.53	51.30	39.08	35.75	33.02	41.44
	Ch1/3	61.59	46.86	64.65	53.36	46.85	47.02	48.36	51.13
	Ch2/3	53.77	60.60	48.71	40.81	38.92	40.92	39.38	47.66



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.54	0.68
Ch2/1	0.53	0.65
Ch1/2	0.57	0.72
Ch2/2	0.54	0.71
Ch1/3	0.56	0.70
Ch2/3	0.55	0.73

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



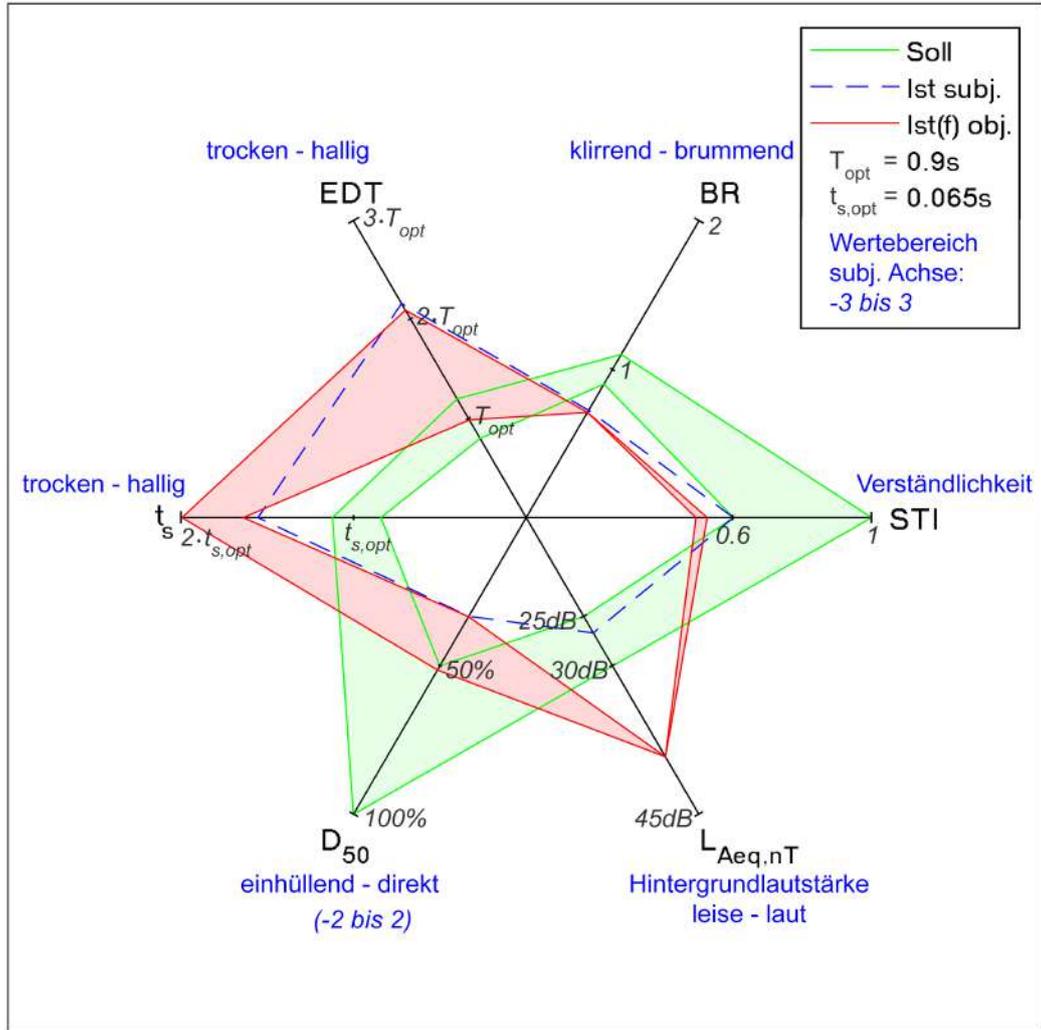
DATENBLATT HSi9



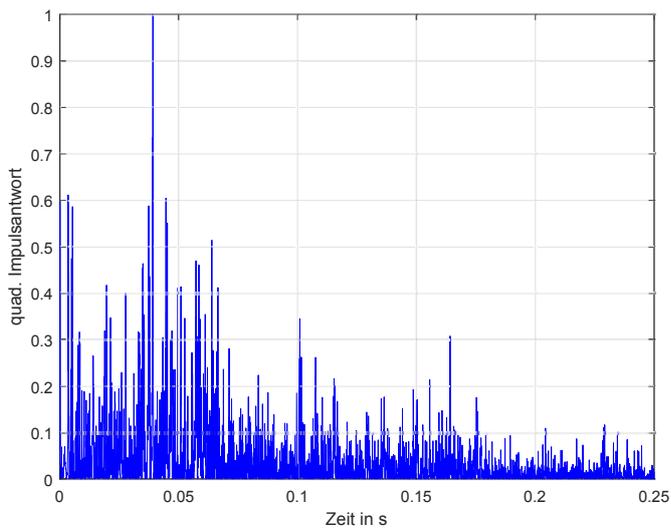
INFFELDGASSE 13

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

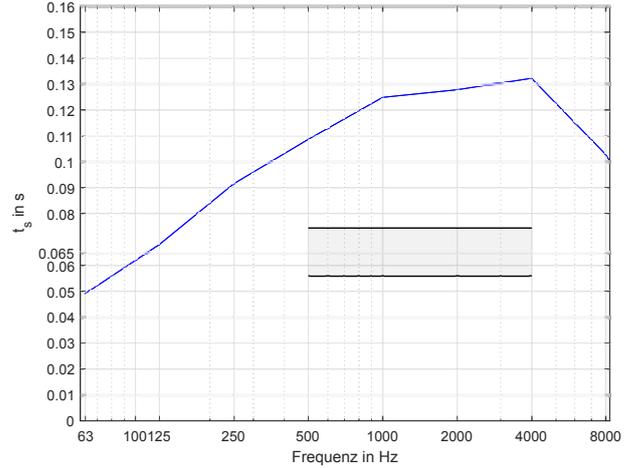
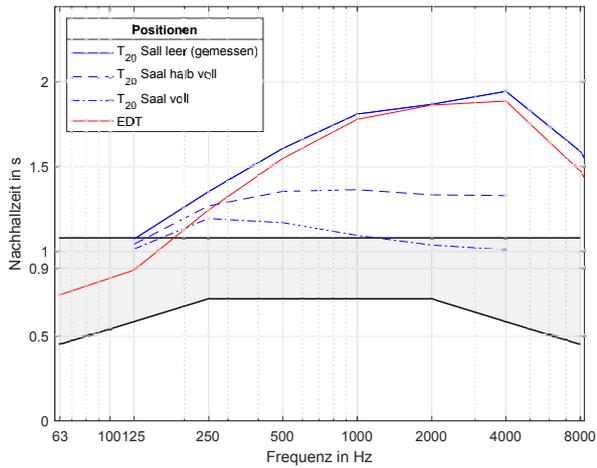
Sommersemester 2018



EDT... Anfangsnachhallzeit *L_{Aeq,nT}*... Anlagengeräuschpegel *t_s*... Schwerpunktszeit
D₅₀... Deutlichkeitsgrad *STI*... Sprachübertragungsindex *BR*... Bassverhältnis

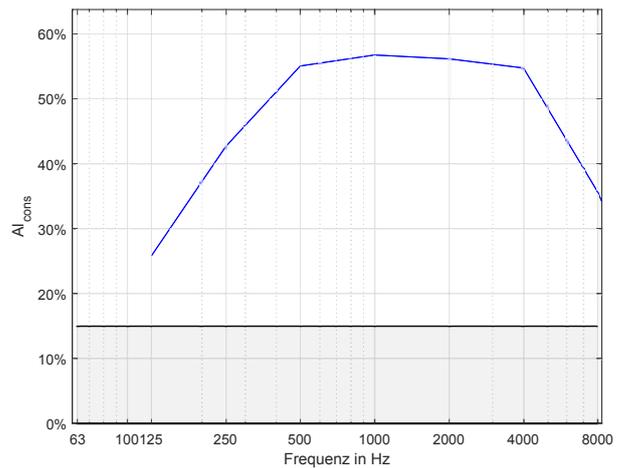
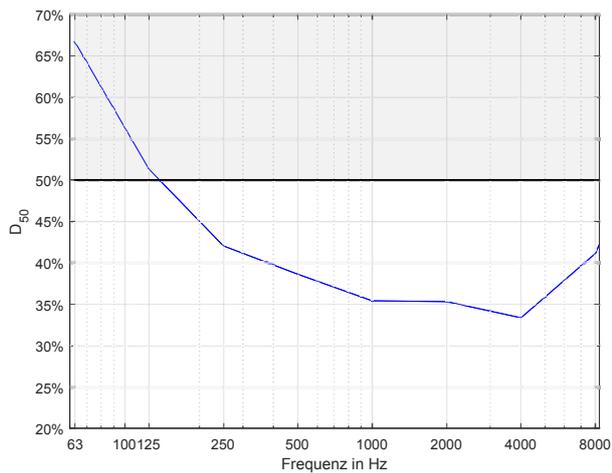


Messbedingungen	
Datum	09.06.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	643 m ³
Temperatur	23,4°C
Luftfeuchtigkeit	63,3%
L _{Aeq}	39,7 dB(A)
Bestuhlung	70 Sessel Holz
Boden	Holzparkett
Wände	Fenster, Holz
Decke	Rigips
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Nein



Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.65	1.07	1.35	1.61	1.81	1.87	1.94	1.59
T_{20} halbvoll in s	–	1.04	1.27	1.35	1.36	1.33	1.33	–
T_{20} voll in s	–	1.01	1.19	1.17	1.09	1.04	1.01	–
EDT in s	0.74	0.89	1.24	1.55	1.78	1.86	1.89	1.47

Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.049	0.068	0.092	0.109	0.125	0.128	0.132	0.103



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	67	51	42	39	35	35	33	41

Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	11	26	43	55	57	56	55	36

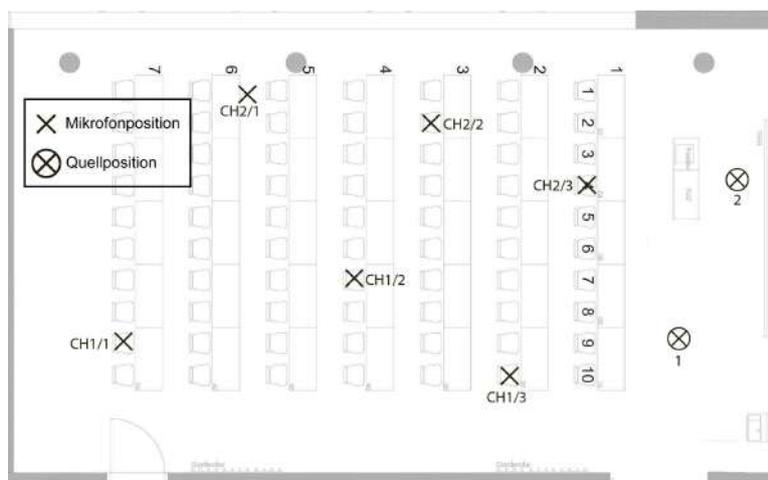
Diskussion:

Auffällig im HSi9 sind die enorm hohen Werte des Al_{cons} in den letzten beiden Reihen. Subjektiv wurde der Hörsaal in diesem Bereich als sehr hallig evaluiert. Der daraus resultierende Deutlichkeitsgrad ist im Großteil der Messpunkte zu niedrig.

Fazit:

Durch überwiegende Abweichungen im gesamten Frequenzbereich der Gütemaße und dem ergänzenden subjektiven Eindruck empfiehlt sich im HSi9 eine akustische Sanierung.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	0.97	0.95	1.33	1.67	1.83	1.90	1.92	1.59
	Ch2/1	0.56	1.10	1.37	1.58	1.84	1.87	1.97	1.61
	Ch1/2	0.79	1.18	1.28	1.60	1.81	1.85	1.96	1.59
	Ch2/2	0.64	1.00	1.41	1.61	1.81	1.86	1.91	1.59
	Ch1/3	0.60	1.03	1.30	1.63	1.80	1.85	1.92	1.58
	Ch2/3	0.52	1.18	1.41	1.55	1.77	1.87	1.98	1.57
EDT in s	Ch1/1	0.77	1.16	1.48	1.52	1.82	1.84	1.91	1.49
	Ch2/1	0.80	0.82	0.96	1.47	1.85	1.95	1.86	1.56
	Ch1/2	1.18	1.09	1.29	1.69	1.73	1.86	1.87	1.48
	Ch2/2	0.65	0.79	1.10	1.52	1.71	1.88	1.97	1.43
	Ch1/3	0.63	0.79	1.38	1.54	1.78	1.84	1.91	1.46
	Ch2/3	0.41	0.68	1.24	1.55	1.78	1.80	1.79	1.40
t_s in s	Ch1/1	0.041	0.073	0.095	0.115	0.137	0.142	0.140	0.110
	Ch2/1	0.055	0.069	0.075	0.115	0.131	0.141	0.141	0.115
	Ch1/2	0.074	0.088	0.097	0.122	0.133	0.137	0.140	0.112
	Ch2/2	0.047	0.061	0.092	0.116	0.134	0.128	0.136	0.099
	Ch1/3	0.048	0.062	0.096	0.092	0.111	0.109	0.120	0.092
	Ch2/3	0.029	0.055	0.095	0.093	0.104	0.111	0.117	0.089
A_{cons} in %	Ch1/1	48.41	46.47	90.52	100.00	100.00	100.00	100.00	77.63
	Ch2/1	12.04	46.88	73.69	96.85	100.00	100.00	98.90	59.31
	Ch1/2	16.67	27.59	33.15	53.60	56.74	55.31	53.40	31.18
	Ch2/2	6.84	16.42	31.87	41.88	44.09	42.74	39.12	24.07
	Ch1/3	4.77	9.76	16.10	25.15	25.61	24.51	22.94	13.54
	Ch2/3	1.42	7.78	10.71	12.89	14.09	14.42	14.16	7.88
D_{50} in %	Ch1/1	81.99	51.04	44.47	38.42	33.83	27.60	30.05	37.57
	Ch2/1	65.67	55.39	56.51	29.26	32.12	29.69	28.61	35.74
	Ch1/2	48.25	32.61	35.31	36.39	27.50	27.78	29.05	35.05
	Ch2/2	66.92	54.92	37.44	29.83	27.02	36.15	33.26	43.30
	Ch1/3	54.34	56.46	38.80	49.60	43.84	45.40	39.13	46.80
	Ch2/3	83.62	57.67	39.89	48.37	48.30	45.38	40.19	48.44



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.50	0.65
Ch2/1	0.51	0.72
Ch1/2	0.48	0.72
Ch2/2	0.51	0.70
Ch1/3	0.53	0.68
Ch2/3	0.54	0.78

