

AcouCheck 2

**Raumakustik-Analyse mit
Notebook- und Tablet-PCs**

Benutzer-Anleitung

Juli 2017

Inhalt

1.	Einführung	3
2.	Anleitung für Einsteiger	4
2.1.	<i>Eine Meßreihe vorbereiten</i>	4
2.2.	<i>Messungen durchführen</i>	8
2.3.	<i>Messungen auswerten</i>	10
2.4.	<i>Meßergebnisse bewerten</i>	12
2.5.	<i>Modifikationen am Meßobjekt berechnen</i>	14
2.6.	<i>Ergebnisse dokumentieren</i>	17
2.7.	<i>Die Schallabsorber-Datenbank</i>	18
3.	Ergänzungen für fortgeschrittene Nutzer	19
3.1.	<i>Raumimpulsantworten mit 'Sinus-Sweep' messen</i>	19
3.2.	<i>Verschiedenartig gemessene Nachhallzeiten</i>	20
3.3.	<i>Maße für Klarheit und Übertragungsqualität</i>	21
3.4.	<i>Schallabsorber-Daten und Planung</i>	23
Anhang		26
A.1.	<i>Didaktischer Kontext</i>	26
A.2.	<i>Eine kleine Mikrofonkunde</i>	27
A.3.	<i>Die Schallabsorber-Datenbank</i>	30
A.4.	<i>Betrachtungen zur Genauigkeit der Messungen</i>	31
A.5.	<i>Literatur und Planungshilfen</i>	34
A.6.	<i>Dateisysteme und Speicher-Orte der Dateien</i>	35
A.7.	<i>Installation und erster Programmstart</i>	36
A.8.	<i>Lizenzierung, Copyright, Haftungsausschluß</i>	37
A.9.	<i>Projekt-Information</i>	38

1. Einführung

Die AcouCheck-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.

Auch können diese Software und Anleitung keine Fachplaner ersetzen, sondern Sie ermöglichen Nutzern mit einigen akustischen Grundkenntnissen eine raumakustische Einschätzung mit wenig Aufwand.

In allen Fällen, in denen es auf die raumakustische Qualität ankommt, sollte in jedem Fall fachplanerischer Rat eingeholt werden.

–

2. Anleitung für Einsteiger

Die Benutzer-Oberfläche der Software AcouCheck 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' mit der wichtigen Zusatz-Information '6 Personen im Raum'.



Meßobjekt beschreiben	
Objekt-Bezeichnung	Uni Wuppertal, Seminarraum HD22
Beschreibung des Objekts	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- oder Tablet-PC, mit dem die Messung durchgeführt werden soll. Auf diesem PC muß die AcouCheck-Software lauffähig sein. Das geht mit diesen Betriebssystemen:

- Windows ab Version XP (SP3)
- OS-X ab Version 10.6.
- iOS ab Version 7
- Android ab Version 4.03.

Näheres zur Installation und zum Betrieb mit den verschiedenen Betriebssystemen ist in Anhang A.7 zu finden.

ACHTUNG: Der PC muß über einen Mikrofon-Eingang mit angeschlossenem Mikrofon (extern oder intern) verfügen, anderenfalls ist AcouCheck nicht funktionsfähig.

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 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 Kugel-Charakteristik) und einem professionellen Audio-Interface. Der Anschluß des Mikrofons erfolgt hier über robuste XLR-Stecker. Die für professionelle Kondensator-Mikrofone nötige 'Phantomspannung' (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.

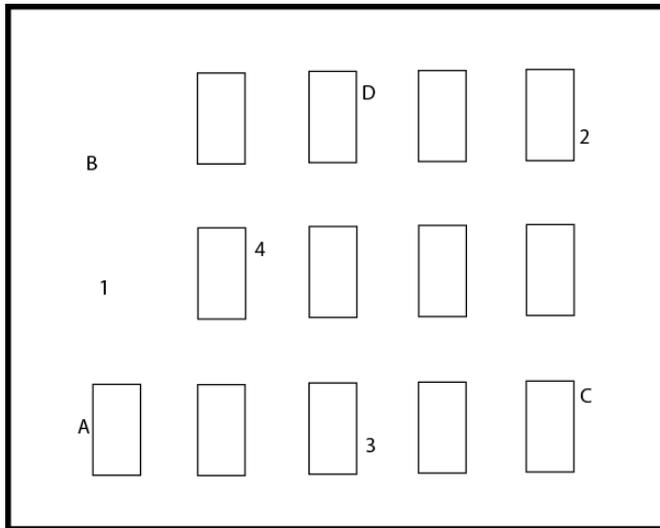
Gehörschutz

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 AcouCheck-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.



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 Seminarrums 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 Einzelmessung sollten Schallquelle und Mikrofon nicht zu nah beieinander 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).

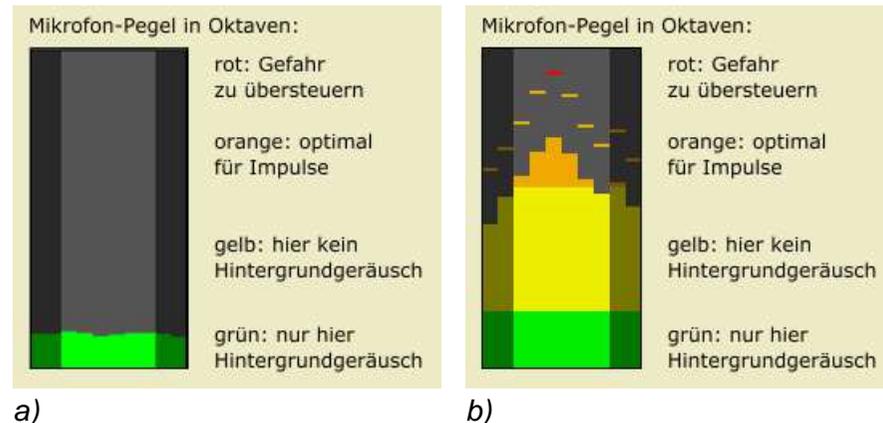
Den Audio-Eingang wählen

Nach dem Start¹ der AcouCheck-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 AcouCheck -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 gut ausgesteuerten Impuls, alle dünnen Spitzenwert-Markierungen erreichen den orangenen Bereich

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 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.

Bei Tablet-Computern mit den Betriebssystemen iOS und Android ist keine Einpegel-Möglichkeit für das Mikrofon vorgesehen. Statt dessen wird das Signal meist bei hohen Pegeln begrenzt, was eine dynamische Verfälschung des Signals bedeutet. Deshalb ist es empfehlenswert, bei diesen Geräten mit Probe-Messungen die dynamischen Eigenschaften zu erkunden³.

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

³ vgl. auch den Abschnitt 'Nichtlinearität und Zeit-Variabilität im Signalweg' in Anhang A 4.

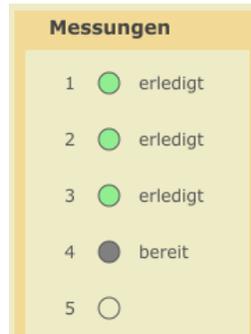
2.2. Messungen durchführen

Start einer Meßreihe

Die AcouCheck-Software erlaubt Meßreihen aus bis zu 12 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.



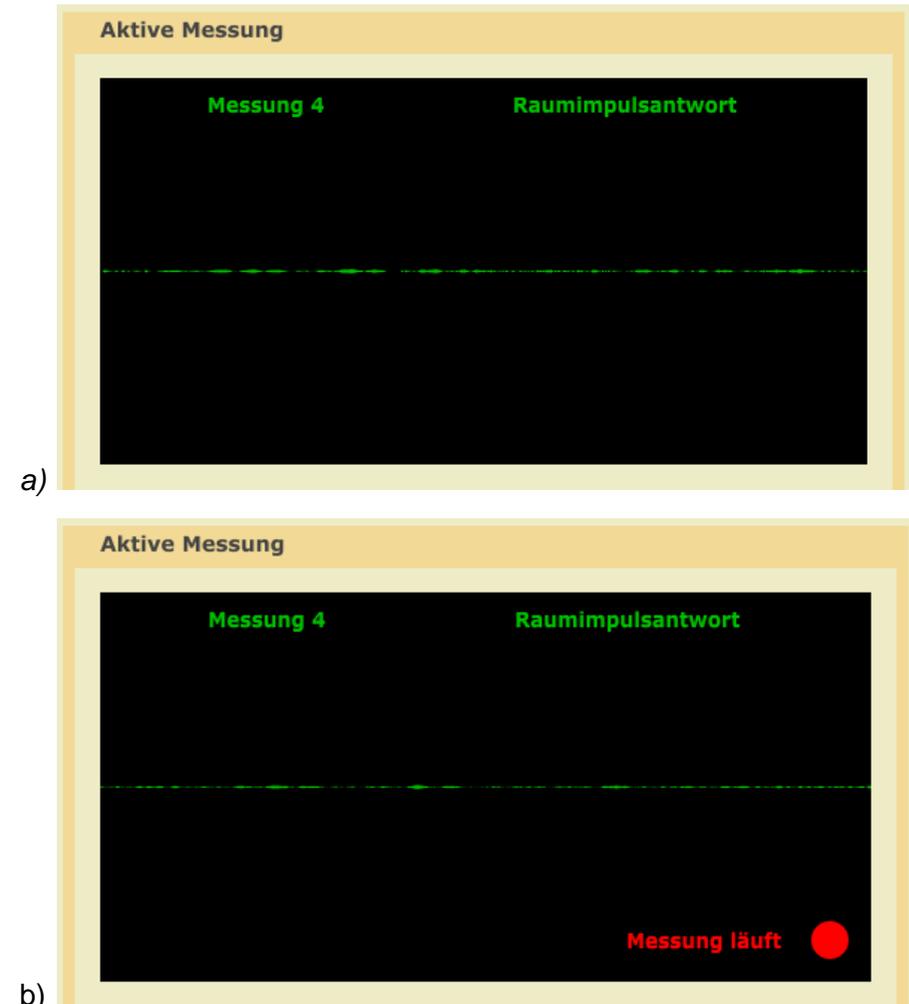
Grafik 2.4

Die aktive Messung

Im 'Oszillografen' der Software wird zunächst das ankommende Mikrophon-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.



