# Implementation einer Freifeld-Klassifizierungsmessung mit Multisinus

Bachelorarbeit im Rahmen des Elektro- und Raumakustik-Seminars verfasst von

**Meyer Simon** 

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

# **ZUSAMMENFASSUNG**

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Implementierung und Durchführung einer Messung zur Raumeignungsprüfung eines Freifeldraumes mit Hilfe der Software *PAK* von der Firma *Müller BBM* und einer Implementierung eines Multisinussignals in *Matlab*.

Die Durchführung erfolgt im Tonstudio des Instituts für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation. Als Messvorschrift dient die Norm *EN ISO 3745, Anhang A* sowie die internationale Norm *ISO 26101*.

# **INHALTSVERZEICHNIS**

1	Mes	sung nach EN ISO 3745, Anhang A	. 1
1.1	Anz	zahl der Mikrofonbahnen	. 1
1.2	Räu	ımliche Auflösung der Messpunkte	. 1
1.3	Mir	nimaler und maximaler Messradius	. 2
1.4	Prü	fsignal	. 2
2	Impl	lementierung und Optimierung des Multisinus	. 3
2.1	Lov	v-Peak-Faktor-Signal	. 3
2.2	Ver	gleich verschiedener Phasenverschiebungen	. 5
3	Impl	lementierung in PAK	. 7
3.1	Me	ssdefinition	. 7
3.2	Gra	fikauswertung	10
3.3	Ber	echnung mittels PAK Arithmetik	11
3.	3.1	Variablendateien	11
3.	3.2	Formel für die Sollkurve und für den Toleranzschlauch	12
3.	3.3	Formel für die Ist-Kurve	13
3.	3.4	Formel für die Tabellenauswertung	16
4	Mes	sdurchführung	19
4.1	Allg	gemeines	19
4.	1.1	Messaufbau	19
4.	1.2	Inventarliste	20
4.	1.3	Kennwerte der verwendeten Prüflautsprecher	21
4.	1.4	Messablauf	24
4.	1.5	Parameteränderungen	26
4.2	Me	ssungen im SPSC-Tonstudio	29
4.	2.1	Raumabmessungen	29
4.	2.2	Wahl der Messpfade	31
4.	2.3	Messauswertung	32
5	Anh	ang	33
5.1	Pfa	dangaben PAK-Rechner	33

# **LITERATURVERZEICHNIS**

- [1] EN ISO 3745, Akustik Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume.
- [2] ISO 26101, Acoustics Test methodes for the qualification of free-field environments
- [3] M. R. Schröder Bell Telephone Labs., Inc. Murray Hill, N. J. 09747, Synthesis of Low-Peak-Factor Signals and Binary Sequences With Low Autocorrelation, 1969
- [4] Weselak W., Akustische Messtechnik Skript, v.11.0, TU Graz, 2016
- [5] Spötl J., Untersuchung des Einflusses der Mikrofonpositionen in einem Hallraum, Masterarbeit, TU Graz, 2014
- [6] Balint J. und Weselak W., Akustische Messtechnik Labor Skript, v2.0, TU Graz, 2016
- [7] Norsonic, Datenblatt Norsonic Schallquellen, PD NoiseExcit Ed5Rev2 Eng 0510

# 1 Messung nach EN ISO 3745, Anhang A

Um einen reflexionsarmen Raum für eine Schallleistungsmessung nach Norm [1] zu klassifizieren, muss auf definierten Bahnen der Schalldruckpegelabfall für mehrere Frequenzen überprüft und mit dem theoretischen Wert des theoretischen Abfalls nach dem Entfernungsgesetz verglichen werden. Mit diesen Werten kann eine "Messkugel" bestimmt werden. Nur innerhalb dieser Kugel ist eine Schallpegelmessung zulässig.

Das Verfahren dazu wird im Anhang A der Norm EN ISO 3745 [1] und in der internationalen Norm ISO 26101 [2] beschrieben und in den folgenden Kapiteln behandelt.

## 1.1 Anzahl der Mikrofonbahnen

Auf mindestens 5 bis maximal 8 Bahnen soll der Schalldruckpegelabfall ermittelt werden. Alle Bahnen müssen dabei den gleichen Ursprung haben, welcher im physikalischen Volumen der Schallquelle liegen soll:

- Eine Bahn führt in Richtung einer (zweiflächigen) Kante, die repräsentativ in Bezug auf das freie Schallfeld ist und die einheitlichsten akustischen Eigenschaften hat.
- Eine Bahn führt in Richtung einer (dreiflächigen) Ecke, die repräsentativ in Bezug auf das freie Schallfeld ist und die einheitlichsten akustischen Eigenschaften hat.
- Eine Bahn führt in Richtung des Mittelpunkts einer Grenzfläche, die repräsentativ in Bezug auf das freie Schallfeld ist und die einheitlichsten akustischen Eigenschaften hat.
- Eine Bahn führt in Richtung der nächstgelegenen Grenzfläche.
- Eine Bahn führt in Richtung einer Grenzfläche mit abweichenden akustischen Eigenschaften gegenüber anderer Flächen des Raumes (z.B. Fenster, Türe, etc.).

# 1.2 Räumliche Auflösung der Messpunkte

- Innerhalb des maximalen Radius müssen gesamt mindestens 50 Messpunkte liegen.
- Der Abstand darf unterhalb von 250 Hz maximal ein Zehntel der Wellenlänge des Prüfsignals sein bei 100 Hz also 340 mm.
- Der Abstand darf oberhalb von 250 Hz maximal 100 mm sein.

Bei gleichzeitiger Messung mehrerer Frequenzen muss somit ein einheitlicher Maximalabstand von 100 mm zwischen allen Messpunkten eingehalten werden.

# 1.3 Minimaler und maximaler Messradius

Der minimale Radius, ab dem laut Norm [1] gemessen werden darf, muss folgende Punkte erfüllen:

- $r \ge 2 * d$  (Durchmesser der Schallquelle)
- $r \ge \frac{\lambda}{4} = \frac{343\frac{m}{s}}{100 \, Hz*4} = 0.86m$  (Wert für die kleinste Frequenz)
- $r \ge 1m$

Der maximale Radius beschreibt den größten Radius, innerhalb dem später eine normgerechte Messung von Schallquellen erlaubt ist und ergibt sich aus der maximal zulässigen Abweichung vom theoretischen Wert der Schallabnahme im Freifeld und dem tatsächlichen gemessenen Wert:

Innerhalb der Messkugel (Vollfreifeld) ist bis 630 Hz und ab 6300 Hz eine Abweichung vom theoretischen Schalldruckpegelabfall nach dem Entfernungsgesetz von maximal ±1,5 dB und für die Frequenzbänder dazwischen eine Abweichung von maximal ±1 dB erlaubt.

Innerhalb einer Messhalbkugel (Halbfreifeld) ist bis 630 Hz eine Abweichung von maximal ±2,5 dB, von 800 Hz bis 5000 Hz eine Abweichung von maximal ±2,0 dB und ab 6300 Hz eine Abweichung von maximal ±3,0 dB zulässig.

# 1.4 Prüfsignal

Als Prüfsignal werden Sinustöne der genormten Terzmittenfrequenzen im Bereich zwischen 100 Hz und 10 kHz vorgegeben. Zwischen 125 Hz und 4 kHz müssen nur die Mittenfrequenzen der Oktavbänder ausgewertet werden, darunter und darüber alle Terzmittenfrequenzen. Die Töne müssen zwar dabei nicht einzeln abgespielt werden, jedoch muss bei Verwendung von Multisinus-Testsignalen laut Norm [2] darauf geachtet werden, dass bei der Ermittlung der einzelnen Amplituden die Energie der nicht analysierten Frequenzen nach der Filterung unter 15 dB gegenüber der analysierten Frequenz ist. Beispielsweise bedeutet das bei einer Filterung mit Terzbandfiltern, dass keine benachbarten Terzmittenfrequenzen verwendet werden können und zwei Messdurchgänge pro Messpunkt erforderlich sind.

Anstelle von Filtern darf auch eine FFT-Analyse durchgeführt werden, somit können alle Terzmittenfrequenzen gleichzeitig abgespielt und aufgenommen werden.

# 2 Implementierung und Optimierung des Multisinus

Um die Messzeit möglichst zu verkürzen, soll das Prüfsignal als Multisinus ausgegeben werden. Auch die laut Norm nicht geforderten Terzmittenfrequenzen zwischen 125 Hz und 4 kHz sollen darin enthalten sein. Somit besteht das Prüfsignal aus den folgenden 21 Sinustönen:

**100**, **125**, 160, 200, **250**, 315, 400, **500**, 630, 800, **1000**, 1250, 1600, **2000**, 2500, 3150, **4000**, **5000**, **6300**, **8000** und **10000** Hz

(Die markierten Werte sind die laut Norm geforderten Terzmittenfrequenzen.)

