

# **Implementierung einer Nachhallzeitmessung mit Sinus-Sweep**

## **Toningenieur-Projekt**

durchgeführt von  
**Jakob Spötl**

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation

der Technischen Universität Graz

Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Kubin

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Weselak

Graz, im Oktober 2013

## Zusammenfassung

Aufgabe dieses Toningenieur-Projektes war es, auf dem Messsystem PAK Mobile MKII von Müller BBM<sup>1</sup>, die Nachhallzeitmessung mittels Sinus-Sweep zu implementieren. Für die dazu notwendigen Berechnungen wurde auf Matlab<sup>2</sup> zurückgegriffen. Zu Beginn war eine Einarbeitung in die Messsoftware PAK<sup>3</sup> notwendig, weiters musste der Übergang von PAK auf Matlab hergestellt und getestet werden. Dies gestaltete sich schwieriger als angenommen. Alle Berechnungen wurden dann in Matlab geschrieben. Um von PAK aus aufgerufen werden zu können, mussten die Funktionen zu exe-Files kompiliert werden. Als größte Herausforderung stellte sich, neben der Schnittstelle, die zeitliche Reduktion der Impulsantwort auf den relevanten Teil heraus. Diese beeinflusst die gemessene Nachhallzeit unmittelbar und musste aufgrund von schwer umsetzbaren Vorgaben<sup>4</sup> selbst erstellt und approbiert werden. Weiters mussten die zuständigen Normen<sup>5</sup> beachtet und – soweit möglich – umgesetzt werden. Das Ergebnis der Messung ist eine übersichtliche Darstellung der gemessenen Nachhallzeiten ( $T_{20}$ ,  $T_{30}$ ) je Terzband sowie diverse andere raumakustische Parameter.

## Abstract

The aim of this project was to implement the measurement of the reverberation time on a Müller BBM<sup>1</sup> PAK Mobile MKII system using sine-sweeps. The necessary calculations were performed in Matlab<sup>2</sup>. A training in the measurement software PAK<sup>3</sup> was necessary at the beginning of the project. In addition, the interface between PAK and Matlab had to be tested. This step turned out to be more challenging than initially assumed. All calculations were written in Matlab and compiled to an exe-file to be executable in PAK. Apart from the interface the key challenge was the temporal reduction of the impulse response. The latter directly effects the measurement and had to be established and tested. The suggestion for this procedure in the standard specification<sup>4</sup> was found to be inappropriate and had to be replaced. Furthermore, attention was paid to perform the measurement closely following the standards<sup>5</sup>. As an outcome of each measurement the results of the reverberation times in one-third octave bands ( $RT_{20}$ ,  $RT_{30}$ ) are plotted in a well-arranged way, along with various other parameters of room acoustics.

---

<sup>1</sup> Müller BBM, Planegg/München, Deutschland

<sup>2</sup> Matlab, v. 7.13.0.564 (R2011b), MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, USA

<sup>3</sup> PAK 5.7, Service Release 3

<sup>4</sup> EN ISO 3382 und EN ISO 18233 [1, 2]

<sup>5</sup> EN ISO 3382, EN ISO 18233 und EN IEC 61260 [1, 2, 3]

## Literaturverzeichnis

- [1] EN ISO 3382, Akustik – Messung von raumakustischen Parametern, Teil 1&2, 2009
- [2] EN ISO 18233, Akustik – Anwendung neuer Messverfahren in der Bau- und Raumakustik, 2006
- [3] EN IEC 61260, Elektroakustik – Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven, 2001
- [4] Weselak W. und Graber G., Raumakustik Skript, v.5.3, TU Graz, 2009
- [5] Weselak W., Akustische Messtechnik Skript, v.7.0, TU Graz, 2012
- [6] Iglisch F. und Spötl J., Soundfield Microphone (B-Format), Bachelorarbeit, IEM KU Graz, 2011
- [7] Farina A., Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique, J. Audio Eng. Soc. (Abstract's), Vol. 48, p. 350, 2000
- [8] Cabrera D. et al, Decay Envelope Manipulation of Room Impulse Responses: Techniques for Auralization and Sonification, Proceedings of Acoustics, paper No. 70, 2011
- [9] EN IEC 61672-1, Elektroakustik – Schallpegelmesser, Teil 1, 2005
- [10] Fassold W. und Veres E., Schallschutz + Raumakustik in der Praxis, Verlag für Bauwesen - Berlin, 1998

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>1</b>
1.1	Raumimpulsantwort	1
1.1.1	Grundlagen	1
1.1.2	Messung	3
1.2	Nachhallzeit	5
1.2.1	Messung mit abgeschaltetem Rauschen	6
1.2.2	Messung mittels Impulsantwort – Rückwärtsintegration	7
1.3	Weitere raumakustische Gütemaße	7
<b>2</b>	<b>Praktische Vorgaben</b>	<b>9</b>
2.1	Das Messsystem	9
2.2	Der Messablauf	10
2.3	Zuständige Normen	10
2.4	Frequenzbereich der Nachhallzeitmessung	11
<b>3</b>	<b>Entwicklung der Messablaufsteuerung</b>	<b>13</b>
3.1	Übersicht über den Signalfluss	13
3.2	PAK-Software	13
3.3	Support von Müller BBM	14
3.4	Schnittstelle zwischen PAK und MATLAB	14
3.5	Erstellen eines Matlab executables	15
3.6	Berechnung der Impulsantwort	16
3.7	Konditionierung der Impulsantwort	16
3.7.1	Filterung (Frequenzbereich)	16
3.7.2	Fensterung (Zeitbereich)	17
3.8	Filterung für die Terzbandanalyse	18
3.8.1	Vorgaben der Norm	18
3.8.2	Implementierung in Matlab	21
3.8.3	Einfluss der Terzbandfilter auf die Nachhallzeiten	22
3.9	Zeitbegrenzung der Impulsantwort	23
3.9.1	Normgerechte Zeitbegrenzung	25
3.9.2	Verwendung des SNR-Wertes	27
3.9.3	Verwendung eines bestimmten Prozentsatzes der Energie	27
3.9.4	Rückwärtsintegration ab einem fixen Pegelabfall	28
3.10	Berechnung der Rückwärtsintegration und Einpassen der Abklinggeraden	30
3.11	Berechnung der weiteren Gütemaße	30
3.12	Berechnungsaufwurf und Programmablauf	31
3.13	Erstellung der Grafikvorlagen in PAK	31
3.14	Vergleich der internen Soundkarte zum Fireface 400	35
3.15	Datenstruktur	36

<b>4</b>	<b>Messanleitung</b>	<b>39</b>
4.1	Benötigtes Equipment für die Messung mit X (Anzahl) Messmikrofonen	39
4.2	Aufbau des Equipments	39
4.3	Durchführung einer Messung	40
4.3.1	Vorbereitung der Software	40
4.3.2	Messung	42
4.4	Anzeigen von Messergebnissen ohne direkte Messung	45
4.4.1	Darstellung eines einzelnen Datensatzes	45
4.4.2	Gemeinsame Darstellung mehrerer Datensätze	46
<b>5</b>	<b>Beispielmessungen</b>	<b>49</b>
5.1	Vermessung des Besprechungsraumes „Rom“ (ACC Fürstenfeld)	49
5.2	Vermessung des Tonlabors der Inffeldgasse 12 (TU Graz)	51



# 1 Theoretische Grundlagen

Für diese Arbeit musste lediglich auf das Basiswissen aus den verschiedenen Lehrveranstaltungen im Bachelorstudium zurückgegriffen werden. Aus diesem Grund wird auf die theoretischen Grundlagen hier nur sehr überblickshaft eingegangen. Für die tiefergehende Beschäftigung sei auf Grundlagenliteratur der Akustik und Signalverarbeitung bzw. auf die Skripten „Raumakustik“ und „Akustische Messtechnik“ verwiesen [4, 5].

## 1.1 Raumimpulsantwort

### 1.1.1 Grundlagen

Jedes lineare zeitinvariante System kann mittels seiner Impulsantwort beschrieben werden. Die Impulsantwort ist das Ausgangssignal des Systems, welches zu diesem Zweck mit einem Dirac-Impuls angeregt wird. Dieses Signal hat folgende mathematischen Eigenschaften:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{für } t = 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) \cdot dt = 1 \quad \delta(j\omega) = 1$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) \cdot x(t) \cdot dt = x(0)$$

- $\delta(t)$  ..... Dirac-Funktion im Zeitbereich
- $\delta(j\omega)$  ..... Frequenzspektrum der Dirac-Funktion
- $x(t)$  ..... Beliebige Zeitfunktion

Damit ist definiert, dass ein Dirac-Impuls eine zeitliche Ausdehnung von 0 sowie eine Höhe von unendlich besitzen muss. Dies erfüllt die Forderung nach einem konstanten (weißen) Spektrum.

Praktisch lässt sich diese Forderung nicht realisieren. Es reicht jedoch eine Näherung, welche im interessierenden Frequenzbereich die gegebenen Anforderungen erfüllt. Bei der Arbeit mit digitalen Systemen ist dies ein Impuls mit der kleinstmöglichen Breite, ( $T_s = 1/f_s$ ) und Höhe 1. Diese Funktion wird dann – der Unterscheidbarkeit wegen – oft auch als „Kronecker Delta“ oder Einheitsimpuls bezeichnet.

Wenn nun ein lineares, zeitinvariantes System eben so angeregt wird, erhält man am Ausgang dessen Impulsantwort. Mit diesem Wissen ist es möglich, die Antwort des Systems auf jegliche Art der Anregung zu berechnen. Mathematisch werden die drei Größen durch die Faltungsoperation verbunden.

$$y(t) = x(t) * h(t)$$

$y(t)$  ..... Ausgangssignal  
 $x(t)$  ..... Eingangssignal  
 $h(t)$  ..... Impulsantwort

Die Faltung ist eine Rechenvorschrift, die vollständig beschrieben wie folgt aussieht:

zeitkontinuierlich:  $y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot h(t - \tau) \cdot d\tau$

zeitdiskret:  $y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} x[m] \cdot h[n - m]$

Alternativ kann diese Berechnung auch im Frequenzbereich erfolgen, wodurch die aufwendige Faltung zu einer einfachen Multiplikation wird.

zeitkontinuierlich:  $Y(j\omega) = X(j\omega) \cdot H(j\omega)$

zeitdiskret:  $Y(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega}) \cdot H(e^{j\omega})$

Im Falle von endlichen Signallängen ändern sich die Formeln ein wenig (hier nur im zeitdiskreten Fall gezeigt).

$$x[n] * h[n] \rightarrow x[n] \overset{N}{*} h[n] \quad \text{und} \quad X(e^{j\omega}) \cdot H(e^{j\omega}) \rightarrow X[k] \cdot H[k]$$

Das  $N$  über dem Faltungsstern steht dabei rein als Symbol für die zirkuläre Faltung. Die Multiplikation im Frequenzbereich hat dementsprechend keine lineare, sondern eine zirkuläre Faltung im Zeitbereich zur Folge. Um die Probleme mit der zirkulären Faltung zu umgehen, müssen die Transformationen von  $x$  und  $h$  in den Frequenzbereich mit um Nullen verlängerten Signalen (zero-padding) erfolgen. Damit kann sichergestellt werden, dass das Ergebnis einer spektralen Multiplikation auch im Fall von endlichen Signallängen dem einer linearen Faltung entspricht. Hierfür haben die Signallängen jeweils mindestens  $N+L-1$  Samples zu entsprechen ( $L$  = Länge von  $x$ ,  $N$  = Länge von  $h$ ). Diese Vorgehensweise wurde auch in dieser Arbeit verwendet.

### 1.1.2 Messung

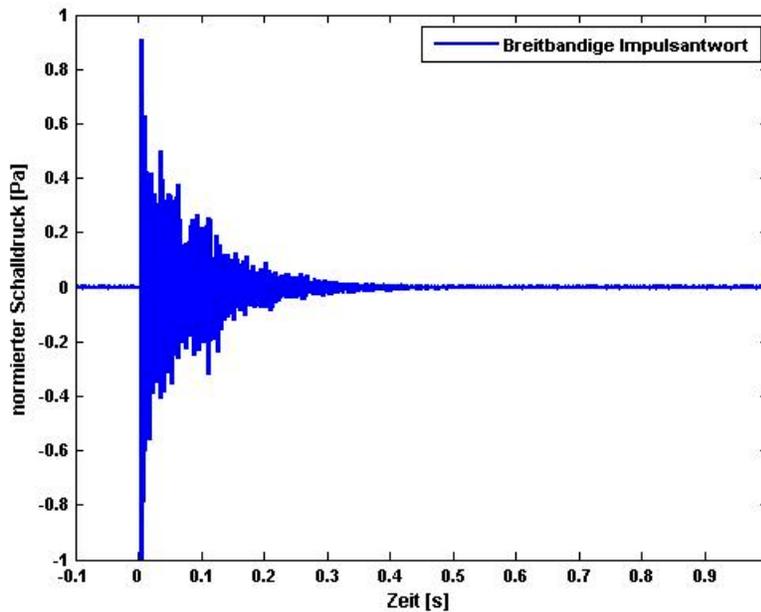


Abb. 1.1: Typischer Verlauf einer Impulsantwort, hier von einer Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

Die Messung der Impulsantwort mittels eines reinen Impulses ist nur schwer sauber durchführbar. Das Problem liegt meist im zu geringen SNR. Modernere Verfahren greifen deshalb auf MLS<sup>6</sup> und Sinus-Sweep als Raumanregung zurück. Für mehr Details dazu sei auf [5] verwiesen.

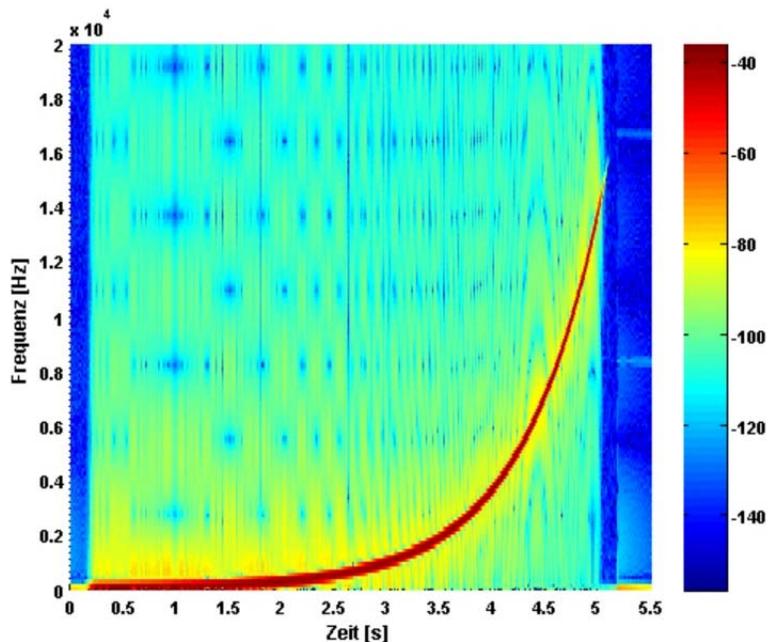


Abb. 1.2: Spektrogramm eines exponentiellen Sweeps, welcher von 20Hz bis 16kHz verläuft. Die Angaben zur Farbskala sind in dB.

<sup>6</sup> Maximum Length Sequence

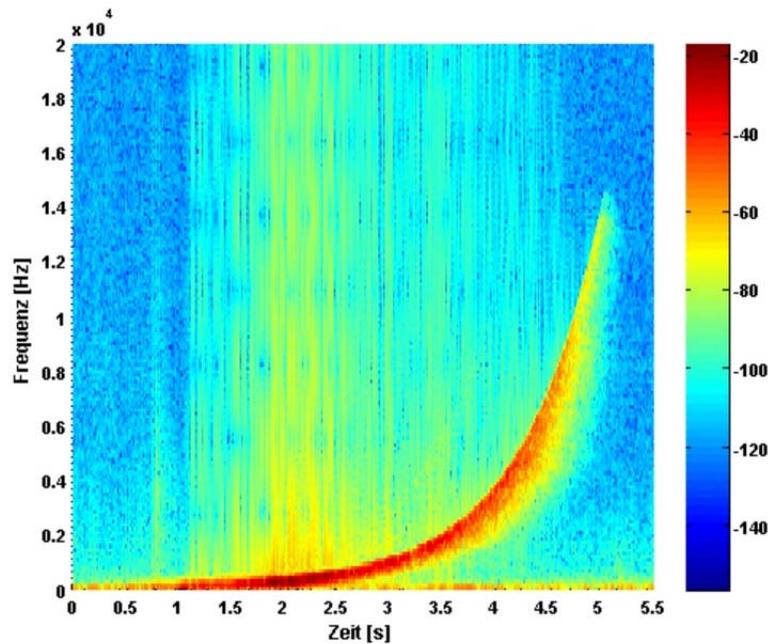


Abb. 1.3: Spektrogramm des aufgezeichneten Mikrophonsignals bei Beschallung des Raumes mit dem exponentiellen Sweep aus Abb. 1.2. Die Angaben zur Farbskala sind in dB. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

Durch entsprechende Berechnungen kann aus der Raumantwort auf diese Anregung die Impulsantwort ermittelt werden. Im Falle des Sinus-Sweeps gelingt dies durch eine Entfaltung mit dem Originalsignal. Dies kann wieder sowohl im Zeitbereich (dabei muss die gewichtete Inverse der Anregung bekannt sein), als auch im Frequenzbereich (durch einfache Division) durchgeführt werden.

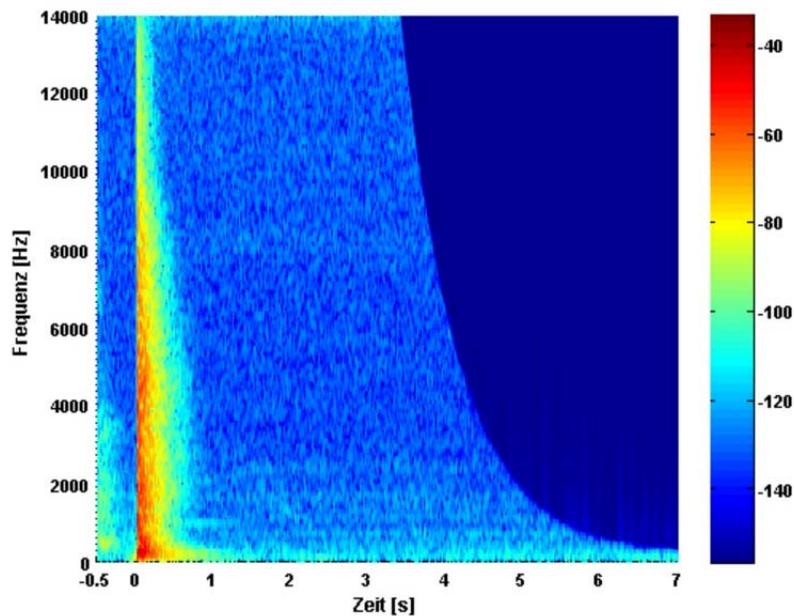


Abb. 1.4: Spektrogramm einer Impulsantwort, gemessen mit exponentiellem Sweep. Die Angaben zur Farbskala sind in dB bezogen auf den Spitzenpegel. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

In Abb. 1.4 ist beispielhaft das Ergebnis einer Entfaltung bzw. Spektraldivision dargestellt. Der Impulsbeginn liegt bei 0s. Dann folgt der Abklingvorgang, welcher übergeht in das Rauschen des Raumes. Der dunkelblaue Bereich rechts entsteht durch das zero-padding. Der Übergang zwischen Rauschen und „Nullbereich“ ist frequenzabhängig. Es ergibt sich bei jeder Frequenz eine Rauschfahne mit der selben Dauer, welche nach dem Zeitpunkt des Abspielens dieser Frequenz während der Messung noch aufgezeichnet wurde. So wurde z.B. bei der obigen Messung, nach Erklängen des 2kHz Tons, noch ca. 5s aufgenommen.

Man könnte sich die Wirkung der Entfaltung (Spektraldivision) auch als Aufeinander-schieben des in der Raumantwort (bei Anregung mit einem Sinus-Sweep) zeitlich zerdehnten Abklingvorganges vorstellen. Die Abklingvorgänge, welche im aufgezeichneten Raumsignal noch über die Frequenz zeitlich versetzt beginnen (siehe Abb. 1.3), werden durch die Entfaltung auf den selben Startzeitpunkt zusammen geschoben (siehe Abb. 1.4). Damit entspricht das Ergebnis (innerhalb des angeregten Frequenzbereiches) dem einer Impulsanregung.

Der helle Bereich links unten (vor 0s) ist Teil der Impulsantwort der ersten harmonischen Verzerrung. Die Impulsantworten der höheren Verzerrungen liegen noch weiter im nicht dargestellten negativen Zeitbereich. Dies ist eine weitere Eigenschaft der Impulsantwortmessung mit logarithmischen Sinus-Sweeps [7, 6]. Somit werden Verzerrungen – welche z.B. beim Lautsprecher auftreten – vom eigentlichen Anregungssignal getrennt und haben auf die weitere Verarbeitung keinen Einfluss. Dies ist zulässig und erforderlich, da im relevanten Dynamikbereich jeder Raum als lineares System betrachtet werden kann. Daher sind auftretende harmonische Verzerrungen Fehler der restlichen Komponenten und sollten nicht in das Messergebnis mit einfließen.

## 1.2 Nachhallzeit

Für die Nachhallzeit werden in der Akustik verschiedene Bezeichnungen verwendet ( $T_{60}$ ,  $T_{30}$ ,  $T_{20}$ ). Allen ist gemein, dass sie die Zeit bezeichnen, welche der Schall in einem Raum braucht, um nach dem Abschalten 60dB abzufallen. Die unterschiedlichen Zahlen geben jeweils nur den Messbereich an. Wobei in jedem Fall von -5dB weg gemessen wird. Z.B. wird für  $T_{20}$  von -5 auf -25dB gemessen und dann auf einen Abfall von insgesamt 60dB extrapoliert.

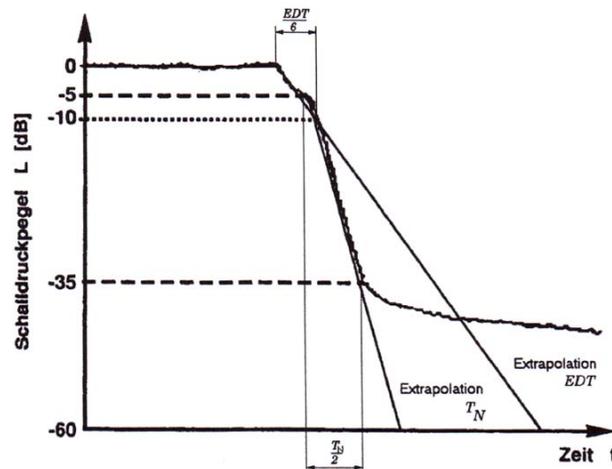


Abb. 1.5: Typischer Abklingvorgang bei einer Nachhallzeitmessung.  $T_N$  entspricht  $T_{30}$ . [10]

Die Nachhallzeit kann sowohl in Oktaven als auch in Terzen gemessen und angegeben werden. Für den Einzahlwert (z.B.  $T_{30}$ ) wird jedoch lediglich über die beiden Mittenoktaven 500 und 1000Hz gemittelt. Bei der Messung in Terzen erfolgt die Mittelung entsprechend von 400 bis 1250Hz. Eine direkte Bestimmung aus dem Summensignal ist nicht zu empfehlen. Durch den nicht idealen Frequenzgang des Lautsprechers wird die Abklingkurve primär nach den Abklingvorgängen der stark vertretenen Frequenzbereiche geformt. Durch das Filtern in Terzen bzw. Oktaven und der nachfolgenden Mittelwertbildung erfolgt ein Angleichen der einzelnen Bänder, welches einen vom Lautsprecherfrequenzgang unabhängigeren Einzahlwert liefert.