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



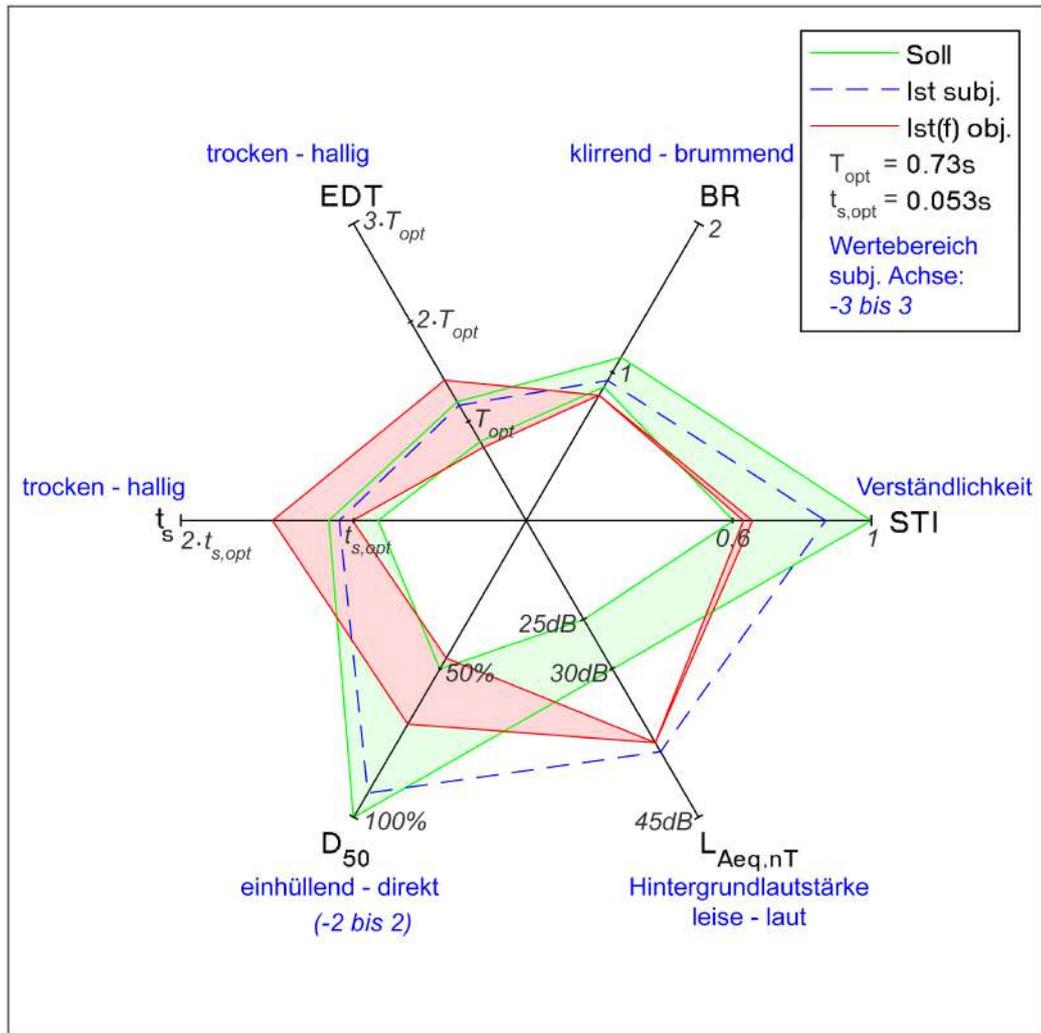
DATENBLATT HSi10



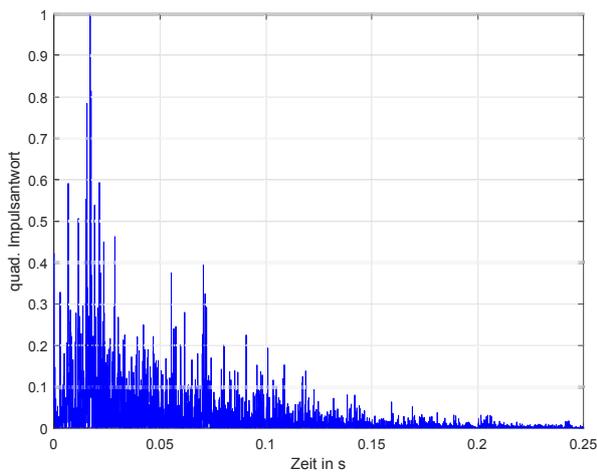
INFFELDGASSE 23

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

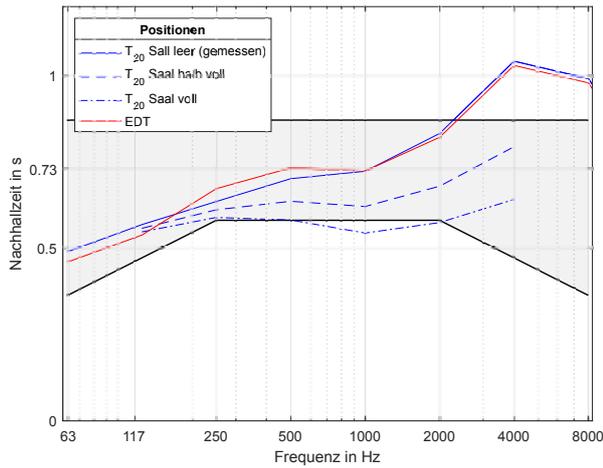
Sommersemester 2018



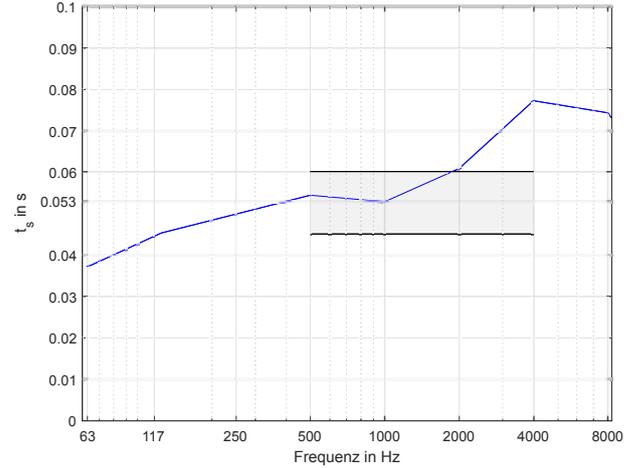
EDT... Anfangsnachhallzeit LAeq,nT... Anlagengeräuschpegel ts... Schwerpunktszeit
 D50... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis



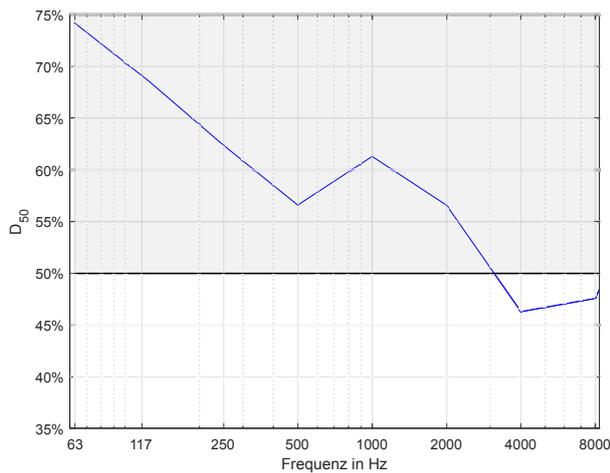
Messbedingungen	
Datum	08.06.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	219 m ³
Temperatur	25, 8°C
Luftfeuchtigkeit	60, 8%
LAeq	37,6 dB(A)
Bestuhlung	30 Sessel Holz
Boden	Parkett
Wände	Feinlochvertäfelung, Fenster
Decke	Feinlochvertäfelung
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Nein



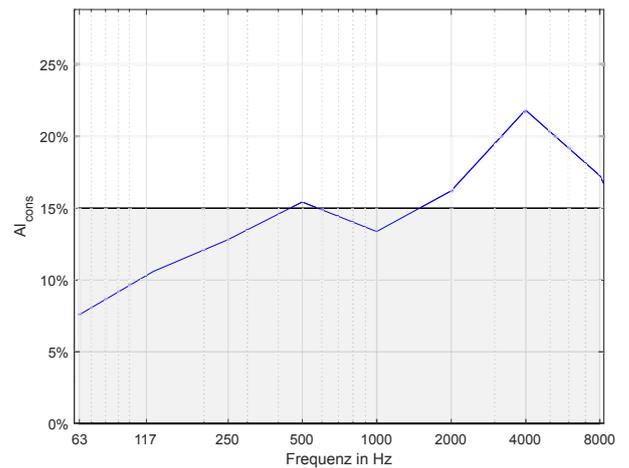
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.49	0.57	0.64	0.70	0.72	0.83	1.04	0.99
T_{20} halbvoll in s	–	0.56	0.61	0.64	0.62	0.68	0.79	–
T_{20} voll in s	–	0.55	0.59	0.58	0.54	0.57	0.64	–
EDT in s	0.46	0.54	0.67	0.73	0.72	0.82	1.03	0.98



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.037	0.045	0.050	0.054	0.053	0.061	0.077	0.074



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	74	69	62	57	61	57	46	48



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	8	11	13	15	13	16	22	17

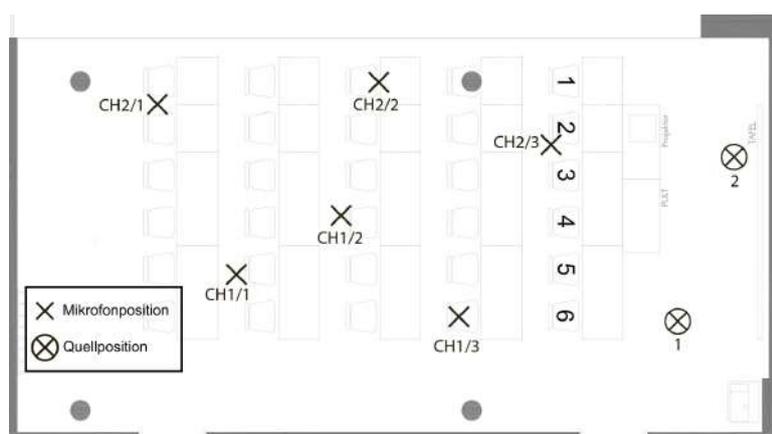
Diskussion:

Im Hörsaal i10 liegen die Gütemaße zum Großteil im Optimalbereich. Der erhöhte Hintergrundpegel, welcher durch den Beamer erzeugt wird, mindert eventuell die Sprachverständlichkeit. Lediglich bei $f = 4kHz$ weicht die Nachhallzeit im leeren Zustand vom Toleranzband ab.

Fazit:

Der HSi10 kann bezüglich seiner Akustik als in Ordnung eingestuft werden. Verbesserungspotential gibt es bei der Wahl der technischen Einrichtungen, wie des Beamers, um den Hintergrund zu senken, ist jedoch aufgrund der geringen Raumgröße nicht zwingend nötig.

	Positionen	f in Hz							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	0.58	0.66	0.68	0.72	0.75	0.84	1.05	1.00
	Ch2/1	0.50	0.54	0.61	0.74	0.73	0.84	1.05	0.98
	Ch1/2	0.50	0.61	0.65	0.69	0.72	0.85	1.06	1.00
	Ch2/2	0.44	0.61	0.68	0.70	0.75	0.84	1.05	0.98
	Ch1/3	0.40	0.55	0.55	0.73	0.72	0.82	1.03	1.01
	Ch2/3	0.52	0.45	0.64	0.64	0.68	0.81	1.02	0.98
EDT in s	Ch1/1	0.37	0.48	0.58	0.82	0.72	0.84	1.06	1.01
	Ch2/1	0.43	0.61	0.69	0.67	0.66	0.75	0.97	0.97
	Ch1/2	0.34	0.64	0.75	0.80	0.76	0.82	1.04	0.99
	Ch2/2	0.57	0.43	0.66	0.74	0.64	0.83	1.05	1.00
	Ch1/3	0.54	0.58	0.70	0.73	0.75	0.89	1.05	1.00
	Ch2/3	0.51	0.48	0.65	0.64	0.81	0.80	0.99	0.90
t_s in s	Ch1/1	0.029	0.044	0.052	0.057	0.054	0.066	0.083	0.080
	Ch2/1	0.048	0.049	0.048	0.056	0.053	0.059	0.078	0.074
	Ch1/2	0.036	0.054	0.062	0.060	0.056	0.065	0.082	0.078
	Ch2/2	0.035	0.038	0.047	0.055	0.052	0.057	0.078	0.076
	Ch1/3	0.040	0.047	0.054	0.051	0.056	0.063	0.075	0.072
	Ch2/3	0.034	0.041	0.036	0.048	0.048	0.056	0.067	0.066
A_{cons} in %	Ch1/1	16.53	21.74	23.64	25.66	23.18	26.60	35.99	29.00
	Ch2/1	11.23	13.59	18.49	27.35	21.45	26.56	35.57	27.47
	Ch1/2	7.21	11.05	13.02	14.21	12.54	16.25	22.07	17.14
	Ch2/2	5.92	11.64	14.22	14.91	14.21	16.66	22.49	17.49
	Ch1/3	2.51	4.18	4.61	7.64	6.22	7.64	10.12	8.52
	Ch2/3	1.99	1.39	2.83	2.83	2.64	3.51	4.77	3.94
D_{50} in %	Ch1/1	86.04	74.95	56.52	57.54	60.06	53.22	43.86	44.53
	Ch2/1	58.35	66.39	65.76	53.79	60.67	56.56	44.35	48.36
	Ch1/2	81.95	61.47	49.33	49.96	57.92	53.05	41.80	43.86
	Ch2/2	72.44	76.43	70.22	53.38	62.26	60.65	45.00	46.16
	Ch1/3	67.43	63.05	56.94	63.38	60.39	56.30	48.19	47.90
	Ch2/3	78.99	69.09	75.58	61.52	66.45	59.68	54.58	54.67



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.64	0.91
Ch2/1	0.65	0.78
Ch1/2	0.62	0.89
Ch2/2	0.65	0.90
Ch1/3	0.63	0.76
Ch2/3	0.67	0.82

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



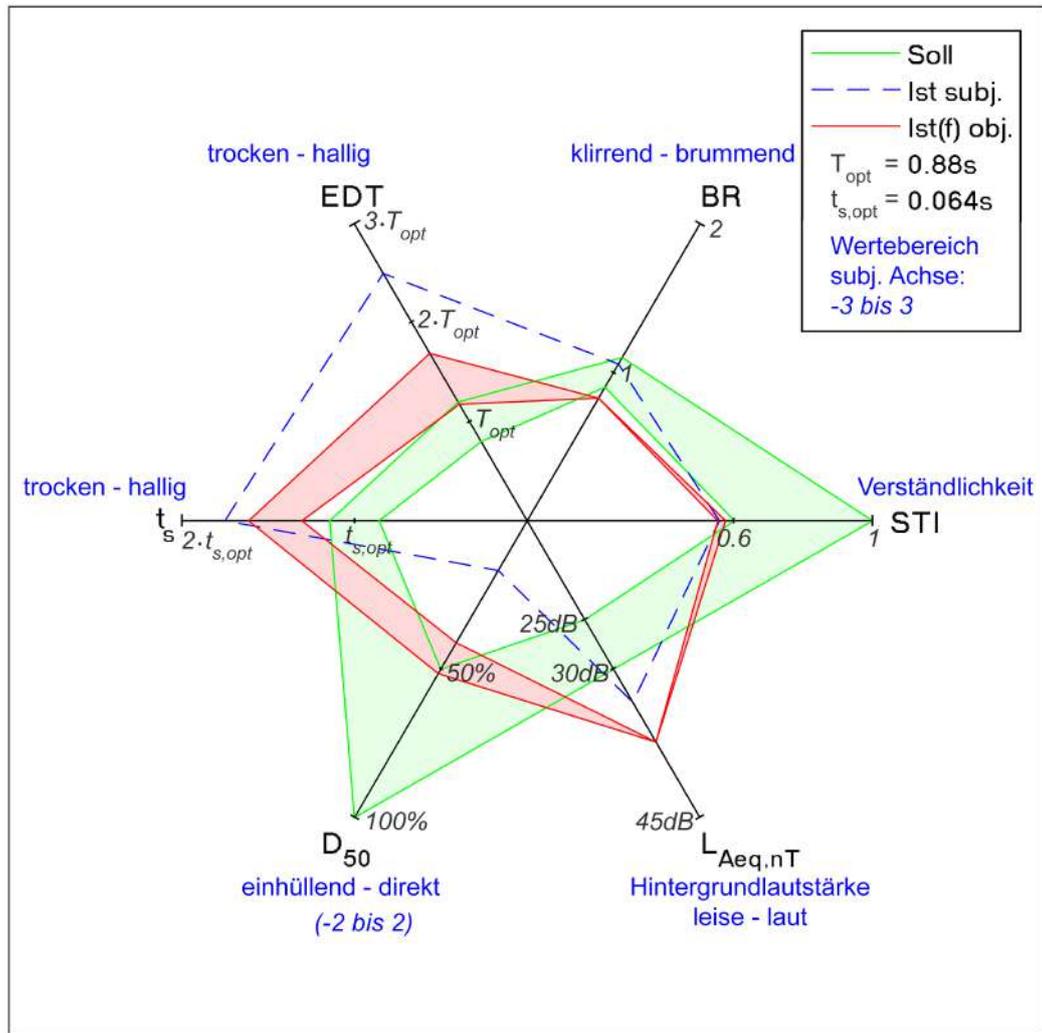
DATENBLATT HSi11



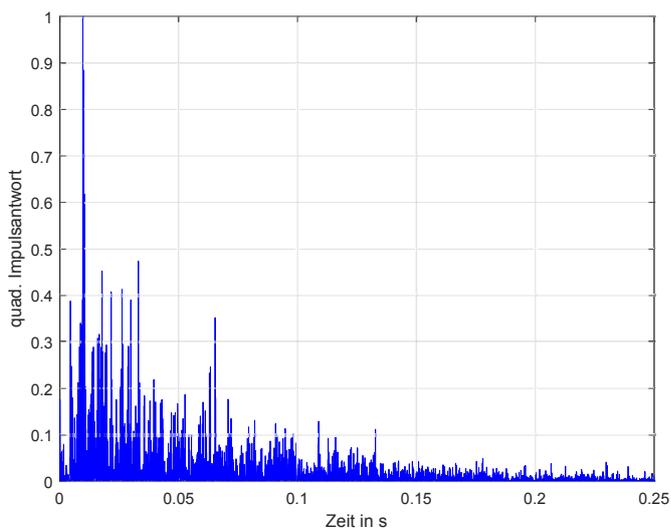
INFFELDASSE 16B

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

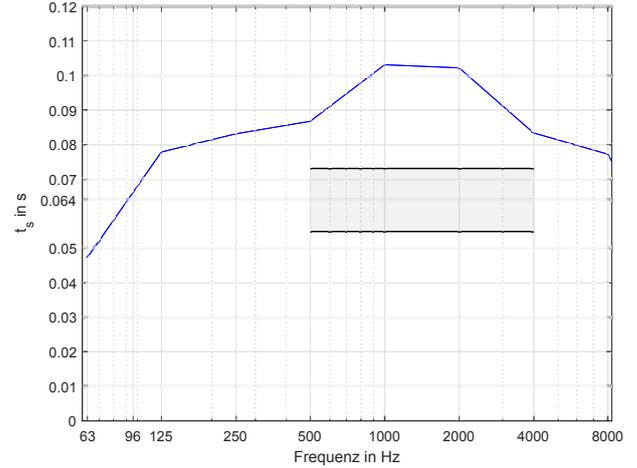
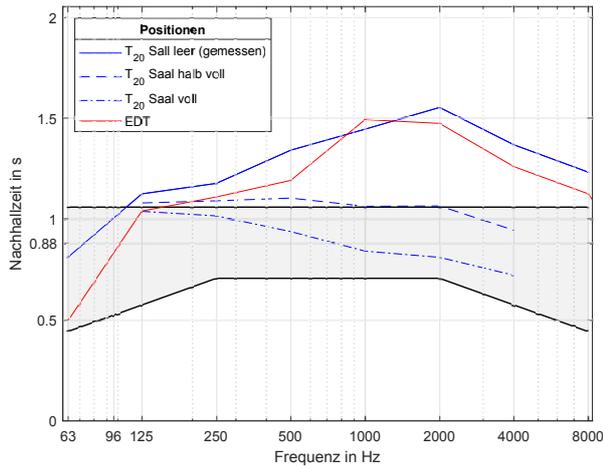
Sommersemester 2018