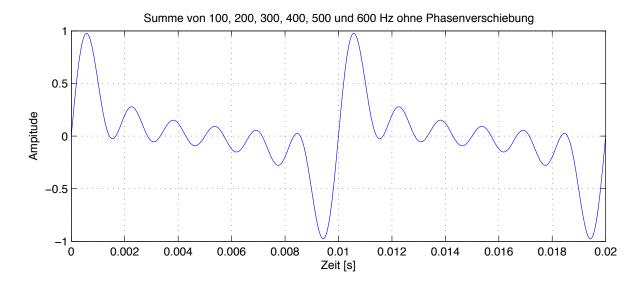
# 2.1 Low-Peak-Faktor-Signal

Bei der Summenbildung von Sinusschwingungen mit verschiedenen Frequenzen ergeben sich durch die Überlagerung mehrerer Signalflanken unerwünschte Peaks im Signal. Diese Peaks verringern die Energie des quantifizierten Audiosignals. Durch unterschiedliche Phasenverschiebungen der Schwingungen zueinander können sie minimiert werden. Der theoretische Physiker Manfred Schröder hat dazu in seinem Artikel [3] folgenden Algorithmus entwickelt, mit dessen Hilfe die höchste Dekorrelation beim Summieren von harmonischen Schwingungen erreicht werden kann:

$$\varphi_k = \varphi_1 - \frac{\pi * k^2}{N} \qquad [3]$$

Als Maß für die Energie des Signals führt Schröder einen "Peak-Faktor" ein, bei dem die Differenz des Maximal- und Minimalwerts durch den Effektivwert dividiert wird.

In der Abbildung 1 ist der Vergleich zwischen harmonischen Schwingungen ohne Phasenverschiebung und harmonischen Schwingungen mit Phasenverschiebung nach dem Schröder-Algorithmus zu sehen. Nach der Skalierung hat das Signal ohne Phasenverschiebung einen Effektivwert von  $x_{eff,ohne} = 0,37$  und mit Phasenverschiebung einen Effektivwert von  $x_{eff,Schröder} = 0,48$ .



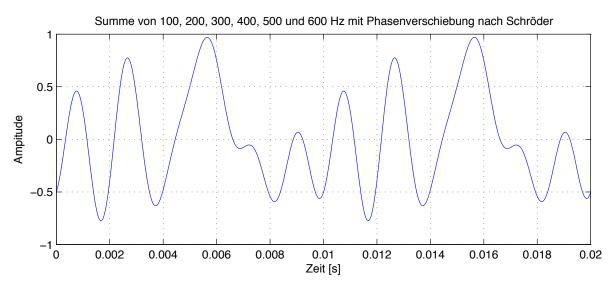


Abbildung 1: Summenbildung von harmonischen Sinussignalen

# 2.2 Vergleich verschiedener Phasenverschiebungen

Im geforderten Quellsignal sind nicht alle Vielfachen von 100 Hz enthalten. Außerdem kommen auch Frequenzen vor, die nicht dem Vielfachen der Grundfrequenz entsprechen. Werden solche Frequenzen dazu addiert, werden die Peaks bereits ohne Phasenverschiebung schwächer (siehe Abbildung 2).

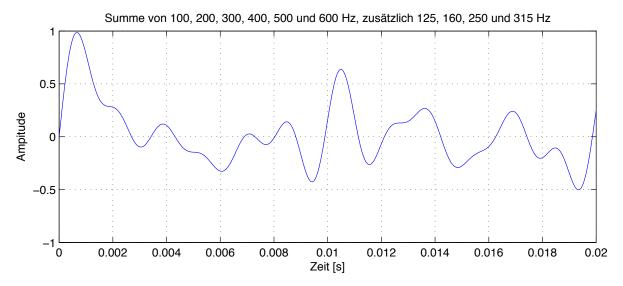


Abbildung 2: Summenbildung von Sinussignalen mit nicht harmonischen Frequenzen

Aus o.g. Gründen kann deshalb der Schröder-Algorithmus den Effektivwert gegenüber dem Signal ohne Phasenverschiebung nicht mehr verbessern.

Zur Optimierung des Quellsignals mit allen 21 Terzmittenfrequenzen wurden mehrere Algorithmen für die Phasenverschiebung gewählt und verglichen.

Phasen- verschiebung	Effektivwert	Maximalwert	Phasenwinkel		
ohne	0,3258	9,9462			
zufällig	0,2644	12,2559	$\varphi_k = \frac{\pi}{2} - 2\pi * rand$		
Schröder- Algorithmus	0,2974	10,8957	$\varphi_k = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi * k^2}{21}$		
linear verteilt zwischen 0 und 2π	0,2473	13,1037	$\varphi_k = \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi * k}{21}$		

Abbildung 3: Vergleich verschiedener Phasenverschiebungen

Abbildung 4 zeigt, dass das Signal ohne Phasenverschiebung tatsächlich am meisten Energie enthält. Die Peaks sind gegenüber dem durchschnittlichen Signalpegel am geringsten. Das Signal mit zufälliger Phasenverschiebung ergibt stark schwankende Ergebnisse, jedoch steigt der Effektivwert nie über 0,32.

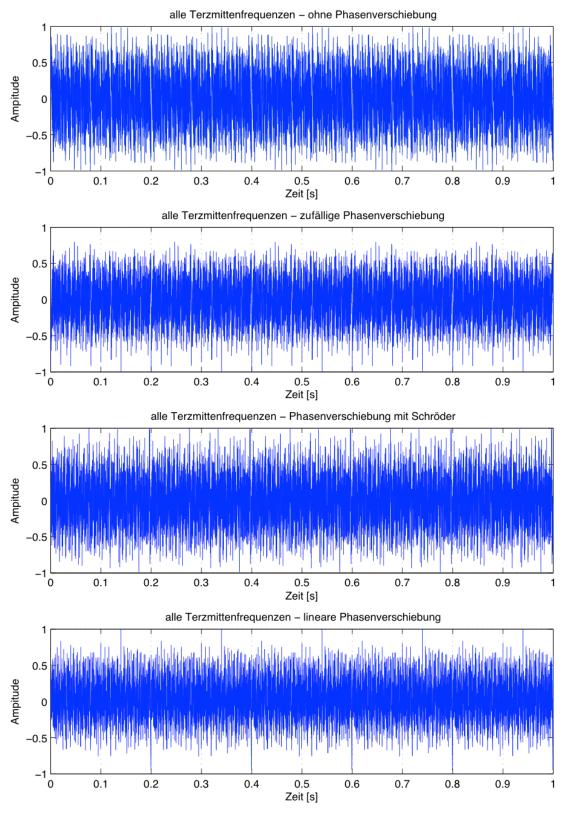


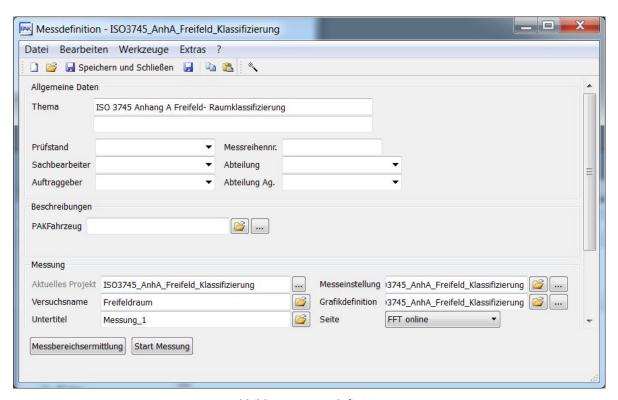
Abbildung 4: Vergleich verschiedener Phasenverschiebungen

# 3 Implementierung in PAK

Die Messung erfolgt mittels des Multichannel-Messgeräts *MKII* der Firma *Müller BBM* und der zugehörigen Software *PAK*. Die Implementierung der Messung und die Umsetzung der Messauswertung sind im Projekt *ISO3745\_AnhA\_Freifeld\_Klassifizierung* und in der gleichnamigen Messdefinition gespeichert und werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

# 3.1 Messdefinition

Die Messung muss vom kleinsten bis zum größten Messradius erfolgen. Jeder Pfad erhält ein eigenes Mikrofon, das nach jeder Messung zum nächstgrößeren Radius gestellt wird. Die jeweiligen Messwerte aller Mikrofone werden in den Ordner Messung\_1, Messung\_2,... gespeichert und in der Grafikausgabe aufgerufen. Aus diesem Grund dürfen die voreingestellten Definitionen im Feld "Versuchsname" und "Untertitel" nicht geändert werden. Das Feld "Untertitel" erhöht seinen Index automatisiert nach jeder erfolgten Messung.



**Abbildung 5: Messdefinition** 

In der zugehörigen Messeinstellungsdatei wurde eine Dauer von 20 Sekunden bestimmt. Die Abtastrate beträgt 32768 Hz, damit die höchste Frequenz von 10 kHz mit der FFT noch erfasst werden kann. Als Trigger-Signal dient das an Kanal 13 angelegte Direktsignal.

