

PHILIPS

meets



Abschlussarbeit zum Toningenieurprojekt

Psychoakustische Optimierung von Haushaltsgeräten

von

Roman Sereinig

durchgeführt für Philips DAP, Klagenfurt

am Institut für elektronische Musik und Akustik, Graz

Graz, am 18. Dezember 2006

Betreuer IEM: o.Univ.-Prof. Mag. DI Dr. Robert Höldrich

Mitbetreuer IEM: Univ.Ass. DI Dr. Alois Sontacchi

Projektbetreuer Philips: DI Thomas Sigot

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Lärmbelastung und dessen Einfluss auf das Kaufverhalten von Kunden, soll eine sinnvolle Erfassbarkeit, der von Küchengeräten ausgehenden Schallemission, untersucht werden. Dazu soll zunächst eine möglichst effiziente Messkette, die in 3 Stufen aufgeteilt wird, entworfen werden, um Unzulänglichkeiten der Geräte, in Bezug auf die Schallabstrahlung, möglichst effizient für den Hersteller zu erkennen. Eine darauf aufbauende, weiterführende Diplomarbeit soll danach den psychoakustischen Sachverhalt mittels Lästigkeitsindex klären und eventuell zu einer konkreten Optimierung eines Gerätes führen.

In der Ersten Stufe sollen direkt bei Philips in Klagenfurt vor Ort, fertige Seriengeräte, bzw. eventuelle Prototypen auf grundsätzliche „Tauglichkeit“ hin überprüft werden können. In der Zweiten Stufe der Kette wird eine genauere psychoakustische Untersuchung der Geräte, auch in Bezug auf Schallaustrittsrichtungen, am Messplatz am *Institut für Elektronische Musik und Akustik* (nachfolgend IEM genannt) vorgenommen. Mögliche nicht unmittelbar erkennbare akustische Schwächen der Geräte sollen hier erkannt werden können. In der Dritten Stufe soll das Testzentrum in Holland die genormte Verifikation der erfolgten Messungen durchführen. Wobei hier die Resultate nur als Verifikation dienen sollen.

Der Vorteil der 3-Stufigkeit besteht darin, dass grobe Variationen der Schallemission der Geräte bereits vor Ort erkannt und nötigenfalls beseitigt werden sollen. Falls die Art des Störgeräusches viel tiefgründiger ist, soll eine genauere Messung am IEM Abhilfe schaffen. Durch die kurze geografische Distanz Graz - Klagenfurt ist somit der Iterationszyklus zur Messung und eventuellen späteren Optimierung extrem kurz.

Ziel der Projektarbeit ist es die oben beschriebene Messkette zu entwerfen und eine geregelte Kommunikation zwischen den beteiligten Partnern mittels standardisiertem Messprotokoll zu gewährleisten.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Schalleistungsmessung	7
2.1. Messmethoden	7
2.1.1. Vor- und Nachteile	8
2.1.2. Anforderungen & Voraussetzungen an das Messverfahren	9
2.2. Herleitung des L_w	10
3. Der Messplatz am IEM in Graz	12
3.1. Einführung	12
3.2. Messaufbau	13
3.3. Hardwareaustattung am Messplatz	13
3.4. Softwareanwendungen am Messplatz	15
3.4.1. Aufzeichnung mit Pure Data	15
3.4.1.1. Benutzeroberfläche „CAMDA“ (Frontend)	15
3.4.1.2. Datenaufzeichnung (Backend)	17
3.4.2. Auswertung mit MATLAB [®]	19
3.4.2.1. Verarbeitung der gemessenen Audiodaten	20
3.4.2.2. Visualisierung der Auswertung	26
3.5. Messablauf	27
3.5.1. Kalibrierung	29
3.5.2. Messung	29
3.5.3. Auswertung	30
4. Auswertungen	31
4.1. Analyse von 4 „HR1704“	32
4.1.1. HR1704 Nr.1	33
4.1.2. HR1704 Nr.2	36
4.1.3. HR1704 Nr.3	39
4.1.4. HR1704 Nr.4	39
4.1.5. HR1704 Nr.1 & 2 mit Szenario 3	43
4.2. Zusammenfassung der Auswertungsergebnisse des Blenders „HR1704“	47
5. Vergleich der Messumgebungen	48

Inhaltsverzeichnis

5.1. Vergleich Der Messergebnisse IEM und Philips	48
5.2. Verifikation der Messkoje	50
5.2.1. Referenzmessung mit Speziallautsprecher „Knopper“	50
5.2.2. Referenzmessung mit „2-Flächen-Verfahren“ nach ISO3745	52
5.3. Akustische Optimierungsmaßnahmen	53
6. Schlussfolgerungen	55
6.1. Mögliche Verbesserungen	55
6.1.1. Software	55
6.1.2. Gezieltere Analysemethoden	55
6.2. Fazit	56
6.3. Ausblick	56
Literaturverzeichnis	57
A. Anhang - MATLAB[®]-codes	59
A.1. CAMDA_Analyser.m	59
A.2. camda_calibration.m	59
A.3. camda_filereader.m	61
A.4. camda_swlcalculator.m	62
A.5. camda_plotter.m	65
B. Anhang - Sonstiges	67
B.1. Messkojendaten	67
B.2. Verwendete Gerätschaften	67
B.2.1. Kalibratoren	67
B.2.2. Mikrofone	68
B.2.3. Vorverstärker & AD-Wandler	68
B.2.4. Sonstiges Equipment	68
B.3. Exemplarischer Messbericht	69