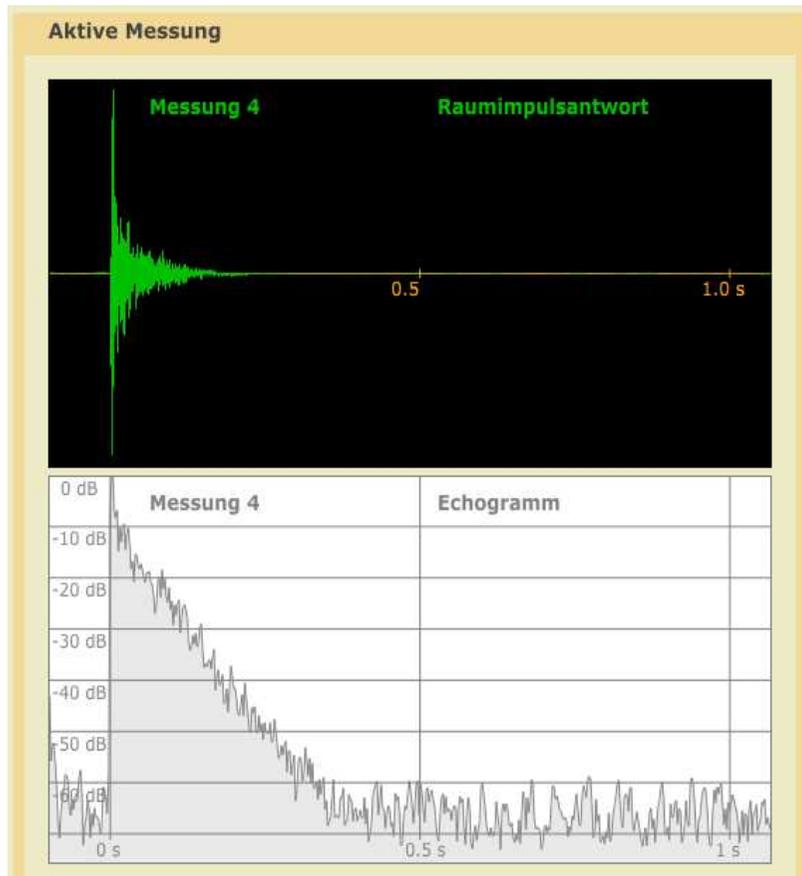
Grafik 2.5 Messung einer Raumimpulsantwort

a) vor Eintreffen des Impulses

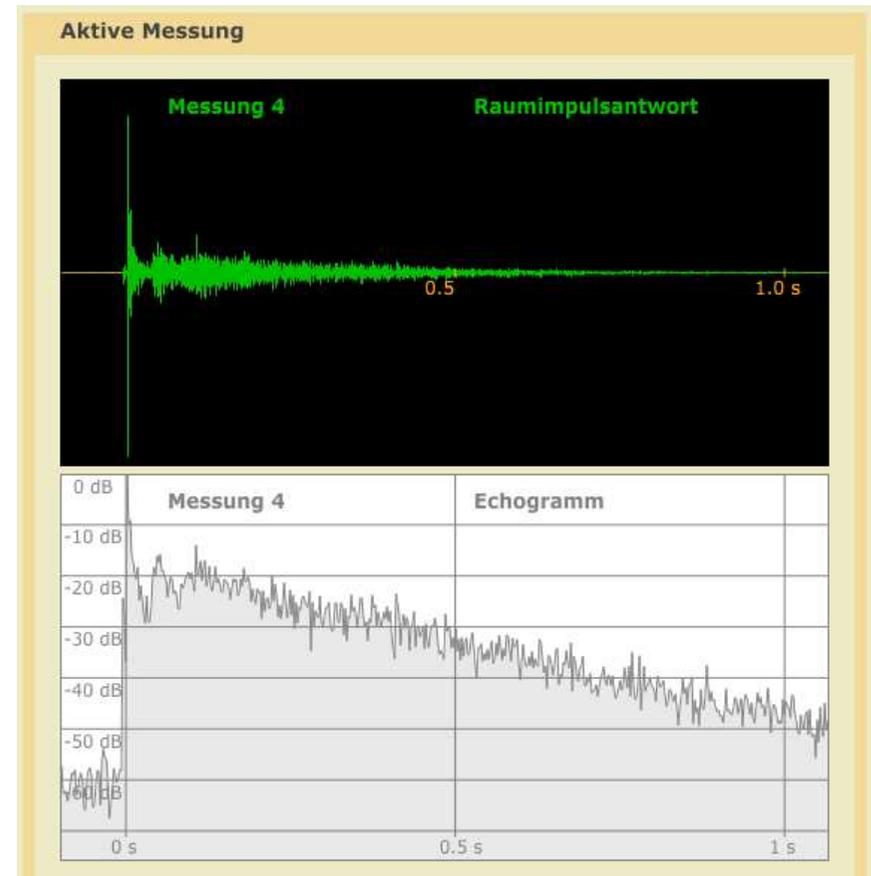
b) während der 5 Sekunden langen Aufzeichnung

Sobald ein hinreichend lauter Impuls eintrifft, wird automatisch der Aufnahme-Modus gestartet und durch einen roten Punkt angezeigt. 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 ausgewertet. Die Raumimpulsantwort wird im Hintergrund gespeichert (vgl. Anhang 6).

Nun kann entweder die nächste Messung gestartet werden oder die noch aktive Messung wiederholt werden, beispielsweise wenn während der Messung Störgeräusche auftraten, oder an den Oktav-Echogrammen auf Programm-Seite 3 'Auswertung' zu erkennen ist, daß der Meßvorgang mißlungen ist.



Grafik 2.6 Gemessene Raum-Impulsantwort (oben) und dazugehöriges Echogramm (unten) aus einem Raum mit einer Nachhallzeit von etwa 0.4 s

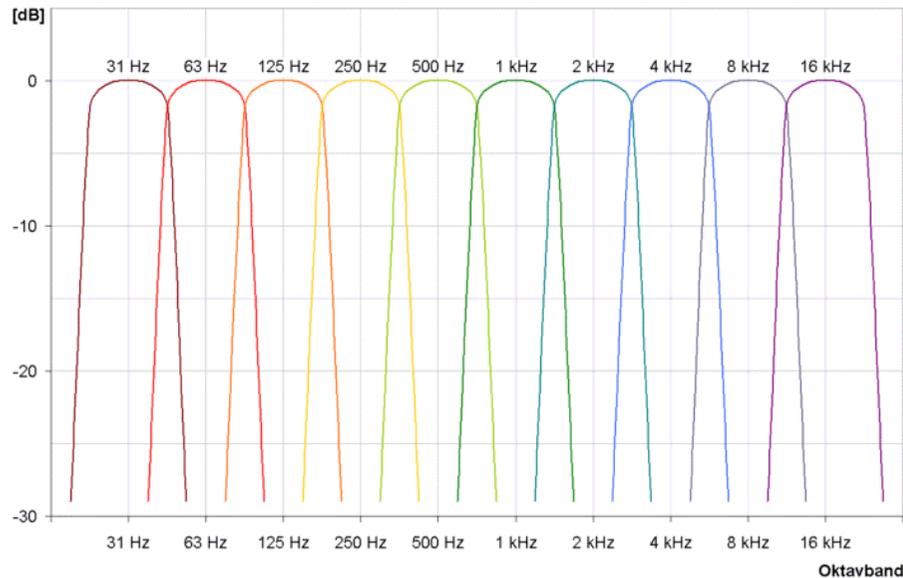


Grafik 2.7 Gemessene Raum-Impulsantwort (oben) und dazugehöriges Echogramm (unten) aus einem Konzertsaal mit etwa 2 s Nachhallzeit

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.