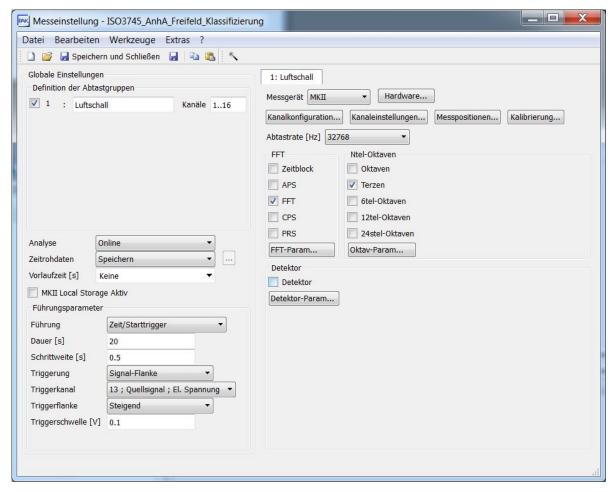


Abbildung 6: Messeinstellung

Als Voreinstellung wurden 5+1 Messkanäle ausgewählt, die Anzahl kann aber unter "Kanaleinstellungen" zwischen 1 und 8 Mikrofonkanälen variiert werden. Dazu müssen die ersten 8 Eingänge benutzt werden.

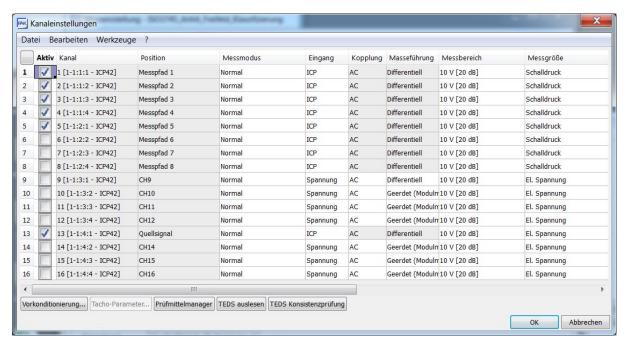
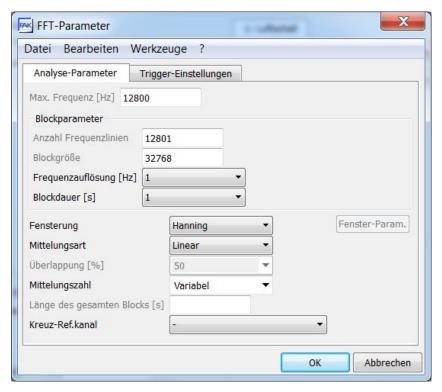


Abbildung 7: Kanaleinstellungen

Gespeichert werden für jeden Kanal die Zeitrohdaten, eine FFT- Analyse und eine Terzbandanalyse. Für die FFT ist eine Schrittweite von 0,5s und eine Blockgröße von 1s mit einer Überlappung von 50% eingestellt. Die Gewichtung erfolgt mit einem Hanning-Fenster.



**Abbildung 8: FFT-Parameter** 

# 3.2 Grafikauswertung

Die Grafikdefinition ist in der Datei *ISO3745\_AnhA\_Freifeld\_Klassifizierung* hinterlegt und besteht aus folgenden Reitern: (siehe Abbildung 15)

- Die "Zeitrohdaten", "FFT online" und "Terzbänder online" zeigen das aktuelle Signal der ersten 8 Kanäle, sowie das Quellsignal am Kanal 13 als Zeitsignal-, FFT- und Terzbandanalyse an. Läuft keine Messung, wird die letzte Messung angezeigt.
- Die Reiter "100" bis "10000" zeigen eine grafische Auswertung des Schalldruckpegelabfalls jedes Messpfades für die jeweilige Terzmittenfrequenz an. Der kleinste Radius entspricht dabei 0 dB, die weiteren Schalldruckpegel werden gegenüber diesem Pegel berechnet. Die Messwerte werden als rote Punkte dargestellt. Zusätzlich wird eine durchgängige Sollkurve und ein strichlierter Toleranzschlauch angezeigt, in dem laut Norm [1] die Messung liegen sollte. Bis 630 Hz hat der Toleranzschlauch ±2,5 dB, für die Frequenzbänder von 800 bis 5000 Hz ±2,0 dB und ab 6300 Hz ±3,0 dB. Auch die Auflösung zwischen den Messpunkten dr = 0,1m, ein minimaler Abstand von  $r_{min} = 0,5$  m und ein maximaler Abstand von  $r_{max} = 5,0$  m sind derzeit vordefiniert, können aber, wie es in Kapitel 4.1.5 beschrieben wird, geändert werden.

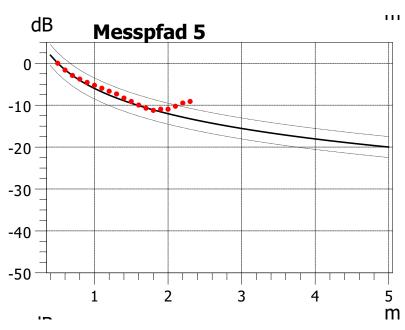


Abbildung 9: Darstellung der Messauswertung (125 Hz)

• Die Reiter "100(Tabelle)" bis "10000(Tabelle)" zeigen die genaue Abweichung vom Sollwert als Zahl in einer Tabelle an.

Für die Darstellung der Reiter wurden folgende Grafikvorlagen erstellt und verwendet:

- ISO3745 AnhA Rohdaten
- ISO3745\_AnhA\_FFT
- ISO3745\_AnhA\_Pegelabfall
- ISO3745\_AnhA\_Tabelle

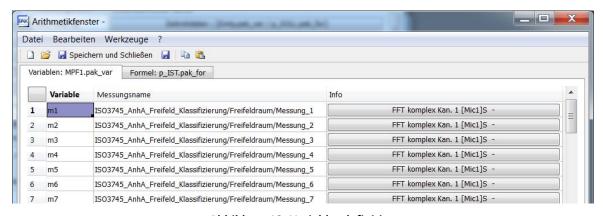
# 3.3 Berechnung mittels PAK Arithmetik

Für die Auswertung wurden folgende 8 Variablen und 10 Formeln erstellt:

- Variablen-Dateien: MPF1.pak var, MPF2.pak var bis MPF8.pak var
- p\_SOLL.pak\_for
- p\_+tol1.pak\_for, p\_-tol1.pak\_for
- p\_+tol2.pak\_for, p\_-tol2.pak\_for
- p +tol3.pak for,
   p -tol3.pak for
- p IST.pak for
- p\_DIFF.pak\_for
- p\_TAB.pak\_for

### 3.3.1 Variablendateien

In der Variablendatei MPF1.pak\_var sind die (derzeit 50) Variablen für den Messpfad 1 enthalten. Der Kanal 1 (Mic 1) wird aus dem jeweiligen Messordner ("Messung\_1", "Messung\_2", etc.) ausgelesen und der Variable mit dem gleichen Suffix ("m1", "m2", etc.) zugeordnet. Die Kanäle 2 bis 8 werden den restlichen Variablendateien mit gleicher Nummerierung zugeordnet. Die Variablen ("m1", "m2", etc.) werden von den Formeln p\_IST.pak\_for, p\_DIFF.pak\_for und p\_TAB.pak\_for aufgerufen.



**Abbildung 10: Variablendefinition** 

#### 3.3.2 Formel für die Sollkurve und für den Toleranzschlauch

Für die Sollkurve und den Toleranzschlauch werden jedem der 8 Diagramme drei Formeln zugeordnet, die den theoretischen Schalldruckpegelabfall berechnen und die Kurve um den im Dateinamen angegebenen dB-Wert verschieben. In der Auswertung sind immer alle 8 Diagramme sichtbar, eine Ist-Kurve wird jedoch nur für die aktiven Kanäle dargestellt.

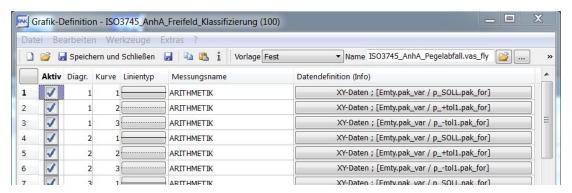


Abbildung 11: Grafikausgabe des Toleranzschlauchs

Die Kurve wird in allen der Toleranz-Formeln gleich berechnet. Es wird lediglich der Wert für die Variable "tol" geändert, um die Kurve nach oben oder unten zu verschieben.