EDT... Anfangsnachhallzeit L_{Aeq,nT}... Anlagengeräuschpegel t_s... Schwerpunktszeit
 D₅₀... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis

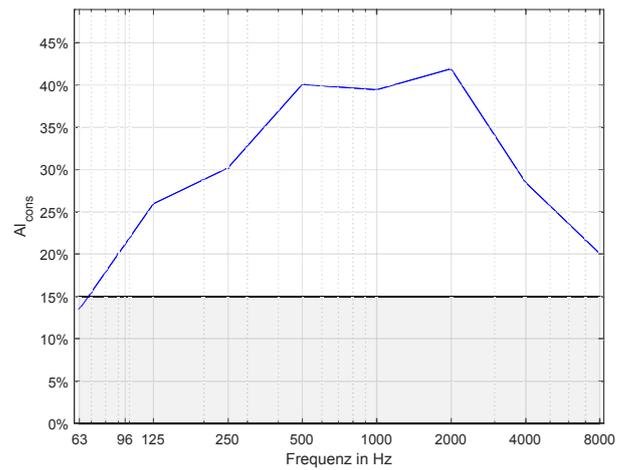
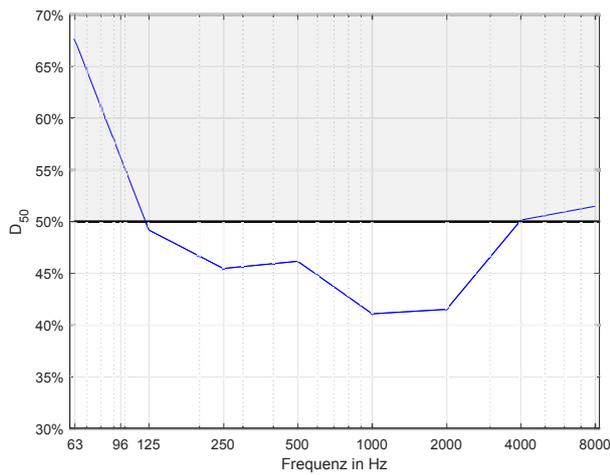


Messbedingungen	
Datum	26.05.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	581 m ³
Temperatur	25,8°C
Luftfeuchtigkeit	46,9%
L _{Aeq}	37,8 dB(A)
Bestuhlung	87 Klappsitze Holz
Boden	Parkett
Wände	Aluminium Verkleidung
Decke	Rigips
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	5x Glasplatten



Nachhallzeit								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.81	1.13	1.18	1.34	1.45	1.55	1.37	1.23
T_{20} halbvoll in s	–	1.08	1.09	1.10	1.06	1.06	0.94	–
T_{20} voll in s	–	1.04	1.02	0.94	0.84	0.81	0.72	–
EDT in s	0.49	1.04	1.11	1.19	1.49	1.47	1.26	1.12

Schwerpunktszeit								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.047	0.078	0.083	0.087	0.103	0.102	0.083	0.077



Deutlichkeitsgrad								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	68	49	45	46	41	42	50	51

Artikulationsverlust								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	13	26	30	40	39	42	29	20

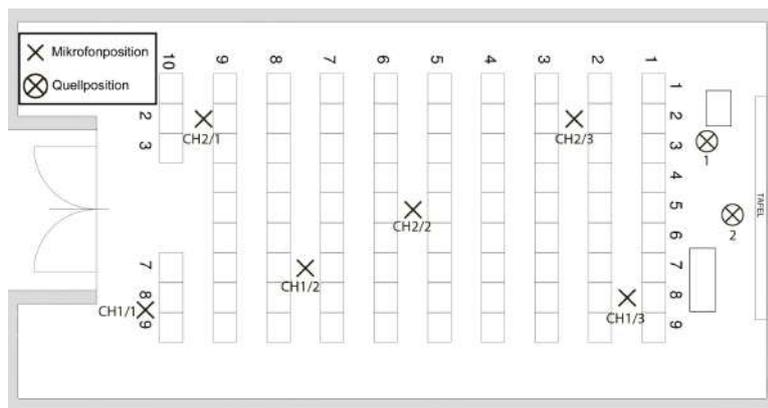
Diskussion:

Im Hörsaal i11 liegen die Nachhallzeiten T_{20} und EDT über dem zulässigen Toleranzband. Dies lässt sich durch die schlecht absorbierenden Begrenzungsflächen des Saals erklären. Durch die Anwesenheit von Publikum wird die Nachhallzeit in den Sollbereich gesenkt. Die Schwerpunktszeit ist ebenfalls zu lang, obwohl Glasplatten installiert sind, um frühe Reflexionen zu den Zuhörern zu lenken. Auch der Deutlichkeitsgrad D_{50} und der Artikulationsverlust Al_{cons} befinden sich außerhalb des Toleranzbereichs. Die Sprachverständlichkeit ist besonders in den mittleren und hinteren Reihen nicht gegeben.

Fazit:

Durch die lange Nachhallzeit ist die Sprachverständlichkeit im leeren Zustand nicht gegeben. Eine akustische Sanierung ist notwendig.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	0.74	0.95	1.20	1.38	1.46	1.56	1.36	1.23
	Ch2/1	0.79	1.14	1.05	1.30	1.44	1.52	1.40	1.22
	Ch1/2	0.73	1.15	1.18	1.30	1.46	1.61	1.38	1.25
	Ch2/2	0.85	1.16	1.10	1.35	1.42	1.54	1.36	1.23
	Ch1/3	0.98	1.24	1.29	1.34	1.46	1.55	1.33	1.21
	Ch2/3	0.76	1.11	1.24	1.38	1.44	1.53	1.37	1.24
EDT in s	Ch1/1	0.57	0.99	1.04	1.09	1.47	1.43	1.23	1.05
	Ch2/1	0.42	1.06	1.22	1.16	1.41	1.48	1.16	1.09
	Ch1/2	0.43	1.00	1.09	1.27	1.57	1.41	1.27	1.12
	Ch2/2	0.68	0.92	1.18	1.20	1.47	1.47	1.20	1.07
	Ch1/3	0.27	1.07	1.23	1.20	1.51	1.55	1.37	1.23
	Ch2/3	0.58	1.20	0.91	1.23	1.53	1.50	1.33	1.19
t_s in s	Ch1/1	0.054	0.077	0.075	0.085	0.113	0.107	0.085	0.077
	Ch2/1	0.045	0.084	0.088	0.087	0.101	0.107	0.084	0.084
	Ch1/2	0.047	0.078	0.088	0.098	0.108	0.104	0.089	0.078
	Ch2/2	0.058	0.071	0.090	0.091	0.113	0.099	0.077	0.069
	Ch1/3	0.025	0.076	0.083	0.076	0.089	0.098	0.077	0.079
	Ch2/3	0.054	0.080	0.076	0.084	0.095	0.099	0.088	0.076
$A_{I_{cons}}$ in %	Ch1/1	27.59	43.51	70.06	90.04	86.34	91.02	60.25	43.22
	Ch2/1	23.69	49.34	45.37	66.37	67.17	69.12	50.74	33.89
	Ch1/2	12.96	31.88	34.00	40.95	42.96	48.81	31.02	22.46
	Ch2/2	9.85	18.15	17.20	25.45	23.80	25.65	17.44	12.45
	Ch1/3	3.78	5.92	6.41	7.00	6.86	7.15	4.53	3.35
	Ch2/3	2.71	7.04	8.17	10.69	9.58	9.80	7.03	5.10
D_{50} in %	Ch1/1	56.19	45.29	51.90	49.02	34.33	36.91	49.19	50.74
	Ch2/1	76.45	39.22	46.42	45.55	42.24	37.48	49.36	44.41
	Ch1/2	61.25	48.12	39.97	38.67	39.97	38.48	46.10	50.79
	Ch2/2	52.17	53.98	41.18	42.21	34.41	45.74	55.30	59.32
	Ch1/3	92.31	59.99	50.43	54.31	50.79	45.14	53.28	49.13
	Ch2/3	67.63	48.48	42.91	47.22	44.81	45.37	47.68	54.54



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.56	0.76
Ch2/1	0.56	0.80
Ch1/2	0.55	0.85
Ch2/2	0.57	0.82
Ch1/3	0.56	0.90
Ch2/3	0.55	0.83

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



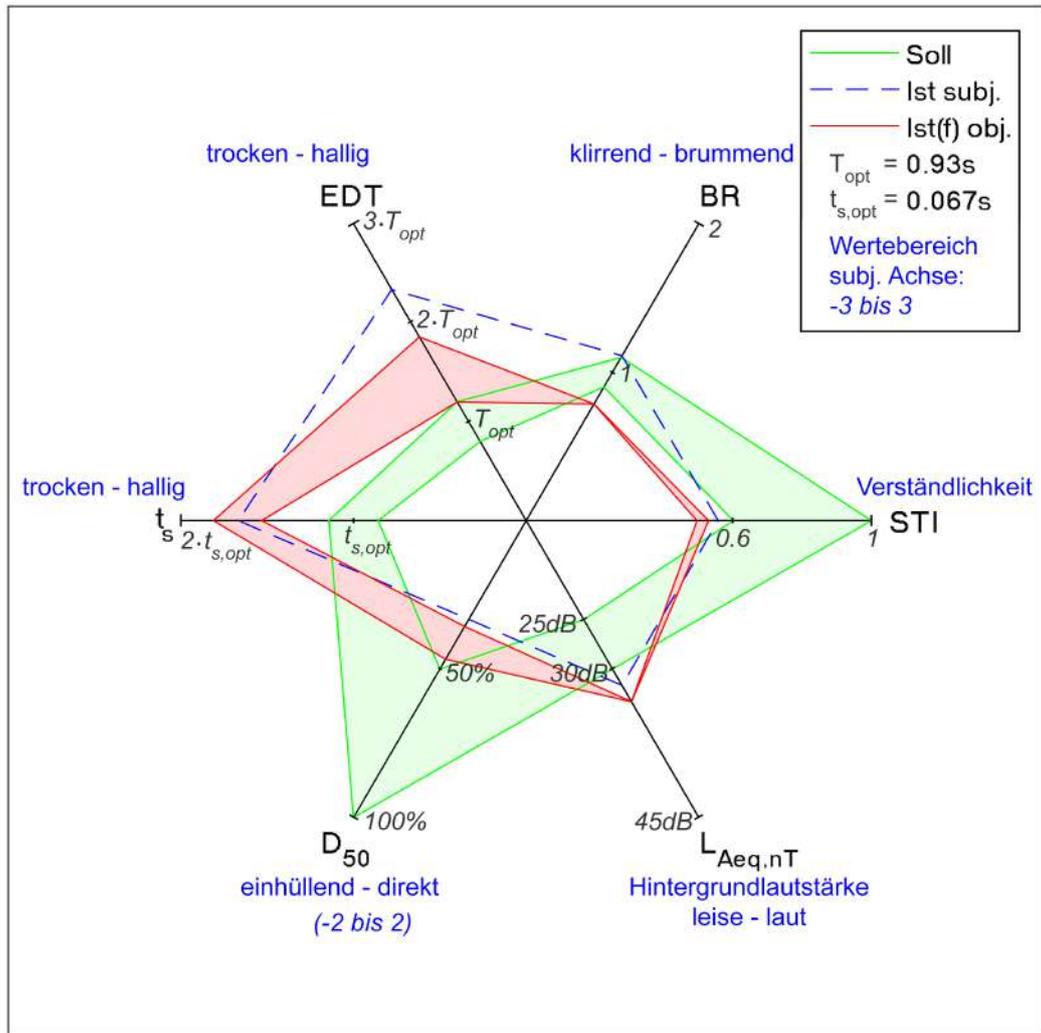
DATENBLATT HSi12



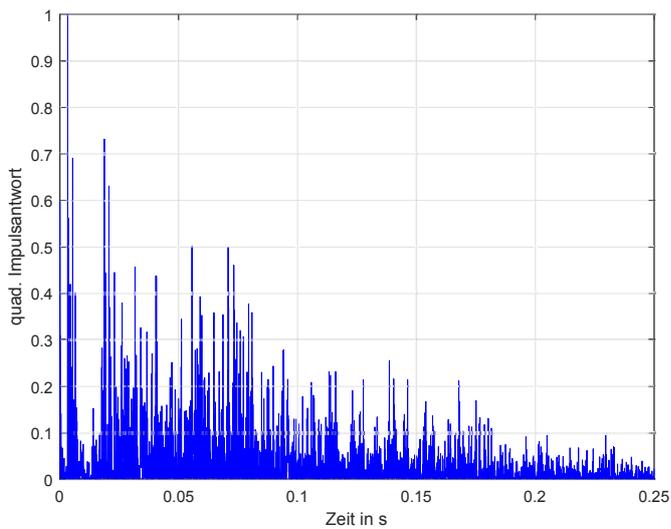
INFFELDGASSE 16/B

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

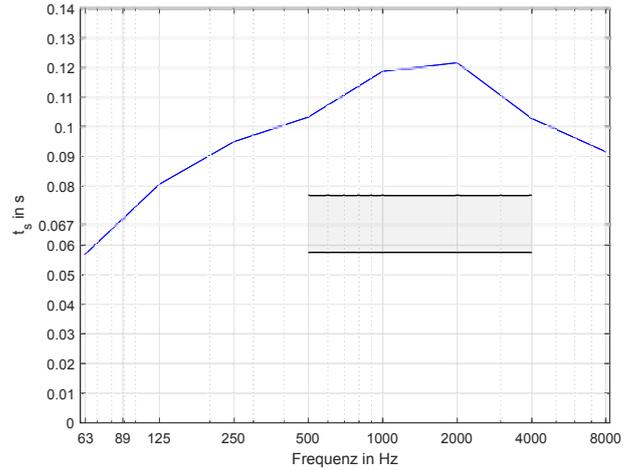
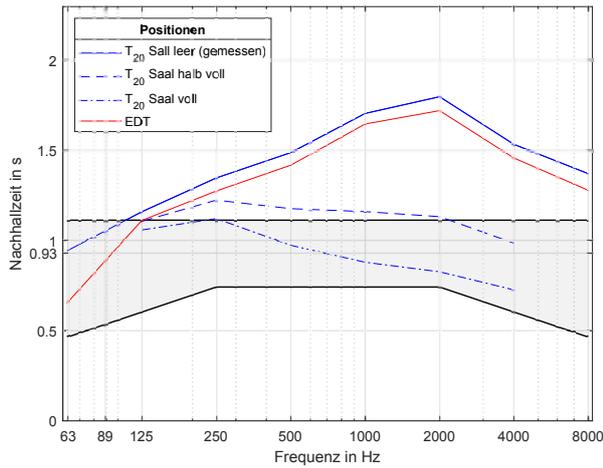
Sommersemester 2018



EDT... Anfangsnachhallzeit $L_{Aeq,nT}$... Anlagengeräuschpegel t_s ... Schwerpunktszeit
 D_{50} ... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis

