Raumakustik aus einem interdisziplinären Blickwinkel

Robert Hofer[1], Jamilla Balint[1] ,* Milena Stavric[2]

[1] *Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation, Technische Universität Graz, 8010 Graz, Österreich,*
Email: robert.hofer@student.tugraz.at, balint@tugraz.at

[2] *Institut für Architektur und Medien, Technische Universität Graz, 8010 Graz, Österreich,*
Email: mstavric@tugraz.at

Einleitung

Wallace C. Sabine, ein Pionier der Raumakustik, hat 1897 seine ersten Experimente im Vortragssaal des Fogg Art Museum durchgeführt, wo er auch beauftragt wurde die Sprachverständlichkeit zu verbessern [1]. Inspiriert von Sabine's Arbeit, haben Studierende der Technischen Universität Graz der Fachrichtungen Elektrotechnik-Toningenieur über 100 Jahre später im Rahmen von Forschungsprojekten 26 Hörsäle raumakustisch vermessen und mithilfe eines Fragebogens subjektiv beurteilt. Aus dem Abgleich von subjektiven und objektiven Ergebnissen mit den Sollwertangaben aus der Literatur konnten die Anforderungen an die Raumakustik für Vorträgssäle evaluiert werden. Für die vereinte Darstellung der ermittelten subjektiven und objektiven Ergebnisse, der Sollwerte sowie der Toleranzbereiche wurde ein Netzdiagramm entwickelt. Auf Grundlage der akustischen Bestandsaufnahmen sowie Materialvorgaben wurden Umbauaßnahmen der sanierungsbedürftigen Hörsäle von Studierenden der Fachrichtung Architektur ausgearbeitet.

Messung und Auswertung

Die Beurteilung der Räume erfolgte sowohl objektiv mittels Berechnung von raumakustischen Gütemaßen als auch subjektiv anhand eines Fragebogens.

Objektive Messung

Zur Ermittlung der Gütemaße wurden in einer raumakustischen Messung mit insgesamt 12 unabhängigen Quell- und Empfängerpositionen gemäß ÖNORM 3382-1 [7] die Impulsantworten ermittelt. Als Messsignal wurde ein exponentieller Sweep und ein MLS Signal verwendet. Aus den aufgenommenen Impulsantworten wurden mithilfe der ITA-Toolbox die Gütemaße berechnet [2]. Der Signalweg ist in Abb. 1 dargestellt.

Um die akustischen Eigenschaften der Hörsäle objektiv zu beschreiben, wurden die Gütemaße Anfangsnachhallzeit EDT, Deutlichkeitsgrad D_{50}, Bass Ratio BR und Schwerpunktzeit t_s, Sprachverständlichkeitsindex STI und der Anlagengeräuschpegel $L_{Aeq,nT}$ gewählt. Anstelle der üblicherweise verwendeten Nachhallzeitparameter T_{20} oder T_{30} wurde die Anfangsnachhallzeit EDT verwendet, da diese besser mit der subjektiven Wahrnehmung der Nachhallzeit korreliert. Außerdem wurden Parameter, die für die Beurteilung von Konzertsälen dienen, herangezogen (Deutlichkeitsgrad D_{50}, Bass Ratio BR und Schwerpunktzeit t_s), da sie auch einen großen Einfluss auf die wahrgenommene Sprachverständlichkeit besitzen. Die Bass Ratio BR soll zeigen, ob eine Maskierung von Sprachsignalen durch tieffrequenten Störschall durch eine zu lange Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen vorliegt. Der Anlagengeräuschpegel $L_{Aeq,nT}$ wurde betrachtet, da sich ein zu hoher Hintergrundgeräuschpegel negativ auf die Sprachverständlichkeit auswirkt.

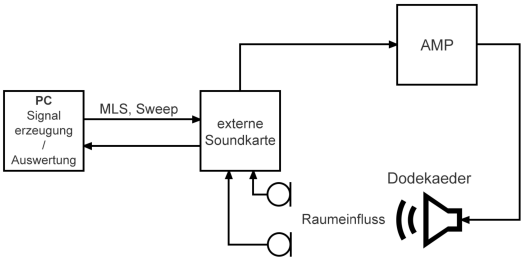


Abbildung 1: Signalweg der raumakustischen Messung

Subjektive Evaluierung

Für die subjektive Evaluierung wurde in jedem Raum ein eingepegeltes Sprachsignal (männliche Stimme) durch einen Lautsprecher (Studiomonitor Yamaha HS 8) abgespielt (L_p = 65dB(A) in 1m Entfernung) [11]. Dabei wurde ein Fragebogen (semantisches Differential mit einer Skala von -3 bis 3) von drei hörtechnisch geschulten Personen ausgefüllt. Ein schematischer Aufbau der Evaluierung ist in Abb. 2 dargestellt.