### 1.2.1 Messung mit abgeschaltetem Rauschen

Um die Nachhallzeit zu messen, wird beim klassischen Verfahren ein Raum mit Rauschen angeregt, welches abgeschaltet wird. Der sich ergebende Schallpegel des Nachhalls wird aufgezeichnet und über mehrere Durchgänge gemittelt. Dieses Verfahren hat das gleiche Problem wie die direkte Impulsantwortmessung, der SNR ist eher gering und die Ergebnisse sind schlecht reproduzierbar.

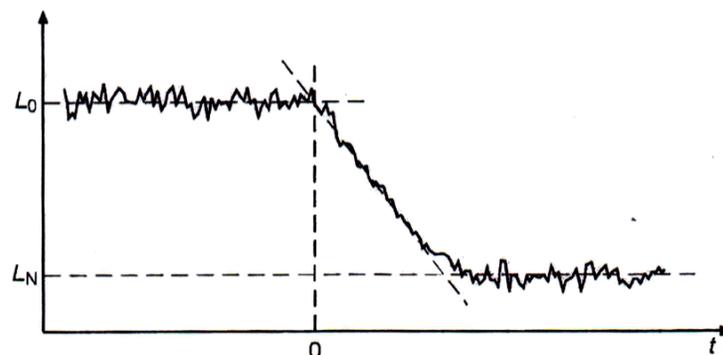


Abb. 1.6: Typischer Verlauf des Schallpegels bei der Messung der Nachhallzeit mit abgeschaltetem Rauschen.  $L_0$  = Pegel bei aktiver Messrauschquelle,  $L_N$  = Ruhepegel im Raum. [2]

### 1.2.2 Messung mittels Impulsantwort – Rückwärtsintegration

Die moderneren Verfahren (Sinus-Sweep und MLS) liefern als (indirektes) Ergebnis die Impulsantwort des vermessenen Systems. Es ist mit ihnen möglich größere SNR-Werte zu erreichen als es mit der direkten Impulsanregung möglich wäre. Um nun aus dieser Impulsantwort, welche immer der Verlauf einer Feldgröße ist, einen Energie- bzw. Leistungsverlauf zu bekommen, muss die Impulsantwort zuerst über eine Quadrierung in einen Leistungsverlauf umgerechnet werden. Falls man nun eine Energieabklingkurve erhalten möchte, welche zu jedem Zeitpunkt die noch im Raum enthaltene akustische Energie angibt, muss der Leistungsverlauf rückwärtsintegriert werden.

$$E(t) = \int_t^{\infty} h^2(\tau) \cdot d\tau \quad \text{bzw.} \quad E(n) = \sum_{m=n}^{\infty} h^2(m)$$

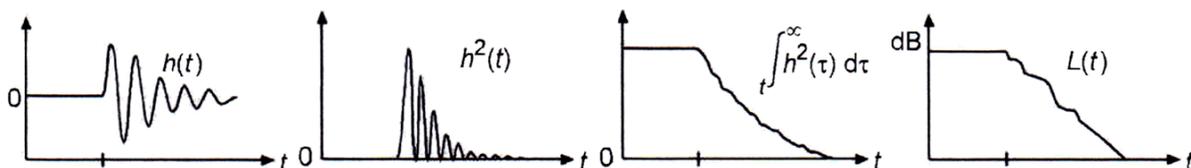


Abb. 1.7: Veranschaulichung des Weges von der Impulsantwort  $h(t)$  über die Momentanleistung  $h^2(t)$ , mittels Rückwärtsintegration zur Energie und zu guter Letzt bis zur Abklingkurve  $L(t)$  in dB. [2]

Durch die Integration entsteht unter anderem eine Glättung des Verlaufs. Die Abklinggerade kann daher leichter in den, in dB dargestellten, Energieverlauf eingepasst werden.

### 1.3 Weitere raumakustische Gütemaße

Neben der Nachhallzeit werden in der Akustik etliche weitere Gütemaße zur Beschreibung von Räumen verwendet [1, 4]. Hier wird nur auf die wichtigsten, welche auch in der implementierten Messung berechnet werden, kurz eingegangen. Bei den meisten Maßen handelt es sich um Einzahlgrößen, welche über die beiden Mittenoktaven (500 und 1000Hz) berechnet werden. Alternativ kann die Mittelung auch über die Terzen von 400 bis 1250Hz erfolgen.

#### Early Decay Time – EDT

Sie beziffert den unmittelbaren Abfall der Abklingkurve zu Beginn (0dB) bis -10dB, extrapoliert auf -60dB (siehe Abb. 1.5). Auch diese Größe kann als Einzahlwert angegeben werden. In diesem Fall ist eine Darstellung über die Terzbänder allerdings aussagekräftiger.

**Deutlichkeits-/Klarheitsmaß –  $C_{50}/C_{80}$  (Clarity)**

Dies ist eine Beschreibung für die Deutlichkeit von Sprache bzw. die Klarheit von Musik in einem Raum. Dazu wird das Verhältnis von frühem zu spätem Schall herangezogen und in dB angegeben. Für Sprache liegt die Zeitgrenze bei 50ms, für Musik bei 80ms.

$$C_{50} = 10 \cdot \log \left( \frac{\int_0^{50ms} h^2(t) \cdot dt}{\int_{50ms}^{\infty} h^2(t) \cdot dt} \right) \quad \text{bzw.} \quad C_{80} = 10 \cdot \log \left( \frac{\int_0^{80ms} h^2(t) \cdot dt}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(t) \cdot dt} \right)$$

**Deutlichkeitsgrad –  $D_{50}$** 

Dies entspricht in etwa dem Deutlichkeitsmaß. Jedoch wird in diesem Fall der frühe Schall ins Verhältnis zum Gesamtschall gesetzt und als Prozentzahl (nicht in dB) angegeben.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} h^2(t) \cdot dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) \cdot dt} \quad \text{bzw.} \quad D_{50} = \frac{10^{\frac{C_{50}}{10}}}{1 + 10^{\frac{C_{50}}{10}}}$$

**Bassverhältnis – BR (Bass ratio)**

Es beschreibt das Verhältnis der Nachhallzeiten vom Bass- zum Mittenbereich.

$$BR = \frac{T(125\text{Hz}) + T(250\text{Hz})}{T(500\text{Hz}) + T(1000\text{Hz})}$$

## 2 Praktische Vorgaben

Ziel war es, eine Nachhallzeitmessung mit Sinus-Sweep auf dem gegebenen Messsystem (s.u.) zu implementieren. Als Resultat sollen  $T_{20}$ ,  $T_{30}$  und  $EDT$  (jeweils in Terzbändern und als Einzahlwert), sowie  $C_{50}$ ,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$  und  $BR$  (als Einzahlwert) ausgegeben werden.

In weiterer Folge wird kurz die Ausgangslage umrissen. Dabei werden das Messsystem, der Messablauf, sowie die zuständigen Normen kurz beschrieben. Auch auf den bei der Messung möglichen Frequenzbereich wird kurz eingegangen.

### 2.1 Das Messsystem

Das Messsystem besteht zum einen aus dem PAK Mobile MKII von Müller BBM<sup>7</sup> und der zugehörigen Software PAK<sup>8</sup>, zum anderen aus dem Dodekaederlautsprecher Nor276 mit zugehörigem Verstärker Nor280 von Norsonic<sup>9</sup>. Die Software läuft auf einem Lenovo ThinkPad<sup>10</sup> Laptop mit Windows 7<sup>11</sup>. Abgespielt werden die Anregungssignale entweder über die interne Soundkarte des Laptops 20672 SmartAudio HD von Conexant<sup>12</sup> oder über das RME<sup>13</sup> Fireface 400. Als Mikrofon wird das 46AE Halb Zoll-Freifeldmikrofon von G.R.A.S<sup>14</sup> verwendet. Um das Anregungssignal sowohl über den Raum als auch direkt aufzeichnen zu können, wird das Signal mit einem T-Stück gesplittet und sowohl auf den Verstärker (und Lautsprecher) als auch direkt in das PAK Mobile MKII weitergeleitet.

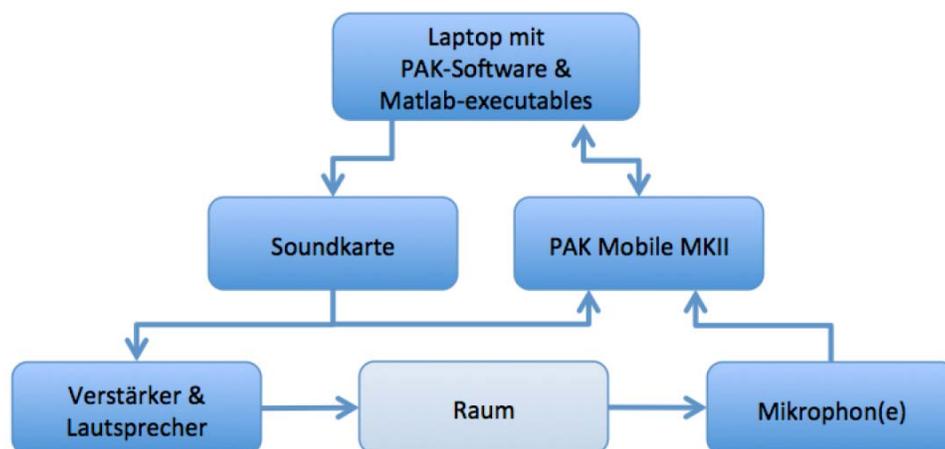


Abb. 2.1: Übersicht über den Aufbau der Messung. Als Soundkarte kann wahlweise die interne des Laptops oder das RME Fireface 400 verwendet werden.

<sup>7</sup> Müller BBM, Planegg/München, Deutschland

<sup>8</sup> PAK 5.7, Service Release 3

<sup>9</sup> Norsonic AS, Lierskogen, Norwegen

<sup>10</sup> ThinkPad W520, lenovo Group, Raleigh, USA

<sup>11</sup> Windows 7, Service Pack 1, Microsoft Corporation, Redmond, Washington, USA

<sup>12</sup> Conexant, Newport Beach, CA, USA

<sup>13</sup> RME Audio, Haimhausen, Deutschland

<sup>14</sup> G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, Holte, Dänemark

## 2.2 Der Messablauf

Nach dem Aufbau und Anschließen der Gerätschaften wird der Raum mit einem Sinus-Sweep beschallt. Währenddessen erfolgt die Aufnahme des/der Mikrophonsignals/e, sowie des Quellsignals. Die aufgezeichneten Daten werden dann an eine in Matlab<sup>15</sup> geschriebene Funktion übergeben. Dort wird die Impulsantwort berechnet, und das Signal in Terzbänder aufgeteilt. Innerhalb jedes Terzbandes wird nun der relevante Teil der Impulsantwort ermittelt und davon die Abklingkurve berechnet. Aus dieser lassen sich in weiterer Folge alle relevanten raumakustischen Gütemaße ermitteln. Zu guter Letzt werden die ermittelten Daten wieder zurück nach PAK übergeben und dort zur Anzeige gebracht.

## 2.3 Zuständige Normen

Da es Ziel war, eine möglichst normgerechte Messung zu implementieren, welche vergleichbare Ergebnisse liefert, mussten die Vorgaben in den Normen beachtet werden. Relevant für dieses Projekt waren die Normen EN ISO 3382, EN ISO 18223 und EN IEC 61260 [1, 2, 3].

In der ersten wird allgemein die Nachhallzeitmessung beschrieben. Dabei wird sowohl das Verfahren mit abgeschaltetem Rauschen, als auch jenes mit der Rückwärtsintegration der Impulsantwort erläutert. Weiters findet sich dort die Messbeschreibung (erforderliche Anzahl und Positionierung von den Mikrofonen und der Quelle), die verschiedenen Genauigkeitsklassen und Angaben zum Messfehler.

In der zweiten wird auf die neuen Messverfahren (MLS und Sinus-Sweep) eingegangen und deren Theorie erklärt.

Die letzte beschreibt die Auflagen an Oktav- und Terzbandfilter.

Etwaige Abweichungen der Implementation von den Vorgaben werden an passender Stelle aufgezeigt.

---

<sup>15</sup> Matlab, v. 7.13.0.564 (R2011b), MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, USA

## 2.4 Frequenzbereich der Nachhallzeitmessung

Der Idealfall einer Nachhallzeitmessung über den gesamten Hörfrequenzbereich kann aufgrund der realen Lautsprecher nicht erreicht werden. Das Limit wird sowohl durch den nichtlinearen Frequenzgang als auch durch das diskontinuierliche Abstrahlverhalten gesetzt. Der Extremfall einer real erreichbaren Nachhallzeitmessung wäre eine Messung von 50Hz bis 10kHz. Dies wurde zu Beginn angestrebt. Im Laufe der Entwicklung stellte sich heraus, dass die unterste Oktave, welche die Terzbänder 50, 63 und 80Hz beinhaltet, nicht haltbar ist. Dies liegt an den Terzbandfiltern, welche im tiefen Frequenzbereich eine sehr starke Impulsaufweitung bewirken. Dadurch entstehen zu lange Abklingvorgänge, welche zu groß gemessene Nachhallzeiten ergeben (siehe Kap. 3.8.3). Weiters führt diese Aufweitung zur Abflachung der Impulse, was eine Reduktion der Signal-Rauschabstände zur Folge hat. Dadurch ist in den tiefen Terzbändern viel früher mit einer Nichterfüllung der Normanforderungen an den SNR zu rechnen als bei den höheren. Aus diesen Gründen wurde auf eine Nachhallzeitmessung in Terzen unterhalb von 100Hz verzichtet.

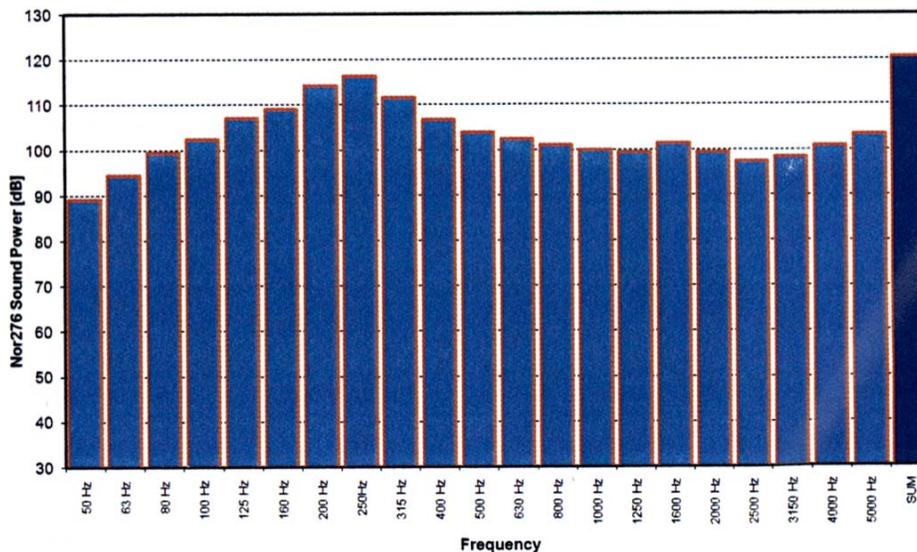


Abb. 2.2: Frequenzgang des Lautsprechers mit aktiviertem Equalizer und rosa Rauschen.<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Dodekaederlautsprecher Nor276, Norsonic.



### 3 Entwicklung der Messablaufsteuerung

In diesem Kapitel wird die eigentliche Arbeit beschrieben. Dabei wird auf die auftretenden Schwierigkeiten eingegangen und die verschiedenen Lösungen werden betrachtet. Dieses Kapitel wird – der Übersicht halber – in etwa dem Signalfluss folgen. Nebenthemen werden an passender Stelle angeführt.

#### 3.1 Übersicht über den Signalfluss

Die folgende Grafik soll einen Überblick über den Verlauf der Daten sowie die Bearbeitungsschritte geben.

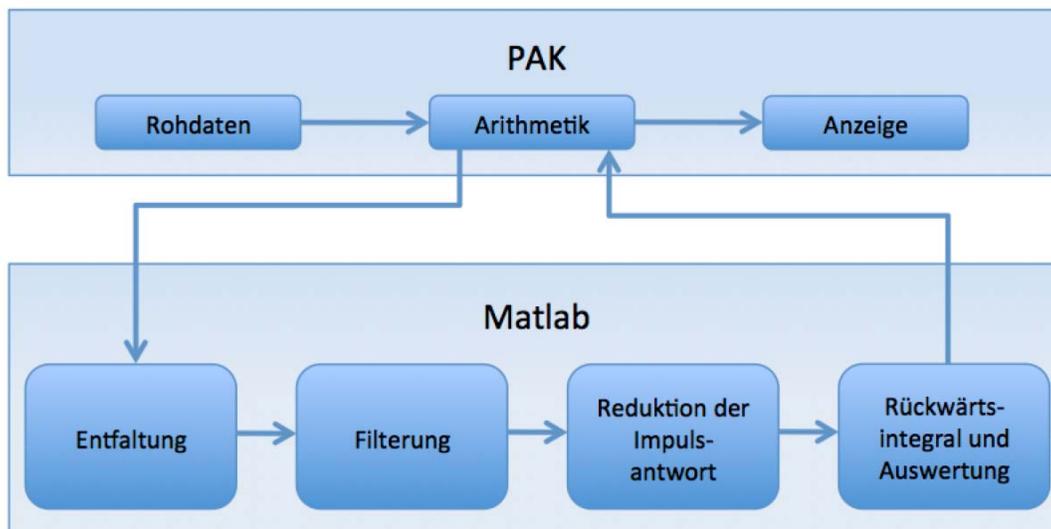


Abb. 3.1: Übersicht über die Verarbeitung der Daten.

#### 3.2 PAK-Software

Zu Beginn der Arbeit war eine Einarbeitung in die PAK-Software notwendig. Dabei ging es sowohl um das Abstecken der Möglichkeiten des Programms für dieses Projekt, als auch um ein generelles Verständnis der Abläufe und Arbeitsphilosophie.

Um die notwendigen Berechnungen durchführen zu können, wurde auf Matlab ausgewichen. Die Möglichkeit dieser Schnittstelle wird innerhalb der Arithmetik geboten. Diese ist eine Berechnungssoftware, welche es ermöglicht, kleine Berechnungen innerhalb von PAK zu tätigen. Von dort aus können auch Daten auf die Festplatte geschrieben, Programme aufgerufen und Daten wieder eingelesen werden.

Da diese Arbeit die erste an der TU Graz war, welche sich mit diesem Messsystem beschäftigte war die Evaluierung dieser Schnittstelle auch indirekt Teil dieser Arbeit.

Die Arithmetik muss für jede Funktion, welche dargestellt werden soll, aufs Neue aufgerufen werden. Daher war es auch notwendig eine Systematik zu entwickeln, um auf bereits berechnete Ergebnisse zurückgreifen zu können. Die einfachste Lösung stellte

das Zusammenfassen aller Bearbeitungsschritte in einer Funktion dar. Innerhalb dieser werden alle notwendigen Berechnungen durchgeführt und alle Ergebnisse auf die Festplatte geschrieben. Die folgenden Arithmetikaufrufe dienen lediglich dem Einlesen und Darstellen der unterschiedlichen Ergebnisse.

### 3.3 Support von Müller BBM

Im weiteren Verlauf war es hin und wieder von Nöten den Support zu kontaktieren, da die Lösung mancher Probleme alleine nicht möglich schien. Generell ist der Support von Müller BBM uneingeschränkt weiterzuempfehlen. Alle Mitarbeiter der Firma, mit welchen teils kurzer, teils längerer Kontakt – jeweils telefonisch als auch via Email – bestand, waren sehr freundlich und äußerst hilfsbereit. Als häufigster Ansprechpartner stellte sich Dr. Dejan Arsić heraus, welcher sich mit der Schnittstelle zu Matlab sehr gut auskannte. Im weiteren Verlauf konnten über diesen Kontakt diverse Fragen beantwortet werden.

### 3.4 Schnittstelle zwischen PAK und MATLAB

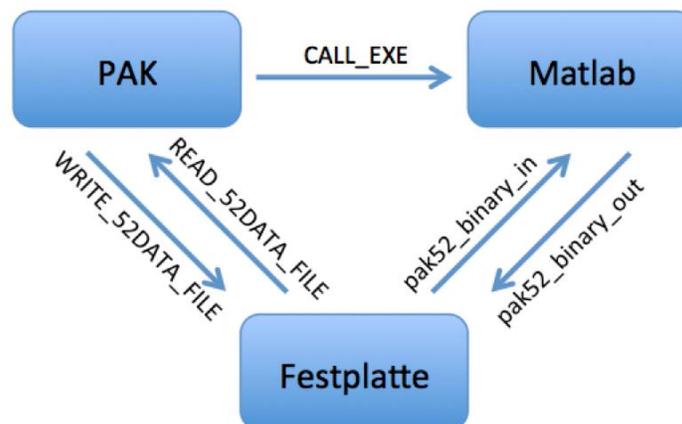


Abb. 3.2: Übersicht über den Datenaustausch zwischen PAK und einer Matlabfunktion.

Innerhalb der Arithmetik kann man mittels des `WRITE_52DATA_FILE`-Befehls Daten aus PAK auf einen beliebigen Ort auf der Festplatte schreiben. Die Daten liegen dann wahlweise im PAK-Binärdatenformat oder als ASCII-Zeichen vor und können von jedweder anderen Software eingelesen werden. Dabei ist lediglich zu wissen, wie man diese Formate einzulesen hat.

Die ASCII-Zeichen können von Matlab sehr unkompliziert mit dem Befehl `load` gelesen werden. Daher schien dies das Mittel der Wahl. Jedoch ist PAK sehr langsam beim Erstellen dieses Datentyps.

Alternativ kann man auch versuchen den PAK-Binärdatensatz in Matlab einzulesen. Dies erfordert allerdings eine genaue Kenntnis über den Aufbau dieser Datei. Dieser lässt sich leider nirgends in der Hilfe finden. Ein weiteres Problem ergibt sich beim Wiedereinlesen, denn hierbei müssen die Daten im PAK-Binärdatenformat vorliegen.

PAK stellt jedoch etliche C-Funktionen zur Verfügung, welche es dem Benutzer allgemein erleichtern sollten, PAK-Binärdaten außerhalb von PAK zu verwalten. Leider bieten

diese keine direkte Hilfestellung für die Schnittstelle zu Matlab. Auch war es nicht Sinn und Zweck dieser Arbeit, C zu programmieren, weshalb es zur Kontaktaufnahme mit dem Support von Müller BBM kam.

