

Karsten Voss, Edwin Rotzal, Detlef Hennings

AkuMess

**Entwicklung eines EDV-Werkzeuges
für die einfache Messung von
Nachhallzeiten von Räumen zur
Nutzung in Studium, Lehre, Aus- und
Weiterbildung**

F 2926

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9436-3

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



Bergische Universität Wuppertal

AkuMess

Entwicklung eines EDV-Werkzeuges für die einfache Messung von Nachhallzeiten von Räumen zur Nutzung in Studium, Lehre, Aus- und Weiterbildung

Endbericht

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

Aktenzeichen II 3-F20-11-1-037 / SWD-10.08.18.7-12.23

Projektnehmer

Bergische Universität Wuppertal

Fachbereich D, Architektur

Lehrgebiet Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung, b+tg

Prof. Dr.- Ing. Karsten Voss

Haspeler Strasse 27

42285 Wuppertal

Wuppertal, im August 2014





Die Projektbeteiligten

Projekt-Team

Bergische Universität Wuppertal
Fachbereich D, Abteilung Architektur
Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung Haspeler Str.27
Prof. Dr.-Ing. K. Voss, Dipl. Ing. (FH) E. Rotzal D-42285 Wuppertal

Dr. D. Hennings Augustastr. 24
D-51065 Köln

Projekt-Berater

Dipl.-Ing. S. Goossens Institut für Rundfunktechnik
D-80939 München

KH. Stegmaier, M.A. Akustikbüro Krämer & Stegmaier
D-10553 Berlin

Dipl.-Ing. J. Wuttke Jörg Wuttke Consultancy
D-76327 Pfinztal

Unterstützende Firmen

Herr Bürgi Akustik & Raum AG
Tannwaldstraße 101
CH-4600 Olten

Herrn Barchfeld Caparol
Roßdörfer Str. 50
D-64372 Ober-Ramstadt

Herr Harder LIGNO TREND
Landstraße 25
D-79809 Weilheim-Bannholz

Herr Overbeck OWAcoustic
Postfach 1120
D-63916 Amorbach





Der vorliegende Endbericht bezieht sich auf das Forschungsprojekt „AkuMess – Entwicklung eines EDV-Werkzeuges für die einfache Messung von Nachhallzeiten von Räumen zur Nutzung in Studium, Lehre, Aus- und Weiterbildung“ Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Der Bericht umfasst 57 Seiten, zuzüglich Anhang.

Wuppertal, August 2014

.....
Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss





Inhalt

1. Kurzfassung	8
2. Ausgangslage	8
3. Entwicklungsziele	9
4. Entwicklungsverlauf und Erprobung der Software	9
4.1. Die erste Entwicklungs- und Erprobungsphase	9
4.2. Die zweite Entwicklungsphase	13
4.3. Die finale Erprobungs- und Testphase	15
5. Die funktionale Struktur der Software	18
6. Die Standard-Nutzung der AkuCheck-Software	19
6.1. Eine Meßreihe vorbereiten	19
6.2. Messungen durchführen	23
6.3. Messungen auswerten	26
6.4. Meßergebnisse bewerten	28
6.5. Modifikationen am Meßobjekt berechnen	31
6.6. Dokumentieren der Meß- und Berechnungs-Ergebnisse	35
6.7. Die Nutzung der Schallabsorberdatenbank	35
7. Die erweiterte Anwendung der Software	37
7.1. Messung von Raumimpulsantworten mit 'Sinus-Sweep'	37
7.2. Verschiedenartig gemessene Nachhallzeiten	39
7.3. Maße für Klarheit und Übertragungsqualität	40
7.4. Schallabsorberdaten und Planung	43
8. Der didaktische Kontext	46
9. Betrachtungen zur Genauigkeit der Messungen	49
10. Betrachtungen zur Wahl geeigneter Mikrofone	53
11. Kommunikation und Publikation	57
12. Anhang	58



1. Kurzfassung

Im oben bezeichneten Projekt wurde eine Software für die „raumakustische Analyse mit einfachen Mitteln“ entwickelt, getestet und im laufenden Lehrbetrieb der Universität Wuppertal praktisch erprobt. Die Software ist primär für die Anwendung im Lehr- und Lernbetrieb konzipiert. Leitlinien der Entwicklung waren unter anderem, dass die Studierenden und Lernenden ihre eigenen Notebook-PCs für Messungen einsetzen können und dass die Anwender von der Software fachdidaktisch durch den Messprozess geführt werden.

In zwei Entwicklungsphasen, die sich mit technischen Tests und didaktischer Erprobung abwechselten, wurde die Software erstellt und zur Anwendungsreife gebracht, so dass sie ab August 2014 für alle Lehrenden und Lernenden zur freien Verfügung steht. Dazu steht eine Downloadadresse bereit:

<http://www.btga-arch.uni-wuppertal.de/werkzeuge/akucheck.html>

2. Ausgangslage

In vielen Gebäuden ist eine überzeugende Raumakustik wesentlicher Bestandteil der Nutzungsqualität. Dies gilt in besonderem Maß in Schulen und anderen Bildungseinrichtungen, aber auch für alle anderen Räume, in denen kommuniziert wird, wo Vorträge gehalten werden oder in denen Veranstaltungen mit Sprache oder Musik stattfinden.

Die Erfahrung zeigt, dass eine große Zahl derartiger Räume existiert, die aufgrund ihrer raumakustischen Eigenschaften für ihren Zweck (Unterricht, Vortrag, usw.) nicht gut geeignet sind. Dies gilt nicht nur bei älteren Bestandsgebäuden, sondern auch in Neubauten.

Daraus lässt sich folgern, dass

- eine gute raumakustische Qualität offenbar noch nicht selbstverständlicher Bestandteil eines gut gelungenen Bauwerks ist
- Planungsbeteiligte (bei Bauvorhaben ohne spezielle raumakustische Beratung) offenbar keine ausreichenden raumakustischen Kenntnisse besitzen.

In der Architekturausbildung an den Hochschulen sowie in der Weiterbildung für Architekten und andere Bauberufe besteht ein wichtiger Ansatzpunkt für eine nachhaltige und über längere Zeit wirksame Verbesserung, indem der Kenntnisstand über raumakustische Zusammenhänge vertieft wird.



3. Entwicklungsziele

Ausgehend von der Tatsache, dass die Curricula in der Architekten-Ausbildung nur eine geringe Zahl von Unterrichtsstunden für akustische Themen vorsehen, soll ein Software-Werkzeug entwickelt werden, das den Studierenden mit kurzer Vorbereitungszeit und mit geringem technischem Aufwand eine intensive praktische Arbeit am Thema Raumakustik ermöglicht.

Die Software soll es den Studierenden erlauben, ohne besondere Messapparatur unter Einsatz ihrer eigenen Notebook-Computer und eines einfachen und preisgünstigen Mikrofons raumakustische Messungen vorzunehmen, diese auszuwerten und gemessene Nachhallzeiten anhand genormter Kriterien die raumakustische Qualität einzuschätzen. Darüber hinaus soll es möglich sein, ausgehend von den gemessenen Nachhallzeiten die Wirkung zusätzlicher Personen im Raum einerseits und raumakustische Verbesserungen durch zusätzliche Schallabsorber andererseits zu berechnen. Zu diesem Zweck soll eine Schallabsorber-Datenbank integriert werden.

4. Entwicklungsverlauf und Erprobung der Software

Im August 2012 wurde die Entwicklung der Software zunächst unter dem Arbeitstitel 'Aku-Mess' gestartet. Ein wesentlicher Gesichtspunkt der Entwicklung war es, bereits im laufenden Projekt die Software praktisch erproben zu können und Erfahrungen aus dieser Erprobung im weiteren Verlauf nutzen zu können. Deshalb wurde die Entwicklung in zwei Phasen unterteilt, an die sich jeweils eine didaktische Erprobung anschließt ebenso wie technische Tests. Da die didaktischen Erprobungen im Fachbereich Architektur der Universität Wuppertal stattfinden sollten, wurde der Zeitplan an den Studienplänen orientiert. Im Laufe des Projektes wurde nach eingehender Diskussion die Software in 'AkuCheck' umgetauft.

4.1. Die erste Entwicklungs- und Erprobungsphase

Am Ende der ersten Entwicklungsphase von August 2012 bis Januar 2013 sollte eine erste nutzbare Basisversion der Software mit noch eingeschränktem Funktionsumfang zur Verfügung stehen, um Tests und praktische Erprobung zu ermöglichen.

In dieser Phase wurde die grundlegende Softwarestruktur, mit der Möglichkeit Raumimpulsantworten mittels Impulsanregung zu messen, erarbeitet. Zusätzlich wurden die Algorithmen für die Ermittlung von Nachhallzeiten analog ISO 3382 implementiert.

Die in Bild 1 erkennbare Führung durch den Ablauf eines Analyseprozesses durch nummerierte, mittels Tabulator zugängliche Oberflächen Seiten war bereits angelegt, jedoch im Detail nur soweit umgesetzt, wie es die Basisfunktionen erforderten.

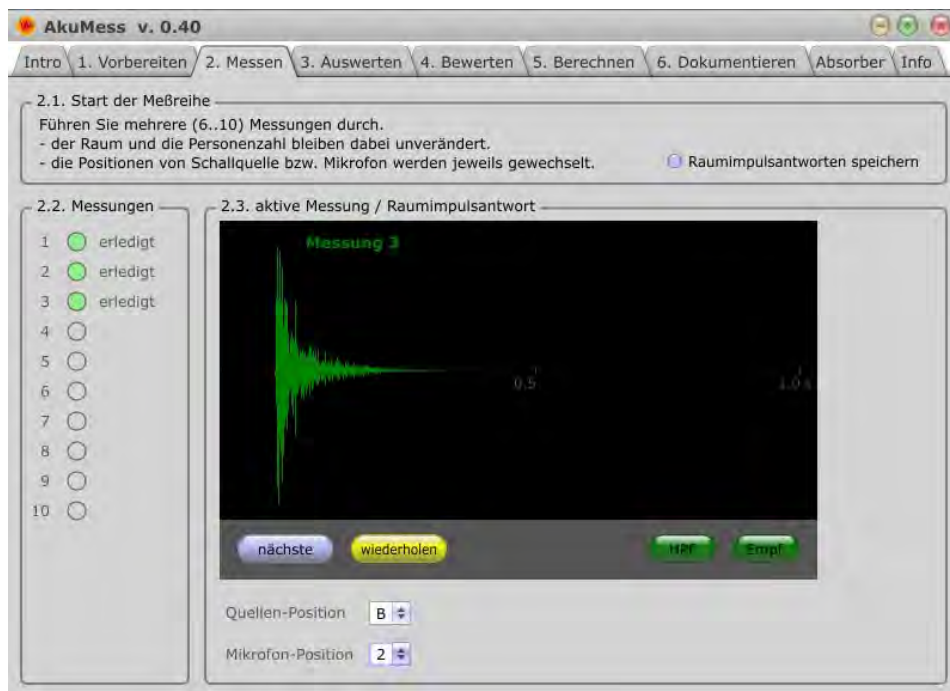


Bild 1: Die Nutzeroberfläche der Basisversion der Software nach der ersten Entwicklungsphase mit gemessener Impulsantwort eines akustisch trockenen Raums (Nachhallzeit etwa 0.4 s). Über den Tabulator oben sind die Oberflächen-Seiten mit verschiedenen Funktionsbereichen der Software zugänglich. Die Oberflächenseiten '5. Berechnen' und 'Absorber' waren zu diesem Zeitpunkt noch leer. Auch auf anderen Seiten waren nur die zu diesem Zeitpunkt notwendigen Teilfunktionen implementiert.

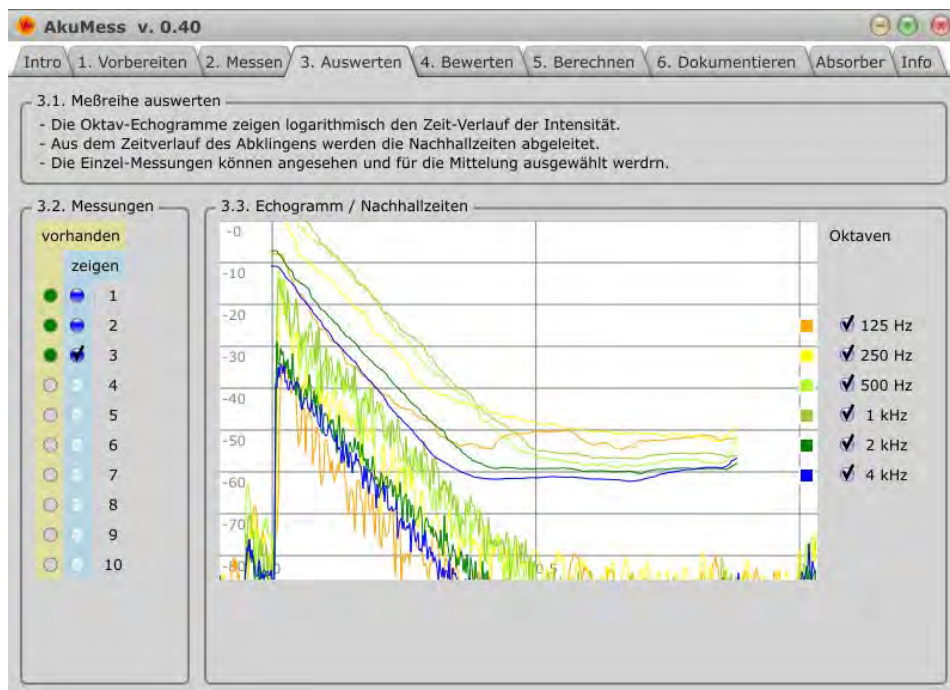


Bild 2: Die Rückwärtsintegration der aus der Impulsantwort berechneten Oktavechogramme ist ein wichtiger Zwischenschritt der Bestimmung von Nachhallzeiten mit den in ISO 3382 beschriebenen Algorithmen.

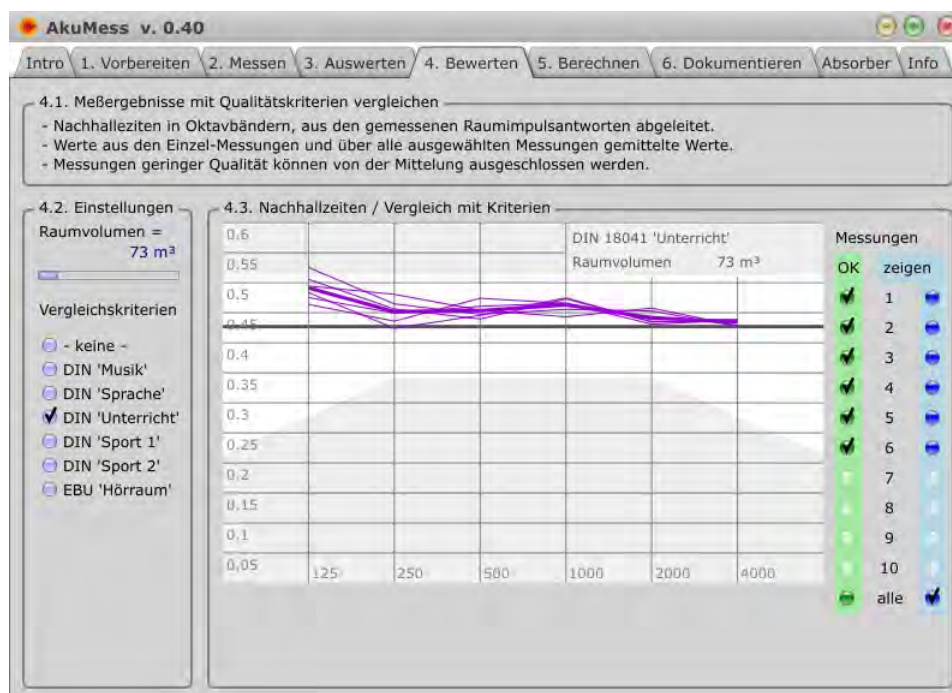


Bild 3: Die Oktavnachhallzeiten aus mehreren Messungen in einem Raum, sowie die Bewertung mit der Empfehlung für Unterrichtsräume aus DIN 18041.

Im Januar 2013 begann die didaktische und technische Erprobung der Basisversion. Im laufenden Lehrbetrieb an der Universität Wuppertal erfolgten erstmals praktische Messungen mit kleinen Studierendengruppen. Wichtigstes Ziel dieser Erprobung war es zu untersuchen, ob die Studierenden, die keine eigene Erfahrung mit akustischen Messungen hatten, sich schnell in die Verwendung der Software eingewöhnen konnten. Es zeigte sich, dass die Teilnehmer der Erprobung nach kurzer Anleitung teils völlig eigenständig, teils mit geringfügiger Unterstützung mit der Software arbeiten konnten. Aufbauend auf dieser ersten Erfahrung wurden einige Modifikationen an der Software vorgenommen, insbesondere wurde die Anzeige des Mikrofonpegels als Echtzeitoktavanalysator ausgeführt, so dass damit auch die Eignung von Impulsschallquellen für die Messungen überprüft werden kann.

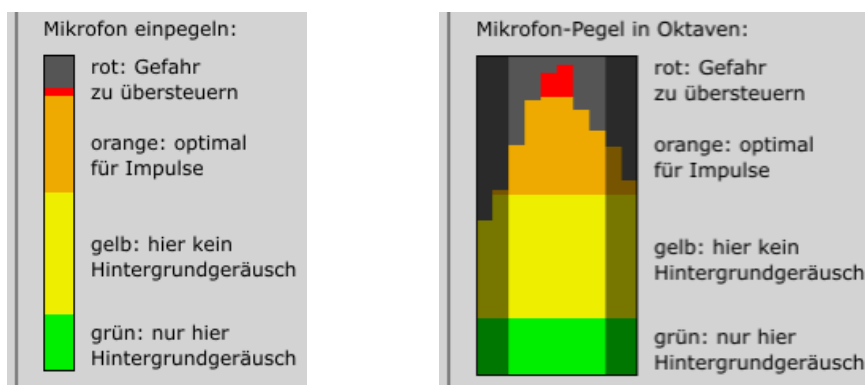


Bild 4: Als Konsequenz aus Erfahrungen der didaktischen Erprobung wurde die einfache Pegelanzeige (links) als Hilfsmittel für die Vorbereitung der Messungen durch einen Echtzeitoktavanalysator (rechts) abgelöst.



Bild 5: Ein Teil der für den Algorithmenvergleich verwendeten Raumimpulsantworten wurde in Räumen der Universität Wuppertal gemessen. Hier der Messaufbau in einem Hörsaal.

Neben der didaktischen Erprobung wurde die Genauigkeit der Messalgorithmen anhand von Testmessungen im Vergleich zu drei etablierten Referenzen überprüft. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung. Die Abweichungen der AkuCheck-Software zu den Referenzen waren in der gleichen Größenordnung wie die Abweichungen der Referenzen untereinander. Eine ausführlichere Betrachtung zur Messgenauigkeit enthält Kapitel 9. Weiteres zum didaktischen Kontext enthält Kapitel 8.



4.2. Die zweite Entwicklungsphase

Nach der Auswertung der didaktischen Erprobung und der technischen Tests der ersten Phase begann Mitte des Jahres 2013 die zweite Entwicklungsphase, in der die Software auf den vollen Funktionsumfang erweitert wurde. Dazu gehören neben den einfachen Nachhallmessungen mit Impulsanregung auch genauere Messungen mit Gleitsinus ('sinus sweep'), die Ermittlung der Nachhallzeiten T_{30} , T_{20} und EDT sowie verschiedener Klarheits- und Deutlichkeitsmaße und eine Möglichkeit aufgrund von Messergebnissen die Wirkungen zusätzlicher Personen im Raum sowie raumakustischer Verbesserungsmaßnahmen zu berechnen. Für Letzteres wurde auch eine Schallabsorber-Datenbank integriert, die die Nutzer erweitern können. Die Erweiterungen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Für Messungen mit Gleitsinus ist zusätzlich zum Mikrofon auch ein Lautsprecher für die Abstrahlung des Messsignals erforderlich. Softwareintern wird als Messsignal ein kontinuierlich und logarithmisch über alle Frequenzen des Hörspektrums gleitendes Sinus-Signal mit einer Länge von 2^{16} Samples erzeugt. Parallel dazu wird ein im Frequenzverlauf inverses Signal für die Auswertung erzeugt. Das Messsignal wird über Lautsprecher in den Raum abgestrahlt und das übertragene Signal an der Mikrofonposition wird aufgezeichnet. Das aufgezeichnete Signal wird mit dem inversen Signal mathematisch 'gefaltet'. Die Faltung erfolgt als Multiplikation der Spektren beider Signale, mit vor- und nachgeschalteter FFT ('fast fourier transform'). Dieser Messvorgang wird manuell gestartet und läuft dann automatisch gesteuert ab.

Als Resultat der Gleitsinussmessung ergibt sich ebenso wie bei einer Impulsmessung eine Raum-Impulsantwort, wobei eine Gleitsinussmessung in der Regel präzisere Ergebnisse liefert und weniger empfindlich für Störgeräusche ist. Der weitere Auswerteprozess ist bei Gleitsinus- und bei Impulsmessungen der Gleiche.

Die Nachhallzeiten können wahlweise aus verschiedenen Abschnitten der Abklingkurve des gemessenen Signals (vgl. Bild 2) bestimmt werden. Bei der Nachhallzeit T_{30} wird das Abklingen von -5 dB bis -35 dB, bei T_{20} von -5 dB bis -25 dB ausgewertet. Die EDT (early decay time) wird aus dem Bereich 0 dB bis -10 dB gewonnen. Für die Auswertung werden Algorithmen analog ISO 3382 eingesetzt. Es kann auch ein mit der Messqualität gewichtetes Mittel aus T_{30} und T_{20} gewählt werden, so dass unter ungünstigen Messbedingungen jeweils ein 'bestmöglicher' Messwert angezeigt wird.

Neben den Nachhallzeiten, die sich als statistische Größe auf einen ganzen Raum beziehen, können auch Maße für die Übertragungsqualität einzelner Strecken von einer Schallquelle zu einer Hörposition aus den gemessenen Raumimpulsantworten bestimmt werden. In diesen Maßen wird der zeitliche Verlauf der Schallenergieverteilung in der Impulsantwort mit einer Bewertungsfunktion integriert bzw. aufsummiert. Bei der Deutlichkeit D_{50} , dem Deutlichkeitsmaß C_{50} und dem Klarheitsmaß C_{80} erfolgt die Bewertung mit einer Sprungfunktion (mit Sprung bei 50 bzw. bei 80 ms). Bei der Schwerpunktzeit T_5 dient die Zeit als Bewertungsfunktion. Auch hier beruhen die Auswertealgorithmen auf ISO 3382.

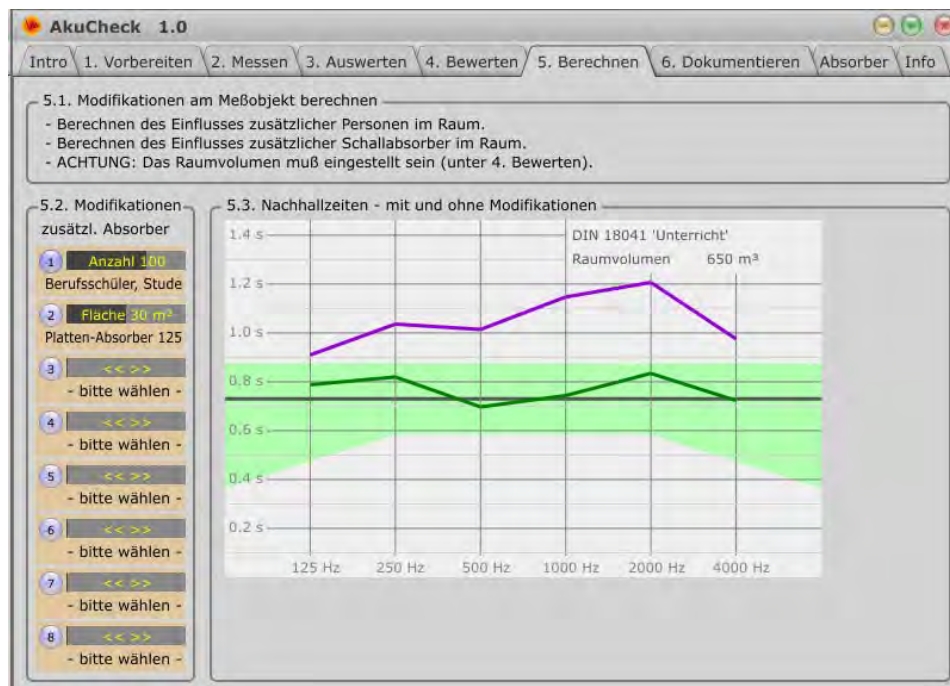


Bild 6: Beispielhafte Berechnung der Wirkung von 100 Personen und zusätzlicher Plattenabsorber in einem Hörsaal. In dieser Variante erfüllt der Hörsaal die Empfehlung der DIN 18041 für die Nutzungsart Unterricht.

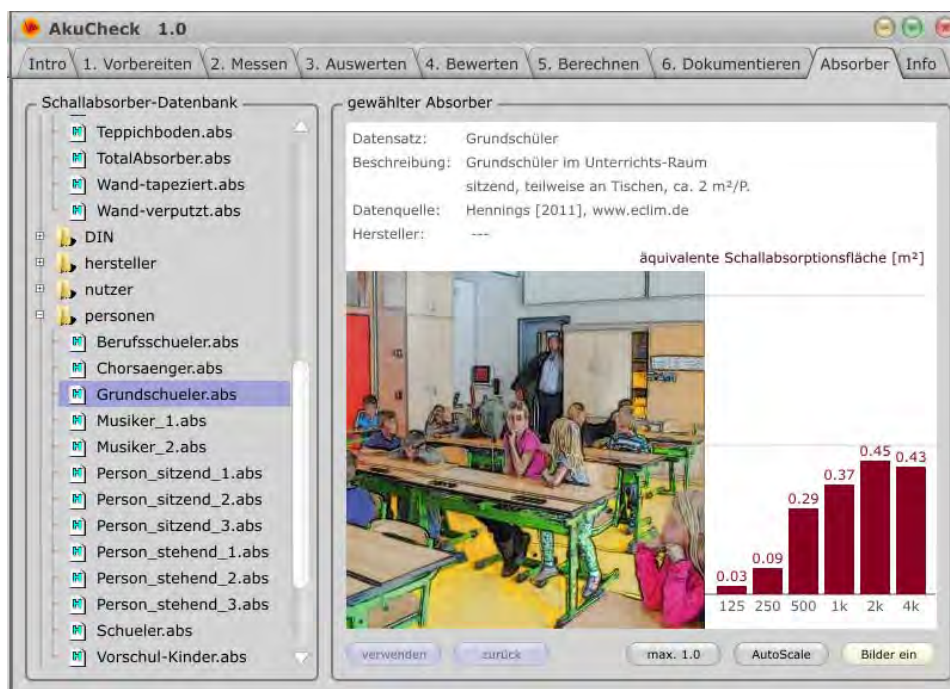


Bild 7: Die integrierte Schallabsorberdatenbank mit einem Datensatz für Grundschüler in der Anzeige.

Ausgehend von den gemessenen Nachhallzeiten kann die voraussichtliche Wirkung zusätzlicher Schallabsorber im Raum berechnet werden. Diese Option kann in zweierlei Weise genutzt werden. Nachhallmessungen, die meist mit nur wenigen Personen im Raum erfolgen, können so auf eine höhere Personenzahl, die der normalen Raumnutzung entspricht, 'hoch-



gerechnet' werden, indem Personen als Absorber eingesetzt werden. Des Weiteren kann die Wirkung zusätzlicher Schallabsorber als raumakustische Verbesserungsmaßnahme im Raum rechnerisch 'erprobt' werden, indem Nachhallzeiten dafür prognostiziert werden. Bei diesen Berechnungen kommt die Sabine'sche Näherungsformel für Nachhallzeiten zum Einsatz.

Als Datengrundlage für die Berechnungen ist eine Schallabsorberdatenbank integriert. Diese enthält eine Basisauswahl verschiedener Schallabsorbertypen. Daneben können die Projektunterstützenden Hersteller Absorberdaten aus ihrem Angebot einbringen. Schließlich besteht die Möglichkeit, dass Softwareanwender eigene Absorberdaten hinzufügen.

Weiter Information zu den Funktionen der Software ist in der Benutzeranleitung enthalten.

4.3. Die finale Erprobungs- und Testphase

Im zweiten Quartal 2014 erfolgten abschließende Beta-Tests, in denen unter anderem das Zusammenwirken der Software mit diversen, auch von den unterstützenden Firmen bereitgestellten Absorberdaten, erprobt wurde und in der eine Reihe kleinerer Softwarefehler gefunden und beseitigt wurden.

Der zweite Teil des Algorithmenvergleichs bezog sich auf die Maße für Übertragungsqualität (D_{50} , C_{50} , C_{80} , T_5). Auch hier zeigten sich wie bei den Nachhallzeiten kleine Abweichungen zu den Referenzen in gleicher Größenordnung, wie die Streuung der Referenzen untereinander. Ein weiterer Gegenstand der technischen Tests war der Einfluss der Messanregung auf die Genauigkeit der Messung. Messungen mit Gleitsinusanregung sind bei unverändertem Messaufbau bis auf (in der Regel unbedeutende) durch Störgeräusche bedingte Abweichungen nahezu exakt reproduzierbar. Messungen mit Impulsanregung zeigen dagegen eine prinzipbedingte Streuung, da nahezu alle Impulsschallquellen keine genau reproduzierbaren Impulse erzeugen können. In den Versuchen dazu wurde insbesondere die Zuverlässigkeit der bei den Studierendenversuchen häufig eingesetzten und wenig reproduzierbaren Schallquelle 'kräftiges Händeklatschen' betrachtet. In Bild 8 ist ein Beispiel aus diesen Vergleichen dargestellt. Es zeigt sich eine Streuung der Messwerte, die im Vergleich zu der Streuung von Messungen mit verschiedenen Quell- und Mikrofonpositionen kleiner oder maximal etwa gleich groß ist. Für die Messung der statistischen Messgröße Nachhallzeit bedeutet dies, dass eine nicht dominierende weitere Streuung der Messwerte hinzukommt, was bei Bedarf mit einer höheren Anzahl von Einzelmessungen weitgehend ausgeglichen werden kann. Da die Verhältnisse abhängig vom individuellen Raum und vom Schallquellentyp abhängen kann keine allgemeine Regel aufgestellt werden. Als Orientierung kann dienen, dass die Streuung der Messwerte nach Möglichkeit nicht größer sein soll als die Toleranzbreite der Empfehlungen in DIN 18041.

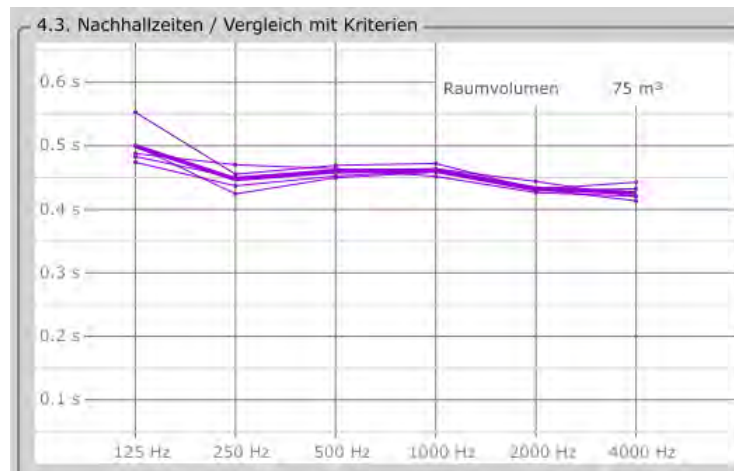


Bild 8: Ein Beispiel für die Reproduzierbarkeit von Nachhallzeitmessungen mit kräftigem Händeklatschen als Impuls-Anregung bei unveränderten Positionen von Schallquelle und Mikrofon. Bei tiefen Frequenzen zeigen sich vereinzelt etwas größere Abweichungen, denn hier ist der Energieinhalt der Impulse recht gering.

In einem weiteren Teil der technischen Tests wurde die Eignung verschiedener, auch einfacher und kostengünstiger Mikrofone und Audiointerfaces für die Messungen untersucht. Aus diesen Tests ergaben sich einige Richtlinien für die Auswahl geeigneter Hardware:

- In den Signalwegen der internen Mikrofone vieler Notebook-PCs der jüngeren Generation findet eine Signalverarbeitung statt. In diesen Fällen sind sie für Messungen ungeeignet und eine externe Kombination aus Mikrofon und Audiointerface muss verwendet werden.
- Kleine Elektret-Mikrofonkapseln mit 5-10 mm Membrandurchmesser und Mikrofone, in denen solche Kapseln verbaut sind, sind recht gut für Messungen geeignet, soweit die Übertragung tiefer Frequenzen bis herab zu etwa 80 Hz nicht beschnitten ist. Des Weiteren muss die Abschirmung gegen elektromagnetische Felder für die Umgebung im Messraum hinreichend sein.
- Sehr kostengünstige USB-Audiointerfaces (ca. 10 €) können mit Elektret-Mikrofonen verwendet werden. Auch hier muss die elektromagnetische Abschirmung hinreichend sein.
- Bei professionellen Mikrofonen und Audiointerfaces gibt es kaum Einschränkungen der Eignung. Lediglich bei sehr ausgeprägter Richtcharakteristik des Mikrofons (insbesondere 'Acht') ist Vorsicht geboten. Optimal für Messungen sind spezielle Messmikrofone oder Kleinmembranstudiomikrofone mit Kugelcharakteristik.



Bild 9: Ein Messmikrofon und eine Elektretmikrofon-Kapsel, für eine Vergleichsmessung übereinander montiert.

Parallel zu den technischen Tests wurde die weitgehend fertiggestellte Software im laufenden Sommersemester 2014 didaktisch erprobt. Dabei führten die Studierenden neben Messungen auch darauf aufbauende Berechnungen durch. Im Einzelnen bekamen die Studierenden nach einer kurzen Einführung in Grundlagen der Akustik und der Raumakustik in wenigen Unterrichtsstunden die Aufgabe in kleinen Gruppen jeweils einen Raum in der Universität zu analysieren. Die Analyse bestand aus einer Reihe von Teilaufgaben, insbesondere:

- Zunächst soll der Raum passiv (ohne Schallerzeugung) und aktiv (mit Erzeugung von Geräuschen) auditiv erkundet werden.
- Messung von Oktavnachhallzeiten mit der AkuCheck-Software und Impulsanregung.
- Vergleich der gemessenen Nachhallzeiten mit der Empfehlung in DIN 18041.
- Vergleich der auditiven Wahrnehmung und der Messergebnisse.
- Umrechnung der gemessenen Nachhallzeiten auf einen höheren Besetzungsgrad, der der normalen Nutzung des Raums entspricht.
- Vergleich der Nachhallzeiten mit höherer Besetzung mit der Empfehlung in DIN 18041.
- Berechnung der Wirkung einer raumakustischen Verbesserung durch zusätzliche Schallabsorber im Raum.

Insgesamt zeigte sich wie bei der ersten didaktischen Erprobung, dass die Studierenden gut mit der Software arbeiten konnten. Ein Teil der Gruppen erledigte die Aufgabe völlig eigenständig, Andere benötigten punktuelle Unterstützung, beispielsweise um auftretende Fragen zu klären. Ein weiteres Ergebnis war, dass die Software auf nahezu allen der beteiligten Notebook-PCs der Studierenden problemlos einsetzbar war. Die Mikrofone und USB-Audiointerfaces wurden von der Universität gestellt.



5. Die funktionale Struktur der Software

Die AkuCheck-Software ist intern modular in Funktionsblöcken aufgebaut, die untereinander Daten und Steuersignale austauschen. Die wichtigsten Funktionsblöcke sind:

- Die Benutzeroberfläche ist das Modul, über das der Austausch mit dem Nutzer stattfindet. Hier sind Eingaben zur manuellen Steuerung über Maus und Tastatur möglich und es erfolgt die Ausgabe von Text und Grafik auf den Bildschirm. Auf dem Bildschirm kann die Benutzeroberfläche verschiedene Seiten darstellen, die verschiedenen internen Vorgängen zugeordnet sind und die für die Nutzer den Ablauf einer Messreihe strukturieren.
- Die Ablaufsteuerung sorgt dafür, dass alle Vorgänge in der Software zum richtigen Zeitpunkt und in geeigneter Reihenfolge stattfinden, und dass Signale und Daten zwischen den verschiedenen Modulen ausgetauscht werden.
- Im Rechenkern werden die Algorithmen für die Messauswertung und für Berechnungen umgesetzt und hier sind auch alle Daten der jeweils aktuellen Messreihe gespeichert.
- Über die Audiosignal-Verarbeitung erfolgen die Eingabe und eine erste Verarbeitungsstufe des Mikrofonsignals sowie die Ausgabe der Messanregung bei Gleitsinmessungen.
- Die Datenbank-Steuerung ist für den Zugriff auf die Schallabsorberdatenbank und für die Auswahl von Absorbern zuständig. Die Daten der Datenbank sind nicht im Programm, sondern in Dateien auf der Festplatte gespeichert.