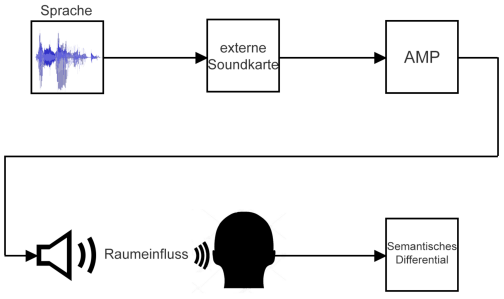


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der subjektiven Beurteilung

*derzeitige institutionelle Zugehörigkeit: Institut für Hörtechnik und Akustik, RWTH Aachen University

Vergleich von subjektiven und objektiven Parametern

Durch den Vergleich zwischen subjektiven und objektiven Ergebnissen wurde der Sollwertbereich der Gütemaße eingegrenzt. Dies wurde gemacht indem überprüft wurde, ob bei den Hörsälen im oberen Teil des subjektiven Rankings (die als subjektiv „gut“ empfundene Hörsäle) die Wertebereiche der Gütemaße im Optimalbereich sind. Die Wertebereiche wurden wie folgt definiert:

***EDT*:** Als Sollwerte der Anfangsnachhallzeit EDT wurde die optimale Nachhallzeit nach ÖNORM B 8115-3 übernommen [6].

D_{50}: Für den Deutlichkeitsgrad D_{50} wird ein Wertebereich von $D_{50} \geq 50\%$ empfohlen, was dem von Schmidt und Reichardt (1984) definierten Wertebereich entspricht [12].

t_S: Für die Schwerpunktszeit t_s wurde die von der Sollnachhallzeit (Nach ÖNORM B 8115-3) abhängigen optimale Schwepunktszeit nach Kürer [5] mit dem Wertebereich nach Ahnert und Tennhardt [9] kombiniert. Dadurch ergibt sich ein Sollbereich von $\frac{6}{7} \cdot t_{s,opt} \geq \frac{6}{7} \cdot t_{s,opt}$ wobei $t_{s,opt} = \frac{T_{opt}}{13,8}$.

BR: Der von Ahnert und Tennhardt [9] definierte Sollwertebereich (0,9 - 1,0) der Bass Ratio BR wurde auf 0,9 - 1,1 erweitert.

***STI*:** Die von Houtgast und Steeneken definierten Verständlichkeitsklassen des STI [8], wurden von fünf auf zwei abgeändert. Für „verständliche“ Hörsäle wird ein Wertebereich von STI $\geq$ 0,6 empfohlen.

$L_{Aeq,nT}$: Der Wertebereich des äquivalenten Dauerschallpegels von $L_{Aeq,nT} \leq$ 30dB wurde der OIB-Richtlinie 5 entnommen, welcher für Aufenthaltsräume mit dem Schutzziel Konzentration definiert ist [10].

Um zu Beurteilen ob subjektive und objektive Ergebnisse korrelieren, wurden passende Zuordnungen zwischen den Gütemaßen und den Eigenschaftspaaren aus dem Semantischen Differential gefunden (siehe Tab. 1).

Tabelle 1: Zuornung der Gütemaße Anfangsnachhallzeit EDT, Deutlichkeitsgrad D_{50}, Schwerpunktzeit t_s, Bass Ratio BR, Sprachverständlichkeitsindex STI, Anlagengeräuschpegel $L_{Aeq,nT}$ zu den ausgewählten subjektiven Attributen aus dem semantischen Differential

Gütemaß	subjektives Paar	
EDT	hallig	trocken
D_{50}	einhüllend	direkt
t_s	hallig	trocken
BR	klirrend	brummend
STI	verständlich	unverständlich
$L_{Aeq,nT}$	leise	laut