Die Lösung brachten zwei Matlabfunktionen, welche von Müller BBM zur Verfügung gestellt wurden. Dabei handelte es sich um eine Lesefunktion (*pak52\_binary\_in*), welche PAK-Binärdaten in Matlab einliest und sie für die aufrufende Funktion zur Verfügung stellt. Die Zweite war eine Schreibfunktion (*pak52\_binary\_out*), welche aus gegebenen Daten einen PAK-Binärdatensatz erstellt und abspeichert, um ihn mit PAK wieder einlesen zu können. Mithilfe dieser beiden Funktionen war nun ein recht unkompliziertes Austauschen der Daten zwischen Matlab und PAK möglich.

Der Programmaufruf der Matlabanwendung in PAK muss über den Befehl `CALL_EXE` geschehen. Als Aufrufparameter in PAK werden dabei der Dateipfad der Matlabanwendung, sowie andere Ein- und Ausgabepfade für Daten übergeben. Auch das Übergeben einfacher Parameter ist möglich. Diese Informationen müssen jeweils als IN, OUT, oder PARAM bezeichnet werden.

Wichtig zu wissen ist, dass das aufzurufende Matlab executable alle Aufrufparameter (egal ob mit IN, OUT, oder PARAM bezeichnet) als gleichwertige Eingabeparameter bekommt. Die Unterscheidung beim Aufruf betrifft lediglich wie PAK die Daten behandelt. Bei IN und OUT werden bei Bedarf die relativen Pfade in absolute umgewandelt (als Bezug gilt der unter Extras/Optionen/Analysen/Arithmetik angegebene Pfad). Die als Output deklarierten Daten werden vor dem Programmaufruf gelöscht (falls vorhanden), um dem Benutzer nicht alte Daten, im Falle eines Fehlers, als Ergebnis zu präsentieren.

Eingelesen werden die berechneten Ergebnisfiles zu guter Letzt mit der Funktion `READ_52DATA_FILE`, welche nur das PAK-Binärdatenformat akzeptiert. Da PAK intern alle Dateien mit den zugehörigen physikalischen Messgrößen sowie Einheiten verarbeitet, ist die Angabe derselben beim Einlesen der Daten notwendig.

### 3.5 Erstellen eines Matlab executables

Um von PAK aus aufgerufen werden zu können, muss es sich bei der Matlabanwendung um eine eigenständige exe-Datei handeln. Dies bedeutet, dass jedwede Matlabfunktion zu einem eigenständigen Programm kompiliert werden muss. Der dazu notwendige Befehl heißt *mcc*. Dazu muss ein entsprechender Compiler am Rechner installiert sein. Näheres dazu findet sich in der Matlab-Hilfe.

### 3.6 Berechnung der Impulsantwort

Angekommen in der Matlabanwendung, werden die Audiofiles eingelesen. Dabei ist wichtig, dass sowohl das Mikrophonsignal, als auch das Quellsignal – welches aus der Soundkarte direkt in den Input der Hardware zurück geführt wurde – mit aufgenommen und übergeben wird. Die Raumimpulsantwort errechnet sich nun als Übertragungsfunktion zwischen Antwort und Anregung. Aus Gründen der Zeiteffizienz wurde keine Entfaltung im Zeitbereich, sondern eine Division im Frequenzbereich implementiert. Die jeweiligen Transformationen werden so durchgeführt, dass das Ergebnis einer linearen Entfaltung und nicht einer zirkulären entspricht (siehe auch Kap. 1.1.1).

### 3.7 Konditionierung der Impulsantwort

Um Fehlern und Ungenauigkeiten bei den nachfolgenden Auswertungen der gemessenen Impulsantworten vorzubeugen, wurden zwei Arten der Konditionierung getestet.

#### 3.7.1 Filterung (Frequenzbereich)

Probleme ergeben sich für die Berechnung der Raumimpulsantwort aufgrund der „Beinahe-Nullstellen“ im Spektrum des Direktsignals überall dort, wo es kein Nutzsignal gibt. Es kommt so zur Division durch 0 (bzw. einer sehr kleinen Zahl). Das Ergebnis ist ein sehr hoher Rauschanteil im ungenutzten Frequenzbereich (außerhalb der Sweepfrequenzen). Bei der Darstellung im Zeitbereich verdeckt dieses Rauschen das Nutzsignal beinahe vollständig. Daher erschien eine Vorfilterung der Impulsantwort – unabhängig von der weiteren Verarbeitung – sinnvoll.

Diese Problematik kann auch nicht durch die Verwendung einer Entfaltung im Zeitbereich (anstelle der Spektraldivision) umgangen werden. Die beiden Operationen sind bei korrektem Zero-padding ident (siehe Kap. 1.1.1).

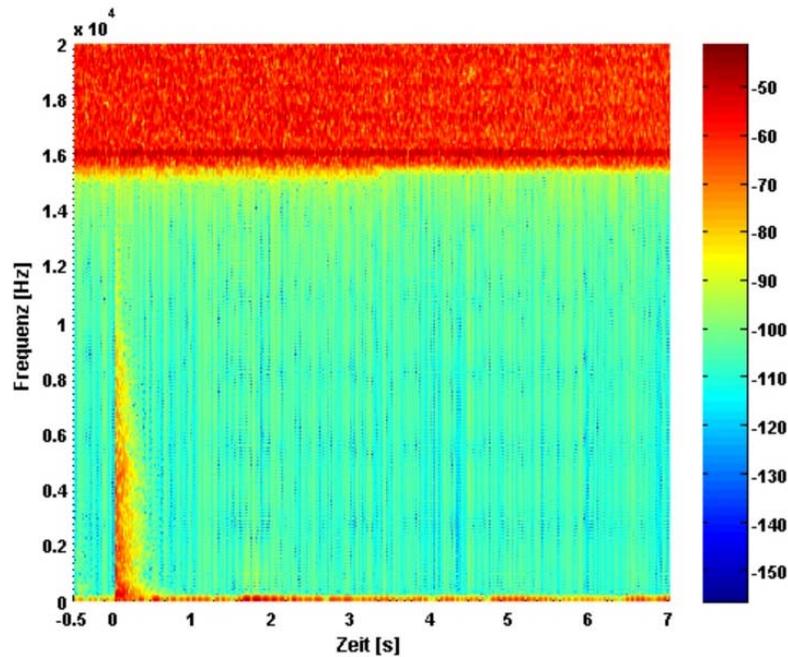


Abb. 3.3: Spektrogramm einer ungefilterten Impulsantwort. Der Frequenzbereich des Sweeps ging von 20Hz bis 16kHz. Die Angaben zur Farbskala sind in dB bezogen auf den Spitzenpegel. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

Eine einfache Lösung des Problems stellt die Filterung im Frequenzbereich dar; im primitivsten Fall ein hartes Abschneiden der Störfrequenzen. Dies kann direkt mittels Nullsetzen geschehen. Das Problem dieses Vorgehens liegt dann allerdings im Zeitbereich. Die Filterung mit einem idealen Rechteckfilter hat im Zeitbereich die Faltung mit einer Sinc-Funktion zur Folge. Optisch fällt dies nicht auf, jedoch stellte sich im weiteren Verlauf der Berechnungen heraus, dass dieser Nebeneffekt die Messung des tiefsten und höchsten Terzbandes (100Hz und 10kHz) negativ beeinflusste.

Glücklicherweise sind die nachfolgenden Terzbandfilter (siehe Kap. 3.8) alleine steilflankig genug, um eine spektrale Filterung der breitbandigen Raumimpulsantwort im Vorhinein nicht zu benötigen. Daher wurde auf diese gänzlich verzichtet.

### 3.7.2 Fensterung (Zeitbereich)

Aufgrund des Fehlens eines Ein- und Ausfade-Vorgangs kam es bei den terzbandgefilterten Raumimpulsantworten am Beginn und am Ende zu Artefakten. Diese machten sich primär in den hohen Terzbändern – ab etlichen kHz – bemerkbar und verfälschten dort das Messergebnis. Um dies zu vermeiden wird die breitbandige ungefilterte Impulsantwort noch vor der Terzbandfilterung Ein- und Ausgefadet. Um vor dem Impulsbeginn genügend Audiomaterial zu haben, wird die Impulsantwort zirkulär um 10ms nach hinten geschiftet. Dadurch kommt der hinten rausgeschobene Teil vorne hinzu; dieser Bereich wird anschließend mit einem halben von-Hann-Fenster beaufschlagt. Das Ausfaden passiert über Multiplikation mit der zweiten Hälfte des von-Hann-Fensters am Ende der geschifteten Impulsantwort. Die Länge des Fensters sowie der Rotation wurde empirisch bestimmt. Diese Bearbeitung reicht aus, um die starken Einschwingvorgänge bei der folgenden Filterung (siehe Kap. 3.8) einzudämmen.

### 3.8 Filterung für die Terzbandanalyse

Um eine normgerechte Terzbandanalyse gewährleisten zu können, mussten die strikten Vorgaben laut Norm [1, 3] erfüllt werden.

#### 3.8.1 Vorgaben der Norm

Die dafür zuständige Norm ist die EN IEC 61260 [3]; in ihr ist der einzuhaltende Frequenzgang angegeben.

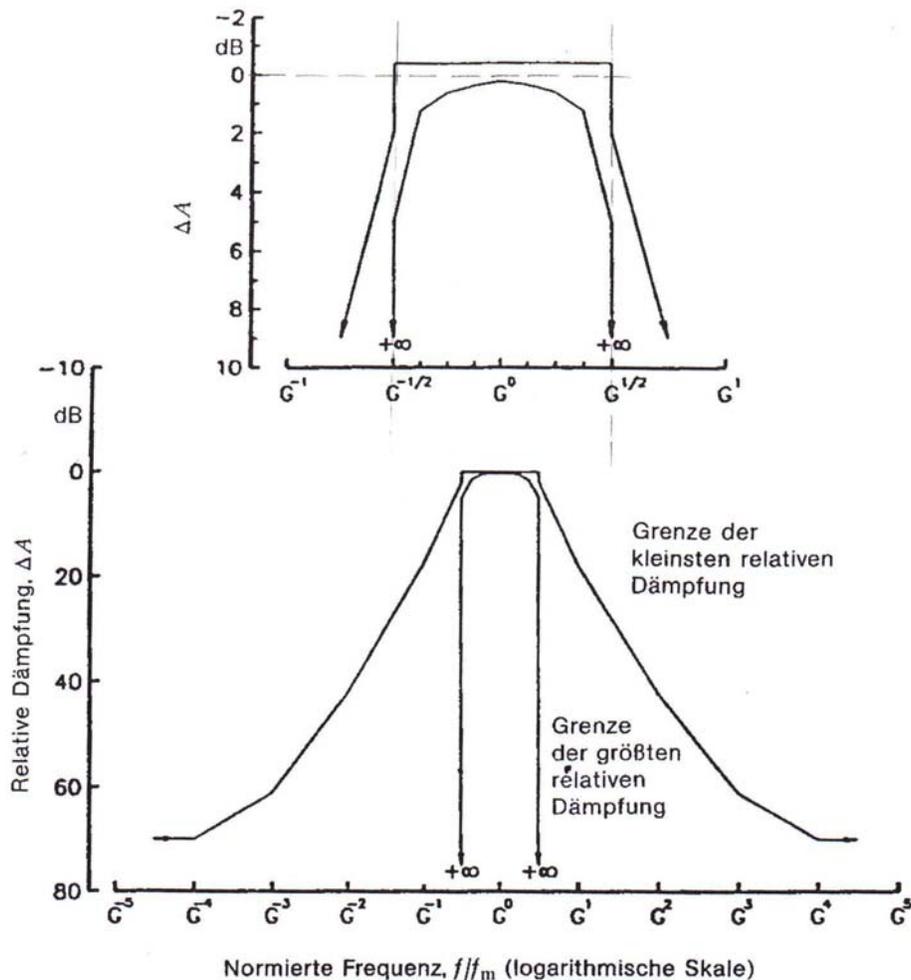


Abb. 3.4: Grenzen des Frequenzgangs eines normierten Oktavbandfilters laut Norm 61260 [3]. Die obere Abbildung zeigt im Detail den Bereich um die Mittenfrequenz, während die untere einen Überblick über einen größeren Frequenzbereich gibt.  $G$  entspricht dem Oktavverhältnis und wird üblicherweise mit 2 beziffert. Laut Norm ist auch  $G = 10^{3/10} = 1,995..$  möglich. Die Abbildung gilt in skalierten Versionen ebenso für die Terzbandfilter.

Normierte Frequenz $f/f_m$ für $\Omega_h$ und $\Omega_l$		Grenzen der kleinsten und größten Dämpfung dB		
Basis zehn	Basis zwei	Filterklasse		
		0	1	2
1,00000	1,00000	-0,15; +0,15	-0,3; +0,3	-0,5; +0,5
1,02667	1,02676	-0,15; +0,2	-0,3; +0,4	-0,5; +0,6
0,97402	0,97394			
1,05575	1,05594	-0,15; +0,4	-0,3; +0,6	-0,5; +0,8
0,94719	0,94702			
1,08746	1,08776	-0,15; +1,1	-0,3; +1,3	-0,5; +1,6
0,91958	0,91932			
< 1,12202	< 1,12246	-0,15; +4,5 <sup>*)</sup>	-0,3; +5,0 <sup>*)</sup>	-0,5; +5,5 <sup>*)</sup>
> 0,89125	> 0,89090			
> 1,12202	> 1,12246	+2,3; +4,5 <sup>*)</sup>	+2,0; +5,0 <sup>*)</sup>	+1,6; +5,5 <sup>*)</sup>
< 0,89125	< 0,89090			
1,29437	1,29565	+18,0; +∞	+17,5; +∞	+16,5; +∞
0,77257	0,77181			
1,88173	1,88695	+42,5; +∞	+42; +∞	+41; +∞
0,53143	0,52996			
3,05365	3,06955	+62; +∞	+61; +∞	+55; +∞
0,32748	0,32578			
≥ 5,39195	≥ 5,43474	+75; +∞	+70; +∞	+60; +∞
≤ 0,18546	≤ 0,18400			

<sup>\*)</sup> Für Frequenzen, die kleiner als die untere Bandedeckfrequenz und größer als die obere Bandedeckfrequenz sind, ist die Grenze der größten relativen Dämpfung +∞, siehe Bild 1.

Abb. 3.5: Tabelle mit den Anforderungen an den Frequenzgang eines Terzbandfilters laut Norm [3]. Dabei muss die Mittenfrequenz auf 1 normiert werden. Die Frequenzachse wird entweder im Logarithmus zur Basis 2 oder zur Basis  $10^{3/10}$  dargestellt (s.o.). Je nachdem ist die entsprechende Spalte links für die Position der Auswertungen zu verwenden.  $\Omega_h$  entspricht einer normierten hohen Frequenz ( $> 1$ ) und  $\Omega_l$  einer normierten tiefen Frequenz ( $< 1$ ); sie sind jeweils über/unter einer strichlierten Line angeordnet.

Die Anforderungen an die Filterklasse 0 sind nur mit hohen Filtergüten (bei Butterworth-Filtern ab ca. 14. Ordnung) einzuhalten. Bei dieser Größenordnung werden allerdings bei den tiefen Frequenzbändern die Gruppenlaufzeiten und Impulsaufweitungen sehr groß. Für die Nachhallzeiten bedeutet dies, dass tendenziell ein immer leicht zu hoher Wert ermittelt wird (siehe auch Kap. 3.8.3). Dies kann leider nicht generell kompensiert werden.

Bei der Berechnung von  $C_{50}$ ,  $C_{80}$  und  $D_{50}$  muss den Nebenwirkungen der Filter aufgrund der sehr kleinen Zeitfenster besondere Beachtung geschenkt werden (siehe auch Kap. 3.11). Aufgrund der Impulsaufweitung kommt es zu einer Veränderung des Verhältnisses zwischen früher und später Schallenergie. Die Norm gibt zwei Möglichkeiten an dies zu kompensieren.

Im einen Fall wird zuerst die breitbandige Raumimpulsantwort (vor der Filterung) an der entsprechenden Zeitgrenze (50ms oder 80ms) geschnitten und dann separat gefiltert, im anderen wird zuerst gefiltert und dann jeweils pro Terzband eine neue Zeitgrenze

ermittelt (s.u.). In diesem Projekt wurde die zweite Methode implementiert. Die entsprechende Stelle in der Norm lautet (siehe auch Abb. 3.6):

*Wenn die Raumimpulsantwort zunächst in Oktavbändern gefiltert wird, sollte der Integrations-Beginn in den Gleichungen [...] (Anm: siehe Kap 1.3) als derjenige Punkt bestimmt werden, wo sich das gefilterte Signal deutlich aus dem Störpegel abhebt, jedoch mindestens 20dB unter dem Maximalwert liegt. Das frühe Zeitintervall  $t_e$  (Anm.: 50ms oder 80ms) muss an diesem Triggerpunkt beginnen und  $t_e$  Sekunden vermehrt um die halbe Verzögerungszeit des Filters andauern. Das späte Zeitintervall sollte am Zeitpunkt  $t_e$  in Sekunden, vermehrt um die halbe Verzögerungszeit des Filters nach dem Triggerpunkt beginnen. In diesem Zusammenhang ist die Filter-Verzögerungszeit diejenige Zeit, in der die Hälfte der Energie das Filter verlässt, wenn dieses mit einem Impuls gespeist wird. [1]*

Das Ergebnis dieser Berechnungsmethode der Filter-Verzögerungszeit entspricht in etwa dem einer durchschnittlichen Gruppenlaufzeit, jedoch gewichtet mit dem Frequenzgang. So fließt die Gruppenlaufzeit des Durchlassbereiches stärker in die Mittelung ein, als die der Sperrbereiche.

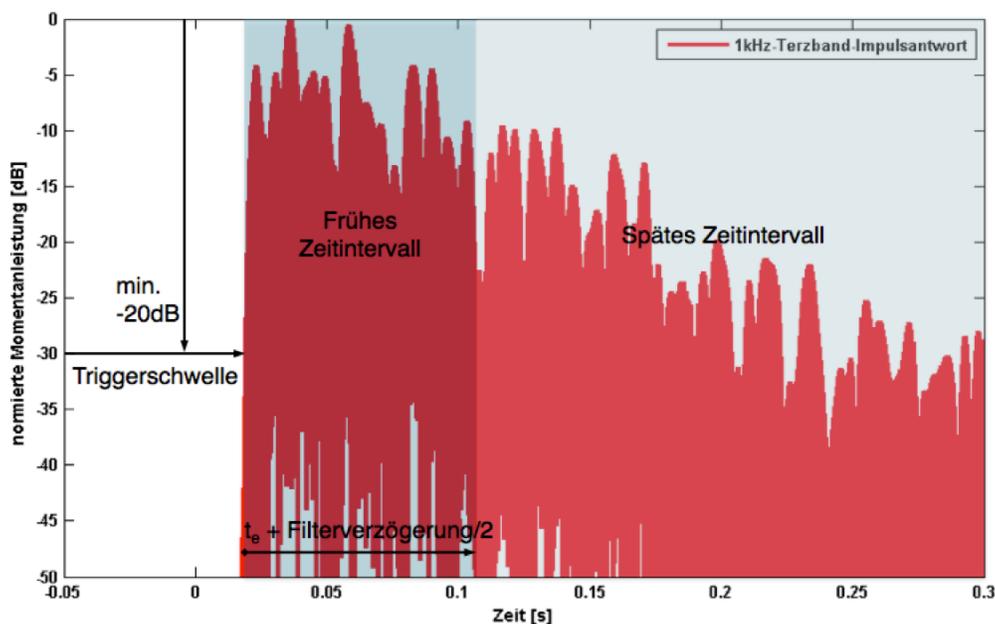


Abb. 3.6: Prinzipdarstellung der Bereichsbestimmung für die frühen und späten Zeitintervalle nach Norm 3382 [1]. Die Triggerschwelle dient der einfachen Bestimmung des relevanten Beginns der Impulsantwort.  $t_e$  ist bei dieser Darstellung 80ms (entsprechend C80) und die Filterverzögerung 70ms. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

Der Einfachheit halber wurde bei der Implementation als Beginnzeit ein Schwellwertdetektor von -30dB unterhalb des Maximums gewählt. Der dafür notwendige SNR steht bei normalen Messbedingungen in allen Frequenzbereichen zur Verfügung.

### 3.8.2 Implementierung in Matlab

Der erste und einfachste Ansatz, die Terzbandfilterung über einen harten Schnitt im Frequenzspektrum durchzuführen (vgl. Kap. 3.7), brachte, wie erwartet, keine guten Ergebnisse, selbst wenn dies der Norm entsprechen würde. Daher musste auf saubere Filterfunktionen übergegangen werden. Die Umsetzung in Matlab gestaltete sich jedoch umständlich, und musste auf mehrere Arten versucht werden.

#### *Filterung mittels `butter` und `filter`*

Der direkte Weg über die Berechnung der Filterkoeffizienten mittels `butter`<sup>17</sup> lieferte in Kombination mit der Funktion `filter`<sup>18</sup> schon bei geringen Filtergüten Unstetigkeiten. Dies ist auf die Rundungsfehler zurückzuführen, welche bei der Berechnung der Filterkoeffizienten  $a_0 \dots a_N$  und  $b_0 \dots b_N$  der Übertragungsfunktion entstehen. Dadurch rutschen eventuell Pole, die gerade noch innerhalb des Einheitskreises waren, nach außen und ergeben ein instabiles System. Zwar könnte `butter` auch die Pole und Nullstellen direkt ausgeben, jedoch gibt es keine Funktion in Matlab, welche diese so weiterverarbeiten kann.

#### *Filterung mittels DSP-Filterdesigner und `filter`*

Innerhalb der DSP-Toolbox gibt es eine sehr mächtige Funktion (`fdesign`<sup>19</sup>) für den Filterentwurf. Es ist zwar möglich diese Filter zu erstellen und anzuwenden, jedoch kam es bei der kompilierten stand-alone Anwendung zu nicht erklärbaren Fehlermeldungen, welche die Verwendung unmöglich machten. Auch das Inkludieren der in Frage kommenden Toolboxen beim Kompilieren brachte keine Verbesserung.

#### *Filterung mittels Filterimpulsantworten*

Da die direkte Verwendung des Filterdesigners nicht möglich war, wurden in Matlab die Filterimpulsantworten der gewünschten Terzbandfilter im Vorhinein (offline) berechnet und als Matrix in einem mat-File abgespeichert. Das bei der Nachhallmessung aufgerufene Matlab executable liest diese Matrix ein und faltet die Filterimpulsantworten mit der Raumimpulsantwort (bzw. multipliziert die jeweiligen Spektren). Das Ergebnis sind die terzbandgefilterten Raumimpulsantworten.

Die verwendeten Filter besitzen eine Ordnung von 14 und machten die vorerst geplante Vorfilterung des Summensignals (siehe Kap. 3.7.1) redundant. Die Länge der Filterimpulsantworten wurde auf 100.000 Samples ( $\approx 1,53s$ ) gesetzt, wovon die letzten 30.000 mit halbem von-Hann-Fenster beaufschlagt sind. Damit entsprechen die Filter den Anforderungen der Norm an die Filterklasse 0.