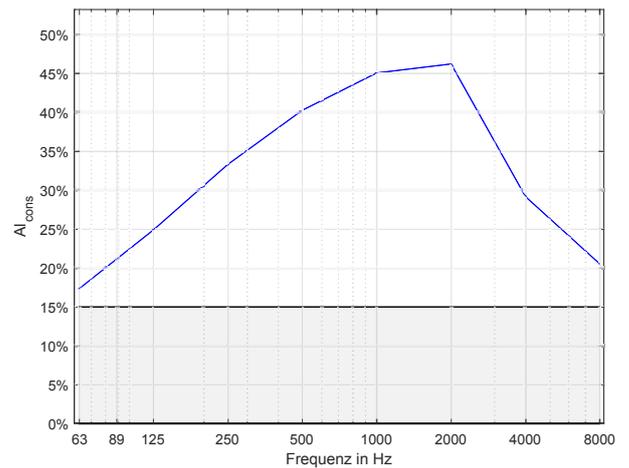
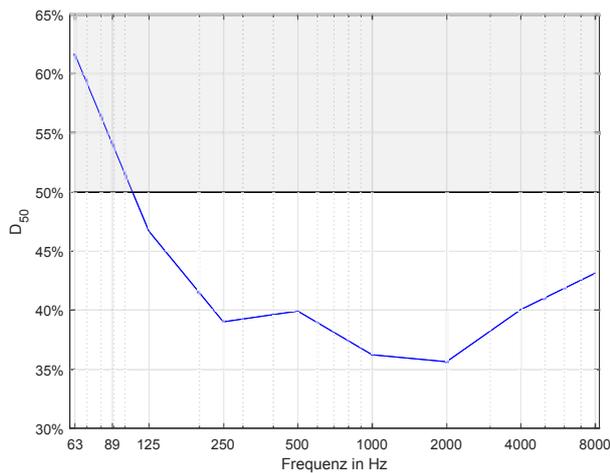


Messbedingungen	
Datum	26.05.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	765,9 m ³
Temperatur	22,8 °C
Luftfeuchtigkeit	59,5%
LAeq	33,8 dB(A)
Bestuhlung	127 Sitze Holz
Boden	Parkett
Wände	Alu, Beton
Decke	Alu
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Glasreflektoren



Nachhallzeit								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.94	1.16	1.35	1.49	1.70	1.80	1.53	1.37
T_{20} halbvoll in s	–	1.11	1.22	1.18	1.16	1.13	0.98	–
T_{20} voll in s	–	1.06	1.12	0.97	0.88	0.83	0.73	–
<i>EDT</i> in s	0.66	1.11	1.27	1.42	1.65	1.72	1.46	1.28

Schwerpunktszeit								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.057	0.081	0.095	0.103	0.119	0.122	0.103	0.092



Deutlichkeitsgrad								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	62	47	39	40	36	36	40	43

Artikulationsverlust								
<i>f</i> in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	17	25	33	40	45	46	29	21

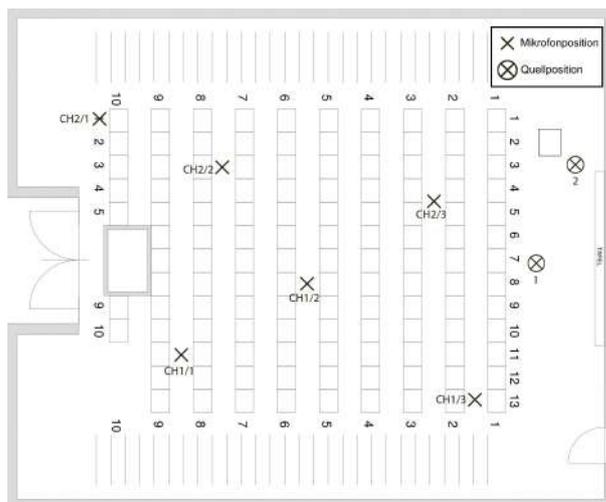
Diskussion:

Im Hörsaal i12 liegen die Nachhallzeiten T_{20} und *EDT* weit über dem zulässigen Toleranzband. Dies lässt sich durch die schlecht absorbierenden Begrenzungsflächen des Saals erklären. Durch die Anwesenheit von Publikum wird die Nachhallzeit in, teilweise sogar unter den Sollbereich gesenkt. Die Schwerpunktszeit ist ebenfalls zu lang, obwohl Glasplatten installiert sind, um frühe Reflexionen zu den Zuhörern zu lenken. Auch der Deutlichkeitsgrad D_{50} und der Artikulationsverlust Al_{cons} befinden sich außerhalb des Toleranzbereichs. Die Sprachverständlichkeit ist besonders in den mittleren und hinteren Reihen nicht gegeben.

Fazit:

Durch die lange Nachhallzeit ist die Sprachverständlichkeit im leeren Zustand nicht gegeben. Eine akustische Sanierung ist notwendig.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	0.74	1.15	1.41	1.47	1.77	1.78	1.54	1.36
	Ch2/1	1.02	1.27	1.24	1.43	1.68	1.81	1.57	1.38
	Ch1/2	0.90	1.10	1.38	1.48	1.71	1.83	1.52	1.37
	Ch2/2	0.70	1.01	1.36	1.54	1.68	1.80	1.55	1.38
	Ch1/3	1.27	1.09	1.38	1.53	1.69	1.80	1.48	1.37
	Ch2/3	1.04	1.33	1.32	1.48	1.69	1.76	1.54	1.36
EDT in s	Ch1/1	0.65	1.07	1.18	1.41	1.65	1.74	1.40	1.25
	Ch2/1	0.35	0.84	1.38	1.52	1.65	1.72	1.45	1.26
	Ch1/2	0.98	1.18	1.41	1.37	1.66	1.64	1.45	1.31
	Ch2/2	0.80	1.06	1.16	1.35	1.65	1.72	1.47	1.22
	Ch1/3	0.54	1.45	1.24	1.48	1.63	1.74	1.56	1.32
	Ch2/3	0.62	1.05	1.27	1.37	1.65	1.77	1.42	1.31
t_s in s	Ch1/1	0.063	0.086	0.093	0.109	0.126	0.121	0.106	0.095
	Ch2/1	0.042	0.069	0.101	0.109	0.124	0.128	0.110	0.094
	Ch1/2	0.085	0.097	0.111	0.101	0.119	0.116	0.109	0.100
	Ch2/2	0.071	0.094	0.093	0.111	0.124	0.127	0.101	0.091
	Ch1/3	0.042	0.072	0.090	0.099	0.105	0.124	0.094	0.080
	Ch2/3	0.039	0.066	0.082	0.091	0.115	0.115	0.097	0.089
$A_{I_{cons}}$ in %	Ch1/1	13.29	32.40	50.28	52.74	65.08	60.05	39.37	27.18
	Ch2/1	34.82	54.66	51.56	68.67	79.23	85.15	55.28	37.59
	Ch1/2	13.00	16.66	26.02	30.71	33.99	36.46	21.66	15.67
	Ch2/2	8.46	17.66	32.04	40.58	40.51	42.74	27.40	19.12
	Ch1/3	31.17	22.59	34.71	42.43	44.54	45.86	26.63	20.27
	Ch2/3	3.24	5.42	5.36	6.60	7.19	7.22	4.77	3.30
D_{50} in %	Ch1/1	47.20	42.64	43.45	36.01	33.30	37.22	36.98	39.53
	Ch2/1	84.13	50.16	35.12	37.66	32.56	29.96	32.99	39.27
	Ch1/2	29.41	33.09	29.60	42.05	34.30	38.79	37.13	37.38
	Ch2/2	47.90	31.10	32.84	34.22	33.65	32.71	43.32	44.16
	Ch1/3	82.13	62.75	45.43	43.06	44.67	35.36	47.88	51.58
	Ch2/3	79.61	60.40	47.72	46.62	38.96	39.88	42.12	46.97



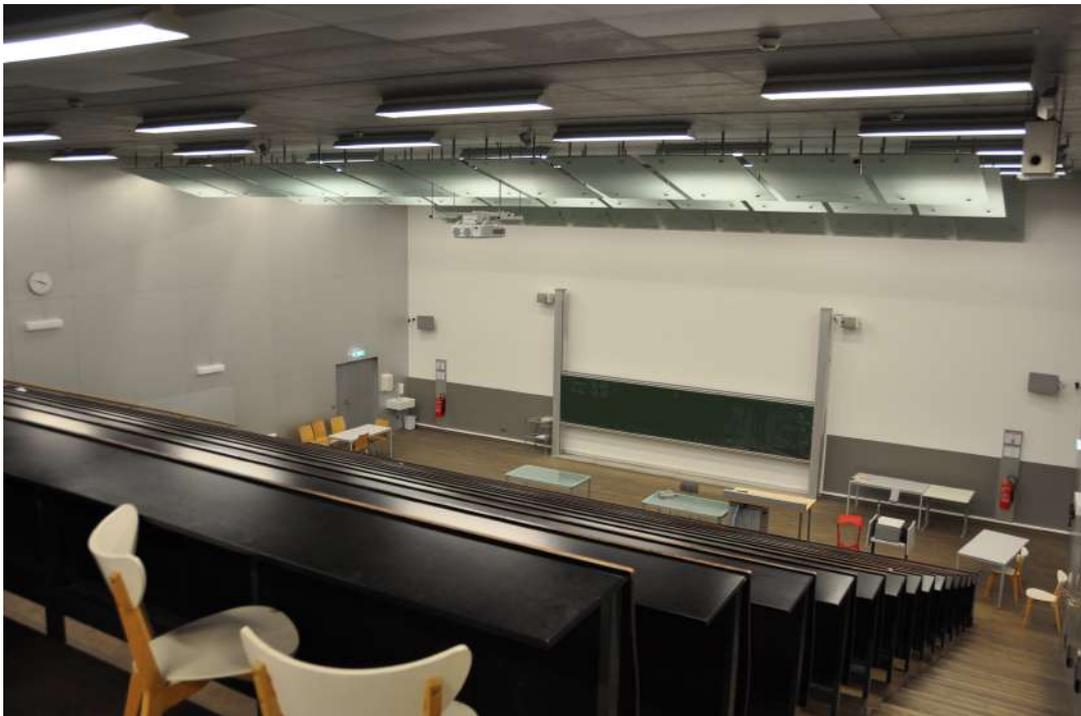
Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.53	0.79
Ch2/1	0.50	0.81
Ch1/2	0.51	0.78
Ch2/2	0.53	0.74
Ch1/3	0.53	0.76
Ch2/3	0.53	0.84

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



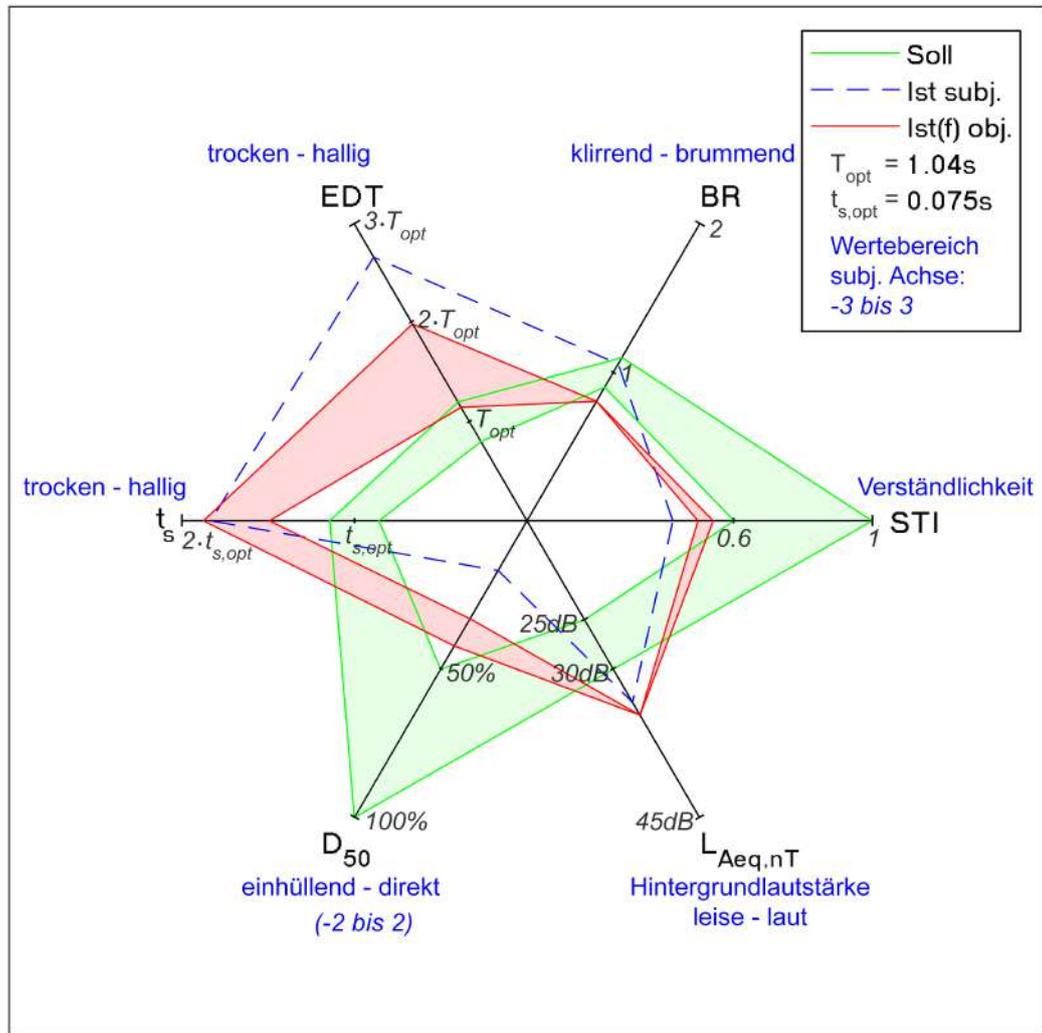
DATENBLATT HSi13



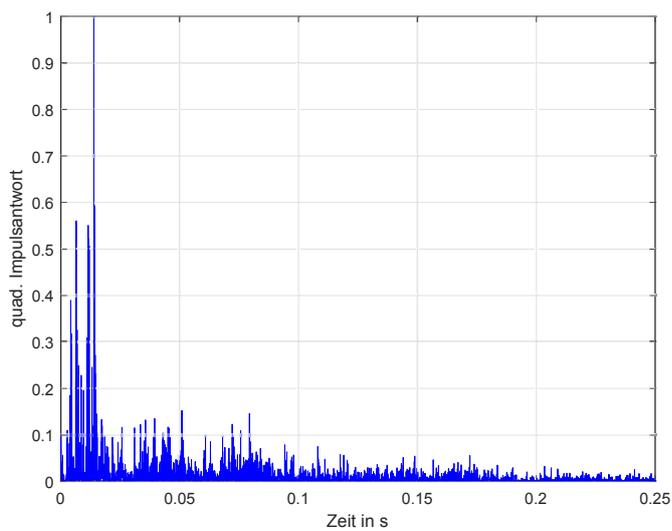
INFFELDGASSE 16B

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

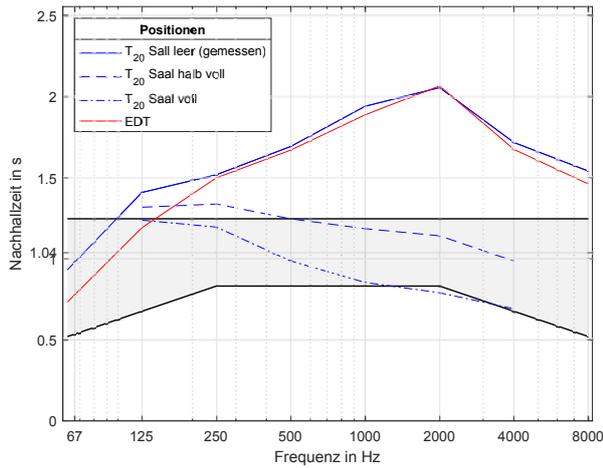
Sommersemester 2018



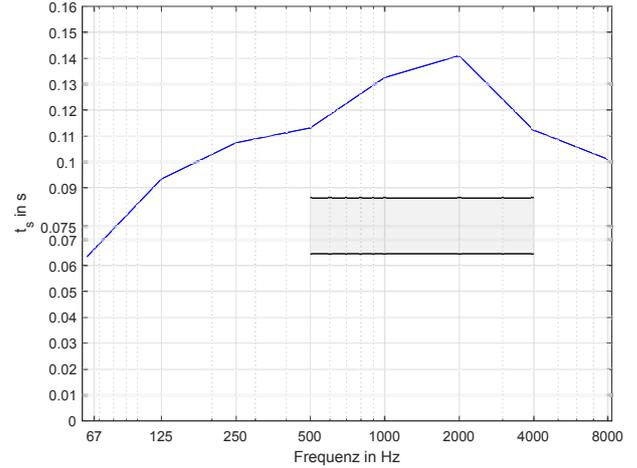
EDT... Anfangsnachhallzeit L_{Aeq,nT}... Anlagengeräuschpegel t_s... Schwerpunktzeit
 D₅₀... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis



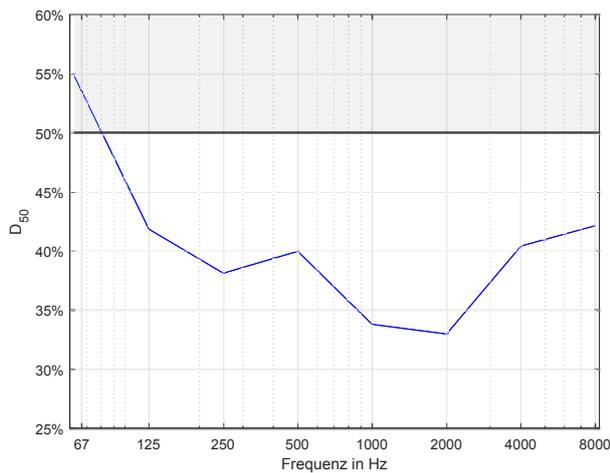
Messbedingungen	
Datum	25.05.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	1516 m ³
Temperatur	23,2°C
Luftfeuchtigkeit	58,4%
L _{Aeq}	35,2 dB(A)
Bestuhlung	303 Sitze Holz
Boden	Holzparkett
Wände	Aluverkleidung
Decke	Aluplatten
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	36x Glasplatten