# Parameter definieren	
<i>rmin = 0.5</i>	#Abstand erster Messpunkt vom Mittelpunkt
dr = 0.1	#Abstand zwischen den Messpunkten
rmax =5.0	#maximaler Abstand in der Grafikausgabe (X-Achse)
tol = 0.0	#Toleranz

Die Berechnung erfolgt ab dem Punkt "rmin-1\*dr" bis Punkt "rmin+50\*dr". Für jeden dieser Punkte wird der zugehörige Pegelabfall in dB berechnet. Die Kurve soll dabei an der Stelle "rmin" 0 dB schneiden, alle anderen Punkte werden gegenüber diesem Abstand berechnet. In einem Array werden diese Werte dem entsprechenden X-Wert zugeordnet.

```
array = CREATE\_ARRAY(rmin-1*dr, \quad -20*LOG10((rmin-1*dr)/rmin)+tol, \\ rmin+0*dr, \quad -20*LOG10((rmin+0*dr)/rmin)+tol, \\ rmin+1*dr, \quad -20*LOG10((rmin+1*dr)/rmin)+tol, \\ rmin+2*dr, \quad -20*LOG10((rmin+2*dr)/rmin)+tol, \\ ... \\ rmin+50*dr, \quad -20*LOG10((rmin+50*dr)/rmin)+tol, \\ CREATE\ CURVE)
```

Um die Kurve für mehr Messpunkte beliebig erweitern zu können und trotzdem eine richtige Skalierung der X-Achse zu gewährleisten, wird die Anzahl der Punkte der Kurve über die anfangs definierten Parameter berechnet.

```
rAnzahl = 2+(rmax-rmin)/dr
```

Die Erhöhung um zwei Punkte ergibt sich aus dem zusätzlichen Punkt an der Stelle rmin-1\*dr (hier: 0,4 m) und dem letzten Punkt (hier: 5,0 m)

Anschließend wird das Ergebnis als zweidimensionales Diagramm ausgegeben. Die Ausgabe erfolgt von "rmin-1\*dr" bis "rmax".

```
RESULT = CREATE_2D(rmin-1*dr, rmax, rAnzahl, 'Undefiniert', 'Schalldruck', 'XY-Daten',
DECIBEL, array)
```

### Die Funktion "CREATE\_2D" ist wie folgt aufgebaut:

CREATE\_2D("X-Start", "X-Stop", "X-Anzahl", "Einheit der X-Achse", "Einheit der Y-Achse", "Darstellung der Y-Achse", "Funktionswerte")

### 3.3.3 Formel für die Ist-Kurve

Auch für die Formel "p\_IST.pak\_for" werden die Parameter für die richtige Skalierung der X-Achse gebraucht.

# Parameter definiere	n
<i>rmin = 0.5</i>	#Abstand erster Messpunkt vom Mittelpunkt
dr = 0.1	#Abstand zwischen den Messpunkten
rmax =5.0	#maximaler Abstand in der Grafikausgabe (X-Achse)

Zusätzlich wird über den freien Formelparameter "%a" der Frequenzwert aus der Datendefinition ausgelesen. Dieser Wert bestimmt in der weiteren Berechnung, an welcher Stelle die Amplitude der FFT-Analyse ausgelesen werden soll.

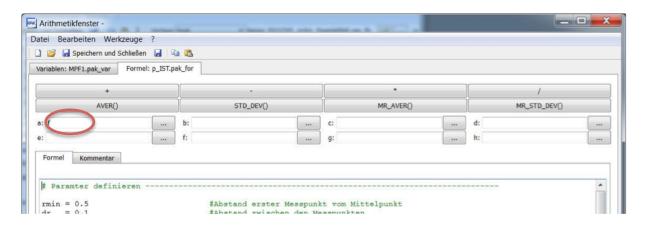


Abbildung 12: Formeleditor (freie Formelparameter bestimmen)

Für die weitere Berechnung werden aus dem Variableneditor die Variablen "m1", "m2", etc. bis (derzeit) "m50" aufgerufen. Da "m1" aus dem Messordner "Messung\_1" entnommen wird und somit dem Schalldruckpegel an der Stelle "rmin" entspricht, wird dieser Wert als Referenzwert "m1 ref" definiert:

```
# Referenzwert (1. Messpunkt) bestimmen ------
#GET_DATA_VAL(X, Y_VAL, AT_VAL, %a) Y-Wert von X an der Stelle %a auslesen
#AVER(...) zeitliche Mittelung (derzeit 20 Sekunden)
# MAG(...) Amplitude aus komplexer FFT-Analyse lesen

m1_ref = GET_DATA_VAL(AVER(MAG(m1)), Y_VAL, AT_VAL, %a)
```

Anschließend wird aus der jeweiligen Variablen ("m1", "m2", etc. bis (derzeit) "m50") die Amplitude bei der Frequenz "%a" ausgelesen, in Verhältnis zum berechneten Referenzwert "m1 ref" gesetzt und in dB umgerechnet:

```
m1\_dB = 20*LOG10(GET\_DATA\_VAL(AVER(MAG(m1)), Y\_VAL, AT\_VAL, %a)/m1\_ref)
m2\_dB = 20*LOG10(GET\_DATA\_VAL(AVER(MAG(m2)), Y\_VAL, AT\_VAL, %a)/m1\_ref)
...
m50\_dB = 20*LOG10(GET\_DATA\_VAL(AVER(MAG(m50)), Y\_VAL, AT\_VAL, %a)/m1\_ref)
```

Diese Werte werden wiederum mit dem zugehörigen X-Wert in ein Array geschrieben.

rAnzahl = 1+(rmax-rmin)/dr

```
array = CREATE_ARRAY(rmin+0*dr, m1_dB,

rmin+1*dr, m2_dB,

rmin+2*dr, m3_dB,

...

rmin+49*dr, m50 dB, CREATE CURVE)
```

Für die Skalierung wird wieder die Anzahl der Messpunkte ermittelt und anschließend ein zweidimensionales Diagramm ausgegeben:

```
RESULT = CREATE_2D (rmin, rmax, rAnzahl , 'Undefiniert', 'Schalldruck',
'XY-Daten', DECIBEL, array)
```

Der Wert rAnzahl muss um 1 erhöht werden, da der letzte Messpunkt auch dazugerechnet werden muss. (hier: Messung von 0,5 m bis 5,0 m → Messung bis rmin+45\*dr → m46\_dB → 46 Messpunkte)

Um eine Formel für alle Ist-Werte jedes Messpfades verwenden zu können, werden in der Grafikdefinition die entsprechenden Variablendefinitionen  $MPF1.pak\_var$  bis  $MPF8.pak\_var$  dem dazugehörigen Diagramm zugeordnet. Dadurch erhält die Berechnungsformel  $p\_IST.pak\_for$  zwar immer die gleichnamigen Variablen, aber aus unterschiedlichen Kanälen.

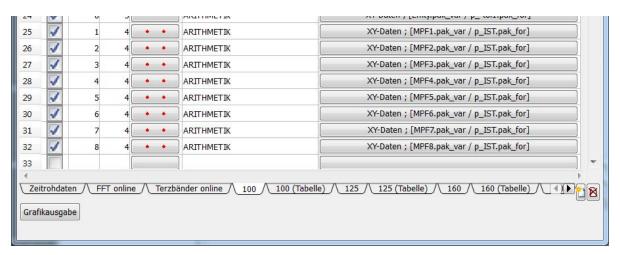


Abbildung 13: Grafikdefinition (Zuordnung verschiedener Variablen zur gleichen Formel)

Um die entsprechende Frequenz des jeweiligen Reiters mit nur einer Formel bestimmen zu können, ist in allen acht Datendefinitionen die im Reiter angegebene Frequenz hinterlegt und wird als freier Formelparameter "%a" an die Formel p IST.pak for weitergegeben.

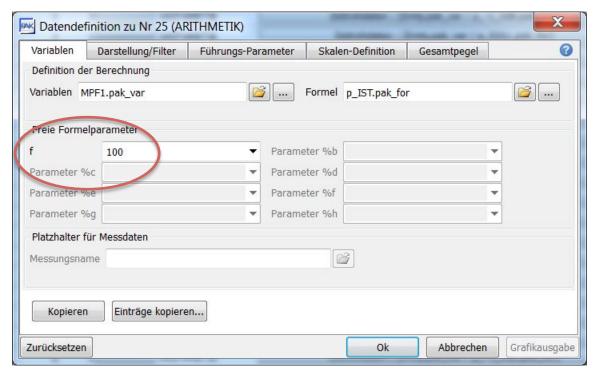


Abbildung 14: Datendefinition (entsprechende Terzmittenfrequenz wird an die Berechnung weitergegeben)

# 3.3.4 Formel für die Tabellenauswertung

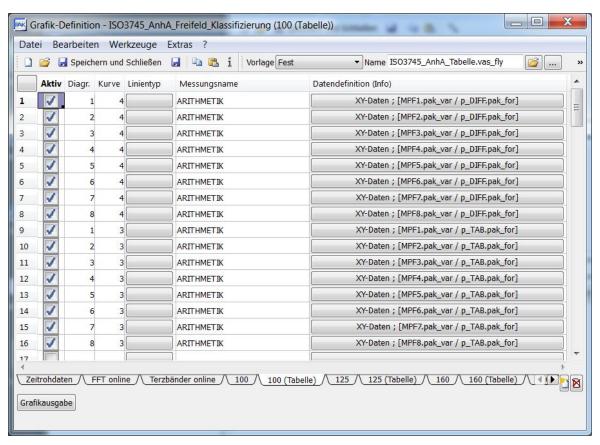


Abbildung 15: Grafikdefinition (Tabellenauswertung)

Die Formel *p\_DIFF.pak\_for* berechnet die Abweichung vom Sollwert. Der grundsätzliche Aufbau ist wie in der Formel *p\_IST.pak\_for* und wird in Kapitel 3.3.3 beschrieben. Der Unterschied liegt darin, dass der berechnete Ist-Wert vom Betrag des jeweiligen Werts der Sollkurve (siehe Kapitel 3.3.2) abgezogen wird:

```
m1\_df = ABS(20*LOG10(rmin/(rmin+0*dr))) +
+ 20*LOG10(GET\_DATA\_VAL(AVER(MAG(m1)), Y\_VAL, AT\_VAL, %a)/m1\_ref)
m2\_df = ABS(20*LOG10(rmin/(rmin+1*dr))) +
+ 20*LOG10(GET\_DATA\_VAL(AVER(MAG(m2)), Y\_VAL, AT\_VAL, %a)/m1\_ref)
...
m50\_df = ABS(20*LOG10(rmin/(rmin+49*dr))) +
+ 20*LOG10(GET\_DATA\_VAL(AVER(MAG(m50)), Y\_VAL, AT\_VAL, %a)/m1\_ref)
```

Da bereits Dummy-Messungen vordefiniert sind, damit die Berechnung der Formel durch fehlende Messungen nicht abbricht, wird immer ein Wert zwischen "rmin" und "rmax" ausgegeben, auch für die Punkte, die noch nicht gemessen wurden (-400 dB). Deshalb ist in der Grafikvorlage *ISO3745\_AnhA\_Tabelle* die Ausgabe des Werts in der Tabelle an eine Bedingung geknüpft.