---

<sup>17</sup> „butter“ gibt die Filterkoeffizienten bzw. Pole und Nullstellen für einen Butterworthfilter gegebener Ordnung und Grenzfrequenz aus.

<sup>18</sup> „filter“ filtert das gegebene Signal mit den angegebenen Filterkoeffizienten.

<sup>19</sup> Stammfunktion für den Filterentwurf aus der DSP-Toolbox mit sehr vielen Möglichkeiten des Filterdesigns.

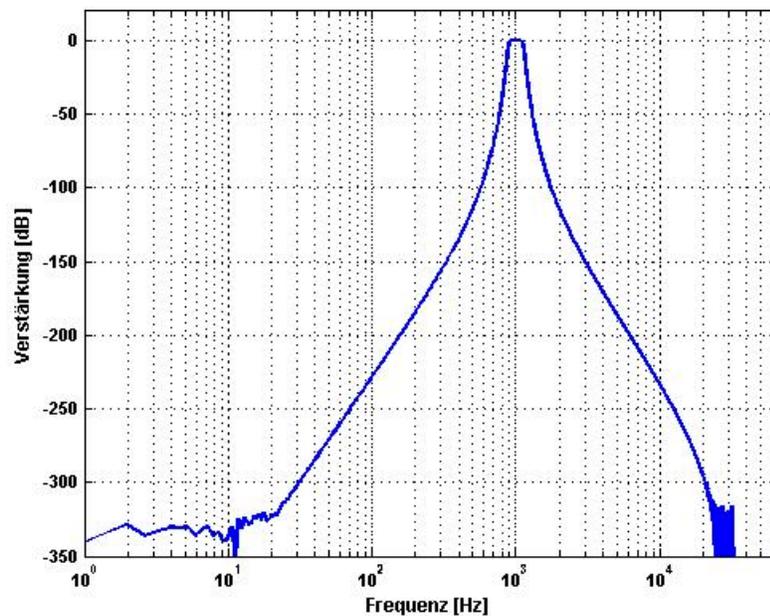


Abb. 3.7: Frequenzverlauf des implementierten 1kHz-Terzband-Filters der Filterklasse 0 laut Norm 61260 [3].

### 3.8.3 Einfluss der Terzbandfilter auf die Nachhallzeiten

Bei jeder dieser Terzbandfilterungen entsteht eine Aufweitung und Verflachung der Raumimpulsantwort. Dies hat eine zu lang ermittelte Nachhallzeit zur Folge. Im Falle eines Kronecker Deltas (digitaler Dirac-Impuls) als Raumimpulsantwort kann man die Nachhallzeit, welche rein durch den Filter vorgetäuscht wird, berechnen.

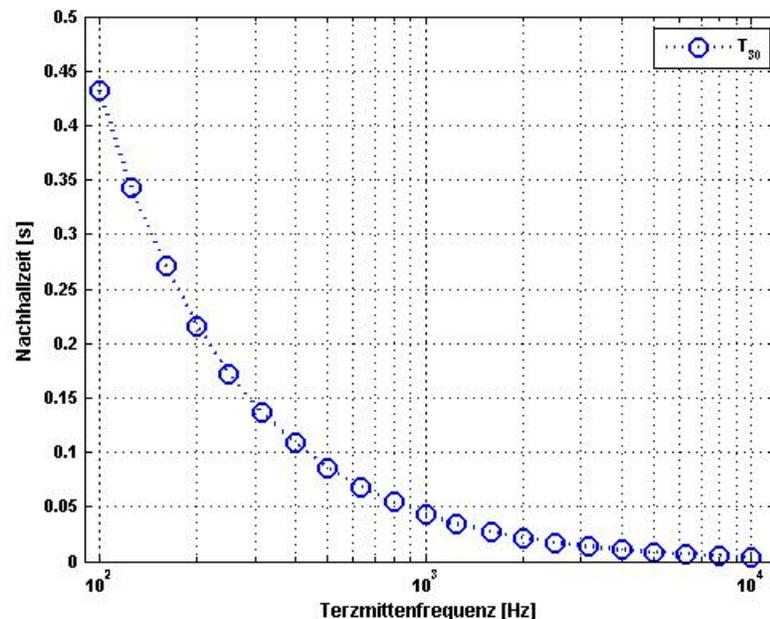


Abb. 3.8: „Nachhallzeiten“ je Terz, welche sich ergeben, wenn als Raumimpulsantwort ein Kronecker Delta verwendet wird.

Leider wird diese „Nachhallzeit“ nicht additiv mit der wahren Nachhallzeit im Raum verknüpft und kann daher nicht einfach herausgerechnet werden. Der extreme Anstieg zu tiefen Frequenzen war mit ein Grund die Nachhallzeitmessung erst im Frequenzbereich über 100Hz zu implementieren (siehe Kap. 2.4).

### 3.9 Zeitbegrenzung der Impulsantwort

Um einen Abklingverlauf zu bekommen, ist die Rückwärtsintegration durchzuführen. Dieser Verlauf soll anzeigen, wie viel Restenergie sich zum jeweiligen Zeitpunkt noch im Raum befindet. Ohne jegliches Rauschen sieht dies sehr sauber aus und führt zu einer perfekten Abklingkurve. Wenn allerdings über lange Zeit Rauschen aufsummiert wird, wird der Bereich, in welchem der Abklingvorgang zu erkennen ist, immer geringer. Um dem entgegen zu wirken ist eine Kürzung der Impulsantwort nötig. In den folgenden Bildern ist zu erkennen, welchen Einfluss die Länge der verwendeten Impulsantwort auf den Abklingvorgang – und damit auf die ermittelten Nachhallzeiten – hat.

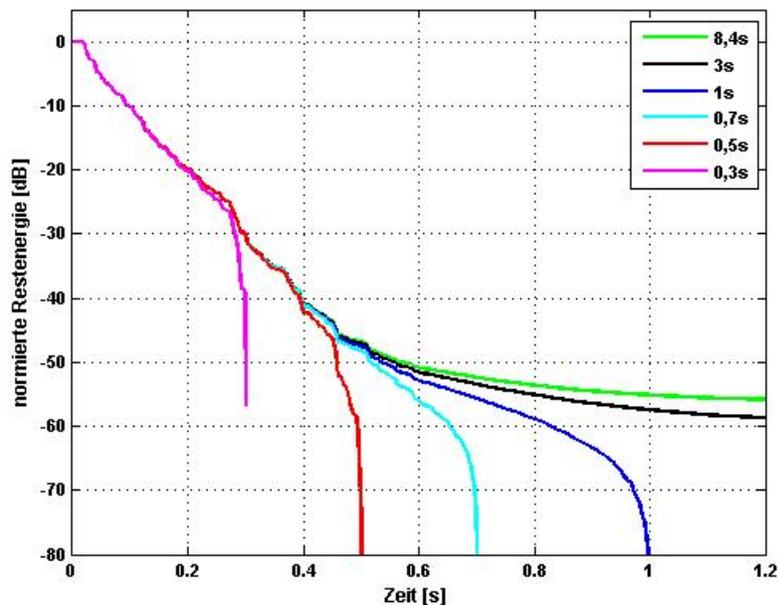


Abb. 3.9: Vergleich zwischen den unterschiedlichen Längen der rückwärtsintegrierten quadrierten 1kHz-Terzband-Impulsantwort. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

In diesem Fall (Abb. 3.9) wäre sogar eine korrekte Bestimmung von allen Parametern innerhalb dieses Terzbandes ohne vorherige zeitliche Reduktion der Raumimpulsantwort möglich (8,4s, grüne Kurve). Falls bei einer Messung jedoch mehr Störschall auftritt oder weniger Signalleistung verwendet werden kann, ist eine Zeitbegrenzung unumgänglich.

Problematischer als das 1kHz-Terzband ist das 100Hz-Terzband (siehe Abb. 3.10). Dort wäre bei der selben Einstellung wie in Abb. 3.9 ohne zeitliche Reduktion keine korrekte Bestimmung der  $T_{30}$  möglich.

Jedoch kann eine zu starke Kürzung der Impulsantwort zu kurz gemessene Nachhallzeiten zur Folge haben. Im Fall von Abb. 3.10 wäre eine Impulsantwortlänge zwischen

0,7 und 1s ideal und würde – in Anbetracht der Unstetigkeit der Abklingkurve – zu einer ausreichend genau ermittelten Nachhallzeit führen.

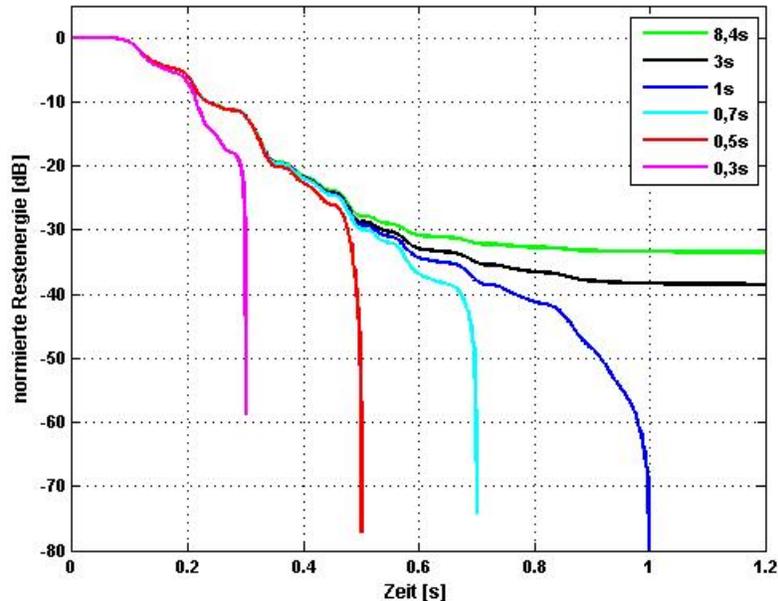


Abb. 3.10: Vergleich zwischen den unterschiedlichen Längen der rückwärtsintegrierten quadrierten 100Hz-Terzband-Impulsantwort. Messung im Tonlabor der Infeldgasse 12, TU Graz.

Anhand der verschiedenen Höhen der „Geraden“ rechts (3 und 8,4s) erkennt man die unterschiedliche Rauschenergie, welche aufsummiert wurde. Weiters ergibt sich in diesem Frequenzbereich ein diskontinuierlicherer Abklingvorgang als bei 1kHz (s.o). Dies ist auf die isolierten Raummoden zurückzuführen, welche den Gültigkeitsbereich der statistischen Raumakustik (für welchen die Nachhallzeit als beschreibende Größe sinnvoll ist) nach unten begrenzen.

Ziel der zeitlichen Begrenzung der Raumimpulsantwort sollte das Entfernen des vom Rauschen dominierten Bereiches sein. Um dies automatisiert durchführen zu können, musste ein entsprechendes Verfahren implementiert werden.

Auch die Norm [1, 2] spricht sich für eine Zeitbegrenzung der Raumimpulsantwort aus und gibt grob ein Methode an, nach der dies durchzuführen ist. Da diese jedoch praktisch schwer umzusetzen ist, wurden andere Verfahren ausprobiert. Im Folgenden werden die Vorgaben der Norm vorgestellt und dann verschiedene andere Ansätze und deren Ergebnisse angeführt.

### 3.9.1 Normgerechte Zeitbegrenzung

In den Normen findet man folgendes Verfahren:

*Um den Einfluss des Störpegels auf den letzten Teil der Impulsantwort zu minimieren, darf das folgende Verfahren angewendet werden.*

*Ist der Störpegel bekannt, muss der Anfangswert der Rückwärtsintegration  $t_1$  als Schnittpunkt einer Horizontalen durch den Störpegel und einer geneigten Linie durch einen repräsentativen Teil der mittels dB-Skala dargestellten quadrierten Impulsantwort (Anm.: siehe Abb. 3.11) bestimmt und die Abklingkurve nach Gleichung [...] (Anm.: wie folgt) berechnet werden.*

$$E(t) = \int_{t_1}^t h^2(\tau) \cdot d(-\tau) + C$$

*C..... eine wählbare Korrektur für die integrierte quadrierte Impulsantwort zwischen  $t_1$  und unendlich [1]*

Laut Norm soll also anhand der quadrierten Impulsantwort (in dB) der Übergangspunkt zwischen Abklingvorgang und Rauschen ermittelt werden. Dies geschieht über eine geschätzte Gerade im Abklingvorgang und eine Waagrechte, welche das durchschnittliche Rauschen repräsentiert. Es ist anzuraten dieses Vorgehen bei jedem Terzband separat durchzuführen.

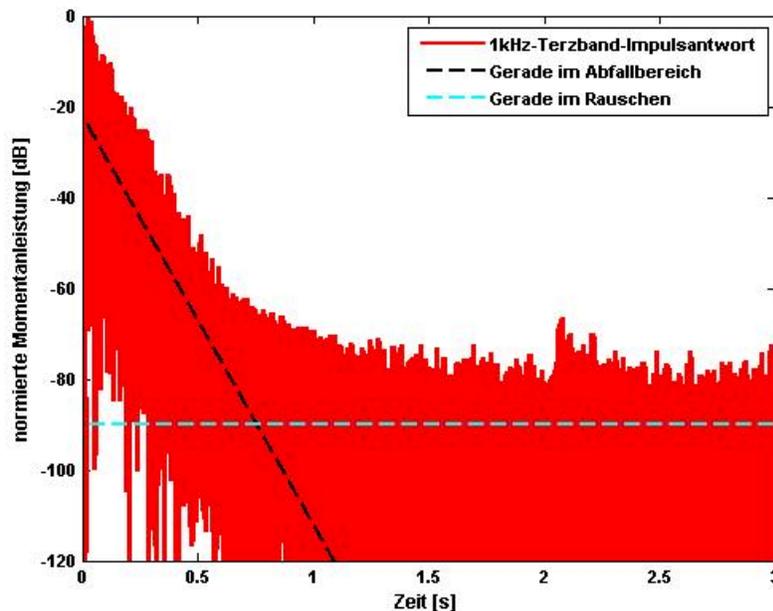


Abb. 3.11: Veranschaulichung für das in der Norm 3382 angegebene Verfahren bei einer quadrierten 1kHz-Terzband-Impulsantwort. In diesem Fall wurden die Geraden als optischer Anhaltspunkt nach Augenmaß eingefügt. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

Diese Methode klingt zunächst sehr intuitiv und einfach. Praktisch ergeben sich jedoch Probleme beim Finden der beiden Geraden.

### Berechnung der Gerade im Rauschen

Für die Berechnung des Rauschens im Raum muss jener Zeitbereich, in welchem dieses dominiert, bekannt sein. Dieser ändert sich jedoch abhängig vom jeweiligen Terzband (siehe Abb. 3.12). Zum einen durch die – noch nicht bekannte – Länge der Nachhallphase (links), zum anderen durch die frequenzabhängige Länge der Rauschphase (rechts), welche sich in der Raumimpulsantwort ergibt (siehe Abb. 1.4).

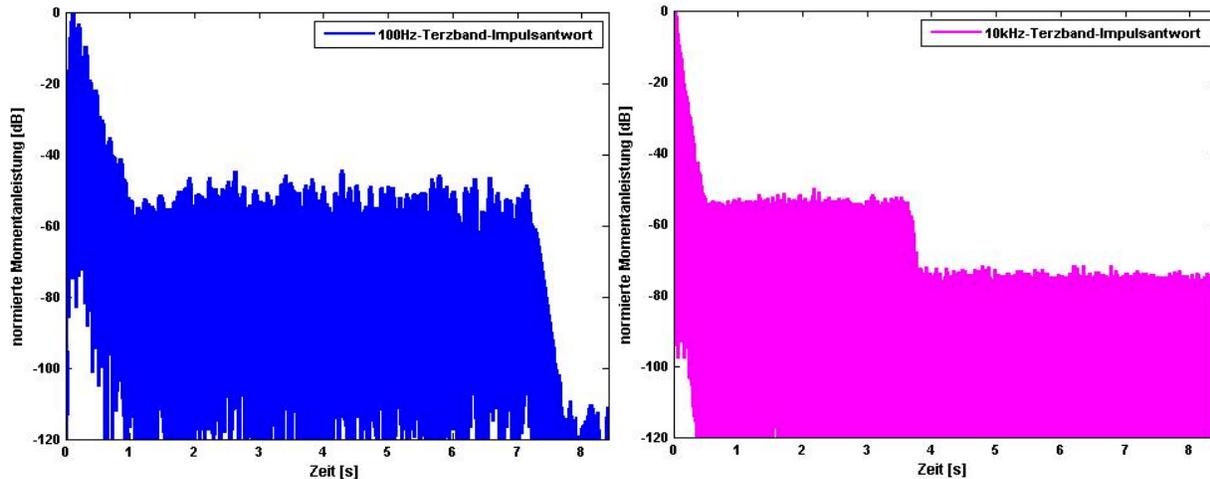


Abb. 3.12: Quadrierte Impulsantwort des 100Hz- und des 10kHz-Terzbandes. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

### Berechnung der Gerade im Abklingbereich

Hier ergibt sich das selbe Problem den Bereich zu definieren wie bei der Gerade im Rauschen. So muss in etwa der Bereich bekannt sein, innerhalb dessen der Abklingvorgang dominiert. Dort müsste dann eine Gerade eingepasst werden. Dies war jedoch bereits das Ausgangsproblem, welches mit diesem Verfahren hätte gelöst werden sollen.

Es handelt sich also beim Vorschlag der Norm primär um eine Verlagerung der Problematik und nicht um eine direkt umsetzbare Methode. Aus diesem Grund wurden andere Lösungsansätze ausprobiert.

### 3.9.2 Verwendung des SNR-Wertes

Bei dieser Methode wurde versucht die Schwierigkeit der Ermittlung einer Geraden im Abklingbereich zu umgehen. Der Rauschpegel jedoch muss weiterhin über einen grob geschätzten Zeitbereich ermittelt werden. Die Idee war die Grenze zu suchen, ab der sich die Impulsantwort aus dem Rauschen erhebt bzw. darin versinkt. Da es sich in der Regel um Gaußsches Rauschen handelt, kann davon ausgegangen werden, dass die Spitzenausschläge etliches über dem Rauschdurchschnitt liegen. Während der Entwicklungsphase wurden verschiedene Mindestabstände ausprobiert (zwischen 10 und 30dB). Jedoch führte auch diese Methode nicht immer zu verlässlichen Ergebnissen. Besonders im tiefen Frequenzbereich war durch das geringere Signal-Rausch-Verhältnis wenig Spielraum gegeben. Daher waren die Ergebnisse dort oft sehr unvorhersehbar und führten zu falschen Nachhallzeiten bei der folgenden Rückwärtsintegration. Daher wurde in weiterer Folge auf dieses Verfahren verzichtet.

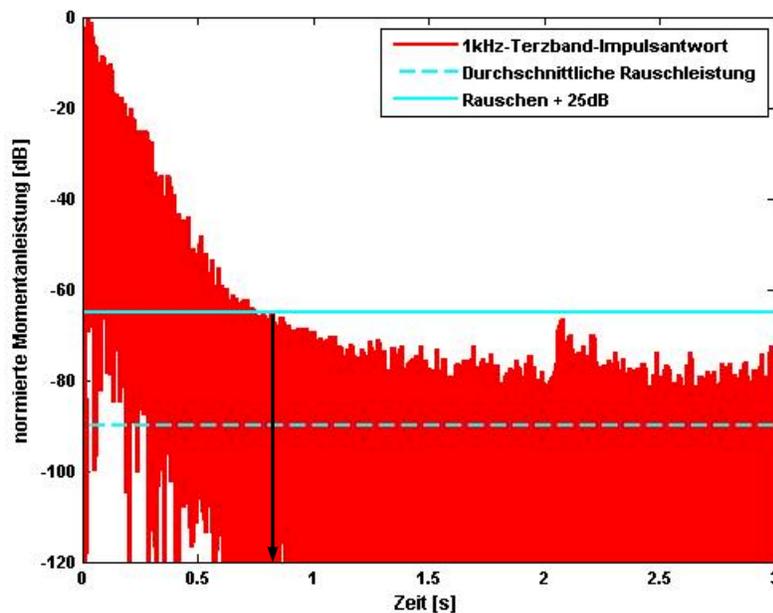


Abb. 3.13: Veranschaulichung der Methode mit Verwendung eines erforderlichen SNR-Wertes. In diesem Fall würde die 1kHz-Terzband-Impulsantwort bis ca. 0,8s verwendet werden können. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

### 3.9.3 Verwendung eines bestimmten Prozentsatzes der Energie

Ein weiterer Ansatz war die Vorwärtsintegration der quadrierten Impulsantwort. Wenn diese ins Verhältnis gesetzt wird mit der Gesamtsumme erhält man einen Verlauf der aussagt, über wie viel Prozent der Energie bereits aufsummiert wurde. Nun kann empirisch ein Prozentsatz fixiert werden, bis zu welchem die Impulsantwort für die folgende Rückwärtsintegration verwendet wird. Dies führte ebenfalls zu keinem befriedigenden Ergebnis, da sich sowohl das Verhältnis der Längen zwischen Ausklang und Rauschen in der Impulsantwort, als auch der SNR bei jeder Messung und über jedes Terzband ändert. Daher konnte kein fixierter Threshold gefunden werden, der bei allen Fällen brauchbare Ergebnisse lieferte.

Auch der Versuch der Berücksichtigung einer einfachen Abschätzung des SNR (Spitzenmomentanleistung der gefilterten quadrierten Impulsantwort zu grob geschätztem Durchschnittsrauschen) brachte keine Verbesserung.

Typische verwendete Anteile der Energie lagen zwischen 90 und 99,9%.

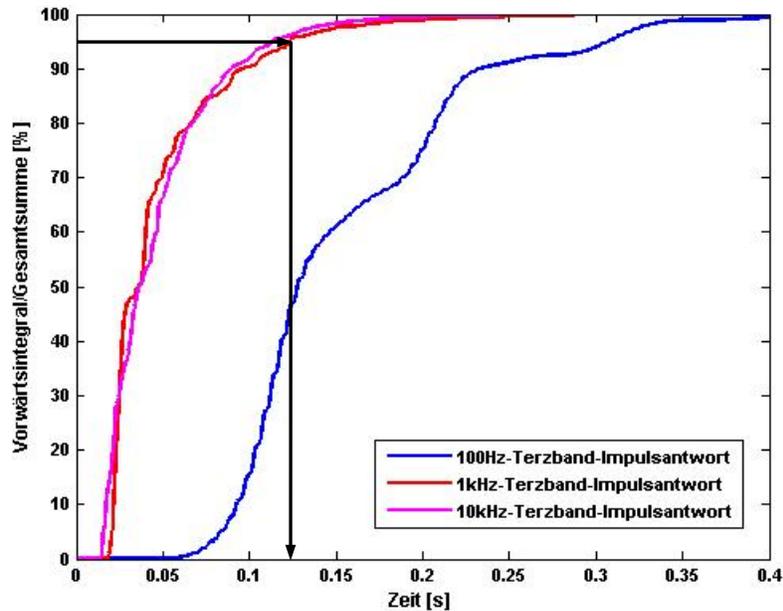


Abb. 3.14: Vorwärtsintegrale über verschiedene Terzbänder. Mit einem Threshold von 95% würde sich beim 1kHz-Terzband eine verwendbare Impulsantwortlänge von ca. 0,12s ergeben. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

### 3.9.4 Rückwärtsintegration ab einem fixen Pegelabfall

Die Grundidee hierbei war unabhängig vom Rauschen zu werden, indem nur über den benötigten Teil der quadrierten Impulsantwort integriert wird. Laut Norm [1, 2] wird für die Messung von  $T_{30}$  ein SNR von 45dB benötigt. Der Trick besteht nun darin, die quadrierte Raumimpulsantwort passend zu glätten. Zu diesem Zweck wurde ein Rechteckfenster zur gleitenden Mittelwertbildung verwendet. Mathematisch entspricht dies einer Faltung mit einem Rechteck im Zeitbereich. Dies wurde in Matlab mittels doppelter Verwendung von *cumsum*<sup>20</sup> gelöst. Durch diese Art der Mittelwertbildung entsteht eine Glättung, welche immer sauberer wird, je länger das Rechteckfenster ist (siehe Abb. 3.15).