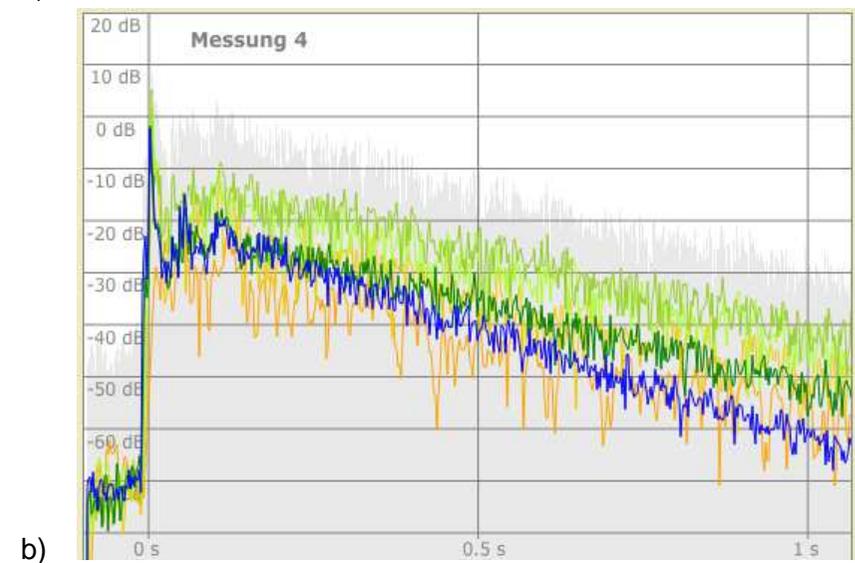
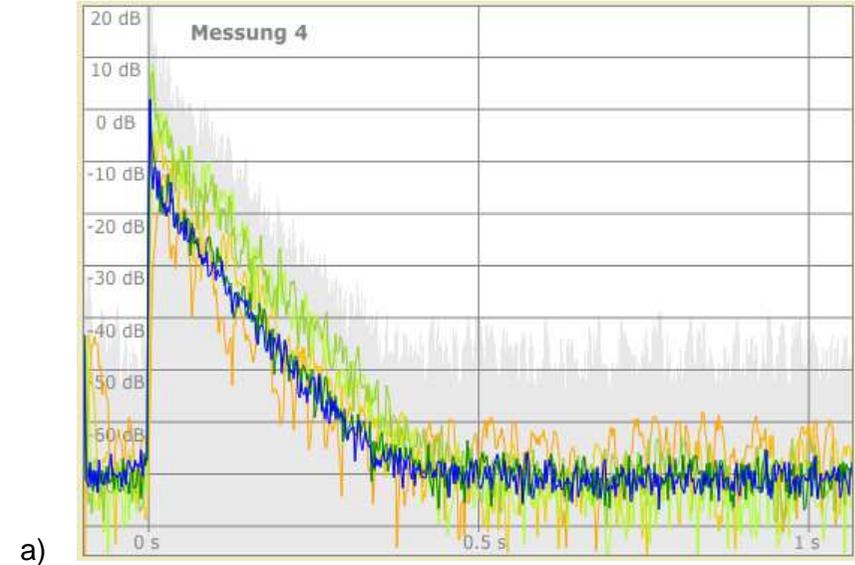


Grafik 2.8 Die Filterkurven aller 10 Standard-Oktavfilter im menschlichen Hörbereich. In AcouCheck werden die sechs mittleren Oktaven von 125 Hz bis 4 kHz ausgewertet, wie dies in der Raumakustik in den meisten Fällen geschieht.

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

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

in [dB] skalierte Werte umgewandelt, die in Echogrammen wie in Grafik 2.9 dargestellt werden.



Grafik 2.9 In Echogrammen wird das zeitliche Abklingen des Nachhalls mit logarithmischer Intensitäts-Skala in [dB] dargestellt, a) für einen Wohnraum mit etwa 0.4 s Nachhallzeit b) für einen Konzertsaal mit etwa 2 s Nachhallzeit

Die Echogramme zeigen nach dem Direktschall-Impuls ein gleichmäßiges, von Schwankungen überlagertes Abklingen, bis das Niveau des Hintergrundgeräusches 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 2.9b erkennbar, daß die Nachhallzeiten bei hohen Frequenzen (blaue Kurven) niedriger sind als bei mittleren Frequenzen (grüne Kurven).

Außerdem ist in Grafik 2.9. 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.

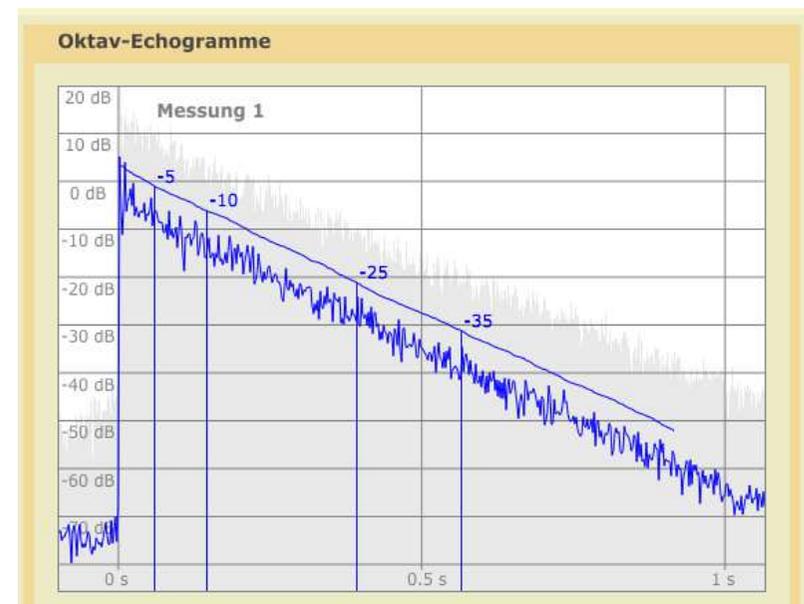
Ganz besonders bei Händeklatsch-Anregung gelingt eine Messung bei tiefen Frequenzen nur, wenn mit 'hohlen' Händen geklatscht wird und das Klatschen einen 'satten' Klang hat.

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.

Einzelne-Oktaven ansehen

Wenn man eine Oktav-Taste zweimal nacheinander anklickt (kein Doppelklick, sondern langsamer, etwa 1 Sek. Pause dazwischen), erscheint das Echogramm dieser Oktave in 'Solo-Darstellung'. Zusätzlich wird das in der Auswertung intern verwendete 'Rückwärts-Integral' angezeigt.

Diese Darstellung (Grafik 2.10) eignet sich besonders, um die Qualität einer Messung visuell einzuschätzen.



Grafik 2.10 Echogramm und 'Rückwärts-Integral' für eine Oktave einer Messung guter Qualität.

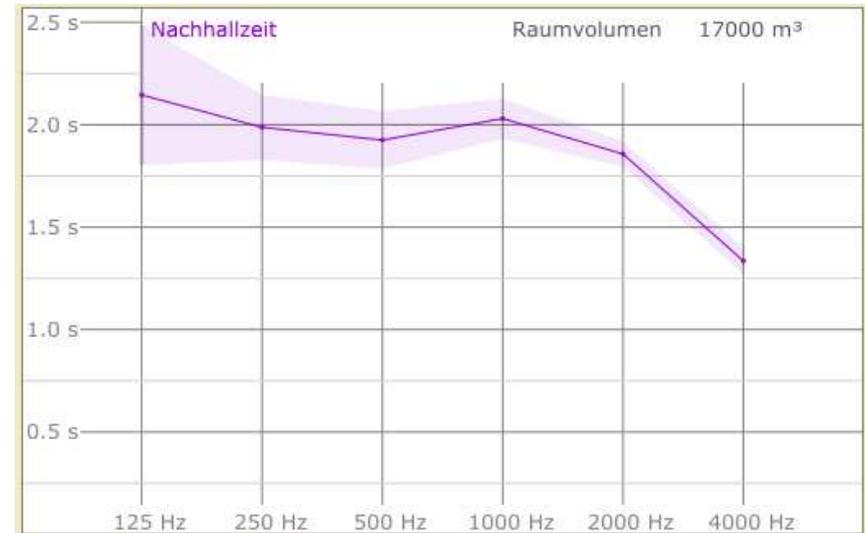
2.4. Meßergebnisse bewerten

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.

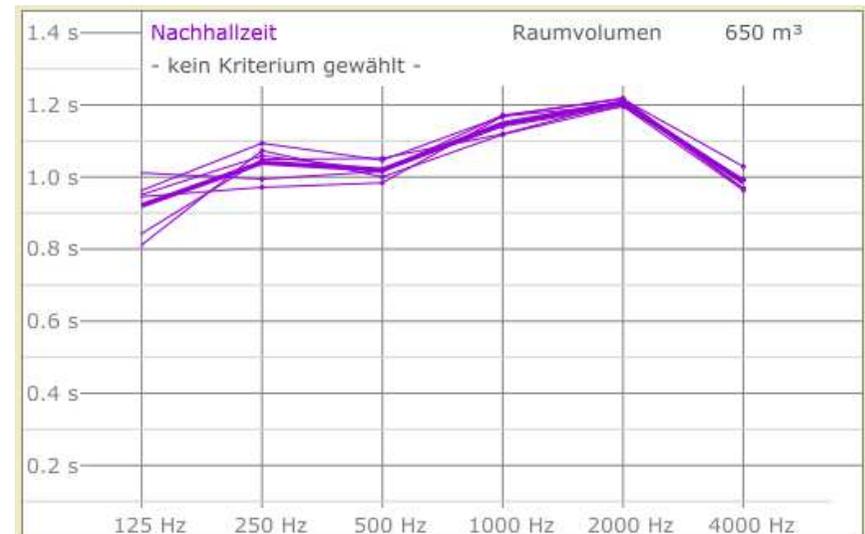
Grafik 2.12 zeigt Nachhallzeiten aus sechs Einzelmessungen mit verschiedenen Schallquellen- und Mikrofon-Positionen in einem Hörsaal sowie deren Mittelwerte als fette Kurve. Die einzelnen Messungen liegen einigermaßen nah beieinander und es ist ein leichter Trend zu erkennen, daß die Streuung der Meßwerte 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 daran 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 Volumen-abhängig 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.