Texteditor : Textattribute	*****					- Inches	-0 3156
Datei Bearbeiten Ansicht	Formatelemente Ta	belle Attribute ?					
💹 Übernehmen 🔛 Übernehme	🖟 Übernehmen und Schließen " 🤼 🖟 😘 😘 Rohtext darstellen Zoom: 80% 🔻 Tahoma 🔻 12 🔻 F 🔏 🗓 🚨 🛗 🗒 🖺 Tahom						
Tr[m] MPF 1	MPF 2	MPF 3	MPF 4	MPF 5	MPF 6	MPF 7	MPF 8
	f value th value	f value th value	if value th value	if value th value	if value th value	f value th value	if value th value
value II value in value	Livalue (nivalue	el fi	el fi	el fi	III.value in value	el fi	el fi
	f value th value	if value th value	if value th value	if value th value	if value th value	f value th value	if value th value
value el fi	el fil	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi
	f value th value	f value th value	if value th value	if value th value	if value th value	f value th value	if value th value
el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi
if value th value	f value th value	if value th value	if value th value	if value th value	if value th value	if value th value	if value th value
	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fil
if value th value	f value th value	if value th value	if value th value	if value th value el fil	if value th value	if value th value	if value th value
value if value th value	f value th value	f value th value	if value th value	f value th value	if value th value	if value th value	if value th value
value el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi
value if value th value	f value th value	if value th value	if value th value	if walue th value	if value th value	if value th value	if value th value
value el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi
value if value th value i	f value th value	if value th value	if value th value	if value th value	if value th value	f value th value	if value th value
el ti if value th value	el fil f value th value	el fil	lel lfil	el fi f value th value	el fil if value th value	el fil if value th value	lel Ifil
el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi
	f value th value	if value th value	if value th value	f value th value	if value th value	f value th value	f value th value
el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi
value if value th value	f value th value	if value th value	if value th value	if value th value	if value th value	if value th value	if value th value
value el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi	el fi
	f value th value	f value th value	if value th value	if value th value	if value th value	f value th value	if value th value
value el fi	El III	el III	if walue th walue	el III	if walue th walue	f value th value	if walue th walue

Abbildung 16: bedingte Formatierung der Grafikvorlage

Die Ausgabe erfolgt nur, wenn der gemessene absolute Schalldruckpegel über 10 dB liegt, d.h. wenn während der Lautsprecherwiedergabe am Frontend ein Mikrofon angeschlossen ist. Dieser Pegel wird mit den Zeilen 9 bis 16 in der Grafikdefinition bestimmt und mit der Formel *p\_TAB.pak\_for* berechnet.

```
m1\_tab = 20*LOG10(GET\_DATA\_VAL(AVER(MAG(m1)), Y\_VAL, AT\_VAL, \%a) / 0.00002)
m2\_tab = 20*LOG10(GET\_DATA\_VAL(AVER(MAG(m2)), Y\_VAL, AT\_VAL, \%a) / 0.00002)
...
m50\_tab = 20*LOG10(GET\_DATA\_VAL(AVER(MAG(50)), Y\_VAL, AT\_VAL, \%a) / 0.00002)
```

Die Tabelle erfasst diese Werte in einer if-Verknüpfung, die wie folgt aufgebaut ist:

- Mit ,,<" wird ein Befehl gestartet, mit ,,</" beendet
- type = "gt" value = "10" stellt fest, ob die anschließend angegebene Variable größer
   als 10 (hier: dB) ist
- curve = "3" entspricht dem absoluten Schalldruckpegel aus der Formel "p\_TAB" und curve = "4" der Berechnung der Abweichung aus der Formel "p\_DIFF" (siehe Abbildung 15)
- ist die Aussage wahr, wird der Befehl "then" ausgeführt und die nachfolgende Variable ausgegeben
- ist die Aussage falsch, so wird der leere "else"-Befehl ausgeführt und das Tabellenfeld bleibt leer

r[m]	MPF 1	MPF 2	MPF 3	MPF 4	MPF 5	MPF 6	MPF 7	MPF 8	r[m]	MPF 1	MPF 2	MPF 3	MPF 4	MPF 5	MPF 6	MPF 7	MPF 8
0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				3.5	1.5	4.2		1.5				
0.6	-0.1	-0.2	-0.2	0.8	-0.0				3.6	-1.2	1.2		2.9				
0.7	0.7	0.6	-0.2	1.3	0.0				3.7		-2.7						
0.8	2.0	2.0	-0.1	1.8	0.3				3.8		-7.2						
0.9	3.3	3.6	0.6	2.0	0.5				3.9		-8.0						
1.0	4.4	4.8	1.6	1.7	0.8				4.0		-5.8						
1.1	5.1	5.9	2.8	1.2	0.9				4.1		-4.2						
1.2	5.4	6.6	4.1	0.5	0.9				4.2		-3.8						
1.3	5.2	7.1	5.2	-0.5	1.0				4.3		-6.2						
1.4	5.0	7.2	6.3	-2.3	0.6				4.4		-12.2						
1.5	4.1	7.0	7.1	-5.1	0.4				4.5		-27.2						
1.6	2.9	6.4	7.8	-9.3	0.1				4.6		-8.1						
1.7	1.5	5.5	8.3	-14.6	-0.1				4.7		-0.6						
1.8	0.7	4.2	8.7	-11.2	-0.1												
1.9	0.9	2.4	8.7	-6.3	0.6												
2.0	3.0	2.2	8.8	-2.9	1.1												
2.1	5.0	3.1	8.5	-1.1	2.2												
2.2	6.6	5.0	7.9	0.1	3.4												
2.3	8.1	6.8	7.2	0.9	4.1												
2.4	9.2	8.2	6.3	1.3													
2.5	10.0	9.3	4.7	1.2													
2.6	10.4	10.6	2.5	0.4	1												
2.7	10.6	10.9	0.2	-0.5													
2.8	10.4	11.2	-3.6	-2.3													
3.0	10.2 9.5	11.2 11.1	-7.2 -3.7	-5.3 -10.2													
3.0	9.5 8.5	10.4	0.0	-10.2													
3.1	7.3	9.4	2.8	-7.8													
3.3	5.7	8.1	4.4	-3.3													
	3.8	6.6	4.9	-0.5													
3.4	3.8	0.6	4.9	-0.5													

Abbildung 17: Tabellenausgabe in der Grafikauswertung (125 Hz)

# 4 Messdurchführung

# 4.1 Allgemeines

### 4.1.1 Messaufbau

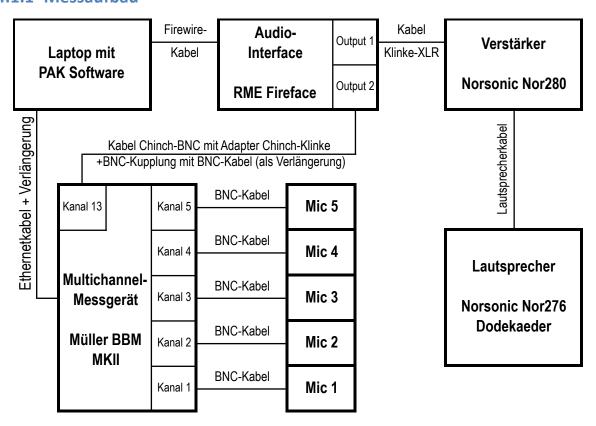


Abbildung 18: Messaufbau

Das Direktsignal des Audiointerface wird an Kanal 13 angelegt, die 5 Mikrofone an den ersten 5 Eingängen. Die Kanäle 6 bis 12 sind optionale Kanäle, um beispielsweise die Messung auf bis zu 8 Mikrofone erweitern zu können.