Nach dieser Glättung wird nun der erste Wert gesucht, welcher 45dB unter dem geglätteten Maximum liegt. Bis zu dieser Länge wird die Impulsantwort als sinnvoll für die Rückwärtsintegration betrachtet.

Die Fensterlänge wurde empirisch bestimmt. Eine Mittlung über ca. 10000 Samples bei einer Abtastrate von 65536Hz stellte sich besonders im tiefen Frequenzbereich als gute Wahl dar. Dies entspricht einer Fenstergröße von ca. 153ms. Bei kürzeren Zeiten waren regelmäßig diskontinuierliche Abfälle zu beobachten, welche fehlerhafte Nachhallzeiten zur Folge gehabt hätten. Um unabhängig von der Abtastrate zu werden, wurde auf ein

<sup>20</sup> „cumsum“ summiert die Werte in einem/einer Vektor/Matrix von vorne nach hinten auf und schreibt die jeweiligen Zwischenergebnisse in den Rückgabevektor/die Rückgabematrix.

Verhältnis von  $f_s/(6,5\text{Hz})$  als Fensterlänge in Samples übergegangen. Bei den höheren Frequenzen wäre auch eine geringere Länge möglich, diese bringt jedoch praktisch keine Vorteile.

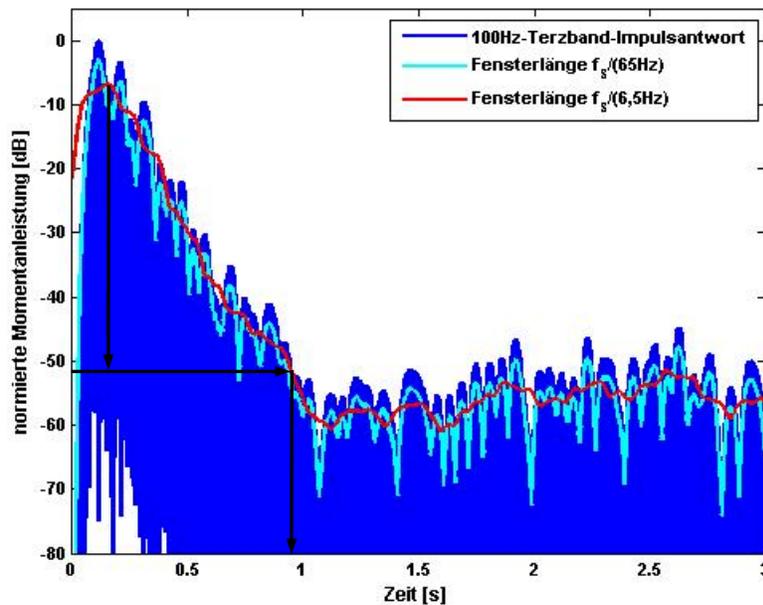


Abb. 3.15: Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Fenstern zur gleitenden Mittelwertbildung im 100Hz-Terzband. Bei Fensterlänge  $f_g/(6,5\text{Hz})$  ergibt sich für die 100Hz-Terzband-Impulsantwort ein verwendbarer Bereich von knapp 1s. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

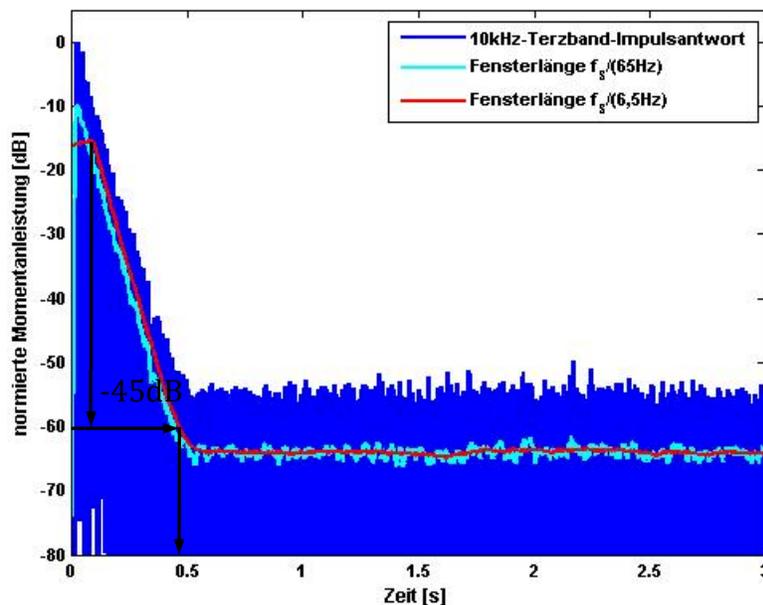


Abb. 3.16: Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Fenstern zur gleitenden Mittelwertbildung im 10kHz-Terzband. Bei Fensterlänge  $f_g/(6,5\text{Hz})$  ergibt sich für die 10kHz-Terzband-Impulsantwort ein verwendbarer Bereich von knapp 0,5s. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

### 3.10 Berechnung der Rückwärtsintegration und Einpassen der Abklinggeraden

Nachdem die Impulsantwort nun auf ihren aussagekräftigen Teil reduziert wurde, kann die Rückwärtsintegration durchgeführt werden. Der erste Ansatz mit einer Schleife brauchte in Matlab viel zu lange und wurde durch eine spezielle Verwendung der Funktion *cumsum* ersetzt. Die Abklinggerade selbst wird mittels *polyfit*<sup>21</sup> in den, in dB dargestellten, Abklingvorgang zwischen -5dB und -25/-35dB eingepasst [1, 2]. Mit der Steigung kann nun leicht die Zeit für den 60dB-Abfall berechnet werden.

### 3.11 Berechnung der weiteren Gütemaße

Die *EDT* kann direkt anhand der bereits gewonnenen Abklingkurve berechnet werden. Für  $C_{50}$ ,  $C_{80}$  und  $D_{50}$  kann die gekürzte Impulsantwort eventuell ein wenig zu kurz sein um den späten Nachhall repräsentativ zu erfassen. Deshalb wird für diesen Zweck die Nachhallzeit als neue Länge der Impulsantwort für die Rückwärtsintegration verwendet. Nach dieser Zeit ist die Wahrscheinlichkeit sehr groß, nur mehr Rauschen anzutreffen. Ebenso ist es für  $C_{50}$ ,  $C_{80}$  und  $D_{50}$  notwendig den exakten Startpunkt der Impulsantwort zu kennen und die Filterverzögerungen auszugleichen (siehe dazu Kap. 3.8.1). Diese erzeugen besonders bei tiefen Frequenzen eine beträchtliche Verzögerung. Im 100Hz-Terzband ergibt sich eine Durchschnittsverzögerung von gut 70ms.

Dies könnte in Anbetracht der zu messenden 50ms für  $C_{50}$  das Ergebnis stark beeinflussen. Für die Einzahlwerte wird jedoch nur über 400 bis 1250Hz gemittelt (siehe Kap. 1.3), allerdings ergeben sich auch dort bis zu knapp 20ms Verzögerung.

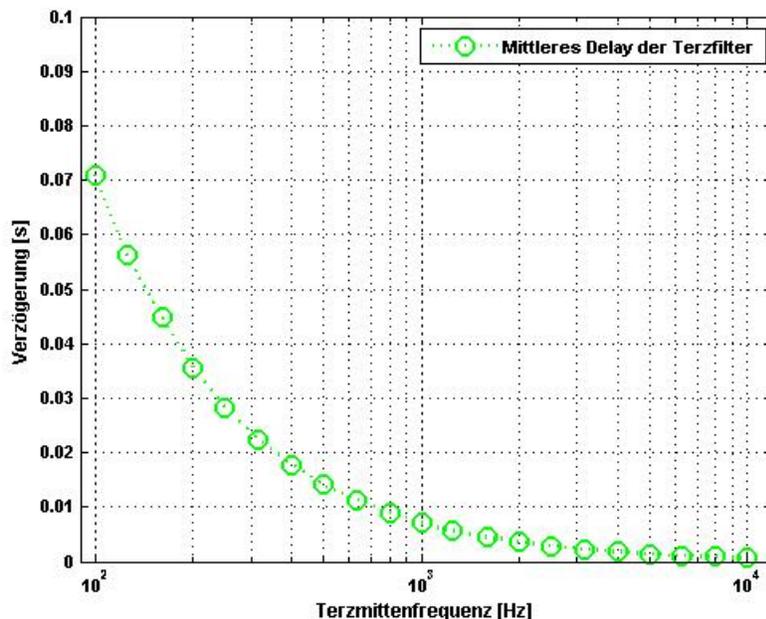


Abb. 3.17: Durchschnittsverzögerung der einzelnen Terzbandfilter. Dabei handelt es sich um die Zeit, in welcher die Hälfte der Ausgangsenergie den Filter verlassen hat [3].

<sup>21</sup> „polyfit“ passt ein Polynom von wählbarem Grad nach der Methode der geringsten Abstandsquadrate in den Verlauf ein.

### 3.12 Berechnungsaufwurf und Programmablauf

Um einen reibungslosen Messablauf zu ermöglichen mussten passende Presets erstellt werden. Ebenso war es notwendig eine bedienungsfreundliche Aufteilung der Berechnungen auf die Ergebnis-Reiter einzuführen, welche es dem User erlaubt, ohne langes Warten zwischen den Ergebnisdarstellungen umschalten zu können. PAK berechnet im Normalfall bei jedem Umschalten die dargestellten Grafiken neu. Dies bedeutet, dass alle Berechnungen jedes Mal aufs Neue ausgeführt werden. Um dies zu umgehen war es notwendig, alle Rechenoperationen auf einen Reiter zu legen, welcher nur zu Beginn geöffnet werden muss. Anschließend werden jeweils nur mehr die soeben erstellten Ergebnisse eingelesen und angezeigt. Dazu bedarf es einer übersichtlichen Datenstruktur, welche leicht auf jede mögliche Mikrofonanzahl adaptiert werden kann. Ebenso müssen die Matlabfunktionen mit den verschiedensten Rahmenbedingungen umgehen können. So ist es möglich, mit jeder beliebigen Abtastrate, logarithmischen oder linearen Sweeps, sowie über alle möglichen Frequenzbereiche mit ein und demselben Preset (welches nur von der Kanalanzahl abhängig ist) zu messen.

### 3.13 Erstellung der Grafikvorlagen in PAK

Nachdem die Daten wieder in PAK eingelesen wurden, erfolgt die Anzeige. Durch die mächtige Grafik-Engine gestaltete sich dieser Teil sehr einfach. Es wurden fixe Vorlagen erstellt, welche alle Diagramme passend skalieren und übersichtlich positionieren. Weiters wurden für die Nachhallzeiten und die weiteren raumakustischen Parameter Tabellen geschrieben. Um die Abklingkurven selbst überprüfen zu können, werden diese in einem separaten Reiter dargestellt. Bei einer Messung mit mehreren Mikrofonen gibt es zusätzlich eine Übersicht über den Mittelwert der Ergebnisse.

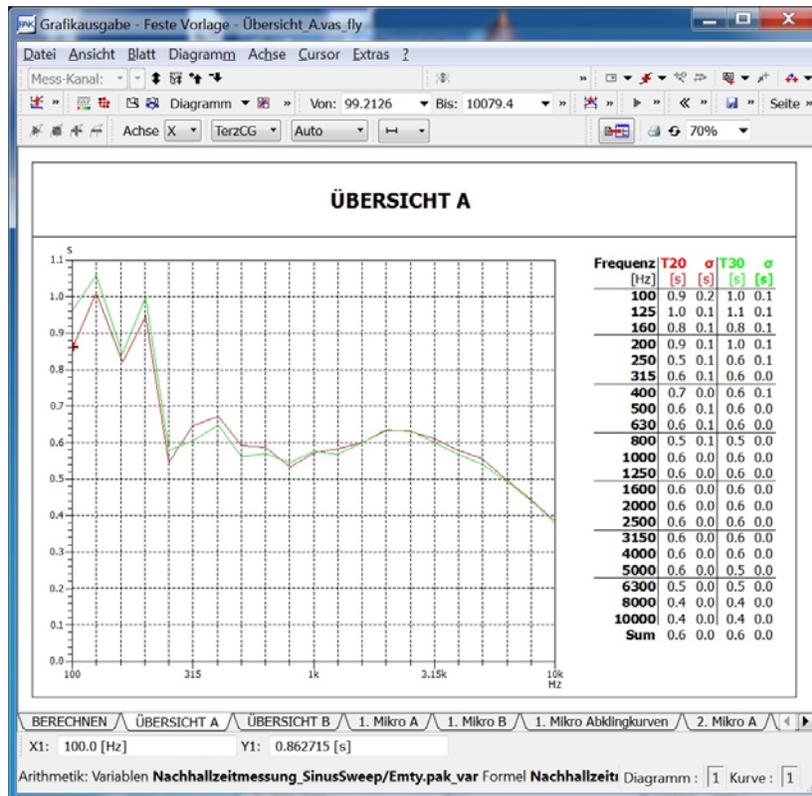


Abb. 3.18: Übersicht A in PAK bei einer Messung mit 6 Mikrofonen. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

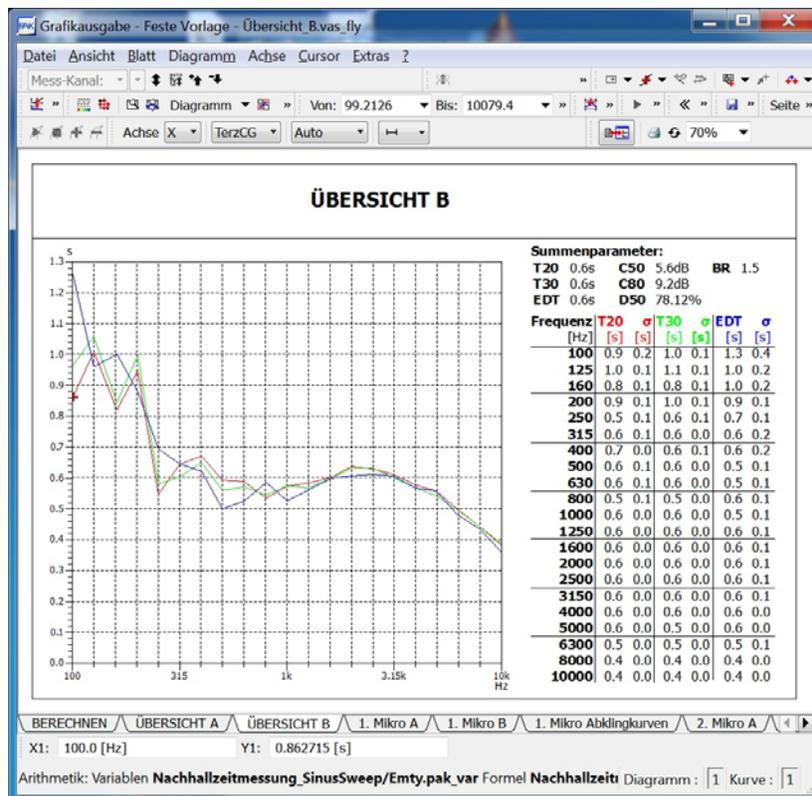


Abb. 3.19: Übersicht B in PAK bei einer Messung mit 6 Mikrofonen. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

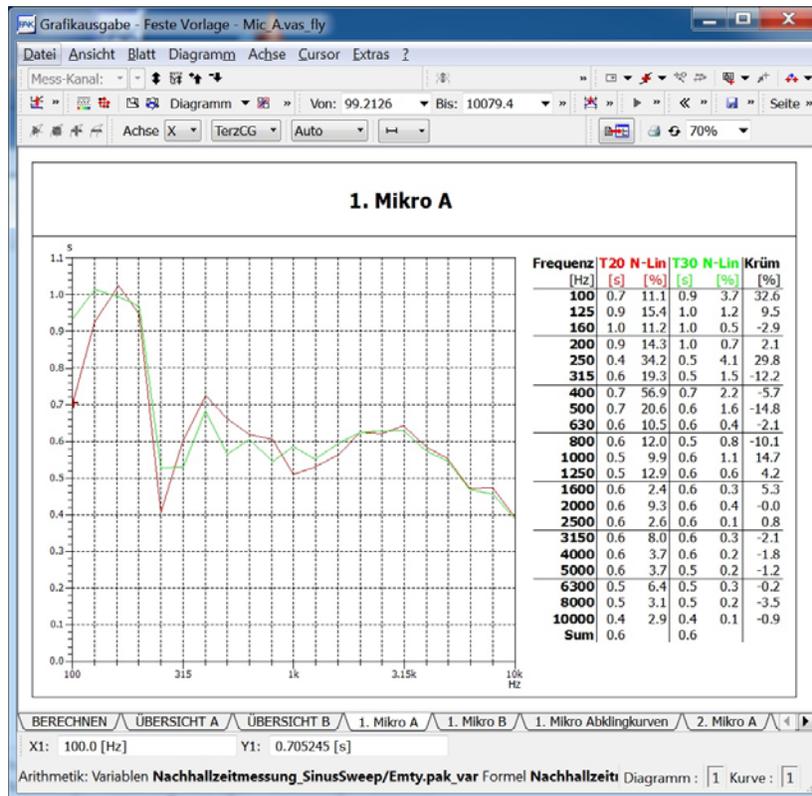


Abb. 3.20: Einzelansicht A des 1. Mikrophons in PAK bei einer Messung mit 6 Mikrophonen. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

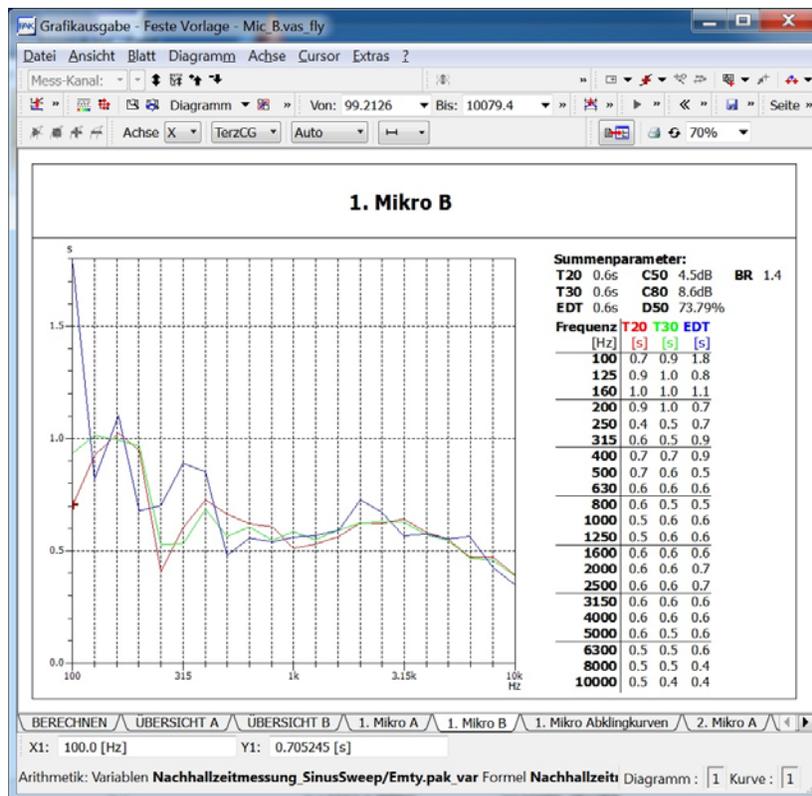


Abb. 3.21: Einzelansicht B des 1. Mikrophons in PAK bei einer Messung mit 6 Mikrophonen. Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

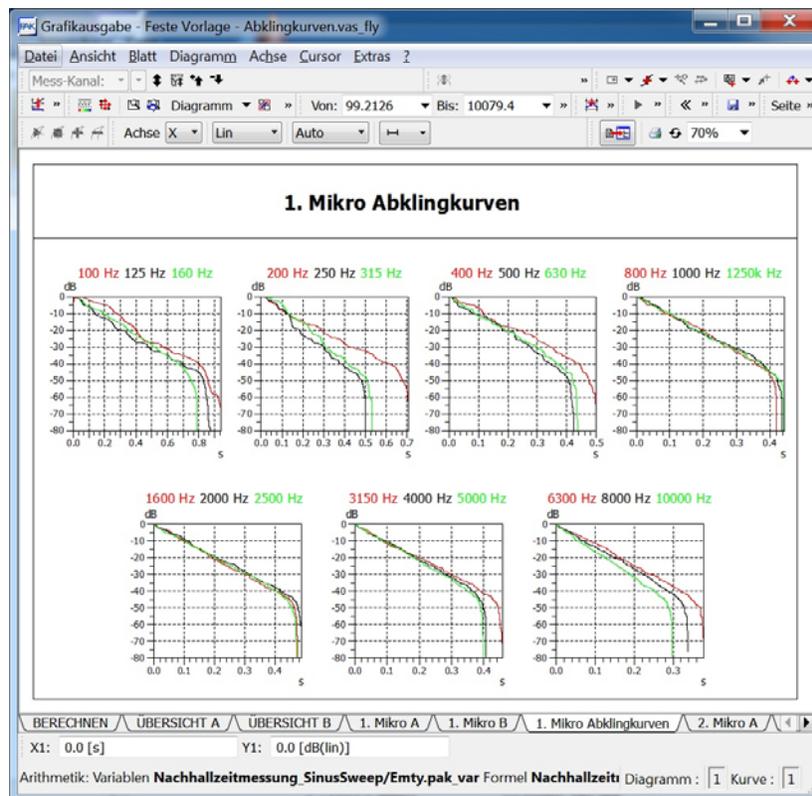


Abb. 3.22: Abklingkurven des 1. Mikrophons in PAK bei einer Messung mit 6 Mikrophonen. Daten aus einer Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

### 3.14 Vergleich der internen Soundkarte zum Fireface 400

Da beim einfachen Hantieren mit der internen Soundkarte schon tieffrequente Stör-signale beobachtet wurden, war ein direkter Vergleich zu einer professionellen Soundkarte angebracht. Dabei wurde das Fireface 400 von RME als Referenzsystem verwendet.