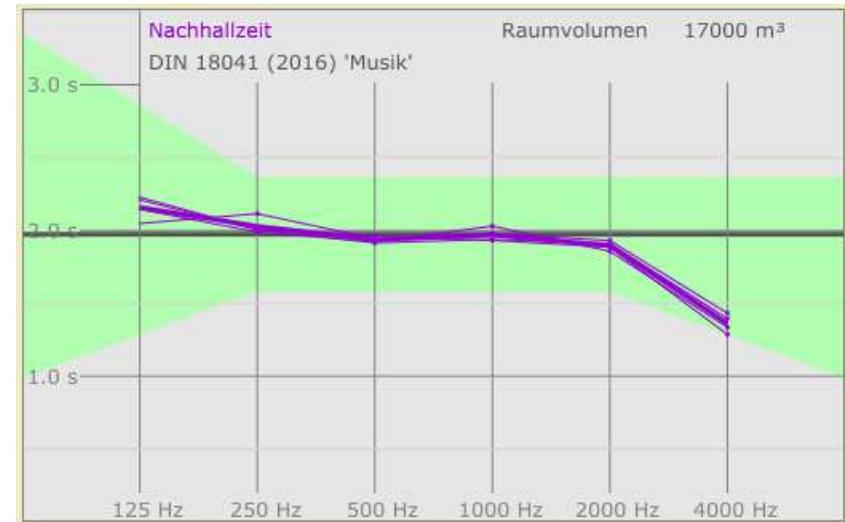
Die wählbaren Vergleichskriterien sind:

- DIN 18041 (2016) mit den Nutzungsarten:
 - 'Musik'
 - 'Sprache / Vortrag' (optional mit Inklusion)
 - 'Unterricht / Kommunikation' (optional mit Inklusion)
 - 'Sport'
- DIN 18041 (2004) mit den Nutzungsarten:
'Musik', 'Sprache', 'Unterricht', 'Sport 1', 'Sport 2'
- DIN 18041 (1968) ohne wählbare Nutzungsart.
- EBU 'Hörraum' – eine besonders 'trockene' Raumgestaltung für das optimale Abhören von Tonaufnahmen im Studiobetrieb.

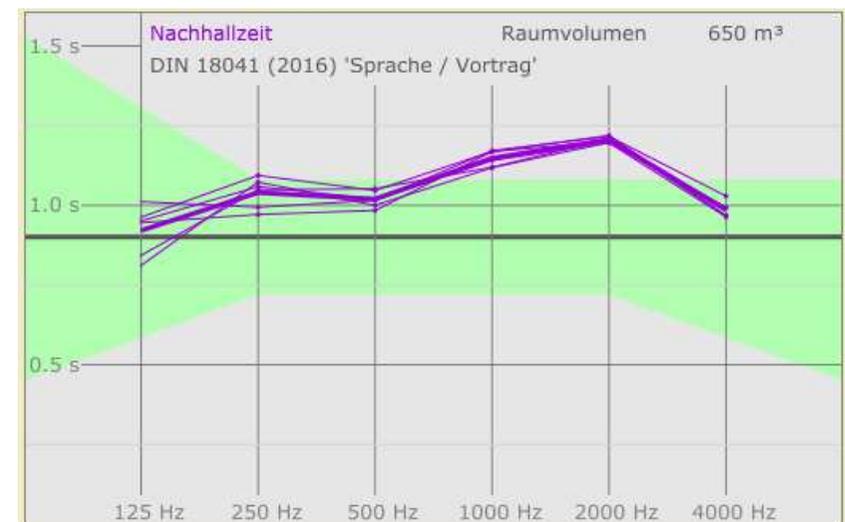
Mit Wahl der älteren DIN-Empfehlungen kann festgestellt werden, ob Räume in Bestands-Gebäuden den Empfehlungen im Baujahr entsprechen.

⁵ Eingabe durch horizontales Ziehen im Einstell-Feld.

⁷ Bei flächigen Absorbern wird die (geometrische) Fläche des Absorbers, bei Personen oder Möbelstücken wird die Anzahl eingestellt. Es gibt auch Absorber-Elemente, die Stückweise behandelt werden, z. B. Sessel.



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'.

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 nummerierten 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 Absorbern.

Die 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:

$$T = 0.163 \ V / A \quad ^8$$

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].

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:

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

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 äquivalente Schallabsorptionsfläche die Nachhallzeit mit den zusätzlichen Absorbern berechnet:

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

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

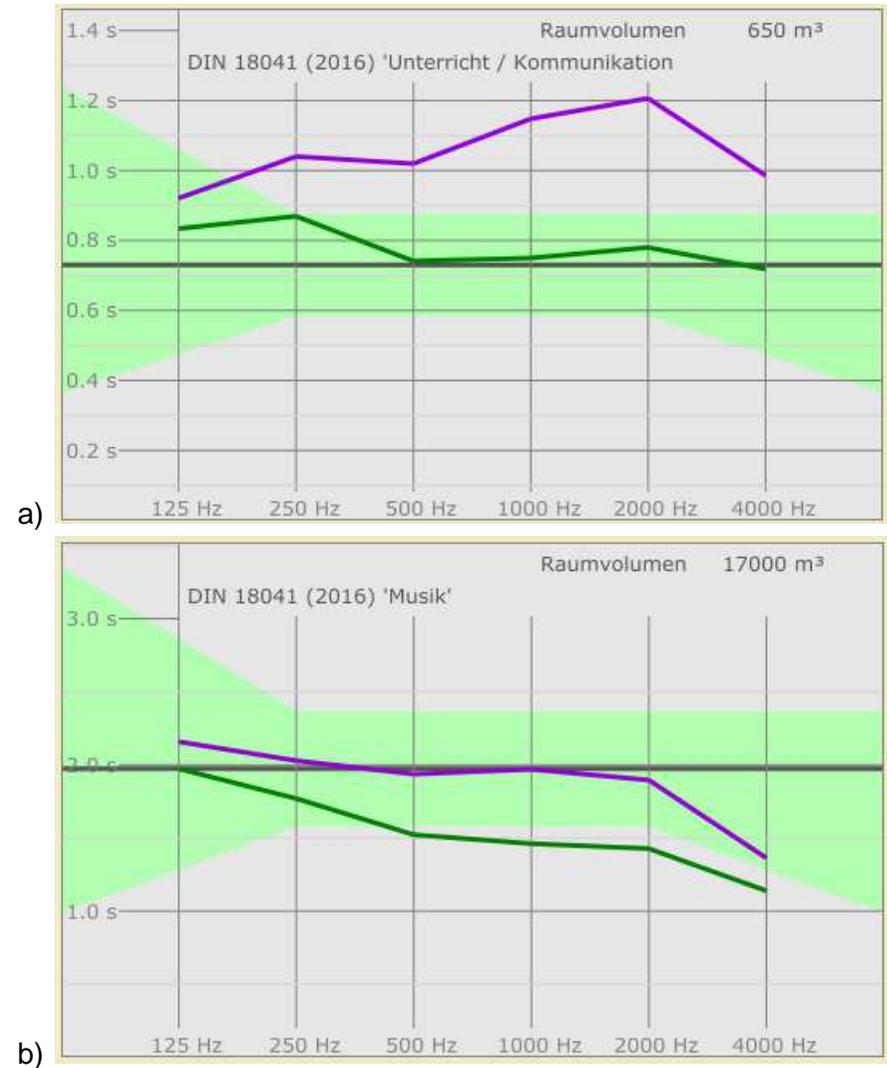
In den meisten Fällen sind bei Nachhall-Messungen nur wenige Personen im Raum, wogegen bei der normalen Nutzung oft wesentlich mehr Personen anwesend sind. Dann ist es nützlich, die Wirkung einer stärkeren Besetzung mit Personen in den Raum 'hineinzurechnen'. Ohne weiteres ist dies möglich, wenn die 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.