Abbildungsverzeichnis

2.1. Vermessung der Messkoje am IEM für mehrere Szenarien	8
3.1. Der Messplatz am IEM	12
3.2. Der Verkabelungsplan des Messaufbaus	14
3.3. Benutzeroberfläche „CAMDA“ in PD	16
3.4. Datenaufzeichnungsanwendung in PD	18
3.5. Flussdiagramm der Auswertungsanwendung	22
3.6. Datenstruktur der P-Matrix	23
3.7. Korrekturvektor $C_{Behringer}$	25
3.8. Flussdiagramm des gesamten Messablaufs	28
4.1. Vergleich Messung am IEM der Geräte Nr. 1 und 2	32
4.2. Diagramme der Messung von HR1704-1, Szenario 1	34
4.3. Diagramme der Messung von HR1704-1, Szenario 2	35
4.4. Diagramme der Messung von HR1704-2, Szenario 1	37
4.5. Diagramme der Messung von HR1704-2, Szenario 2	38
4.6. Diagramme der Messung von HR1704-3, Szenario 1	40
4.7. Diagramme der Messung von HR1704-3, Szenario 2	41
4.8. Diagramme der Messung von HR1704-4, Szenario 1	42
4.9. Diagramme der Messung von HR1704-4, Szenario 2	44
4.10. Horizontaldiagramme von HR1704-1, Szenarien 1, 2 und 3 im Vergleich . .	45
4.11. Schalleistungsspektren von HR1704-2, Szenarien 1, 2 und 3 im Vergleich .	46
5.1. Vergleich Messung am IEM <i>mit</i> und <i>ohne</i> Korrektur und bei Philips . . .	49
5.2. Differenz zwischen <i>simulierten</i> und <i>gemessenen</i> Terzschalleistungspegeln .	51
5.3. Messung nach 2-Flächen-Verfahren am IEM	52
5.4. Die Messkoje am IEM ohne Gestellverkleidung	54

1. Einleitung

Die vorliegende Projektarbeit stellt einen ersten Schritt der Zusammenarbeit zwischen IEM und Philips dar. Es werden grundlegende Möglichkeiten der akustischen Erfassung von kleineren Küchengeräten bzw. Haushaltsgeräten (engl. *domestic appliances*) geschaffen und anschließend exemplarisch erprobt.

Um den Umfang dieser Projektarbeit nicht zu sprengen und, da schon weitestgehend standardisiert und anerkannt, wurde die Messung bzw. Auswertung des Schalleistungsspektrums einer Geräuschquelle als die wichtigste zu messende akustische Kenngröße festgelegt. Dazu werden in Kapitel 2 zunächst die Prinzipien der Schalleistungsmessung und ihrer zugrunde liegenden Messmethoden erklärt. Darüber hinaus werden auch weitere relevante akustische Beschreibungsgrößen vorgeschlagen.

Die Beschreibung der praktischen Implementierung des Messvorganges, sowie der Auswertung ist Bestandteil von Kapitel 3. Hier wurde auf die am IEM hinreichend erprobten Softwareapplikationen Pure Data und MATLAB[®] zurückgegriffen.

Anschließend folgt eine ausführliche Analyse der durchgeführten Messungen in Kapitel 4. Die daraus gewonnen Erkenntnisse sind dann Gegenstand einer Gegenüberstellung von Auswertungsergebnissen aus Graz und Klagenfurt in Kapitel 5.

Schließlich wird am Ende dieser Arbeit (siehe Kap. 6) die Überleitung in Hinblick auf die nachfolgende Diplomarbeit hergestellt.

2. Schalleistungsmessung

Zur akustischen Erfassung von Küchengeräten wurde als wichtigste Kenngröße der *Schallleistungspegel* (unbewertet L_w bzw. A-bewertet $L_{w(A)}$) ausgewählt. Im Gegensatz zur Messung des reinen *Schalldruckpegels* p (z.B. mittels Schalldruckpegelmessers) hat dieser mehr Aussagekraft, da er sowohl von der Entfernung als auch vom Raum unabhängig ist und somit für viele verschiedene Gerätetypen eine einigermaßen objektive Vergleichsmöglichkeit bietet. Es existieren zu diesem Zweck entsprechende, für diese Arbeit relevante, Normen [1] und [2]. Soweit möglich, wird weitestgehend auf diese standardisierten Verfahren zur Schalleistungsmessung zurückgegriffen. Allerdings wurde das tatsächliche Messverfahren auf Grund der räumlichen Gegebenheiten am IEM geringfügig modifiziert (siehe Kap. 3). Außerdem betreffen weitere Beschränkungen und nachträgliche Anpassungen auch die Auswertung - mehr dazu in Kapitel 4.

2.1. Messmethoden

Um die Vergleichbarkeit mit anderen Messungen, die ebenfalls nach [1] oder [2] durchgeführt werden bzw. stark daran angelehnt sind, zu gewährleisten, ist der Schalleistungspegel als Basisgröße unabdingbar. Die grundsätzliche Möglichkeit der Messung weiterer Parameter ergibt sich in erster Linie durch das gewählte Messverfahren. Es bestehen grundsätzlich folgende, in entsprechenden ISO Normen definierte, Messverfahren um die Schalleistung zu bestimmen (nach [6], S.134):

1. *Hüllflächenschalldruckverfahren*
Die Schalldruckpegelmessungen werden unter exakten oder angenäherten Freifeldbedingungen ausgeführt
2. *Hüllflächen-Schallintensitätsverfahren*
Die Intensitätsmessungen können unter (fast) beliebigen Umgebungsbedingungen - an üblichen Maschinen/Geräteaufstellungen, aber auch unter Freifeld- und Hallfeldbedingungen - ausgeführt werden
3. *Hallraumverfahren*
Die Messungen werden in einem Hallraum ausgeführt
4. *Vergleichsverfahren*
Zur Messung wird eine geeichte Prüfschallquelle benötigt. Für die akustische Qualität des Aufstellungsraumes sind im Gegensatz zu den beiden zuvor genannten

2. Schalleistungsmessung

Schalldruckverfahren keine besonderen Bedingungen zu erfüllen. Wohl aber kann seine Anwendung an zu hohen Störgeräuschpegeln scheitern.

Jedes dieser Verfahren hat in gewissen Grenzen seine Berechtigungen, Vorteile und Beschränkungen. Daher werden nun kurz die Vor- und Nachteile der Verfahren erläutert. Besonderes Augenmerk wird hier auf die am IEM in Graz (Verfahren 1) und bei Philips in Klagenfurt (Verfahren 3) verwendeten Verfahren gelegt.