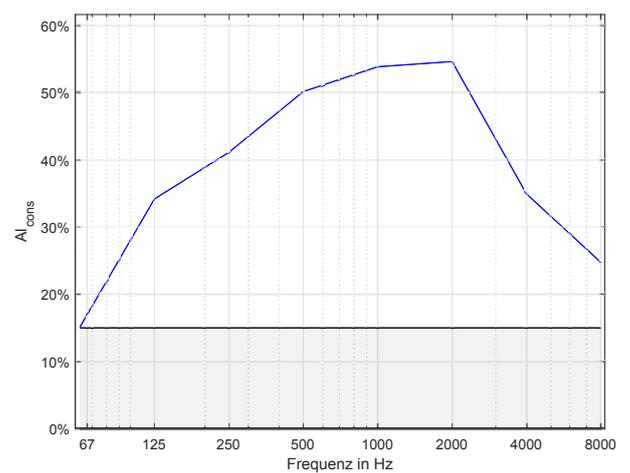
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	0.93	1.41	1.52	1.69	1.94	2.06	1.72	1.54
T_{20} halbvoll in s	–	1.32	1.34	1.25	1.19	1.14	0.99	–
T_{20} voll in s	–	1.24	1.20	0.99	0.85	0.79	0.69	–
EDT in s	0.73	1.19	1.50	1.67	1.89	2.07	1.67	1.46



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.063	0.093	0.107	0.113	0.133	0.141	0.112	0.101



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	55	42	38	40	34	33	40	42



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	15	34	41	50	54	55	35	25

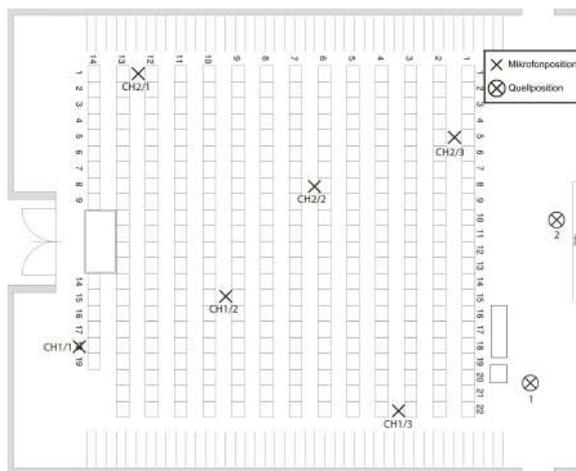
Diskussion:

Im Hörsaal i13 liegen die Nachhallzeiten T_{20} und EDT weit über dem zulässigen Toleranzband. Dies lässt sich durch die schlecht absorbierenden Begrenzungsflächen des Saals erklären. Durch die Anwesenheit von Publikum wird die Nachhallzeit in den Sollbereich gesenkt. Die Schwerpunktszeit ist ebenfalls zu lang, obwohl Glasplatten installiert sind, um frühe Reflexionen zu den Zuhörern zu lenken. Auch der Deutlichkeitsgrad D_{50} und der Artikulationsverlust Al_{cons} befinden sich außerhalb des Toleranzbereichs. Die Sprachverständlichkeit ist besonders in den mittleren und hinteren Reihen nicht gegeben.

Fazit:

Durch die lange Nachhallzeit ist die Sprachverständlichkeit nicht gegeben. Eine akustische Sanierung ist notwendig.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	0.85	1.28	1.56	1.64	1.91	2.06	1.69	1.51
	Ch2/1	0.92	1.41	1.44	1.71	1.95	2.07	1.75	1.55
	Ch1/2	1.09	1.44	1.47	1.70	1.99	2.03	1.72	1.55
	Ch2/2	0.96	1.48	1.59	1.65	1.93	2.05	1.71	1.55
	Ch1/3	1.00	1.59	1.59	1.71	1.98	2.09	1.72	1.54
	Ch2/3	0.77	1.25	1.45	1.74	1.89	2.04	1.72	1.54
EDT in s	Ch1/1	0.87	1.20	1.29	1.78	1.88	2.02	1.66	1.44
	Ch2/1	0.62	0.93	1.50	1.58	1.87	2.06	1.63	1.43
	Ch1/2	0.69	1.20	1.64	1.72	1.95	2.09	1.70	1.47
	Ch2/2	0.98	1.17	1.46	1.67	1.87	2.20	1.70	1.55
	Ch1/3	0.46	1.18	1.61	1.66	1.86	2.01	1.71	1.44
	Ch2/3	0.78	1.47	1.49	1.62	1.89	2.01	1.65	1.45
t_s in s	Ch1/1	0.076	0.094	0.096	0.115	0.126	0.136	0.109	0.104
	Ch2/1	0.065	0.083	0.093	0.101	0.133	0.130	0.108	0.093
	Ch1/2	0.067	0.107	0.124	0.128	0.143	0.140	0.119	0.098
	Ch2/2	0.081	0.097	0.105	0.115	0.136	0.162	0.125	0.118
	Ch1/3	0.040	0.081	0.122	0.110	0.129	0.143	0.106	0.098
	Ch2/3	0.052	0.098	0.104	0.111	0.129	0.136	0.106	0.094
$A_{I_{cons}}$ in %	Ch1/1	24.19	56.20	83.58	90.20	95.16	99.50	64.33	45.40
	Ch2/1	26.67	63.32	66.76	93.62	97.80	96.54	65.12	45.55
	Ch1/2	19.19	33.69	35.45	47.79	54.24	51.70	32.39	23.22
	Ch2/2	9.79	24.51	27.02	29.12	33.03	34.53	20.85	15.10
	Ch1/3	7.53	18.62	21.26	22.67	26.06	26.77	15.49	11.27
	Ch2/3	3.37	8.72	12.66	17.64	16.93	18.87	11.45	7.97
D_{50} in %	Ch1/1	43.11	45.17	45.07	39.30	38.21	34.18	41.58	38.44
	Ch2/1	42.31	39.12	44.48	44.70	33.83	39.05	42.62	46.31
	Ch1/2	49.54	30.76	28.81	34.52	28.79	32.16	35.73	44.20
	Ch2/2	39.48	40.40	35.62	40.57	29.96	24.68	31.72	32.14
	Ch1/3	83.15	56.09	32.63	39.41	36.58	32.86	45.80	44.62
	Ch2/3	71.07	39.62	42.23	41.44	35.50	35.06	45.16	47.23



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.56	0.76
Ch2/1	0.56	0.80
Ch1/2	0.55	0.85
Ch2/2	0.57	0.82
Ch1/3	0.56	0.90
Ch2/3	0.55	0.83

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



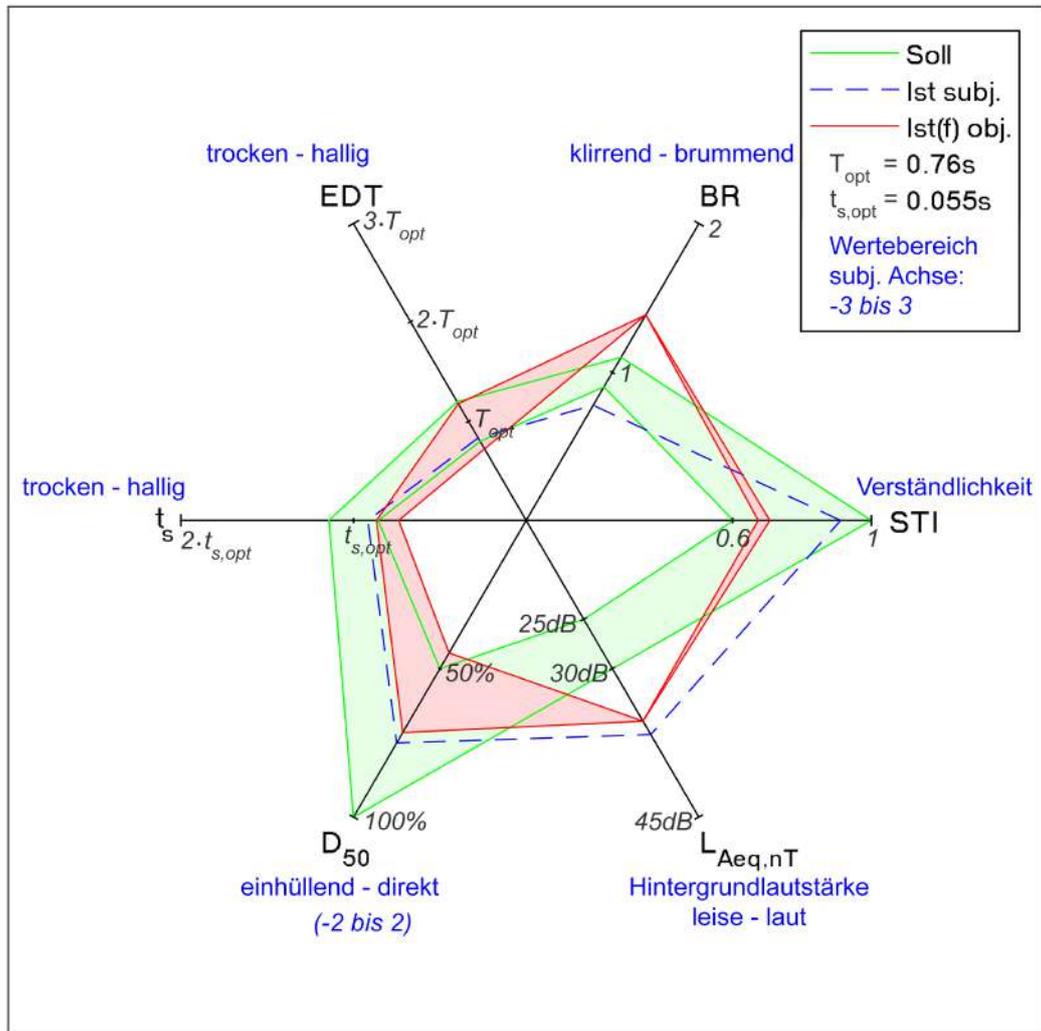
DATENBLATT HSi14



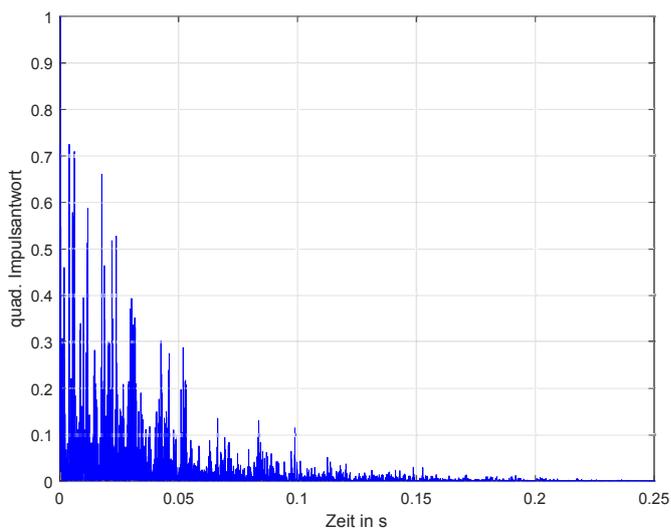
INFFELDGASSE 18

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

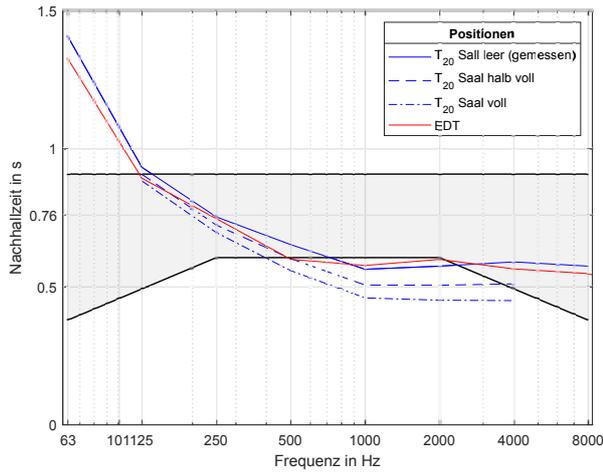
Sommersemester 2018



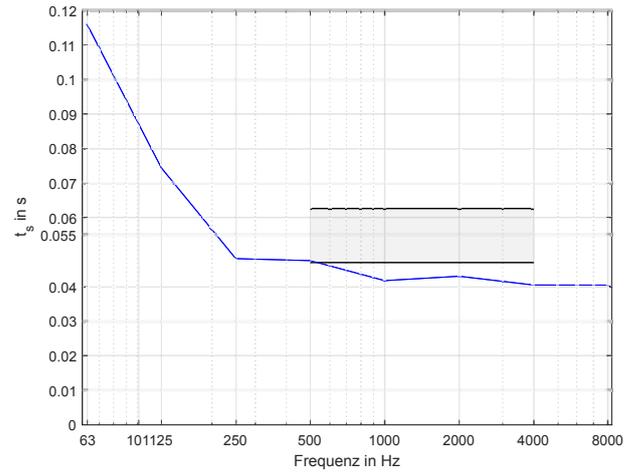
EDT... Anfangsnachhallzeit *L_{Aeq,nT}*... Anlagengeräuschpegel *t_s*... Schwerpunktszeit
D₅₀... Deutlichkeitsgrad *STI*... Sprachübertragungsindex *BR*... Bassverhältnis



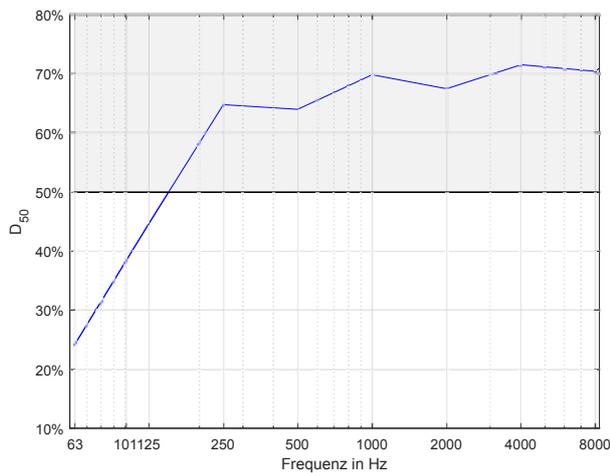
Messbedingungen	
Datum	12.05.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	265 m ³
Temperatur	21,4 °C
Luftfeuchtigkeit	57,4%
LAeq	35,4 dB(A)
Bestuhlung	36 Sessel Holz
Boden	PVC
Wände	Putz
Decke	Rigips
Absorber	10 poröse Absorber
Reflektoren	Nein



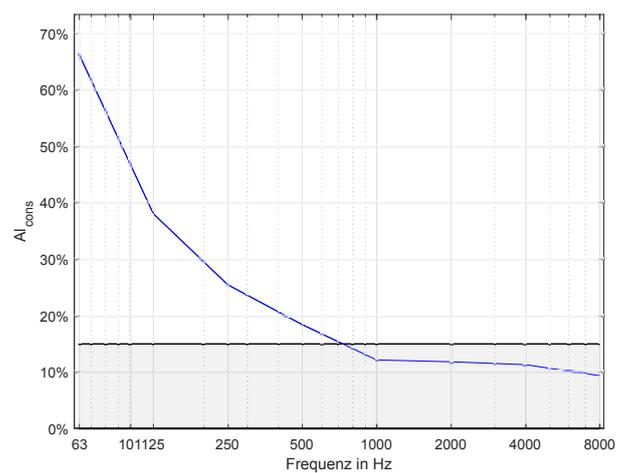
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	1.41	0.93	0.75	0.65	0.56	0.57	0.59	0.57
T_{20} halbvoll in s	—	0.91	0.72	0.60	0.51	0.51	0.51	—
T_{20} voll in s	—	0.88	0.70	0.56	0.46	0.45	0.45	—
EDT in s	1.33	0.89	0.75	0.60	0.58	0.60	0.56	0.55



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.116	0.074	0.048	0.048	0.042	0.043	0.040	0.040



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	24	45	65	64	70	67	72	70



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	66	38	25	18	12	12	11	9

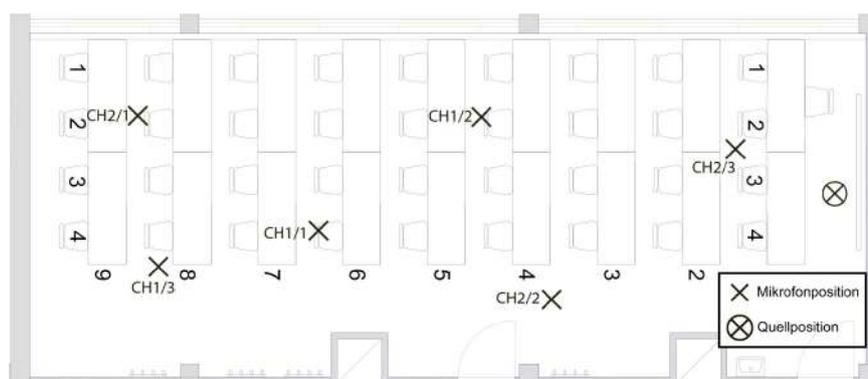
Diskussion:

Im Hörsaal i14 sind die Nachhallzeiten zu lang für $f < 125Hz$ und zu kurz für $f < 1kHz$, besonders bei Anwesenheit von Publikum. Die langen Nachhallzeiten entstehen durch starke Modenbildung und sind für die Auswertung nicht aussagekräftig, da sie sich unterhalb der Schröderfrequenz befinden. Wegen der hohen Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen wird der Raum als brummend empfunden, was sich negativ auf die Sprachverständlichkeit auswirkt. Die im Hörsaal verbauten Anlagen erzeugen einen Grundgeräuschpegel, der sich oberhalb des maximal zulässigen Grenzwertes befindet.