Ergebnisse

Für die Darstellung von subjektiver Evaluierung und raumakustischer Messung, sowie deren Vergleich, wurde ein Netzdiagramm entworfen, welches am Beispiel des HSi4 (s. Abb. 3, einem Hörsaal der TU- Graz im Campus Inffeldgasse ($V = 169\text{m}^3$)) im Folgenden beschrieben wird: Auf jeder der Achsen des Netzdiagramms wird das Ergebnis aller Positionen der objektiven Messung mit der dazugehörigen subjektiven Evaluierung dargestellt. Die rote Fläche beschreibt die frequenzabhängige Darstellung der objektiven Messwerten und die blau-strichlierte Linie enthält den subjektive ermittelten Wertebereich von -3 bis 3. Der Optimalwertebereich für die objektive Ergebnisse ist in grün eingezeichnet.

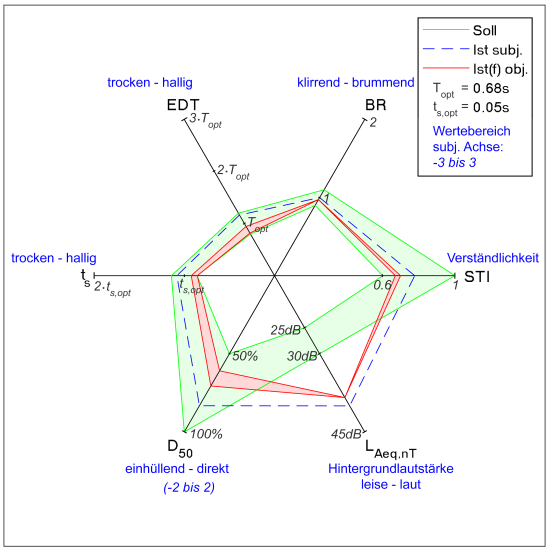


Abbildung 3: Netzdiagramm des HSi4

Der HSi4 ist ein Beispiel eines sowohl subjektiv als auch objektiv akustisch guten Hörsaal, was im Netzdiagramm zu erkennen ist, da sich mit Ausnahme des Anlagengeräuschpegels $L_{Aeq,nT}$ die subjektiven und objektiven Ergebnisse innerhalb des Toleranzbereiches befinden.

Im Netzdiagramm in Abb. 4 weicht die rote Fläche (Werte der objektiven Messung) als auch die blaue Linie (Werte der subjektiven Evaluierung) vom grünen Bereich (Sollwerte) relativ stark ab. Es handelt sich daher beim HSi13 um einen akustisch nicht idealen Hörsaal. Außerdem ist zu sehen, dass die Werte der Nachhallzeit EDT eine hohe spektrale Spreizung besitzen. Diese Eigenschaft in Verbindung mit einer Bass Ratio von $BR \leq 1$ weist auf einen ungünstigen, zu tiefen Frequenzen ansteigenden Verlauf der Nachhallzeit hin.

Die subjektiven Werte der Netzdiagramme von HSi8 und HSi9 variieren sehr stark, im Gegensatz dazu weisen die objektiven Messwerte eine ähnliche Tendenz auf (siehe Abb. 5). Beide Hörsäle befinden sich im gleichen Gebäude, besitzen ähnliche Raumbegrenzungsflächen, unterscheiden sich jedoch maßgeblich im Raumvolumen ($V_{HSi8} = 363\text{m}^3$; $V_{HSi9} = 643\text{m}^3$). Mit zunehmender Raumgröße steigt daher die Forderung, dass sich die Gütemaße nahe des Idealwerts befinden. Obwohl