2.1.1. Vor- und Nachteile

Das *Hüllflächenschalldruckverfahren* kommt am IEM zum Einsatz. Die Messkoje bietet im relevanten Frequenzbereich (ca. 300Hz bis 12kHz) annähernd das für diese Verfahren geforderte „Freifeld“ (Schalldruckabnahme mit ca. $1/r$). Durch den Raumanteil (Diffusanteil) wird an den Mikrofonen ein höherer Schalldruckpegel gemessen, als dies bei einem vollständigen Freifeld der Fall wäre. Dies wurde unter anderem bei einer Impulsantwortmessung bei der Beschaffung des Moltonvorhanges festgestellt. Abb. 2.1 zeigt anhand der Pegelzuschläge (in Abhängigkeit von der Frequenz), den Fehler der auf Grund des Diffusanteils gemacht wird. Liegt beispielsweise der Diffusanteil 10dB unterhalb des Direktanteils, so ist der gemessene Wert um 0.5dB größer als der wahre Wert. Ab 400Hz liegen die Pegelzuschläge mit dem angeschafften Vorhang bereits unter 1dB, was bereits einen sehr guten Wert darstellt. Der Vorteil des Hüllflächenschalldruckverfahrens

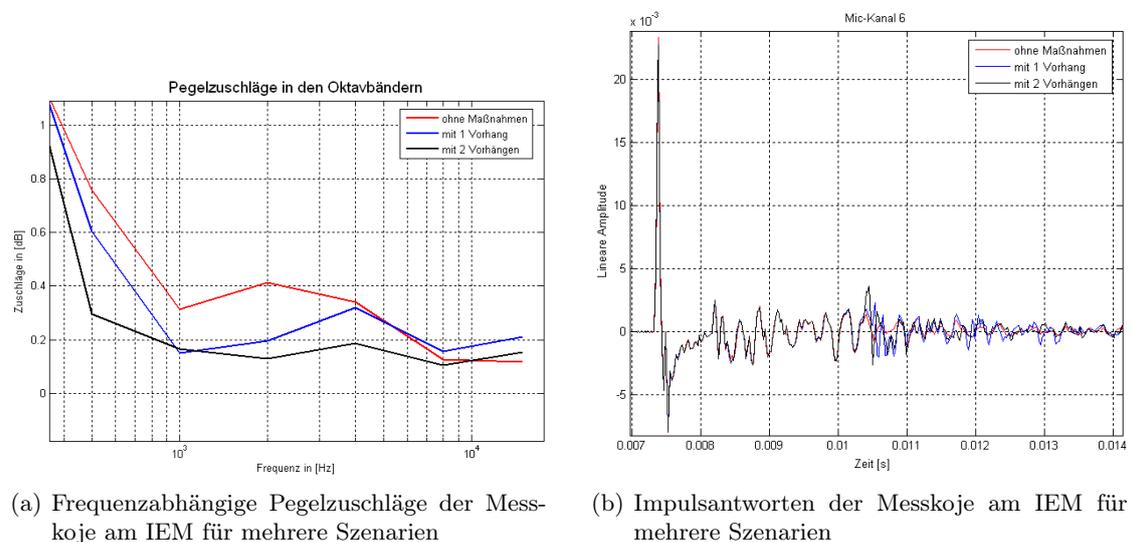


Abbildung 2.1.: Vermessung der Messkoje am IEM für mehrere Szenarien

besteht in der verhältnismäßig billigen Bestimmung der Schalleistung mit Hilfe einiger

Schalldruckempfänger (=Mikrofone). Allerdings hängt die Genauigkeit der Messungen wesentlich von der Einhaltung der Freifeldbedingung ab. Ein weiterer Nachteil ist die notwendige Berücksichtigung des Nahfeldes¹.

Das *Hüllflächen-Schallintensitätsverfahren* hat gegenüber dem Hüllflächenschalldruckverfahren den Vorteil, dass es in fast jeder beliebigen Umgebung zum Einsatz kommen kann. Das begründet sich einerseits in der Unabhängigkeit von der Freifeldbedingung und andererseits im nicht vorhandenen Nahfeldfehler. Allerdings ist diese Methode mit einem ziemlichen finanziellen Aufwand verbunden, da die dazu benötigten „Schallintensitätssonden“ sehr teuer sind.

Das *Hallraumverfahren* kommt in Klagenfurt zum Einsatz. Man kann damit recht einfach und schnell die Schalleistung bestimmen. Durch die diffuse Verteilung des Schalls im Raum ist man jedoch ausschließlich auf die Messung der Schalleistung beschränkt und erhält keinerlei weitere interessante Informationen (wie z.B. die Abstrahlcharakteristik).

Das *Vergleichsverfahren* kommt fast ausschließlich dann zum Einsatz, wenn ein sehr hoher Umgebungspegel² unvermeidbar ist. Es wird daher eine geeichte Prüfschallquelle als Referenz benötigt. Da hier die gesamte Messung von der verwendeten Prüfschallquelle abhängt und dennoch relativ ungenaue Ergebnisse liefert, kommt dieses Verfahren nur in speziellen Situationen zum Einsatz (z.B. bei großen, fix eingebauten Maschinen).

Für detailliertere Beschreibungen zu den einzelnen Verfahren wird auf die Literatur verwiesen ([6], ISO374x).

2.1.2. Anforderungen & Voraussetzungen an das Messverfahren

Aus den vorangegangenen Betrachtungen geht hervor, dass es zur korrekten Schalleistungsmessung mehrere Bedingungen einzuhalten gilt.

Für das Verfahren am IEM sind dies:

- Einhaltung der Freifeldbedingung
- Vermeidung des Nahfeldfehlers - Messung im Fernfeld der Quelle (siehe dazu 2.2)
- Umgebungsgeräuschpegel in jedem interessierenden Terzband 10dB unter dem Pegel der Geräuschquelle

Die Einhaltung der Freifeldbedingung und die Vermeidung des Nahfeldfehlers stellen in gewisser Weise einen Widerspruch dar. Eine Messung im Fernfeld erfordert einen ausreichend *großen* Abstand zur Quelle, während die Einhaltung der Freifeldbedingung einen *kleinen* Abstand verlangt. Um beiden Anforderungen entsprechen zu können gibt es mehrere Möglichkeiten. Für die Vermessung von Küchengeräten ist eine Einschränkung

¹Das Nahfeld beschreibt jenen Teil des Schallfeldes in dem *Schalldruck* p und *Schallschnelle* \vec{v} nicht mehr in Phase sind

²Differenz zwischen Umgebungspegel und Geräuschquelle < 6dB

des Frequenzbereiches nach unten hin die praktikabelste Lösung. D.h. das alle Frequenzen unterhalb 100Hz nicht zur Beurteilung herangezogen werden.

Der Messplatz in Klagenfurt wurde in der derzeitigen Form belassen und als Vergleichsmöglichkeit genutzt um eventuell auftretende Schwächen bzw. Fehler (sowohl in Graz als auch in Klagenfurt) aufzudecken. Wie sich später (siehe Kap. 4) herausstellt war diese Entscheidung sinnvoll.