In Bild 10 ist das Zusammenwirken der Funktionsblöcke grafisch dargestellt.

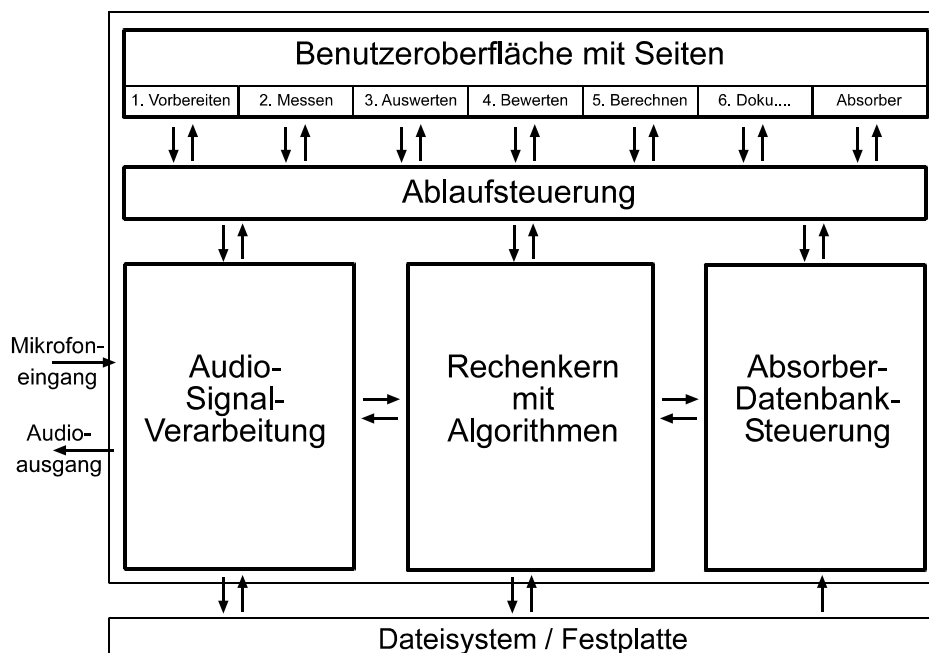


Bild 10: Der Modulare Aufbau der AkuCheck-Software: Funktionsblöcke und ihre Zusammenhänge.



6. Die Standardnutzung der AkuCheck-Software

Die Standardnutzung entspricht dem primären Entwicklungsziel, eine Software zur Verfügung zu stellen, mit der Einsteiger nach einer kurzen Einführung eigenständig Erfahrungen mit der raumakustischen Analyse machen können. In den folgenden Abschnitten sind die einzelnen wichtigen Schritte der Standardnutzung beschrieben.

6.1. Eine Messreihe vorbereiten

Das Messobjekt

Eine Messreihe bezieht sich immer auf einen Raum in einem bestimmten Zustand. Ein Beispiel ist der Seminarraum HD 22 in der Universität Wuppertal, in dem sich während der Messungen 6 Personen befinden. Unser Messobjekt ist also der 'Seminarraum HD 22' in der Variante '6 Personen im Raum'.

1.1. Meßobjekt beschreiben	
Objekt-Bezeichnung	Uni Wuppertal, Seminarraum HD 22
Variante / Beschreibung	6 Personen im Raum

Bild 11: Bezeichnung des Messobjekts.

Die Messungen vorbereiten

Vor einer Messreihe muss die Messausrüstung zusammengestellt werden und ggf. der Raum vorbereitet werden. Dazu gehören:

Messcomputer

Ein Notebook-PC, mit dem die Messung durchgeführt werden soll. Auf diesem PC muss die AkuCheck-Software lauffähig sein. AkuCheck benötigt das Betriebssystem Windows ab Version XP.

Messmikrofon

Ein Mikrofon, das für die Messung geeignet ist. In vielen Fällen wird dies ein einfaches Elektret-Mikrofon sein, denn dieser Mikrofontyp ist sehr verbreitet. Wichtige Voraussetzung ist, dass das Mikrofon an den PC anschließbar ist und das Mikrofon-Signal von Software im PC verwendet werden kann. Der Anschluss kann so erfolgen:

- Eine kostengünstige Lösung besteht aus einem einfachen Elektret-Mikrofon und einem USB-Audiointerface (jeweils ab etwa 10 Euro erhältlich). Ein USB-Audiointerface wird in der Regel innerhalb der ersten Minute nach dem Einstecken in einen USB-Anschluss automatisch erkannt und steht dann für Programme zur Verfügung.



- In manchen Notebook-PCs kann auch der integrierte Mikrofoneingang mit einem externen Mikrofon oder auch ein internes Mikrofon genutzt werden. Allerdings ist hier Vorsicht geboten, denn in vielen Notebook-PCs der jüngeren Generation wird das Mikrofonsignal manipuliert, bevor es zur Software gelangt. Für Sprachanwendungen ('Voice over IP') kann das vorteilhaft sein, eine Messung macht es jedoch unmöglich. Deshalb ist es besser, im Zweifelsfall die obige externe Lösung zu wählen.
- Die qualitativ beste aber auch teuerste Lösung besteht aus einem professionellen Mess-Mikrofon oder Studio-Mikrofon (mit Kugelcharakteristik) und einem professionellen Audiointerface. Der Anschluss des Mikrofons erfolgt hier über robuste XLR-Stecker. Die für professionelle Kondensatormikrofone nötige 'Phantomspannung' (meist 48 V) wird vom Audiointerface geliefert. Das Preisspektrum beginnt für Mikrofon und Audiointerface jeweils um 100 Euro und reicht bis in den vierstelligen Bereich bei Geräten der Spitzenklasse.

Impulsschallquelle

Für die einfache Nachhallmessung ist eine Impulsschallquelle nötig. Diese kann auf verschiedene Weise realisiert werden:

- Eine einfache Methode einen Impuls zu erzeugen ist ein kräftiges Händeklatschen. Dabei kommt es darauf an, dass mit 'hohlen' Händen geklatscht wird, so dass ein 'satter' Klang entsteht, in dem auch tiefe Frequenzen enthalten sind. Händeklatschen ist als Schallquelle nur für kleinere und mittelgroße Räume bis etwa Klassenraumgröße geeignet, wobei das Hintergrundgeräusch gering sein muß.
- Wenn das Händeklatschen als Schallquelle nicht ausreicht, kann ein aufgeblasener Luftballon oder Ähnliches zum Zerplatzen gebracht werden. Gut geeignet (und sehr laut) sind einige Arten etwa 10 cm großer Verpackungs-Luftkissen.
- Als Schallquelle für sehr große Räume kommen auch Knallkörper oder Schreckschußpistolen in Frage. Hierbei müssen ggf. Vorschriften beachtet werden.

Gehörschutz

Bei sehr lauten Schallquellen muß ein Gehörschutz getragen werden. Bei Schallquellen, die deutlich lauter als ein kräftiges Händeklatschen sind ist es empfehlenswert, die Ohren zu schützen. Ein lauter Knall kann zu einer spontanen Schädigung des Hörorgans führen (Knalltrauma). Gehörschutz gibt es in zweierlei Form: als Gehörgangstöpsel und als ohrumschließende Kapseln.

Positionen von Schallquelle und Mikrofon im Raum

Da die Nachhallzeit eine statistische Größe ist, liefert nicht jede Messung in einem Raum exakt die gleichen Werte. Aus diesem Grund wird die Nachhallzeit in der Regel in einer Meßreihe aus mehreren Einzel-Messungen ermittelt.

Entsprechend DIN 18041 sollen mindestens 6 Messungen mit verschiedenen Positionen von Schallquelle und Mikrofon vorgenommen werden. Empfehlenswert ist, die mit der AkuCheck-Software möglichen 10 Einzel-Messungen in einer Meßreihe voll auszuschöpfen.



Eine einfache Möglichkeit (von sehr vielen): Wählt man beispielsweise 4 verschiedene Schallquellen-Positionen und 6 verschiedene Mikrofon-Positionen im Raum aus, dann ergeben sich 24 unterschiedliche Kombinationen, von denen nur 10 benötigt werden.

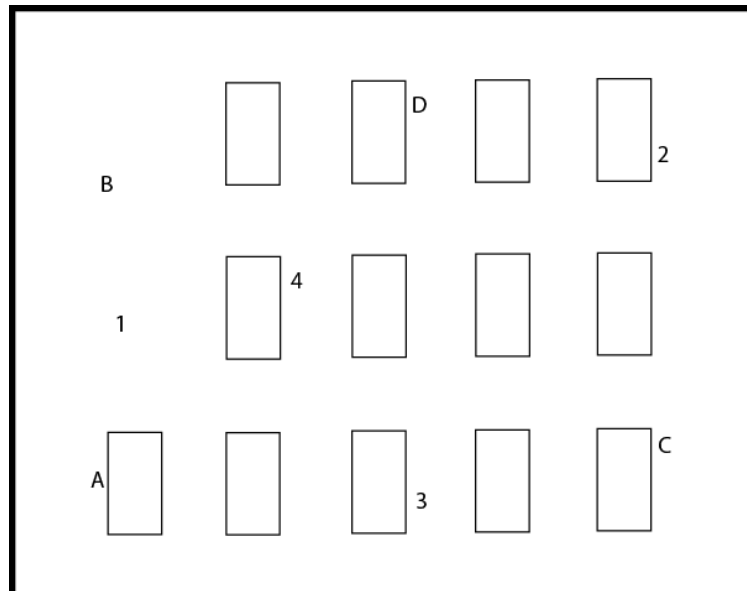


Bild 12: Skizze eines Unterrichtsraums mit Schallquellen (A, B, C, D) und Mikrofon-Positionen (1, 2, 3, 4).

Bei der Wahl der einzelnen Positionen kann man sich von der typischen Raumnutzung leiten lassen. So können im Beispiel eines Seminarraums typische stehende und sitzende Sprecher-Positionen als Schallquellen-Orte und in gleicher Weise typische stehende und sitzende Hörer-Positionen für das Mikrofon ausgewählt werden. Die Positionen sollten über den Raum verteilt sein (also nicht in einem kleinen Bereich des Raums konzentriert) und nicht zu nah an Umschließungsflächen liegen (Wandabstand > ca. 1 m). Bei jeder Einzel-Messung sollten Schallquelle und Mikrofon nicht zu nah voneinander sein (ein Abstand im Bereich 1/3 bis 2/3 der Raum-Diagonale ist günstig).

Ruhe im Raum

Da das Schallsignal im Raum für die Messung ausgewertet wird, soll es so wenig wie möglich gestört werden. Also müssen Störquellen im Raum beseitigt werden, Türen und Fenster geschlossen werden, und es muß ein Zeitpunkt für die Messung gewählt werden, an dem nur geringe Störungen von Außen zu erwarten sind. Während jeder der etwa 5 Sekunden dauernden Messungen darf kein anderes Geräusch als der Impuls erzeugt werden.



Das Mikrofon einrichten

Nach den allgemeinen Vorbereitungen wird die Meßapparatur, bestehend aus dem Meß-Computer, dem Mikrofon und ggf. einem externen Audio-Interface, in Betrieb genommen.

Audio-Interface und Mikrofon anschließen

Falls ein externes Audio-Interface verwendet wird, sollte dies als erstes mit dem Computer verbunden werden. Das Mikrofon wird an den Mikrofon-Eingang angeschlossen, entweder am externen Audio-Interface oder direkt am Computer (siehe auch weiter oben).

Den Audio-Eingang wählen

Nach dem Start der AkuCheck-Software wird in der Aussteuerungs-Anzeige der Pegel des Mikrofon-Signals angezeigt, es sei denn der Audio-Eingang ist nicht richtig gewählt. Falls nötig kann nach dem Klicken der Taste 'Audio-Einstellungen' der richtige Mikrofon-Eingang ausgewählt werden.

Das Mikrofon einpegeln

Wenn das Mikrofon-Signal vorhanden ist, wird auch in einem einigermaßen ruhigen Raum der Pegel des immer vorhandenen Hintergrundgeräuschs angezeigt. Für gute Meß-Qualität sollte das Hintergrundgeräusch im grünen Anzeige-Bereich bleiben und höchstens für kurze Momente in den gelben Bereich 'hineinragen'.

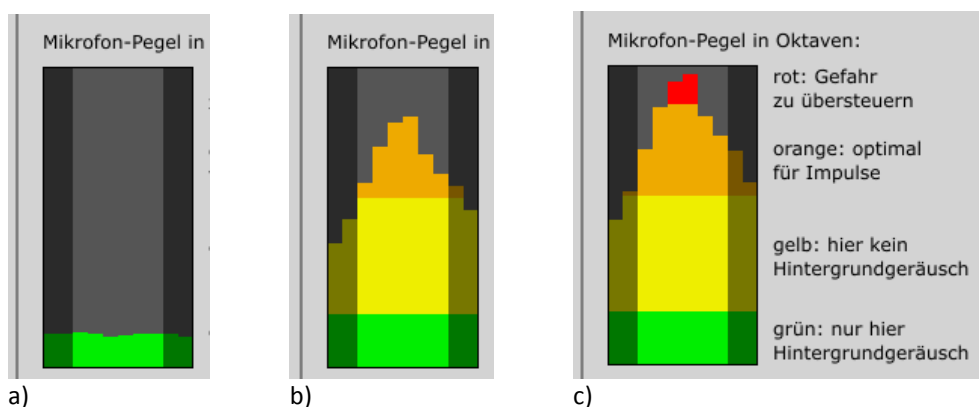


Bild 13: Der Mikrofon-Pegel wird in allen zehn Oktaven des Hörbereichs angezeigt, von links, dunkel eingefärbt 31 und 63 Hz, dann die sechs Oktavbänder, in denen gemessen wird (125, 250, 500 Hz, 1, 2, 4 kHz), ganz rechts dunkel eingefärbt 8 und 16 kHz.

- a) zeigt ein Hintergrundgeräusch im 'grünen Bereich',
- b) zeigt einen genügend ausgesteuerten Impuls,
- c) zeigt einen maximal ausgesteuerten, fast übersteuerten Impuls.

Mit Probe-Impulsen kann getestet werden, ob diese hinreichend laut, aber nicht zu laut sind. Die Impulse sollen in allen sechs mittleren (hell eingefärbten) Oktavbändern in den orangenen Anzeige-Bereich reichen und sie dürfen auch kurzzeitig ins Rote ragen. Sie sollen aber nicht



am Oberrand der Anzeige 'anschlagen', denn das bedeutet eine Übersteuerung und damit eine Verfälschung des Signals.

Für den Fall, dass die Pegel noch nicht im gewünschten Bereich liegen, gibt es mehrere Möglichkeiten zur Korrektur:

- Wenn die Signale insgesamt sehr gering oder sehr hoch sind, kann in den Windows-Audio-Einstellungen der Mikrofon-Pegel angepaßt werden. Falls ein professionelles Audio-Interface verwendet wird, kann dort meist die Verstärkung des Mikrofon-Vorverstärkers eingestellt werden.
- Wenn der Pegel-Unterschied zwischen Impulsen und Hintergrundgeräusch zu gering ist, muß entweder der Geräuschpegel gesenkt werden oder eine lautere Impulsquelle verwendet werden - oder Beides.
- Kombination von Maßnahmen.

6.2. Messungen durchführen

Start einer Meßreihe

Die AkuCheck-Software erlaubt Meßreihen aus bis zu 10 Einzel-Messungen. Im Sinne der Meßgenauigkeit sollte die maximale Anzahl der Einzel-Messungen genutzt werden. Falls sich nachträglich einige der Einzel-Messungen als 'Ausreißer' mit schlechter Meß-Qualität erweisen, können diese später von der Gesamt-Auswertung ausgeschlossen werden.

Die Einzel-Messungen

Die Einzel-Messungen erfolgen in numerierter Reihenfolge. Die gerade anstehende Einzel-Messung hat den Status 'bereit'. Die bereits abgeschlossenen Einzel-Messungen haben den Status 'erledigt'. Die übrigen Einzel-Messungen haben den Status 'noch nicht dran', der jedoch nicht besonders angezeigt wird. In Bild 14 sind die Messungen 1 und 2 erledigt und die Messung 3 steht jetzt an.

Bild 14: Eine Meßreihe kann aus maximal 10 Einzel-Messungen bestehen. Mindestens sollen 6 Messungen verwendet werden.





Die aktive Messung

Im 'Oszillografen' der Software wird zunächst das ankommende Mikrofon-Signal fortlaufend angezeigt. Momentaufnahmen sind in Bild 15 dargestellt.



Bild 15: Das Oszillogramm vor (oben) und nach (unten) Start eines Meß-Impulses.

Mit der Taste 'Datei' kann anstelle einer aktuellen Messung eine Impulsantwort aus einer früheren Messung zwecks erneuter Verarbeitung geladen werden. Mit der Taste 'HPF' (Hochpaßfilter) können tieffrequente Störungen ausgefiltert werden. Mit der Taste 'Empf' kann die Ansprech-Empfindlichkeit für Impulse erhöht werden.

Sobald ein hinreichend lauter Impuls eintrifft, wird automatisch der Aufnahme-Modus gestartet und durch einen roten Punkt angezeigt. Falls in diesem Zeitraum merkliche Störungen im Raum auftreten, sollte die Messung wiederholt werden. Nach ca. 5 Sekunden stoppt die Aufnahme und die interne Auswertung beginnt. Der rote Punkt wird dabei gelb. Wenn der gelbe Punkt erlischt, ist die aktuelle Einzelmessung abgeschlossen, die Raum-Impulsantwort ist gespeichert und die Software ist bereit für die nächste Einzelmessung.



Die Bilder 16 und 17 zeigen zwei Beispiele für gemessene Raum-Impulsantworten.

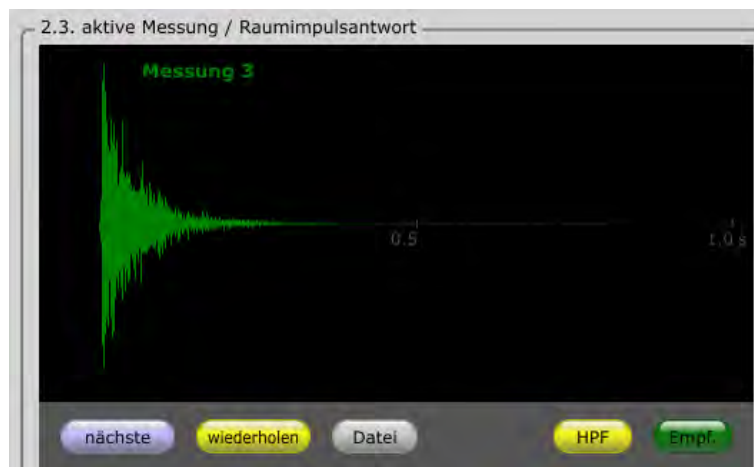


Bild 16: Eine gemessene Raum-Impulsantwort eines Wohnraums mit etwa 0.4 Sekunden Nachhallzeit.



Bild 17: Eine gemessene Raum-Impulsantwort eines Konzertsaals mit etwa 2 Sekunden Nachhallzeit.



6.3. Messungen auswerten

Auf der Software-Seite '3. Auswerten' ist eine wichtige Zwischenstufe der Meß-Auswertung grafisch dargestellt, die im Folgenden erläutert wird:

Die gemessene Raumimpulsantwort enthält alle aufgenommenen Spektralanteile. Als erster Bearbeitungs-Schritt wird die Raumimpulsantwort in Oktavbänder spektral zerlegt. In der AkuCheck-Software geschieht dies mit Filtern 10. Ordnung.

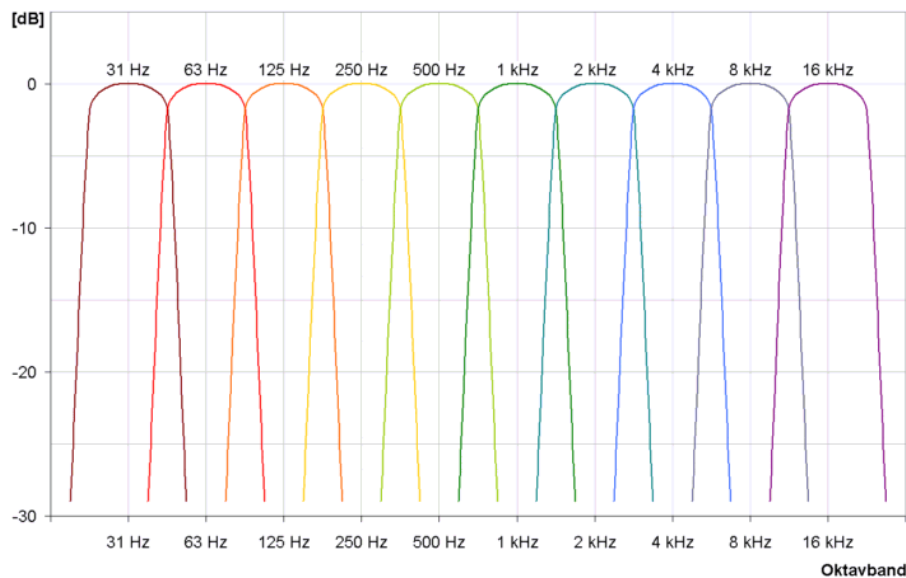


Bild 18: Die Filterkurven aller 10 Standard-Oktavfilter im menschlichen Hörbereich. In AkuCheck werden, wie in der Raumakustik üblich, die sechs mittleren Oktaven von 125 Hz bis 4 kHz ausgewertet.

Hinter den Filtern werden in jeder der Oktav-gefilterten Impulsantworten für jeden einzelnen Zeitpunkt die Werte mit der Funktion $10 \cdot \log(x^2)$ in [dB] skalierte Werte umgewandelt, die in Echogrammen wie in den Bildern 19 und 20 dargestellt werden.

Die Echogramme zeigen nach dem Direktschallimpuls ein gleichmäßiges, von Schwankungen überlagertes Abklingen, bis das Niveau des Hintergrundgeräusches erreicht ist. Aus der Steilheit des Abklings lässt sich die Nachhallzeit ablesen. Mathematisch geschieht dies, indem zunächst die Abklingkurve durch Rückwärtsintegration geglättet wird und dann an die geglättete Kurve eine Gerade angepaßt wird. Die Algorithmen sind in ISO 3382 beschrieben. Ein schnelles (steiles) Abklingen entspricht einer kurzen Nachhallzeit, ein langsames (flaches) Abklingen einer langen Nachhallzeit. So ist beispielsweise in Bild 20 erkennbar, dass die Nachhallzeiten bei hohen Frequenzen (blaue Kurven) niedriger sind als bei mittleren Frequenzen (grüne Kurven).

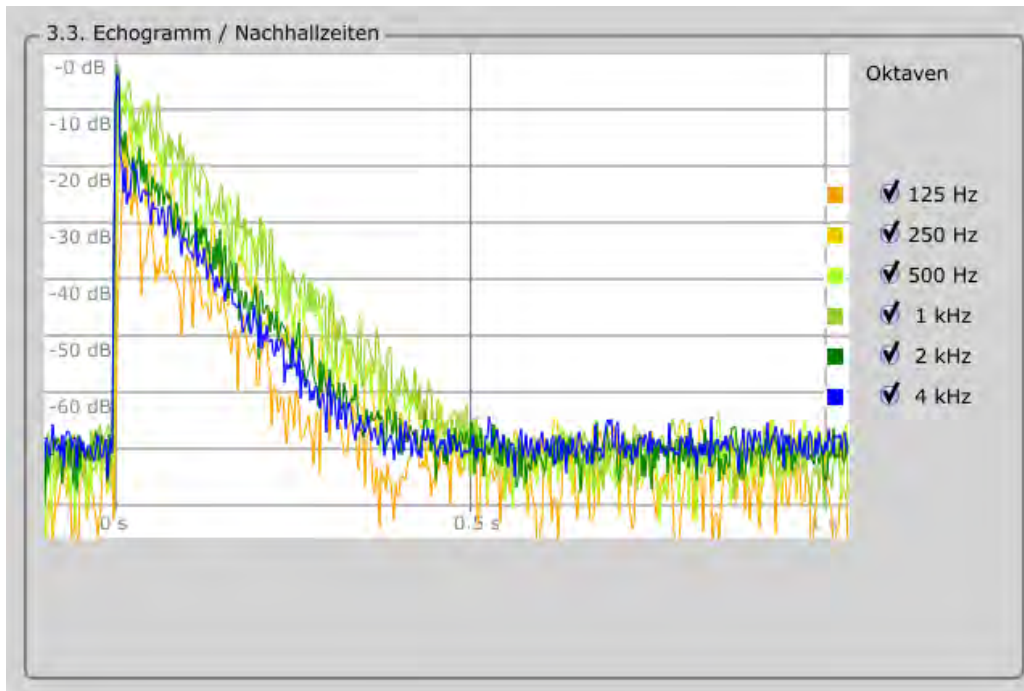


Bild 19: In Echgrammen wird das zeitliche Abklingen des Nachhalls logarithmisch dargestellt, hier für einen Raum mit etwa 0.4 s Nachhallzeit.

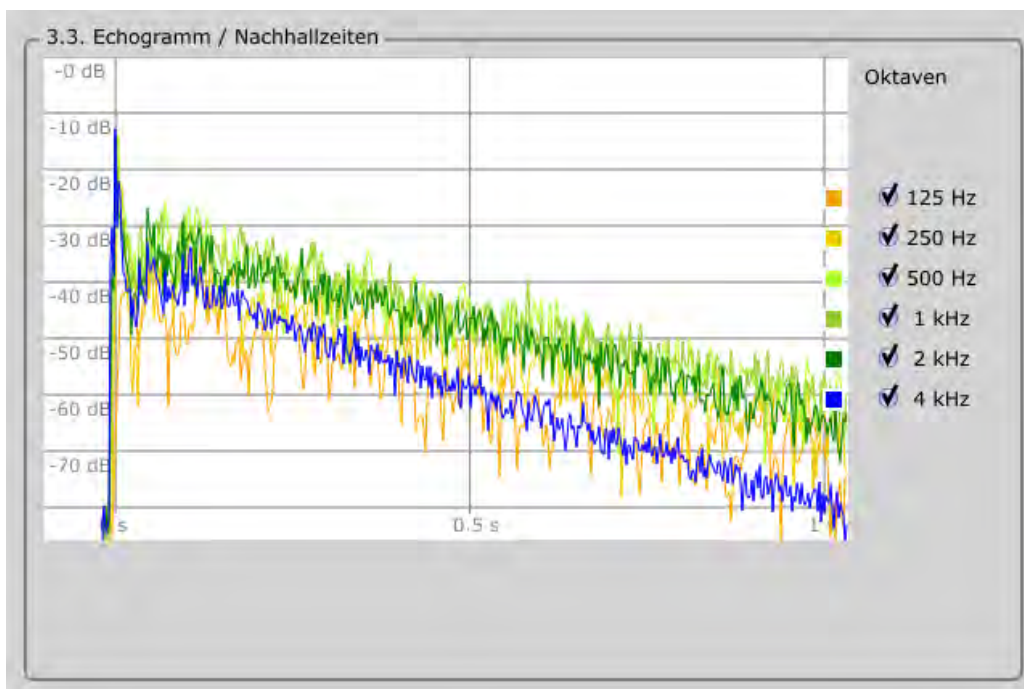


Bild 20: Echgramme eines Konzertsaals mit ungefähr zwei Sekunden Nachhallzeit.



Darüber hinaus ist in den Bildern 19. und 20 zu erkennen, dass das Abklingen bei tiefen Frequenzen (orange Kurven) weniger gleichmäßig verläuft als bei mittleren und hohen Frequenzen. Dem entspricht, dass Nachhallzeit-Messungen bei tiefen Frequenzen oft ungenauer sind als bei höheren Frequenzen. Zwei Gründe können dabei eine Rolle spielen:

- Bei tiefen Frequenzen ist die Anzahl der Raumeigenfrequenzen pro Oktave geringer als bei hohen Frequenzen. Deshalb spielen einzelne Eigenfrequenzen eine größere Rolle. Eigenfrequenzen machen sich als räumliche Muster im Schallfeld bemerkbar. Bei Messungen an verschiedenen Orten im Raum ergibt sich daher eine größere Streuung der Meßergebnisse als in höheren Oktaven..
- Bei Messungen mit Impuls-Anregung wird zudem offenbar, dass in einem kurzen Impuls nur wenig Schallenergie bei tiefen Frequenzen enthalten ist. Dies spielt besonders bei Anregung mit Händeklatschen eine Rolle, was bei tiefen Frequenzen nur gelingt, wenn mit hohlen Händen ein 'satter' Klang erzeugt wird.

6.4. Meßergebnisse bewerten

Auf der Software-Seite '4. Bewerten' werden die Ergebnisse der Meß-Auswertung für die sechs Oktavbänder von 125 Hz bis 4 kHz dargestellt. Den als Linie dargestellten Nachhallzeiten der Einzel-Messungen ist ein Schatten hinterlegt, dessen Breite eine Abschätzung der Meßunsicherheit der jeweiligen Einzel-Messung darstellt. Am Beispiel des Konzertsaals ist in Bild 21 zu sehen, dass die Meßunsicherheit wie in vielen Fällen von tiefen zu hohen Frequenzen hin abnimmt.

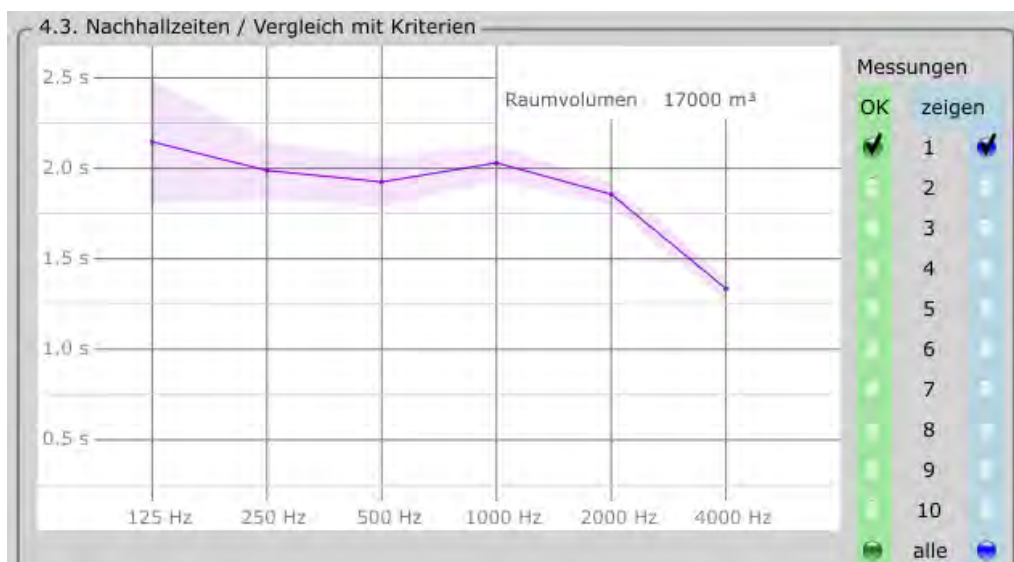


Bild 21: Nachhallzeiten eines Konzertsaals – Einzel-Messung mit Impuls-Anregung.

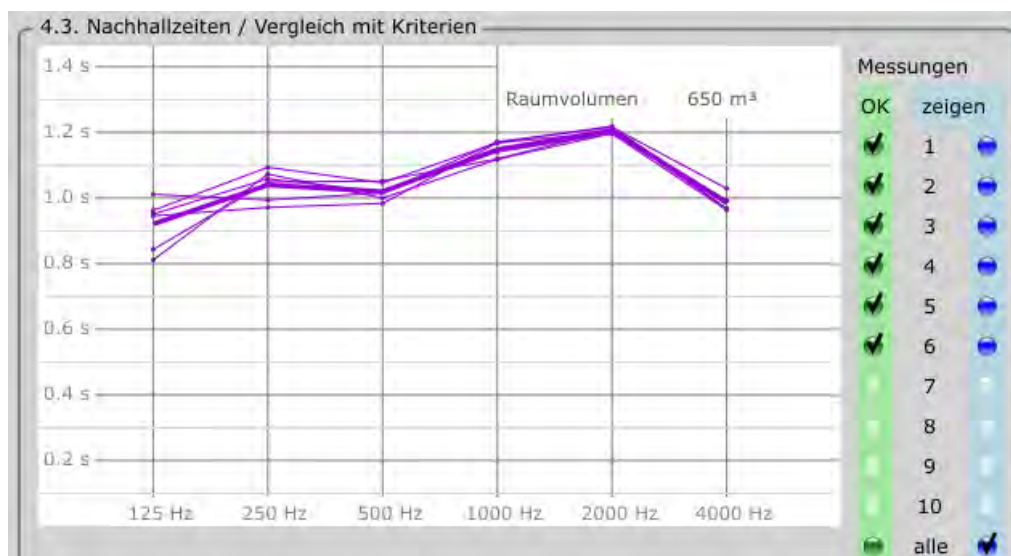


Bild 22: Nachhallzeiten eines Hörsaals – sechs Einzel-Messungen und Mittelwerte.

Bild 22 zeigt Nachhallzeiten aus sechs Einzelmessungen mit verschiedenen Schallquellen- und Mikrofon-Positionen in einem Hörsaal sowie deren Mittelwerte als fette Kurve. Die einzelnen Messungen liegen einigermaßen nah beieinander und es ist ein leichter Trend zu erkennen, dass die Streuung der Meßwerte zu tiefen Frequenzen hin größer wird. Dieser Trend ist bei diversen Messungen zu beobachten und teilweise auch stärker ausgeprägt.

Fehlmessungen ausschließen

Insbesondere Messungen, die unter ungünstigen Bedingungen wie ausgeprägte Störgeräusche oder mit nicht gut geeigneter Schallquelle gemacht wurden, können gelegentlich mißlingen. Fehlmessungen lassen sich meist daran erkennen, dass entweder die Messunsicherheit wesentlich größer ist als in Bild 21 dargestellt oder dass sie 'Ausreißer' in einer Meßreihe sind, also bei einem oder mehreren Oktavbändern weit von übrigen Messungen abweichen (oft sind auch beide Kriterien zugleich erfüllt). Solche Messungen können durch Entfernen des OK's von der weiteren Verwendung ausgeschlossen werden.

Mit Vergleichskriterien bewerten

In DIN 18041 sind für verschiedene Raumnutzungsarten volumenabhängig Nachhallzeiten empfohlen, die hier als Vergleichskriterien verwendet werden können. Dazu muß das Raumvolumen eingegeben werden und eine der vorgegebenen Nutzungsarten gewählt werden. Dann erscheint die empfohlene Nachhallzeit als horizontale fette Linie in der Grafik und ein grünes Toleranzfeld, in dem die Nachhallzeiten gemäß der gewählten Empfehlung liegen sollen, wird hinterlegt. In den Bildern 23 und 24 sind zwei Beispiele dargestellt.



Die wählbaren Vergleichskriterien sind:

- DIN 18041 für die Nutzungsart 'Musik'
- DIN 18041 für die Nutzungsart 'Sprache'
- DIN 18041 für die Nutzungsart 'Unterricht'
- DIN 18041 für die Nutzungsarten 'Sport 1' und 'Sport 2'
- EBU 'Hörraum' – eine besonders 'trockene' Raumgestaltung für das optimale Abhören von Tonaufnahmen im Studiobetrieb.