Fazit:

Trotz der Abweichung der Gütemaße von den Sollwerten ist der Vortragende im gesamten Auditorium verständlich. Leisere technische Anlagen und eine Absenkung der tiefen Frequenzen durch Absorber würden die Sprachverständlichkeit zusätzlich verbessern.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	1.59	0.89	0.74	0.65	0.58	0.56	0.59	0.56
	Ch2/1	1.53	0.82	0.68	0.59	0.55	0.57	0.59	0.57
	Ch1/2	1.46	0.84	0.74	0.66	0.57	0.60	0.58	0.60
	Ch2/2	1.15	1.02	0.90	0.76	0.56	0.56	0.57	0.55
	Ch1/3	1.29	0.96	0.76	0.61	0.55	0.58	0.64	0.61
	Ch2/3	1.43	1.06	0.70	0.65	0.57	0.57	0.57	0.55
EDT in s	Ch1/1	0.76	0.88	0.63	0.57	0.57	0.66	0.60	0.59
	Ch2/1	1.23	0.91	0.82	0.83	0.64	0.62	0.60	0.60
	Ch1/2	1.26	1.09	0.73	0.73	0.56	0.63	0.65	0.62
	Ch2/2	1.58	1.01	0.72	0.44	0.52	0.53	0.51	0.48
	Ch1/3	1.53	0.78	0.61	0.65	0.64	0.62	0.55	0.55
	Ch2/3	1.60	0.69	0.97	0.39	0.54	0.54	0.48	0.45
t_s in s	Ch1/1	0.089	0.085	0.039	0.048	0.040	0.050	0.047	0.044
	Ch2/1	0.115	0.077	0.062	0.067	0.050	0.048	0.040	0.044
	Ch1/2	0.133	0.072	0.055	0.050	0.045	0.045	0.044	0.045
	Ch2/2	0.103	0.077	0.055	0.037	0.035	0.037	0.036	0.036
	Ch1/3	0.142	0.080	0.041	0.061	0.049	0.046	0.041	0.040
	Ch2/3	0.114	0.056	0.037	0.023	0.032	0.032	0.035	0.034
A_{cons} in %	Ch1/1	100.00	40.59	27.89	21.37	14.25	12.19	11.79	9.39
	Ch2/1	100.00	58.65	39.88	30.27	21.82	21.60	20.14	16.69
	Ch1/2	61.90	20.30	15.94	12.47	7.75	8.07	6.44	6.08
	Ch2/2	23.85	18.84	14.60	10.37	4.79	4.45	3.97	3.28
	Ch1/3	100.00	83.21	51.58	33.47	22.73	23.18	24.30	19.69
	Ch2/3	12.04	6.62	2.89	2.51	1.58	1.49	1.28	1.05
D_{50} in %	Ch1/1	24.19	30.72	79.63	65.15	72.69	57.29	64.45	65.16
	Ch2/1	22.23	48.88	41.94	44.33	59.83	63.18	73.19	67.83
	Ch1/2	13.38	55.22	62.11	58.18	66.61	67.06	66.58	64.30
	Ch2/2	39.28	44.66	65.88	81.07	77.69	76.51	76.41	74.95
	Ch1/3	15.47	32.00	67.68	47.79	63.09	64.29	70.08	70.01
	Ch2/3	30.27	56.48	71.34	87.33	79.01	76.40	78.34	80.20



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.68	1.33
Ch2/1	0.67	1.32
Ch1/2	0.68	1.29
Ch2/2	0.71	1.45
Ch1/3	0.68	1.48
Ch2/3	0.74	1.44

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



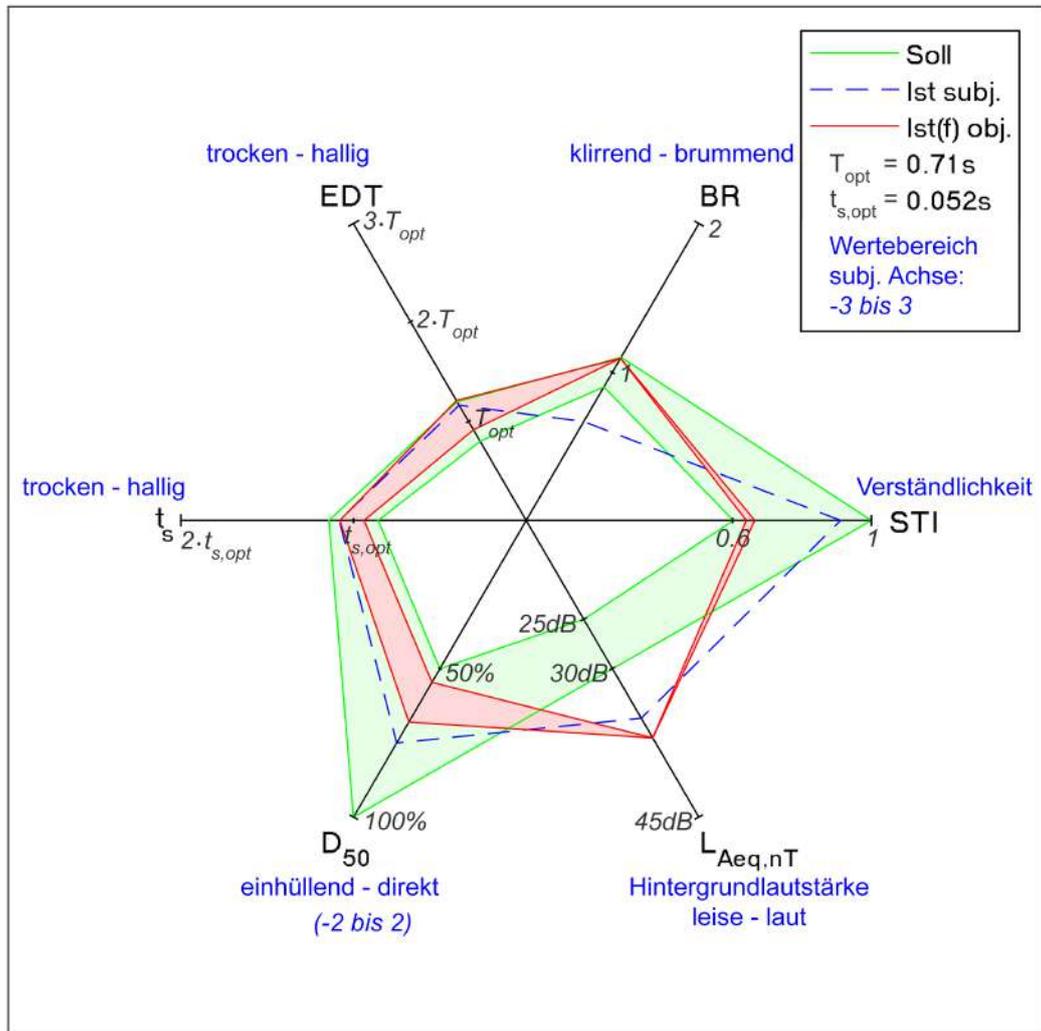
DATENBLATT HSi15



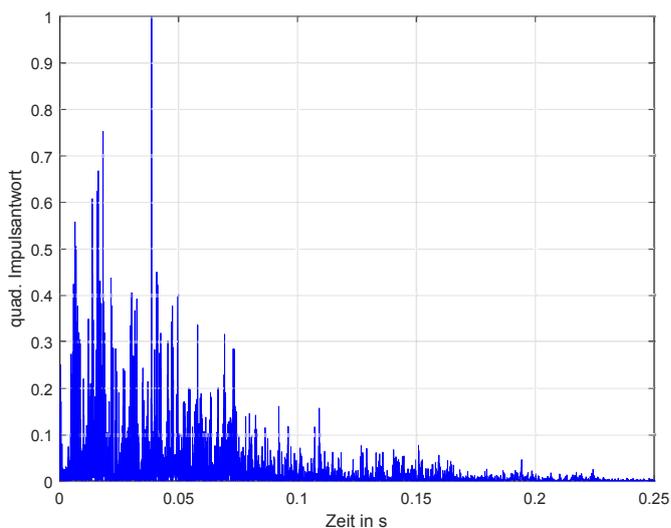
INFFELDGASSE 18

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

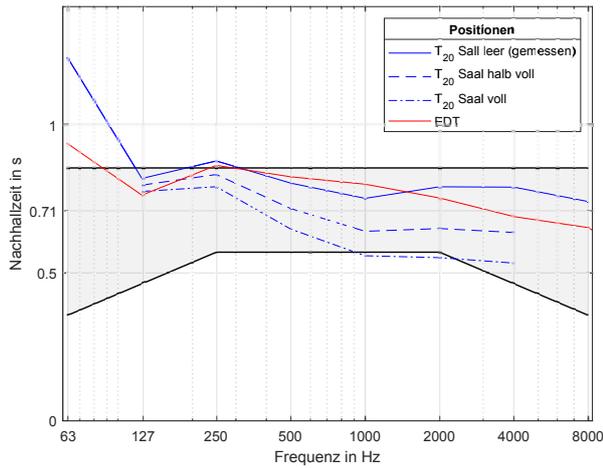
Sommersemester 2018



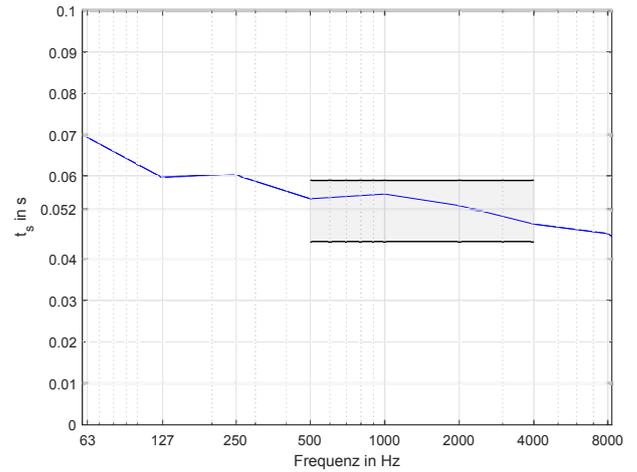
EDT... Anfangsnachhallzeit $L_{Aeq,nT}$... Anlagengeräuschpegel t_s ... Schwerpunktszeit
 D_{50} ... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis



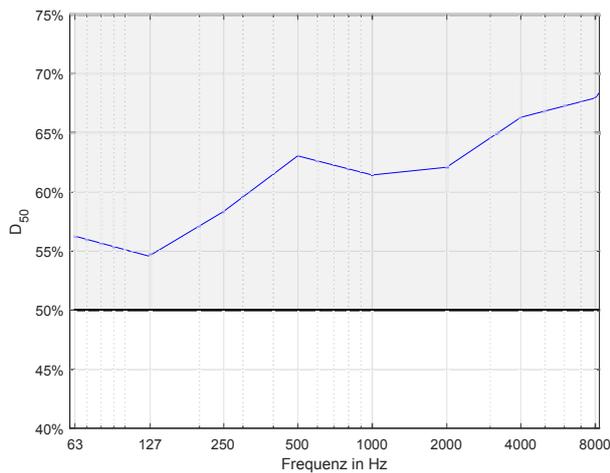
Messbedingungen	
Datum	12.05.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	201 m ³
Temperatur	20,7 °C
Luftfeuchtigkeit	58,8%
LAeq	37,2 dB(A)
Bestuhlung	28 Sessel Holz
Boden	PVC
Wände	Holz, Fenster
Decke	Rigips
Absorber	Kantenabsorber
Reflektoren	Nein



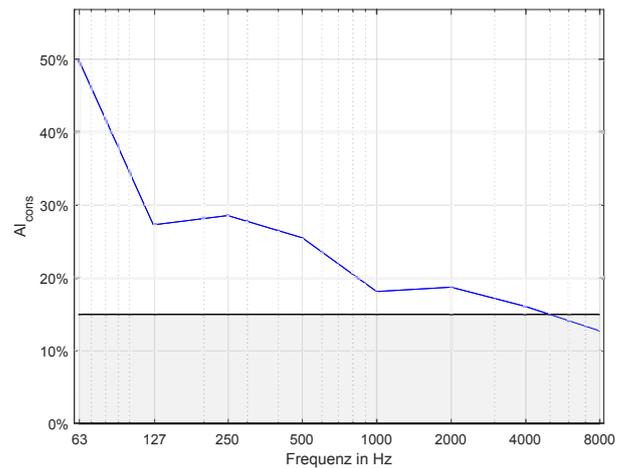
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	1.23	0.82	0.88	0.80	0.75	0.79	0.79	0.74
T_{20} halbvoll in s	–	0.80	0.83	0.72	0.64	0.65	0.64	–
T_{20} voll in s	–	0.78	0.79	0.65	0.56	0.55	0.53	–
EDT in s	0.94	0.76	0.86	0.82	0.80	0.75	0.69	0.65



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.069	0.060	0.060	0.055	0.056	0.053	0.048	0.046



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	56	55	58	63	61	62	66	68



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	50	27	29	26	18	19	16	13

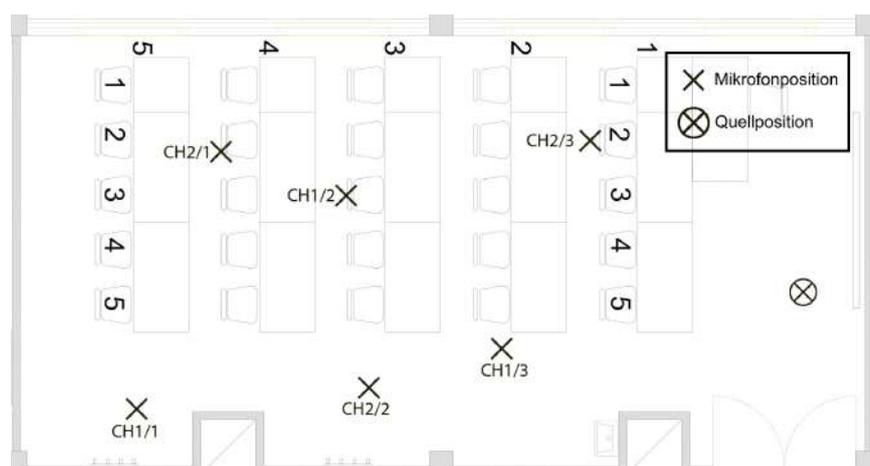
Diskussion:

Im Hörsaal i15 befinden sich die Nachhallzeiten unterhalb von $f = 250Hz$ im Toleranzbereich. Auffallend sind die besonders hohen Werte der Nachhallzeit und des Artikulationsverlustes unterhalb der Schröderfrequenz von $f = 127Hz$. Da es unterhalb dieser Frequenz zu Modenbildungen kommt, haben die „Ausreißer“ keine Aussagekraft. Die im Hörsaal verbauten Anlagen erzeugen einen Grundgeräuschpegel, der sich oberhalb des maximal zulässigen Grenzwertes befindet.