Die Testergebnisse bestätigten zwar das tieffrequente Rauschen, belegten aber die geringe Differenz im relevanten Frequenzbereich. Es kann davon ausgegangen werden, dass der praktische Unterschied vernachlässigbar gering ist. Auch entsteht durch die Entfaltung (bzw. Spektraldivision) mit dem Ausgangssignal (der jeweiligen Soundkarte) automatisch eine Entzerrung.

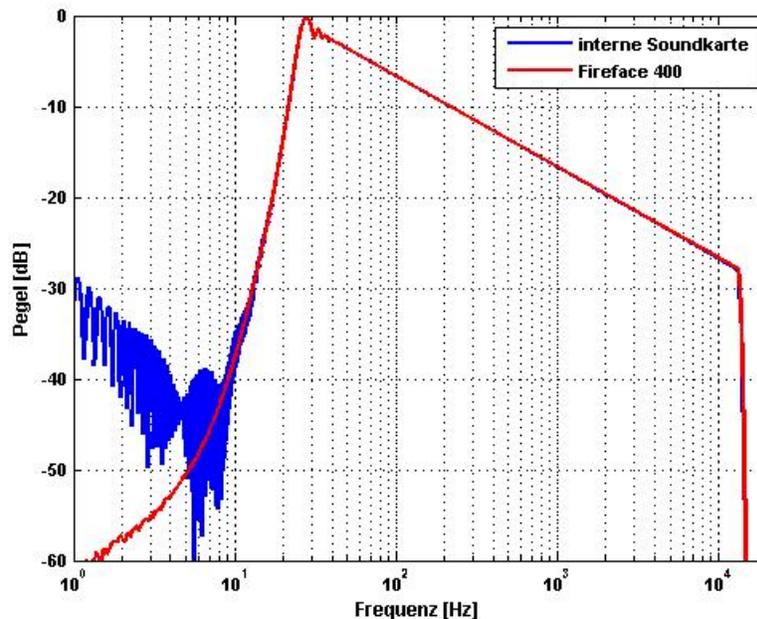


Abb. 3.23: Vergleich zwischen den Frequenzverläufen der Quellsignale (der Soundkarten) bei einer typischen Messung mit logarithmischem Sinus-Sweep. Die beiden Kurven wurden auf denselben Pegel skaliert, um die Unterschiede deutlicher zu erkennen. Ursprünglich war das Quellsignal des Fireface 400 um knapp 10dB lauter.

Der einzige gravierende Unterschied ist der mögliche Pegel. Das Fireface ermöglicht um über 15dB mehr Ausgabepegel, welcher bei der Vermessung von größeren Räumen oder hohem Störgeräusch durchaus von Nutzen sein kann. Mit der internen Soundkarte erreicht man, in Kombination mit dem angegebenen Verstärker-Lautsprecher-System, Pegel, welche mit 0815-Gehörschutz im Tonlabor (ca. 28,5m<sup>2</sup> Fläche; 3,1m Höhe) noch auszuhalten waren.

### 3.15 Datenstruktur

Innerhalb von PAK muss für jede Kurve, welche aus externen Daten dargestellt werden soll, die Arithmetik aufgerufen werden. Um das Anzeigen der Daten möglichst unabhängig von deren Berechnung zu machen, wurde deshalb eine einzelne Matlab-anwendung kreiert, welche nur zu Beginn ausgeführt werden muss. Diese liest die Daten ein, führt alle Berechnungen durch und speichert alle für die Anzeige benötigten Daten. Um jedoch die dadurch entstandenen Files einlesen zu können, muss für jedes einzelne eine eigene Formel in der Arithmetik existieren und aufgerufen werden. Dies umfasst pro Mikrofon ca. 30 Formeln.

Ebenso müssen die berechneten Daten nach einer fixen Struktur gespeichert werden um systematisch aufgerufen werden zu können. Auch für jede Anzahl an Mikrofonen muss je eine Grafik-Definition als Preset vorhanden sein.

Daher war es wichtig eine überschaubare Datenstruktur einzurichten. Leider ist es nicht möglich alle Daten und Files, welche für dieses Projekt benötigt wurden, zusammen innerhalb eines Verzeichnisses zu speichern. Die Formeln müssen – ebenso wie die Grafikdefinitionen, die Variablen, die Grafikvorlagen, die Messeinstellungen und die Messdefinitionen – innerhalb des jeweils vordefinierten Ordners liegen. Auch das Abspeichern von Files in Unterordnern dieses Verzeichnisses ist ein wenig kompliziert. So ist es zwar möglich die Files von Unterordnern aufzurufen, beim erneuten Speichern wird im Pfad jedoch der Unterordner gestrichen. Die Unterordner der jeweiligen Vorlagen/Definition wurden einheitlich mit dem Titel „Nachhallzeitmessung\_Sinus Sweep“ benannt.

Bei den **Messeinstellungen** wurden im entsprechenden Unterordner die Files mit dem Titel „Nachhallzeitmessung\_SinusSweep\_XMic\_Ys“ (wobei das X für die Anzahl der verwendeten Mikrophone und Y für die Aufzeichnungslänge steht) angelegt.

Die **Messdefinitionen** wurden wie die Messeinstellungen benannt.

Bei den **Grafikdefinitionen** wurden die Files mit dem Titel „Messung\_Darstellung\_XMic“ und „Darstellung\_XMic“ benannt. Dies sind jeweils unterschiedliche Vorlagen für die beiden Möglichkeiten (siehe Kap. 4.3 und Kap. 4.4).

Die **Variablen** wurden nach dem selben Schema wie die Grafikdefinitionen benannt.

Bei den **Grafikvorlagen** war die Sache einfacher und es mussten innerhalb des Unterordners bei den festen Vorlagen nur sechs Files mit den Titeln „Berechnen“, „Übersicht\_A“, „Übersicht\_B“, „Mic\_A“, „Mic\_B“ und „Abklingkurven“ erstellt werden. Hinzu kam eine variable Vorlage mit dem Namen „Nachhallzeitmessung\_Sinus Sweep\_Online“, diese passt sich an die Mikrofonanzahl an.

Bei den **Formeln** (siehe Abb. 3.24) wurde innerhalb des Unterordners noch eine weitere Struktur angelegt welche aus „Berechnen“ und „Mic1“ bis „Mic6“ besteht. Innerhalb von „Berechnen“ liegen die Formeln, welche rein für die Datenberechnung benötigt werden. Diese sind nach dem Prinzip „Frl\_Nachhallmessung\_XMic“ benannt.

Die Formeln, welche rein Daten einlesen, liegen jeweils innerhalb der „MicX“ Ordner. Dort befinden sich die Formeln „Frl\_AbK\_T50“ bis „Frl\_AbK\_T10000“ das „AbK“ steht dabei für Abklingkurve und die Zahl zum Schluss jeweils für die entsprechende Terz. Weitere Formeln sind die „Frl\_RT20“, „Frl\_RT30“ und die „Frl\_EDT“ sowie die „Frl\_RAP“ (raumakustische Parameter). Diese unterscheiden sich bei den unterschiedlichen

Mikrofonkanälen zwar nur sehr leicht, müssen jedoch als separate Files vorhanden sein.

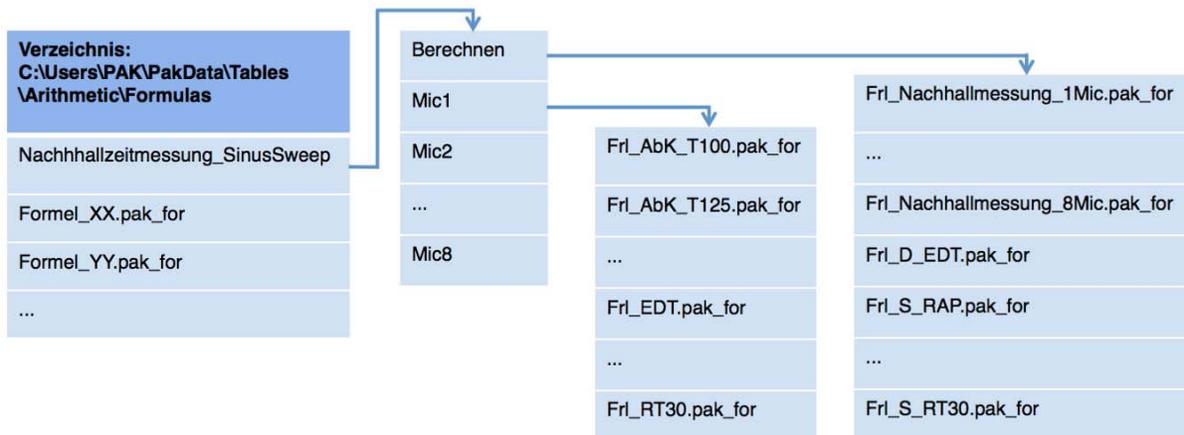


Abb. 3.24: Übersicht über die Speicherstruktur der Formeln, welche von PAK bei der Darstellung aufgerufen werden.

Die Speicherung der **berechneten Daten** erfolgt im Ordner „DATA“ innerhalb des PakData-Verzeichnisses (siehe Abb. 3.25). Dort wurde ein Ordner mit dem Titel „Nachhallzeitmessung\_SinusSweep“ angelegt, welcher die Unterverzeichnisse „Matlab\_Funktionen,Daten“ und „Temp\_Messdaten“ enthält. Im ersteren liegen die benötigten exe-Files und die Impulsantworten der Terzbandfilter. Im zweiten werden die zuletzt berechneten Messdaten, nach Mikrofonen sortiert, abgelegt. Auch ein Ordner „Mat-Files“, in welchem die Matlabdaten nach Mikrofonen sortiert gespeichert werden, ist vorhanden. In diesen mat-Files werden u.a. Impulsantwort, T20, T30 und alle weiteren Ergebnisse gespeichert. Dies soll – bei Bedarf – die unkomplizierte Weiterverarbeitung in Matlab ermöglichen. Der gesamte Ordner „Temp\_Messdaten“ wird bei jeder Berechnung gelöscht und wieder neu erstellt, um nicht versehentlich alte Messdaten als aktuelle Ergebnisse zu präsentieren.

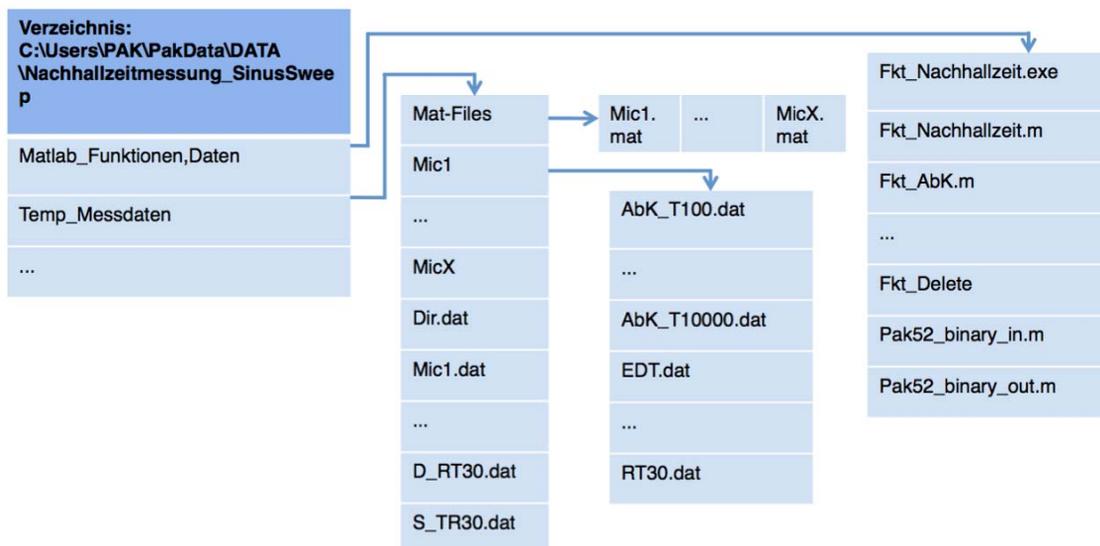


Abb. 3.25: Übersicht über die Datenspeicherung für die Kommunikation zwischen PAK und Matlab, sowie den Speicherort der Matlabfunktionen.



## 4 Messanleitung

### 4.1 Benötigtes Equipment für die Messung mit X (Anzahl) Messmikrofonen

- Laptop: Lenovo Thinkpad W520 + Stromversorgung
- Front-End: PAK Mobile MKII + Stromversorgung
- X Messmikrophon(e) + Klemmen: G.R.A.S. 46AE
- Verstärker: Norsonic Nor280 + Kaltgerätekabel
- Dodekaederlautsprecher: Norsonic Nor276
- Speakon-Lautsprecherkabel
- X+1 BNC-Kabel (zwischen Mikrophon-PAK Mobile und Soundkarte-Verstärker)
- X+1 Adapterkabel von PAK Mobile-Eingangsstecker auf BNC
- Adapterkabel von BNC auf Miniklinke
- Adapter von BNC auf XLR-M (für den Verstärkereingang)
- BNC-T-Stück (zwischen PAK Mobile, Soundkarte und Verstärker)
- UTP Netzwerkkabel, d.h. Ethernet Kabel mit Steckern ohne Metallabschirmung (zwischen PAK Mobile und Laptop)
- Gehörschutz
- Messgerät für Temperatur und relative Luftfeuchte

Auch in weiterer Folge wird die Anzahl der gleichzeitig verwendeten Mikrophone mit „X“ bezeichnet.

### 4.2 Aufbau des Equipments

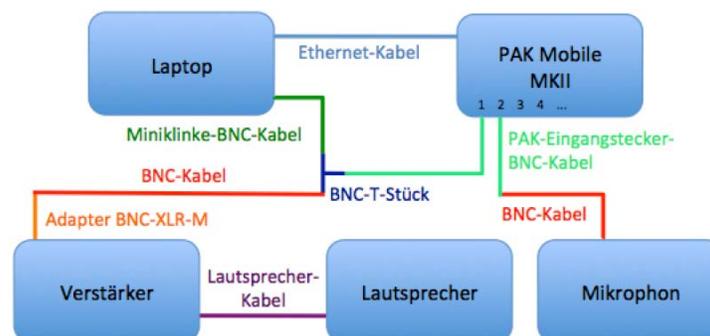


Abb. 4.1: Überblick über den Aufbau des benötigten Equipments für ein Mikrofon.

Die Reihenfolge der Signale an den Eingängen von PAK muss jener auf der Zeichnung entsprechen. Beginnend mit dem Quellsignal folgen anschließend die Mikrophone 1 bis X.

Das PAK Mobile MKII wird über den Einschaltknopf vorne rechts aktiviert. Die Lautstärke der Soundkarte des Laptops sollte voll aufgedreht sein, um eine möglichst hohe Signalleistung im Raum zu ermöglichen.

Am Verstärker muss als Eingang der „Line“-Input aktiviert sein und die Verstärkung passend eingestellt werden. In Kombination mit der internen Soundkarte empfiehlt es sich diese sehr hoch zu wählen (0dB oder -10dB).

Für eine normgerechte Messung müssen die entsprechenden Vorgaben an die Anzahl und Platzierung von Quell- und Mikrofonpositionen eingehalten werden. Diese sind bei Aufführungsplätzen der Norm 3382-1 S.9, bei gewöhnlichen Räumen der Norm 3382-2 S.8 zu entnehmen [1].

Es besteht auch die Möglichkeit, Daten ohne unmittelbar zuvor durchgeführte Messung (Beschallung und Aufzeichnung) darzustellen (siehe dazu Kap 4.4).

### 4.3 Durchführung einer Messung

Die folgende Beschreibung widmet sich der Messung mit nur einer Quellposition. Sollen mehrere Quellpositionen vermessen werden (wie es z.B. laut Norm im Fall einer Präzisionsmessung erforderlich ist), so muss das kommende Verfahren entsprechend öfter durchgeführt werden. Nachträglich können die Messungen kombiniert ausgewertet werden. Siehe dazu dann Kap. 4.4.2.

#### 4.3.1 Vorbereitung der Software

Nach dem erfolgreichen Aufbau und Einschalten aller Gerätschaften muss PAK 5.7 am Computer gestartet werden. Das dazu erforderliche Icon befindet sich am Desktop. Das Hauptmenü von PAK erscheint.

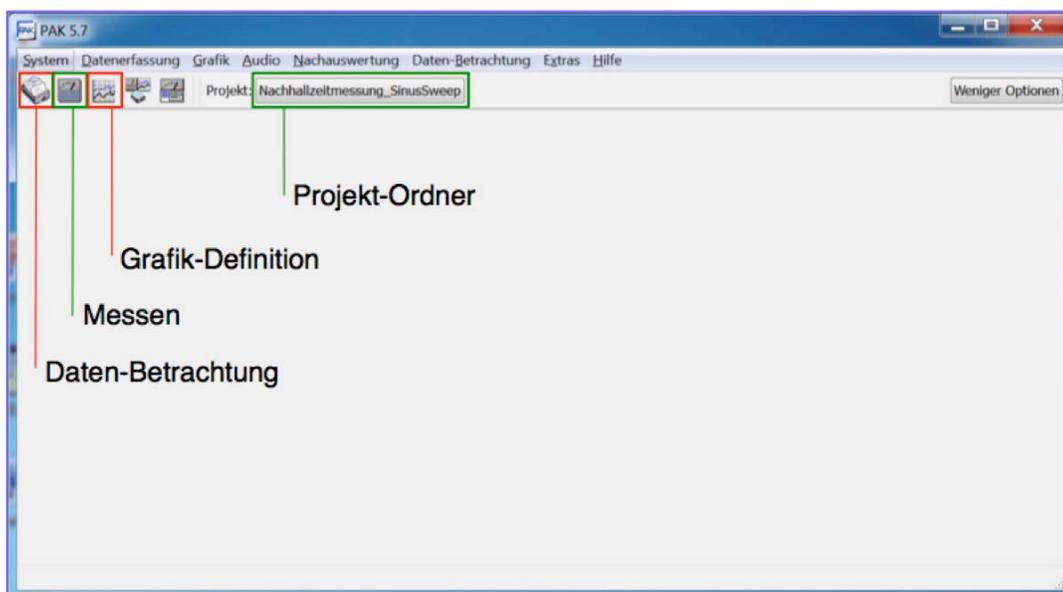


Abb. 4.2: Hauptfenster von PAK 5.7

Rechts von der Bezeichnung „Projekt:“ scheint das aktuelle Arbeitsverzeichnis auf. Durch Klicken auf die Schaltfläche lässt sich das gewünschte Projekt aus den bereits erstellten auswählen. In der Regel empfiehlt es sich „Nachhallzeitmessung\_Sinus Sweep“ für diese Art der Messung zu verwenden. Ansonsten lässt sich über die „Daten-

Betrachtung“ (siehe Abb. 4.5) ganz links ein neues Arbeitsverzeichnis erstellen. Dies muss innerhalb des Ordners „Messdaten-Pfad“ mit Rechtsklick – „Erzeuge neues Projekt“ – geschehen, oder über den Menüpunkt „Aktionen“. Der erstellte Ordner hat zunächst den Namen „Unbekannt“ und wird über Rechtsklick – „Verwaltung/ Umbenennen“ – umbenannt; alternativ kann dies auch wieder über die Schaltfläche „Aktionen“ erfolgen. Nun muss das entsprechende Projekt noch im Hauptfenster als aktives ausgewählt werden.

Um eine neue Messung anzulegen muss die Schaltfläche „Messen“ geklickt werden (siehe Abb. 4.2). Die Messdefinition erscheint (siehe Abb. 4.3). Nun muss das entsprechende Preset geladen werden. Dies geschieht über „Öffnen“ (als Schaltfläche oder unter „Datei“). Ein Fenster erscheint, aus welchem innerhalb des Ordners „Nachhallzeitmessung\_SinusSweep“ die Datei „Nachhallzeitmessung\_SinusSweep\_XMic\_Zs“ ausgewählt werden muss. „X“ steht dabei für die Mikrophonanzahl und „Z“ für die Länge in Sekunden, über welche aufgezeichnet wird.

Eine Kombination von 8s Aufnahmezeit und 6s Sweep dürfte in den meisten gewöhnlichen Räumen ausreichend sein. Alternativ wird für hallige Messobjekte, welche meist auch mehr Signalenergie erfordern, eine Kombination von 15s Aufnahme- zu 10s Sweepzeit empfohlen und bereitgestellt.

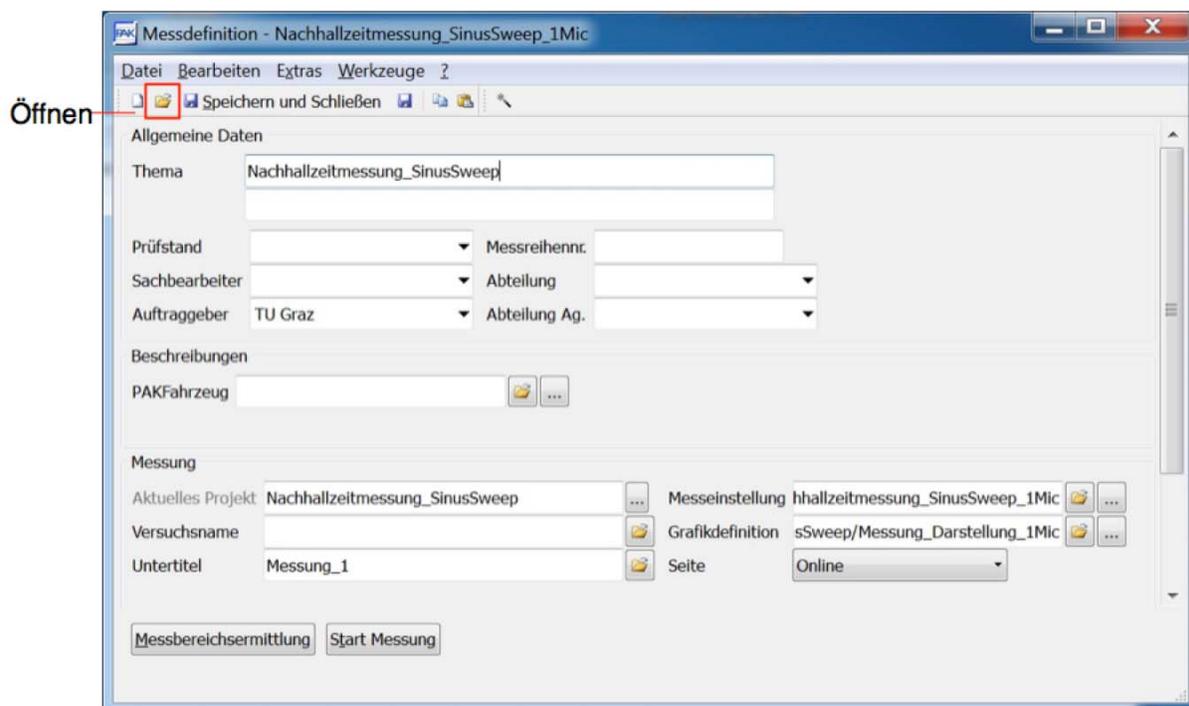


Abb. 4.3: Messdefinition von PAK 5.7.