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 mit Polstergestühl ist eine entsprechende Rechnung nicht ohne weiteres möglich (vgl. Text)

Die Berechnung raumakustischer Verbesserungs-Maßnahmen

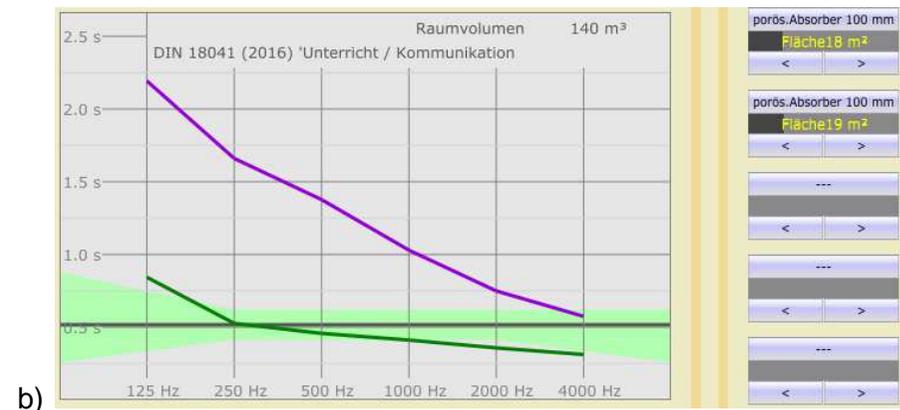
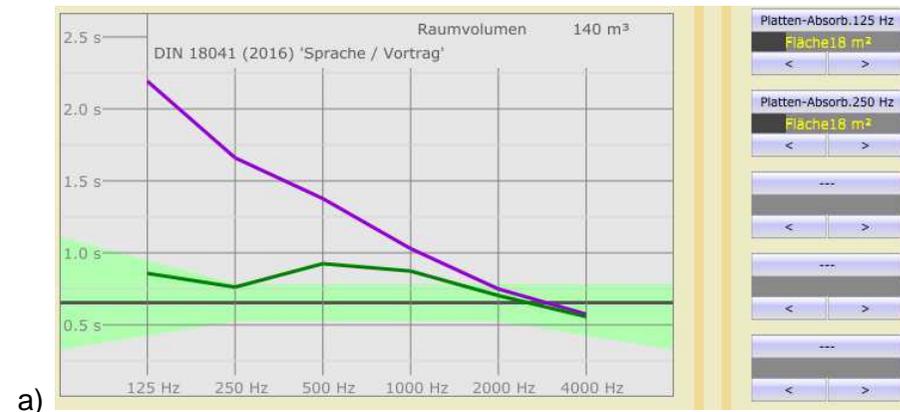
Häufig wird die Analyse eines Raums ergeben, daß die Nachhallzeiten zu lang sind. In solchen Fällen können raumakustische Verbesserungs-Maßnahmen rechnerisch 'erprobt' werden. Damit diese Rechnung funktioniert, muß auf Programm-Seite 4 das Raumvolumen eingestellt sein.

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.



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 'Erstellen (txt)' wird eine Text-Dokumentation im Editierfenster erzeugt. Dabei wird der vorherige Inhalt des Fensters gelöscht. Im 'erweiterten Modus' von AcouCheck werden in der Dokumentation alle Meß-Parameter aufgeführt, anderenfalls entsteht eine kompakte Dokumentation mit Nachhallzeiten. Der Text kann im 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

Bei jeglichen Zweifeln an der Meßqualität, oder falls die Qualitätszahl weniger als 8 beträgt, empfiehlt es sich, auf der Programm-Seite 3 für die betreffende Messung das Echogramm und das Rückwärts-Integral der fraglichen Oktave kritisch anzusehen (die Oktav-Taste zweimal nacheinander anklicken, mit ca. 1 Sek. dazwischen, kein Doppelklick).

⁹ Beim Beenden des Programms 'AcouCheck' wird die Text-Dokumentation automatisch im Verzeichnis der zugehörigen Impulsantworten gespeichert, also im Datenverzeichnis 'imp\JJJMMTT_hhmm'. Dabei sind 'JJJMMTT_hhmm' Datum und Uhrzeit des Starts der Meßreihe. Nach dem Fertigstellen einer Meßreihe kann dieses Unterverzeichnis auch umbenannt werden, so daß die Meßreihe später leichter auffindbar ist, zum Beispiel in der Form 'JJJMMTT_hhmm_Objektbezeichnung'.

Alternativ zum Text kann mit der Taste 'Erstellen (csv)' eine Dokumentation im CSV-Format mit Semikolon als Trennzeichen erstellt werden. Dieses Format eignet sich nicht zum manuellen Weiterverarbeiten, sondern ist für den Import in Tabellenkalkulations-Software¹⁰ vorgesehen. Dort können die Daten weiter ausgewertet werden, mit eigenen Grafiken versehen werden, etc..

¹⁰ Freie oder kostengünstige Alternativen zum verbreiteten 'Excel' sind u. a.:
- 'Calc' in den OpenSource Software-Paketen 'OpenOffice' / 'LibreOffice' (für Windows, OS-X, Linux und weitere Betriebssysteme)
- 'PlanMaker' im Software-Paket 'SoftMaker Office' (für Windows, Linux, Android), freie 'educational' Version verfügbar (Stand 2016)

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 elementaren Absorber-Typen ('basic'), verschiedene Baukonstruktionen und Oberflächen mit ihren Absorber-Eigenschaften ('Bauteile & Absorber'), Personen und Möblierung als Absorber ('Personen & Möbel'), einigen ungewöhnlichen Absorber-Typen ('spezielle Absorber') und schließlich von Herstellern, die das Projekt unterstützt haben, angeboten werden ('Hersteller-Absorber').

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 herabzusetzen¹¹ (im Programmfenster unten rechts mit der Taste 'max. 1.0' kann dies bewirkt werden). Weiteres zur Interpretation und Verwendung von Schallabsorber-Daten ist im Anleitungsteil für fortgeschrittene Nutzer in Kapitel 3.4. zu finden.

¹¹ 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 befaßt haben und schon einfache Messungen und Berechnungen durchgeführt haben.

ACHTUNG: In der AcouCheck-Software muß auf Programm-Seite 1 der '**erweiterte Modus**' aktiviert werden, damit die in diesem Kapitel beschriebenen zusätzlichen Funktionen zugänglich sind.

Im 'erweiterten Modus' stehen folgende Erweiterungen zur Verfügung:

- Messungen mit 'Sinus-Sweep' als Meß-Signal
- zusätzliche Meßgrößen (T_{20} , T_{30} , EDT, Rad^{12} , T_S , C_{80} , C_{50} , D_{50})
- Messung auch in den Oktavbändern 63 Hz und 8 kHz.
- Varianten bei der Berechnung mit zusätzlichen Absorbern

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 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' (das ist ein durch das gesamte Hörspektrum gleitender Sinus-Ton) 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. In AcouCheck dauert ein 'Sinus-Sweep' eine Sekunde lang.

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 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.

¹² Mit 'Rad' ist der Hallradius abgekürzt.

Vorgehensweise bei 'Sinus-Sweep'-Messungen

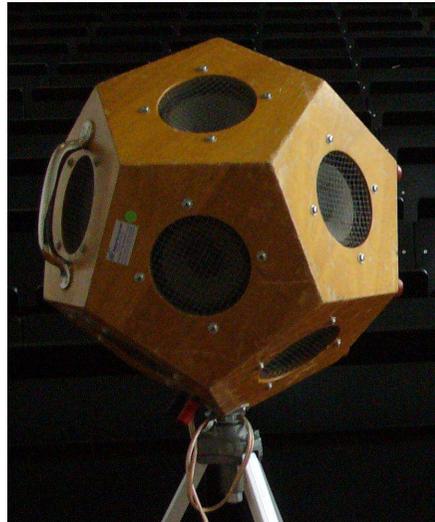
Der Meßaufbau

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.

Bei professionellen Nachhall-Messungen werden oft Dodekaeder-Lautsprecher¹³ eingesetzt, die den Schall näherungsweise gleichmäßig in alle Richtungen abstrahlen. Aber 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



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

¹³ Der Dodekaeder (Zwölfflächler) ist ein regelmäßiger Körper, dessen Oberfläche aus 12 gleichen gleichseitigen Fünfecken zusammengesetzt ist. In jedes der Fünfecke eines Dodekaeders ist ein Lautsprecher eingesetzt.

der Lautsprecher übersteuert werden, denn die Verzerrungen bei Übersteuerung können die Meßergebnisse verfälschen.

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

ACHTUNG: Wenn bei 'Sinus-Sweep'-Messungen ein professionelles Audio-Interface verwendet wird, muß eine evtl. vorhandene 'Monitor'-Schaltung unbedingt deaktiviert sein (vgl. auch Anhang A 2).

3.2. Verschiedenartig gemessene Nachhallzeiten

Originär ist die Nachhallzeit definiert als die Zeit, in der ein Schallerlebnis 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 muß¹⁴. 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 AcouCheck wird darüber hinaus ein gewichtetes Mittel aus T_{20} und T_{30} gebildet und als T_{mix} angezeigt. Die Wichtung erfolgt anhand der

¹⁴ 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.

Meßunsicherheiten, so daß Werte mit besserer Meßqualität bevorzugt werden. T_{mix} ist eine Annäherung an einen 'bestmöglich gemessenen' Wert aus jeder Messung ist, entspricht jedoch keiner Norm:

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.