Fazit:

Da alle Werte innerhalb oder in der Nähe des Toleranzbereiches sind, ist die Sprachverständlichkeit gewährleistet. Leisere technische Anlagen würden die Sprachverständlichkeit zusätzlich verbessern.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	0.91	0.91	0.94	0.83	0.73	0.80	0.79	0.76
	Ch2/1	1.41	0.76	0.75	0.82	0.79	0.80	0.81	0.75
	Ch1/2	1.33	0.86	0.86	0.78	0.74	0.79	0.79	0.74
	Ch2/2	1.13	0.82	0.83	0.82	0.75	0.78	0.77	0.74
	Ch1/3	0.99	0.82	0.93	0.75	0.75	0.78	0.79	0.72
	Ch2/3	1.59	0.75	0.95	0.82	0.76	0.79	0.79	0.73
EDT in s	Ch1/1	0.90	0.72	0.81	0.82	0.79	0.76	0.74	0.66
	Ch2/1	1.12	0.98	1.02	0.89	0.78	0.74	0.74	0.68
	Ch1/2	1.10	0.80	0.98	0.87	0.81	0.85	0.69	0.69
	Ch2/2	0.88	0.64	0.72	0.81	0.84	0.74	0.73	0.69
	Ch1/3	0.80	0.67	0.90	0.83	0.82	0.76	0.65	0.64
	Ch2/3	0.82	0.76	0.76	0.73	0.77	0.67	0.59	0.55
t_s in s	Ch1/1	0.081	0.062	0.055	0.054	0.061	0.056	0.057	0.051
	Ch2/1	0.078	0.066	0.080	0.059	0.056	0.054	0.052	0.051
	Ch1/2	0.078	0.074	0.060	0.051	0.061	0.058	0.048	0.048
	Ch2/2	0.064	0.048	0.061	0.067	0.060	0.058	0.055	0.052
	Ch1/3	0.061	0.058	0.062	0.051	0.050	0.051	0.044	0.040
	Ch2/3	0.056	0.052	0.044	0.046	0.047	0.041	0.035	0.035
$A_{I_{cons}}$ in %	Ch1/1	62.36	63.17	67.13	52.17	33.38	37.25	31.48	25.55
	Ch2/1	100.00	39.17	38.59	45.33	34.37	33.27	28.99	22.32
	Ch1/2	72.10	30.05	29.90	24.68	18.45	19.48	16.77	13.23
	Ch2/2	43.07	22.29	23.14	22.34	15.83	15.58	13.28	10.84
	Ch1/3	9.45	6.37	8.26	5.33	4.45	4.49	4.00	2.90
	Ch2/3	12.13	2.68	4.39	3.26	2.31	2.32	2.00	1.51
D_{50} in %	Ch1/1	30.51	56.58	70.04	66.25	57.62	59.08	58.76	64.70
	Ch2/1	50.45	43.94	43.74	60.94	60.18	59.87	63.44	63.95
	Ch1/2	63.25	37.06	63.77	64.43	57.77	58.25	65.77	67.62
	Ch2/2	63.54	70.05	54.09	49.75	55.74	58.39	60.56	62.06
	Ch1/3	57.23	62.46	50.67	67.71	65.97	63.16	70.46	71.10
	Ch2/3	72.70	57.38	67.70	69.24	71.36	73.80	78.91	78.25



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.66	1.19
Ch2/1	0.64	0.94
Ch1/2	0.65	1.13
Ch2/2	0.65	1.05
Ch1/3	0.66	1.17
Ch2/3	0.69	1.08

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



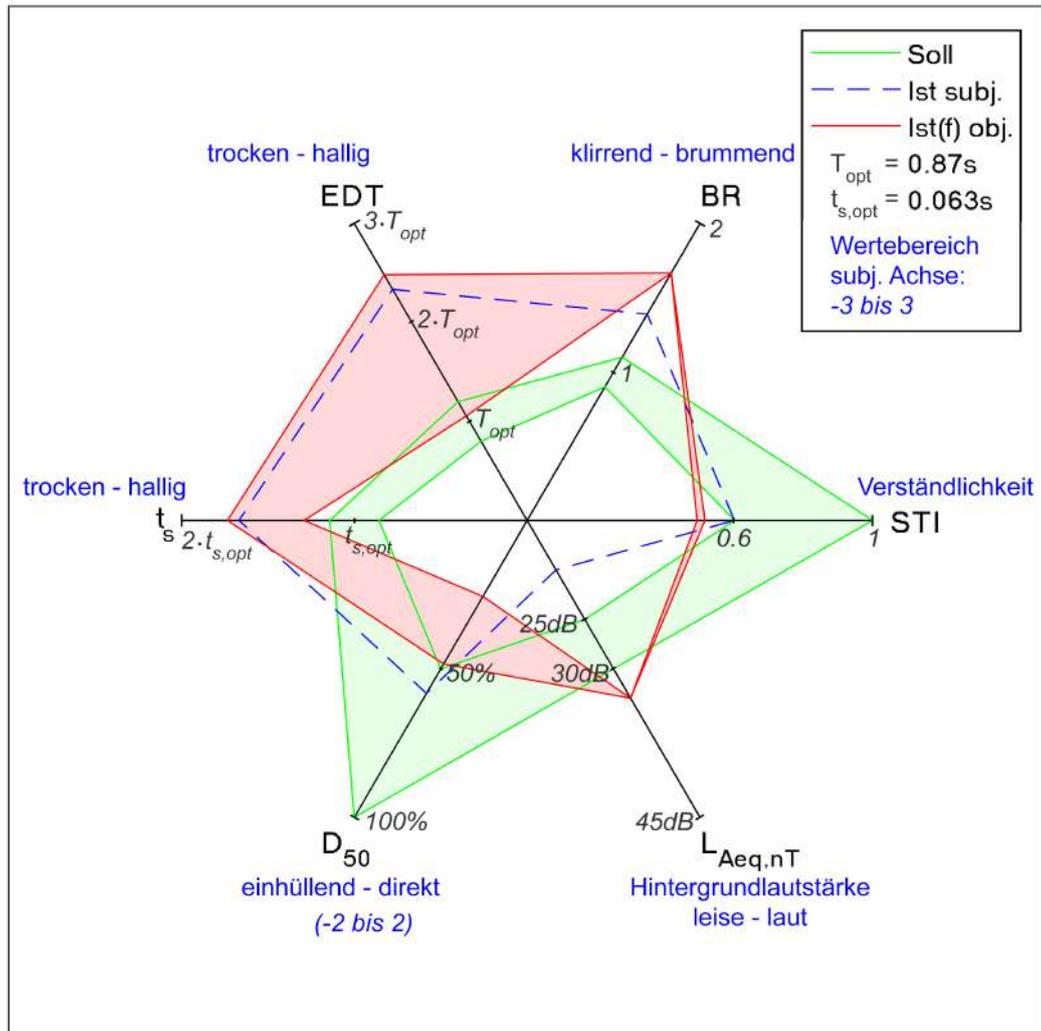
DATENBLATT HSFSI1



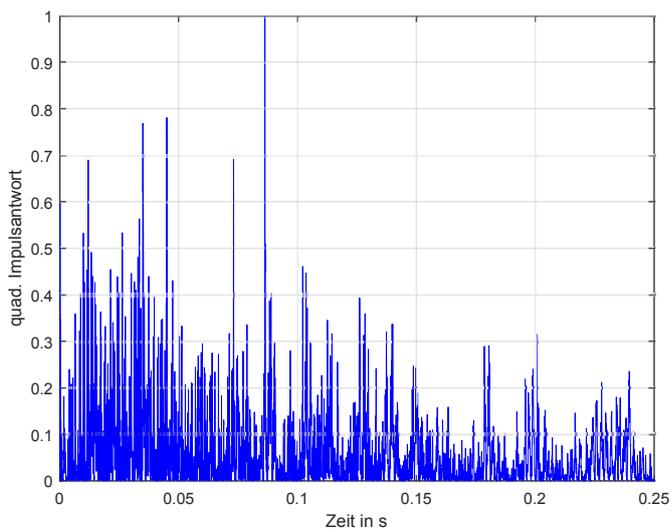
INFFELD GASSE 11

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

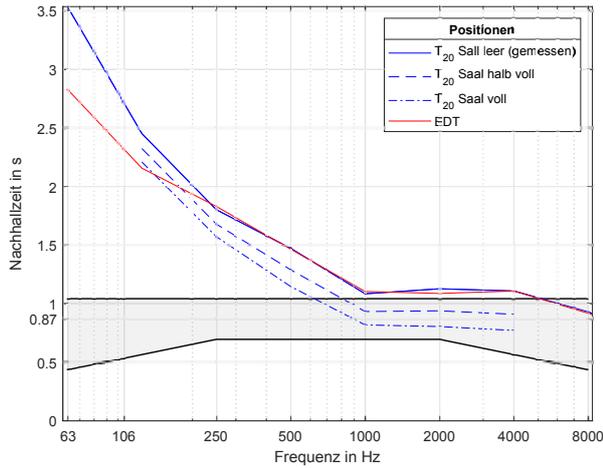
Sommersemester 2018



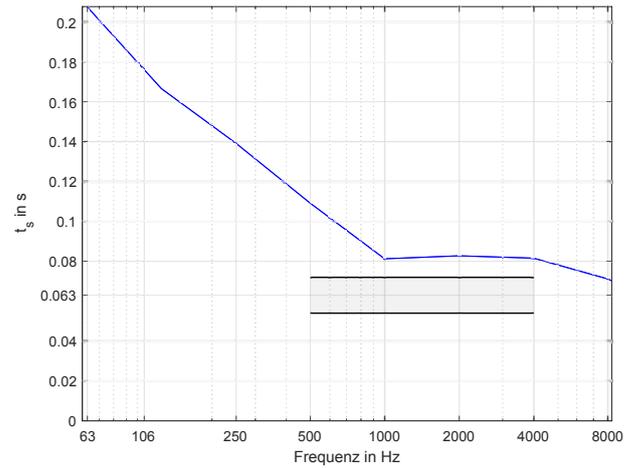
EDT... Anfangsnachhallzeit LAeq,nT... Anlagengeräuschpegel ts... Schwerpunktszeit
 D50... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis



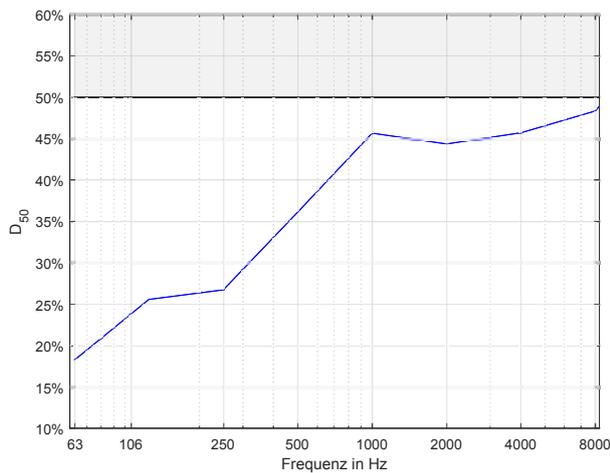
Messbedingungen	
Datum	09.06.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	532 m ³
Temperatur	25,1 °C
Luftfeuchtigkeit	59,8%
LAeq	33,4 dB(A)
Bestuhlung	48 Sessel Holz
Boden	Linoleum
Wände	Holz, Fenster, Putz
Decke	Putz
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Nein



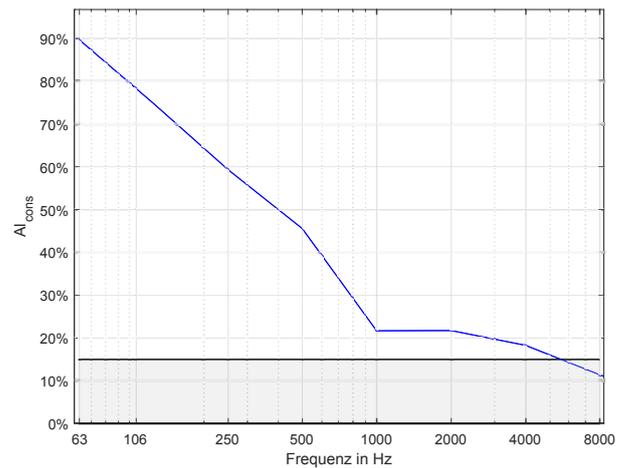
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	3.54	2.45	1.80	1.47	1.08	1.13	1.11	0.93
T_{20} halbvoll in s	–	2.32	1.68	1.29	0.93	0.94	0.91	–
T_{20} voll in s	–	2.21	1.57	1.15	0.82	0.80	0.77	–
EDT in s	2.83	2.16	1.83	1.47	1.10	1.09	1.11	0.92



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.208	0.167	0.139	0.109	0.081	0.083	0.082	0.071



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	18	26	27	36	46	44	46	48



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	90	75	59	46	22	22	18	11

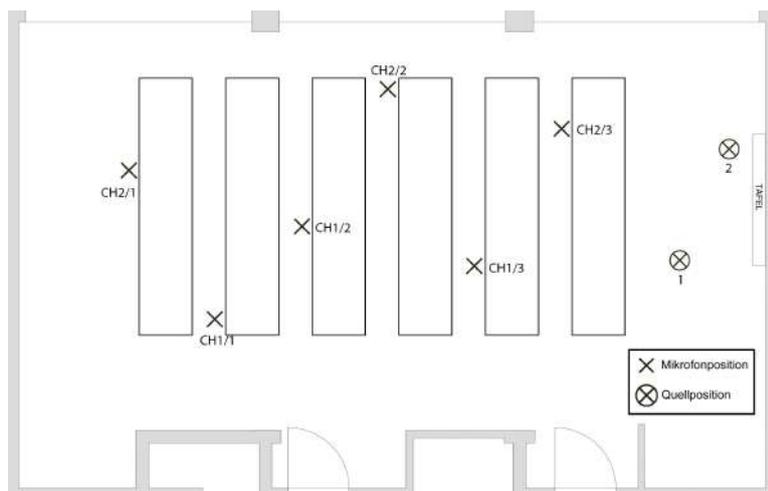
Diskussion:

Im Hörsaal FS1 sind die Nachhallzeiten bereits unterhalb von $f = 4kHz$ außerhalb des Toleranzbandes und unterhalb von $f = 1kHz$ sehr hoch. Die sonst in den tiefen wirkenden Fensterfassaden sind in diesem Gebäude durch deren Beschaffenheit nicht wirksam. Die lange Nachhallzeit in den tiefen Frequenzen wird subjektiv als brummend empfunden und verschlechtert die Sprachverständlichkeit. Die im Hörsaal verbauten Anlagen erzeugen einen Grundgeräuschpegel, der sich oberhalb des maximal zulässigen Grenzwertes befindet. Bis $t = 200ms$ sind noch starke Reflexionen vorhanden. Diese werden als störend empfunden und verschlechtern die Verständlichkeit.

Fazit:

Wegen hoher Nachhallzeit, Echos und zu hohem Grundgeräuschpegel ist die Sprachverständlichkeit nicht gewährleistet. Eine akustische Sanierung des Hörsaales ist notwendig.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	3.71	2.54	1.81	1.48	1.12	1.14	1.11	0.95
	Ch2/1	4.24	2.44	1.71	1.46	1.08	1.12	1.13	0.94
	Ch1/2	3.58	2.56	1.99	1.39	1.10	1.18	1.11	0.94
	Ch2/2	2.95	2.34	1.74	1.52	1.07	1.11	1.11	0.93
	Ch1/3	2.81	2.55	1.83	1.51	1.06	1.11	1.09	0.90
	Ch2/3	3.94	2.28	1.74	1.48	1.06	1.10	1.09	0.92
EDT in s	Ch1/1	2.23	1.94	2.03	1.40	1.14	1.12	1.21	0.98
	Ch2/1	3.33	2.34	1.79	1.63	1.21	1.16	1.15	1.01
	Ch1/2	3.69	2.49	1.76	1.55	1.14	1.09	1.15	0.94
	Ch2/2	2.17	2.00	1.88	1.40	1.05	1.06	1.12	0.91
	Ch1/3	2.74	2.06	1.72	1.47	1.09	1.07	1.02	0.84
	Ch2/3	2.82	2.11	1.80	1.34	1.00	1.03	1.01	0.82
t_s in s	Ch1/1	0.193	0.164	0.149	0.114	0.087	0.088	0.092	0.078
	Ch2/1	0.256	0.189	0.148	0.138	0.093	0.090	0.093	0.083
	Ch1/2	0.238	0.194	0.144	0.115	0.086	0.085	0.088	0.077
	Ch2/2	0.175	0.146	0.150	0.107	0.079	0.080	0.078	0.069
	Ch1/3	0.164	0.149	0.122	0.093	0.073	0.078	0.072	0.060
	Ch2/3	0.219	0.159	0.122	0.087	0.070	0.075	0.066	0.060
A_{cons} in %	Ch1/1	100.00	100.00	96.32	79.80	38.28	37.20	31.13	19.87
	Ch2/1	100.00	100.00	100.00	95.86	46.84	46.88	41.02	25.16
	Ch1/2	100.00	98.61	78.33	38.03	19.99	21.47	16.32	10.21
	Ch2/2	100.00	81.61	45.11	34.45	14.41	14.21	12.34	7.64
	Ch1/3	51.42	37.41	19.17	12.84	5.19	5.43	4.41	2.69
	Ch2/3	87.07	31.35	17.42	12.51	5.41	5.30	4.53	2.83
D_{50} in %	Ch1/1	15.97	14.34	23.38	28.69	42.04	39.94	39.27	42.04
	Ch2/1	13.09	19.03	23.25	19.76	37.74	39.55	37.02	38.86
	Ch1/2	21.97	21.38	22.97	34.50	41.25	42.77	40.48	42.00
	Ch2/2	11.89	33.61	21.04	35.42	46.61	46.72	48.19	51.11
	Ch1/3	31.00	39.36	32.85	48.31	52.67	49.13	52.93	58.20
	Ch2/3	15.69	25.88	37.04	50.16	53.73	48.13	56.44	57.94



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.51	1.68
Ch2/1	0.50	1.63
Ch1/2	0.51	1.83
Ch2/2	0.53	1.57
Ch1/3	0.56	1.70
Ch2/3	0.56	1.58