Um die Messung nicht durch Lüftergeräusche zu verfälschen, ist folgende Geräteaufstellung sinnvoll:

im Messraum: Messgerät "MBBM MKII"

Messmikrofone

Lautsprecher

draußen: Laptop (mit Ethernet-Verlängerung)

Audiointerface (mit Verlängerung durch BNC-Kabel)

Verstärker (Norsonic-Lautsprecherkabel ist lang genug)

# 4.1.2 Inventarliste

Stückzahl	Bezeichnung	Hersteller, Typ			
1	Laptop mit PAK-Software	Lenovo Thinkpad W520			
1	Audiointerface	RME Fireface 400			
1	Firewirekabel	Firewire-male (6-polig) auf Firewire-male (4-polig)			
1	Kabel Klinke-XLR	Klinke-male (sym./ 6,3mm) XLR-male			
1	Verstärker	Norsonic Nor280			
1	Lautsprecher	Norsonic Nor276 Dodekaeder			
1	Lautsprecherkabel	Norsonic			
1	Lautsprecherstativ	Manfrotto 190XPROB			
1	Multichannel- Messgerät	Müller BBM PAK Mobile MKII			
1	Ethernetkabel	ohne Metallabschirmung			
1	Ethernetverlängerung	ohne Metallabschirmung			
5	Messmikrofon inkl. Stativadapter	G.R.A.S. 46AE 1/2" CCP Free- field			
1	Kalibrator	Brüel & Kjaer Type 4231			
5	Mikrofonstativ	König & Meyer 210/2			
6	BNC-Kabel	2x BNC-male			
1	BNC-Kupplung	2x BNC-female			
1	Kabel Cinch-BNC	Cinch-male (mono) BNC-male			
1	Adapter BNC-Klinke	BNC-female Klinke-male (unsym./6,3mm)			

Abbildung 19: Inventarliste

Für eine Vergleichsmessung mit Hilfe des SPSC-Lautsprechers, Marke "TUG-Eigenbau" wird das Inventar laut Abbildung 20 benötigt. Der grundsätzliche Messaufbau bleibt dabei aber gleich, nur der Verstärker wird anstelle des *Norsonic Nor280* an den Output 1 des Audio-Interfaces angesteckt.

Stückzahl	Bezeichnung	Hersteller, Typ
1	SPSC-Lautsprecher	TUG-Eigenbau
1	Verstärker	Parasound HCA-800
1	Kabel Cinch-Cinch	Cinch-male (mono)
1	Adapter Cinch-Klinke	Cinch-female (mono) Klinke-male (unsym./6,3mm)
1	Lautsprecherkabel	Lamellenstecker 2-polig (4mm) Klinke-male (unsym./6,3mm)

Abbildung 20: Inventarliste (Vergleichsmessung mit TUG-Lautsprecher)

# 4.1.3 Kennwerte der verwendeten Prüflautsprecher

Da ein klassifizierter Freifeldraumprüflautsprecher nicht verfügbar ist, werden zwei Lautsprecher mit unterschiedlicher Abstrahlcharakteristik und Frequenzgang für die Messung verwendet und verglichen.



Abbildung 21: Vergleich der Prüflautsprecher (links Dodekaederlautsprecher, rechts SPSC-Lautsprecher)

#### **Abstrahlcharakteristik**

Der Dodekaederlautsprecher *Nor276* besitzt zwölf auf die gesamte Kugeloberfläche gleichmäßig verteilte Lautsprecher. Ab einem gewissen Abstand erhält man dadurch eine beinahe

kugelförmige Schallabstrahlung. Der SPSC-Lautsprecher dagegen ist durch seine gebündelte Abstrahlcharakteristik völlig ungeeignet für eine Vollfreifeldraummessung. Bei einer Messung im Halbfreifeldraum mit reflektierendem Boden ist eine bedingte Messung zu Vergleichszwecken möglich.

Das Datenblatt des Dodekaederlautsprechers [7] zeigt folgende Auswertung der Abstrahlcharakteristik für 4 Frequenzen:

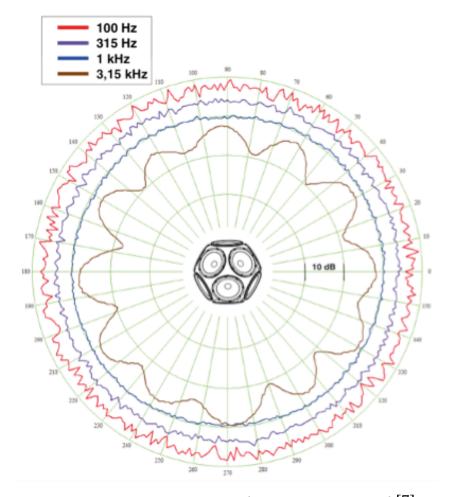


Abbildung 22: Abstrahlcharakteristik (Dodekaederlautsprecher) [7]

## Frequenzverhalten

Der Frequenzgang der beiden Lautsprecher spielt eine untergeordnete Rolle, da es sich bei der Freifeldklassifizierung um Relativmessungen handelt. Allerdings sollte für die höchste Terzmittenfrequenz von 10 kHz die Energie noch ausreichend sein, damit das Ergebnis der äußersten Punkte der Messpfade nicht im Umgebungsrauschen verschwindet. (Im Datenblatt des Dodekaederlautsprechers [7] wird der Frequenzgang nur bis zu 5 kHz behandelt – siehe Abbildung 23). Bei der Durchführung der Freifeldklassifizierungsmessung hat sich gezeigt, dass die Energie im oberen Frequenzbereich noch ausreichend ist.

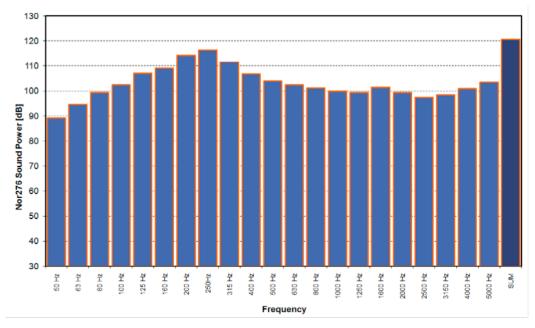


Abbildung 23: Frequenzgang des Dodekaederlautsprechers [7] (bei eingeschaltetem Equalizer am Nor280)

Der Frequenzgang des TUG-Eigenbau-Lautsprechers wird in der Masterarbeit von Jakob Spötl [5] bis 2,5 kHz beschrieben:

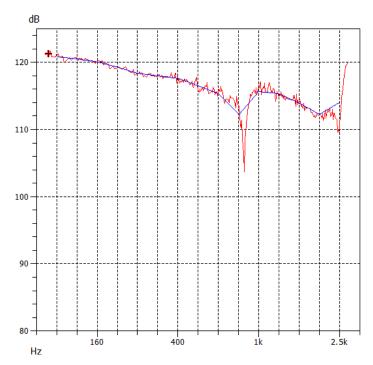


Abbildung 24: Frequenzgang des TUG-Lautsprechers [5]

Im höheren Frequenzbereich ist bei der Freifeldklassifizierungsmessung gegenüber dem Dodekaederlautsprecher deutlich ein Einbruch hörbar und der Multisinus klingt "dunkler". Die FFT-Analyse bei hohen Frequenzen an den äußersten Punkten zeigt auch kaum noch genügend Signal-Rausch-Abstand.

### **Pegeleinstellung**

Um an beiden Lautsprechern bei 1 kHz und gleichem Abstand von 0,5 m den gleichen Messpegel zu erhalten (Referenzpunkt auf Messpfad 5 (siehe Kapitel 4.2.2) im Abstand  $r_{min}$ ), werden folgende Einstellungen verwendet:

- Digitale Vollausteuerung der Wiedergabesoftware und des Audiointerfaces (0 dB)
- Norsonic-Verstärker: -15 dB inklusive Equalizer
- Parasound-Verstärker: Volume-Regler auf "15 Uhr" gedreht

### 4.1.4 Messablauf

Um eine neue Messung vorzubereiten, muss im Dateiexplorer unter dem Pfad D:\Messdaten\ISO3745\_AnhA\_Freifeld\_Klassifizierung der Inhalt des Ordners Freifeldraum mit dem Inhalt des Preset-Ordners default 50 Messpunkte ersetzt werden.

Achtung: Dabei werden die aktuell vorliegenden Messdaten gelöscht und müssen bei Bedarf in einem anders benannten Ordner zwischengespeichert werden!

Anschließend wird das *PAK mobile MKII* eingeschaltet und am Laptop das Programm *PAK* gestartet, das Projekt *ISO3745\_AnhA\_Freifeld\_Klassifizierung* ausgewählt und als Messdefinition die gleichnamige Datei gewählt.

Im Fenster Messdefinition muss im Feld "Versuchsname" der Eintrag "Freifeldraum" und bei "Untertitel" der Eintrag "Messung\_1" stehen, damit die auszuwertenden Messdaten im richtigen Ordner abgelegt werden.

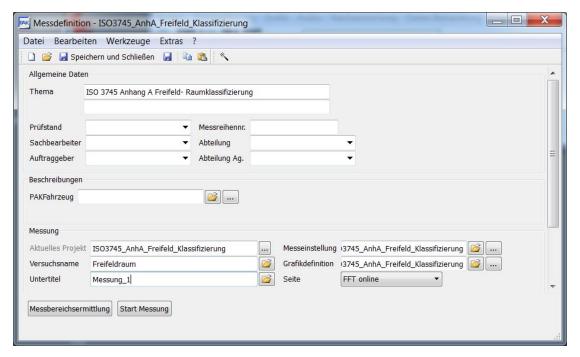


Abbildung 25: Messdefinition - Messung starten

Nun kann unter Messeinstellung eine optionale Kalibrierung der Mikrofone durchgeführt werden. Da die Messauswertung aus Relativwerten besteht (siehe Kapitel 3.3.3), ist die Kalibrierung nicht unbedingt notwendig.