2.2. Herleitung des L_w

[2] schreibt eine bestimmte Vorgehensweise zur Schalleistungsmessung vor. Daher wird nachfolgend der Schalleistungspegel in die für Kapitel 4 relevante Form hergeleitet.

Die *Schalleistung* P_{ak} definiert sich als Produkt aus *Schallintensität* I und der die Quelle umhüllenden *Hüllfläche* A ($P_{ak} = I \cdot A$)³. Der *Schalleistungspegel* L_w gibt hingegen das Verhältnis der Schalleistung einer Quelle zur sog. Bezugsschalleistung ($P_0 = 10^{-12}\text{W}$) in Dezibel an. Diese definiert sich über eine Bezugsfläche von 1m^2 .

$$L_w = 10 \cdot \log \left(\frac{P_1}{P_0} \right) \text{ dB} \quad (2.1)$$

Die *Schallintensität* I ist selbst als Produkt von *Schalldruck* p und *Schallschnelle* \vec{v} definiert. Es ist nun weiters möglich die Schallschnelle als $\frac{p}{Z_0}$ auszudrücken⁴ und für die *Schallkennimpedanz* Z_0 das Produkt $\rho \cdot c$ zu substituieren. Wenn man nun von einem *Kugelstrahler 0. Ordnung* ausgeht (was bei kleinen Küchengeräten durchaus zutrifft), kann man eine kugelförmige Hüllfläche ($A = 4\pi R^2$) einsetzen. „Ein Beispiel für eine Kugelschallquelle ist ein kugelförmiger Luftballon, dessen Innendruck periodisch verändert wird“ ([11], S.46). Der Schalleistungspegel kann dann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$L_w = 10 \cdot \log \left(\frac{4\pi R^2 \tilde{p}^2 \rho c}{\tilde{p}_0^2 \rho c} \right) \quad (2.2)$$

Das es sich bei den im Zuge dieser Arbeit gemessenen Haushaltsgeräten auch tatsächlich um Kugelstrahler niedriger Ordnung (< 2) handelt, wurde in [4] eingehendst untersucht und bewiesen. Obwohl in der Praxis bei hohen Frequenzen größere Richtwirkungen zu erwarten sind, bleibt, bedingt durch den großen Messabstand (relativ zur Wellenlänge), dennoch die Fernfeldbedingung aufrecht, was Nahfeldfehler von vorne herein ausschließt. Durch aufteilen der Gl. 2.2 erhält man jeweils einen Teil für das Druckverhältnis und

³Hier wird natürlich stillschweigend davon ausgegangen, dass die Hülloberfläche normal zur Ausbreitungsrichtung steht und das bei der Schalleistungsmessung nur die Intensität in Richtung der Flächennormalen berücksichtigt wird

⁴Dies gilt jedoch nur im bereits in 2.1.2 erwähnten „Fernfeld“, wo Schalldruck und Schallschnelle in Phase sind - deshalb auch die Anforderung an die Messung

einen für das Flächenverhältnis.

$$L_w = 10 \cdot \log \left(\frac{\tilde{p}^2}{\tilde{p}_0^2} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{4\pi R^2}{1} \right) \quad (2.3)$$

Der erste Teil aus Gl. 2.3 kann nun durch einen sog. *Messflächenschalldruckpegel* $\overline{L_{pf}}$ (bezogen auf $20\mu\text{Pa}$) ersetzt werden. Dabei wird von *ungleich großen Teilflächen* S_i und damit automatisch auch *unterschiedlichen Schalldruckpegeln* L_{pi} für jede Mikrofonposition ausgegangen.

$$\overline{L_{pf}} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{S} \left[\sum_{i=1}^N S_i 10^{0.1L_{pi}} \right] \right) \text{dB} \quad (2.4)$$

Wobei:

N ... Anzahl der Mikrofonpositionen

S_i ... die zur i -ten Mikrofonposition gehörende Teilfläche der kugelförmigen Messfläche

S ... die Gesamtfläche der kugelförmigen Messfläche

L_{pi} ... der fremdgeräuschkorrigierte Schalldruckpegel an der i -ten Mikrofonposition, in Dezibel, bezogen auf $20\mu\text{Pa}$

Daher können wir den Schalleistungspegel (wie auch in [2] festgelegt) folgendermaßen ausdrücken:

$$\boxed{L_w = \overline{L_{pf}} + 10 \cdot \log \left(\frac{S_1}{S_0} \right) \text{dB}} + C_1 + C_2 \quad (2.5)$$

Wobei hier für $S_0 = 1$ und für $S_1 = 4\pi R^2$ eingesetzt wird und die 2 Korrekturterme C_1 & C_2 für Luftdruck und Lufttemperatur laut [2], S. 20 gesondert zu berechnen sind. Diese Form wird letztendlich auch bei der Auswertung in 3.4.2 verwendet.

3. Der Messplatz am IEM in Graz

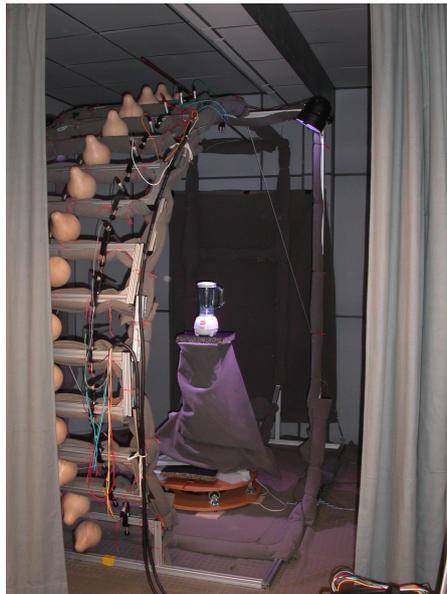


Abbildung 3.1.: Der Messplatz am IEM

3.1. Einführung

Der Messplatz am IEM wurde Ende 2005 für die Messung von so genannten HRTF¹-Kurven entworfen. Die Messung von personenbezogenen HRTF-Kurven soll eine deutlich verbesserte Kopfhörerwiedergabe virtueller Räume („Auralisation“) ermöglichen und ist zur Zeit Gegenstand intensiver Forschungen am IEM. Da die Messumgebung als Teilraum in ein bestehendes mittelgrosses Büro im 1. Stock des Studienzentrum in der Inffeldgasse 10 integriert wurde, ist an und für sich die Bezeichnung „Messkoje“ zutreffender. Die Anwendung als Messumgebung für dieses Projekt ergab sich durch die für diesen Zweck ausreichend gute Absorption der akustisch dämmend verkleideten Wand des Raumes. Im Vorfeld wurden bereits Untersuchungen bzgl. des Richtungsverhaltens des Direkt- und