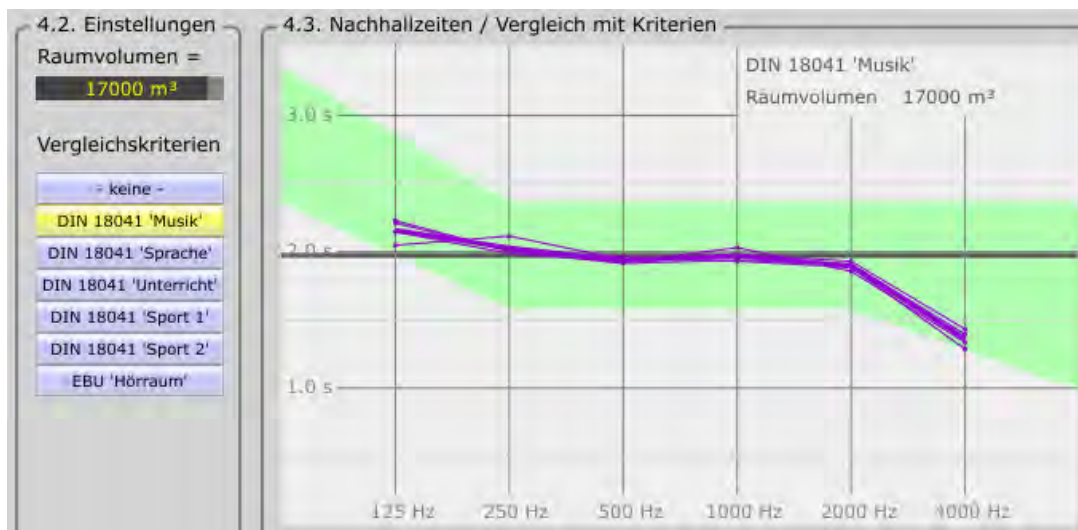


Bild 23: Mehrere Nachhallzeit-Messungen in einem Konzertsaal mit DIN-Bewertung 'Musik'

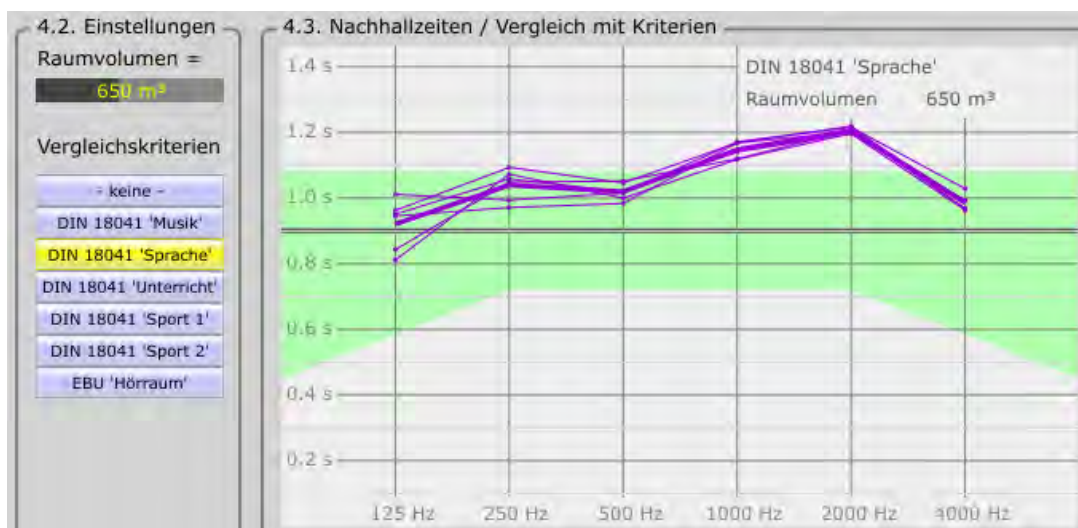


Bild 24: Nachhallzeit-Messungen in einem (leeren) Hörsaal mit DIN-Bewertung für die Nutzungsart 'Sprache'. Im voll besetzten Zustand sinken die Nachhallzeiten auf etwa 0.8 s



6.5. Modifikationen am Meßobjekt berechnen

Auf der Software-Seite '5. Berechnen' besteht die Möglichkeit die Auswirkungen zusätzlicher Schallabsorber im Raum vorherzuberechnen. Die zusätzlichen Absorber können sowohl Personen als auch technische Schallabsorber sein. Einem Raum können rechnerisch bis zu 8 verschiedene Schallabsorber-Typen hinzugefügt werden.

Zur Auswahl eines Absorbers wird die entsprechende nummerierte Taste geklickt. Dann wechselt das Programm auf die 'Absorber'-Seite (siehe Kapitel 6.7). Dort kann in der Datenbank ein Absorber ausgewählt werden. Mit der Taste 'verwenden' wird die Auswahl bestätigt und das Programm kehrt zur Seite '5. Berechnen' zurück.

Nun kann die wirksame Absorbermenge (bei flächigen Absorbern die geometrische Fläche des Absorbers, bei Personen oder Möbelstücken die Anzahl) eingestellt werden. Sobald dem Raum rechnerisch Absorber hinzugeführt wurden, erscheint zusätzlich zur violetten Kurve mit gemessenen Nachhallzeiten eine grüne Kurve mit berechneten Nachhallzeiten für den Raum mit zusätzlichen Absorbern. Beim Variieren der Absorber-Menge wird instantan auch die Wirkung jeweils angepasst, so dass sich leicht ein optimaler Wert ermitteln läßt

Die interne Berechnung erfolgt für jede Oktave separat in drei Schritten. Dabei wird der in der Sabine'schen Formel beschriebene Zusammenhang zwischen Nachhallzeit, Raumvolumen und Absorbern genutzt:

$$T = 0.163 V / A$$

Zuerst wird mit der Sabine'sche Formel aus der gemessenen Nachhallzeit und dem Raumvolumen die vorhandene äquivalente Schallabsorptionsfläche berechnet:

$$A_{\text{vorhanden}} = 0.163 V / T_{\text{gemessen}}$$

Als zweiter Schritt wird rechnerisch die äquivalente Schallabsorptionsfläche der zusätzlichen Absorber hinzugefügt:

$$A_{\text{berechnet}} = A_{\text{vorhanden}} + A_{\text{zusätzlich}}$$

Die zusätzliche äquivalente Schallabsorptionsfläche faßt die Wirkung aller zusätzlichen Absorber zusammen, also beispielsweise bei zusätzlich zwei Absorbertypen und mehreren Personen im Raum:

$$A_{\text{zusätzlich}} = S_1 * \alpha_1 + S_2 * \alpha_2 + n_p * A_p$$

wobei S_1, S_2 die geometrischen Flächen der Absorber,
 α_1, α_2 die Schallabsorptionsgrade der Absorber,
 n_p die Anzahl der Personen und
 A_p die äquivalente Schallabsorptionsfläche einer einzelnen Person sind.

Schließlich wird, wieder mit der Sabine'schen Formel, aus der berechneten äquivalente Schallabsorptionsfläche die Nachhallzeit mit den zusätzlichen Absorbern berechnet:



$$T_{\text{berechnet}} = 0.163 \cdot V / A_{\text{berechnet}}$$

Diese berechnete Nachhallzeit ist eine Prognose, deren Qualität nicht nur von der zugrundeliegenden Messung abhängt, sondern auch von den als Annahmen eingehenden Daten. Je realistischer diese Annahmen sind, umso besser wird die Prognose.

Zusätzliche Personen im Raum

In den meisten Fällen sind bei Nachhall-Messungen nur wenige Personen im Raum, wogegen bei der normalen Nutzung oft wesentlich mehr Personen anwesend sind. Dies kann berücksichtigt werden, indem die Wirkung einer stärkeren Besetzung mit Personen im Raum berechnet wird. Ohne weiteres ist dies möglich, wenn die Personen im Raum stehen oder auf schallharten Möbeln sitzen, wie im Beispiel des Hörsaals in Bild 25.

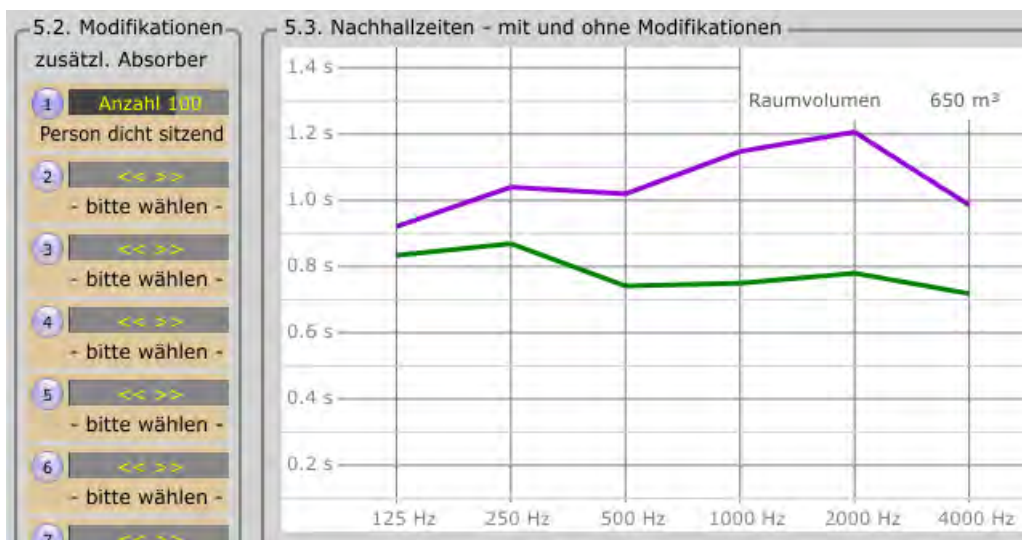


Bild 25: Die berechnete Wirkung zusätzlicher Personen in einem Hörsaal. Nachhallzeiten eines Hörsaals, unbesetzt gemessen (violett) und berechnet mit 100 Personen auf den Holzsitzen des Saals (grün).

Werden dagegen Polstermöbel rechnerisch mit zusätzlichen Personen besetzt, dann führt eine einfache Addition der Absorberwirkung der Personen zu einem falschen Ergebnis, da die reduzierte Absorberwirkung der Polstermöbel dabei unberücksichtigt bleibt, wie beispielsweise in Bild 26. Für solche Fälle sind speziell hergestellte Datensätze erforderlich, die die Änderung der Absorberwirkung beim Besetzen eines Sitzes beschreiben.

In jedem Fall gilt es jedoch zu beachten, dass die Absorberwirkung einer Person, genauer deren äquivalente Schallabsorptionsfläche, unterschiedlich groß sein kann. Einfluß haben:

- Die Größe der Personen (Erwachsene absorbieren mehr als Kinder)
- Die Bekleidung (Winterkleidung wirkt stärker als Sommerkleidung)
- Stehende Personen absorbieren meist mehr als Sitzende



- Die Abstände der Personen zueinander – dicht stehende oder sitzende Personen verdecken einander teilweise und absorbieren deshalb weniger.



Bild 26: Im Fall des vermessenen Konzertsaales ist eine einfache Berechnung der Wirkung zusätzlicher Personen nicht möglich, da jede Person ein Polster verdeckt und als Absorber unwirksam macht.

Die Berechnung raumakustischer Verbesserungsmaßnahmen

Ein häufiges Ergebnis raumakustischer Analysen ist es, dass die Nachhallzeiten zu lang sind. In solchen Fällen können raumakustische Verbesserungsmaßnahmen rechnerisch 'erprobt' werden. Die Berechnung setzt voraus, dass das Raumvolumen eingegeben ist.

In den Bildern 27 und 28 wird dies am Beispiel eines Besprechungsraums illustriert, der mit Teppichboden und bei der Messung mit 9 Personen besetzt zwar im hohen Frequenzbereich einigermaßen bedämpft ist, in tiefen Oktaven jedoch sehr hallig ist.

Um auch tiefe Frequenzen besser zu bedämpfen, werden in der Rechnung zwei Seitenwände des Raums mit jeweils 18 m^2 Plattenabsorber unterschiedlicher Absorptionsmaxima (bei 125 Hz und bei 250 Hz) belegt. Damit sind die verfügbaren Flächen ausgeschöpft und es wird eine deutliche Verbesserung bei tiefen Frequenzen erreicht. Die DIN-Empfehlung für die Nutzungsart Sprache wird allerdings nicht ganz erreicht (Bild 27).

Werden statt dessen insgesamt 36 m^2 poröser Breitbandabsorber von 100 mm Stärke an den Seitenwänden angebracht, so ist das Ergebnis in der 125 Hz-Oktave etwa gleich gut, bei höheren Frequenzen wird jedoch die anspruchsvollere DIN-Empfehlung 'Unterricht' erfüllt und teilweise sogar unterschritten (Bild 28).

In jedem Fall muß wie hier neben der reinen Berechnung beachtet werden, ob die gewählten Absorber für den konkreten Raum geeignet sind und insbesondere ob genügend Oberfläche zur Verfügung steht.

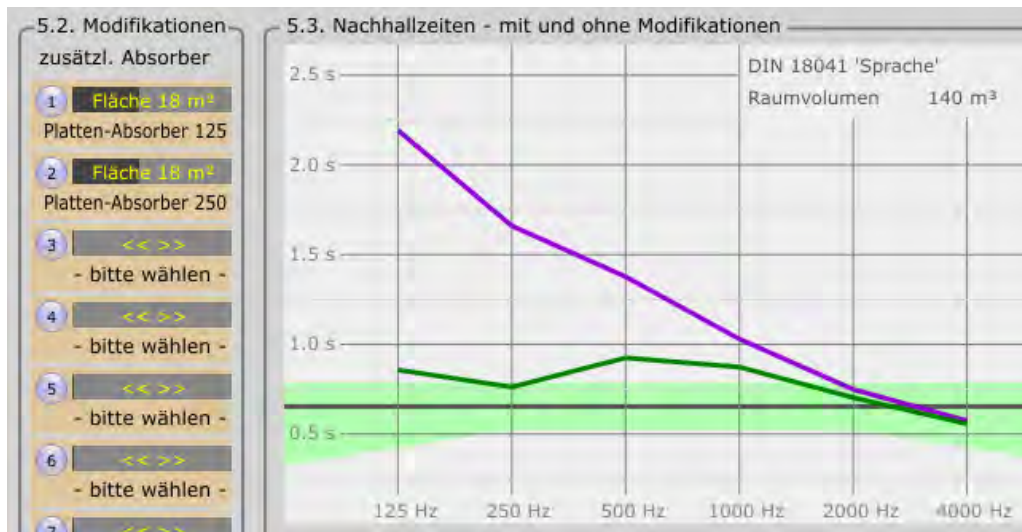


Bild 27: Die rechnerische Verbesserung eines Besprechungsraums mit unzureichender Tiefenbedämpfung mittels zweier verschiedener Plattenabsorbertypen an den Seitenwänden (mit DIN-Kriterium 'Sprache').

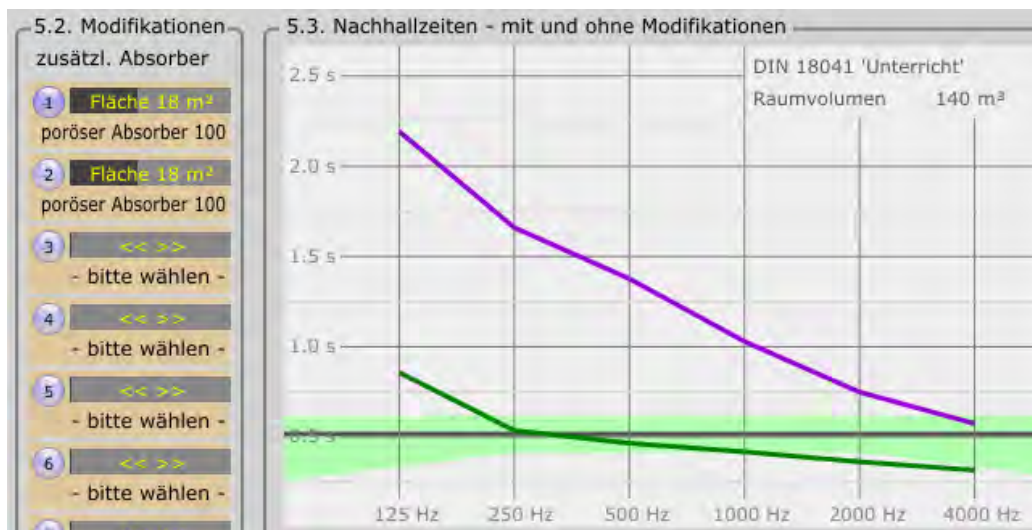


Bild 28: Die rechnerische Verbesserung eines Besprechungsraums mit unzureichender Tiefenbedämpfung mittels Breitbandabsorberrn an zwei Seitenwänden, sowie das DIN-Kriterium 'Unterricht'.



6.6. Dokumentieren der Meß- und Berechnungs-Ergebnisse

Auf der Software-Seite '6. Dokumentieren' kann eine Text-Dokumentation der aktuellen Meßreihe erstellt werden. Dabei besteht die Wahl zwischen einer Standard-Dokumentation, die die Ergebnisse von hier beschriebenen Messungen und Berechnungen darstellt, und einer erweiterten Dokumentation, die dem in Kapitel 7 beschriebenen erweiterten Funktionsumfang entspricht. Die Dokumentation kann zur Ablage oder weiteren Verwendung gespeichert werden.

Die Nachhallzeiten in den Tabellen sind mit einer Qualitätszahl (0..9) versehen. Diese kann etwa so interpretiert werden:

- 9 gute bis sehr gute Meßqualität
- 8 noch gute Meßqualität
- 7 noch akzeptable Meßqualität
- 6 sehr mäßige Meßqualität, eher nicht verwenden
- 5 oder weniger: Meßergebnis fragwürdig - nicht verwenden

Alternativ zum Text kann ein CSV-Format (mit Semikolon oder mit Komma als Trennzeichen) ausgewählt werden. Diese Formate eignen sich beispielsweise für den Import in Tabellenkalkulations-Software wie 'OpenOffice Calc' oder 'Excel' zur weiteren numerischen oder grafischen Verarbeitung.

6.7. Die Nutzung der Schallabsorber-Datenbank

Die Programm-Seite 'Absorber' enthält einen Browser für die integrierte Schallabsorber-datenbank. Die linke Spalte enthält eine Baumstruktur, in der ein Absorber ausgewählt werden kann. Der gewählte Absorber wird in der rechten Spalte mit seinen Eigenschaften angezeigt.



Bild 29: Der Schallabsorber-Browser: links die Baumstruktur, rechts der ausgewählte Absorber.



Mit Hilfe der Navigationstasten ($\uparrow, \downarrow, \leftarrow, \rightarrow$) oder durch Anklicken kann die Schallabsorberdatenbank einfach durchsucht werden, wobei die Eigenschaften jedes Absorbers sofort angezeigt werden. Der Navigationsbaum ist unterteilt in verschiedene Zweige, eine Basis-Auswahl von allgemeinen Absorber-Typen ('basic'), Absorber aus dem Anhang der DIN 18041 ('DIN'), Absorber, die von Herstellern angeboten werden, Personen (als Schallabsorber). Da die Datenbank erweiterbar ist, können weitere Zweige und Datensätze im Browser hinzukommen. Näheres zur Erweiterung der Datenbank ist im Anhang zu finden.

Der Datensatz eines Absorbers enthält im Einzelnen:

- Die Bezeichnung des Datensatzes
- Eine kurze Beschreibung des Absorbers
- Soweit bekannt, die Quelle der Absorberdaten
- Bei kommerziell erhältlichen Absorbern der Hersteller / Anbieter
- Die Schallabsorptionsgrade (bei flächigen Absorbern) bzw. die äquivalenten Schallabsorptionsflächen (bei Personen oder stückweisen Absorbern wie Möbelstücken) sowohl als Zahlenwerte als auch in grafischer Darstellung.
- Soweit vorhanden eine Abbildung des Absorbers.

Die Absorptionsgrade in der Datenbank sind teilweise 'praktische Schallabsorptionsgrade' (α_p) nach ISO 11654, die auf Stufen von 0.05 gerundet sind und maximal 1.0 betragen können. Absorber-Daten, die nicht ISO 11654 entsprechen, können auch über 1.0 betragen.

Schallabsorptionsgrade über 1.0 sind physikalisch unmöglich, können sich aber rechnerisch ergeben, wenn bei der Interpretation von Absorptionsmessungen Konsequenzen aus der Wellen-Eigenschaft des Schalls vernachlässigt werden, beispielsweise bei Messungen an Absorber-Proben, deren Abmessungen nicht groß gegen die Wellenlänge sind. Bei der Interpretation und Verwendung solcher Werte ist große Vorsicht geboten. Eine sehr einfache, aber auch recht grobe Vorsichtsmaßnahme ist es, alle Werte über 1.0 auf genau 1.0 herabzusetzen, wie dies bei der Erzeugung der 'praktischen Schallabsorptionsgrade' (α_p) nach ISO 11654 geschieht. Diese Funktion kann in der AkuCheck-Software zugeschaltet werden. Mehr zur Interpretation und Verwendung von Schallabsorber-Daten ist in Kapitel 7.4. zu finden.



7. Die erweiterte Anwendung der Software

Für Raumakustik-erfahrene Nutzer können erweiterte Funktionen der AkuCheck-Software hinzugeschaltet werden, die weitere Anwendungs-Möglichkeiten eröffnen.

7.1. Messung von Raumimpulsantworten mit 'Sinus-Sweep'

Vorteile der Messung mit 'Sinus-Sweep'

Wer Messungen mit Impulsanregung macht, wird feststellen, dass diese recht anfällig für Störungen sind. Der Grund liegt darin, dass der anregende Impuls zwar laut, aber zugleich extrem kurz sein soll. Wegen dieser Kürze kann der Impuls trotz aller Lautstärke nur wenig Schallenergie enthalten.

Ein sehr kurzer Impuls eignet sich als Meßsignal, weil er alle Frequenzen des Hörspektrums enthält und innerhalb des sehr kurzen Zeitintervalls überträgt. Der 'Trick' bei Verwendung eines 'Sinus-Sweep', eines durch das gesamte Hörspektrum gleitenden Sinus-Tons, besteht darin, dass die einzelnen Spektralanteile nicht wie beim Impuls zugleich, sondern zeitlich nacheinander übertragen werden. Damit kann bei gleicher Intensität um ein großes Vielfaches mehr Energie im Meßsignal übertragen werden, und zwar umso mehr, je länger der 'Sweep' dauert.

Nach der Messung werden im aufgezeichneten Meßsignal die Frequenzanteile mit einem mathematischen Prozeß, der 'Faltung' mit einem inversen 'Sweep', zeitlich 'zusammengeschoben', so dass eine Raumimpulsantwort entsteht, als sei mit einer Impulsanregung gemessen worden. Jedoch sind auf diese Art gewonnene Raumimpulsantworten um ein vielfaches weniger empfindlich für Störungen, da das Messsignal viel energiereicher war.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass Messungen bei gleicher Meßanordnung von Schallquelle und Mikrofon exakt reproduzierbar sind (bis auf meist marginale Abweichungen infolge von Personen-Bewegungen im Raum oder von Störgeräuschen). Messungen mit Impulsquellen zeigen dagegen fast immer auch bei gleichbleibender Meßanordnung eine merkliche Streuung, da die anregenden Impulse in der Regel nicht genau reproduzierbar sind.



Die Vorgehensweise bei 'Sinus-Sweep'-Messungen

Der Meßaufbau

Der größte Unterschied zu Messungen mit Impuls-Anregung ist, dass das Meß-Signal über einen Lautsprecher (mit zugehörigem Verstärker) abgestrahlt wird.

Für die Meßgenauigkeit ist zwar vorteilhaft, wenn das Meßsignal einigermäßen laut abgestrahlt wird, um einen hohen 'Störabstand' zu erhalten. Die Lautstärke sollte aber nur so hoch eingestellt werden, dass keine merklichen Verzerrungen auftreten – Lautsprecher und Verstärker müssen deutlich 'unterhalb ihrer Möglichkeiten' betrieben werden.

Für die Auswahl der Schallquellen- und Mikrofon-Orte gelten die gleichen Regeln wie in Kapitel 6.1 für Impuls-Schallquellen beschrieben.

Bei professionellen Nachhallmessungen werden meist Dodekaederlautsprecher ('Zwölfflächler' aus gleichseitigen Fünfecken) eingesetzt, die den Schall näherungsweise gleichmäßig in alle Richtungen abstrahlen.

Auch mit gerichtet strahlenden Lautsprechern guter Qualität sind Nachhallmessungen möglich.

Obwohl für die Messungen eine große Lautstärke vorteilhaft ist, muß besonders darauf geachtet werden, dass weder der Verstärker noch der Lautsprecher übersteuert werden, denn die Verzerrungen bei Übersteuerung können die Meßergebnisse verfälschen.

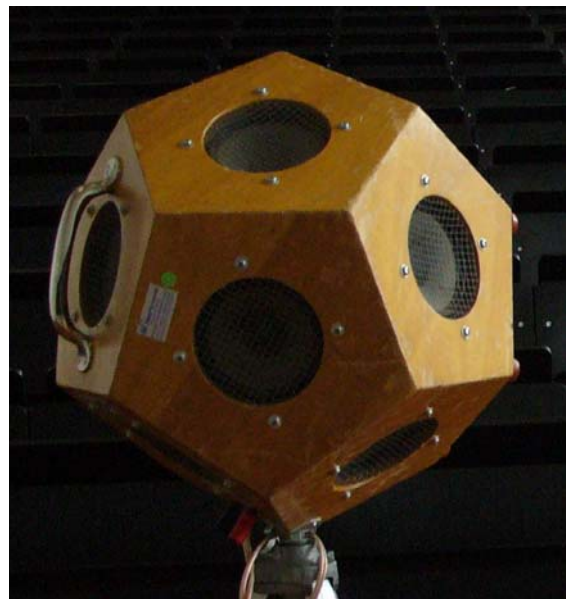


Bild 30 Ein betagter Dodekaederlautsprecher, der an Uni Wuppertal nach wie vor im Einsatz ist.



7.2. Verschiedenartig gemessene Nachhallzeiten

Originär ist die Nachhallzeit definiert als die Zeit, in der ein Schallereignis im Raum um 60 dB gegenüber dem anfänglichen Schallpegel abgeklungen ist - nach einem Impuls oder nach dem Abschalten einer konstanten Schallquelle. Eine über volle 60 dB Abklingen gemessene Nachhallzeit wird als T_{60} bezeichnet. Es erfordert allerdings, dass auch das um 60 dB abgeklungene Signal im Pegel noch über dem Hintergrundgeräusch liegen muß (engl. 'signal-to-noise ratio', kurz SNR > 60 dB). Diese Bedingung ist in vielen realen Meßsituationen nicht erfüllt. T_{60} kann dann nicht gemessen werden.

Als Abhilfe macht man sich zunutze, dass das Abklingen des Nachhalls in der Regel exponentiell erfolgt. Dann dauert das anteilige Abklingen von 0 dB bis -30 dB gleich lang wie das anteilige Abklingen von -30 dB bis -60 dB. Man kann demnach eine 30 dB-Abklingzeit verdoppeln und erhält einen Wert, der im Idealfall mit T_{60} übereinstimmt. Konkret wird die Abklingzeit von -5 dB bis -35 dB gemessen und verdoppelt als T_{30} bezeichnet. Analog dazu wird die verdreifachte Abklingzeit von -5 dB bis -25 dB, also über 20 dB, T_{20} genannt.

In AkuCheck wird darüber hinaus ein gewichtetes Mittel aus T_{20} und T_{30} gebildet und als T_{mix} angezeigt. Die Wichtung erfolgt anhand der Meßunsicherheiten, so dass Werte mit besserer Meßqualität bevorzugt werden. T_{mix} ist eine Annäherung an einen 'bestmöglich gemessenen' Wert aus jeder Messung.

Schließlich wird die Abklingzeit von 0 dB bis -10 dB versechsfacht als EDT (early decay time, 'frühe Abklingzeit') gemessen. Anders als T_{20} und T_{30} die oft nahe beieinander liegen, weicht EDT häufig von den übrigen 'Nachhallzeit-Typen' deutlich ab.



7.3. Maße für Klarheit und Übertragungsqualität

Die Nachhallzeit ist eine statistische Beschreibung des Abklingens von Schallereignissen in einem Raum, also eine Eigenschaft des gesamten Raumes. Einzelne Messungen sind Stichproben und deren Ergebnisse streuen demgemäß um einen Mittelwert, der 'die Nachhallzeit' genannt wird.

Anders verhält es sich mit Maßen, die die Übertragungsqualität jeweils von einer Quelle (Sprecher, Musiker, Lautsprecher, usw.) an einem bestimmten Quell-Ort zu einem Empfänger (Hörer, Mikrofon) an einem bestimmten Empfangs-Ort beschreiben.

Diesen Maßen liegt die Tatsache zugrunde, dass Sprache und Musik zeitliche Strukturen der Lautstärke und des Frequenzspektrums enthalten, die mit wenig Verfälschung und gut erkennbar bei Hörern ankommen sollen.

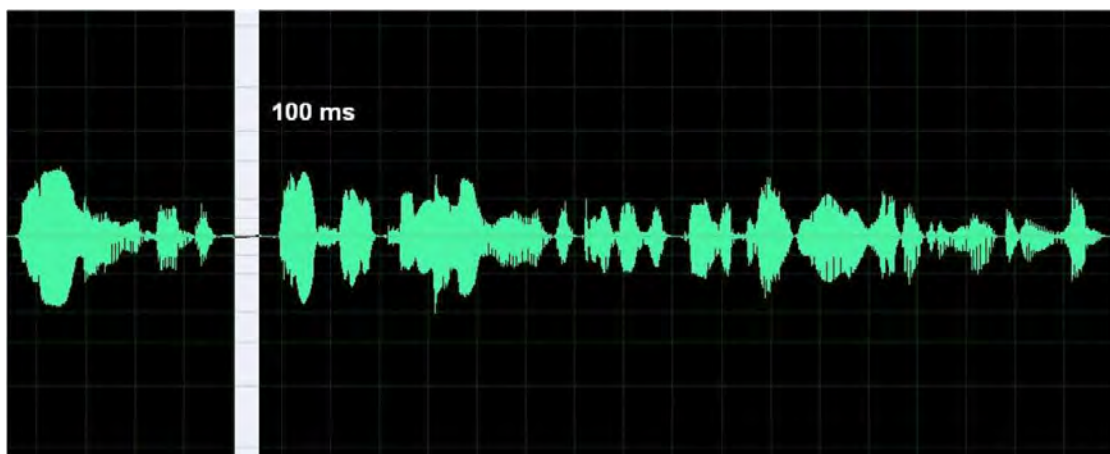


Bild 31: Das Oszillogramm eines Sprach-Signals von etwa 4.5 s Länge. Zur Zeit-Skalierung ist ein Abschnitt von 100 ms darin weiß eingefärbt.

In dem Sprach-Oszillogramm in Bild 31 ist gut erkennbar, dass die Artikulations-Elemente, die die Sprache verständlich machen, sich in Zeitsegmenten von etwa 50 bis 200 ms Dauer abspielen. Damit Sprache in einem Raum gut verständlich ist, sollen aufeinander folgende Artikulations-Elemente durch die Überlagerung der verschiedenen Übertragungswege vom Sprecher zum Hörer so wenig wie möglich miteinander vermischt werden.

Hier setzen die herkömmlichen Maße für die Klarheit der Übertragung von Sprache an, in denen Sprachsignal-Anteile, die innerhalb der ersten 50 ms ab dem Direktschall beim Hörer eintreffen, als positiv und alle späteren Anteile als negativ bewerten.



Die **Deutlichkeit** D_{50} ist definiert mit:

$$D_{50} = W_{0..50 \text{ ms}} / W_{0..\infty \text{ ms}}$$

wobei $W_{0..50 \text{ ms}}$ die 'frühe' Schallenergie von 0 bis 50 ms
und $W_{0..\infty \text{ ms}}$ die gesamte Schallenergie ist.

D_{50} hat keine Einheit und kann im Wertebereich 0..1 variieren, Je höher der Wert von D_{50} ist, umso deutlicher und besser verständlich wird Sprache übertragen.

Das **Deutlichkeitsmaß** C_{50} ist in der Aussage äquivalent zu D_{50} , jedoch ist die Skala logarithmisch und die Werte werden in der Einheit [dB] angegeben. Das 'Deutlichkeitsmaß' C_{50} ergibt sich aus:

$$C_{50} = 10 \log_{10} (W_{0..50 \text{ ms}} / W_{50..\infty \text{ ms}}) \text{ [dB]}$$

wobei $W_{0..50 \text{ ms}}$ die 'frühe' Schallenergie von 0 bis 50 ms
und $W_{50..\infty \text{ ms}}$ die 'späte' Schallenergie nach 50 ms ist.

Der Wertebereich von C_{50} ist nicht beschränkt. Auch hier ist die Sprachübertragung bei hohen Werten von C_{50} deutlicher und besser.

C_{50} und D_{50} hängen zusammen über:

$$C_{50} = 10 \log_{10} (D_{50} / (1 - D_{50})) \text{ [dB]}$$

Beispielhaft für eine sehr hohe Übertragungsqualität können in einem akustisch sehr guten Unterrichtsraum D_{50} -Werte ab rund 0.75 aufwärts und C_{50} -Werte von etwa +5 dB oder mehr gemessen werden.

Die Klarheit von Musikübertragungen kann beschrieben werden mit dem **Klarheitsmaß** C_{80} , das analog zu C_{50} definiert ist, jedoch mit der Grenze zwischen 'früher' und 'später' Schallenergie bei 80 ms.

$$C_{80} = 10 \log_{10} (W_{0..80 \text{ ms}} / W_{80..\infty \text{ ms}}) \text{ [dB]}$$

wobei $W_{0..80 \text{ ms}}$ die 'frühe' Schallenergie von 0 bis 80 ms
und $W_{80..\infty \text{ ms}}$ die 'späte' Schallenergie nach 80 ms ist.

Auch hier bedeuten hohe Werte eine ausgeprägte Klarheit der Musik. Beispielsweise liegen die C_{80} -Werte im *Teatro alla Scala* in Milano deutlich über 0 dB, was der Textverständlichkeit in der Oper zugute kommen dürfte. Der *Große Musikvereinssaal* in Wien, der als erstklassischer Konzertsaal für sinfonische Musik aus Klassik und Romantik gilt, weist dagegen ebenso wie das *Concertgebouw* in Amsterdam C_{80} -Werte bis etwa -5 dB auf. Der Unterschied zum *Teatro alla Scala* deutet darauf hin, dass das in Konzertsälen erwünschte 'Umhülltsein mit Musik' mit etwas geringerer Klarheit erkaufte wird.



Eine Gemeinsamkeit der Maße D_{50} , C_{50} und C_{80} ist die scharfe Zeitgrenze bei 50 oder 80 ms, bis zu der die Schallenergie-Beiträge positiv und ab der die Beiträge negativ gezählt werden. Dies kann zu Artefakten in Messungen führen, die nicht der menschlichen Wahrnehmung entsprechen. Verschiebt sich beispielsweise bei kleiner Veränderung eines Hörorts um einige Millimeter die Verzögerung eines reflektierten Schallanteils von 0.01 ms vor der Schwelle auf 0.01 ms nach der Schwelle, ergibt sich in diesen Maßen ein Sprung, dem keine wahrgenommene Veränderung des Hörereignisses entspricht.

Bei ähnlicher Aussagekraft kann die **Schwerpunktzeit** T_s keine derartigen Artefakte erzeugen. Die Schwerpunktzeit beschreibt den Versatz des zeitlichen Schwerpunkts der gesamten eintreffenden Schall-Energie bezogen auf den Direktschall.

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t W'(t) dt}{\int_0^{\infty} W'(t) dt}$$

Anders als bei den vorherigen Maßen, bedeuten kleinere Werte der Schwerpunktzeit eine bessere Übertragungsqualität. Bei sehr guter Sprachübertragung liegen die Werte unterhalb etwa 50 ms.

Die Maße C_{80} , C_{50} , D_{50} und T_s werden ebenfalls in Oktavbändern gemessen. Bild 32 zeigt beispielhaft Schwerpunktzeiten T_s für sechs verschiedene Übertragungswege in einem voll besetzten Grundschulunterrichtsraum mit sehr guten Sprachübertragungseigenschaften. Eine Mittelung über Meßwerte verschiedener Übertragungsstrecken ist hier nicht sinnvoll, da die Meßwerte sich jeweils auf eine Übertragungsstrecke beziehen und nicht auf den ganzen Raum.

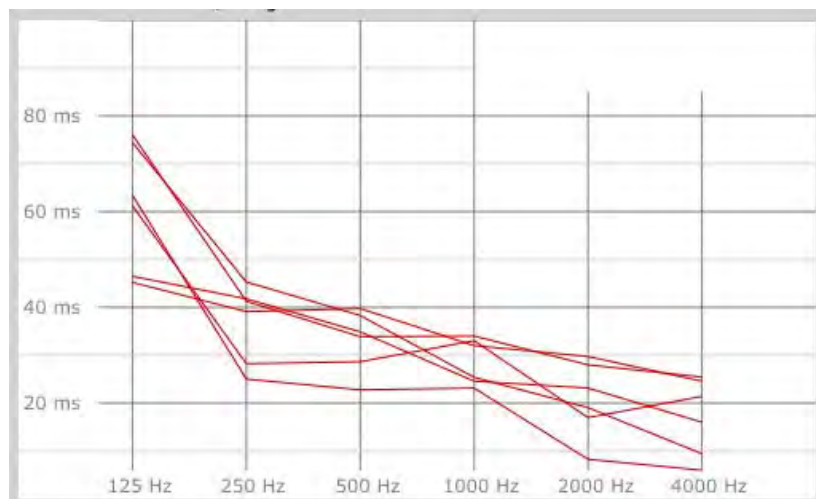


Bild 32: Schwerpunktzeiten verschiedener Übertragungsstrecken in einem Unterrichtsraum.