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ



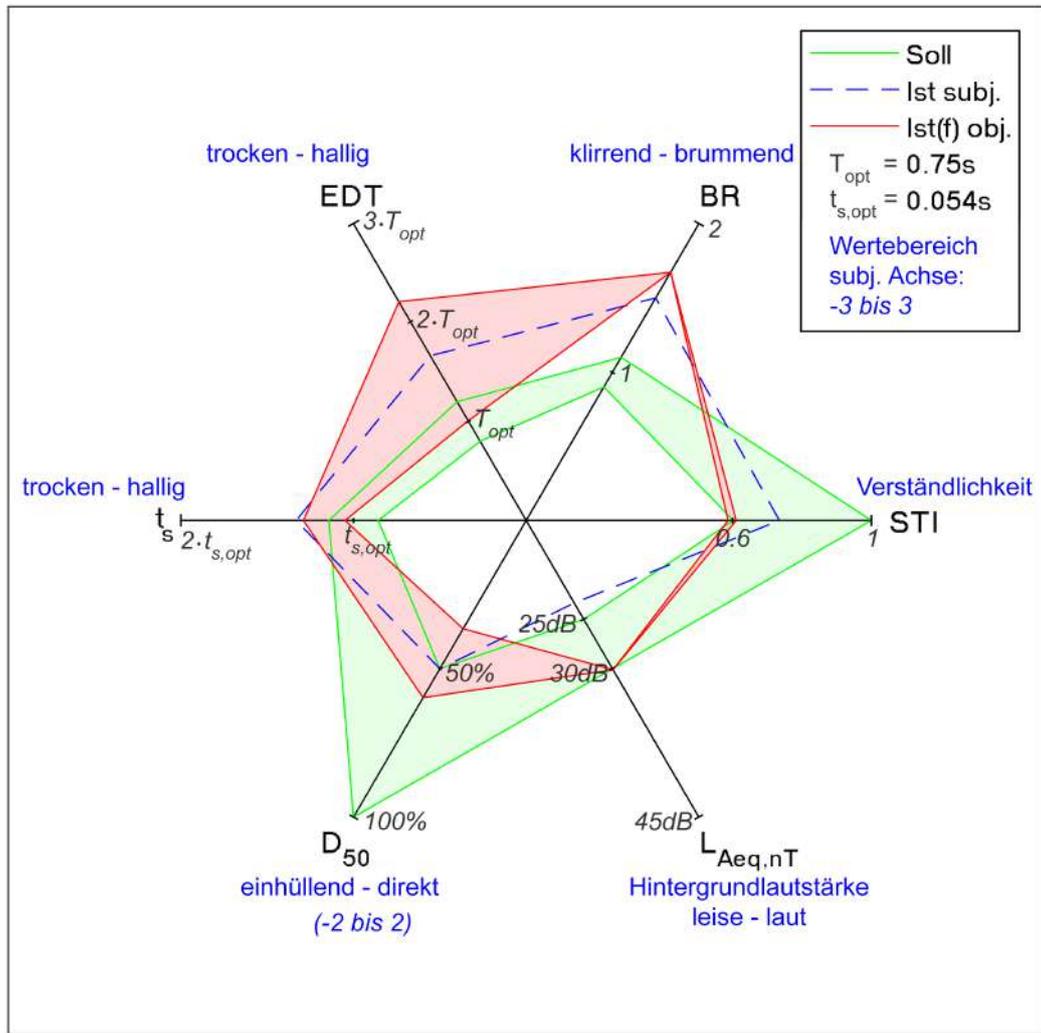
DATENBLATT HSFSI2



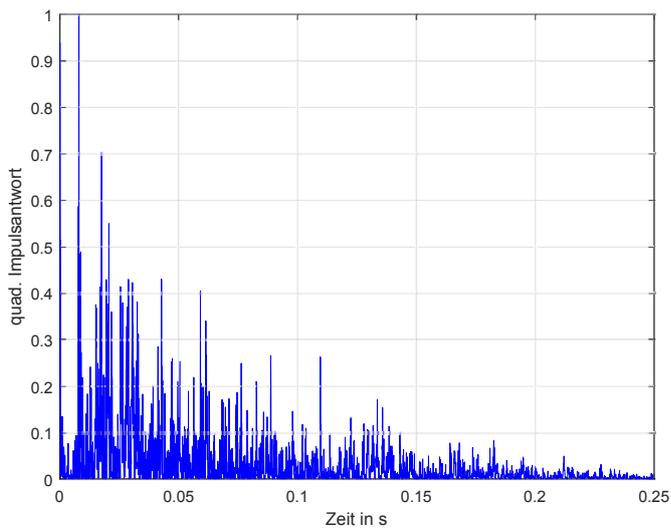
INFFELDGASSE 11

C. FRISCHMANN, K. SCHILLER, R. HOFER

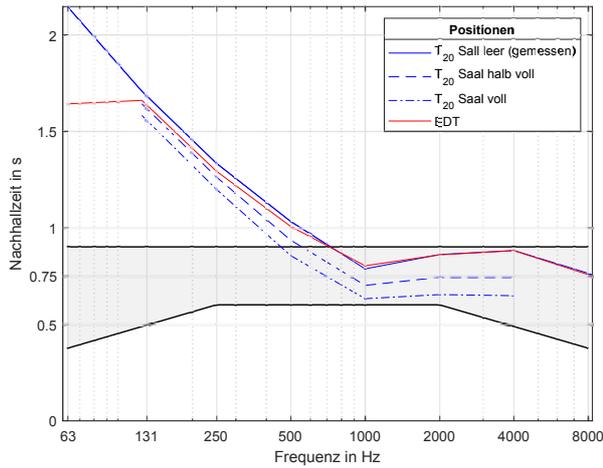
Sommersemester 2018



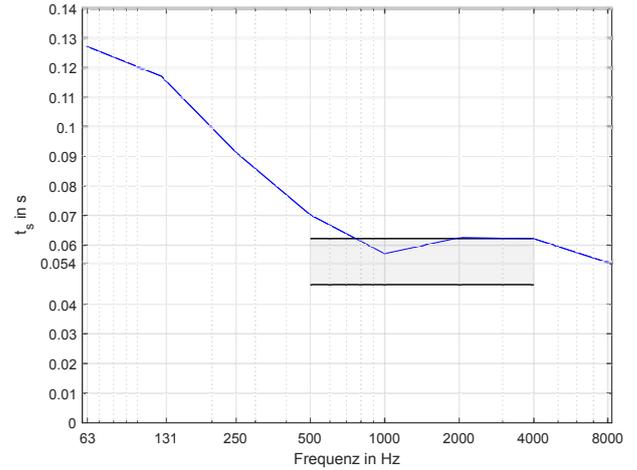
EDT... Anfangsnachhallzeit $L_{Aeq,nT}$... Anlagengeräuschpegel t_s ... Schwerpunktszeit
 D_{50} ... Deutlichkeitsgrad STI... Sprachübertragungsindex BR... Bassverhältnis



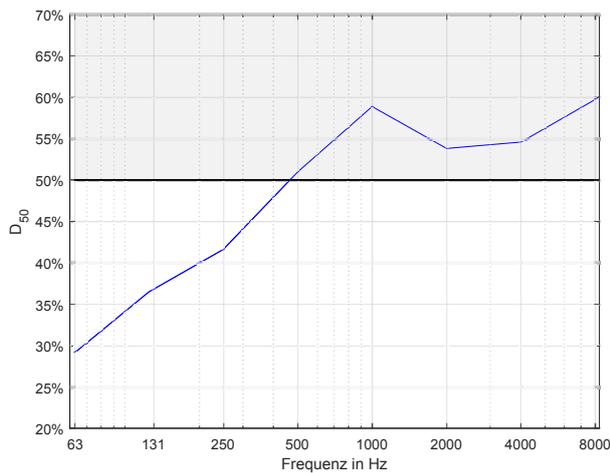
Messbedingungen	
Datum	09.06.2018
Messmethoden	MLS, Exp. Sweep
Personen im Raum	1
Raumvolumen	257 m ³
Temperatur	25,1 °C
Luftfeuchtigkeit	50,6%
LAeq	30,4 dB(A)
Bestuhlung	24 Sessel Holz
Boden	Linoleum
Wände	Holz, Fenster, Putz
Decke	Putz
Absorber	Lochplatten
Reflektoren	Nein



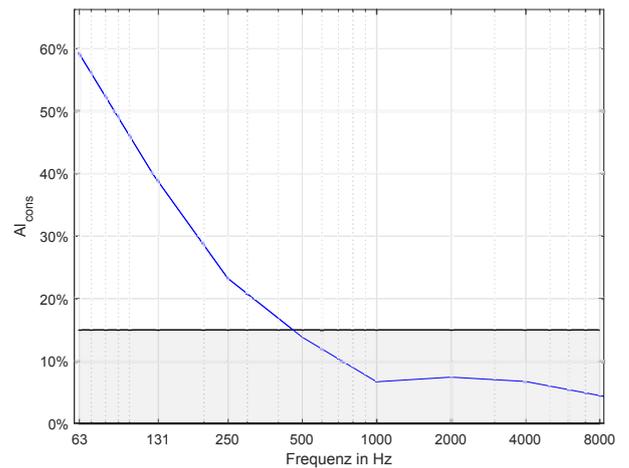
Nachhallzeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	2.15	1.71	1.34	1.03	0.79	0.86	0.88	0.76
T_{20} halbvoll in s	–	1.64	1.27	0.94	0.70	0.74	0.75	–
T_{20} voll in s	–	1.58	1.20	0.86	0.63	0.65	0.65	–
EDT in s	1.64	1.66	1.30	1.01	0.80	0.86	0.88	0.76



Schwerpunktszeit								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
t_s in s	0.127	0.117	0.091	0.070	0.057	0.063	0.062	0.054



Deutlichkeitsgrad								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
D_{50} in %	29	37	42	51	59	54	55	60



Artikulationsverlust								
f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Al_{cons} in %	59	40	23	14	7	7	7	4

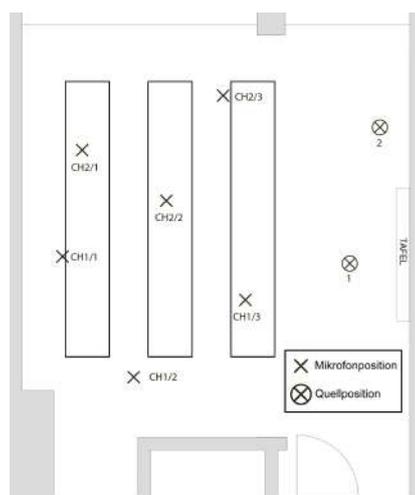
Diskussion:

Im Hörsaal FSI2 ist die Nachhallzeit unterhalb $f = 500Hz$ zu lang, weshalb er subjektiv als brummend empfunden wird. Unterhalb dieser Frequenz ist der Deutlichkeitsgrad zu gering sowie der Artikulationsverlust zu hoch, wodurch man auf schlechte Sprachverständlichkeit schließen kann. Die sonst in den Tiefen wirkenden Fenster sind in diesem Gebäude durch deren Beschaffenheit nicht wirksam.

Fazit:

Durch die lange Nachhallzeit besonders bei tiefen Frequenzen ist die Sprachverständlichkeit nicht gegeben. Eine akustische Sanierung des Hörsaals ist empfohlen.

		f in Hz							
Positionen		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_{20} in s	Ch1/1	1.92	1.88	1.33	0.97	0.78	0.86	0.89	0.76
	Ch2/1	2.32	1.73	1.39	1.11	0.79	0.85	0.87	0.78
	Ch1/2	2.19	1.57	1.27	0.99	0.77	0.87	0.88	0.76
	Ch2/2	2.46	1.74	1.35	1.03	0.81	0.87	0.87	0.75
	Ch1/3	1.84	1.64	1.33	1.09	0.79	0.87	0.91	0.78
	Ch2/3	2.17	1.70	1.35	1.01	0.79	0.86	0.88	0.77
EDT in s	Ch1/1	1.55	1.89	1.34	0.96	0.81	0.88	0.91	0.78
	Ch2/1	1.83	1.42	1.24	0.96	0.87	0.90	0.91	0.76
	Ch1/2	1.37	1.71	1.31	1.05	0.88	0.80	0.85	0.73
	Ch2/2	1.75	1.70	1.51	1.08	0.74	0.89	0.87	0.77
	Ch1/3	1.44	1.57	1.16	1.11	0.78	0.83	0.87	0.77
	Ch2/3	1.91	1.69	1.21	0.89	0.76	0.87	0.90	0.74
t_s in s	Ch1/1	0.132	0.117	0.098	0.073	0.063	0.067	0.066	0.058
	Ch2/1	0.140	0.107	0.085	0.065	0.062	0.067	0.068	0.058
	Ch1/2	0.086	0.120	0.107	0.073	0.058	0.060	0.062	0.055
	Ch2/2	0.147	0.135	0.102	0.077	0.056	0.064	0.063	0.056
	Ch1/3	0.100	0.115	0.076	0.069	0.054	0.055	0.053	0.045
	Ch2/3	0.157	0.108	0.080	0.063	0.050	0.061	0.061	0.054
Al_{cons} in %	Ch1/1	77.80	73.67	37.04	19.83	10.85	12.12	11.07	7.19
	Ch2/1	98.75	59.40	37.27	23.43	9.85	10.65	9.76	6.77
	Ch1/2	79.17	43.49	27.60	16.75	8.42	9.86	8.67	5.73
	Ch2/2	48.70	24.11	14.46	8.53	4.36	4.59	4.01	2.62
	Ch1/3	21.63	16.71	9.48	7.08	3.15	3.45	3.34	2.14
	Ch2/3	29.50	21.52	13.64	7.34	3.54	3.94	3.62	2.43
D_{50} in %	Ch1/1	21.62	39.95	40.32	50.21	53.70	49.06	53.16	56.26
	Ch2/1	23.22	37.50	45.50	55.53	55.12	51.20	50.27	56.70
	Ch1/2	54.13	37.05	22.44	47.91	59.84	55.04	53.54	56.83
	Ch2/2	21.28	21.89	39.31	42.60	60.47	55.06	53.55	58.97
	Ch1/3	34.74	36.46	55.01	53.32	59.36	57.68	61.43	67.79
	Ch2/3	19.83	46.20	47.25	56.43	64.82	54.92	55.65	61.97



Positionen	STI	BR
Ch1/1	0.59	1.83
Ch2/1	0.60	1.65
Ch1/2	0.59	1.62
Ch2/2	0.58	1.67
Ch1/3	0.61	1.58
Ch2/3	0.61	1.69

Das Datenblatt wurde im Rahmen der Bachelorarbeit „Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse“ erstellt. Details zur Messung, Berechnung und Auswertung werden in der genannten Arbeit erläutert.



Messprotokollvorlage

Prüfbericht

Anmerkungen	
Raumbezeichnung ,-und Ort:	
Grundriss (Anhang)	
Volumen:	
Anzahl/Art der Sitze:	
Form/Material d. Raumwände/Flächen:	
Besetzung/Anzahl Personen anwesend:	
Bedingungen veränderlicher Einrichtungen	
(Sicherheitsvorhang)	
(Beschreibung Bühne/Konzertzimmer)	
Temperatur [C°]: Luftfeuchte [%]:	
Beschreibung: 1.) Messgerät 2.) Schallquelle 3.) Mikrofon	
Beschreibung Schallsignal:	
(Messpunktdichte)	

Hörsaal:

Datum:

Volumen	$V =$	m^3
Nachhallzeit	$T =$	s

Grundgeräuschpegel (im Nutzbetrieb, z.B. mit Beamer EIN):

$L_{Aeq1} =$	$dB(A)$	vorne
$L_{Aeq2} =$	$dB(A)$	mittig
$L_{Aeq3} =$	$dB(A)$	hinten

Schröderfrequenz:

$$f_{Schröder} = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} = \quad Hz$$

optimale Nachhallzeit nach ÖNORM 8115-3:

$$T_{opt} = 0,37 \log\left(\frac{V}{m^3}\right) - 0,14 = \quad s$$

Mindestabstände nach ÖNORM EN ISO 3382-1 bzw. 3382-2 :

Wand ↔ Empfänger = $1m$
Empfänger ↔ Empfänger = $2m$
Sender ↔ Empfänger = $2 \sqrt{\frac{V}{c * T}} = \quad m$

Sender ↔ Empfänger (+20cm Box)		Verstärker	Messmethode	durchgeführt
E1 S1	ch1 ↔ S1 = m	dB		<input type="radio"/>
	ch2 ↔ S1 = m	dB		<input type="radio"/>
E1 S2	ch1 ↔ S2 = m	dB		<input type="radio"/>
	ch2 ↔ S2 = m	dB		<input type="radio"/>
E2 S2	ch1 ↔ S2 = m	dB		<input type="radio"/>
	ch2 ↔ S2 = m	dB		<input type="radio"/>
E2 S1	ch1 ↔ S1 = m	dB		<input type="radio"/>
	ch2 ↔ S1 = m	dB		<input type="radio"/>
E3 S1	ch1 ↔ S1 = m	dB		<input type="radio"/>
	ch2 ↔ S1 = m	dB		<input type="radio"/>
E3 S2	ch1 ↔ S2 = m	dB		<input type="radio"/>
	ch2 ↔ S2 = m	dB		<input type="radio"/>

E....Empfängerposition S....Senderposition