¹Head Related Transfer Function

Diffusanteils durchgeführt. Es wurde eine zu höheren Frequenzen hin immer größer werdende Diskrepanz im Richtverhalten der beiden Anteile festgestellt. Eine Messung von stark gerichteten Schallquellen ist daher in dieser Messkoje nur unter erschwerten Bedingungen durchführbar, da bei hohen Frequenzen die Fehler aufgrund des Diffusanteiles des Raumes berücksichtigt werden müssen. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die Relevanz dieses Verhaltens in Bezug auf diese Projektarbeit näher eingegangen.

3.2. Messaufbau

Wie in Kapitel 2 beschrieben müssen bei Verwendung des Hüllflächenschalldruckverfahrens (siehe Seite 7) bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein um eine vernünftig genaue Schalleistungsmessung zu gewährleisten. Zur Bestimmung weiterer interessanter Parameter ist eine Art von akustischer „Kartografierung“ der Geräte notwendig. Um dieses Ziel zu erreichen, kann man (wie u.a. in [2] beschrieben) entweder Mikrofone an einem fixen Gestell rund um das Gerät herum befestigen oder, die Mikrofone auf bestimmten Bahnen kontinuierlich um das Gerät kreisen lassen und dieses Signal aufnehmen. Der tatsächliche Messvorgang am IEM stellt in dieser Hinsicht einen innovativen Kompromiss dar. Ein per PC steuerbarer Drehteller der Firma *Outline*², auf dem das Gerät steht, kann in bestimmte Gradpositionen gestellt werden. Dieser war bereits am IEM vorhanden und kam schon mehrmals bei ähnlichen Forschungsarbeiten (u.a. zur Vermessung von Lautsprechern) zum Einsatz. Diese Methode hat den Vorteil, dass weitaus weniger Mikrofone benötigt werden und der gesamte Messaufbau mechanisch weitaus simpler zu bauen und warten ist, als dies bei anderen Messmethoden der Fall ist. Ein nennenswerter Nachteil (neben der Schwierigkeit die Messumgebungsbedingungen zu erfüllen), ist der etwas länger dauernde Messvorgang (bei 20s Messdauer pro Gradposition und Gradauflösung von 20 Grad - ca. 7 Minuten). Die Änderung der räumlichen Situation um das Messobjekt herum, durch Drehen des Drehtellers, kann bei stärker gerichteter Abstrahlung zum Problem werden. Da dies bei den hier wichtigen kleineren Haushaltsgeräten nicht der Fall ist, ist dieser Nachteil nur bedingt relevant. Weitere auf dieser Annahme basierende Betrachtungen folgen in 3.3.

3.3. Hardwareaustattung am Messplatz

In Abb. 3.2 ist der Messaufbau schematisch dargestellt. Es befinden sich 14 „Behringer ECM8000“ Mikrofone auf einem annähernd kreisbogenförmigen Gestell³, das vertikal um die Quelle herum aufgebaut ist. Deshalb wird bei der Berechnung des L_w auch von der in 2.2 beschriebenen Form mit ungleich großen Teilflächen S_i ausgegangen. Durch Drehen des Tellers (in bis zu min. 5 Grad feinen Schritten) erhält man so die Abstrahlung

²nähere Informationen siehe http://www.outline.it/ET2-ST2_Turntable.htm

³Dies begründet sich in dem um lediglich 10 Grad verstellbaren Winkel zwischen den Elementen