7.4. Schallabsorber-Daten und Planung

Den Berechnungen der Wirkung zusätzlicher Absorber auf der Programm-Seite '5. Berechnen' liegt die Sabine'sche Formel zugrunde, die in ihrer einfachen Form lautet:

$$T_{\text{sab}} = 0.163 V / A$$

wobei V das Raumvolumen

und $A = \sum S_i \alpha_i$

die äquivalente Schallabsorptionsfläche sind

Jeder Flächen-Anteil (i) von A wird dabei mit zwei Werten beschrieben, der geometrischen Fläche S_i und dem Schallabsorptionsgrad α_i mit dem Wertebereich (0 .. 1).

Schallabsorptionsgrade sind für viele Oberflächen-Typen bekannt und tabelliert. Schallabsorptionsgrade werden meist gemessen, indem Proben eines Schallabsorbers als 'zusätzliche Absorber' in einen Hallraum eingebracht werden. Aus der dadurch bewirkten Veränderung der Nachhallzeiten werden Schallabsorptionsgrade berechnet.

Die Messungen erfolgen oft in 'Terzbändern' (engl. 'third octave', also drei Frequenzbänder pro Oktave). Die Werte für Oktavbänder werden dann durch Mittelung über je drei Terzbänder gebildet. Bei den häufig anzutreffenden 'praktischen Schallabsorptionsgraden' α_p nach ISO 11654 wurden die Oktavwerte anschließend in Stufen von 0.05 gerundet und etwaige Werte über 1.0 auf 1.0 reduziert. Warum überhaupt Werte über 1.0 auftreten können, wird im Folgenden erläutert.

Interpretation von Schallabsorptionsgraden

Die Definition des Schallabsorptionsgrades geht implizit von einer unendlich ausgedehnten ebenen Absorber-Oberfläche aus. In der Realität ist dies jedoch nur näherungsweise erfüllt, wenn die Abmessungen eines Absorbers sehr groß im Vergleich zur Wellenlänge des Schalls sind. Bei hohen Frequenzen ist dies häufiger der Fall. So liegen die Wellenlängen im 4 kHz-Oktavband beispielsweise im Bereich von 6 bis 12 cm. Hier 'passen' viele Wellenlängen in einen Absorber von mehreren Metern Abmessung. Bei tiefen Frequenzen sind die Verhältnisse ganz anders. So variieren im 125 Hz-Oktavband die Wellenlängen von knapp 2 m bis knapp 4 m und sind damit in der gleichen Größenordnung wie die Abmessungen vieler Absorber. In solchen Fällen macht sich bemerkbar, dass der Absorber ungefähr eine Viertel Wellenlänge weit über seinen geometrischen Rand hinaus wirkt. Dies bedeutet, dass die wirksame Oberfläche eines Absorbers bei tiefen Frequenzen merklich größer wird als seine geometrische Oberfläche. Es bedeutet auch, dass die Wirkung eines länglichen Absorbers, beispielsweise 0.5 m x 8 m, größer sein kann als die Wirkung eines quadratischen Absorbers gleicher geometrischer Fläche und mit gleicher Menge Absorbermaterial, im Beispiel 2 m x 2 m groß.



Diese Effekte werden jedoch bisher weder bei der Messung von Absorptionsgraden im Hallraum noch bei der Bemessung von Schallabsorbern in der Planung berücksichtigt. Praktisch hat das die Auswirkung, dass Schallabsorptionsgrade aus Hallraummessungen nur in den Fällen einigermaßen richtig die Absorptionswirkung beschreiben, in denen die Größe und Anordnung der Schallabsorber in der Anwendung und bei der Messung einander ähnlich sind. Da außer in den Meßprotokollen der Hallraummessungen die Meßanordnungen selten mit den Schallabsorptionsgraden dokumentiert sind, entsteht dadurch im Normalfall einer Raumakustischen Planung eine Unsicherheit, die kaum zu beziffern ist. Will man dem entgegen und ein bestimmte raumakustische Qualität sicherstellen, dann ist dies nur mit einer Messung nach Fertigstellung und eventuellen nachträglichen Korrekturen möglich.

Kanteneffekte

Neben den Randeffekten von Absorbern kann ein weiterer Effekt in Räumen eine wichtige Rolle spielen. Bei der Reflexion an den Umschließungsflächen überlagern sich einfallende und reflektierte Welle und bilden stehende Wellen aus. Da bei Reflexion an einer schallharten Oberfläche die normale (senkrecht zur Oberfläche stehende) Komponente der 'Schall-Schnelle' (also der Bewegung der Luftteilchen) zwingend verschwinden muß, ergibt sich in der durch die Reflexion erzeugten stehenden Welle im Bereich um $\frac{1}{4}$ Wellenlänge Entfernung von der schallharten Oberfläche ein Maximum der Schall-Schnelle. Hier kann man mit Reibung in einem schalldurchlässigen porösen Material dem Schall besonders gut Energie entziehen, worauf das Konzept des 'porösen Absorbers' beruht.

In Raum-Kanten, wo zwei Flächen aufeinander treffen, entsteht um $\frac{1}{4}$ Wellenlänge Entfernung von beiden Flächen der Effekt in zwei Raum-Richtungen. Deshalb kann man dort bis zur doppelten Absorptionswirkung von Absorbermaterial in Kantennähe erreichen. Die Empfehlung, Absorber für tiefe Frequenzen in Kanten-Nähe anzubringen beruht hierauf ebenso wie das Konzept des 'Kanten-Absorbers' als besonders wirksamem Tiefenabsorber. Der 'Kanten-Effekt' existiert zwar bei allen Frequenzen, jedoch sind bei hohen Frequenzen aufgrund der kleinen Wellenlängen die wirksamen Bereiche um die Raumkanten so klein, dass sie praktisch keine Rolle spielen.

Wenn die Absorptionswirkung von Kanten-Absorbern in Form flächenbezogener Schallabsorptionsgrade quantifiziert wird, können wiederum Schallabsorptionsgrade > 1 auftreten. Hinzu kommt die Unklarheit, ob bei einem Kantenabsorber eine oder zwei Oberflächen-Seiten als Bezugsfläche dienen sollen.

Besser wäre es, alle Kanten- und Randeffekte von vorne herein in einer Längen-bezogenen 'äquivalenten Schallabsorptionsbreite' zu separieren und nicht in Flächen-bezogenen Schallabsorptionsgraden 'versteckt' unterzubringen. Bei einer solchen Handhabung wären Schallabsorptionsgrade > 1 obsolet und beliebige Geometrien von Schallabsorbern könnten korrekt berechnet werden (Die AkuCheck-Software kann 'äquivalente Schallabsorptionsbreiten' in Berechnungen nutzen, wenn in den Absorberdaten – beispielsweise bei Kantenabsorbern – die Dimension des Absorbers 'absdim=1' gesetzt wird).



Vorgehensweise bei hoher Qualitätsanforderung

Allein aufgrund dieser Effekte, die in einer Planung kaum exakt berücksichtigt werden können, muß man mit Abweichungen zwischen vorherberechneten und nach der Realisierung gemessenen raumakustischen Eigenschaften rechnen. Das ist kein Argument gegen eine sorgfältige Planung, sondern es bedeutet, dass in Räumen mit hohen Anforderungen an die raumakustische Qualität unbedingt nach Fertigstellung eine meßtechnische Überprüfung notwendig ist und dass eventuell korrigiert werden muß. Um unnötigen Aufwand für die Korrekturen zu vermeiden, empfiehlt sich daher bei Gebäuden mit vielen gleichartigen Räumen, wie beispielsweise bei Unterrichtsräumen in Schulen, zunächst einen Raum fertigzustellen und zu vermessen, so dass eventuelle Korrekturen in allen übrigen Räumen ohne nachträgliche Änderungen berücksichtigt werden können.



8. Der didaktische Kontext

Lehrveranstaltungen zur Raumakustik erfolgen nicht nach einem einheitlichen Schema, sondern können an Hochschulen und anderen Bildungseinrichtungen in vielfältigen Formen stattfinden, die unter anderem von der Zielgruppe, den Vorkenntnissen der Lernenden, den Lernzielen, dem Umfang der Lehrveranstaltung und nicht zuletzt von den didaktischen Präferenzen der Lehrenden abhängen. In diesem Kontext soll die AkuCheck-Software als ein 'Werkzeug' neue Möglichkeiten eröffnen, ohne dabei die Lehrenden auf ein bestimmtes didaktisches Konzept festzulegen.

Das didaktische Umfeld, in dem die AkuCheck-Software im Projektverlauf an der Universität Wuppertal erprobt wurde, kann deshalb auch nur als eine von vielen Möglichkeiten verstanden werden. Dem entsprechend diente die didaktische Erprobung auch nicht der Überprüfung des didaktischen Konzepts der Lehre in Wuppertal, sondern der Fragestellung, ob die Studierenden nach einer zeitlich eng bemessenen einführenden Vorlesung über Grundlagen der Akustik und der Raumakustik und einer kurzen Einführung in die Benutzung der Software in der Lage sind, weitgehend eigenständig mit der AkuCheck-Software zu arbeiten.

In den Erprobungen mit zwei Jahrgängen des Bachelor-Studiengangs Architektur, an denen insgesamt etwa 60 Studierende teilnahmen, zeigte sich, dass diese Voraussetzung für den Einsatz der AkuCheck-Software erfüllt ist. Etwa die Hälfte der Gruppen von je 2-3 Studierenden arbeitete nach der Einführung völlig eigenständig. Die Übrigen nahmen die angebotene punktuelle Hilfe in Anspruch, um einzelne Fragen zu klären. Dabei ist der prozentuale Anteil der völlig selbstständigen Gruppen unerheblich, denn das Stellen und Klären auftretender Fragen ist im Wuppertaler didaktischen Konzept ein ebenso erwünschter Bestandteil des Lernens wie die eigenständige Arbeit. Von größerer Bedeutung ist dagegen, dass es in beiden Erprobungsjahrgängen keine einzige Studierende Gruppe gab, die permanente Betreuung während ihrer Arbeit benötigte. Für die Lehrpraxis zeigt dies, dass die weitgehend eigenständige Arbeit der Studierenden mit der AkuCheck-Software möglich ist. Allerdings ist es erforderlich, dass ein fachlich kompetenter Ansprechpartner zur Klärung auftretender Fragen für die Studierenden erreichbar ist.

Beispielhaft wird im Folgenden skizziert, in welchem didaktischen Kontext die Erprobung an der Universität Wuppertal erfolgte.

Der Lehrplan für das Bachelor-Studium in Wuppertal sieht im Rahmen der Bauphysik für alle akustischen Themen insgesamt knapp 20 Unterrichtsstunden vor, wobei als abschließender Höhepunkt und motivationsförderndes Element auch eine halbtägige Exkursion mit fachkundiger Führung in einem Konzertsaal integriert ist. Ein zentrales Ziel der Lehre in Wuppertal ist es, die akustische Wahrnehmung mit der physikalischen Beschreibung und Berechnung zu verknüpfen, da dies eine unabdingbare Voraussetzung für eine sinnvolle akustische Planung ist. Dazu ist die Vorlesung mit diversen Hörbeispielen, einem mitlaufenden, hochauflösenden Echtzeit-Spektalanalysator und einer Reihe von Saalexperimenten mit Studierendenbeteiligung angereichert. Als raumakustisches Beispiel wird der Hörsaal



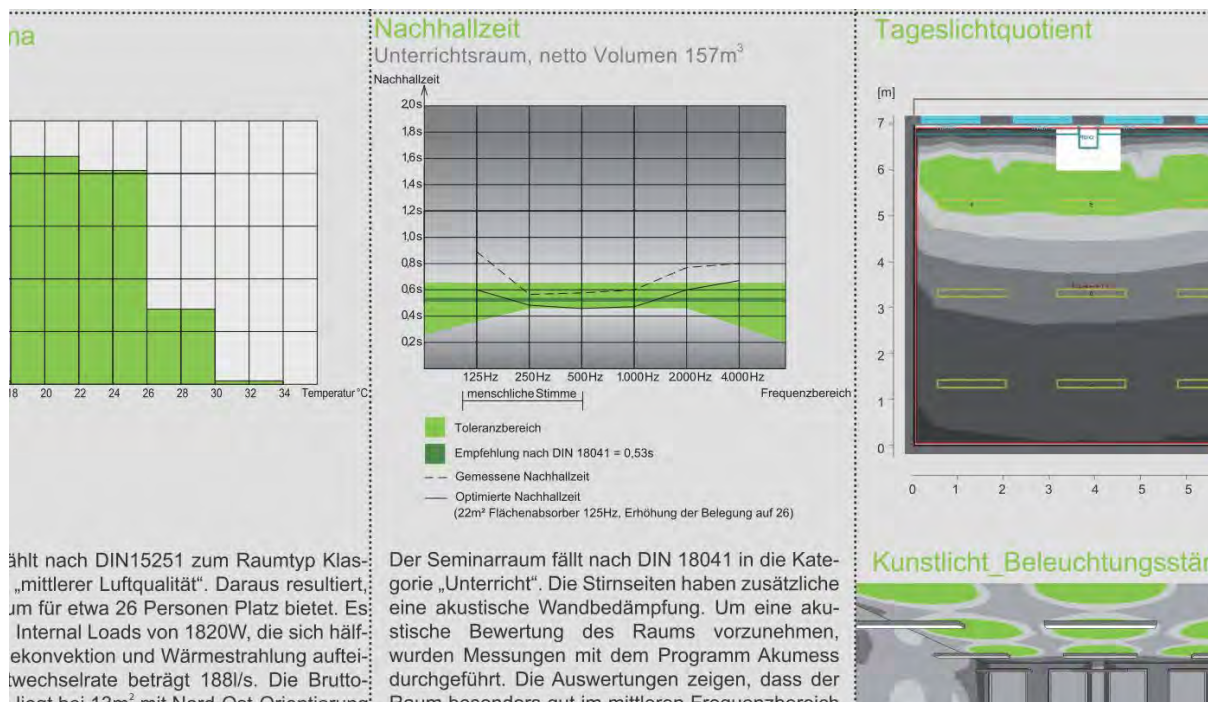
analysiert, wobei für Messungen die AkuCheck-Software im erweiterten Modus mit Sinus-Sweep-Messung zum Einsatz kommt.

Nach dieser Einführung erhalten die Studierenden die Aufgabe, in Kleingruppen jeweils einen Seminar- oder anderen Unterrichts-Raum zunächst auditiv zu erkunden und anschließend mittels der AkuCheck-Software meßtechnisch zu analysieren und die Wirkung zusätzlicher Absorber im Raum zu berechnen.

Erläuterung	Vorbereitungen:														
	<ul style="list-style-type: none"> - fertigen Sie eine maßstäbliche Grundriß-Skizze des Raums auf einem separaten (karierten) Blatt an - wählen Sie 4-5 über den Raum verteilte Positionen (A,B,C,...) für die Schallquelle aus (jeweils minimal 1m Wandabstand) - wählen Sie 4-5 über den Raum verteilte Positionen (1,2,3,...) für das Mikrofon aus (jeweils minimal 1m Wandabstand) - zeichnen Sie alle Positionen (A,B,.. und 1,2,...) in die maßstäbliche Skizze ein Messungen: <ul style="list-style-type: none"> - verwenden Sie für die Messungen die 'AkuCheck'-Software - führen Sie 10 Messungen durch, jede Messung mit einer eigenen Kombination aus Quell- und Mikrofon-Position - falls eine Messung offensichtlich nicht gelungen ist, wiederholen Sie diese Messung sofort - nach Abschluß aller 10 Messungen vergleichen Sie diese und prüfen Sie auf 'Ausreißer' (starke Abweichungen vom Rest) - falls nötig, können Sie bis maximal 4 der Messungen von der weiteren Auswertung ausschließen (aber nur Ausreißer !!) - mitteln Sie über die verbleibenden 6 - 10 Messungen - das ist das Ergebnis der Meßreihe 														
Messungen	Positionen (siehe Skizze)		ist OK (ja/nein)	gemessene Nachhallzeiten T [s]						verwendete Nachhallzeiten T [s]					
	Quelle	Mikrofon		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Messung 1															
Messung 2															
Messung 3															
Messung 4															
Messung 5															
Messung 6															
Messung 7															
Messung 8															
Messung 9															
Messung 10															
mindestens 6 Messungen verwenden !															
Anzahl: <input type="text"/> Mittelwerte der verwendeten Nachhallzeit-Messungen T_{gem} [s] <input type="text"/>															
Teilaufgabe 3: Berechnen Sie die Wirkung von Menschen im Raum															
Erläuterung	Berechnen Sie zuerst die äquivalenten Schallabsorptionsflächen A aus den Nachhallzeiten - formen Sie dazu die Sabine'sche Formel ($T = 0.163 V / A$) in geeigneter Weise um Fügen Sie nun rechnerisch Menschen im Raum hinzu - wieviele Menschen sind bei voller Besetzung im Raum zu erwarten ? (wieviele mehr als bei der Messung !!) - verwenden Sie den eigetragenen 'Personen-Typ': (erw.) Schüler / Studenten im U-Raum - berechnen Sie nun die äquivalenten Schallabsorptionsflächen A inklusive der zusätzlichen Personen Berechnen Sie nun die inklusive der zusätzlichen Personen zu erwartenden Nachhallzeiten - verwenden Sie dazu wiederum die Sabine'sche Formel ($T = 0.163 V / A$)														

Bild 33: Ein Ausschnitt aus der Aufgabenstellung für die Bachelor-Studierenden im Sommersemester 2014. Einige Berechnungen wurden von den Studierenden parallel zur Software manuell ausgeführt, so dass die Möglichkeit bestand die Ergebnisse zu vergleichen und auch zu verstehen, was innerhalb der Software berechnet wird.

Neben der geplanten Erprobung wurde die AkuCheck-Software während der zweiten Entwicklungsphase auch in anderen Lehrveranstaltungen verwendet. So setzten Master-Studierende die Software nach einer einstündigen Einführung eigenständig für ihre Arbeiten ein. Sie nutzen die Software – noch unter dem Arbeitstitel 'AkuMess' – für die raumakustische Bewertung in einer Master-Seminararbeit zur Performance der Campusgebäude. Bild 34 zeigt einen Ausschnitt der Posterpräsentation mit Bezug zur Raumakustik.



...fällt nach DIN15251 zum Raumtyp Klasse 1 („mittlerer Luftqualität“). Daraus resultiert, dass der Raum für etwa 26 Personen Platz bietet. Es gibt interne Lasten von 1820W, die sich durch Konvektion und Wärmestrahlung aufsteigen. Die Luftwechselrate beträgt 188l/s. Die Bruttofläche beträgt bei 13m² mit Nord-Ost-Orientierung...

Der Seminarraum fällt nach DIN 18041 in die Kategorie „Unterricht“. Die Stirnseiten haben zusätzliche eine akustische Wandbedämpfung. Um eine akustische Bewertung des Raums vorzunehmen, wurden Messungen mit dem Programm Akumess durchgeführt. Die Auswertungen zeigen, dass der Raum besonders gut im mittleren Frequenzbereich...

Bild 34: Ein Ausschnitt aus der Präsentation der Master-Seminararbeit 'Passport HB' von Antonia Könsgen und Jana David.

Auch außerhalb der Universität Wuppertal wurde die AkuCheck-Software bereits eingesetzt. So zeigte anlässlich der Vorführung der Software auf der DAGA-Tagung 2014 Prof. Christoph Reuter vom Institut für Musikwissenschaft der Universität Wien großes Interesse an der Verwendung in der Lehre. In seinem kurzen Erfahrungsbericht schreibt er: *"Im letzten Semester haben wir es (Anm. AkuCheck) auch sehr gut im Raumakustik-Seminar einsetzen können (besonders bei der Messung der Akustik des Hörsaals II), als Impulsgeber hatten wir hier Pistole, Luftballons und Klappe gehabt. Sehr gut ist vor allem die intuitive Bedienbarkeit und klare Benutzerführung in dem Programm (so dass auch die Studierenden alleine damit experimentieren konnten), und natürlich auch, dass die Kurven gleich ausgegeben werden und virtuell mit Absorptionsmaterialien verändert werden können."*



9. Betrachtungen zur Genauigkeit der Messungen

Für Nachhall-Messungen gibt es keine direkte absolute Referenz in Form eines Ur-Hallraums analog zum Ur-Meter (oder zu neueren Referenzen). Stattdessen gibt es festgelegte Meß-Algorithmen, insbesondere in ISO 3382. Wenn diese Algorithmen in einem Computer auf der Sample-Basis eines Meß-Signals abgearbeitet werden, werden Nachhallzeiten und andere Zeit-bezogene Maße implizit auf die Taktfrequenz der Digitalisierung zurückgeführt. Da diese Quarz-gestützten Takte in der Regel recht genau sind (Abweichungen typisch $< 10^{-4}$), ist von hier kein für die Raumakustik relevanter Fehler zu erwarten.

Algorithmenüberprüfung

Bei jeder digitalen Signalverarbeitung müssen mögliche Softwarefehler in Betracht gezogen werden. Da diese in einer komplexen Software kaum durch Absuchen des Programmcodes zu entdecken sind, verbleiben zwei erfolgversprechende Verfahren um eine fehlerhafte Umsetzung von Algorithmen in der Software festzustellen. Eine Überprüfung der Ergebnisse auf Plausibilität kann in kurzen Zeitabständen parallel zur Entwicklung erfolgen und eignet sich um grobe Fehler frühzeitig zu erkennen. Die eigentliche Prüfung der Genauigkeit erfolgt durch Vergleich mit bereits seit langem, von vielen Nutzern in vielen Messungen eingesetzten Meßsystemen, die man als gut ausgetestete Quasi-Standards ansehen kann. Das Risiko noch unentdeckter 'Rest-Fehler' wird nochmals kleiner, wenn mehr als ein solcher Quasi-Standard herangezogen wird.

Der Vergleich von Nachhallzeit-Algorithmen

Die Algorithmen der AkuCheck-Software wurden mit drei verbreiteten Software-Meßsystemen verglichen, deren Algorithmen ebenfalls auf ISO 3382 beruhen.

Mit allen am Vergleich beteiligten Programmen wurden jeweils dieselben Impulsantworten ausgewertet und die Resultate verglichen. Der Vergleich zeigte zwischen den Nachhallzeit-Auswertungen aller vier beteiligten Programme geringfügige Abweichungen, also auch zwischen den Referenzen untereinander.

Die Nachhallzeiten aller vier Programme stimmten generell innerhalb von 0.02 bis 0.05 s überein. Jedes der vier Programme zeigte allerdings vereinzelt individuelle Ausreißer bis maximal etwa 0.1 s. Die Übereinstimmung belegt eine offenbar weitgehend korrekte Umsetzung der Algorithmen aus ISO 3382, die Abweichungen können in Freiheiten der Umsetzung begründet sein, die ISO 3382 läßt, die aber nicht im Einzelnen dokumentiert sind.

Da die Abweichungen der Programme untereinander deutlich kleiner sind, als die typische Streuung der Messungen innerhalb eines Raums, können die Algorithmen-bedingten Unterschiede als unbedeutend für die Meßergebnisse angesehen werden (vgl. Bild 35).

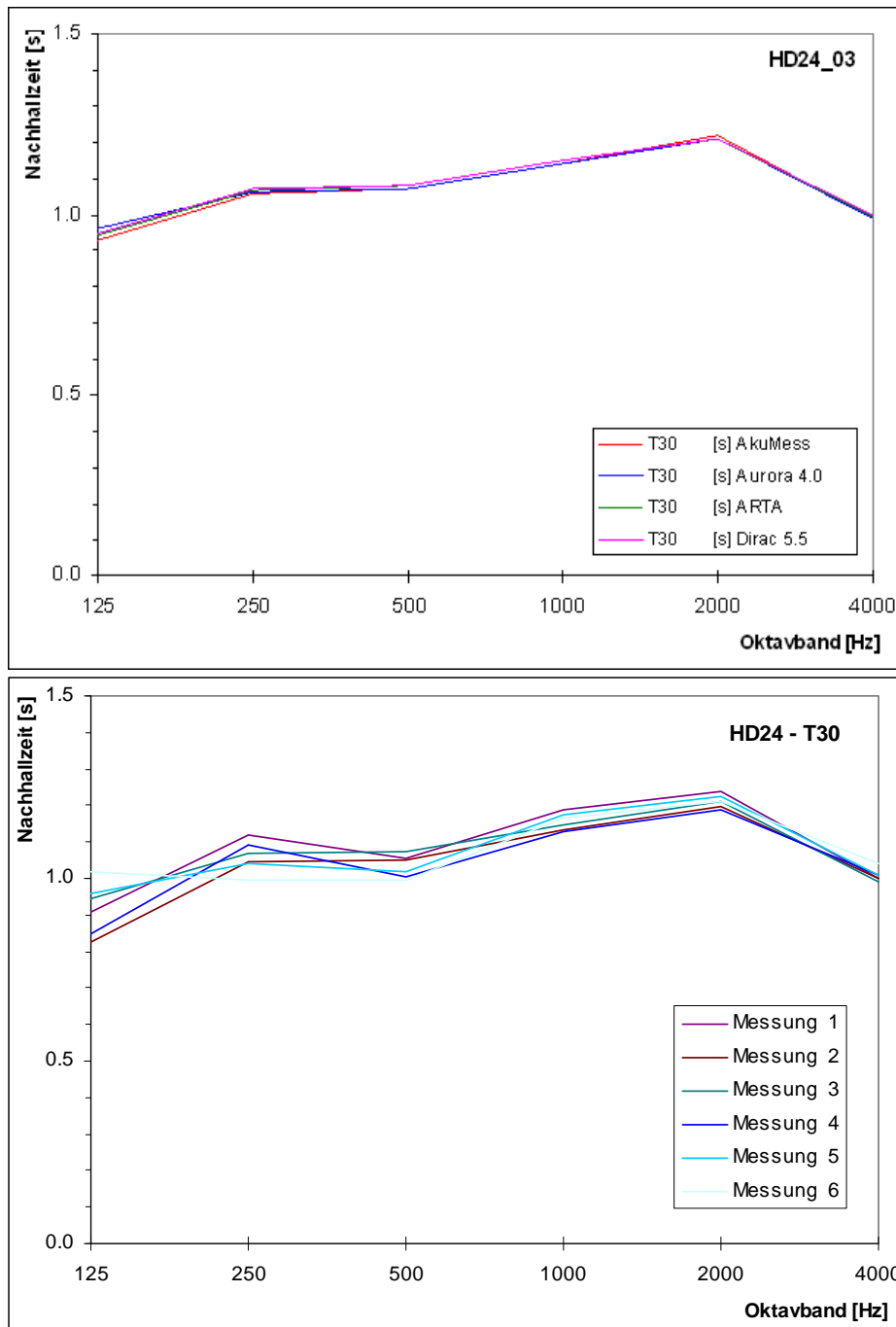


Bild 35: Oben ein Beispiel aus dem Algorithmen-Vergleich mit drei etablierten Referenzen. Die Abweichungen, die sich in dem Vergleich zeigten, waren weit kleiner als die Streuung, die sich typischerweise zwischen mehreren Messungen an verschiedenen Orten im Raum ergibt (das Bild unten zeigt 6 Messungen mit verschiedenen Positionen von Schallquelle und Mikrofon).



Weitere Algorithmmentests

Bei den Maßen für Klarheit und Übertragungsqualität, die das Verhältnis früher zu später Schallenergie beschreiben (T_s , C_{80} , C_{50} , D_{50}), wird nicht, wie bei den Nachhallzeiten, die Steilheit eines Abklingens ausgewertet, sondern die Schallenergie-Anteile werden mit einer Zeit-abhängigen Bewertungs-Funktion aufsummiert. Bei T_s ist die Bewertungs-Funktion die Zeit selber, bei C_{80} , C_{50} und D_{50} ist es eine Sprungfunktion mit einem Sprung bei 80 ms bzw. bei 50 ms. Die Zeitskala für die Bewertungs-Funktion hat ihren Nullpunkt im Direktsignal der Raumimpulsantwort.

Ein kritischer Punkt der Algorithmen ist, dass dieser Nullpunkt zwar im ungefilterten Signal als Peak mit steilem Anstieg gut detektierbar ist, hinter den Oktav-Filtern jedoch insbesondere bei tiefen Frequenzen nur noch sehr unscharf feststellbar ist. Andererseits erzeugen die Filter eine Signal-Verzögerung, die zu tiefen Frequenzen hin zunimmt. Eine praktikable Lösung dafür ist es, den Nullpunkt im ungefilterten Signal zu bestimmen und bei der Auswertung jedes Oktav-gefilterten Signals individuell um die Filter-Verzögerung zu verschieben.

In AkuCheck wurden mit Messungen der Oktav-Schwerpunktzeiten eines Impulses von einem Sample Länge ohne angewendete Verzögerungs-Korrektur die Filter-Verzögerungen bestimmt. Aufgrund der Definition der Schwerpunktzeit liefert diese Messung eine Verzögerung innerhalb der Auswerte-Kette. Anschließend wurden diese in den Programm-Code integriert. Eine Kontrollmessung ergab Rest-Abweichungen unter 2 ms in den tiefen Oktaven und weit unter 1 ms bei hohen Frequenzen.

Der Einfluss der Messanregung

Die Messung mit Sinus-Sweep als Anregung und anschließender Faltung des empfangenen Signals mit einem inversen Sweep ist eine gute Annäherung an eine ideale Messung mit einem energiereichen Dirac-Impuls. Die wirksame Anregung ist nur ein Sample lang (kürzer als 25 μ s). Die Messung ist bis auf Störeinflüsse exakt reproduzierbar.

Impuls-Anregungen sind dagegen in der Regel nur grob reproduzierbar und der anregende Impuls ist immer etwas unscharf. Eine exakte Übereinstimmung wiederholter Messungen ist unter diesen Umständen nicht zu erwarten.

Bild 36 zeigt in einem Beispiel, dass sich Impuls-angeregte Messungen mit einer Streubreite um die Mittelwerte von etwa 0.02 s bei hohen Frequenzen und etwa 0.03 s bei tiefen Frequenzen wiederholen lassen, mit einem Ausreißer bei 125 Hz. Damit ist bei Impulsanregung eine Reproduzierbarkeit erreichbar ist, die unterhalb der typischen Streubreite der Nachhallzeiten zwischen verschiedenen Meßpositionen im Raum liegt und somit keine dominierende Fehlerquelle wird. Voraussetzungen für diese Reproduzierbarkeit sind eine weitgehende Abwesenheit von Störgeräuschen im Raum und anregende Impulse, die in allen Oktaven genügend Energie enthalten.

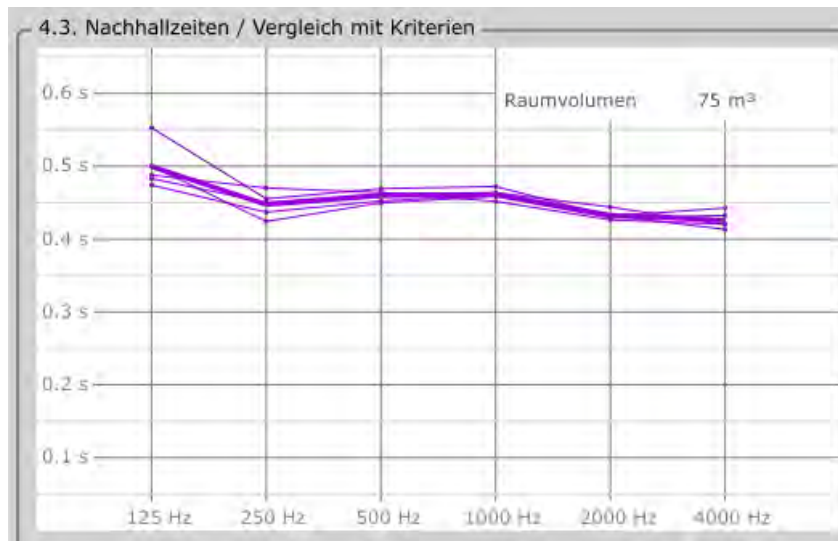


Bild 36: Fünf Wiederholungen der gleichen Messung mit Händeklatschen als Anregung zeigen beispielhaft die Reproduzierbarkeit.



10. Betrachtungen zur Wahl geeigneter Mikrofone

Das Mikrofon ist eine zentrale Komponente bei akustischen Messungen. Die folgenden Betrachtungen ordnen das sehr breite Angebot erhältlicher Mikrofone und ebenfalls für die Messungen erforderlicher Audio-Interfaces nach Kriterien der Eignung für raumakustische Messungen.

Mikrofontypen

Die höchste Übertragungsqualität aller Mikrofontypen ermöglichen Kondensatormikrofone. Seit Entwicklung der ersten Kondensatormikrofone (Georg Neumann, ca. 1930) kann Musik und Sprache in hoher Qualität übertragen und aufgezeichnet werden. Heute werden Kondensatormikrofone als Meßmikrofone und als Studio-Kondensatormikrofone verwendet. Der in den 1960er Jahren entwickelte Typ des Elektret-Mikrofons vereinfacht das Prinzip des Kondensator-Mikrofons und ist inzwischen der am weitesten verbreitete Mikrofontyp. Dynamische Mikrofone spielen in der Bühnentechnik eine wichtige Rolle, da sie sich besonders robust bei zugleich recht guter Übertragungsqualität herstellen lassen.

Meßmikrofone

Typisches Kennzeichen von Meßmikrofonen ist ein kleiner Durchmesser der Mikrofonkapsel und ein entsprechend schlankes Mikrofon-Gehäuse, das sich zum Anschluß hin erweitert. Damit wird erreicht, dass das Mikrofon das Schallfeld nur wenig verändert und dass die Richtcharakteristik bei allen Frequenzen des Hörbereichs nahezu kugelförmig ist.

Ihrem Name entsprechend sind Meßmikrofone die erste Wahl, wenn es um akustische Messungen geht. Allerdings sind raumakustische Messungen auch mit anderen Mikrofontypen möglich, wobei es aber Einschränkungen in der Meßqualität geben kann.



Bild 37: Ein Meßmikrofon (links) und eine Studio-Kondensatormikrofon mit Kugel-Charakteristik (rechts).



Studio-Kondensatormikrofone

Studio-Kondensatormikrofone sind in der Übertragungsqualität vergleichbar mit Meßmikrofonen, jedoch in den Bauformen und Eigenschaften auf die hochwertige Übertragung von Musik und Sprache ausgelegt. Es gibt zwei Unterscheidungsmerkmale, nach denen Studio-Mikrofone kategorisiert werden: Richtcharakteristik und Membrangröße.

Anders als bei Meßmikrofonen, wo meist eine kugelförmige Richtcharakteristik erwünscht ist, sollen Studio-Mikrofone häufig auf eine Schallquelle ausgerichtet sein, von dort den Schall besonders gut aufnehmen und für Schall aus anderen Richtungen weniger empfindlich sein. Zu diesem Zweck sind Richtcharakteristiken wie 'Niere' und 'Superniere' entwickelt. Eine besondere Richtcharakteristik ist die 'Acht', die von vorne und hinten gleich empfindlich und von der Seite völlig unempfindlich ist. Es gibt auch Mikrofone, deren Richtcharakteristik von 'Kugel' über 'Niere' bis 'Acht' in Stufen oder kontinuierlich einstellbar ist.

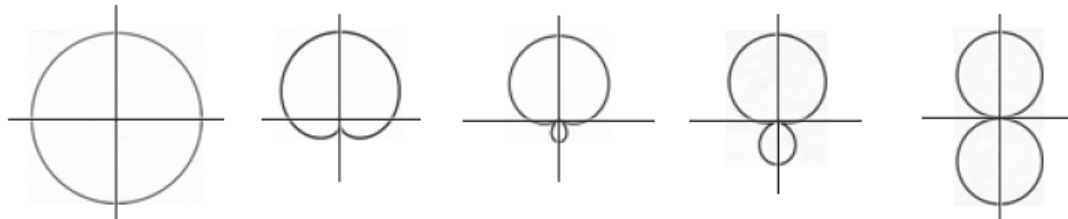


Bild 38: Richtcharakteristiken von Mikrofonen (v.l.n.r. Kugel, Niere, Superniere, Hypernieren, Acht).

Kondensator-Mikrofone mit großer Membran ($\varnothing > 25$ mm) eignen sich bevorzugt für die Aufnahme von Stimmen oder einzelner Instrumente. Deren Richtcharakteristik ist häufig stärker Frequenz-abhängig als bei Mikrofonen mit kleiner Membran (\varnothing typisch 10-15 mm). Kleinmembran-Kondensatormikrofone mit Kugel-Charakteristik weisen oft einen sehr gleichmäßigen Frequenzverlauf der Übertragungseigenschaften auf.

Mit Einschränkungen können alle Studiomikrofone für raumakustische Messungen verwendet werden. Bei stark gerichteten Mikrofonen, besonders bei 'Acht'-Charakteristik ist jedoch Vorsicht geboten. Am besten für Raumakustik-Messungen geeignet und für diesen Zweck nahezu gleichwertig zu Meßmikrofonen sind Kleinmembran-Kondensatormikrofone mit Kugel-Charakteristik.