Der *Hallradius* ist eine eine aus der Nachhallzeit abgeleitete Größe, die den Abstand von der Schallquelle angibt, in dem Direktschall und diffuser Nachhall gleich laut sind¹⁵. Der Hallradius r_H ergibt sich aus Nachhallzeit (T [s]) und Raumvolumen (V [m³]) mit

$$r_H = 0.057 \sqrt{(V / T)} \quad \text{in [m].}$$

Typische Hallradien reichen von unter 1 m bei kleinen Räumen bis zu knapp 10 m bei sehr großen Räumen.

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.

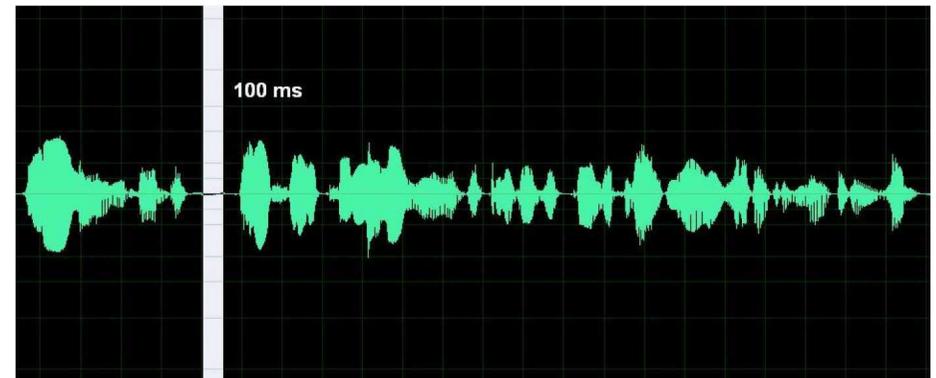
Anders verhält es sich mit Maßen, die die Übertragungsqualität jeweils von einer Quelle (Sprecher, Musiker, Lautsprecher, usw.) an einem bestimmten Quell-Ort zu einem Empfänger (Hörer, Mikrofon) an einem bestimmten Empfangs-Ort beschreiben.

¹⁵ Genau genommen wird dabei eine kugelförmig strahlende Quelle vorausgesetzt. Bei gerichteter Quelle wird der Wert mit dem Bündelungsgrad γ in Richtung Empfänger korrigiert: $r_H = 0.057 \sqrt{(\gamma V / T)}$

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 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.



Grafik 3.2 Oszillogramm von Sprache

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 erstklassiger 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.¹⁶

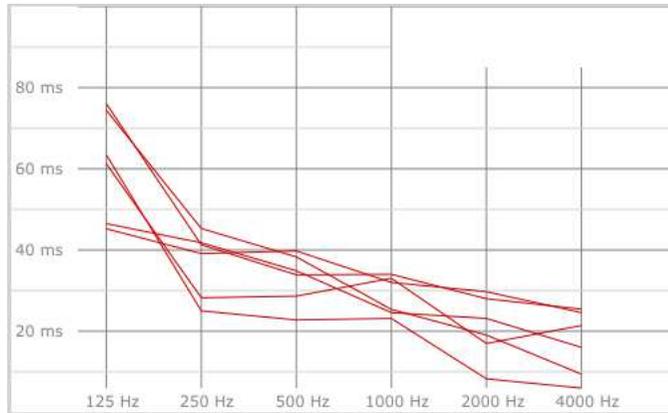
Eine Gemeinsamkeit der Maße D_{50} , C_{50} und C_{80} ist die scharfe Zeitgrenze bei 50 oder 80 ms, bis zu der die Schallenergie-Beiträge positiv und ab der die Beiträge negativ gezählt werden. Dies kann zu Artefakten in Messungen führen, die nicht der menschlichen Wahrnehmung entsprechen. Verschiebt 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 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.

¹⁶ 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.



Grafik 3.3 Schwerpunktzeiten verschiedener Übertragungstrecken in einem Unterrichtsraum

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 Übertragungstrecken ist hier nicht sinnvoll, da die Meßwerte sich jeweils auf eine Übertragungstrecke beziehen und nicht auf den ganzen Raum.

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

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 Hallraum¹⁷ 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 Grö-

¹⁷ Ein Hallraum ist ein Raum mit besonders schallharten Oberflächen, in dem durch schiefwinklige Geometrie und / oder Diffusoren für ein sehr diffuses Schallfeld gesorgt wird.

ßenordnung 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. Außer in den Meßprotokollen der Hallraum-Messungen sind die Meßanordnungen selten dokumentiert. Dadurch entsteht 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 Re-

flexion 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 Kanten-Nähe erreichen. Die Empfehlung, 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 bei allen Frequenzen, jedoch nur bei tiefen Frequenzen spielt er aufgrund der großen Wellenlängen eine praktische Rolle.

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.¹⁸

¹⁸ AcouCheck enthält in der Datenbank einige 'Kanten-Absorber' mit experimentellen Daten als 'äquivalente Schallabsorptionsbreiten' und kann diese in Berechnungen nutzen.

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 gemessen 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.

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 AcouCheck-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 AcouCheck-Software eingesetzt, auch im erweiterten Modus, z.B. für 'sinus-sweep' Messungen.

- Aufgabe an kleine Gruppen von 2-3 Studenten, jeweils einen Seminarräum mit Hilfe der AcouCheck-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 AcouCheck' 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 Mikrophonkapsel 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.

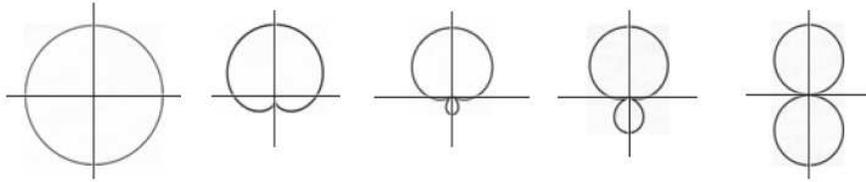


Grafik A.1 Ein Meßmikrofon (links) und eine Studio-Kondensatormikrofon mit Kugel-Charakteristik (rechts).

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, Hyperniere, 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.¹⁹

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-

fonkapseln 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.

¹⁹ Weitere Aspekte hochwertiger Mikrofone – auch aus der Perspektive des Entwicklers – werden in den 'Mikrofon-Aufsätzen' von Jörg Wuttke behandelt (erhältlich unter 'www.ingwu.de').

Mikrofon-Vorverstärker und Audio-Interfaces

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 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.

Bei 'Sinus-Sweep'-Messungen mit einem professionellen Audio-Interface muß beachtet werden, daß viele derartige Interface-Typen eine Schaltung enthalten, die das Mikrofon-Signal zum Lautsprecher- bzw. Line-Ausgang durchschleift, häufig mit 'Monitor' bezeichnet. Diese Funktion *muß für Messungen unbedingt deaktiviert sein*. Anderenfalls

wird das gesendete Sweep-Signal durch das empfangene Mikrofon-Signal verfälscht und es kann ein Rückkopplungs-Signal entstehen.



Grafik A.3 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).

Professionelle Kondensator-Mikrofone benötigen in der Regel eine 'Phantomspeisung', eine 48 V-Versorgung²⁰ 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, Mikrophon 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)

²⁰ 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-Datenbank²¹ besteht aus zwei Teilen: In die Software fest integriert ist eine Basis-Datenbank mit elementaren Absorber-Typen, verschiedenen Oberflächen-Konstruktionen als Beispiele, Personen und Möbeln als Absorber, sowie einigen eher exotischen Absorbern. Hinzu kommt ein veränderlicher Teil der Datenbank. Hier sind insbesondere Hersteller-spezifische Abdorber zu finden. Bei jedem Programm-Start prüft AcouCheck, ob der veränderlicher Datenbank-Teil aktuell ist und aktualisiert gegebenenfalls, vorausgesetzt es besteht beim Start eine Verbindung des Programms zum Internet.

Der Speicherort der Datenbank

Alle Daten und Bilder des veränderlichen Teils der Datenbank sind im Unterverzeichnis 'absdata' abgelegt. Das Unterverzeichnis 'absdata' befindet sich im 'AcouCheck-Datenverzeichnis' und damit je nach Betriebssystem an unterschiedlichen Orten auf dem Speichermedium (vgl. dazu Anhang A.6).

Ein Verändern der Dateien der Datenbank ist nicht zu empfehlen, da dies sowohl zum Versagen der Datenbank als auch zu unerwünschtem Verhalten von AcouCheck führen kann.

²¹ Das Format der Schallabsorber-Datenbank ist seit der Version AkuCheck 1.3x vollständig erneuert und nicht kompatibel mit der in AkuCheck 1.0x verwendeten Datenbank. Die 'alten' Absorber-Daten können also mit 'neuen' AkuCheck-Versionen nicht weiter genutzt werden.

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.