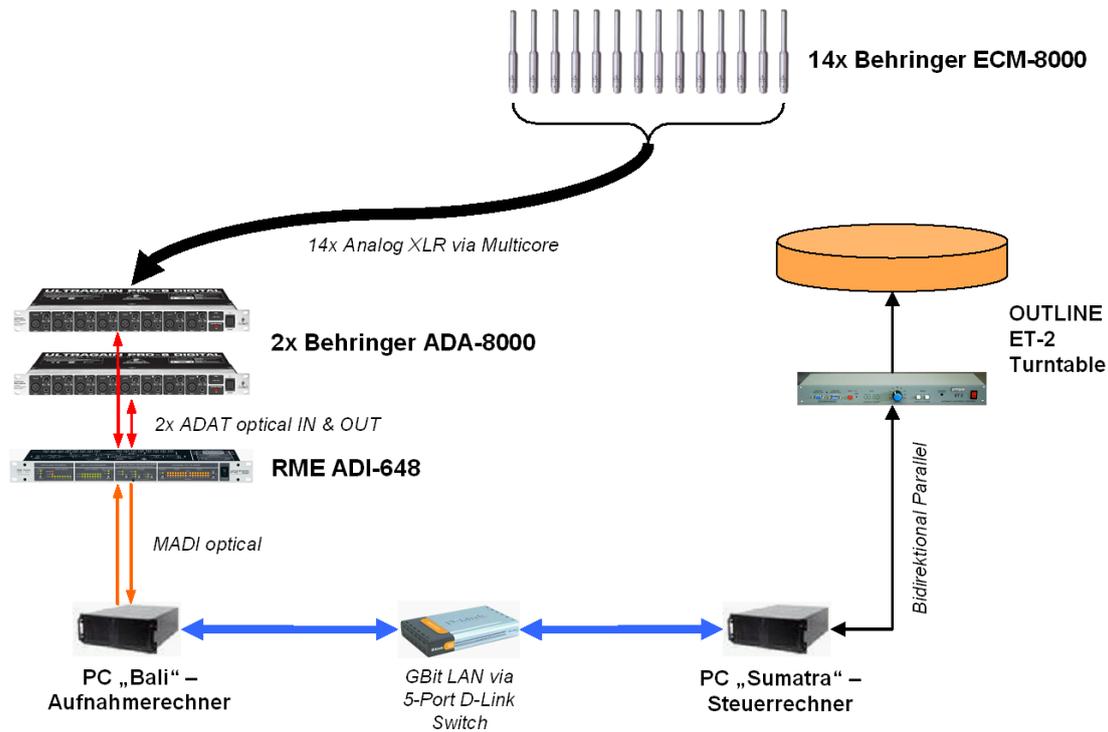


Abbildung 3.2.: Der Verkabelungsplan des Messaufbaus

des Gerätes in nahezu alle Richtungen. Nahezu deshalb, da der Bogen nur bis ca. -45 Grad der Horizontalebene auf Höhe des Gerätes geht und somit nicht die vollständige Abstrahlung nach unten hin erfasst werden kann. Für die Messung der hier wichtigen kleinen Küchengeräte, gehen wir (wie schon in 2.2 erwähnt) aber ohnehin von Strahlern niedriger Ordnung (< 2) aus. Einerseits ist dadurch der Nahfeldfehler laut [4] für den am IEM gewählten mittleren Abstand von ca. 1.3m vom Mikrofon zur Quelle vernachlässigbar. Dies gilt allerdings nur für den gültigen und für diese Anwendung relevanten Frequenzbereich von ca. 300 – 12500Hz. Andererseits ist deshalb auch keine nennenswerte, gerichtete Abstrahlung in eine bestimmte Richtung (also z.B. auch nach unten hin) zu erwarten. Daher ist für die Genauigkeit der Messung des Schalleistungspegels das Erfassen der Abstrahlung nach unten hin nicht von essentiellen Belang.

Weiter Details und weiterführende Verweise zur verwendeten Hardware befinden sich in Anhang B auf Seite 67.

3.4. Softwareanwendungen am Messplatz

Auf der Softwareseite besteht der gesamte Messvorgang aus 2 Hauptteilen:

1. Aufzeichnung des Geräusches (siehe 3.4.1)
2. Auswertung der aufgezeichneten Daten (siehe 3.4.2)

3.4.1. Aufzeichnung mit Pure Data

Zur Aufzeichnung der anfallenden Messdaten wurde mit Hilfe der Software **Pure Data**⁴ (kurz PD) eine Anwendung erstellt. PD ist eine grafische Open Source Programmiersprache basierend auf dem inzwischen kommerziellen MAX/MSP, die schon seit einiger Zeit vom IEM mitentwickelt und aktiv unterstützt wird. Grundsätzlich ist PD zur Echtzeitverarbeitung von Audiosignalen und für Computermusik gedacht, ist aber sehr universell auch für andere Zwecke einsetzbar. In diesem Projekt wird damit sowohl die Drehtelleransteuerung als auch die Aufzeichnung der Geräuschquelle realisiert.

Der gesamte Aufzeichnungsvorgang findet verteilt auf 2 Computern statt, auf denen PD mit den entsprechenden „Patches“⁵ läuft (siehe Abb. 3.2). Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da eine beträchtliche Anzahl an Daten anfällt und dieser Aufwand mit Hilfe von 2 Rechnern einfacher abzuwickeln ist.

Das „Frontend“ am Steuerrechner „SUMATRA“ (Betriebssystem: WINDOWS XP®), mit der in 3.4.1.1 näher behandelten Benutzeroberfläche, hat die Aufgabe den Drehteller zu steuern und die Anweisungen zum Aufnahmestart und Aufnahmestopp an den Aufnahmerechner „BALI“ (Betriebssystem: DEBIAN LINUX 2.6.X) via Gigabit-Ethernet zu schicken. Während das in 3.4.1.2 erläuterte „Backend“ am Aufnahmerechner „BALI“ die alleinige Aufgabe hat, die Daten der 14 Mikrofone in eine sog. „*Multiwave*“-Datei zu schreiben. Hierbei werden die Daten aller 14 Mikrofone einer Gradposition in eine 16-Kanal-Datei geschrieben, um die Überschaubarkeit zu gewährleisten. Der Grund für die Aufnahme von 16 anstelle von 14 Kanälen wird in 3.4.2.1 näher erklärt.

Nach Eingabe der Parameter und Start der Messung läuft diese vollautomatisch ab. Der gesamte Messablauf wird in 3.5 exemplarisch durchbesprochen.

3.4.1.1. Benutzeroberfläche „CAMDA“ (Frontend)

„CAMDA“ steht für **C**ontrolcenter for **A**coustical Measurement of **D**omestic **A**ppiances. Die Benutzeroberfläche am Rechner „SUMATRA“ soll den Messvorgang übersichtlicher und zugleich komfortabler machen. Außerdem muss sich der „einfache Benutzer“ nicht näher mit PD beschäftigen um dennoch eine Messung durchzuführen. Mit den Statusanzeigen hat man alle aktuellen Parameter zur Hand und ist über den aktuellen Stand

⁴nähere Informationen siehe <http://www.pure-data.info>

⁵Als „Patch“ versteht man bei PD ein Fenster, das die „grafisch programmierten“ Elemente enthält