Elektret-Mikrofone

Da Elektret-Mikrofonkapseln zu niedrigen Kosten und in kleiner Bauform hergestellt werden können, sind sie in vielerlei Geräten eingebaut wie Mobiltelefone und Headsets, Computer, mobile Recorder und einfache Konsumenten-Mikrofone. Hochwertige Elektret-Mikrofonkapseln werden auch in einigen (eher preisgünstigen) Meß- und Studiomikrofonen verwendet.



Für Raumakustik-Messungen sind Elektret-Mikrofonkapseln nach 'echten' Meßmikrofonen und Studio-Mikrofonen mit Kugel-Charakteristik die zweitbeste Wahl. Wenn die Übertragungseigenschaften nicht künstlich verschlechtert wurden, werden die Frequenzen des Hörbereichs sehr gleichmäßig übertragen. Lediglich das Eigenrauschen ist bei kleinen Mikrofonkapseln höher, so dass Messen mit sehr leisen Signalen schwieriger wird.

Dynamische Mikrofone

Dynamische Mikrofone werden häufig auf der Bühne zur Abnahme von Instrumenten oder Stimmen verwendet. Dieser Mikrontyp kann besonders robust und unempfindlich für Umwelt-Einflüsse hergestellt werden, was für den rauen Bühnenbetrieb ein großer Vorteil ist. Die Übertragungsqualität ist bei guten dynamischen Mikrofonen auch recht gut, erreicht aber nicht das Niveau guter Kondensatormikrofone.

Dynamische Mikrofone können auch für Raumakustik-Messungen verwendet werden. Wie bei Kondensator-Mikrofonen gilt auch hier: je weniger gerichtet, umso besser geeignet. Dynamische Mikrofone mit Kugel-Charakteristik sind allerdings äußerst selten. Die meisten dieser Mikrofone haben eine Nieren- oder Supernieren-Charakteristik.

Mikrofon-Vorverstärker

Zum Anschluß von Mikrofonen an Computer dienen in der Regel Kombinationen aus Mikrofon-Vorverstärker und Analog-Digital-Wandler, die 'Audio-Interface' oder 'Soundkarte' genannt werden. In die meisten PCs ist eine solche 'Soundkarte' integriert. Externe Audio-Interfaces können über USB, FireWire oder andere Schnittstellen angeschlossen werden.

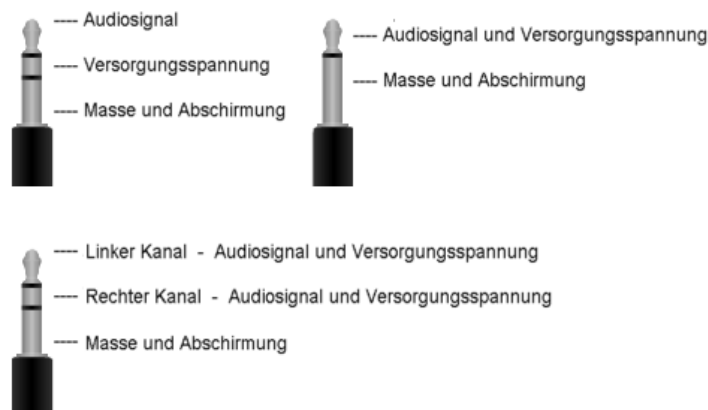


Bild 39: Steckverbindungen für Elektretmikrofone. Einfache Elektretmikrofone sind häufig mit einem 3-poligen Klinkenstecker versehen, in dem das Audiosignal und die Versorgungsspannung für das Mikrofon über separate Pole geführt werden (oben links). Diese Anschlußart paßt zu den meisten 'Konsumenten-' Audio-Interfaces und -Soundkarten. Bei Elektretmikrofonen mit 2-poligem Klinkenstecker sind Audiosignal und Versorgungsspannung in einem Pol zusammengefaßt (oben rechts, genannt 'Tonaderspeisung'). Diese Mikrofone können an den 3-poligen Eingängen nur mit einem Adapter betrieben werden, in dem die Pole 'Audiosignal' und 'Versorgungsspannung' zusammengeführt werden. Bei Stereo-Mikrofonen liegen Audiosignal und Versorgungsspannung immer zusammen auf einem Pol (unten)..



Mikrofon-Anschluß bei Konsumenten-Geräten

Mikrofon-Vorverstärker müssen zum Mikrofon passen, es kann also nicht jedes Mikrofon an jedem Vorverstärker betrieben werden. Für einfache Elektretmikrofone muß der Vorverstärker eine Versorgungsspannung (ca. 5 V) liefern, es sei denn das Mikrofon ist Batterie-betrieben. Meist sind die Anschluß-Stecker der Mikrofone wie oben links in Grafik A.3 beschaltet und passen damit zu den Mikrofon-Eingängen vieler Audio-Interfaces und Soundkarten für Konsumenten.

Mikrofon-Anschluß bei professionellen Geräten

Professionelle Geräte für den Bühnen- und Studio-Einsatz sind mit einer ganz anderen Anschluß-Technik ausgeführt. Hier kommen überwiegend 'symmetrische' Leitungen zum Einsatz. Jedes Audio-Signal wird auf zwei Adern einer symmetrischen Leitung mit zueinander inverser Polarität übertragen. Die Masse- und Abschirmung sind hier an der Signal-Übertragung nicht beteiligt. Mit dieser Technik sind auch lange Leitungen bei geringer Störung durch äußere elektromagnetische Felder möglich.

Professionelle Kondensator-Mikrofone benötigen in der Regel eine 'Phantomspeisung', eine 48 V-Versorgung (einige Mikrofon-Typen können auch mit geringerer Spannung betrieben werden) mit Pluspol auf beiden Signaladern und Minus auf der Masse. Dynamische Mikrofone benötigen keine Stromversorgung. Als Steckverbindung für professionelle Mikrofone dienen überwiegend robuste 3-polige XLR-Stecker. Die professionelle Anschlußtechnik ist weder elektrisch noch mechanisch kompatibel mit Konsumenten-Geräten. Für die Praxis bedeutet das, Mikrofon und Vorverstärker müssen zur gleichen 'Geräte-Familie' gehören: entweder beide 'professional' oder beide 'consumer'.



Bild 40: Beispiele für Audio-Interfaces, einfach und hochwertig. Links eine einfaches USB-Interface mit 'Consumer'-Anschluss für ca. 10 Euro. Rechts ein professionelles Audio-Interface höchster Qualität (oben Vorder-, unten Rückseite), das etwa das 100-fache kostet. (Bildquelle rechts: RME).



11. Kommunikation und Publikation

Zur Kommunikation unter den Projektbeteiligten fand eine Reihe von Projekt-Treffen statt.

Ein erstes ad-hoc-Treffen mit zwei Projekt-Beratern erfolgte im November 2012 am Rande der Tonmeistertagung in Köln. Die regulären Projekt-Meetings waren am 16.1.2013 anlässlich der Messe 'Bau' in München und am 16.1.2014 auf Einladung der Firma OWAconsult in Amorbach. Im März 2014 während der Tagung DAGA 2014 in Oldenburg fand ein weiteres, informelles Gespräch mit zwei der Projektberater statt.

Im Projektverlauf wurde die Software auf zwei Konferenzen vorgestellt und praktisch vorgeführt: Auf dem 'Central European Symposium on Building Physics', CESBP 2013 in Wien und auf der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Akustik, DAGA 2014 in Oldenburg. Nach den Vorträgen gab es neben dem Interesse von Tagungs-Teilnehmern die Software sobald wie möglich zu erhalten auch über das aktuelle Projekt hinausgehende Nachfragen nach Software-Versionen in anderen Sprachen und für andere Betriebssysteme als Windows.

Die Software steht seit August 2014 zum freien Download zur Verfügung und kann unter folgendem Link angefordert werden:

<http://www.btga-arch.uni-wuppertal.de/werkzeuge/akucheck.html>



12. Anhang

- Benutzer-Anleitung zur Software
- Tagungs-Manuskript zum CESBP 2013
- Tagungs- Manuskript zur DAGA 2014
- Software auf CD

AkuCheck

Raumakustik-Analyse mit dem Notebook-PC

Benutzer-Anleitung

Version AkuCheck RC 1 (Juni 2014)

Inhalt

1. Einführung	3
2. Anleitung für Einsteiger	4
2.1. Eine Meßreihe vorbereiten	4
2.2. Messungen durchführen	8
2.3. Messungen auswerten	10
2.4. Meßergebnisse bewerten	12
2.5. Modifikationen am Meßobjekt berechnen	14
2.6. Ergebnisse dokumentieren	17
2.7. Die Schallabsorber-Datenbank	18
3. Ergänzungen für fortgeschrittene Nutzer	19
3.1. Raumimpulsantworten mit 'Sinus-Sweep' messen	19
3.2. Verschiedenartig gemessene Nachhallzeiten	20
3.3. Maße für Klarheit und Übertragungsqualität	21
3.4. Schallabsorber-Daten und Planung	23
Anhang	
A.1. Didaktischer Kontext	25
A.2. Eine kleine Mikrofonkunde	26
A.3. Die Schallabsorber-Datenbank	29
A.4. Betrachtungen zur Genauigkeit der Messungen	31
A.5. System-Voraussetzungen und Installation	33
A.6. Literatur und Planungshilfen	33
A.7. Projekt-Information	34

1. Einführung

Die AkuCheck-Software verwandelt einen Notebook-PC mit einem angeschlossenen Mikrofon in ein einfach handhabbares Meßgerät für raumakustische Parameter, Nachhallzeiten und andere.

Die Software ist primär für Lehr-, Lern- und Informations-Zwecke konzipiert, mit dem Ziel Messungen ohne spezielle technische Ausrüstung mit relativ einfachen Mitteln zu ermöglichen. Zudem führt die Software durch den Meß- und Analyse-Prozeß und gibt einen Einblick in die Funktionsweise der Messung.

Mit solchen einfachen Mitteln erhebt die Software keinen Anspruch, Ergebnisse in Referenzqualität zu liefern, aber die Genauigkeit sollte ausreichen um die Qualität und Eignung von Kommunikationsräumen, wie beispielsweise Unterrichtsräumen in Schulen, einzuschätzen.


2. Anleitung für Einsteiger

Die Benutzer-Oberfläche der Software AkuCheck ist so gestaltet, daß die Anwender durch eine Meßreihe einschließlich der Auswertung geführt werden. Mit der Tabulatur oben im Programmfenster kann zwischen den nummerierten Seiten der Oberfläche umgeschaltet werden. Die Nummern leiten durch die einzelnen Schritte der Meßreihe. Die einzelnen Seiten sind wiederum in Punkten untergliedert.

2.1. Eine Meßreihe vorbereiten

Das Meßobjekt

Eine Meßreihe bezieht sich immer auf einen Raum in einem bestimmten Zustand. Wir nehmen als Beispiel den Seminarraum HD 22 in der Universität Wuppertal, in dem sich während der Messungen 6 Personen befinden. Unser Meßobjekt ist also der 'Seminarraum HD 22' in der Variante '6 Personen im Raum'.



1.1. Meßobjekt beschreiben	
Objekt-Bezeichnung	Uni Wuppertal, Seminarraum HD 22
Variante / Beschreibung	6 Personen im Raum

Grafik 2.1 Bezeichnung des Meßobjekts.

Die Messungen vorbereiten

Vor einer Meßreihe muß die Meßausrüstung zusammengestellt werden und ggf. der Raum vorbereitet werden. Dazu gehören:

Meß-Computer

Ein Notebook-PC, mit dem die Messung durchgeführt werden soll. Auf diesem PC muß die AkuCheck-Software lauffähig sein. AkuCheck benötigt das Betriebssystem Windows ab Version XP.

Meß-Mikrofon

Ein Mikrofon, das für die Messung geeignet ist. In vielen Fällen wird dies eine einfaches Elektret-Mikrofon sein, denn dieser Mikrofon-Typ ist sehr verbreitet. Wichtige Voraussetzung ist, daß das Mikrofon an den PC anschließbar ist und das Mikrofon-Signal von Software im PC verwendet werden kann. Der Anschluß kann so erfolgen:

- Eine kostengünstige Lösung besteht aus einem einfachen Elektret-Mikrofon und einem USB-Audio-Interface (jeweils ab etwa 10 Euro erhältlich). Ein USB-Audio-Interface wird in der Regel innerhalb der ersten Minute nach dem Einstecken in einen USB-Anschluß automatisch erkannt und steht dann für Programme zur Verfügung.
- In manchen Notebook-PCs kann auch der integrierte Mikrofon-Eingang mit einem externen Mikrofon oder auch ein internes Mikrofon genutzt werden. Allerdings ist hier Vorsicht geboten, denn in vielen Notebook-PCs der jüngeren Generation wird das Mikrofonsignal manipuliert, bevor es zur Software gelangt. Für Sprachanwendung- en ('Voice over IP') kann das vorteilhaft sein, eine Messung macht es jedoch unmöglich. Deshalb ist es besser, im Zweifelsfall die obige externe Lösung zu wählen.
- Die qualitativ beste aber auch teuerste Lösung besteht aus einem professionellen Meß-Mikrofon oder Studio-Mikrofon (mit Kugel-Charakteristik) und einem professionellen Audio-Interface. Der Anschluß des Mikrofons erfolgt hier über robuste XLR-Stecker. Die für professionelle Kondensator-Mikrofone nötige 'Phantomspannung'

ung' (meist 48 V) wird vom Audio-Interface geliefert. Das Preisspektrum beginnt für Mikrofon und Audio-Interface jeweils um 100 Euro und reicht bis in den vierstelligen Bereich bei Geräten der Spitzenklasse.

Impuls-Schallquelle

Für die einfache Nachhall-Messung ist eine Impuls-Schallquelle nötig. Diese kann auf verschiedene Weise realisiert werden:

- Eine einfache Methode eine Impuls zu erzeugen ist ein kräftiges Händeklatschen. Dabei kommt es darauf an, daß mit 'hohlen' Händen geklatscht wird, so daß ein 'satter' Klang entsteht, in dem auch tiefe Frequenzen enthalten sind. Händeklatschen ist als Schallquelle nur für kleinere und mittelgroße Räume bis etwa Klassenraum-Größe geeignet, wobei das Hintergrundgeräusch gering sein muß.
- Wenn das Händeklatschen als Schallquelle nicht ausreicht, kann ein aufgeblasener Luftballon oder Ähnliches zum Zerplatzen gebracht werden. Gut geeignet (und sehr laut) sind einige Arten etwa 10 cm großer Verpackungs-Luftkissen.
- Als Schallquelle für sehr große Räume kommen auch Knallkörper oder Schreckschußpistolen in Frage. Hierbei müssen ggf. Brandschutz-Vorschriften beachtet werden.

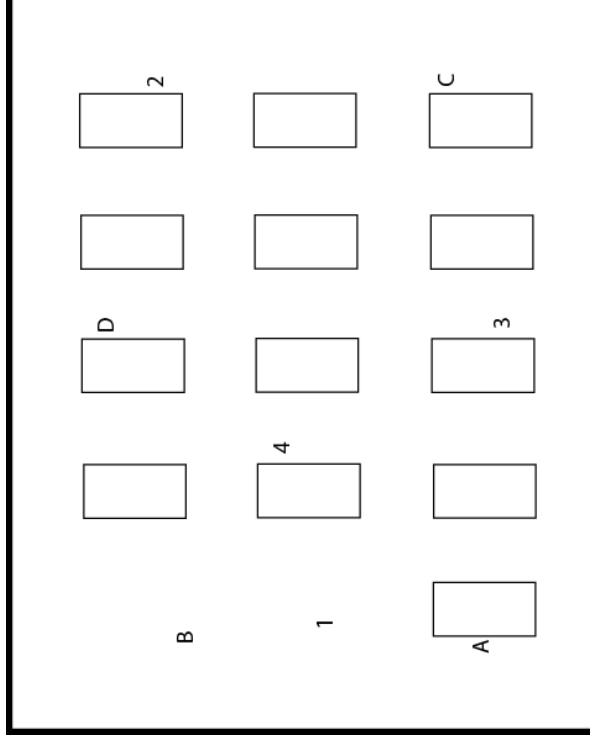
Gehörschutz

Bei sehr lauten Schallquellen muß ein Gehörschutz getragen werden. Bei Schallquellen, die deutlich lauter als ein kräftiges Händeklatschen sind, ist es empfehlenswert, die Ohren zu schützen, denn ein lauter Knall kann zu einer spontanen Schädigung des Hörorgans führen (Knalltrauma). Gehörschutz gibt es in zweierlei Form: als Gehörgang-Stöpsel und als ohrumschließende Kapseln.

Positionen von Schallquelle und Mikrofon im Raum

Da die Nachhallzeit eine statistische Größe ist, liefert nicht jede Messung in einem Raum exakt die gleichen Werte. Aus diesem Grund wird die Nachhallzeit in der Regel in einer Meßreihe aus mehreren Einzel-Messungen ermittelt.

Entsprechend DIN 18041 sollen mindestens 6 Messungen mit verschiedenen Positionen von Schallquelle und Mikrofon vorgenommen werden. Es ist jedoch ratsam, die mit der AkuCheck-Software möglichen 10 Einzel-Messungen in einer Meßreihe voll auszuschnöpfen. Eine einfache Möglichkeit (von sehr vielen): Wählt man beispielsweise 4 verschiedene Schallquellen-Positionen und 6 verschiedene Mikrofon-Positionen im Raum aus, dann ergeben sich 24 unterschiedliche Kombinationen, von denen nur 10 benötigt werden.



Grafik 2.2 Skizze eines Unterrichtsraums mit Schallquellen- (A, B, C, D) und Mikrofon-Positionen (1, 2, 3, 4).

Bei der Wahl der einzelnen Positionen kann man sich von der typischen Raumnutzung leiten lassen. So können im Beispiel eines Seminars typische stehende und sitzende Sprecher-Positionen als Schallquellen-Orte und ich gleicher Weise typische stehende und sitzende Hörer-Positionen für das Mikrofon ausgewählt werden. Die Positionen sollten über den Raum verteilt sein (also nicht in einem kleinen Bereich des Raums konzentriert) und nicht zu nah an Umschließungsflächen liegen (Wandabstand > ca. 1 m). Bei jeder Einzelmessung sollten Schallquelle und Mikrofon nicht zu nah beeinaender sein (ein Abstand im Bereich 1/3 bis 2/3 der Raum-Diagonale ist günstig).

Ruhe im Raum

Da das Schallsignal im Raum für die Messung ausgewertet wird, soll es so wenig wie möglich gestört werden. Also müssen Störquellen im Raum beseitigt werden, Türen und Fenster geschlossen werden, und es muß ein Zeitpunkt für die Messung gewählt werden, an dem nur geringe Störungen von Außen zu erwarten sind. Während jeder der etwa 5 Sekunden dauernden Messungen darf kein anderes Geräusch als der Impuls erzeugt werden.

Das Mikrofon einrichten

Nach den allgemeinen Vorbereitungen wird die Meßappatur, bestehend aus dem Meß-Computer, dem Mikrofon und ggf. einem externen Audio-Interface, in Betrieb genommen.

Audio-Interface und Mikrofon anschließen

Falls ein externes Audio-Interface verwendet wird, sollte dies als erstes mit dem Computer verbunden werden. Das Mikrofon wird an den Mikrofon-Eingang angeschlossen, entweder am externen Audio-Interface oder direkt am Computer (siehe auch weiter oben).

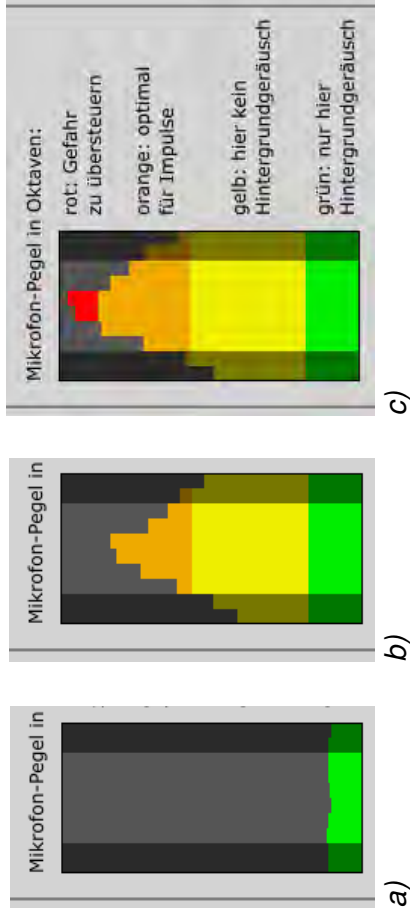
Den Audio-Eingang wählen

Nach dem Start¹ der AkuCheck-Software wird in der Aussteuerungs-Anzeige der Pegel des Mikrofon-Signals angezeigt, es sei denn der Audio-Eingang ist nicht richtig gewählt. Falls nötig kann nach dem Klicken der Taste 'Audio-Einstellungen' der richtige Mikrofon-Eingang ausgewählt werden.

¹ Zwischen dem Anschluß eines externen Audio-Interfaces und dem Start der AkuCheck -Software sollte etwa eine Minute Zeit für die automatische Hardware-Erkennung gelassen werden.

Das Mikrofon einpegeln

Wenn das Mikrofon-Signal vorhanden ist, wird auch in einem einigermaßen ruhigen Raum der Pegel des immer vorhandenen Hintergrundgeräuschs angezeigt. Für gute Meß-Qualität sollte das Hintergrundgeräusch im grünen Anzeige-Bereich bleiben und höchstens für kurze Momente in den gelben Bereich 'hineinragen'.



Grafik 2.3 Der Mikrofon-Pegel wird in allen zehn Oktaven des Hörbereichs angezeigt, von links, dunkel eingefärbt 31 und 63 Hz, dann die sechs Oktavbänder, in denen gemessen wird (125, 250, 500 Hz, 1, 2, 4 kHz), ganz rechts dunkel eingefärbt 8 und 16 kHz. a) zeigt ein Hintergrundgeräusch im 'grünen Bereich', b) zeigt einen genügend ausgesteuerten Impuls, c) zeigt einen maximal ausgesteuerten, fast übersteuerten Impuls'

Mit Probe-Impulsen kann getestet werden, ob diese hinreichend laut, aber nicht zu laut sind. Die Impulse sollen in allen sechs mittleren (hell eingefärbten) Oktavbändern in den orangen Anzeige-Bereich reichen und sie dürfen auch kurzzeitig ins Rote ragen. Sie sollen aber nicht am Oberrand der Anzeige 'anschlagen', denn das bedeutet eine Übersteuerung und damit eine Verfälschung des Signals.

Für den Fall, daß die Pegel noch nicht im gewünschten Bereich liegen, gibt es diese Möglichkeiten zur Korrektur:

- Wenn die Signale insgesamt sehr gering oder sehr hoch sind, kann in den Windows-Audio-Einstellungen der Mikrofon-Pegel angepaßt werden.² Falls ein professionelles Audio-Interface verwendet wird, kann dort meist die Verstärkung des Mikrofon-Vorverstärkers eingestellt werden.
- Wenn der Pegel-Unterschied zwischen Impulsen und Hintergrundgeräusch zu gering ist, muß entweder der Geräuschpegel gesenkt werden oder eine lautere Impulsquelle verwendet werden - oder Beides.
- Selbstverständlich können die Maßnahmen auch kombiniert werden - 'intelligentes Probieren' ist hier gefragt.

² In Windows 7 unter: Systemsteuerung – Sound – Aufnahme
In Windows XP unter: Systemsteuerung – Sounds und Audiogeräte
Weitere Information in der Windows-Dokumentation.

2.2. Messungen durchführen

Start einer Meßreihe

Die AkuCheck-Software erlaubt Meßreihen aus bis zu 10 Einzel-Messungen. Im Sinne der Meßgenauigkeit ist es empfehlenswert, die maximale Anzahl der Einzel-Messungen zu nutzen. Falls sich nachträglich einige der Einzel-Messungen als 'Ausreißer' mit schlechter Meß-Qualität erweisen, können diese später von der Gesamt-Auswertung ausgeschlossen werden.

Die Einzel-Messungen

Die Einzel-Messungen erfolgen in numerierter Reihenfolge. Die gerade anstehende Einzel-Messung hat den Status 'bereit'. Die bereits abgeschlossenen Einzel-Messungen haben den Status 'erledigt'. Die übrigen Einzel-Messungen haben den Status 'noch nicht dran', der jedoch nicht besonders angezeigt wird. In der Grafik rechts sind die Messungen 1 und 2 erledigt und die Messung 3 steht jetzt an.

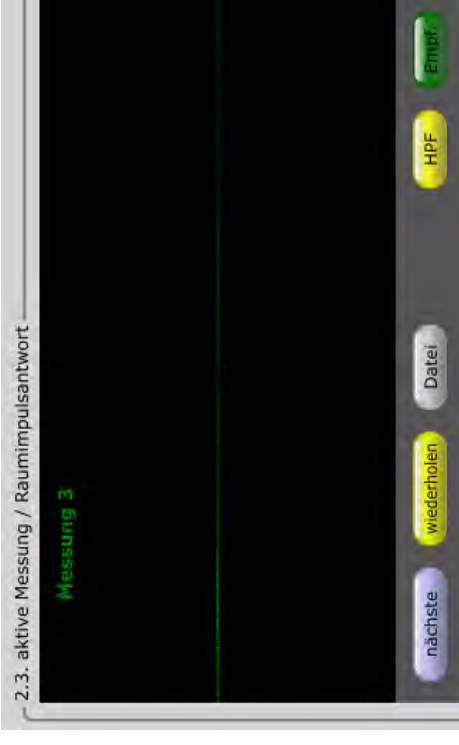


Grafik 2.4

Die aktive Messung

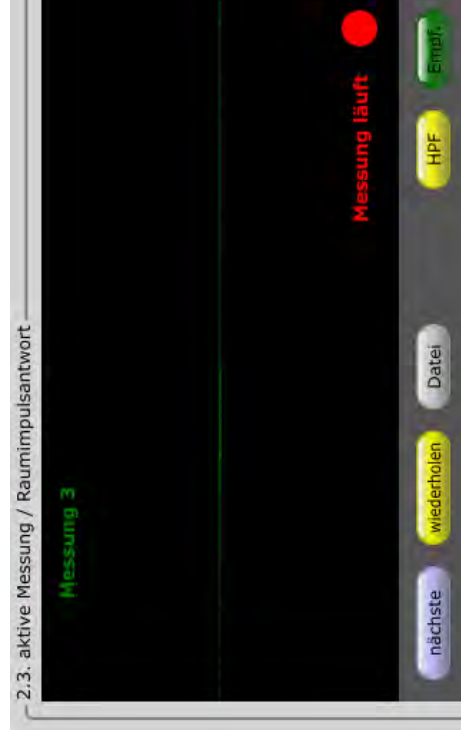
Im 'Oszillografen' der Software wird zunächst das ankommende Mikrofon-Signal fortlaufend angezeigt. Eine Momentaufnahme ist im oberen Bild zu sehen.

Mit der Taste 'Datei' kann anstelle einer aktuellen Messung eine Impulsantwort aus einer früheren Messung zwecks erneuter Verarbeitung geladen werden. Mit der Taste 'HPF' (Hochpaßfilter) können tief-frequente Störungen ausgefiltert werden. Mit der Taste 'Empf' kann die Ansprech-Empfindlichkeit für Impulse erhöht werden.



Grafik 2.5

Sobald ein hinreichend lauter Impuls eintrifft, wird automatisch der Aufnahme-Modus gestartet und durch einen roten Punkt angezeigt



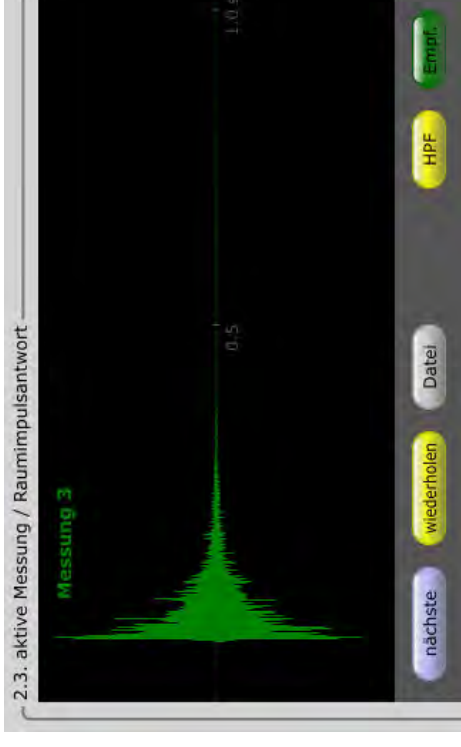
Grafik 2.6

Falls im Zeitraum mit sichtbarem rotem Punkt merkliche Störungen im Raum auftreten, ist es oft ratsam die Messung zu wiederholen.

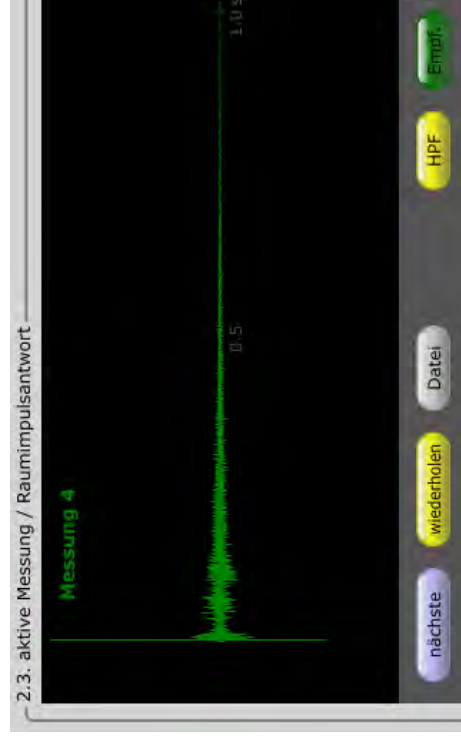
Nach ca. 5 Sekunden stoppt die Aufnahme und die interne Auswertung beginnt. Der rote Punkt wird dabei gelb. Wenn der gelbe Punkt erlischt, ist die aktuelle Einzelmessung fertig und die Raum-Impulsantwort ist gespeichert³.

Nun kann entweder die nächste Messung gestartet werden oder die noch aktive Messung wiederholt werden, beispielsweise wenn der Meßvorgang erkennbar mißlungen ist.

Es empfiehlt sich auch nach jeder Einzelmessung einmal die Programm-Seite 3 'Auswertung' anzusehen.



a)



b)

Grafik 2.7 Zwei Beispiele für gemessene Raum-Impulsantworten:

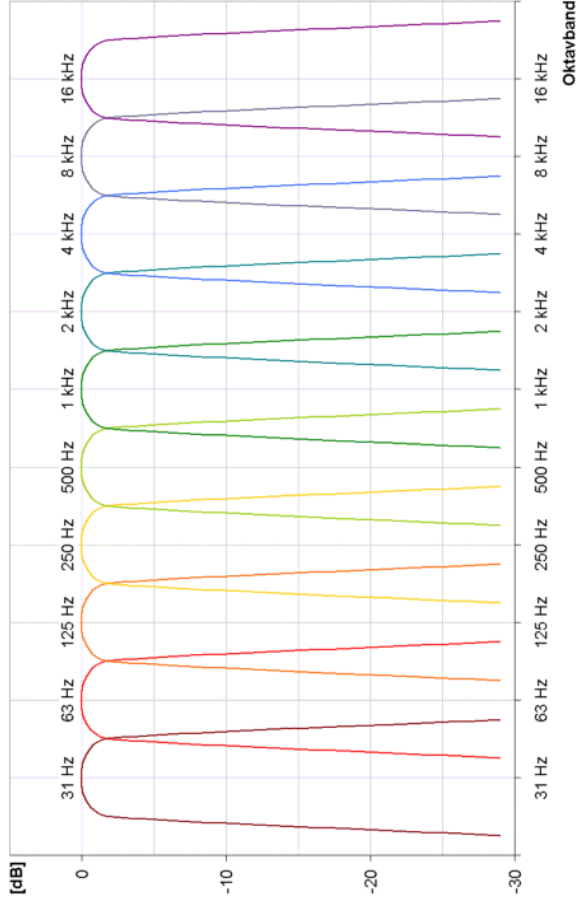
- a) aus einem Raum mit einer Nachhallzeit von etwa 0.4 s
- b) aus einem Konzertsaal mit etwa 2 s Nachhallzeit

³ Für jede Meßreihe wird im Unterverzeichnis 'imp' des Programmverzeichnis ein weiteres Unterverzeichnis angelegt, das mit Datum und Uhrzeit im Format 'JJMMTT_hhmm' benannt ist (wird zum Beispiel eine Meßreihe am 16.10.2014 um 9:55 Uhr gestartet, dann lautet der Verzeichnisname '141016_0955'). Hier werden die Raum-Impulsantworten der Meßreihe mit Dateinamen 'impulse01.wav' bis 'impulse10.wav' automatisch gespeichert.

2.3. Messungen auswerten

Auf der Seite 'Auswerten' ist eine wichtige Zwischenstufe der Meß-Auswertung grafisch dargestellt.

Die gemessene Raum-Impulsantwort enthält alle Spektral-Anteile, die aufgenommen wurden. Als erster Bearbeitungs-Schritt wird die Raum-Impulsantwort in Oktavbänder spektral zerlegt.

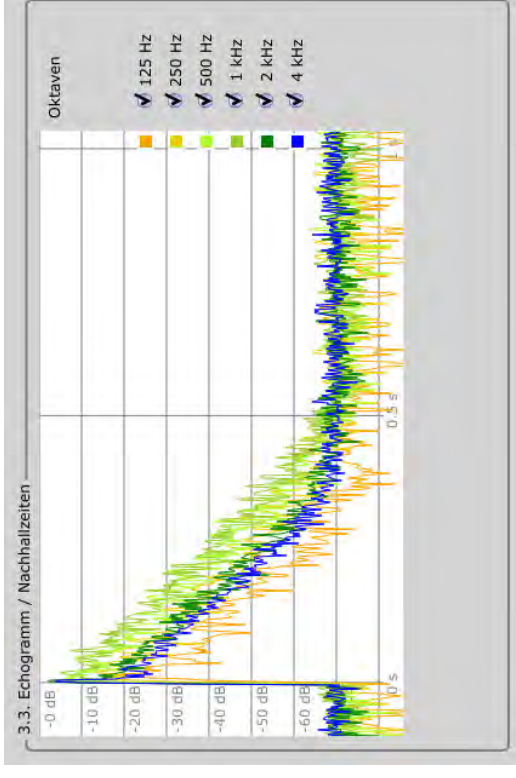


Grafik 2.8 Die Filterkurven aller 10 Standard-Oktavfilter im menschlichen Hörbereich. In AkuCheck werden die sechs mittleren Oktaven von 125 Hz bis 4 kHz ausgewertet, wie dies in der Raumakustik in den meisten Fällen geschieht.

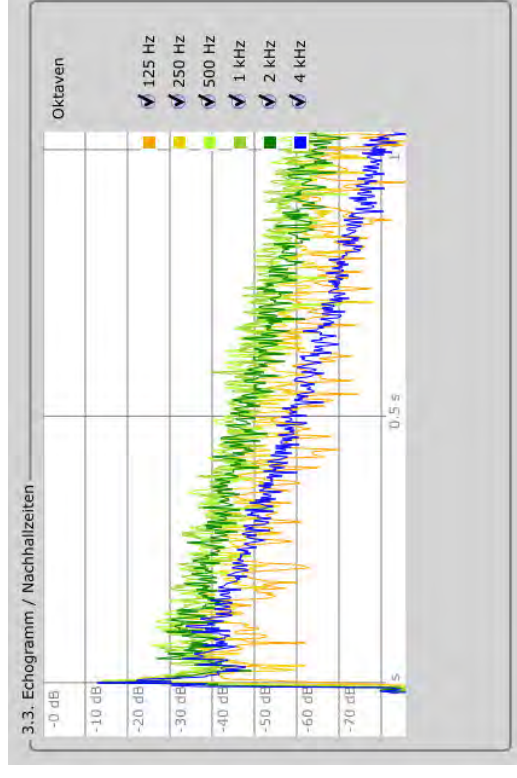
Hinter den Filtern werden in jeder der Oktav-filterten Impulsantworten für jeden einzelnen Zeitpunkt die Werte mit der Funktion

$$10 \cdot \log (x^2)$$

in [dB] skalierte Werte umgewandelt, die in Echogrammen wie in den Grafiken 2.9 und 2.10 dargestellt werden.



Grafik 2.9 In Echogrammen wird das zeitliche Abklingen des Nachhalls mit logarithmischer Intensitäts-Skala in [dB] dargestellt, hier für einen Raum mit etwa 0.4 s Nachhallzeit



Grafik 2.10 Echogramme eines Konzertsaals mit ungefähr zwei Sekunden Nachhallzeit

Die Echogramme zeigen nach dem Direktschall-Impuls ein gleichmäßiges, von Schwankungen überlagertes Abklingen, bis das Niveau des Hintergrundgeräuschs erreicht ist. Aus der Steilheit des Abklingens läßt sich die Nachhallzeit ablesen⁴. Ein schnelles (steiles) Abklingen entspricht einer kurzen Nachhallzeit, ein langsames (flaches) Abklingen einer langen Nachhallzeit. So ist beispielsweise in Grafik 2.10 erkennbar, daß die Nachhallzeiten bei hohen Frequenzen (blaue Kurven) niedriger sind als bei mittleren Frequenzen (grüne Kurven).