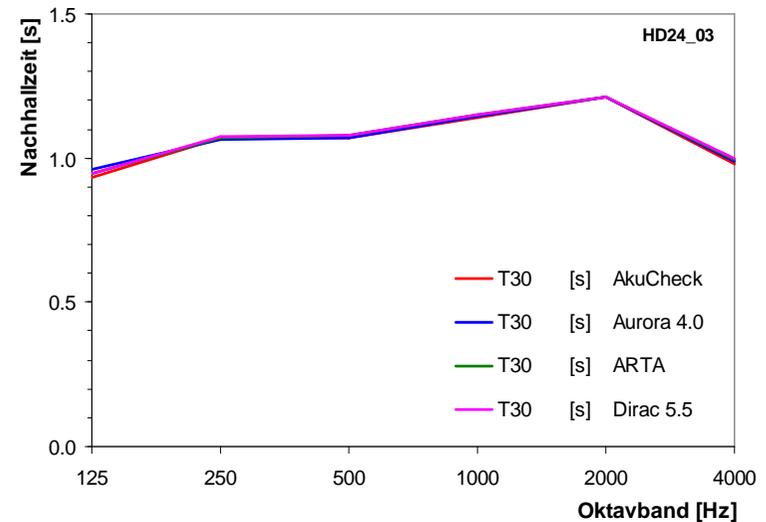
Algorithmen-Überprüfung

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 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 AcouCheck-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 AcouCheck mit drei etablierten Software-Meßsystemen.

Die Nachhallzeiten alle 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 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 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. 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.

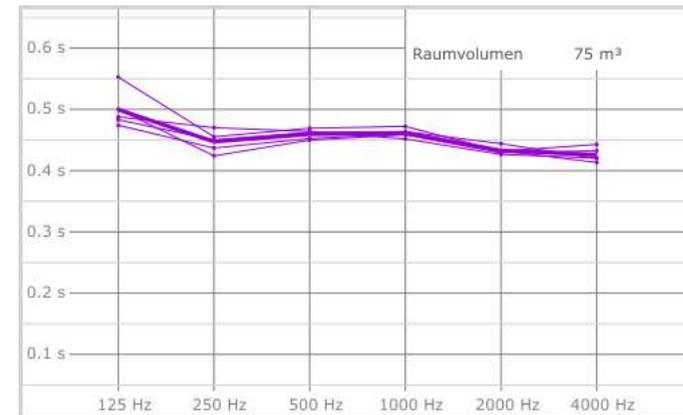
In AcouCheck wurden mit Messungen der Oktav-Schwerpunktzeiten eines Impulses von 1 Sample Länge ohne angewendete Verzögerungs-Korrektur die Filter-Verzögerungen bestimmt. Anschließend wurden diese in den Programm-Code integriert. Eine Kontrollmessung ergab Rest-Abweichungen unter 2 ms in den tiefen Oktaven 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 Handeklatschen als Anregung zeigen beispielhaft die Reproduzierbarkeit.

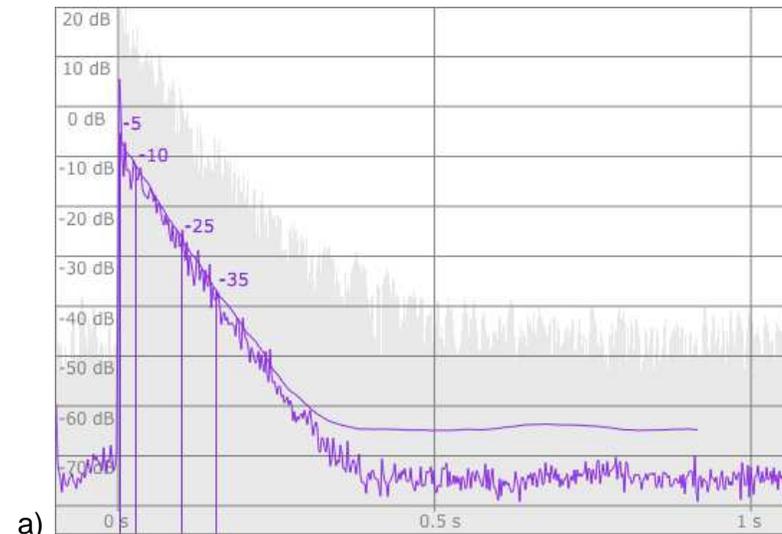
Grafik A.6 zeigt in einem Beispiel, daß sich Impuls-angeregte Messungen mit einer Streubreite um die Mittelwerte von etwa 0,02 s bei hohen Frequenzen und etwa 0,03 s bei tiefen Frequenzen wiederholen lassen, mit einem Ausreißer bei 125 Hz. Damit ist bei Impulsanregung eine Reproduzierbarkeit erreichbar, 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.

Nichtlinearität und Zeit-Variabilität im Signalweg

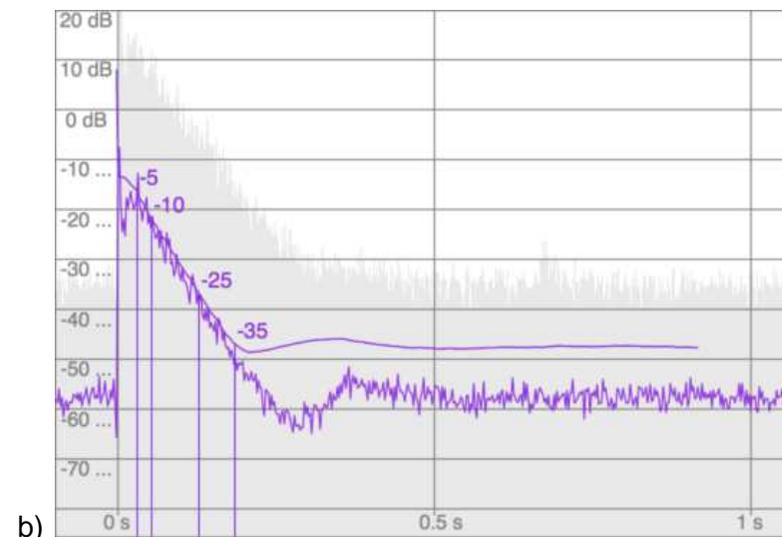
Die Messung von Nachhallzeiten und anderen raumakustischen Parametern setzt voraus, daß Signalweg des Meßsystems ein lineares und zeitlich konstantes Übertragungsverhalten aufweist. Bei professionellen Audio-Systemen ist diese Bedingung innerhalb des nutzbaren Dynamikbereichs erfüllt, soweit keine nichtlinearen Effekte eingeschleift sind.

In den internen Mikrofon-Signalwegen diverser Notebook-Computer erfolgen dagegen Signal-Manipulationen, die beispielsweise der besseren Sprachübertragung im VOIP²²-Betrieb dienen sollen. In vielen Computern sind diese Signal-Veränderungen standardmäßig eingeschaltet. Soweit dies der Fall ist, ist der interne Signalweg für Raumakustik-Messungen absolut ungeeignet.

Anders als in Notebook- und Desktop-Computern besteht in Tablet-Computern mit den Betriebssystemen iOS und Android keine Möglichkeit, die Verstärkung des Mikrofon-Signalwegs passend für das jeweilige Signal einzustellen. Statt dessen wird in vielen Geräten das Signal bei hohen Pegeln vor Erreichen der Aussteuerungs-Grenze begrenzt, was ein sowohl nichtlinearer als auch Zeit-variabler Prozeß ist. Ein solches Gerät kann nur mit Signalen unterhalb der Begrenzer-Schwelle für Meß-Zwecke eingesetzt werden. Grafik A.7 zeigt im Vergleich eine Raumimpulsantwort, die parallel über professionelles Equipment und über den internen Signalweg eines Tablet-Computers aufgezeichnet wurde. Diese 'Tablet-Messung' zeigt einen verzögerten 'Release' und daher ist (zufällig) im Bereich -5 dB bis -35 dB einigermmaßen linear, so daß bei T_{20} und T_{30} die Fehler noch akzeptabel sind. Andere Meßgrößen sind dagegen unbrauchbar.



a)



b)

Grafik A.7 Oktav-Echogramm einer Raum-Impulsantwort
a) mit professionellem Audio-Equipment aufgezeichnet.
b) mit dem internen Signalweg eines Tablet-Computers aufgezeichnet.

²² Voice over IP

A.5. Literatur und Planungshilfen

Literatur zur Raumakustik (kleine Auswahl)

W. Fasold, E. Veres: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis;
2. Aufl., Berlin, 2003 (3. Aufl. in Vorb.)

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 (kleine Auswahl)

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.6. Dateisysteme und Speicher-Orte der Dateien

Das 'AcouCheck-Datenverzeichnis'

AcouCheck schreibt und liest seine Daten im 'AcouCheck-Datenverzeichnis'. Dieses ist je nach Betriebssystem an verschiedenen Orten auf dem Speichermedium (Festplatte oder Flash-Speicher) des Computers angelegt.

Unter Windows wird das Programm-Verzeichnis von AcouCheck als Datenverzeichnis verwendet, alle Daten werden also in Unterverzeichnissen des Programm-Verzeichnisses gespeichert. Mit dieser Speicher-Organisation ist AcouCheck unter Windows 'portabel' und kann beispielsweise von einem USB-Stick gestartet und genutzt werden.

Unter OS-X wird im Verzeichnis '<user>/Library' ein Unterverzeichnis 'ACM2' angelegt und als AcouCheck-Datenverzeichnis genutzt.

Unter iOS wird das Unterverzeichnis 'ACM2' innerhalb der 'SandBox' von AcouCheck angelegt und ist von außen leider nicht zugänglich.

Unter Android wird im Verzeichnis 'SD Card' ein Unterverzeichnis 'ACM2' angelegt und als AcouCheck-Datenverzeichnis genutzt.