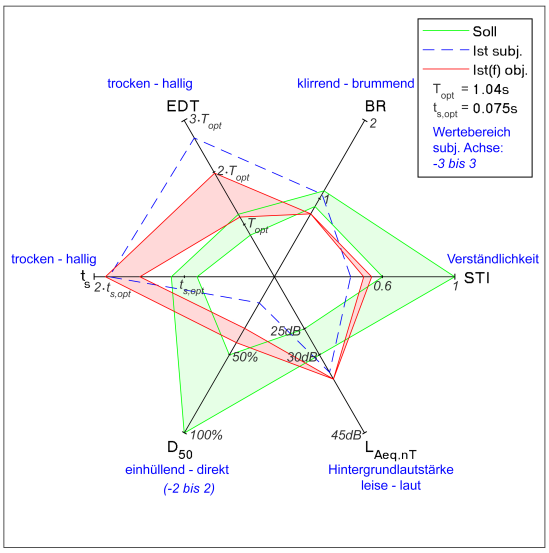


Abbildung 4: Netzdiagramm des HSi13

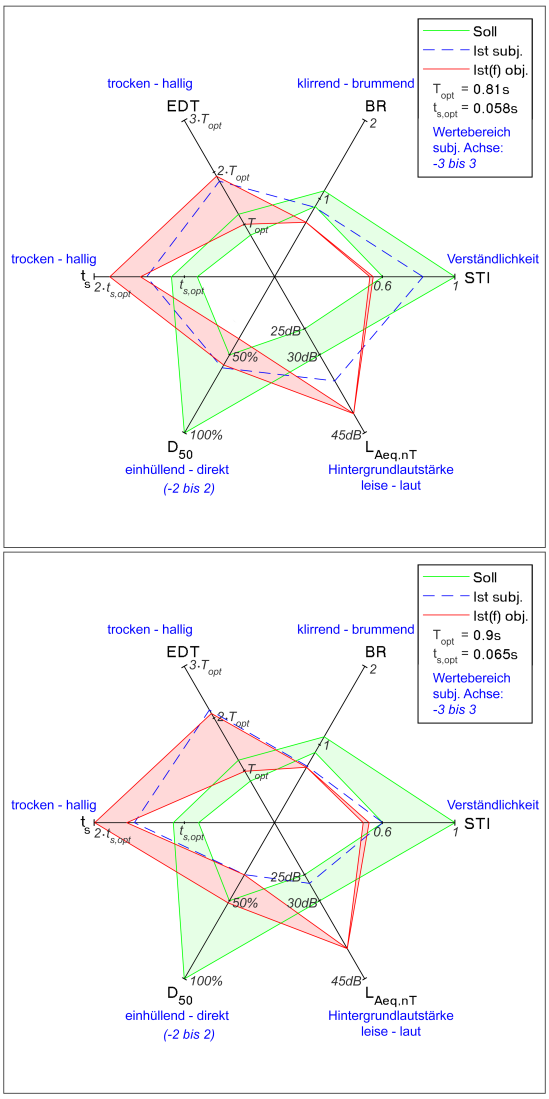


Abbildung 5: Netzdiagramm des HSi8 (oben) und HSi9 (unten)

die objektiv ermittelten Pegel in beiden Sälen ident sind, wird der Pegel im kleineren Saal als subjektiv lauter empfunden. Auch hier besteht ein volumensabhängiger Zusammenhang zwischen Anlagengeräuschpegel und dessen Lautstärkeempfindung. Je größer der Hörsaal ist, desto leiser wird das Hintergrundgeräusch empfunden. Die Messungen zeigen, dass der Anlagengeräuschpegel in allen Hörsälen den Grenzwert überschreitet. Die maßgebliche Lärmemission wird dabei durch den Beamer verursacht.

Rangliste der Hörsäle

Anhand der Abweichung der gemessenen Nachhallzeit T_{20} im leeren Raum von der optimalen Nachhallzeit nach ÖNORM 8115-3 wurde für 17 Hörsäle des Campus Inffeldgasse eine Rangliste erstellt (siehe Tab. 2). Zwischen den Platzierungen 10 (HSi7) und 11 (HSi13) geschieht ein Sprung der prozentualen Abweichung um 19,8% (von 20,1% auf 39,9%). Laut Norm ist eine Abweichung von 20% zulässig, somit besteht für die Hörsäle auf den Platzierungen 11 - 17 Sanierungsbedarf.

Interdisziplinäre Zusammenarbeit

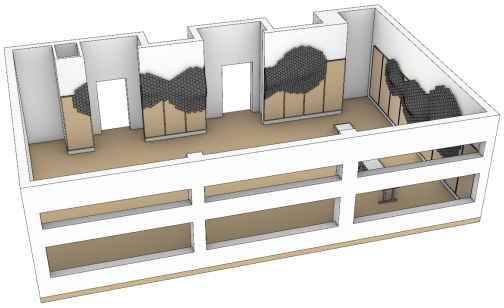
Mit dem Ansatz „*research through design*“ wurden Studierende der Fachrichtung Architektur für das Thema Akustik sensibilisiert. Sie bekamen die Aufgabe, einen Entwurf für eine akustische Sanierung eines Hörsaales mit innovativen Fertigungsmethoden zu gestalten. Ein Beispiel ist in Abb. 6 dargestellt. Ein Polyestervlies mit einer Dicke von $d = 25$mm wurde mittels eines Schneideplotters bearbeitet (Kerfing-Methode) und somit verformbar. Durch eine spezielle Unterkonstruktion entstand ein dreidimensionales Objekt, das horizontal entlang von zwei Wandflächen verläuft. Der Ansatz umfasst eine gleichmäßige Verteilung der Absorption und ist zugleich eine künstlerische Gestaltung des Raumes.