Außerdem ist in den Grafiken 2.9. und 2.10 zu sehen, daß das Abklingen bei tiefen Frequenzen (orange Kurven) weniger gleichmäßig verläuft als bei mittleren und hohen Frequenzen. Daran kann man erkennen, daß Nachhallzeit-Messungen bei tiefen Frequenzen oft ungenauer sind als bei höheren Frequenzen. Zwei Gründe können dabei eine Rolle spielen:

- Bei tiefen Frequenzen gibt es weniger Raum-Eigenfrequenzen pro Oktave als bei hohen Frequenzen und deshalb spielen einzelne Eigenfrequenzen eine größere Rolle. Eigenfrequenzen machen sich als räumliche Muster im Schallfeld bemerkbar. Bei Messungen an verschiedenen Orten im Raum zeigt sich daher auch meist eine größere Streuung der Meßergebnisse als in höheren Oktaven.
- Bei Messungen mit Impuls-Anregung wird zudem offenbar, daß in einem kurzen Impuls nur wenig Schallenergie bei tiefen Frequenzen enthalten ist.
Ganz besonders bei Händeklatsch-Anregung gelingt eine Messung bei tiefen Frequenzen nur, wenn mit 'hohlen' Händen geklatscht wird und das Klatschen einen 'satten' Klang hat.

⁴ Mathematisch geschieht dies, indem zunächst die Abkling-Kurve durch Rückwärts-Integration geglättet wird und dann an die geglättete Kurve eine Gerade angepaßt wird. Die Algorithmen sind in ISO 3382 beschrieben.

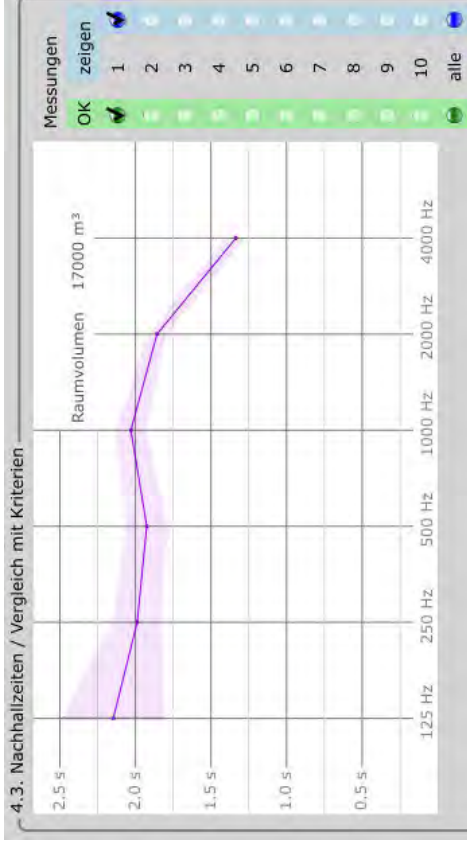
2.4. Meßergebnisse bewerten

Auf der Seite '4. Bewerten' werden die Ergebnisse der Meß-Auswertung für die sechs Oktavbänder von 125 Hz bis 4 kHz dargestellt. Den als Linie dargestellten Nachhallzeiten der Einzel-Messungen ist ein Schatten hinterlegt, dessen Breite eine Schätzung der Meßunsicherheit der jeweiligen Einzel-Messung darstellt. Am Beispiel des Konzertsaals in Grafik 2.11 ist zu sehen, daß die Meßunsicherheit wie in vielen Fällen von tiefen zu hohen Frequenzen hin abnimmt.

Grafik 2.12 zeigt Nachhallzeiten aus sechs Einzelmessungen mit verschiedenen Schallquellen- und Mikrofon-Positionen in einem Hörsaal sowie deren Mittelwerte als fette Kurve. Die einzelnen Messungen liegen einigermaßen nah beieinander und es ist ein leichter Trend zu erkennen, daß die Streuung der Meßwerte zu tiefen Frequenzen hin größer wird. Dieser Trend ist bei diversen Messungen zu beobachten und teilweise auch stärker ausgeprägt.

Fehlmessungen ausschließen

Insbesondere Messungen, die unter ungünstigen Bedingungen wie ausgeprägte Störgeräusche oder mit nicht gut geeigneter Schallquelle gemacht wurden, können gelegentlich mißlingen. Fehlmessungen lassen sich meist erkennen, daß entweder die Meßunsicherheit wesentlich größer ist als in Grafik 2.11 dargestellt oder daß sie 'Ausreißer' in einer Meßreihe sind, also bei einem oder mehreren Oktavbändern weit von übrigen Messungen abweichen (oft sind auch beide Kriterien zugleich erfüllt). Solche Messungen können durch Entfernen des OK's von der weiteren Verwendung ausgeschlossen werden.



Grafik 2.11 Nachhallzeiten eines Konzertsaals – Einzel-Messung



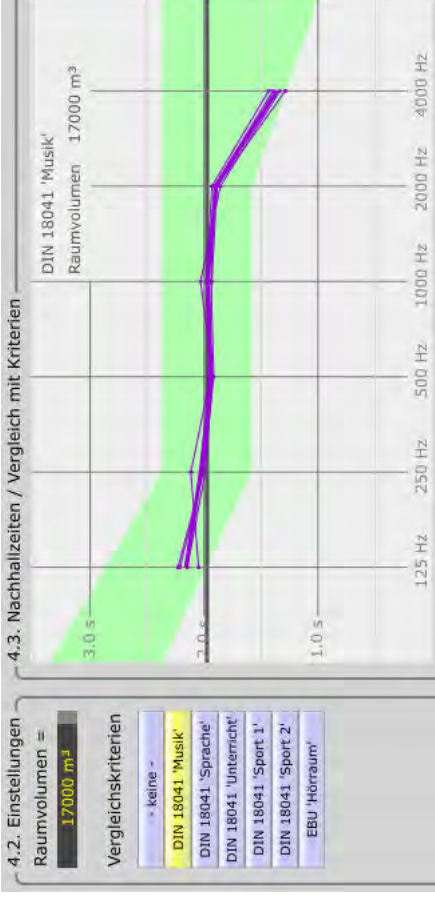
Grafik 2.12 Nachhallzeiten eines Hörsaals – sechs Einzel-Messungen und Mittelwerte.

Mit Vergleichskriterien bewerten

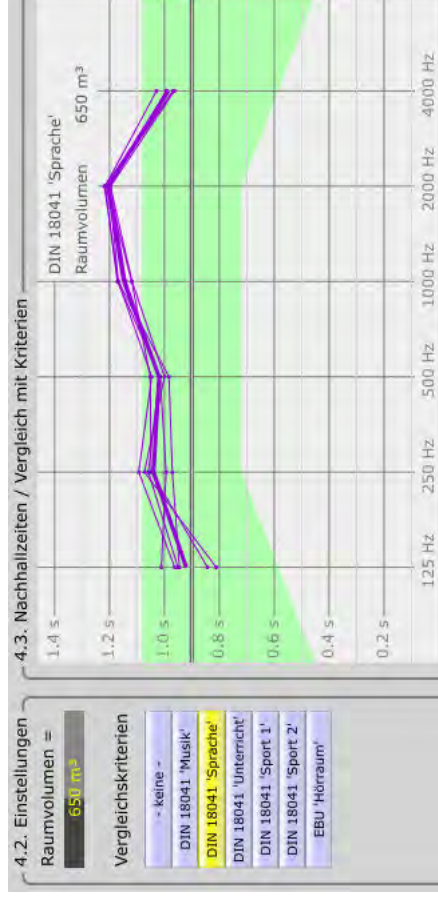
In DIN 18041 sind für verschiedene Raum-Nutzungsarten Volumensabhängig Nachhallzeiten empfohlen, die hier als Vergleichskriterien verwendet werden können. Dazu muß das Raumvolumen eingegeben⁵ werden und eine der vorgegebenen Nutzungsarten gewählt werden. Dann erscheint die empfohlene Nachhallzeit als horizontale fette Linie in der Grafik und ein grünes Toleranzfeld, in dem die Nachhallzeiten gemäß der gewählten Empfehlung liegen sollen, wird hinterlegt.

Die wählbaren Vergleichskriterien sind:

- DIN 18041 'Musik'⁶
- DIN 18041 'Sprache'
- DIN 18041 'Unterricht'
- DIN 18041 'Sport 1'
- DIN 18041 'Sport 2'
- EBU 'Hörraum' – eine besonders 'trockene' Raumgestaltung für das optimale Abhören von Tonaufnahmen im Studiobetrieb.



Grafik 2.13 Mehrere Nachhallzeit-Messungen in einem Konzertsaal mit DIN-Bewertung 'Musik'



Grafik 2.14 Nachhallzeit-Messungen in einem (leeren) Hörsaal mit DIN-Bewertung 'Sprache'. Im voll besetzten Zustand sinken die Nachhallzeiten auf etwa 0.8 s.

⁵ Eingabe durch horizontales Ziehen im Einstell-Feld.

⁶ Die österreichischen und schweizer Empfehlungen stimmen weitgehend mit denen der DIN 18041 überein und sind daher nicht separat aufgeführt.

2.5. Modifikationen am Meßobjekt berechnen

Auf der Seite '5. Berechnen' besteht die Möglichkeit die Auswirkungen zusätzlicher Schallabsorber im Raum vorherzuberechnen. Die zusätzlichen Absorber können sowohl Personen als auch technische Schallabsorber sein. Einem Raum können rechnerisch bis zu 8 verschiedene Schallabsorber-Typen hinzugefügt werden.

Zur Auswahl eines Absorbers wird die entsprechende numerierte Taste geklickt. Dann springt das Programm sofort auf die 'Absorber'-Seite (siehe Kapitel 2.7). Dort kann in der Datenbank ein Absorber ausgewählt werden. Mit der Taste 'verwenden' wird die Auswahl bestätigt und das Programm kehrt zur Seite '5. Berechnen' zurück.

Nun kann die wirksame Absorbermenge⁷ durch horizontales Ziehen in der Einstellfläche rechts neben der numerierten Taste eingestellt werden. Sobald dem Raum rechnerisch Absorber hinzugeführt wurden, erscheint zusätzlich zur violetten Kurve mit gemessenen Nachhallzeiten eine grüne Kurve mit berechneten Nachhallzeiten für den Raum mit zusätzlichen Absorbieren.

Die Berechnung erfolgt für jede Oktave separat in drei Schritten. Zuerst wird mit der Sabine'schen Formel aus der gemessenen Nachhallzeit und dem Raumvolumen die vorhandene äquivalente Schallabsorptionsfläche berechnet⁸:

$$A_{\text{vorhanden}} = 0.163 \cdot V / T_{\text{gemessen}}$$

⁷ Bei flächigen Absorbieren wird die (geometrische) Fläche des Absorbers, bei Personen oder Möbelstücken wird die Anzahl eingestellt.

⁸ In der Sabine'schen Formel hat die Konstante in SI-Einheiten genau genommen die Einheit [s / m], lautet also 0.163 s / m. In der Praxis wird die Einheit meist weggelassen. Es ist aber in jedem Fall wichtig, daß die Variablen in SI-Einheiten verwendet werden, also: A in [m²], V in [m³], T in [s].

Als zweiter Schritt wird rechnerisch die äquivalente Schallabsorptionsfläche der zusätzlichen Absorber hinzugefügt:

$$A_{\text{berechnet}} = A_{\text{vorhanden}} + A_{\text{zusätzlich}}$$

Die zusätzliche äquivalente Schallabsorptionsfläche faßt die Wirkung aller zusätzlichen Absorber zusammen, also beispielsweise bei zusätzlich zwei Absorbertypen und mehreren Personen im Raum:

$$A_{\text{zusätzlich}} = S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + n_P \cdot A_P$$

wobei S_1, S_2 die geometrischen Flächen der Absorber, α_1, α_2 die Schallabsorptionsgrade der Absorber, n_P die Anzahl der Personen und A_P die äquivalente Schallabsorptionsfläche einer einzelnen Person sind.

Schließlich wird, wieder mit der Sabine'schen Formel, aus der berechneten äquivalenten Schallabsorptionsfläche die Nachhallzeit mit den zusätzlichen Absorbieren berechnet:

$$T_{\text{berechnet}} = 0.163 \cdot V / A_{\text{berechnet}}$$

Diese berechnete Nachhallzeit ist eine Prognose, deren Qualität nicht nur von der zugrundeliegenden Messung abhängt, sondern auch von den als Annahmen eingehenden Daten. Je realistischer diese Annahmen sind, umso besser wird die Prognose.

Zusätzliche Personen im Raum

In den meisten Fällen sind bei Nachhall-Messungen nur wenige Personen im Raum, wogegen bei der normalen Nutzung oft wesentlich mehr Personen anwesend sind. Dann ist es nützlich, die Wirkung einer stärkeren Besetzung mit Personen in den Raum 'hineinzurechnen'. Ohne weiteres ist dies möglich, wenn die Personen im Raum stehen oder auf schallharten Möbeln sitzen, wie im Beispiel des Hörsaals in Grafik 2.15 a).

Werden dagegen Polstermöbel rechnerisch mit zusätzlichen Personen besetzt, dann führt eine einfache Addition der Absorberwirkung der Personen zu einem falschen Ergebnis, da die reduzierte Absorberwirkung der Polstermöbel dabei unberücksichtigt bleibt, wie beispielsweise in Grafik 2.15 b). Für solche Fälle sind spezielle Datensätze erforderlich, die die Differenz der Absorberwirkung zwischen einem unbesetzten und einem besetzten Sitz beschreiben.

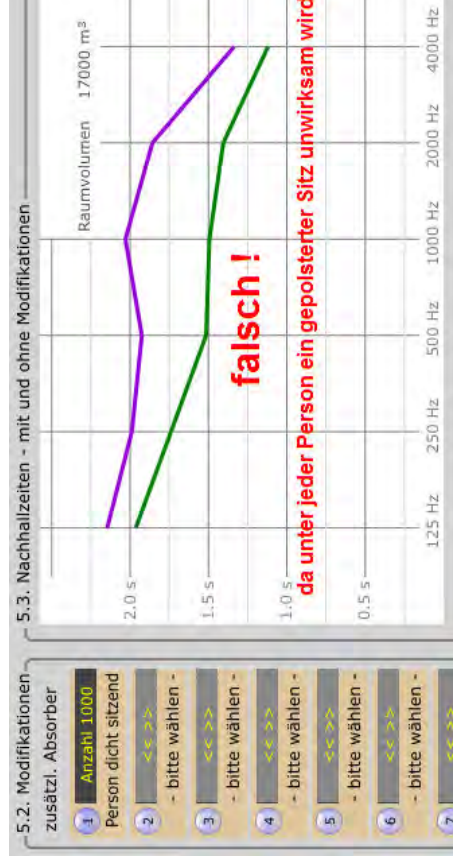
In jedem Fall gilt es jedoch zu beachten, daß die Absorberwirkung einer Person, genauer deren äquivalente Schallabsorptionsfläche, unterschiedlich groß sein kann. Einfluß haben insbesondere:

- Die Größe der Personen (Erwachsene absorbieren mehr als Kinder)
- Die Bekleidung (Winterkleidung wirkt stärker als Sommerkleidung)
- Stehende Personen absorbieren meist mehr als Sitzende
- Die Abstände der Personen zueinander – dicht stehende oder sitzende Personen verdecken einander teilweise und absorbieren deshalb weniger.

Daher ist es wichtig, für jeden Anwendungsfall einen geeigneten Personen-Datensatz auszuwählen, der der jeweiligen Situation am nächsten kommt. Oft bleiben Unsicherheiten und es ist dann sinnvoll eine minimale und eine maximale Personen-Wirkung zu berechnen.



a)



b)

Grafik 2.15 Die berechnete Wirkung zusätzlicher Personen im Raum

- a) Nachhallzeiten eines Hörsaals, unbesetzt gemessen (violett) und berechnet mit 100 Personen auf den Holzsitzen des Saals (grün)
- b) In dem vermessenen Konzertsaal ist eine entsprechende Rechnung nicht ohne weiteres möglich, da Personen auf den Polster-sitzen vorhandene Absorber verdecken und unwirksam machen, die Berechnung dies aber nicht berücksichtigt.

Die Berechnung raumakustischer Verbesserungs-Maßnahmen

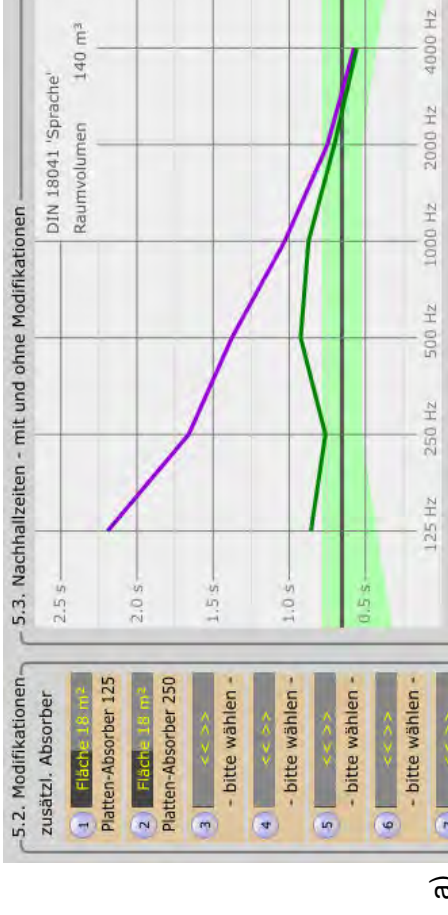
Häufig wird die Analyse eines Raums ergeben, daß die Nachhallzeiten zu lang sind. In solchen Fällen können raumakustische Verbesserungs-Maßnahmen rechnerisch 'erprobt' werden.

In Grafik 2.16 wird dies am Beispiel eines Besprechungsraums gezeigt, der mit Teppichboden und bei der Messung mit 9 Personen besetzt zwar im hohen Frequenzbereich einigermaßen bedämpft ist, in tiefen Oktaven jedoch viel zu viel hallt.

Um auch tiefe Frequenzen besser zu bedämpfen werden in der Rechnung zwei Seitenwände des Raums mit jeweils 18 m² Plattenabsorber unterschiedlicher Absorptions-Maxima (bei 125 Hz und bei 250 Hz) belegt. Damit sind die verfügbaren Flächen ausgeschöpft und es wird eine deutliche Verbesserung bei tiefen Frequenzen erreicht. Die DIN-Empfehlung für die Nutzungsart Sprache wird allerdings nicht ganz erreicht (Grafik 2.16 a).

Werden statt dessen beide Seitenwände mit je 18 m² porösem Breitbandabsorber von 100 mm Stärke belegt, so ist das Ergebnis in der 125 Hz-Oktave etwa gleich gut, bei höheren Frequenzen wird jedoch die anspruchsvollere DIN-Empfehlung 'Unterricht' erfüllt und teilweise sogar unterschritten (Grafik 2.16 b).

In jedem Fall muß wie hier neben der reinen Berechnung beachtet werden, ob die gewählten Absorber für den konkreten Raum geeignet sind und insbesondere ob genügend Oberfläche zur Verfügung steht.



a)



b)

Grafik 2.16 Die rechnerische Verbesserung eines Besprechungsraums mit unzureichender Tiefen-Bedämpfung.

- a) Die Wirkung zweier verschiedener Plattenabsorber-Typen an den Seitenwänden (mit DIN-Kriterium 'Sprache')
- b) Die Wirkung von Breitband-Absorbern an zwei Seitenwänden (mit DIN-Kriterium 'Unterricht')

2.6. Ergebnisse dokumentieren

Auf der Seite '6. Dokumentieren' kann eine Text-Dokumentation der aktuellen Meßreihe erstellt werden. Mit der Taste 'Doku erstellen' wird eine Text-Dokumentation im Editierfenster erzeugt. Dabei wird der vorherige Inhalt des Fensters gelöscht. Wenn die Option 'erweiterte Doku' gewählt ist, werden in der Dokumentation alle Meß-Parameter aufgeführt, anderenfalls entsteht eine kompakte Dokumentation mit Nachhallzeiten. Der Text kann Editierfenster ergänzt und editiert werden. Mit der Taste 'Doku speichern' kann die Dokumentation an einem Ort der eigenen Wahl gespeichert werden.⁹

Die Nachhallzeiten in den Tabellen sind mit einer Qualitätszahl (0..9) versehen. Diese kann etwa so interpretiert werden:

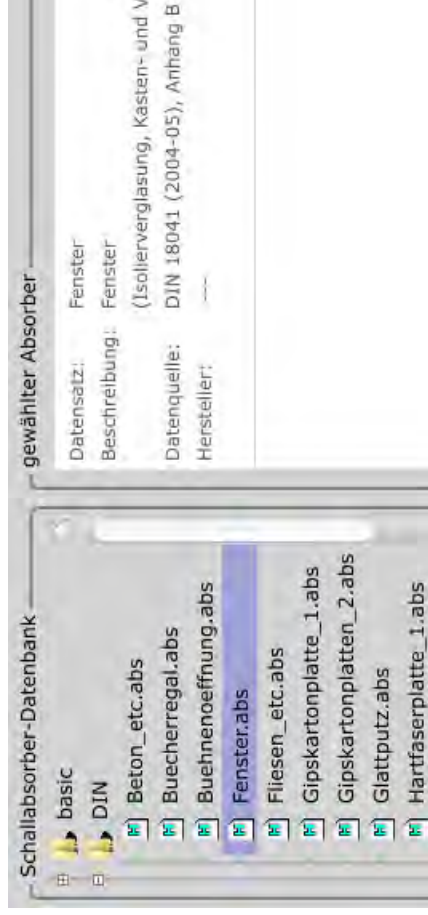
- 9 gute bis sehr gute Meßqualität
- 8 noch gute Meßqualität
- 7 noch akzeptable Meßqualität
- 6 sehr mäßige Meßqualität, eher nicht verwenden
- 5 oder weniger: Meßergebnis fragwürdig - nicht verwenden

Alternativ zum Text kann oben rechts ein CSV-Format mit Semikolon oder mit Komma als Trennzeichen ausgewählt werden. Diese Formate eignen sich nicht zum manuellen Weiterarbeiten, sondern sind für den Import in Tabellenkalkulations-Software wie 'OpenOffice Calc' oder 'Excel' vorgesehen. Dort können die Daten dann weiter ausgewertet werden mit eigenen Grafiken, etc..

⁹ Eine empfehlenswerte Möglichkeit ist es, die Datei im Verzeichnis mit den zugehörigen Impulsantworten zu speichern, also im Unterverzeichnis '\imp\JJJMMTT_hhmm' des Programms, wobei 'JJJMMTT_hhmm' Datum und Uhrzeit des Starts der Meßreihe sind. Empfehlenswert ist es außerdem, nach dem Fertigstellen einer Meßreihe dieses Unterverzeichnis umzubenennen, so daß die Meßreihe später leichter auffindbar ist, zum Beispiel in der Form 'JJJMMTT_hhmm_Objektbezeichnung'.

2.7. Die Schallabsorber-Datenbank

Die Programm-Seite 'Absorber' enthält einen Browser für die integrierte Schallabsorber-Datenbank. Die linke Spalte enthält eine Baumstruktur, in der ein Absorber ausgewählt werden kann. Der gewählte Absorber wird in der rechten Spalte mit seinen Eigenschaften angezeigt.



Grafik 2.17 Der Schallabsorber-Browser: links die Baumstruktur, rechts der ausgewählte Absorber

Mit Hilfe der Navigationstasten ($\uparrow, \downarrow, \leftarrow, \rightarrow$) oder durch Anklicken kann die Schallabsorber-Datenbank einfach durchsucht werden, wobei die Eigenschaften jedes Absorbers sofort angezeigt werden. Der Navigationsbaum ist unterteilt in verschiedene Zweige, eine Basis-Auswahl von allgemeinen Absorber-Typen ('basic'), Absorber aus dem Anhang der DIN 18041 ('DIN'), Absorber, die von Herstellern angeboten werden, Personen (als Schallabsorber). Da die Datenbank erweiterbar ist, können weitere Zweige und Datensätze im Browser hinzukommen. Näheres zur Erweiterung der Datenbank ist im Anhang zu finden.

Der Datensatz eines Absorbers enthält im Einzelnen:

- Die Bezeichnung des Datensatzes
- Eine kurze Beschreibung des Absorbers
- Soweit bekannt, die Quelle der Absorberdaten
- Bei kommerziell erhältlichen Absorbern der Hersteller / Anbieter
- Die Schallabsorptionsgrade (bei flächigen Absorbern) bzw. die äquivalenten Schallabsorptionsflächen (bei Personen oder stückweisen Absorbern wie Möbelstücken) sowohl als Zahlenwerte als auch in grafischer Darstellung.
- Soweit vorhanden eine Abbildung des Absorbers.

Die Absorptionsgrade in der Datenbank sind teilweise 'praktische Schallabsorptionsgrade' (α_p) nach ISO 11654, die auf Stufen von 0.05 gerundet sind und maximal 1.0 betragen können. Bei Absorber-Daten, die nicht ISO 11654 entsprechen, kommen auch Werte über 1.0 vor.

Ein Schallabsorptionsgrad über 1.0 bedeutet jedoch, direkt interpretiert, es wird mehr Schallenergie absorbiert als vorhanden ist. Da dies physikalisch unmöglich ist, sollten solche Werte nur mit großer Vorsicht interpretiert und verwendet werden. Eine sehr einfache, aber auch recht grobe Vorsichtsmaßnahme ist es, alle Werte über 1.0 auf genau 1.0 herabzusetzen¹⁰ (im Programmfenster unten rechts mit der Taste 'max. 1.0' kann dies bewirkt werden). Weiteres zur Interpretation und Verwendung von Schallabsorber-Daten ist im Anleitungs-Teil für fortgeschrittene Nutzer in Kapitel 3.4. zu finden.

¹⁰ Das Gleiche geschieht auch bei der Erzeugung der 'praktischen Schallabsorptionsgrade' (α_p) nach ISO 11654.

3. Ergänzungen für fortgeschrittene Nutzer

Dieser Teil der Anleitung setzt die Kenntnis der 'Anleitung für Einsteiger' in Kapitel 2 voraus und wendet sich an Benutzer, die sich bereits mit Raumakustik befassen und schon einfache Messungen und Berechnungen durchgeführt haben.

In der AkuCheck-Software muß der 'erweiterte Modus' aktiviert werden, damit die in diesem Kapitel beschriebenen zusätzlichen Funktionen zugänglich sind.

3.1. Raumimpulsantworten mit 'Sinus-Sweep' messen

Vorteile der Messung mit 'Sinus-Sweep'

Wer mit Messungen mit Impuls-Anregung macht, wird feststellen, daß diese recht anfällig für Störungen sind. Der Grund liegt darin, daß der anregende Impuls zwar laut, aber zugleich extrem kurz sein soll. Wegen dieser Kürze kann der Impuls trotz aller Intensität nur wenig Schallenergie enthalten.

Ein sehr kurzer Impuls eignet sich als Meßsignal, weil er alle Frequenzen des Hörspektrums enthält und innerhalb des sehr kurzen Zeitintervalls überträgt. Der 'Trick' bei Verwendung eines 'Sinus-Sweep', eines durch das gesamte Hörspektrum gleitenden Sinus-Tons, besteht darin, daß die einzelnen Spektral-Anteile nicht wie beim Impuls zugleich, sondern zeitlich nacheinander übertragen werden. Damit kann bei gleicher Intensität um ein großes Vielfaches mehr Energie im Meßsignal übertragen werden, und zwar umso mehr, je länger der 'Sweep' dauert.

Nach der Messung werden im aufgezeichneten Meßsignal die Frequenz-Anteile mit einem mathematischen Prozeß, der 'Faltung' mit einem inversen 'Sweep', zeitlich 'zusammengeschoben', so daß eine

Raumimpulsantwort entsteht, als sei mit einer Impuls-Anregung gemessen worden. Jedoch sind auf diese Art gewonnene Raumimpulsantworten um ein vielfaches weniger empfindlich für Störungen, da das Meß-Signal viel energiereicher war.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß Messungen bei gleicher Meßanordnung von Schallquelle und Mikrofon exakt reproduzierbar sind (bis auf meist marginale Abweichungen infolge von Personen-Bewegungen im Raum oder von Geräuschen). Messungen mit Impulsquellen zeigen dagegen fast immer auch bei gleichbleibender Meßanordnung eine merkliche Streuung, da die anregenden Impulse in der Regel nicht genau reproduzierbar sind.

Vorgehensweise bei 'Sinus-Sweep'-Messungen

Der Meßaufbau

Der größte Unterschied zu Messungen mit Impuls-Anregung ist, daß als Schallquelle ein Lautsprecher mit zugehörigem Verstärker benötigt wird, über den das Meß-Signal abgestrahlt wird.

Für die Meßgenauigkeit ist zwar vorteilhaft, wenn das Meßsignal einigermaßen laut abgestrahlt wird, um einen hohen 'Störabstand' zu erhalten. Die Lautstärke sollte aber nur so hoch eingestellt werden, daß keine merklichen Verzerrungen auftreten – Lautsprecher und Verstärker sollten deutlich 'unterhalb ihrer Möglichkeiten' betrieben werden.

Für die Auswahl der Schallquellen- und Mikrofon-Orte gelten die gleichen Regeln wie in Kapitel 2.1 für Impuls-Schallquellen beschrieben.

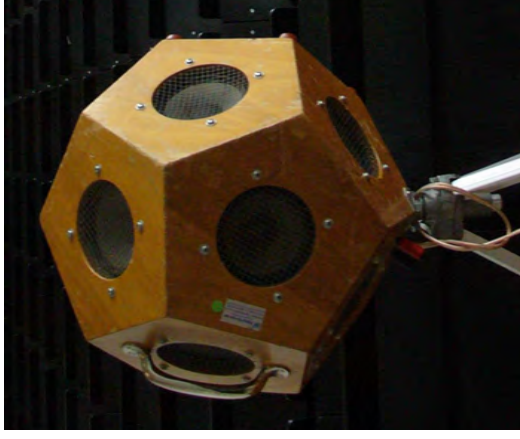
Bei professionellen Nachhall-Messungen werden meist Dodekaeder-Lautsprecher¹¹ eingesetzt, die den Schall näherungsweise gleichmäßig in alle Richtungen abstrahlen.

Auch mit gerichtet strahlenden Lautsprechern guter Qualität sind Nachhall-Messungen möglich.

Obwohl für die Messungen eine große Lautstärke vorteilhaft ist, muß besonders darauf geachtet werden, daß weder der Verstärker noch der Lautsprecher übersteuert werden, denn die Verzerrungen bei Übersteuerung können die Meßergebnisse verfälschen.

3.2. Verschiedenartig gemessene Nachhallzeiten

Originär ist die Nachhallzeit definiert als die Zeit, in der ein Schalleignis im Raum um 60 dB gegenüber dem anfänglichen Schallpegel abgeklungen ist - nach einem Impuls oder nach dem Abschalten einer konstanten Schallquelle. Eine über volle 60 dB Abklungen gemessene Nachhallzeit wird als T_{60} bezeichnet. Es erfordert allerdings, daß auch das um 60 dB abgeklungene Signal im Pegel noch über dem Hinter-



Grafik 3.1 Ein betagter Dodekaeder-Lautsprecher, der an der Uni Wuppertal nach wie vor genutzt wird.

grundgeräusch liegen muß¹². Diese Bedingung ist in realen Meßsituationen oft nicht erfüllt, so daß T_{60} nicht gemessen werden kann.

Als Abhilfe macht man sich zunutze, daß das Abklingen des Nachhalls in der Regel exponentiell erfolgt. Dann dauert das anteilige Abklingen von 0 dB bis -30 dB gleich lang wie das anteilige Abklingen von -30 dB bis -60 dB. Man kann demnach eine 30 dB-Abklingzeit verdoppeln und erhält einen Wert, der im Idealfall mit T_{60} übereinstimmt. Konkret wird die Abklingzeit von -5 dB bis -35 dB gemessen und verdoppelt als T_{30} bezeichnet. Analog dazu wird die verdreifachte Abklingzeit von -5 dB bis -25 dB, also über 20 dB, T_{20} genannt.

In AkuCheck wird darüber hinaus ein gewichtetes Mittel aus T_{20} und T_{30} gebildet und als T_{mix} angezeigt. Die Wichtung erfolgt anhand der Meßunsicherheiten, so daß Werte mit besserer Meßqualität bevorzugt werden. T_{mix} ist eine Annäherung an einen 'bestmöglich gemessenen' Wert aus jeder Messung.

Schließlich wird die Abklingzeit von 0 dB bis -10 dB versechsfacht als EDT (early decay time, 'frühe Abklingzeit') gemessen. Anders als T_{20} und T_{30} die oft nahe beieinander liegen, weicht EDT häufig von den übrigen 'Nachhallzeit-Typen' deutlich ab.

¹¹ Der Dodekaeder (Zwölfflüchler) ist ein regelmäßiger Körper, dessen Oberfläche aus 12 gleichen gleichseitigen Fünfecken zusammengesetzt ist. In jedes der Fünfecke eines Dodekaeders ist ein Lautsprecher eingesetzt.

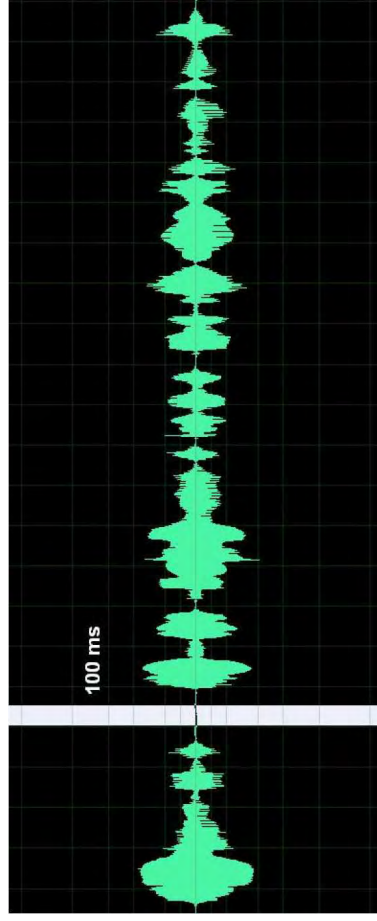
¹² In technischem Englisch wird dies mit dem 'signal-to-noise ratio', kurz SNR bezeichnet. Für die Messung von T_{60} muß gelten $SNR > 60$ dB.

3.3. Maße für Klarheit und Übertragungsqualität

Die Nachhallzeit ist eine statistische Beschreibung des Abklingens von Schallereignissen in einem Raum, also eine Eigenschaft des gesamten Raumes. Einzelne Messungen sind Stichproben und deren Ergebnisse streuen demgemäß um einen Mittelwert, der 'die Nachhallzeit' genannt wird.

Anders verhält es sich mit Maßen, die die Übertragungsqualität jeweils von einer Quelle (Sprecher, Musiker, Lautsprecher) an einem bestimmten Quell-Ort zu einem Empfänger (Hörer, Mikrofon) an einem bestimmten Empfangs-Ort beschreiben.

Diesen Maßen liegt die Tatsache zugrunde, daß Sprache und Musik zeitliche Strukturen der Lautstärke und des Frequenzspektrums enthalten, die mit wenig Verfälschung und gut erkennbar bei Hörern ankommen sollen.



Grafik 3.2 Oszillogramm von Sprache

Die Grafik zeigt ein Oszillogramm von etwa 4.5 Sekunden Sprache. Zur Zeit-Skalierung ist ein Abschnitt von 100 ms darin weiß eingefärbt. Es ist gut erkennbar, daß die Artikulations-Elemente, die die Sprache verständlich machen, sich in Zeitsegmenten von etwa 50 bis 200 ms Dauer abspielen.

Damit Sprache in einem Raum gut verständlich ist, sollen aufeinander folgende Artikulations-Elemente durch die Überlagerung der verschiedenen Übertragungswege vom Sprecher zum Hörer so wenig wie möglich miteinander vermischt werden.

Hier setzen die herkömmlichen Maße für die Klarheit der Übertragung von Sprache an, in denen Sprachsignal-Anteile, die innerhalb der ersten 50 ms ab dem Direktschall beim Hörer eintreffen, als positiv und alle späteren Anteile als negativ bewerten.

Die **Deutlichkeit** D_{50} ist definiert mit

$$D_{50} = W_{0..50 \text{ ms}} / W_{0..\infty \text{ ms}}$$

wobei $W_{0..50 \text{ ms}}$ die 'frühe' Schallenergie von 0 bis 50 ms und $W_{0..\infty \text{ ms}}$ die gesamte Schallenergie ist.