Speicherung der Raumimpulsantworten

Im AcouCheck-Daten-Verzeichnis legt AcouCheck bei der ersten Programm-Nutzung ein Unterverzeichnis 'imp' an, In diesem wird für jede Meßreihe ein weiteres Unterverzeichnis angelegt, das mit Datum und Uhrzeit im Format 'JJJJMMTT_hhmm' benannt ist (wird zum Beispiel eine Meßreihe am 16.10.2016 um 9:55 Uhr gestartet, dann lautet der Verzeichnisname '20161016_0955'). Hier werden die Raum-Impulsantworten der Meßreihe mit Dateinamen 'impulse01.flac' bis 'impulse12.flac' automatisch im Hintergrund gespeichert.

Das Datenformat der von AcouCheck ab Version 1.3x gespeicherten Raum-Impulsantworten ist FLAC (free lossless audio compression), ein freies Format, in dem Audiodaten ohne jeglichen Qualitätsverlust komprimiert werden können. Bei Raum-Impulsantworten kann damit die Dateigröße gegenüber einer unkomprimierten Speicherung (z.B. im wav-Format) auf ein Viertel oder noch weniger schrumpfen^{23,24,25}. Die gespeicherten Raum-Impulsantworten können zur späteren Auswertung auf Programmseite 2 wieder geladen werden.

Speicherung der Schallabsorber-Datenbank

Die Datenbank besteht aus zwei Teilen. Die Hersteller-neutralen Daten sind fest im Programm integriert. Die Hersteller-Daten werden in Unterverzeichnissen des Datenverzeichnisses abgelegt und können bei Bedarf automatisiert über das Internet aktualisiert werden. Manuelle Veränderungen der Datenbank sind nicht zu empfehlen, denn dies kann deren Funktion stark beeinträchtigen oder die Datenbank zerstören.

²³ Bei den AcouCheck Versionen 1.0x werden Impulsantworten im unkomprimierten Datei-Format 'WAV' gespeichert. Neuere Windows-Versionen können neben 'FLAC'- auch 'WAV'- Dateien laden, so daß auch ältere Messungen erneut ausgewertet werden können.

²⁴ Dies steht im Gegensatz zu Verlust-behafteten Kompressions-Verfahren wie beispielsweise 'mp3', bei denen – je nach Kompressionsgrad – nicht hörbare oder auch hörbare, aber weniger wichtige Anteile des Audiosignals weggelassen werden. Verlust-behafteten Kompressions-Verfahren sind deshalb zum Speichern von Audio-Meßdaten nicht geeignet.

²⁵ Der Kompressionsgrad ist bei FLAC (und anderen verlustfreien Verfahren) vom Signal abhängig und damit nicht einheitlich. Deshalb sind die FLAC-Impulsantworten der neuen AcouCheck-Versionen im Gegensatz zu den WAV-Impulsantworten von AcouCheck 1.0x unterschiedlich groß.

A.7. Installation und erster Programmstart

System-Voraussetzungen

Die Software AcouCheck ist für Notebook- und Tablet-PCs mit verschiedenen Betriebssystemen geeignet:

- Windows ab Version XP (SP3)
- OS-X ab Version 10.6.
- iOS ab Version 7
- Android ab Version 4.03.

Zusätzlich muß der PC 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.

Installation

Abhängig vom Betriebssystem wird so installiert:

Windows

Unter Windows geschieht dies 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 anderem Ort der eigenen Wahl). Nun kann 'AcouCheck' gestartet werden. Zwecks Bequemlichkeit kann eine Verknüpfung im Startmenu oder auf dem Desktop erstellt werden. Mit dieser Art der Installation ist AcouCheck *portabel*, d. h. es kann durch einfaches Kopieren auf einen anderen PC übertragen werden. Für die Installation sind auch keine Administrator-Rechte erforderlich. AcouCheck kann alternativ auf einen USB-Stick kopiert werden und von dort gestartet werden. Beim Betrieb von einem USB-

Stick muß auf freien Speicherplatz für die Raum-Impulsantworten geachtet werden, die AcouCheck bei im Hintergrund schreibt. Pro Meßreihe werden etwa 1 bis 2 MB benötigt.

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

OS-X

Unter OS-X geschieht die Installation in üblicher Weise durch Start der Installations-Datei 'AcouCheckXXX.pkg', wobei die 'XXX' die Programm-Version repräsentiert.

iOS

Die Installation ist unter iOS nur vom App-Store aus möglich. Eine direkte Installation aus einer Datei ist unter iOS nicht möglich²⁶.

Android

Unter Android geschieht die Installation durch Start des Installations-Package 'AcouCheckXXX.apk', wobei die 'XXX' die Programm-Version repräsentiert. Dies geschieht in drei Schritten:

1. In Android-Einstellungen → Sicherheit → Unbekannte Herkunft: die Installation 'aus unbekannter Quelle' zulassen.
2. die Datei 'AcouCheckXXX.apk' starten - das startet die Installation
3. in Android-Einstellungen -> Sicherheit -> Unbekannte Herkunft: die Installation wieder abschalten.

²⁶ Es sei denn das System wurde mit einem 'jail break' von seinen Einschränkungen befreit. Dies ist jedoch mit Risiken verbunden und erfordert große Sachkenntnis.

Erster Programmstart

Nach der Installation sollte AcouCheck als Erstes einmal bei bestehendem Internet-Zugang gestartet werden (wichtig: zuerst Internet-Zugang bereitstellen, dann AcouCheck starten). Bei diesem Vorgang werden Hersteller-Absorberdaten aus dem Internet heruntergeladen und lokal auf dem PC gespeichert. Abhängig von der Geschwindigkeit des Internet-Zugangs kann dieser Vorgang eine bis mehrere Minuten dauern. Nach diesem Daten-Abholen ist AcouCheck betriebsbereit.

Steuerung über Startparameter

Einige Programm-Eigenschaften können in der PC-Version bei Bedarf mit Startparametern gesteuert werden.

Die Sprache kann unabhängig von der Sprache des Betriebssystems eingestellt werden mit:

<code>lang=DE</code>	schaltet die Programm-Oberfläche auf Deutsch
<code>lang=EN</code>	schaltet die Programm-Oberfläche auf Englisch

Das Seitenverhältnis des Programm-Fensters wird so eingestellt:

<code>ratio=4:3</code>	stellt ein Seitenverhältnis von 4 : 3 ein
<code>ratio=3:2</code>	stellt ein Seitenverhältnis von 3 : 2 ein
<code>ratio=16:10</code>	stellt ein Seitenverhältnis von 16 : 10 ein
<code>ratio=16:9</code>	stellt ein Seitenverhältnis von 16 : 9 ein

Die Breite des Programm-Fensters wird so eingestellt:

<code>width=1200</code>	stellt beispielsweise eine Breite des Programm-Fensters von 1200 Pixeln ein.
-------------------------	--

A.8. Lizenzierung, Copyright, Haftungsausschluß

Die Software AcouCheck darf frei und unentgeltlich für Lehr-, Lern- und Informations-Zwecke verwendet werden. Eine kommerzielle Verwendung, insbesondere in der Planung, ist nicht zulässig.

Die Verwendung der Software geschieht ausschließlich in eigener Verantwortung und auf eigene Gefahr der jeweiligen Nutzer. Weder der Entwickler noch die Bergische Universität Wuppertal haften für Schäden infolge der Benutzung dieser Software. Insbesondere ist jede Haftung für Schäden jeder Art ausgeschlossen, die durch die Verwendung von Rechenergebnissen oder von Daten oder von Information aus dieser Software verursacht werden. Trotz sorgfältiger Überprüfung wird keine Gewährleistung oder Haftung dafür übernommen, daß diese Software fehlerfrei betrieben werden kann, bzw. daß die hinterlegten Algorithmen, Berechnungen und Daten fehlerfrei sind. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß akustische Messungen und Berechnungen aufgrund verwendeter Näherungs-Verfahren und aufgrund unsicherer Daten ungenau sein können.

Innerhalb der Software AcouCheck werden die Software-Bibliothek Juce (lizensiert von J. Storer) und freie FFT-Routinen von Laurent de Soras verwendet.

A.9. Projekt-Information

Projekt-Team:

Prof. Dr.-Ing. Karsten Voss, Bergische Universität Wuppertal,
Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen - 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, Fakultät
Architektur und Bauingenieurwesen, 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.inqwu.de

Förderer und Unterstützer:

Mit Mitteln der Forschungsinitiative 'Zukunft Bau' des Bundesinstitutes
für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert unter
AZ: SWD-10.08.18.7-15.29 und AZ: SWD-10.08.18.7-12.23 -
www.forschungsinitiative-zukunft-bau.de

Unterstützer der Entwicklung von AcouCheck 1 und von AcouCheck 2
Lignotrend, D-79809 Weilheim-Bannholz, www.lignotrend.com

Weitere Unterstützer der Entwicklung von AcouCheck 2 sind:

Lahnau Akustik, D-35633 Lahnau-Dorlar, www.lahnau-akustik.de

Silentrooms, D 60439 Frankfurt, www.silentrooms.de

Weitere Unterstützer der Entwicklung von AcouCheck 1 sind:

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

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

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