Beim Drücken des Buttons "Start Messung" erscheint eine Meldung, dass bereits eine Messung besteht und überschrieben wird. Diese Meldung kann mit "Ok" bestätigt werden.

Jetzt öffnet sich das Messfenster mit der Aussteuerungsanzeige und der Online-Analyse. Mit Klicken auf den Startbutton beginnt die Messung und das Programm wartet auf das Quellsignal, das über Kanal 13 eingespeist wird.

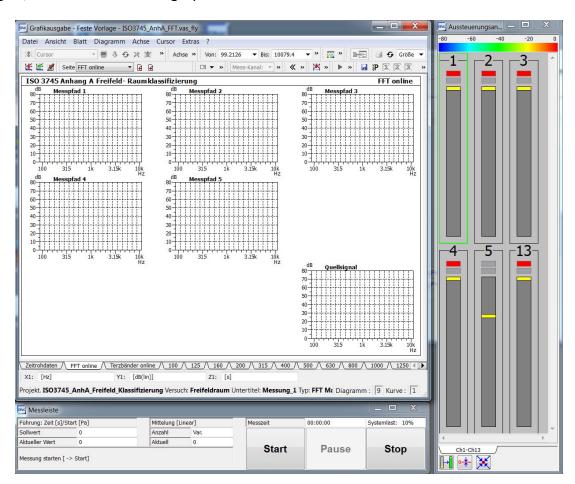


Abbildung 26: Messoberfläche

In *D:\Daten\Quellsignale* liegt die Datei *Multisinus\_ISO3745\_Meyer\_21s\_Phase\_ohne.wav*, die alle Terzmittenfrequenzen zwischen 100 Hz und 10 kHz enthält. Die Sinustöne werden gleichzeitig für 20 Sekunden ausgegeben. Diese Datei kann über einen beliebigen Audioplayer gestartet werden und wird über die Firewireschnittstelle an das Audiointerface und Lautsprecher, sowie an den Kanal 13 des *MKII* weitergegeben. Die Software erkennt nun ein Eingangssignal und beginnt mit der Messung.

Die Echtzeitanalysen des Quellsignals, sowie der Mikrofonsignale werden in den ersten drei Reitern dargestellt, je nach Auswahl als Zeitrohdaten, FFT-Analyse oder Terzbandanalyse.

Nach erfolgter Messung müssen die Mikrofonpositionen um den gewünschten Wert verändert und anschließend eine neue Messung gestartet werden. Diese Messung hat nun automatisiert einen Eintrag im Feld "Untertitel" als nächsthöhere Messung, beispielsweise "Messung\_2".

Sollten die Bahnen eine unterschiedliche Anzahl an Messpunkten haben, müssen die Mikrofone, die nicht mehr gebraucht werden, abgesteckt werden. Wichtig ist dabei, dass das Mikrofon *inklusive* Kabel abgesteckt wird.

Bei der Grafikausgabe erscheint im PAK-Hauptfenster ein Hinweis, dass Variablen für die Berechnung fehlen. Diese Meldung weist nur darauf hin, dass nicht alle 8 vorbereiteten Messkanäle aktiv sind und kann ignoriert werden.

## 4.1.5 Parameteränderungen

### Anzahl der Messpfade ändern

Als Voreinstellung sind 5 Messpfade aktiv, das Programm ist aber auch für die Verwendung von 1 bis 8 Messpfaden vorbereitet. Dazu müssen die Mikrofone in die ersten acht Eingänge des *PAK mobile MKII* eingesteckt werden und unter dem Punkt "Kanaleinstellungen" die jeweiligen Kanäle aktiviert werden.

Die aktivierten Kanäle werden automatisch den gleich nummerierten Diagrammen bei der Auswertung zugeordnet. Die Diagramme der nicht aktivierten Kanäle zeigen nur die Toleranzkurven.

#### Minimaler und maximaler Abstand sowie Messpunktauflösung ändern

Das Programm ist für einen minimalen Radius von  $r_{min}$  = 0,5 m und einen maximalen Radius von  $r_{max}$  = 5,0 m, sowie einen Abstand von  $d_r$  = 0,1 m zwischen den Messpunkten voreingestellt.

Diese Werte können durch Änderung der Parameter in den ersten drei Zeilen aller 10 Formeln, die in Kapitel 3.3 angeführt sind, geändert werden.

Achtung: Alle 10 Formeln müssen auf die gleichen Parameter geändert werden, um eine richtige Skalierung der Diagramme zu erhalten!

### Anzahl der Messpunkte pro Messpfad erhöhen

Das Projekt ist derzeit für maximal 50 Messpunkte pro Messpfad ausgelegt. Um die Anzahl zu erhöhen, müssen folgende Änderungen durchgeführt werden:

- Im Windowsexplorer müssen zusätzlich zur Kopie der 50 Messordner unter D:\Messdaten\ISO3745\_AnhA\_Freifeld\_Klassifizierung\Freifeldraum (siehe Kap. 4.1.4) weitere Ordner erstellt werden. Beispielsweise wird der Ordner Messung\_50 zweimal kopiert und unter Messung\_51 und Messung\_52 abgespeichert, um die Messung auf 52 Messpunkte zu erhöhen.
- Im Programm PAK müssen im Variablenfenster die Variablen in folgenden 8 Dateien erweitert werden: MPF1.pak\_var, MPF2.pak\_var bis MPF8.pak\_var
  - Die Variablenbezeichnung und der Messungsname werden weiter gezählt:
     m51 -> ISO3745\_AnhA\_Freifeld\_Klassifizierung\Freifeldraum\Messung\_51
  - Im Eintrag "Info" wird der jeweilige Kanal angegeben (zum Beispiel Kanal 1 in der Datei MPF1.pak\_var)
- Im Formeleditor muss die Formel p\_IST.pak\_for erweitert werden.
   Eine neue Zeile erfasst den nächsten Messpunkt aus der Variablendefinition, dazu werden die Indizes der Variable "m... dB" und "m..." erhöht:

```
m51 dB = 20*LOG10(GET DATA VAL(AVER(MAG(m51)), Y VAL, AT VAL, %a)/m1 ref)
```

Im Array muss diese zusätzliche Variable mit dem entsprechenden Radius vor dem Eintrag "CREATE\_CURVE" hinzugefügt werden:

```
rmin+50*dr, m51 dB,
```

Dazu muss der Faktor vor der Variable "dr" jeweils um 1 erhöht werden.

Für die Formel p\_DIFF.pak\_for gilt o.g. Schema.
 Zwei Indizes und der Wert vor "dr" werden erhöht und im Array eingetragen:

• Die Formel p TAB.pak for muss ebenso erweitert werden:

```
m51_tab = 20*LOG10(GET_DATA_VAL(AVER(MAG(m51)), Y_VAL, AT_VAL, %a)/
/0.00002)
```

```
rmin+50*dr, m51_dB,
```

 Bei den restlichen 4 Formeln aus Kapitel 3.3, die der Toleranzkurvenausgabe dienen, sind weitere Einträge im Array notwendig, bei denen die zwei Faktoren vor "dr" schrittweise erhöht werden:

```
rmin+51*dr, -20*LOG10((rmin+51*dr)/rmin)+tol
```

Die höchstmögliche Anzahl der Messpunkte pro Messpfad beträgt 120, da die Variablendefinition in *PAK* auf 120 Zeilen beschränkt ist.

#### Toleranzschläuche ändern

Die Toleranzgrenzen laut Norm [1] sind in drei Bereiche eingeteilt. Jeder dieser Bereiche besitzt zwei Formeln für die Unter- und Obergrenze (p\_+tol1.pak\_for und p\_-tol1.pak\_for für den Toleranzbereich 1 bis 630 Hz etc.), die den entsprechenden Reitern in der Grafikausgabe zugeordnet sind.