3. Der Messplatz am IEM in Graz

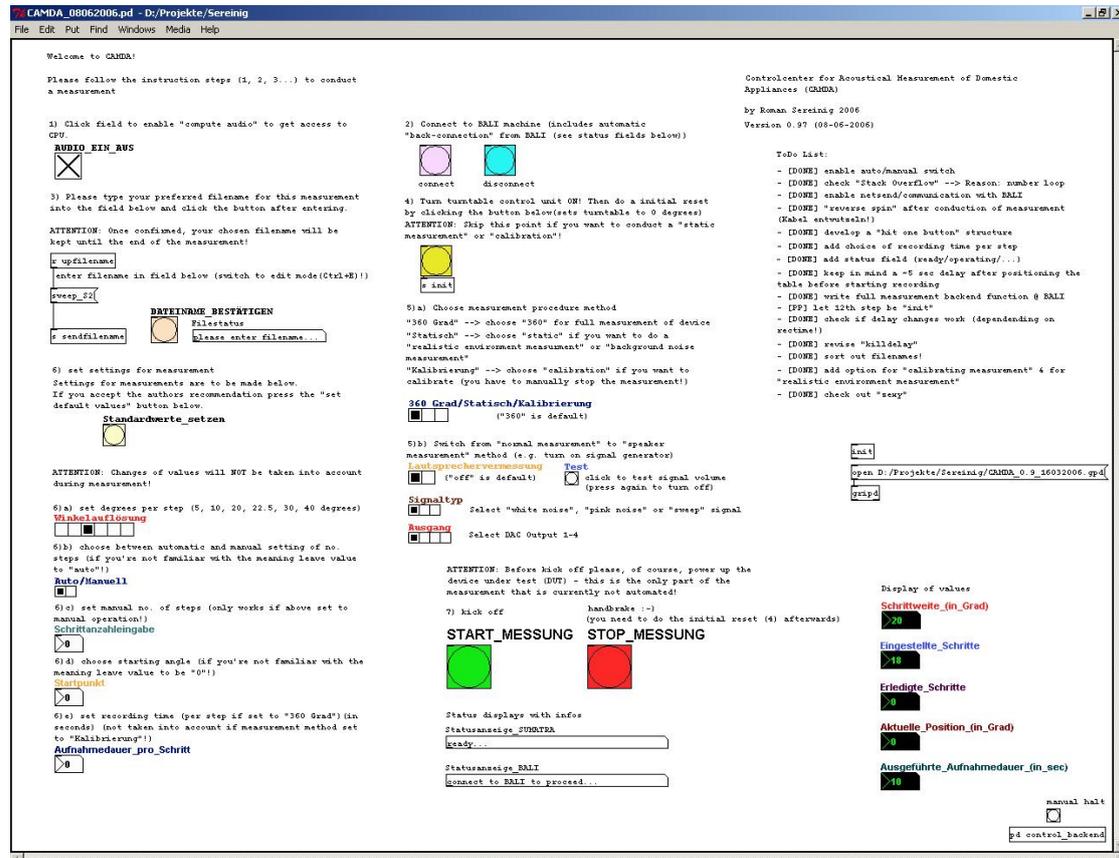


Abbildung 3.3.: Benutzeroberfläche „CAMDA“ in PD

der Messung informiert (siehe Abb. 3.3). Der Basisdateiname sowie die Erstellung des gleichnamigen Unterordners am Rechner „BALI“ werden direkt von hier aus erledigt, was zur allgemeinen Übersichtlichkeit beiträgt.

Die für eine standardisierte Schalleistungsmessung wichtigen Parameter können folgendermaßen eingestellt werden (mögliche Werte sind *kursiv* in Klammern, Defaultwert **fett**):

- **Winkelauflösung** (*5, 10, 20, 22.5, 30, 45 Grad*)
- **Aufnahmedauer pro Schritt** (*1 bis 60 Sekunden, 10 Sekunden*)
- **Aufnahmemodus** (*360 Grad, Statisch, Kalibrierung*)
 - *360 Grad* - komplette Rundum-Messung (z.B. zur Bestimmung der Schalleistung)

- *Statisch* - Messung nur aus einer Richtung (Kann z.B. für die geplante Messung unter „realistischen Umgebungsbedingungen“ (Küchenecke) mittels Kunstkopf verwendet werden)
- *Kalibrierung* - die Messung wird nach einem Countdown von 10 Sekunden gestartet und muss manuell beendet werden (Dies wurde u.a. beim Dauerlauf-Test (siehe Kap. 4) verwendet; der Name „Kalibrierung“ bezieht sich auf die ursprünglich zugedachte Funktion der Kalibrierung mittels des als .wav-Datei aufgezeichneten Kalibratorsignals)

- **Lautsprechervermessung** (*Ein/Aus*)

Zur Fehlersuche und für spezielle Zwecke können auch noch folgende optionale Parameter beeinflusst werden:

- **Auto/Manuell** („*Auto/Manuell*“) - Umschaltung auf manuelle Einstellung der Schrittzahl
- **Schrittzahleingabe** (*1 bis 36 Schritte*) - funktioniert nur bei Einstellung obiger Funktion auf „Manuell“
- **Startpunkt** (*0 bis 360 Grad*) - Einstellung des Startwinkels

Im Hintergrund arbeiten des weiteren noch mehrere „Subpatches“. Sie bewältigen folgende Aufgaben:

1. Steuerung des Drehtellers (basiert zum Teil auf einer bereits zuvor programmierten Schnittstelle)
2. Kommunikation mit der Aufzeichnungsanwendung an BALI
3. Handhabung der Statusanzeigen
4. Ansteuerung eines Lautsprechers für spezielle Messungen (siehe 5.2)

3.4.1.2. Datenaufzeichnung (Backend)

Der zweite wichtige Teil der Messanwendung befindet sich am Rechner BALI. Der Benutzer muss lediglich die dortige Anwendung starten. Theoretisch wäre es sogar möglich auch den Start der Aufzeichnungsanwendung übers Netzwerk zu steuern. Da jedoch ohnehin am Rechner BALI ein Login notwendig ist, steht der Aufwand zur Zeit nicht dafür.

Das Hauptfenster (so wie es auch der Benutzer beim Start zu sehen bekommt) ist in Abb. 3.4 zu sehen. Alle notwendigen Einstellungen und Eingaben werden zwar grundsätzlich an der in 3.4.1.1 besprochenen Benutzeroberfläche CAMDA durchgeführt. Es gibt