D_{50} hat keine Einheit und kann im Wertebereich 0..1 variieren, Je höher der Wert von D_{50} ist, umso deutlicher und besser verständlich wird Sprache übertragen.

Das **Deutlichkeitsmaß** C_{50} ist in der Aussage äquivalent zu D_{50} , jedoch ist die Skala logarithmisch und die Werte werden in der Einheit [dB] angegeben. Das 'Deutlichkeitsmaß' C_{50} ergibt sich aus:

$$C_{50} = 10 \log_{10} (W_{0..50 \text{ ms}} / W_{50..\infty \text{ ms}}) \text{ [dB]}$$

wobei $W_{0..50 \text{ ms}}$ die 'frühe' Schallenergie von 0 bis 50 ms und $W_{50..\infty \text{ ms}}$ die 'späte' Schallenergie nach 50 ms ist.

Der Wertebereich von C_{50} ist nicht beschränkt. Auch hier ist die Sprachübertragung bei hohen Werten von C_{50} deutlicher und besser. C_{50} und D_{50} hängen zusammen über:

$$C_{50} = 10 \log_{10} (D_{50} / (1 - D_{50})) \text{ [dB]}$$

Beispielhaft für eine sehr hohe Übertragungsqualität können in einem akustisch sehr guten Unterrichtsraum D_{50} -Werte ab rund 0.75 aufwärts und C_{50} -Werte von etwa +5 dB oder mehr gemessen werden.

Die Klarheit von Musikübertragungen kann beschrieben werden mit dem **Klarheitsmaß** C_{80} , das analog zu C_{50} definiert ist, jedoch mit der Grenze zwischen 'früher' und 'später' Schallenergie bei 80 ms.

$$C_{80} = 10 \log_{10} (W_{0..80 \text{ ms}} / W_{80..∞ \text{ ms}}) \text{ [dB]}$$

wobei $W_{0..80 \text{ ms}}$ die 'frühe' Schallenergie von 0 bis 80 ms und $W_{80..∞ \text{ ms}}$ die 'späte' Schallenergie nach 80 ms ist.

Auch hier bedeuten hohe Werte eine ausgeprägte Klarheit der Musik. Beispielsweise liegen die C_{80} -Werte im *Teatro alla Scala* in Milano deutlich über 0 dB, was der Textverständlichkeit in der Oper zugute kommen dürfte. Der *Große Musikvereinssaal* in Wien, der als erster klassischer Konzertsaal für sinfonische Musik aus Klassik und Romantik gilt, weist dagegen ebenso wie das *Concertgebouw* in Amsterdam C_{80} -Werte bis etwa -5 dB auf.¹³

Eine Gemeinsamkeit der Maße D_{50} , C_{50} und C_{80} ist die scharfe Zeitgrenze bei 50 oder 80 ms, bis zu der die Schallenergie-Beiträge positiv und ab der die Beiträge negativ gezählt werden. Dies kann zu Artefakten in Messungen führen, die nicht der menschlichen Wahrnehmung entsprechen. Verschiebt sich beispielsweise bei kleiner Veränderung eines Hörorts um einige Millimeter die Verzögerung eines reflektierten Schallanteils von 0.01 ms vor der Schwelle auf 0.01 ms nach der Schwelle, ergibt sich in diesen Maßen ein Sprung, dem keine wahrgenommene Veränderung des Hörereignisses entspricht.

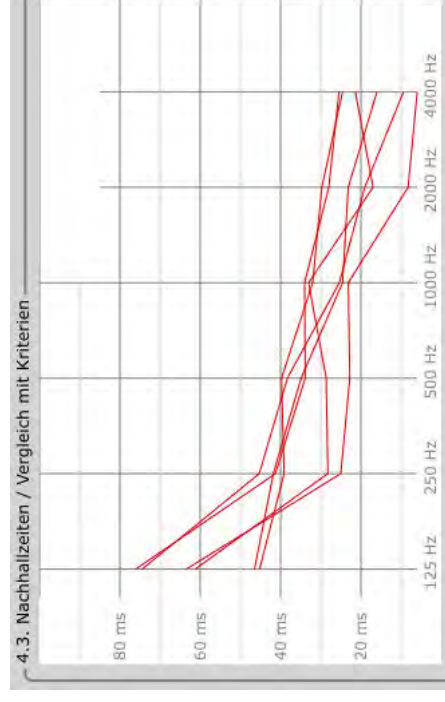
¹³ H. v. Karajan soll seinem Lob des Musikvereinssaals hinzugefügt haben, daß aufeinander folgende Töne gelegentlich miteinander verschmelzen. Diese Bemerkung deutet an, daß das bei Konzertsälen erwünschte 'Umhülltsein' mit Musik mit etwas verminderter Klarheit verbunden sein kann.

Bei ähnlicher Aussagekraft kann die **Schwerpunktzeit** T_s keine derartigen Artefakte erzeugen. Die Schwerpunktzeit beschreibt den Ver-satz des zeitlichen Schwerpunkts der gesamten eintreffenden Schallenergie bezogen auf den Direktschall.

$$T_s = \int_0^{\infty} t W'(t) dt / \int_0^{\infty} W'(t) dt$$

Anders als bei den vorherigen Maßen, bedeuten kleinere Werte der Schwerpunktzeit eine bessere Übertragungsqualität. Bei sehr guter Sprachübertragung liegen die Werte unterhalb etwa 50 ms.

Die Maße C_{80} , C_{50} , D_{50} und T_s werden ebenfalls in Oktavbändern gemessen. Grafik 3.3 zeigt beispielhaft Schwerpunktzeiten T_s für sechs verschiedene Übertragungswege in einem voll besetzten Grundschul-Unterrichtsraum mit sehr guten Sprach-Übertragungseigenschaften. Eine Mittelung über Meßwerte verschiedener Übertragungsstrecken ist hier nicht sinnvoll, da die Meßwerte sich jeweils auf eine Übertragungsstrecke beziehen und nicht auf den ganzen Raum.



Grafik 3.3 Schwerpunktzeiten verschiedener Übertragungsstrecken in einem Unterrichtsraum

3.4. Schallabsorber-Daten und Planung

Den Berechnungen der Wirkung zusätzlicher Absorber auf der Programm-Seite '5. Berechnen' liegt die Sabine'sche Formel zugrunde, die in ihrer einfachen Form lautet:

$$T_{\text{sab}} = 0.163 V / A$$

wobei V das Raumvolumen

$$\text{und } A = \sum S_i \alpha_i$$

die äquivalente Schallabsorptionsfläche sind

Jeder Flächen-Anteil (i) von A wird dabei mit zwei Werten beschrieben, der geometrischen Fläche S_i und dem Schallabsorptionsgrad α_i mit dem Wertebereich (0 .. 1).

Schallabsorptionsgrade sind für viele Oberflächen-Typen bekannt und tabelliert. Schallabsorptionsgrade werden meist gemessen, indem Proben eines Schallabsorbers als 'zusätzliche Absorber' in einen Hallraum¹⁴ eingebracht werden. Aus der dadurch bewirkten Veränderung der Nachhallzeiten werden Schallabsorptionsgrade berechnet.

Die Messungen erfolgen oft in 'Terzbändern' (engl. 'third octave', also drei Frequenzbänder pro Oktave). Die Werte für Oktavbänder werden dann durch Mittelung über je drei Terzbänder gebildet. Bei den häufig anzutreffenden 'praktischen Schallabsorptionsgraden' α_P nach ISO 11654 wurden die Oktavwerte anschließend in Stufen von 0.05 gerundet und etwaige Werte über 1.0 auf 1.0 reduziert. Warum überhaupt Werte über 1.0 auftreten können, wird im Folgenden erläutert.

¹⁴ Ein Hallraum ist ein Raum mit besonders schallharten Oberflächen, in dem durch schiefwinklige Geometrie und / oder Diffusoren für ein sehr diffuses Schallfeld und für geringen Einfluß von Eigenschwingungen (Raumresonanzen) gesorgt wird.

Interpretation von Schallabsorptionsgraden

Die Definition des Schallabsorptionsgrades geht implizit von einer unendlich ausgedehnten ebenen Absorber-Oberfläche aus. In der Realität ist dies jedoch nur näherungsweise erfüllt, wenn die Abmessungen eines Absorbers sehr groß im Vergleich zur Wellenlänge des Schalls sind. Bei hohen Frequenzen ist dies häufiger der Fall. So liegen die Wellenlängen im 4 kHz-Oktavband beispielsweise im Bereich von 6 bis 12 cm. Hier 'passen' viele Wellenlängen in einen Absorber von mehreren Metern Abmessung. Bei tiefen Frequenzen sind die Verhältnisse ganz anders. So variieren im 125 Hz-Oktavband die Wellenlängen von knapp 2 m bis knapp 4 m und sind damit in der gleichen Größenordnung wie die Abmessungen vieler Absorber. In solchen Fällen macht sich bemerkbar, daß der Absorber ungefähr eine Viertel Wellenlänge weit über seinen geometrischen Rand hinaus wirkt. Dies bedeutet, daß die wirksame Oberfläche eines Absorbers bei tiefen Frequenzen merklich größer wird als seine geometrische Oberfläche. Es bedeutet auch, daß die Wirkung eines länglichen Absorbers, beispielsweise 0.5 m x 8 m, größer sein kann als die Wirkung eines quadratischen Absorbers gleicher geometrischer Fläche und mit gleicher Menge Absorber-Material, im Beispiel 2 m x 2 m groß.

Diese Effekte werden jedoch bisher weder bei der Messung von Absorptionsgraden im Hallraum noch bei der Bemessung von Schallabsorbern in der Planung berücksichtigt. Praktisch hat das die Auswirkung, daß Schallabsorptionsgrade aus Hallraum-Messungen nur in den Fällen einigermaßen richtig die Absorptionswirkung beschreiben, in denen die Größe und Anordnung der Schallabsorber in der Anwendung und bei der Messung einander ähnlich sind. Da außer in den Meßprotokollen der Hallraum-Messungen die Meßanordnungen selten mit den Schallabsorptionsgraden dokumentiert sind, entsteht dadurch im Normalfall einer Raumakustischen Planung eine Unsicherheit, die kaum zu beziffern ist. Will man dem entgegen und ein bestimmte

raumakustische Qualität sicherstellen, dann ist dies nur mit einer Messung nach Fertigstellung und eventuellen nachträglichen Korrekturen möglich.

Kanteneffekte

Neben den Randeffekten von Absorbern kann ein weiterer Effekt in Räumen eine wichtige Rolle spielen. Bei der Reflexion den Umschließungsflächen überlagern sich einfallende und reflektierte Welle und bilden stehenden Wellen aus. Da bei Reflexion an einer schallharten Oberfläche die normale (senkrecht zur Oberfläche stehende) Komponente der 'Schall-Schnelle' (also der Bewegung der Luftteilchen) zwingend verschwinden muß, ergibt sich in der durch die Reflexion erzeugten stehenden Welle im Bereich um $\frac{1}{4}$ Wellenlänge Entfernung von der schallharten Oberfläche ein Maximum der Schallschnelle. Hier kann man mit Reibung in einem schalldurchlässigen porösen Material dem Schall besonders gut Energie entziehen, worauf das Konzept des 'porösen Absorbers' beruht.

In Raum-Kanten, wo zwei Flächen aufeinander treffen, entsteht um $\frac{1}{4}$ Wellenlänge Entfernung von beiden Flächen der Effekt in zwei Raum-Richtungen. Deshalb kann man dort bis zur doppelten Absorptionswirkung von Absorbermaterial in Kanten-Nähe erreichen. Die Empfindung, Absorber für tiefe Frequenzen in Kanten-Nähe anzubringen beruht hierauf ebenso wie das Konzept des 'Kanten-Absorbers' als besonders wirksamem Tiefen-Absorber. Der 'Kanten-Effekt' existiert zwar bei allen Frequenzen, jedoch sind bei hohen Frequenzen aufgrund der kleinen Wellenlängen die wirksamen Bereiche um die Raumkanten so klein, daß sie praktisch keine Rolle spielen.

Wenn die Absorptionswirkung von Kanten-Absorbern in Form flächenbezogener Schallabsorptionsgrade quantifiziert wird, können wiederum Schallabsorptionsgrade > 1 auftreten. Hinzu kommt die Unklarheit,

ob bei einem Kantenabsorber eine oder zwei Oberflächen-Seiten als Bezugsfläche dienen sollen.

Besser wäre es, alle Kanten- und Randeffekte von vorne herein in einer Längen-bezogenen 'äquivalenten Schallabsorptionsbreite' zu separieren und nicht in Flächen-bezogenen Schallabsorptionsgraden 'versteckt' unterzubringen. Bei einer solchen Handhabung wären Schallabsorptionsgrade > 1 obsolet und beliebige Geometrien von Schallabsorbern könnten korrekt berechnet werden.¹⁵

Vorgehensweise bei hoher Qualitäts-Anforderung

Allein aufgrund dieser Effekten, die in einer Planung kaum exakt berücksichtigt werden können, muß man mit Abweichungen zwischen vorherberechneten und nach der Realisierung gemessenen raumakustischen Eigenschaften rechnen. Das ist kein Argument gegen eine sorgfältige Planung, sondern es bedeutet, daß in Räumen mit hohen Anforderungen an die raumakustische Qualität unbedingt nach Fertigstellung eine meßtechnische Überprüfung notwendig ist und daß eventuell korrigiert werden muß. Um unnötigen Aufwand für die Korrekturen zu vermeiden, empfiehlt sich daher bei Gebäuden mit vielen gleichartigen Räumen, wie beispielsweise bei Unterrichtsräumen in Schulen, zunächst einen Raum fertigzustellen und zu vermessen, so daß eventuelle Korrekturen in allen übrigen Räumen ohne nachträgliche Änderungen gleich berücksichtigt werden können.

¹⁵ Die AkuCheck-Software kann 'äquivalente Schallabsorptionsbreiten' in Berechnungen nutzen, wenn in den Absorberdaten – beispielsweise bei Kantenabsorbern – die Dimension des Absorbers absdim=1 gesetzt wird.

Anhang

A.1. Didaktischer Kontext

Es gibt vielfältige Möglichkeiten, die Software in Lehrveranstaltungen zu integrieren. Dies hängt unter anderem von der Zielgruppe, den Vorkenntnissen der Lernenden, den Lernzielen, dem Umfang der Lehrveranstaltung und nicht zuletzt von den didaktischen Präferenzen der Lehrenden ab. Es ist kaum möglich alle diese Faktoren in einer Anleitung zu berücksichtigen. Deshalb wird an dieser Stelle lediglich skizziert, wie der Einsatz bei der didaktischen Erprobung im Fachbereich Architektur der Universität Wuppertal ablief.

Der Lehrplan für das Bachelor-Studium in Wuppertal sieht im Rahmen der Bauphysik für alle Akustik-Themen insgesamt knapp 20 Unterrichtsstunden vor, wobei als Höhepunkt und Motivations-förderndes Element auch eine halbtägige Exkursion mit fachkundiger Führung in einem Konzertsaal integriert ist. Ein zentrales Ziel der Lehre in Wuppertal ist es, die akustische Wahrnehmung mit der physikalischen Beschreibung und Berechnung zu verknüpfen, da dies eine unabdingbare Voraussetzung für eine sinnvolle akustische Planung ist. Die Integration der AkuCheck-Software erfolgt etwa so:

- Einführung in allgemeine Grundlagen der Akustik und des Hörens mit diversen Hörproben und Hörsaal-Experimenten
- Einführung in Grundlagen der Raumakustik mit Hörsaal-Experimenten und einer Analyse des Hörsaals; bei der Hörsaal-Analyse wird die AkuCheck-Software eingesetzt, auch im erweiterten Modus, z.B. für 'sinus-sweep' Messungen.

- Aufgabe an kleine Gruppen von 2-3 Studenten, jeweils einen Seminarraum mit Hilfe der AkuCheck-Software eigenständig zu analysieren. Die Studenten verwenden ihre eigenen Notebook-PCs und bekommen eine einfache Kombination aus Mikrofon und Audio-Interface gestellt. Die einzelnen Teilaufgaben sind:
 - a) den Raum zunächst im 'Ruhe-Zustand' anhören (gibt es Geräusche ?, welcher Art ?, welche Quellen ?, ..)
 - b) den Raum mit selbst erzeugten Geräuschen und Sprache auditiv erkunden
 - c) Nachhall-Messungen mit AkuCheck' und Impulsschallquellen
 - d) Umrechnen der Nachhallzeiten auf einen voll besetzten Zustand des Raums
 - e) Bewertung der Nachhallzeiten nach DIN 18041, Nutzungsart 'Unterricht'
 - f) Berechnen einer raumakustischen Verbesserung mit zusätzlichen Absorbern
 - g) Raumakustische gesamt-Einschätzung des Raums.

Die Studenten-Gruppen arbeiten eigenständig, können aber auftretende Fragen und Probleme mit den Dozenten klären. Für das Bearbeiten der Aufgabe bis zur Abgabe des Ergebnis-Protokolls werden zunächst 14 Tage Zeit gegeben, sowie ggf. einige zusätzliche Tage für etwaige Nachbesserungen.

- Anschließend weitere Akustik-Themen (Luftschallschutz, Körperschallschutz, Lärmschutz, ...)
- Exkursion zu einem Konzertsaal in der Region.

A.2. Eine kleine Mikrofondkunde

Das Mikrofon ist eine zentrale Komponente bei akustischen Messungen. Deshalb muß ihm hier besondere Beachtung geschenkt werden.

Um ein Mikrofon am Computer zu verwenden, ist außerdem ein Vorverstärker notwendig, denn Mikrofone liefern meist sehr geringe Ausgangsspannungen. Im Folgenden werden einige wichtige Mikrofontypen und Vorverstärker-Kategorien behandelt.

Mikrofon-Typen

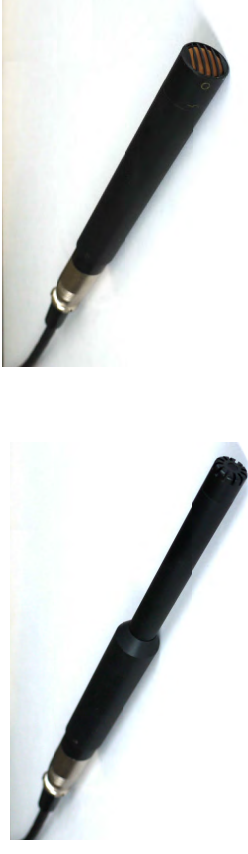
Beginnen wir mit dem Besten, was die Übertragungsqualität betrifft: Kondensatormikrofone. Seit Entwicklung der ersten Kondensatormikrofone (Georg Neumann, ca. 1930) kann Musik in hoher Qualität übertragen und aufgezeichnet werden. Heute werden Kondensatormikrofone als Meßmikrofone und als Studio-Kondensatormikrofone verwendet. Der in den 1960er Jahren entwickelte Typ des Elektret-Mikrofons vereinfacht das Prinzip des Kondensator-Mikrofons und ist inzwischen der am weitesten verbreitete Mikrofontyp. Dynamische Mikrofone spielen in der Bühnentechnik eine wichtige Rolle, da sie sich besonders robust bei zugleich recht guter Übertragungsqualität herstellen lassen.

Meßmikrofone

Typisches Kennzeichen von Meßmikrofonen ist ein kleiner Durchmesser der Mikrofonkapsel und ein entsprechend schlankes Mikrofont Gehäuse, das sich zum Anschluß hin erweitert. Damit wird erreicht, daß das Mikrofon das Schallfeld nur wenig verändert und daß die Richtcharakteristik bei allen Frequenzen des Hörbereichs nahezu kugelförmig ist.

Ihrem Name entsprechend sind Meßmikrofone die erste Wahl, wenn es um akustische Messungen geht. Allerdings sind raumakustische

Messungen auch mit anderen Mikrofontypen möglich, wobei es aber Einschränkungen in der Meßqualität geben kann.

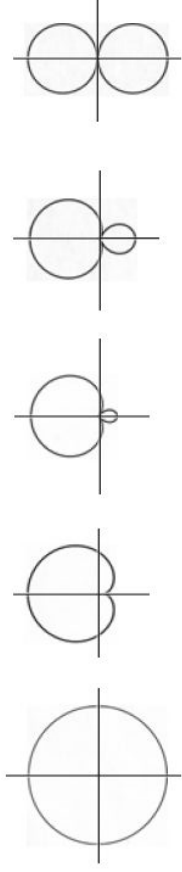


Grafik A.1 Ein Meßmikrofon (links) und eine Studio-Kondensatormikrofon mit Kugel-Charakteristik (rechts).

Studio-Kondensatormikrofone

Studio-Kondensatormikrofone sind in der Übertragungsqualität vergleichbar mit Meßmikrofonen, jedoch in den Bauformen und Eigenschaften auf die hochwertige Übertragung von Musik und Sprache ausgelegt. Es gibt zwei Unterscheidungsmerkmale, nach denen Studio-Mikrofone kategorisiert werden: Richtcharakteristik und Membrangröße.

Anders als bei Meßmikrofonen, wo meist eine kugelförmige Richtcharakteristik erwünscht ist, sollen Studio-Mikrofone häufig auf eine Schallquelle ausgerichtet sein, von dort den Schall besonders gut aufnehmen und für Schall aus anderen Richtungen weniger empfindlich sein. Zu diesem Zweck sind Richtcharakteristiken wie 'Niere' und 'Superniere' entwickelt. Eine besondere Richtcharakteristik ist die 'Acht', die von vorne und hinten gleich empfindlich und von der Seite völlig unempfindlich ist. Es gibt auch Mikrofone, deren Richtcharakteristik von 'Kugel' über 'Niere' bis 'Acht' in Stufen oder kontinuierlich einstellbar ist.



Grafik A.2 Richtcharakteristiken von Mikrofonen (oben entspricht vorne, v.l.n.r. Kugel, Niere, Superniere, Hypernieren, Acht).

Kondensator-Mikrofone mit großer Membran ($\varnothing > 25 \text{ mm}$) eignen sich bevorzugt für die Aufnahme von Stimmen oder einzelner Instrumente. Deren Richtcharakteristik ist häufig stärker Frequenz-abhängig als bei Mikrofonen mit kleiner Membran (\varnothing typisch 10-15 mm). Kleinmembran-Kondensatormikrofone mit Kugel-Charakteristik weisen oft einen sehr gleichmäßigen Frequenzverlauf der Übertragungseigenschaften auf. .

Mit Einschränkungen können alle Studiomikrofone für raumakustische Messungen verwendet werden. Bei stark gerichteten Mikrofonen, besonders bei 'Acht'-Charakteristik ist jedoch Vorsicht geboten. Am besten für Raumakustik-Messungen geeignet und für diesen Zweck nahezu gleichwertig zu Meßmikrofonen sind Kleinmembran-Kondensatormikrofone mit Kugel-Charakteristik.¹⁶

Elektret-Mikrofone

Da Elektret-Mikrofonkapseln zu niedrigen Kosten und in kleiner Bauform hergestellt werden können, sind sie in vielerlei Geräten eingebaut wie Mobiltelefone und Headsets, Computer, mobile Recorder und einfache Konsumenten-Mikrofone. Hochwertige Elektret-Mikro-

¹⁶ Weitere Aspekte hochwertiger Mikrofone – auch aus der Perspektive des Entwicklers – werden in den 'Mikrofon-Aufsätzen' von Jörg Wuttke behandelt (erhältlich unter 'www.ingwu.de').

funkapseln werden auch in einigen (eher preisgünstigen) Meß- und Studiomikrofonen verwendet.

Für Raumakustik-Messungen sind Elektret-Mikrofonkapseln nach 'echten' Meßmikrofonen und Studio-Mikrofonen mit Kugel-Charakteristik die zweitbeste Wahl. Wenn die Übertragungs-Eigenschaften nicht künstlich verschlechtert wurden, werden die Frequenzen des Hörbereichs sehr gleichmäßig übertragen. Lediglich das Eigenrauschen ist bei kleinen Mikrofonkapseln höher, so daß Messen mit sehr leisen Signalen schwieriger wird.

Dynamische Mikrofone

Dynamische Mikrofone werden häufig auf der Bühne zur Abnahme von Instrumenten oder Stimmen verwendet. Dieser Mikrofontyp kann besonders robust und unempfindlich für Umwelt-Einflüsse hergestellt werden, was für den rauen Bühnenbetrieb ein großer Vorteil ist. Die Übertragungsqualität ist bei guten dynamischen Mikrofonen auch recht gut, erreicht aber nicht das Niveau guter Kondensatormikrofone.

Dynamische Mikrofone können auch für Raumakustik-Messungen verwendet werden. Wie bei Kondensator-Mikrofonen gilt auch hier: je weniger gerichtet, umso besser geeignet. Allerdings sind dynamische Mikrofone mit Kugel-Charakteristik äußerst selten. Die meisten dieser Mikrofone haben eine Nieren- oder Supernieren-Charakteristik.

Mikrofon-Vorverstärker

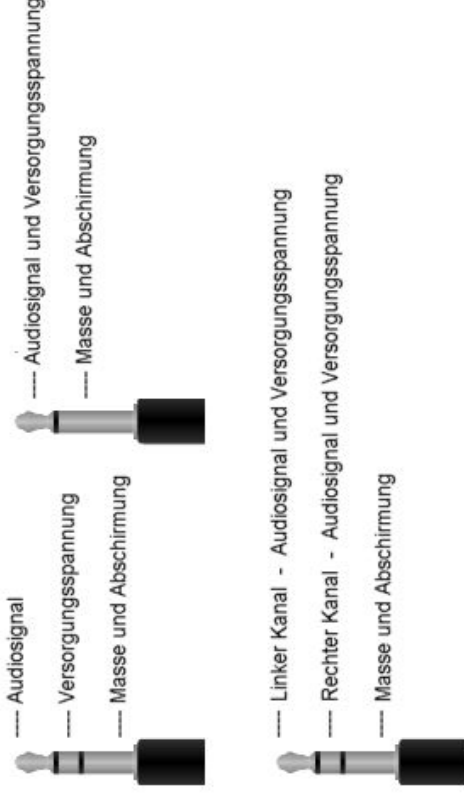
Zum Anschluß von Mikrofonen an Computer dienen in der Regel Kombinationen aus Mikrofon-Vorverstärker und Analog-Digital-Wandler, die 'Audio-Interface' oder 'Soundkarte' genannt werden. In die meisten PCs ist eine solche 'Soundkarte' integriert. Externe Audio-Interfaces können über USB, FireWire oder andere Schnittstellen angeschlossen werden.

Mikrofon-Anschluß bei Konsumenten-Geräten

Mikrofon-Vorverstärker müssen zum Mikrofon passen, es kann also nicht jedes Mikrofon an jedem Vorverstärker betrieben werden. Für einfache Elektretmikrofone muß der Vorverstärker eine Versorgungsspannung (ca. 5 V) liefern, es sei denn das Mikrofon ist Batteriebetrieben. Meist sind die Anschluß-Stecker der Mikrofone wie oben links in Grafik XX beschaltet und passen damit zu den Mikrofon-Eingängen vieler Audio-Interfaces und Soundkarten für Konsumenten.

Mikrofon-Anschluß bei professionellen Geräten

Professionelle Geräte für den Bühnen- und Studio-Einsatz sind mit einer ganz anderen Anschluß-Technik ausgeführt. Hier kommen überwiegend 'symmetrische' Leitungen zum Einsatz. Jedes Audio-Signal wird auf zwei Adern einer symmetrischen Leitung mit zueinander inverser Polarität übertragen. Die Masse- und Abschirmung sind hier an der Signal-Übertragung nicht beteiligt. Mit dieser Technik sind auch lange Leitungen bei geringer Störung durch äußere elektromagnetische Felder möglich.



Grafik A.3 Steckverbindungen für Elektretmikrofone. Einfache Elektretmikrofone sind häufig mit einem 3-poligen Klinkestecker versehen, in dem das Audiosignal und die Versorgungsspannung für das Mikrofon über separate Pole geführt werden (oben links). Diese Anschlußart paßt zu den meisten 'Konsumenten-' Audio-Interfaces und -Soundkarten. Bei Elektretmikrofonen mit 2-poligem Klinkestecker sind Audiosignal und Versorgungsspannung in einem Pol zusammengefaßt (oben rechts, genannt 'Tonaderspeisung'). Diese Mikrofone können an den 3-poligen Eingängen nur mit einem Adapter betrieben werden, in dem die Pole 'Audiosignal' und 'Versorgungsspannung' zusammengeführt werden. Bei Stereo-Mikrofonen liegen Audiosignal und Versorgungsspannung immer zusammen auf einem Pol (unten).

Professionelle Kondensator-Mikrofone benötigen in der Regel eine 'Phantomspannung', eine 48 V-Versorgung¹⁷ mit Pluspol auf beiden Signaladern und Minus auf der Masse. Dynamische Mikrofone benötigen keine Stromversorgung. Als Steckverbindung für professionelle Mikrofone dienen überwiegend robuste 3-polige XLR-Stecker. Die professionelle Anschlußtechnik ist weder elektrisch noch mechanisch kompatibel mit Konsumenten-Geräten. Für die Praxis bedeutet das, Mikrofon und Vorverstärker müssen zur gleichen 'Geräte-Familie' gehören: entweder beide 'professional' oder beide 'consumer'.



Grafik A.4 Beispiele für Audio-Interfaces, einfach und hochwertig. Links eine einfaches USB-Interface mit 'Consumer'-Anschluß für ca. 10 Euro. Rechts ein professionelles Audio-Interface höchster Qualität (oben Vorder-, unten Rückseite), das etwa das 100-fache kostet. (Bildquelle rechts: RME)

¹⁷ Einige Mikrofone können auch mit niedrigerer Spannung betrieben werden. Auskunft darüber geben die Datenblätter der Mikrofone.

A.3. Die Schallabsorber-Datenbank

Der Aufbau der Datenbank

Die Schallabsorber-Datenbank ist realisiert als ein Verzeichnisbaum mit separaten Dateien für jeden einzelnen Absorber. Der Verzeichnisbaum ist im Unterverzeichnis 'absdata' des Programmverzeichnis angeordnet.

Die Daten jedes einzelnen Absorbers sind in einer Textdatei mit der Dateierweiterung '.abs' enthalten. Der Dateiname erscheint im Browser der Datenbank und soll daher eine erste Information über die Art des Absorbers liefern. Grafiken oder Abbildungen zu den Absorbern sind, soweit vorhanden, in Bilddateien gleichen Namens vor dem '.' und mit der Dateierweiterung '.jpg' enthalten. Eine Datei 'DieserAbsorber.jpg' wird automatisch der Absorber-Datei 'DieserAbsorber.abs' zugeordnet.

Erweiterung der Datenbank

Aufgrund ihrer einfachen Struktur kann die Datenbank mit Hilfe eines einfachen Text-Editors und ggf. eines Bildbearbeitungs-Programms erweitert werden. In einem Editor können nach dem Muster auf der nachfolgenden Seite neue Absorber-Datensätze erstellt werden. Die Bilddateien sollten eine Größe von 300 x 300 Pixel² haben und im JPG-Format gespeichert werden. Neue Zweige des Datenbanksbaums können als Unterverzeichnisse angelegt werden.

Die Dateien in den Verzeichnissen 'basic', 'DIN' und 'Personen' sollten nicht verändert oder gelöscht werden, da diese bei jedem Programmstart wiederhergestellt werden. Es können aber auch dort neue Datensätze hinzugefügt werden.

Neu angelegte Teile der Datenbank werden nach einem Neustart der AkuCheck-Software nutzbar.

Das Datenformat für Absorber

```
** acm absdata
*
* Schallabsorber-Daten für die Software AkuCheck - Datei: Beispiel.abs
* Text-Datei, muß ANSI-codiert gespeichert werden (nicht UTF-8, ...)
* alle Einträge beginnen direkt hinter dem '=' und enden direkt vor dem ','
* Zeilen mit '*' als erstes Zeichen sind Kommentare, werden vom Programm ignoriert
*
* Format Version (nicht ändern !)
fmtrev=1.1;
*
* Dimension des Absorbers (flächig: 2, Personen,etc.: 0)
absdim=2;
*
* Bezeichnung des Absorbers, max. 50 Zeichen
name=Beispiel poröser Absorber 100 mm ;
*
* Beschreibung des Absorbers, Zeilen 1 und 2, je max. 55 Zeichen
description1=100 mm poröses Beispiel-Absorber-Material ;
description2=vor schallharter Fläche ;
*
* optionale Angabe zur Datenquelle, z.B. wo Messung publiziert, max. 55 Zeichen
datasource=Hallraum-Messung durch Schall&Rausch GmbH, Hallstadt;
*
* Hersteller des Absorbers, max. 55 Zeichen
manufacturer=Beispiel-Schallabsorber-Hersteller GmbH;
*
* Falls Schallabsorptionsgrade als alpha-P-Werte nach ISO 11654
  alphaP=1;
  anderenfalls ist alphaP=0;
*
* Schallabsorptionsgrade für Oktaven 125Hz bis 4kHz
  optional auch 63Hz, 8kHz (dann '*' entfernen)
  *abs00063oct=0.15;
  abs00125oct=0.35;
  abs00250oct=0.75;
  abs00500oct=0.90;
  abs01000oct=0.90;
  abs02000oct=0.90;
  abs04000oct=0.90;
  *abs08000oct=0.90;
*
** end
```

A.4. Betrachtungen zur Genauigkeit der Messungen

Für Nachhall-Messungen gibt es keine direkte absolute Referenz in Form eines Ur-Hallraums analog zum Ur-Meter (oder zu neueren Referenzen). Statt dessen gibt es festgelegte Meß-Algorithmen, insbesondere in ISO 3382. Wenn diese Algorithmen in einem Computer auf der Sample-Basis eines Meß-Signals abgearbeitet werden, werden Nachhallzeiten und andere Zeit-bezogene Maße implizit auf die Taktfrequenz der Digitalisierung zurückgeführt. Da diese Quarz-gestützten Takte in der Regel recht genau sind, ist von hier kein relevanter Fehler zu erwarten.

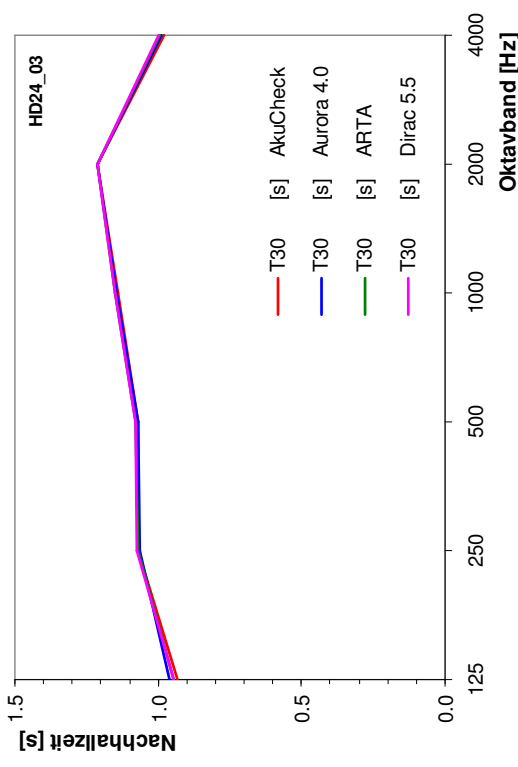
Algorithmen-Überprüfung

Bei jeder digitalen Signalverarbeitung müssen mögliche Softwarefehler in Betracht gezogen werden. Da diese in einer komplexen Software kaum durch Absuchen des Programmcodes zu entdecken sind, verbleiben zwei erfolgsversprechende Verfahren um eine fehlerhafte Umsetzung von Algorithmen in der Software festzustellen. Eine Überprüfung der Ergebnisse auf Plausibilität kann in kurzen Zeitabständen parallel zur Entwicklung erfolgen und eignet sich um grobe Fehler frühzeitig zu erkennen. Die eigentliche Prüfung der Genauigkeit erfolgt durch Vergleich mit bereits seit langem, von vielen Nutzern in vielen Messungen eingesetzten Meßsystemen, die man als gut ausgetestete Quasi-Standards ansehen kann. Das Risiko noch unentdeckter 'Rest-Fehler' wird nochmals kleiner, wenn mehr als ein solcher Quasi-Standard herangezogen wird.

Der Vergleich von Nachhallzeit-Algorithmen

Die Algorithmen der AkuCheck-Software wurden mit drei verbreiteten Software-Meßsystemen verglichen, deren Algorithmen ebenfalls auf ISO 3382 beruht.

Mit allen am Vergleich beteiligten Programmen wurden jeweils dieselben Impulsantworten ausgewertet und die Resultate verglichen. Der Vergleich zeigte zwischen den Nachhallzeit-Auswertungen aller vier beteiligten Programme geringfügige Abweichungen, also auch zwischen den Referenzen untereinander.



Grafik A.5 Ein Beispiel aus dem Nachhall-Algorithmen-Vergleich von AkuCheck mit drei etablierten Software-Meßsystemen.