Derzeit sind die Grenzen für die Messung im Halbfreifeldraum definiert:

- Toleranzbereich 1: ±2,5 dB (bis 630 Hz)
- Toleranzbereich 2: ±2,0 dB (von 800 bis 5000 Hz)
- Toleranzbereich 3: ±3,0 dB (ab 6300 Hz)

Mit Hilfe der Variable tol in der Kopfzeile jeder der 6 Formeln kann dieser Bereich verändert werden:

# 4.2 Messungen im SPSC-Tonstudio

# 4.2.1 Raumabmessungen

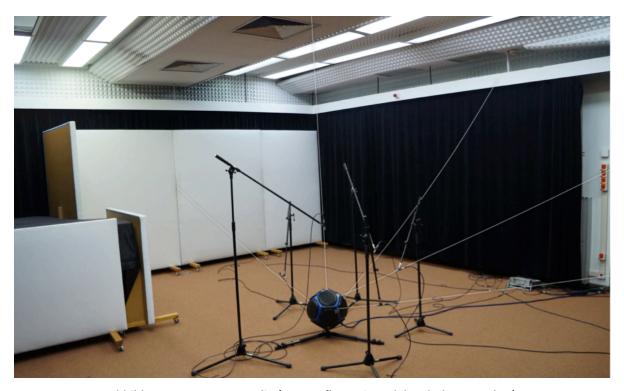
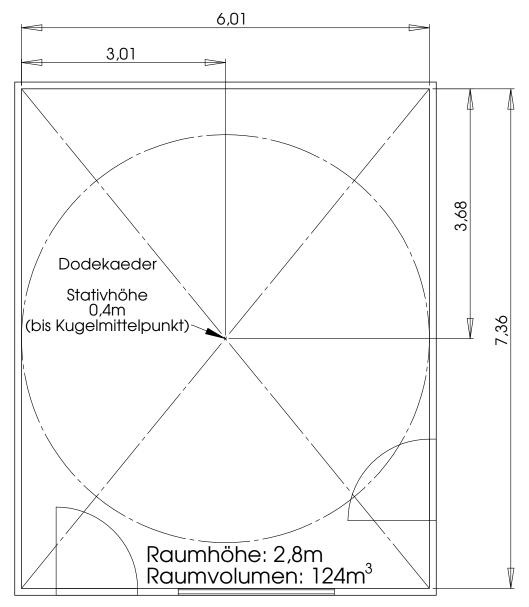


Abbildung 27: SPSC-Tonstudio (Messaufbau mit Dodekaederlautsprecher)

Um die Mikrofonpositionen schnell und genau ermitteln zu können, wurde ein weißer Bindfaden als Messpfad gespannt, der in 10 cm-Schritten eine Markierung mit einem Permanentmarker erhielt. Die Befestigung erfolgte mit grauem GAFFA-Tape an den Vorhängen, der Decke und dem Lautsprecher.



Abbildung 28: Befestigung der Bindfäden für die Markierung der Messpunkte



**Abbildung 29: SPSC-Tonstudio (Grundriss)** 

Für die Messung wird ein schallabsorbierender Vliesvorhang an allen Wänden samt Fenstern und Türen zugezogen. Die Oberfläche der Decke besteht ebenfalls aus gut absorbierendem Material. An der hinteren Wand und rund um den Flügel stehen verschiebbare Absorber.

# 4.2.2 Wahl der Messpfade

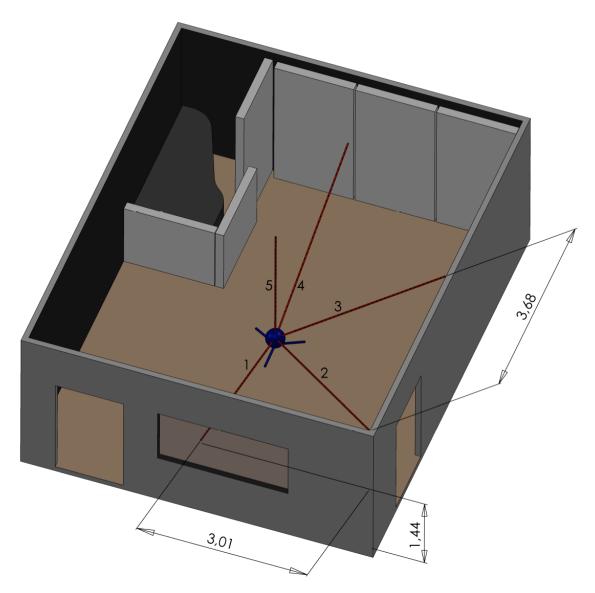


Abbildung 30: SPSC-Tonstudio (Wahl der Messpfade)

	Position	Länge bis zur Raumbegrenzung in [m]	mögliche Anzahl der Messpunkte
Messpfad 1	Richtung vordere Seitenwand	3,7	32
Messpfad 2	Richtung vordere, rechte, obere Ecke	4,8	43
Messpfad 3	Richung rechte obere Kante	3,5	30
Messpfad 4	Richtung hintere Seitenwand	3,7	32
Messpfad 5	Richtung Raumdecke	2,4	19

Abbildung 31: SPSC-Tonstudio (Auflistung der Messpfade)

Der minimale Radius muss laut Norm [1] mindestens 1 m betragen. Zu Versuchszwecken wird aber der Schallpegelabfall bereits vorher erfasst und ab einem Radius von 0,5 m gemessen.

Der maximale Radius der Klassifizierungsmesshalbkugel ergibt sich aus der Begrenzung durch die Decke und beträgt 2,7 m. Zu Versuchszwecken wird jedoch nicht nur innerhalb der Klassifizierungsmesshalbkugel, sondern jede Messlinie bis zur Raumoberfläche gemessen. Der längste Messpfad geht bis zur rechten oberen Ecke (Messpfad 2) und beträgt abzüglich dem Minimalradius von 0,5 m noch 4,2 m. Somit ergibt sich eine maximale Anzahl von 43 Messpunkten mit einem jeweiligen Abstand von 0,1 m.

Maximale Anzahl an Messpunkten pro Bahn: 43							
r <sub>min</sub>	= 0,5m	minimaler Radius					
r <sub>max</sub>	= 4,7m	maximaler Radius					
d <sub>r</sub>	= 0,1m	Auflösung					

### 4.2.3 Messauswertung

Die Messung erfolgte mit zwei verschiedenen Messlautsprechern, die in Kapitel 4.1.3 beschrieben wurden.

Die zugehörigen Messrohdaten sind auf dem PAK-Rechner unter dem Pfad D:\Messdaten\_Archiv\ISO3745\_AnhA\_Freifeld\_Klassifizierung in den Ordnern Freifeld-raum\_Tonstudio\_Dod und Freifeldraum\_Tonstudio\_LS abgelegt.

Die vollständigen Messergebnisse befinden sich in den Dateien *Tonstudio-messung\_Dodekaeder* und *Tonstudiomessung\_SPSC-Lautsprecher.* 

Da es sich beim Tonstudio nicht um einen Halbfreifeldmessraum handelt, sind die Messwerte stark abweichend vom Sollwert.

# 5 Anhang

# 5.1 Pfadangaben PAK-Rechner

In diesem Kapitel folgt eine Auflistung aller Dateipfade der gespeicherten Dateien dieses Bachelorprojekts auf dem PAK-Rechner des SPSC.

### Quellsignal

• D:\Daten\Quellsignale\Multisinus\_ISO3745\_Meyer\_21s\_Phase\_ohne.wav

### Messdefinition

 C:\Users\PAK\PakData\Tables\MessDef\Freifeldraum\_Klassifizierung\ISO3745\_AnhA\_Freifeld\_Klas sifizierung

### Messeinstellung

C:\Users\PAK\PakData\Tables\Setup\Freifeldraum\_Klassifizierung\ISO3745\_AnhA\_Freifeld\_Klassifizierung

#### **Grafik-Definitionen**

- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Setup\Freifeldraum\_Klassifizierung\ISO3745\_AnhA\_Freifeld\_Klassifizierung
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Setup\Freifeldraum\_Klassifizierung\ISO3745\_AnhA\_Freifeld\_Klassifizierung

#### Variablen

- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Variables\Freifeldraum Klassifizierung\ MPF1.pak var
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Variables\Freifeldraum\_Klassifizierung\ MPF2.pak\_var
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Variables\Freifeldraum\_Klassifizierung\ MPF3.pak\_var
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Variables\Freifeldraum\_Klassifizierung\ MPF4.pak\_var
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Variables\Freifeldraum\_Klassifizierung\ MPF5.pak\_var
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Variables\Freifeldraum\_Klassifizierung\ MPF6.pak\_var
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Variables\Freifeldraum\_Klassifizierung\ MPF7.pak\_var
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Variables\Freifeldraum\_Klassifizierung\ MPF8.pak\_var

#### Formeln

- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Formulas\Freifeldraum\_Klassifizierung\p\_+tol1.pak\_for
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Formulas\Freifeldraum\_Klassifizierung\p\_-tol1.pak\_for
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Formulas\Freifeldraum\_Klassifizierung\p\_+tol2.pak\_for
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Formulas\Freifeldraum\_Klassifizierung\p\_-tol2.pak\_for
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Formulas\Freifeldraum\_Klassifizierung\ p\_+tol3.pak\_for
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Formulas\Freifeldraum\_Klassifizierung\p\_-tol3.pak\_for
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Formulas\Freifeldraum\_Klassifizierung\ p\_DIFF.pak\_for
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Formulas\Freifeldraum\_Klassifizierung\ p\_IST.pak\_for
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Formulas\Freifeldraum\_Klassifizierung\ p\_SOLL.pak\_for
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Arithmetic\Formulas\Freifeldraum\_Klassifizierung\p\_TAB.pak\_for

### Grafikvorlagen

- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Format\ISO3745\_AnhA\_Tabelle.vas\_fly
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Format\ISO3745\_AnhA\_Pegelabfall.vas\_fly
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Format\ ISO3745\_AnhA\_FFT.vas\_fly
- C:\Users\PAK\PakData\Tables\Format\ISO3745 AnhA Rohdaten.vas fly

## Messrohdaten SPSC-Tonstudio

- D:\Messdaten\_Archiv\ISO3745\_AnhA\_Freifeld\_Klassifizierung\Freifeldraum\_Tonstudio\_Dod
- D:\Messdaten\_Archiv\ISO3745\_AnhA\_Freifeld\_Klassifizierung\Freifeldraum\_Tonstudio\_LS