In weiterer Folge werden die allgemeinen Daten ausgefüllt und ein „Versuchsname“ sowie „Untertitel“ vergeben. „Versuchsname“ bezeichnet dabei den Ordner, in welchem sich die einzelnen Messungen (mit „Untertitel“ bezeichnet) befinden. Falls der Untertitel mit „\_1“ endet, wird automatisch dieser Zähler bei folgenden Messungen um jeweils eins erhöht.

Eine Kalibration ist für die Nachhallmessung nicht erforderlich. Ebenso muss bei Verwendung des angegebenen Equipments und der internen Soundkarte keine Messbereichsermittlung durchgeführt werden.

### 4.3.2 Messung

Dafür ist die entsprechende Schaltfläche links unten zu betätigen. Es öffnen sich drei neue Fenster (siehe Abb. 4.4), wovon das unterste einen „Start“-Button besitzt (dieser kann auch gleich betätigt werden). Sobald dieser gedrückt wird wartet die Software nur auf den benötigten Trigger und die Aufzeichnung startet von selbst. Als Trigger wird der Pegel des 1. Eingangskanals verwendet. So beginnt die Aufnahme erst dann, wenn der Sinus-Sweep abgespielt wird. Anhand der Diagramme kann online mitverfolgt werden, welcher Verlauf von Spannung bzw. Schalldruck gerade gemessen wird.

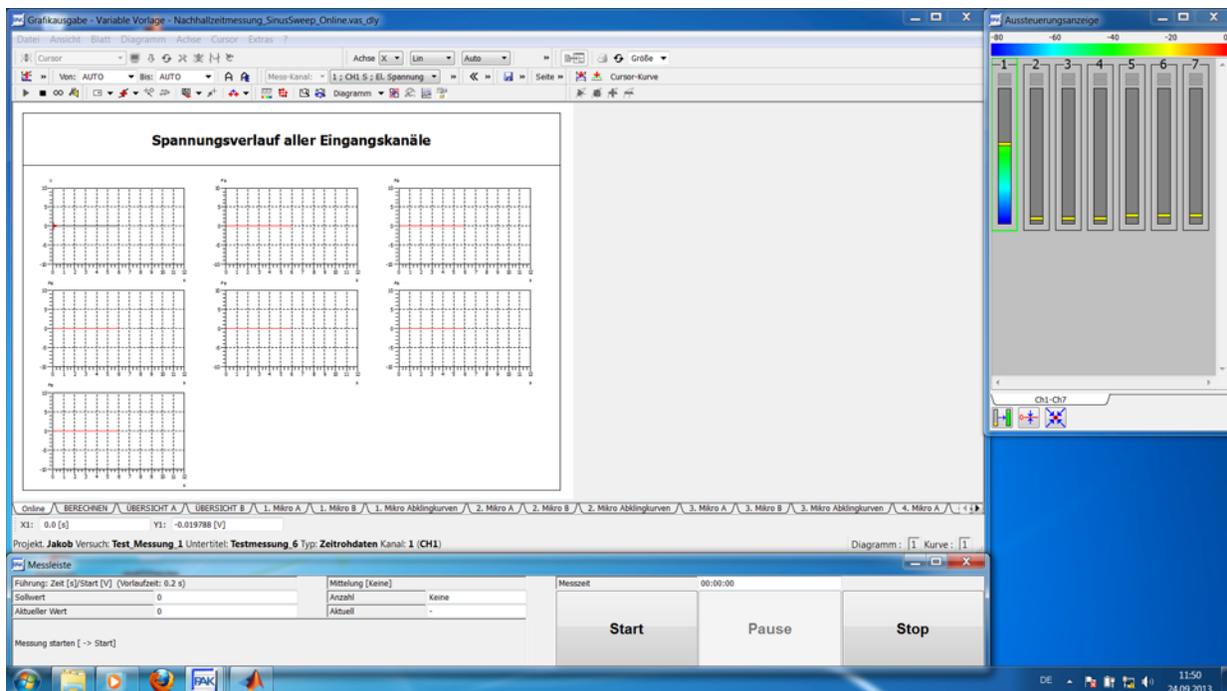


Abb. 4.4: Fenstersetup, welches erscheint, wenn eine Messung mit 6 Mikrofonen durchgeführt wird.

Um nun den Sweep abzuspielen, muss im Hauptfenster die „Daten-Betrachtung“ geöffnet werden (siehe Abb. 4.5). In „Messdaten-Pfad/Nachhallzeitmessung\_Sinus Sweep/SinSweep\_Log“ befinden sich die zur Verfügung stehenden, bereits erstellten logarithmischen Sinus-Sweeps. In der Bezeichnung steht Länge sowie Start- und Endfrequenz. Wenn der benötigte Sweep markiert ist, kann oben unter den Menüs der „Play“-Button gedrückt werden. Allerdings sollte davor der „Start“-Button in der Messleiste (unten) gedrückt worden sein (siehe Abb. 4.4). Mit dem „Play“-Button startet man das markierte Audiofile, triggert damit den eigentlichen Start der Aufzeichnung und beschallt den Raum.

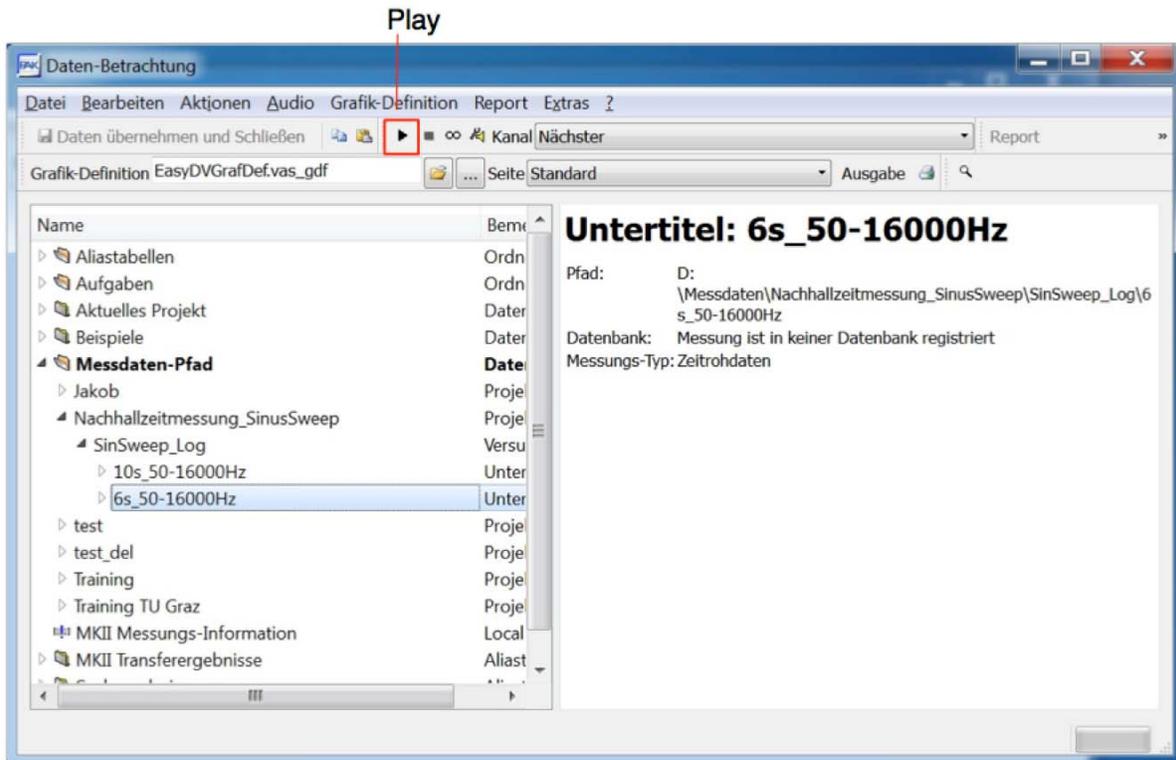


Abb. 4.5: Daten-Betrachtung von PAK 5.7.

Nach Verstreichen der Aufnahmezeit ist es möglich zwischen den Reitern unten in der Grafikausgabe umzuschalten. Als erstes muss jener mit der Bezeichnung „BERECHNEN“ aktiviert werden. Nach ca. 30s (je nach Mikrophonanzahl) erscheint ein Text welcher anzeigt, wie viele Fehler es bei der Berechnung gab (siehe Abb. 4.6). Im Normalfall sollte alles problemlos berechnet worden sein. Nun kann zwischen weiteren Reitern zur Ergebnisdarstellung umgeschaltet werden.

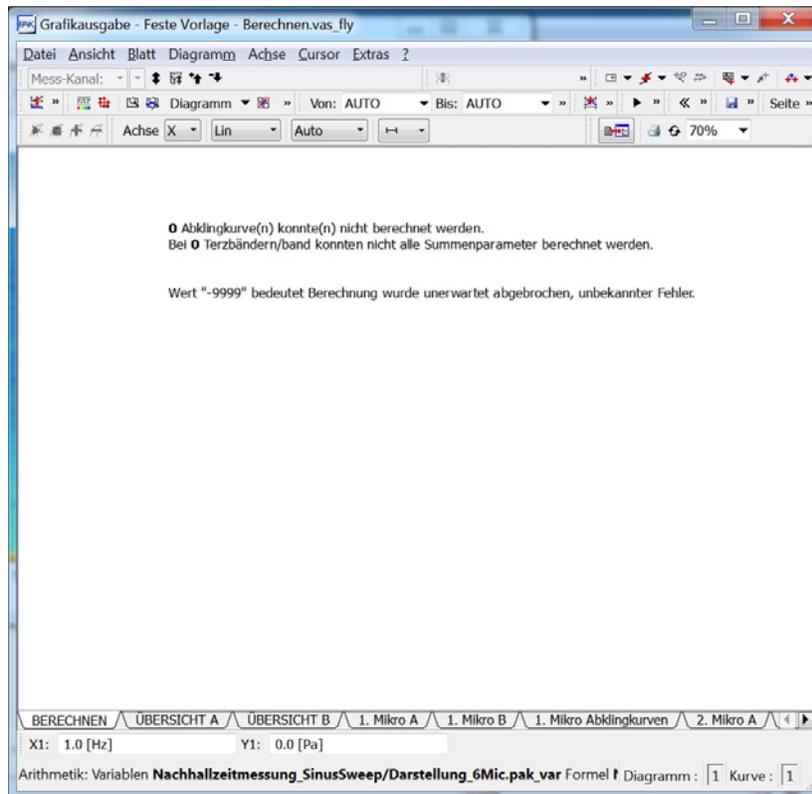


Abb. 4.6: Ansicht des „Berechnen“-Reiters, welcher erscheint, sobald die Berechnungen durchgeführt wurden.

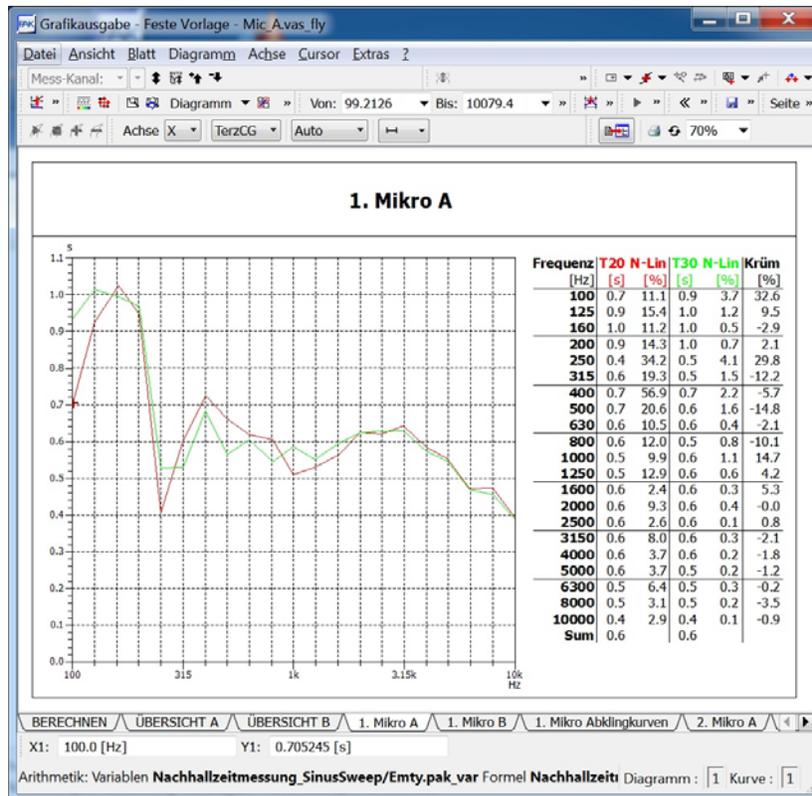


Abb. 4.7: Beispiel eines Messergebnisses. Daten aus einer Messung im Tonlabor der Inffeldgasse 12, TU Graz.

Ein Speichern der plots ist unter „Datei/Speichern als ...“ sowohl als pdf, emf, svg sowie png möglich. Das Drucken findet sich unter „Datei/Drucken“.

Es besteht auch die Möglichkeit direkt auf die berechneten Matlabdaten zuzugreifen. Diese befinden sich im Verzeichnis „C:\Users\PAK\PakData\DATA \Nachhallzeitmessung\_SinusSweep\Temp\_Messdaten\Mat-Files und sind dort als Mic1.mat bis MicX.mat gespeichert.

Bei Beendigung von PAK sollte die Frage, ob die Änderungen gespeichert werden sollen, mit „Nein“ beantwortet werden. Andernfalls überschreibt PAK zwar das Preset nicht, erstellt jedoch ein gleichnamiges im Basisverzeichnis, was später eventuell zu Verwirrungen führen kann.

#### 4.4 Anzeigen von Messergebnissen ohne direkte Messung

Für den Fall, dass der Aufzeichnungsteil der Messung bereits erfolgte und die Messergebnisse nur (erneut) dargestellt werden sollen, gibt es eigens vorbereitete Presets. Mit dem obigen Verfahren (Kap. 4.3) ist ein reines Darstellen, ohne unmittelbar vorhergegangener Aufzeichnung, nicht möglich.

Auch bei diesem Vorgehen ist es möglich, wie bei vorhergegangener Messung (Kap. 4.3) die Ergebnisse zu plotten, sowie auf die mat-Files direkt zuzugreifen.

##### 4.4.1 Darstellung eines einzelnen Datensatzes

Dazu ist im Hauptfenster (siehe Abb. 4.2) die „Grafik-Definition“ zu öffnen und dort die entsprechende Vorlage – über „Öffnen“ (siehe Abb. 4.8) – zu laden. Diese befindet sich im Ordner „Nachhallzeitmessung\_SinusSweep“ unter dem Titel „Darstellung\_XMic“. Um den Datensatz auszuwählen muss im „BERECHNEN“-Reiter die Datendefinition der ersten Kurve geöffnet werden (siehe Abb. 4.8). Weiters wird unter „Messungsname“ die darzustellende Messung (bzw. deren Rohdaten) ausgewählt und mit „Ok“ bestätigt (siehe Abb. 4.9). Durch Drücken der Schaltfläche „Grafikausgabe“ links unten in der „Grafik-Definition“ öffnet sich selbige und die Datenberechnung wird gestartet (siehe Abb. 4.6). Es sollte auch hier immer zuerst der „BERECHNEN“-Reiter geöffnet werden, um die Daten gleich zu berechnen.

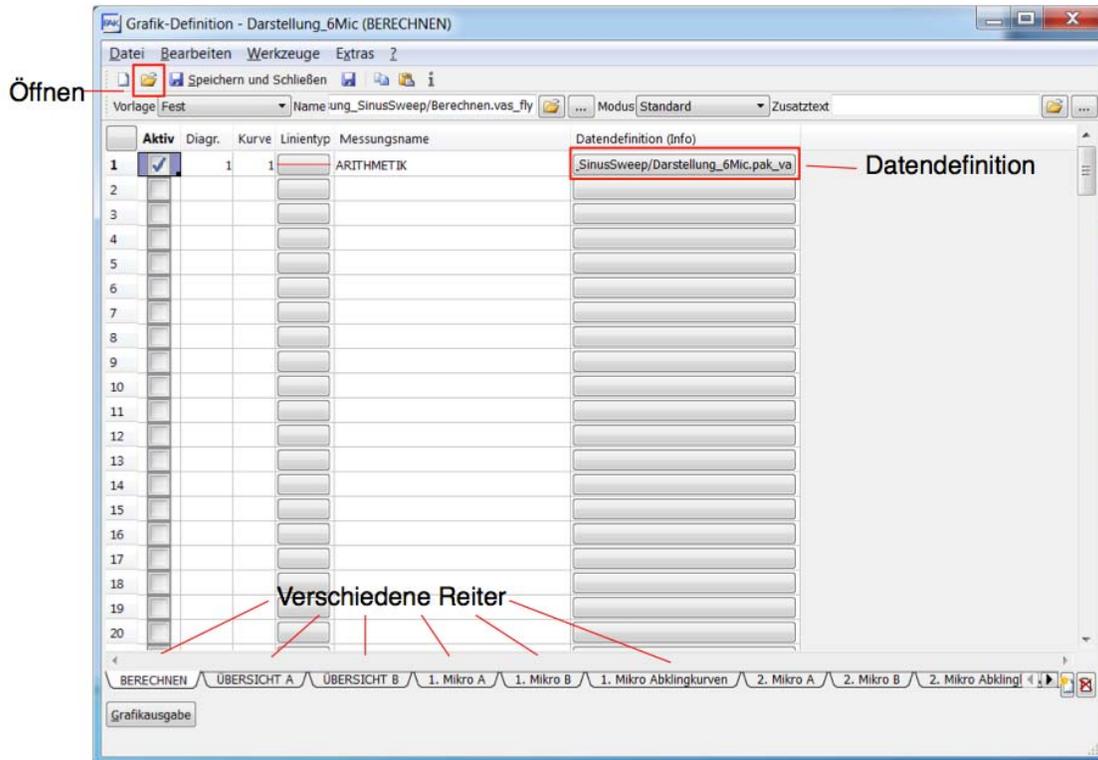


Abb. 4.8: Grafik-Definition bei der reinen Darstellung einer Messung mit 6 Mikrofonen in PAK 5.7.

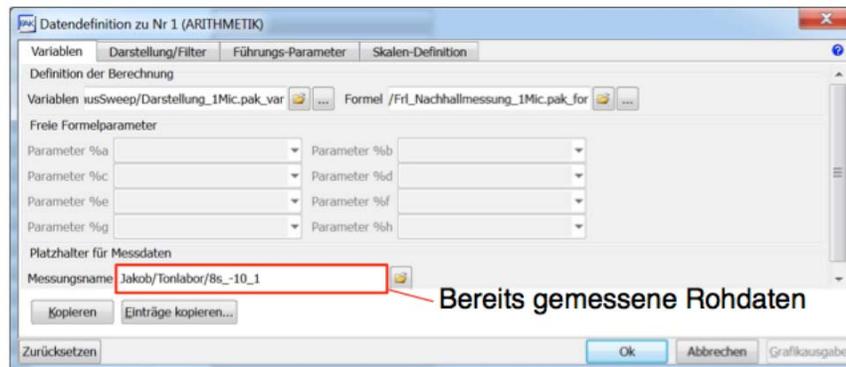


Abb. 4.9: Datendefinition innerhalb der Grafikdefinition von PAK 5.7.

#### 4.4.2 Gemeinsame Darstellung mehrerer Datensätze

Dies ist erforderlich, wenn mehrere Messdatensätze aufgezeichnet wurden und darüber nun ein Durchschnitt berechnet werden soll. Dies trifft auf alle normgerechten Nachhallmessungen zu, welche mit mehr als einer Lautsprecherposition durchzuführen sind.

Zu Beginn muss im Hauptfenster (siehe Abb. 4.2) die Grafik-Definitionen geöffnet werden. Dort ist über „Öffnen“ (siehe Abb. 4.8) das Preset „Darstellung\_mehrere\_Messungen\_Y“ (Y gibt die Gesamtanzahl der verwendeten Mikrofon-Quelle-Kombinationen an) im Ordner „Nachhallzeitmessung\_SinusSweep“ zu laden. Dann wird im „Berechnen“-Reiter (ganz links) die Datendefinition der ersten Kurve geöffnet (siehe Abb. 4.8). In einem weiteren Unterfenster müssen nun die Variablen definiert werden

(siehe Abb. 4.10). Als Variablen gelten die aufgezeichneten Mikrophon-Quelle-Kombinationen der vorhergegangenen Messungen. Über den Button „...“ (Ändern der Variablen) öffnet sich das Arithmetikfenster mit dem Reiter Variablen (siehe Abb. 4.11).

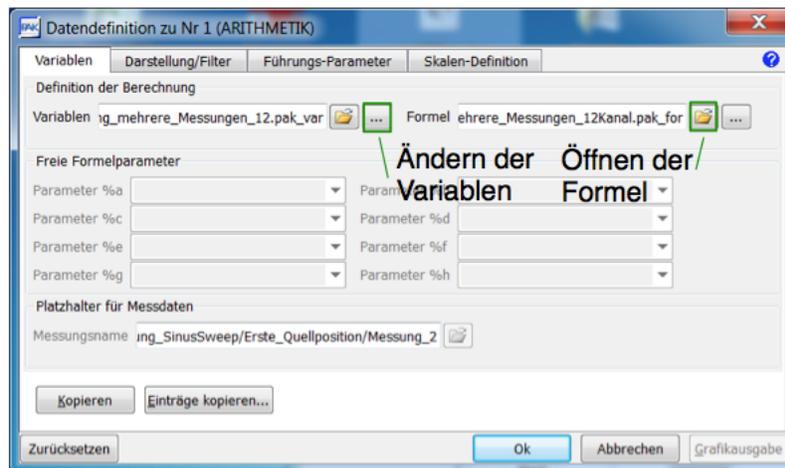


Abb. 4.10: Datendefinition innerhalb der Grafikdefinition von PAK 5.7.