Fazit

Durch Vergleich von subjektiven und objektiven Ergebnissen konnte festgestellt werden, dass durch die alleinige Kenntnis der Gütemaße keine Aussage über die akustische Qualität eines Hörsaals getroffen werden kann, da dafür noch die Raumgröße und der Hintergrundgeräuschpegel bekannt sein muss. Ein zu hoher Hintergrundgeräuschpegel wirkt sich erwartungsgemäß negativ auf die Sprachverständlichkeit aus. In kleinen Hörsälen kann auch eine hinreichende Sprachverständlichkeit erreicht werden, auch wenn die Gütemaße nicht den Idealwert besitzen. Große Hörsäle sollten trotz optimaler Gütemaße mit einer elektroakustischen Anlage ausgestattet werden um eine optimale Sprachverständlichkeit zu erreichen. Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Fachrichtungen Elektrotechnik-Toningenieur und Architektur konnten Studierenden für das jeweils anderes Fachgebiet sensibilisiert werden und innovative Konzepte für die akustische Gestaltung der Hörsäle erarbeitet werden.

Tabelle 2: Objektive Rangliste der Hörsäle

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	HSFSI2	$49,4\%$
15	HSi12	$52,9\%$
16	HSi9	$57,3\%$
17	HSFSI1	$81,3\%$



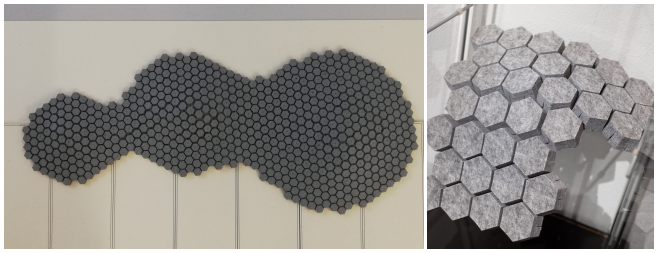


Abbildung 6: Entwurf für die akustische Gestaltung des Hörsaals HSFSi1: Visualisierung, Detailansicht und Modell im Maßstab 1:20

Die gesamte Bachelorarbeit sowie alle akustischen Datenblätter können unter folgendem Link abgerufen werden:

Danksagung

Vielen Dank an die Studierenden Clemens Frischmann, Klaus Schiller, Lazar Radovanvic, Alexander Mülleder, Djordje Perinovic, die im Rahmen ihrer Bachelorarbeit die raumakustischen Messungen und Auswertungen durchgeführt haben. Weiterer Dank geht an Kilian Hoffman für den innovativen Entwurf des Sanierungskonzeptes im Hörsaal.

Literatur

[1] Sabine, W. C. ; Egan, M. D.: Collected papers on acoustics. (1994)

[2] 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)

[3] Clemens Frischmann, Robert Hofer, Klaus Schiller. Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse, Januar 2019. Bachelorarbeit.

[4] Lazar Radovanovic, Djordje Perinovic, Alexander Mülleder. Raumakustische Vermessung und Sanierung von Hörsälen, März 2019. Bachelorarbeit.

[5] 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)

[6] ÖNORM B 8115-3, Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 3. (2002)

[7] ÖNORM EN ISO 3382-1: 2009 Akustik-Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume. (2009)

[8] 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)

[9] Weinzierl, S. : Handbuch der Audiotechnik. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, (2008)

[10] Österreichisches Institut für Bautechnik: OIB Richtlinie 5. (Ausgabe März 2015)

[11] 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

[12] Schmidt, W. ; Reichardt, W.: Raumakustische Kriterien für Sprache und Musik. In: Fasold, W. (Hrsg.) ; Kraak, W. (Hrsg.) ; Schirmer, W. (Hrsg.): Taschenbuch Akustik, Teil 2. Berlin : VEB Verlag Technik, 1984, S. 1188–1207