Die Nachhallzeiten aller vier Programme stimmen generell innerhalb von 0.02 bis 0.05 s überein. Jedes der vier Programme zeigte allerdings vereinzelt individuelle Ausreißer bis maximal etwa 0.1 s. Die Übereinstimmung belegt eine offenbar weitgehend korrekte Umsetzung der Algorithmen aus ISO 3382, die Abweichungen sind vermutlich in den Freiheiten der Umsetzung, die ISO 3382 läßt, begründet. Dies ist aber nicht überprüfbar, denn die Details der Algorithmen-Umsetzungen sind nicht dokumentiert.

Weitere Algorithmen-Tests

Bei den Maßen für Klarheit und Übertragungsqualität, die das Verhältnis früher zu später Schallenergie beschreiben (T_s , C_{80} , C_{50} , D_{50}), wird nicht, wie bei den Nachhallzeiten, die Steilheit eines Abklingens ausgewertet, sondern die Schallenergie-Anteile werden mit einer Zeitabhängigen Bewertungsfunktion aufsummiert. Bei T_s ist die Bewertungsfunktion die Zeit selber, bei C_{80} , C_{50} und D_{50} ist es eine Sprungfunktion mit einem Sprung bei 80 ms bzw. 50 ms. Die Zeitskala für die Bewertungsfunktion hat ihren Nullpunkt im Direktsignal der Raumimpulsantwort.

Ein kritischer Punkt der Algorithmen ist, daß dieser Nullpunkt zwar im ungefilterten Signal als Peak mit steilem Anstieg gut detektierbar ist, hinter den Oktav-Filtern jedoch insbesondere bei tiefen Frequenzen nur noch sehr unscharf feststellbar ist. Andererseits erzeugen die Filter eine Signal-Verzögerung, die zu tiefen Frequenzen hin zunimmt. Eine praktikable Lösung dafür ist es, den Nullpunkt im ungefilterten Signal zu bestimmen und bei der Auswertung jedes Oktav-gefilterten Signals individuell um die Filter-Verzögerung zu verschieben.

In AkuCheck wurden mit Messungen der Oktav-Schwerpunktzeiten eines Impulses von 1 Sample Länge ohne angewendete Verzögerungskorrektur die Filter-Verzögerungen bestimmt. Anschließend wurden diese in den Programm-Code integriert. Eine Kontrollmessung ergab Rest-Abweichungen unter 2 ms in den tiefen Oktaven und weit unter 1 ms bei hohen Frequenzen.

Der Einfluß der Meß-Anregung

Die Messung mit Sinus-Sweep als Anregung und anschließender Faltung des empfangenen Signals mit einem inversen Sweep ist eine gute Annäherung an eine ideale Messung mit einem energiereichen

Dirac-Impuls. Die wirksame Anregung ist nur ein Sample lang (kürzer als 25 μ s). Die Messung ist bis auf Störeinflüsse exakt reproduzierbar. Impuls-Anregungen sind dagegen in der Regel nur grob reproduzierbar und der anregende Impuls ist immer etwas unscharf. Eine exakte Übereinstimmung wiederholter Messungen ist unter diesen Umständen nicht zu erwarten.



Grafik A.6 Fünf Wiederholungen der gleichen Messung mit Handschellen als Anregung zeigen beispielhaft die Reproduzierbarkeit.

Grafik A.6 zeigt in einem Beispiel, daß sich Impuls-angeregte Messungen mit einer Streubreite um die Mittelwerte von etwa 0.02 s bei hohen Frequenzen und etwa 0.03 s bei tiefen Frequenzen wiederholen lassen, mit einem Ausreißer bei 125 Hz. Damit ist bei Impulsanregung eine Reproduzierbarkeit erreichbar ist, die unterhalb der typischen Streubreite der Nachhallzeiten zwischen verschiedenen Meßpositionen im Raum liegt und somit keine dominierende Fehlerquelle wird. Voraussetzungen für diese Reproduzierbarkeit sind eine weitgehende Abwesenheit von Störgeräuschen im Raum und anregende Impulse, die in allen Oktaven genügend Energie enthalten.

A.5. System-Voraussetzungen und Installation

Die Software AkuCheck benötigt einen PC mit dem Betriebssystem Windows XP SP3 oder neuer. Der PC muß mit einer Soundkarte oder einem Audio-Interface mit Mikrofoneingang ausgestattet sein. Zum Messen wird ein für Raumakustik-Messungen geeignetes Mikrofon benötigt. Näheres zu Audio-Interfaces und zu Mikrofonen ist im Anhang A. 2 nachzulesen.

Das Installieren der Software AkuCheck erfolgt einfach, indem der Inhalt der Zip-Datei an den gewünschten Ort auf der Festplatte entpackt wird (z.B. in Windows 7 nach 'C:\Programme (x86)\Akustik\' oder in Windows XP nach 'C:\Programme\Akustik\' oder an einen anderen Ort der eigenen Wahl). Dabei muß die im ZIP enthaltene Unterverzeichnis-Struktur erhalten bleiben. Nun kann 'AkuCheck' gestartet werden. Zwecks Bequemlichkeit kann eine Verknüpfung im Startmenu oder auf dem Desktop erstellt werden.

Mit dieser Art der Installation ist AkuCheck *portabel*, d. h. es kann durch einfaches Kopieren auf einen anderen PC übertragen werden. Für die Installation sind auch keine Administrator-Rechte erforderlich. AkuCheck kann alternativ auf einen USB-Stick kopiert werden und von dort gestartet werden. Dabei muß beachtet werden, daß auf dem USB-Stick genügend freier Speicherplatz für die Raum-Impulsantworten bleibt, die AkuCheck bei jeder Meßreihe im Hintergrund schreibt. Für jede Meßreihe mit 10 Einzelmessungen werden etwa 6 MB benötigt (in ein GB passen also gut 150 Meßreihen).

Eine De-Installation erfolgt einfach durch Löschen des AkuCheck-Verzeichnisses und durch Entfernen etwaiger Verknüpfungen im Startmenu oder auf dem Desktop. Die Windows-Registry wird von AkuCheck nicht genutzt.

A.6. Literatur und Planungshilfen

Literatur zur Raumakustik (kleine Auswahl)

W. Fasold, E. Veres: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis; 2. Aufl., Berlin, 2003

W. Fasold, E. Sonntag, H. Winkler: Bau- und Raumakustik; Köln, 1987 (vergriffen, enthält viele Absorber-Daten)

H. Kuttruff: Room Acoustics; London 2006

L. Beranek: Concert Halls and Opera Houses; 2. Aufl., New York, 2004

Planungshilfen und Normen

ARTA: Audio- und Raumakustik-Meß-Software; www.artalabs.hr

Aurora: Raumakustik-Meß-Software; www.angelofarina.it

CATT-Acoustic: Software für raumakustische Simulation. www.catt.se

DIN 18041: Hörsamkeit in kleinen und mittelgroßen Räumen.

DIN EN ISO 3382: Messung von Parametern der Raumakustik.

DIN EN ISO 11654: Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden.

Dirac: Raumakustik-Meß-Software; www.acoustics-engineering.com

ODEON: Software für raumakustische Simulation. www.odeon.dk

PTB - Schallabsorber-Datenbank; unter www.ptb.de

Zorba Schallabsorber-Berechnungs-Software. www.rahe-kraft.de

A.7. Projekt-Information

Projekt-Team:

Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss, Bergische Universität Wuppertal, FB Architektur; Bauphysik und technische Gebäudeausrüstung (btga), www.btga.uni-wuppertal.de (Projekt-Koordination)

Dr. Detlef Hennings, freiberuflicher Wissenschaftler, Entwickler und Dozent, Köln, www.eclim.de (Idee und Konzeption, Software-Entwicklung, didaktische Tests)

Dipl.-Ing. Edwin Rotzal, Bergische Universität Wuppertal, FB Architektur; Bauphysik und technische Gebäudeausrüstung (btga), www.btga.uni-wuppertal.de (Referenz-Messungen, technische Tests)

Projekt-Berater:

Dipl.-Ing. Sebastian Goossens, Institut für Rundfunktechnik (IRT), D-80939 München, www.irt.de
Karlheinz Stegmaier, M.A., Akustikbüro Krämer & Stegmaier, D-10553 Berlin, www.akustik-berlin.de
Dipl.-Ing. Jörg Wuttke, Jörg Wuttke Consultancy, D-76327 Pfinztal, www.ingwu.de

Förderung:

Mit Mitteln der Forschungsinitiative 'Zukunft Bau' des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert unter
AZ: II-F20-11-1-037 / SWD-10.08.18.7-12.23 - www.forschungsinitiative-zukunft-bau.de

sowie unterstützt von:

Akustik & Raum, CH-4600 Olten, www.akustik-raum.ch

Caparol, D-64372 Ober-Ramstadt, www.caparol.de

Lignotrend, D-79809 Weilheim-Bannholz, www.lignotrend.com

OWAconsult, D-63916 Amorbach, www.owaconsult.com

A new tool for quick room acoustic assessment in architectural education

D. Hennings

Freelance scientist, developer and lecturer, eclim.de, Köln, Germany

K. Voss

Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, Germany

ABSTRACT: A newly developed software tool allows to measure reverberation times and other room acoustic parameters using not more than a notebook computer and a low cost microphone. The software is designed for education and it guides through the measurement process. Measured results can be evaluated by comparing to references. Room acoustic improvements can be pre-calculated using an internal sound absorber data base. First technical and didactic tests have been performed successfully.

1 INTRODUCTION

In numerous rooms for communication and for education it is audible, that the room acoustic quality is considerably below optimal conditions. Even in new buildings this situation is frequently found. The main reasons are assumed to be a lack in attention for room acoustic aspects in building planning and a lack in room acoustic education of architects.

This project primarily aims at an improvement of the room acoustic education of architects. Indirectly it may also help to improve the attention for room acoustics in the long term.

2 OBJECTIVES AND AIMS

2.1 *Didactic approach*

Like most other people students of architecture usually have never dealt with acoustics before and so they need to be introduced from the basics.

As architecture covers a wide range of topics, only a rather small number of lessons is scheduled for teaching room acoustics. In their details curricula differ between universities. As an example at Wuppertal University students of architecture have a total of 15 lessons covering all aspects of architectural acoustics during their basic (bachelor) studies. Approximately one third of these lessons is available for room acoustics.

In consequence of these facts the introduction to general acoustics and to room acoustics is kept short. Then the students are 'thrown' into practical work, but it is essential to link this work to acoustic basics and thus give the students a chance to understand what they are doing.

The newly developed software tool enables small student groups to analyze existing rooms and to investigate room acoustic improvements on their own. If necessary they may use assistance from the tutors.

2.2 *Software design goals*

The software tool shall turn the students' personal notebook computers with just an attached low cost (10..20 €) microphone into a measurement device. This enables the students to perform room acoustic measurements using their own equipment and to keep this option for their further work.

As the software is intended to be used by acoustically unexperienced persons, preferred properties are

- The software shall be easily usable after a short introduction.
- The software shall guide users through the measurement process.
- The software shall be robust against handling errors to some extent.

Although it is not intended to achieve reference quality measurements, accuracy is aimed to be adequate to evaluate rooms for communication or education.

3 SOFTWARE DEVELOPMENT

3.1 Development phases

The measurement software is developed in two phases. In a first phase basic features are implemented and a first software version is ready for tests at the end of this phase. In the second development phase advanced features are integrated into the software. Both phases are completed by technical and by didactic tests.

3.2 Basic features

3.2.1 Impulse excitation

Impulse excitation is a precondition for low cost measurements, as simple excitation sources can be used. Tests have shown that up to classroom size ($< 200 \text{ m}^3$) a strong handclap is sufficient as an impulse source, if the noise floor is low. Larger rooms require more powerful sources like bursting balloons or package bubbles. In very large rooms (e.g. concert halls) very loud sources like bangers or alarm pistols may be needed. Then using an ear protection is advisable.

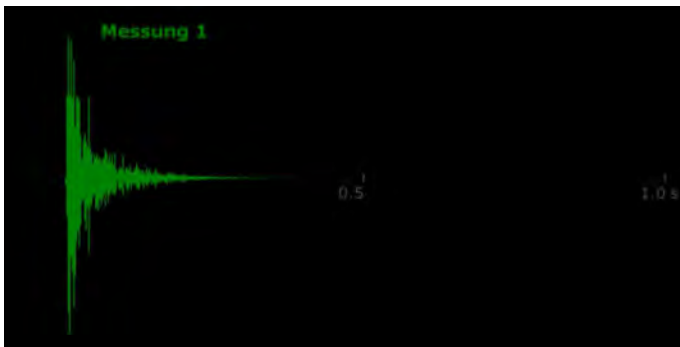


Figure 1. A room impulse response recorded using a handclap as impulse source (screenshot excerpt).

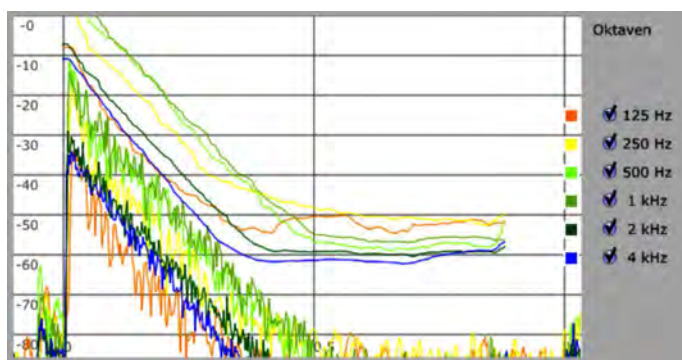


Figure 2. Octave band echograms and backward integrals from a handclap impulse measurement (screenshot excerpt).

3.2.2 Octave band reverberation times

Measured impulses are split into standard octave bands and reverberation times are derived by backward integration according to ISO 3382. Evaluation is concentrated to the six octave bands from 125 Hz to 4 kHz, where sound absorption data are available for most surfaces and numerical planning can easily be done.

3.2.3 Averaging of multiple measurements

As the reverberation time is a statistic measure, individual measurements may vary with source and receiver positions. Thus the software allows to average results from multiple measurements taken at different positions to reduce errors. A spread is shown for each individual measurement indicating its quality mostly resulting from the signal-to-noise ratio. If a single measurement appears as outlier in its spread or its values, it can be excluded from averaging.

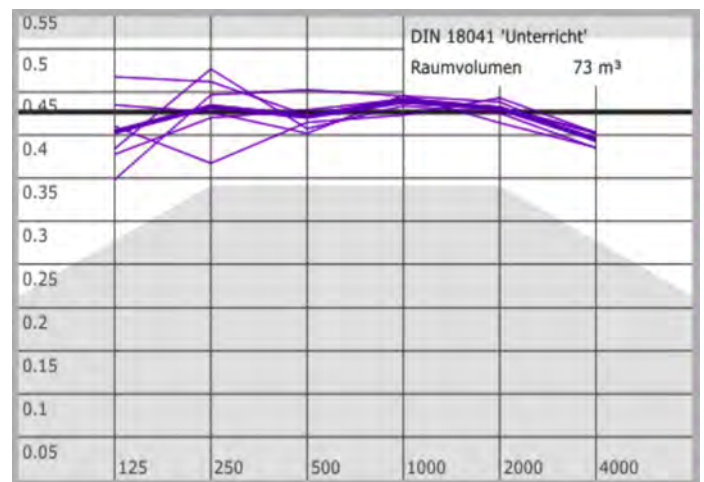


Figure 3. Octave reverberation times from six individual measurements, their averages and DIN 18041 recommended values for a small classroom as a comparison (screenshot excerpt).

3.2.4 Comparison to DIN recommendations

Averaged reverberation times can be compared to recommendations from room acoustic standards. Currently DIN 18041 recommendations are implemented. Other standards can be added in future.

3.2.5 Graphic and text output

In addition to the graphic display (as shown in excerpts in figs. 1-3) numerical results can be summarized to an internal text editor and can be exported for further use.

3.3 Advanced features

In the second development phase advanced features are integrated into the software:

3.3.1 Sine sweep excitation

Alternatively to impulses a logarithmic sine sweep can be generated and played as an acceleration signal. Internally a corresponding inverse sweep is convolved with the received signal to calculate the room response impulse. Using this method a high signal-to-noise ratio can be achieved and measurements can still be performed when moderate background noise is present.

3.3.2 Different reverberation time types

In contrast to the basic feature, where only unspecified reverberation times (internally derived from T_{20} and T_{30}) are displayed for simplicity, different 'reverberation time types' (EDT, T_{20} , T_{30}) can be compared as an advanced feature.

3.3.3 Early-late energy measures

Whereas reverberation time is a statistic measure for a whole room, early-late energy measures (T_S , C_{80} , C_{50}/D_{50}) allow to evaluate and to compare the transmission quality of individual sound paths.

3.3.4 Effect of persons calculation

In most cases reverberation measurements are taken with only a few persons in the room. Corresponding reverberation times for the partial or fully occupied room can be calculated using absorption area data of persons.

3.3.5 Additional absorber effects calculation

Expectable reverberation times after optional room acoustic improvements can be calculated using absorption data from different sound absorber types.

3.3.6 Design mode calculations

After the types of additional absorbers have been selected the absorber's surface area can be varied continuously and the calculated effect on reverberation times can be observed in real time.

3.3.7 Integrated sound absorber data base

For the calculations a sound absorber database is integrated with the software. The database comes with a basic selection of absorbers and can be extended by the users.

3.4 User levels

Corresponding to the basic and advanced software features, two different user levels can be selected for operation.

3.4.1 Standard user level

The standard user level is intended for beginning users and for simple and quick measurements. In this level only the basic measuring features are 'visible' to the users. Reverberation times can be measured and can be compared to DIN recommendations.

3.4.2 Advanced user level

At advanced level, dedicated to experienced users, all measuring features are accessible. Measurements can be done with either impulse or sine sweep acceleration. Measured parameters include T_{30} , T_{20} and EDT reverberation times as well as early-late energy measures (T_S , C_{80} , C/D_{50}).

3.4.3 Both level features

In both user levels several measurements can be averaged and are compared to selectable standard recommendations. Measured reverberation times can be used as starting point to calculate the effects of additional absorbers or persons inside the room. In a 'design mode' absorber sizes can be varied continuously while effects are shown graphically in real time.

An absorber database is included for the calculations and can be extended by the users.

4 TESTING AND EVALUATION

An initial version of the software is functional since end of 2012 and has undergone first technical and didactic tests. Further testing is performed after each development phase.

4.1 Technical testing

Basic technical testing is performed continuously during development in order to avoid software errors. Beyond this three technical aspects are subject to specific tests:

4.1.1 Algorithm comparisons

Impulse responses from a variety of rooms are analyzed in parallel by the new software and several established scientific and commercial software applications as references. Preliminary tests have shown that results from the new software vary in a similar range as the established software applications among each other (Fig. 4).

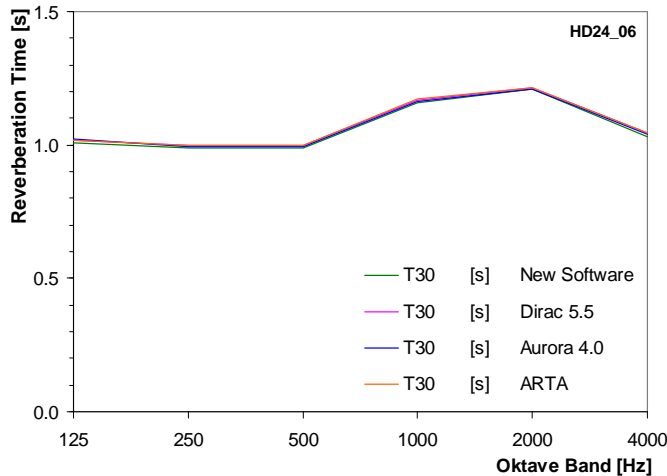


Figure 4. An example result from first algorithm comparisons. The new software was compared to three other software tools using previously recorded impulse responses of an auditorium. Included tools are ‘DIRAC’ (Acoustic Engineering: DIRAC), ‘AURORA’ (A. Farina: AURORA) and ‘ARTA’ (I. Mateljan: ARTA). Except from a few outliers up to 0.1 s all of the four software applications have agreed within 0.02 .. 0.05 s.

4.1.2 Acceleration method tests

Usually impulse accelerations are not exactly reproducible in their detail characteristics. Mostly the directional characteristics of the source is unknown and also the spectrum changes from one impulse to another. In addition common impulses are significantly longer than an ideal one sample impulse, the best possible approximation of a Dirac impulse in a digital system.

In these tests different types of impulse accelerated measurements will be compared to reproducible measurements using sine sweep acceleration radiated from a dodecagon speaker. The tests will be started as soon as the advanced features of the new software are functional.

4.1.3 Hardware compatibility tests

The new software is intended to be compatible with almost any audio hardware. Nevertheless a few limitations have been identified:

- In some computers the microphone signal path includes some signal processing to improve speech quality for voice over IP applications. Any kind of signal processing that affects the time or dynamic structure of the audio signal must be switched off for measurements.

- Some microphones or microphone inputs cut off low frequencies. For measurements covering the octave bands from 125 Hz to 4 kHz the spectral response of the audio path including the microphone should be reasonably flat from about 80 Hz to 6 kHz.
- Some low cost microphones or microphone pre-amplifiers are not well shielded against electromagnetic interference, resulting in an avoidable low signal-to-noise ratio.
- During first tests with students it was found that one of about twenty notebook computers could not be used due to incompatibility.

4.2 Didactic testing

In didactic tests the software in its current version is integrated into the students’ practical seminar work. Tutors observe how the students proceed using the software in order to identify opportunities for improvement.

Didactic test phases are performed with both the basic and the advanced software versions.

During the first didactic test phase at Wuppertal University a students excursion to a famous concert hall in a neighbouring city took place and a few sample measurements were made using the current software version (Fig. 5).

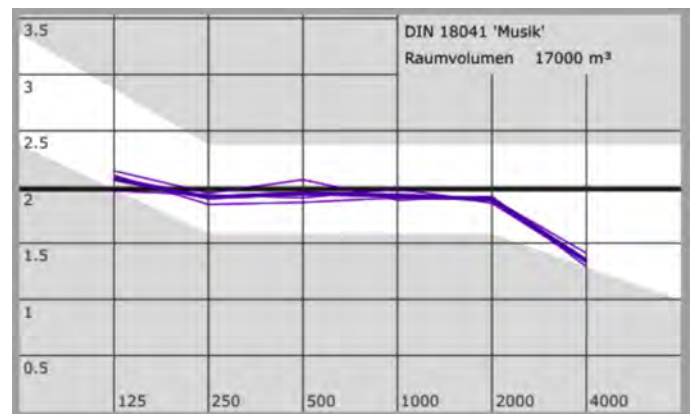


Figure 5. Reverberation times from (non representative) sample measurements inside a concert hall. For comparison the DIN 18041 recommendation for music rooms is shown (screenshot excerpt).

4.3 Learning from test results

The test phases are integral part of the development process. Test results are used for further improvement.

As an example from the first didactic test series it was learnt that a real time octave spectrum analyzer is helpful by making acceleration impulse and background noise spectra visible to the users before they start their measurements.

5 AVAILABILITY AND DISTRIBUTION

5.1 'Beta' versions availability

In spring 2013 the basic features are completed and the second development phase is starting. For test and evaluation 'beta' versions are available on request from the developer (www.eclim.de) or from Wuppertal University (www.btga.uni-wuppertal.de).

5.2 Distribution of the final version

Starting mid of 2014 the final software will be distributed free of charge to students and lecturers. The license will be restricted to non-commercial use.

Distribution will be organized via the German building physics education network 'Lernnetz Bauphysik' (www.lernnetz-bauphysik.de), and it will be open for other distribution channels.

6 FURTHER DEVELOPMENT

The current software version is developed for application under the MS Windows operating system. The user interface is labeled in German language.

Future development plans beyond this project include extensions to other software platforms (Mac OS and tablet computers) and multiple user interface languages.

7 ACKNOWLEDGEMENTS

This work is funded by the German Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development via the 'Forschungsinitiative Zukunft Bau', (contract AZ II-F20-11-1-037 / SWD-10.08.18.7-12.23) and supported by the industrial partners: Akustik & Raum, Caparol, Lignotrend and OWAconsult. The authors wish to thank the members of the advisory board for their assistance.

REFERENCES

- Acoustic Engineering, *DIRAC, software for acoustic measurements*. Distributed by Brüel & Kjær, Nærum, Denmark.
- DIN 18041, 2004-05, '*Hörsamkeit in kleinen und mittelgroßen Räumen*', German standard on room acoustics.
- Farina, A., *AURORA, software for acoustic measurements*. Univ. of Parma, Italy, www.aurora-plugins.com.
- ISO 3382, '*Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*', International standard.
- Mateljan, I., *ARTA, software for acoustic measurements*. ARTALABS, Kastel Luksic, Croatia, www.artalabs.hr.

Ein neues Raumakustik-Meßwerkzeug für die Architekten-Ausbildung

Detlef Hennings¹, Karsten Voss²

¹ freiberuflicher Wissenschaftler und Dozent, eclim.de, Köln, E-Mail: d.hennings@eclim.de

² Bergische Universität Wuppertal, FB Architektur, btga, E-Mail: kvoss@uni-wuppertal.de

Einleitung

Der Zeitrahmen für das Thema Raumakustik in der Architekturausbildung ist knapp. Um dennoch ein vertieftes Verständnis zu erreichen, sollen die Studenten nach einer Einführung selber raumakustische Analysen anfertigen. Diesem Zweck dient eine neue Software, die die Studenten-Notebookcomputer zusammen mit einem einfachen Mikrofon in Meßwerkzeuge für Raumakustik verwandelt.

Entwicklungsziele

Der didaktische Ansatz

Die Studenten erhalten zunächst eine Einführung in Grundlagen der Akustik und der Raumakustik, in der auch mit Experimenten Zusammenhänge zwischen Physik und Sinneswahrnehmung verdeutlicht werden. Anschließend werden in kleinen angeleiteten Gruppen vorhandene Räume sowohl nach vorgegebenen Kriterien angehört, meßtechnisch analysiert und nach raumakustischer Qualität bewertet.

Ziele der Software-Entwicklung

Die neue Software soll als Meßwerkzeug für die Studenten geeignet sein, deren eigene Computer zusammen mit einem kostengünstigen Mikrofon eingesetzt werden. Da keine Erfahrung mit akustischen Messungen vorausgesetzt werden kann, soll die Software einfach handhabbar sein und durch den Meßprozeß führen. Die Meßgenauigkeit soll ausreichend sein um die akustische Qualität von Räumen für Kommunikation und Unterricht einzuschätzen.

Die Software-Implementierung

Nutzer-Modi und Entwicklungsphasen

Mit einem 'Einsteiger-Modus' und einem 'Fortgeschrittenen-Modus' kann die Software auf einfachere Weise mit reduziertem Basis-Funktionsumfang oder mit vollem Funktionsumfang genutzt werden. Analog zu den Nutzer-Modi wird die Software in zwei Phasen entwickelt und getestet.

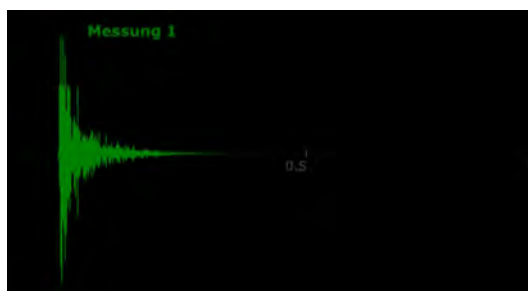


Abbildung 1: Eine mittels kräftigem Händeklatschen erzeugte Raum-Impulsantwort (Bildschirm-Ausschnitt).

Basis-Eigenschaften

Impulsanregung ist eine Voraussetzung für 'low cost' Messungen mit geringem technischen Aufwand. Tests haben ergeben, daß bis etwa 200 m³ (großer Klassenraum) ein kräftiges Händeklatschen als Meßsignal nutzbar ist, vorausgesetzt der Störgeräuschpegel ist niedrig. Größere Räume erfordern entsprechend lautere Schallquellen.

Aus gemessenen Raumimpulsantworten werden analog ISO 3382 Nachhallzeiten für die Standard-Oktavbänder von 125 Hz bis 4 kHz abgeleitet (Abb. 2).

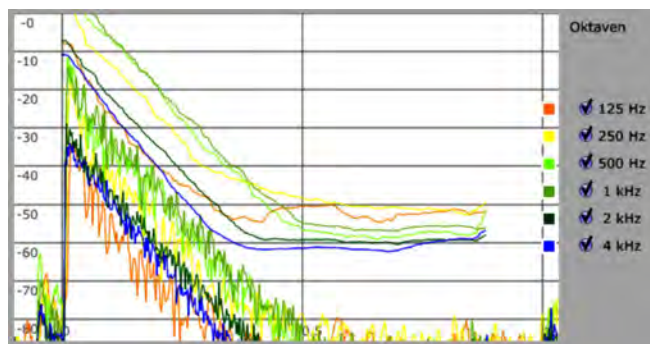


Abbildung 1: Oktavband-Echogramme und Rückwärts-Integrale, aus einer mit Händeklatschen erzeugten Raum-Impulsantwort (Bildschirm-Ausschnitt).

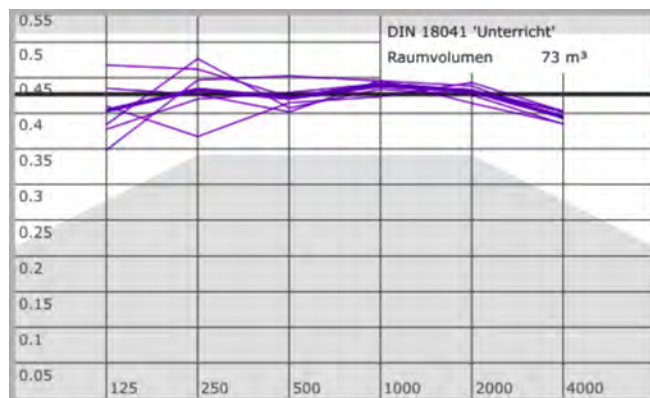


Abbildung 3: Oktavband-Nachhallzeiten aus sechs Einzelmessungen, die Mittelwerte sowie zum Vergleich die DIN-Empfehlung für einen kleinen Unterrichtsraum im Hintergrund (Bildschirm-Ausschnitt).

Die Nachhallzeiten als statistische Raumeigenschaft wird durch Mittelung mehrerer Messungen mit verschiedenen Positionen von Schallquelle und Mikrofon ermittelt. Einzelmessungen, die sich als fehlerhaft oder als Ausreißer herausstellen, können ausgeschlossen werden. Als Qualitäts-Kriterium dienen die Empfehlungen der DIN 18041 (Abb. 3). Neben der grafischen Bildschirmdarstellung ist auch die numerische Ausgabe in eine Datei möglich.

Erweiterte Meß-Eigenschaften

Alternativ zu Impulsen können über Lautsprecher abgestrahlte **Sinus-Sweeps** als Meßsignal für reproduzierbare Messungen mit höherem Signal-Stör-Abstand genutzt werden. Auf unterschiedliche Weise bestimmte Nachhallzeiten, **T₃₀**, **T₂₀**, **EDT**, können ausgewählt und verglichen werden. Maße für Klarheit bzw. das Verhältnis früher zu später Energie in der Impulsantwort, **T_s**, **C80**, **C50/D50**, können bestimmt und dargestellt werden werden.

Umrechnung des Besetzungsgrades

Die meist mit nur wenigen Personen im Raum gemessenen Nachhallzeiten können mittels Personen-Absorptionsdaten auf voll oder teilweise besetzten Raum umgerechnet werden, so daß die Werte der vorwiegenden Nutzung entsprechen.

Berechnung raumakustischer Maßnahmen

Mit Hilfe einer integrierten und von den Nutzern erweiterbaren **Absorber-Datenbank** kann die Wirkung zusätzlicher Absorber im Raum zur raumakustischen Verbesserung berechnet werden. Eine **'Design-Funktion'** erlaubt dabei die Fläche der Absorber kontinuierlich zu verändern, wobei die Wirkung sofort grafisch angezeigt wird.

Tests und praktische Erprobung

Technische Tests

Elementare Funktionstests erfolgen parallel zur Entwicklung. Drei Aspekte werden zusätzlich in besonderen Testabschnitten untersucht:

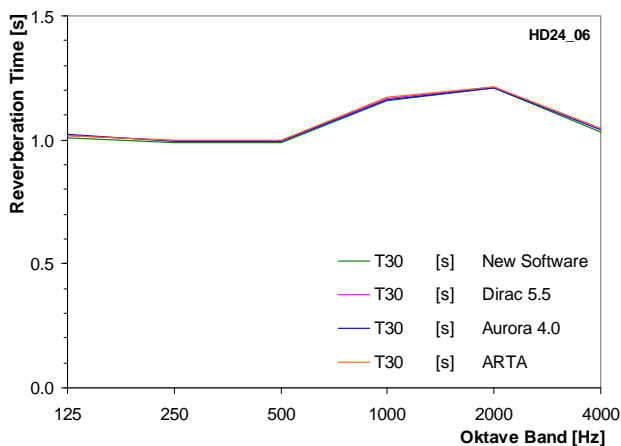


Abbildung 4: Ein Beispiel aus dem Algorithmen-Vergleich der neuen Software mit drei etablierten Software-Meßsystemen. Beim Auswerten derselben Raumimpulsantworten durch alle vier Programme ergaben sich meist Abweichungen im Bereich von 0.01 s bis 0.05 s, in wenigen Einzelfällen bis maximal 0.1 s. Beteiligt waren die Software-Pakete 'DIRAC' [1], 'AURORA' [3] und 'ARTA' [5].

Im **Algorithmen-Vergleich** werden Raum-Impulsantworten verschiedener Räume parallel von der neuen Software und von etablierten Referenzen ausgewertet. Die Ergebnisse aller beteiligten und algorithmisch auf ISO 3382 [4] beruhenden Programme unterscheiden sich nur geringfügig (Abb. 4).

Der **Vergleich zwischen Anregungs-Methoden** soll insbesondere zeigen, welche Streuung der Meßergebnisse bei

nicht genau reproduzierbarer Impuls-Anregung (beispielsweise mit Händeklatschen) im Vergleich zu reproduzierbarer Anregung mit einem Sinus-Sweep erwartet werden kann. Ergebnisse zu diesem Vergleich liegen noch nicht vor.

In **Hardware-Kompatibilitäts-Tests** haben sich einige kritische Punkte herausgestellt, beispielsweise nichtlineare Signalverarbeitung in manchen Notebook-Computern, Hochpaßfilter im Signalweg oder unzureichende Abschirmung einiger Mikrofone und Mikrofon-Interfaces.

Didaktische Tests

In den didaktischen Tests wird die Software in die laufende Lehre eingebunden um die Anwendbarkeit zu prüfen und um etwaigen Verbesserungs-Bedarf zu erkennen. In der ersten von zwei didaktischen Testphasen zeigte sich, daß die Architektur-Studenten nach einer kurzen Einführung in die Funktionsweise teils eigenständig, teils mit geringfügiger Unterstützung mit der Software arbeiten konnten.

Verfügbarkeit der neuen Software

Die Software wird ab dem Wintersemester 2014/15 für alle Lernenden und Lehrenden kostenfrei für nicht-kommerzielle Nutzung bereitgestellt. Die Verteilung soll über das 'Lernnetz Bauphysik' (www.lernnetz-bauphysik.de) erfolgen, und daneben für andere Verbreitungs-Kanäle offen sein.

Zukünftige Weiterentwicklung

Die aktuelle Software-Version ist nur unter dem Betriebssystem MS Windows lauffähig und mit deutschsprachiger Oberfläche ausgestattet. In einem Folgeprojekt soll die Software auf weitere Betriebssysteme für Notebook- und Tablet-Computer portiert werden und mit austauschbarer Sprache der Benutzer-Oberfläche versehen werden. Darüber hinaus sind funktionale Verbesserungen und Erweiterungen geplant.

Dank

Das Projekt wird vom Bundesbauministerium im Rahmen der 'Forschungsinitiative Zukunft Bau' unter AZ II-F20-11-1-037 / SWD-10.08.18.7-12.23 gefördert und wird von den Industriepartnern: Akustik & Raum, Caparol, Lignotrend und OWAconsult unterstützt. Den externen Beratern des Projekts sei hier ebenfalls für ihr Mitwirken gedankt.

Literatur

- [1] Acoustic Engineering: DIRAC, Raumakustik-Meßsoftware. Vertrieb: Brüel & Kjær, Nærum, Dänemark.
- [2] DIN 18041 (2004-05): 'Hörsamkeit in kleinen und mittelgroßen Räumen'.
- [3] Farina: A.: AURORA, Raumakustik-Meßsoftware., URL: <http://www.aurora-plugins.com>.
- [4] ISO 3382: 'Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters'.
- [5] Mateljan, I.: ARTA, Raumakustik-Meßsoftware. ARTALABS, URL: <http://www.artalabs.hr>.