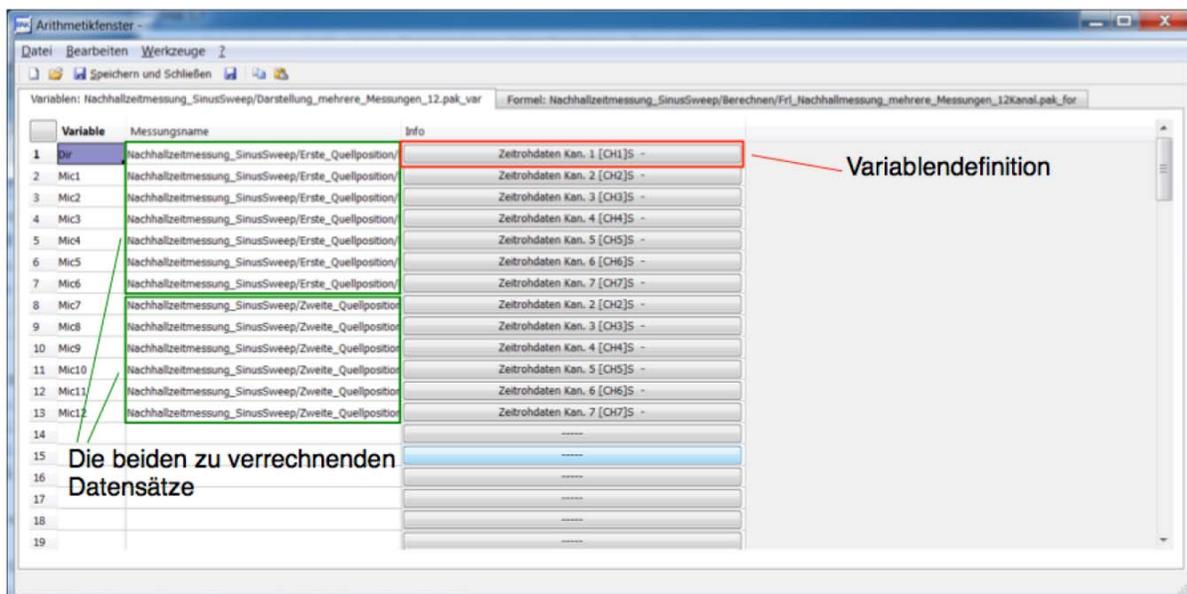


Abb. 4.11: Variablenreiter des Arithmetikfensters innerhalb der Datendefinition von PAK 5.7. Hier im Fall von einer Messung mit 2 Quell- und 6 Mikrophonpositionen.

Dort stehen links die Signalnamen (Dir, Mic1, Mic2, ..., MicY) und daneben der ihnen zugewiesene Datensatz mit dem entsprechenden Kanal. Nun müssen vom User die zu verrechnenden Datensätze sowie deren Kanäle eingestellt werden. Dies geschieht über das Öffnen-Symbol in der „Messungsname“-Spalte, welches durch Klicken auf die Pfadangabe erscheint. In einem weiteren Fenster öffnet sich daraufhin eine Datenbetrachtung und der gewünschte Datensatz kann ausgewählt werden. Weiters müssen die Kanäle des jeweiligen Datensatzes eingestellt werden. Dies geschieht über die Schaltflächen in der „Info“-Spalte (siehe Abb. 4.11). Daraufhin öffnet sich das Fenster „Variablendefinition“ (siehe Abb. 4.12). Hier muss nun der jeweilige Kanal ausgewählt

werden. Dabei ist es sinnvoll die Kanäle von 1 bis X von oben nach unten zuzuweisen. Dies ist für alle benötigten Kanäle durchzuführen (analog zu Abb. 4.11). Die Anzahl der bereits angelegten Variablen entspricht der benötigten.

Dabei ist nicht zu vergessen, dass der 1. Kanal immer das direkte Anregungssignal ist, welches bei dieser Datenverrechnung nur einmal benötigt wird (für die Variable „Dir“).

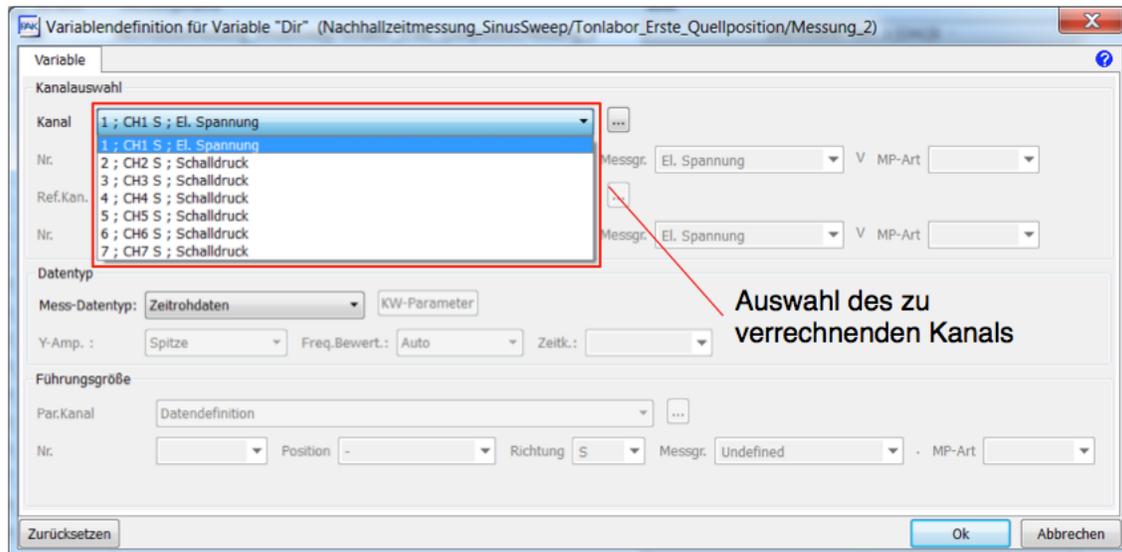


Abb. 4.12: Variablendefinition eines Datensatzes zur Auswahl des Kanals in PAK 5.7.

Abschließend wird das Arithmetikfenster mit „Speichern und Schließen“ verlassen und die richtige Formel ausgewählt (siehe Abb. 4.10). Diese findet sich im Ornder „Nachhallzeit-messung\_SinusSweep\Berechnen“ unter dem Namen „FrI\_Nachhallmessung\_mehrere\_Messungen\_YKanal“.

Es ist wichtig zuerst die Variablendefinition abzuschließen und zu speichern und erst dann die Formel auszuwählen, da sonst der Formelpfad falsch ausgewählt wird.

Auch hier sollte darauf geachtet werden, in der Grafikausgabe immer zuerst den Berechnungsreiter zu aktivieren, um sicher sein zu können, die aktuellen Daten im Zwischenspeicher zu haben und diese darzustellen.

## 5 Beispielmessungen

Um das System als Ganzes bei einer Normmessung nach 3382 [1] zu testen, wurden Nachhallmessungen an zwei verschiedenen Orten durchgeführt.

### 5.1 Vermessung des Besprechungsraumes „Rom“ (ACC Fürstenfeld)

Im Rahmen einer Abschlussarbeit eines Kollegen war unter anderem auch eine Nachhallzeitmessung in einem Besprechungsraum von ACC in Fürstenfeld durchzuführen. Diese wurde als erste Möglichkeit der Approbation genutzt. Die Messung fand am 29.10.12 statt und wurde nach dem Standardverfahren mit 6 Sender-Mikrophon-Kombinationen durchgeführt.

Die folgende Grafik zeigt den Grundriss inklusive der verwendeten Positionen.

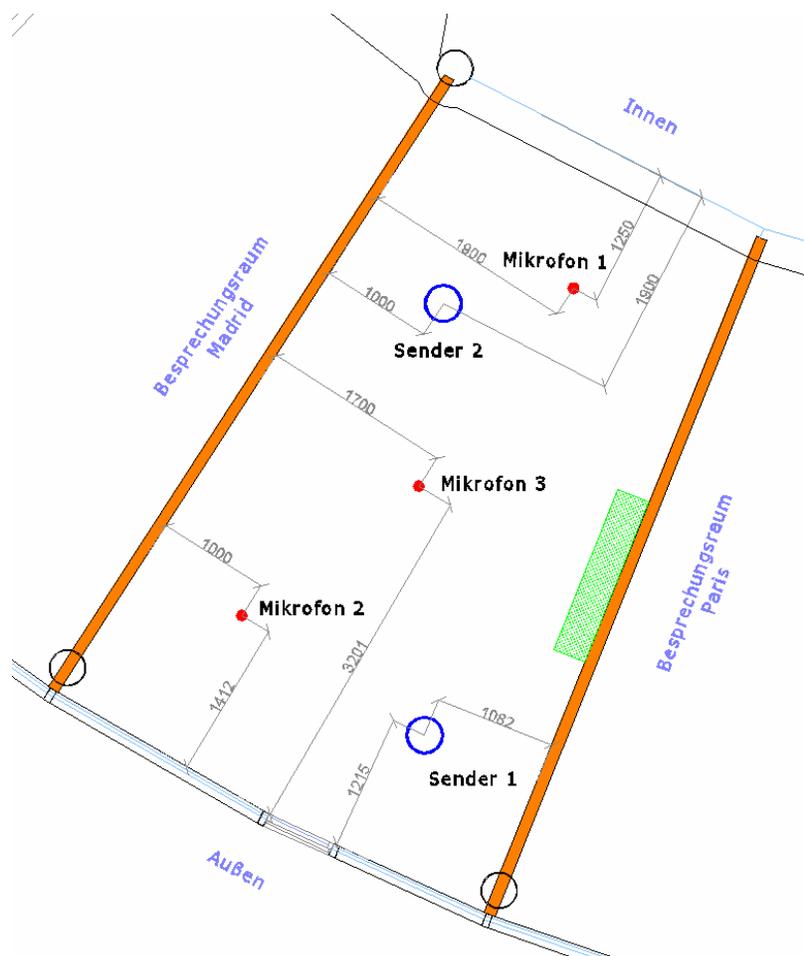


Abb. 5.1: Grundriss des Besprechungsraumes „Rom“ von ACC in Fürstenfeld. Alle Angaben in mm.

Es wurden alle Anforderungen der Norm an die Positionierung erfüllt. Während der Messung befanden sich keine Personen im Raum.

Als Ergebnis sei hier nur die Übersicht über den Durchschnitt der gesamten Messung gegeben, da eine Einzeldarstellung aller Ansichten den Rahmen sprengen würde.

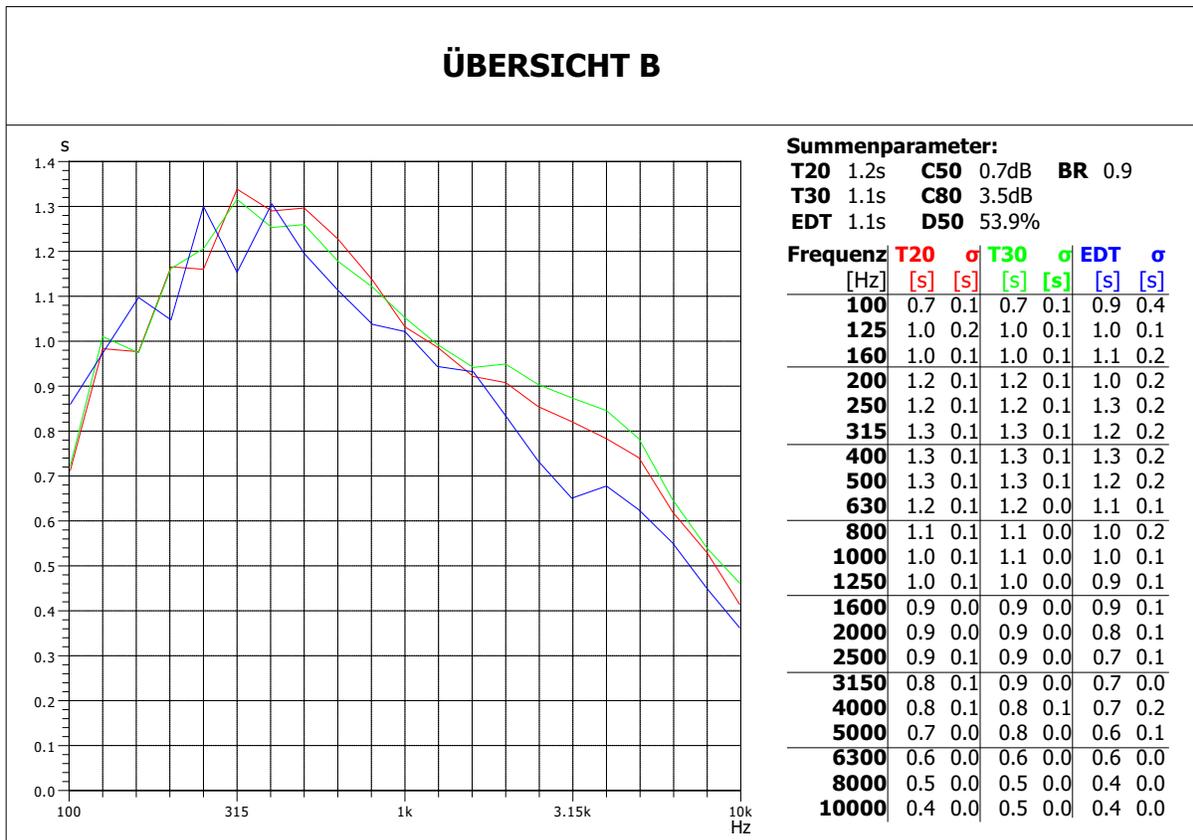


Abb. 5.2: Übersicht (B) über die Messergebnisse im Besprechungsraum „Rom“ von ACC in Fürstentfeld.

## Diskussion

Da der Raum so gut wie keine absorbierenden Gegenstände enthielt, ist die generell sehr hohe Nachhallzeit nicht verwunderlich. Interessant ist vor allem der Abfall unter 300Hz. Dieser tritt für gewöhnlich in derartigen Räumen nicht auf, und ist wahrscheinlich der Glasfassade nach Außen zu verdanken. Diese bedeckt einen beachtlichen Teil der Raumbegrenzungsfläche und wirkt wie mehrere einzelne Plattenresonatoren. Der Abfall zu den Höhen ist nicht weiter verwunderlich, da bei zunehmender Frequenz sämtliche Gegenstände beginnen als Absorber zu wirken und es dadurch vermehrt zum Schallenergieverlust kommt.

## 5.2 Vermessung des Tonlabors der Inffeldgasse 12 (TU Graz)

Die Vermessung des Tonlabors wurde am 21.12.12 in Anlehnung an das Präzisionsverfahren nach 3382 [1] durchgeführt. Es kamen 6 Mikrophon- und 2 Lautsprecherpositionen zur Anwendung (insg. 12 Sender-Mikrophon-Kombinationen). Ein Grundriss zeigt das Messobjekt mit den verwendeten Mikrophon- und Lautsprecherpositionen.

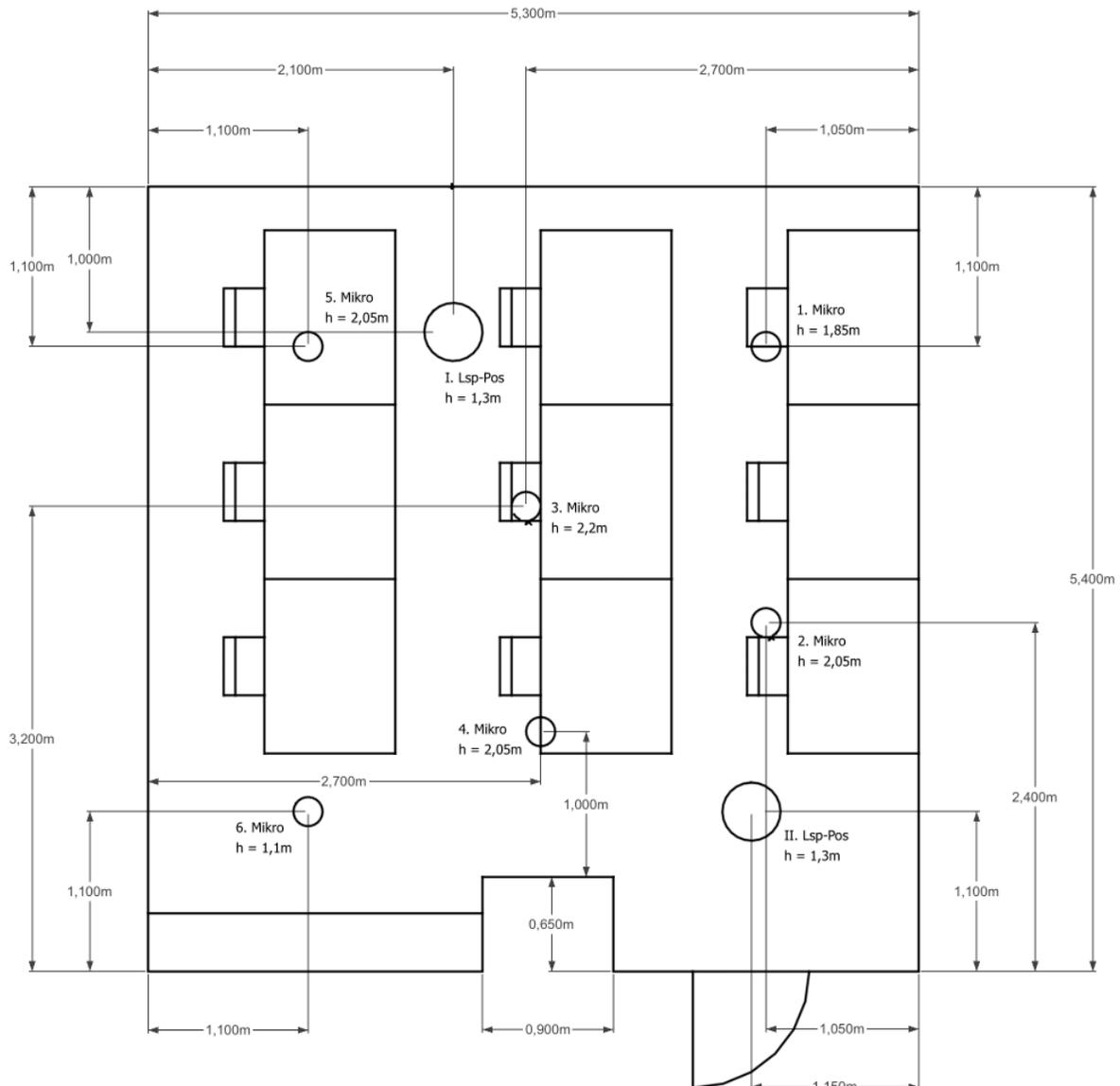


Abb. 5.3: Grober Grundriss des Tonlabors der Inffeldgasse 12 (TU Graz). Die kleinen Kreise repräsentieren die 6 Mikrophon-, die größeren die 2 Lautsprecherpositionen. Alle Angaben in m.  $H = 3,1\text{m}$ ,  $V = 88,35\text{m}^3$ .



Abb. 5.4: Fotos des Messaufbaus mit der ersten Lautsprecherposition.



Abb. 5.5: Fotos des Messaufbaus mit der zweiten Lautsprecherposition.

Es wurde versucht alle Mindestabstände (Mikrophon - Mikrophon, Mikrophon - Lautsprecher, Mikophon/Lautspecher - reflektierende Flächen) einzuhalten. Dies gestaltete sich aufgrund der Raumgröße nicht einfach und es wurden kleine Kompromisse eingegangen, z.B. betrug der Abstand zwischen dem 4. und dem 6. Mikrophon nur ca. 1,8m anstatt den zu erreichenden 2m. Weiters wurde auf das Messen der Raumtemperatur und der relativen Luftfeuchte verzichtet, wobei sich diese gefühlt im typischen Bereich befanden.

Der Laptop und das PAK MOBILE MKII wurden am Tisch neben dem 4. Mikrophon aufgebaut. Somit war immer eine Person während der Messung im Raum anwesend. Auch hier sei als Ergebnis nur die Übersicht über den Durchschnitt aller aufgezeichneten Kanäle gegeben.

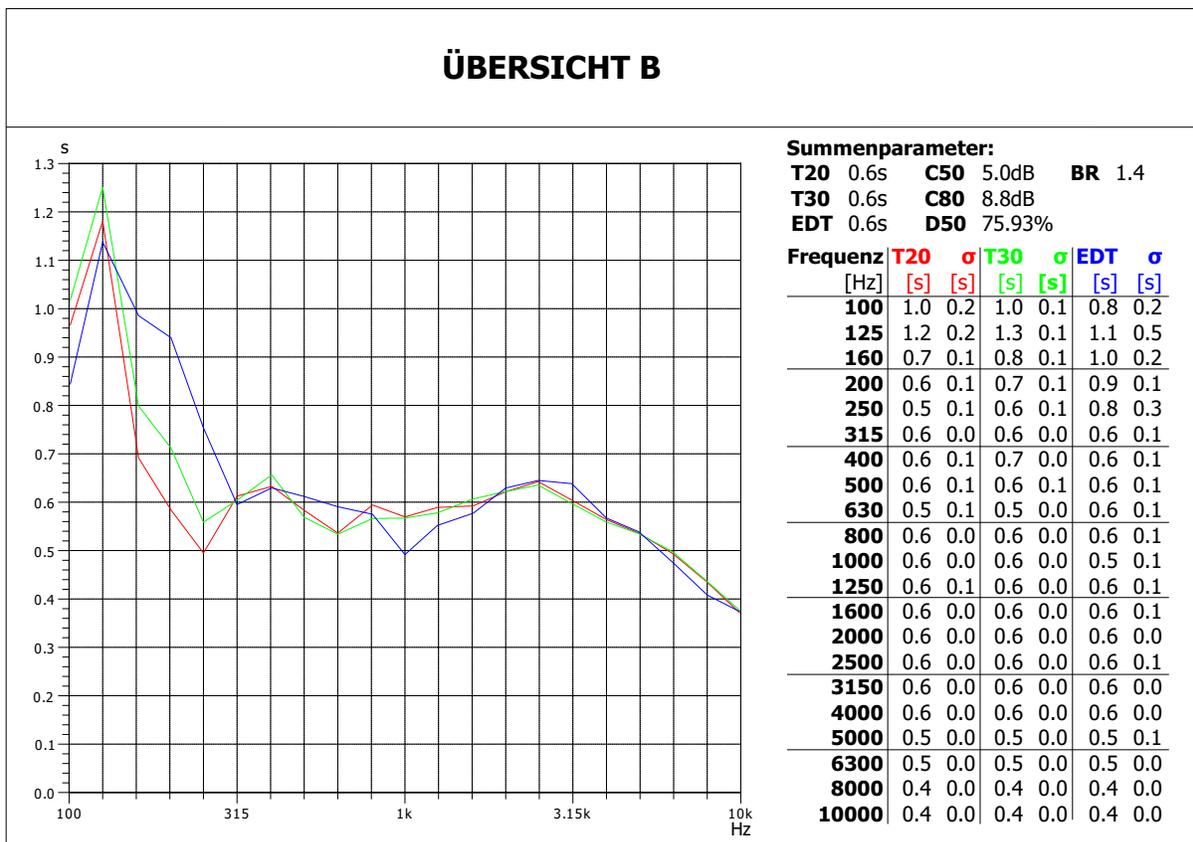


Abb. 5.6: Übersicht (B) über die Messergebnisse im Tonlabor der Inffeldgasse 12 der TU Graz.

## Diskussion

Dieser Raum zeigt in etwa den typischen Verlauf eines Seminarraumes dieser Größe. Aufgrund der verhältnismäßig vielen Gegenstände (Schreibtische, Sessel, Computer usw.) ergibt sich eine höhere Absorption im mittleren und hohen Frequenzbereich. Unter 300Hz nehmen diese Einflüsse ab und die Nachhallzeit steigt stark an. Dem Unterschied zwischen 100 und 125Hz sollte nicht allzu viel Beachtung geschenkt werden, da in diesem Bereich der Effekt isolierter Raummoden einsetzt und die Grundlage für das Modell der statistischen Raumakustik nicht mehr in vollem Maß gegeben ist.