3. Der Messplatz am IEM in Graz

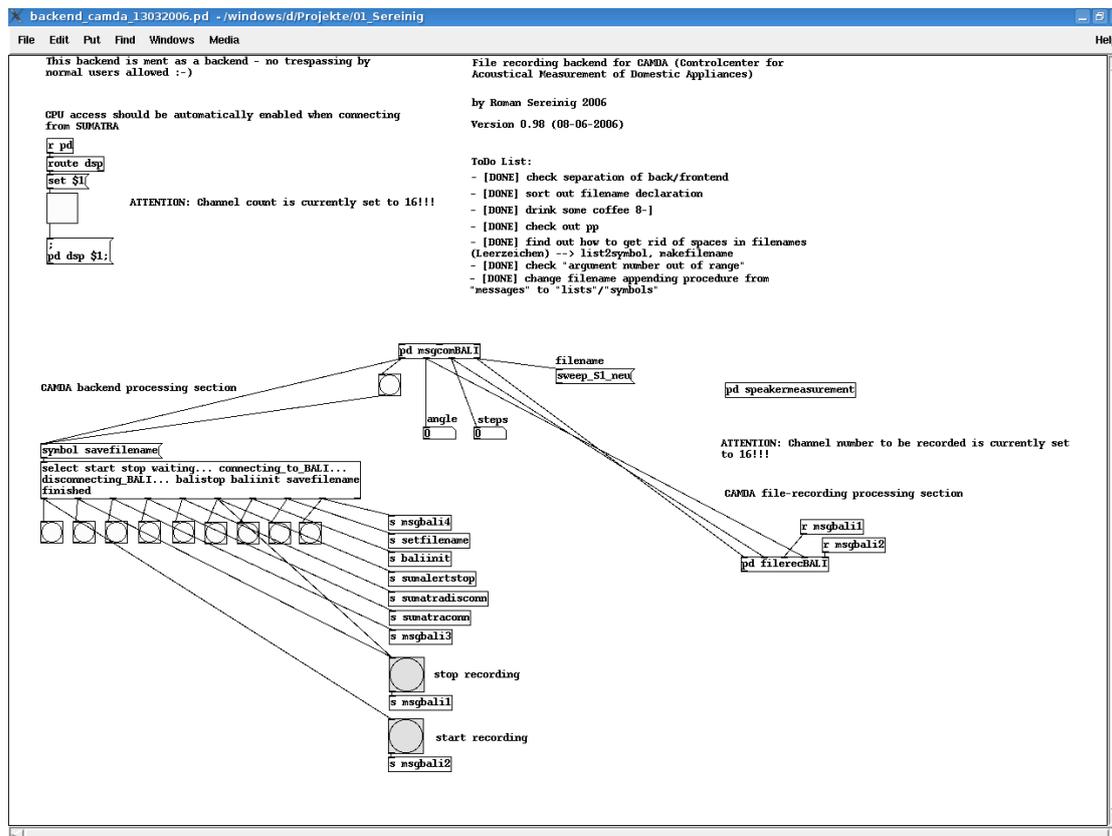


Abbildung 3.4.: Datenaufzeichnungsanwendung in PD

jedoch zur Fehlersuche einige Anzeigen und Eingriffsmöglichkeiten am Programmfenster. Diese sind bei näherer Betrachtung an und für sich selbsterklärend.

Die wesentlichen Funktionen dieser Teilapplikation umfassen:

1. Kommunikation mit der Steueranwendung CAMDA
2. Automatische Beschriftung der Dateien nach vorgegebenem Schema
3. Schreiben der „Multiwave“-Dateien

Die Kommunikation umfasst zum Einen das Verschicken des Status zur aktuell aufgezeichneten Position (also z.B. `recording step 1 @ 0 degrees`) an CAMDA. Zum Anderen werden die wichtigen Befehle zum „Start“ und „Stopp“ der Aufnahme von CAMDA entgegengenommen.

Sämtliche aufgezeichneten Daten werden automatisch in einen Unterordner abgespeichert. Er enthält das Datum, sowie den Basisdateinamen. Der Pfad des Hauptordners

am Rechner BALI lautet zur Zeit `\windows\d\Projekte\01_Sereinig\MeasData`. In diesen werden automatisch alle Unterordner erstellt. Dies kann sich natürlich jederzeit ändern. Es werden aber vom Autor zusätzlich Backups aller Daten geführt, die dieselbe Dateistruktur, wie der Projektordner `01_Sereinig` an BALI, enthalten. Die Benennung und Erstellung des Unterordners wird ebenfalls direkt von CAMDA aus bewerkstelligt. Die automatische Beschriftung erfolgt nach folgendem Schema (Beispiele sind hervorgehoben in Klammern):

Datum (20060725) - im Format YYYYMMDD

Dateiname (hr1704_4_ow) - wird 1:1 vom entsprechenden Eingabefeld der Benutzeroberfläche CAMDA übernommen (ein Unterstrich im Basisdateinamen ist *nicht* zwingend notwendig, wird aber empfohlen!)

Uhrzeit (19-03-56) - im Format HH-MM-SS

Schrittnummer (step_1) - Nummer des aufgezeichneten Schrittes

Gradposition (@_0_degrees) - Gradposition des *Drehtellers*⁶

Dateiendung (.wav) - wird am Ende hinzugefügt

Zwischen alle Einzelteile (mit Ausnahme der Dateiendung) wird immer jeweils ein Unterstrich eingefügt, um sowohl die Lesbarkeit, als auch die Kompatibilität mit verschiedenen Systemen zu erhöhen. Somit ergibt sich der Dateiname unseres Beispiels wie folgt: `20060725_hr1704_4_ow_19-03-56_step_1@_0_degrees.wav`. Wobei der Unterordner, in den alle Daten dieser Messung abgespeichert werden `20060725_hr1704_4_ow` heißt. Somit können zwei, an verschiedenen Tagen durchgeführte Messungen, denselben Namen haben und werden dennoch in verschiedene Ordner abgespeichert. Die im Dateinamen enthaltene Uhrzeit verkompliziert zwar ein wenig den Namen der Datei, verhindert aber ein Überschreiben der Datei bei etwaiger Wiederholung einer gleichnamigen Messung. Nach Durchführung des Messvorganges in PD sind die Dateien als *.wav-Dateien abgelegt und können nun von der Auswertungsanwendung weiter verarbeitet werden.

3.4.2. Auswertung mit MATLAB[®]

Nach Abschluss des Aufzeichnungsvorganges erfolgt die Auswertung der aufgezeichneten Daten durch eine in MATLAB[®]⁷ (Matrizenorientiertes Mathematikprogramm) realisierte Auswertungsanwendung durchgeführt werden. Man kann eine solche Anwendung in MATLAB[®] als „Script“ oder „Function“ definieren. Zur Zeit ist die Verwendung von

⁶nicht zu verwechseln mit der Abstrahlrichtung des Gerätes! Dieser Aspekt kommt in 3.4.2.2 zum Tragen

⁷nähere Informationen siehe <http://www.mathworks.com>

„Scripts“ besser geeignet, da sie lediglich eine Zusammenfassung von Befehlen darstellen, die auch in der MATLAB[®]-Kommandofenster möglich wären und daher die Fehlersuche erleichtern. Es ist aber ohne weiteres möglich daraus eigene Functions mit lokalen Variablen zu erstellen. Für weitere Informationen diesbezüglich wird auf das Handbuch zu MATLAB[®] bzw. auf die Homepage verwiesen. Als weiterer Beitrag zur Übersichtlichkeit und vor allem Modularität/Erweiterbarkeit ist die Aufteilung der Anwendung in mehrere Scripts, die unterschiedliche Aufgaben erledigen, zu verstehen. Manche Scripts können deshalb sogar unabhängig von den anderen Teilen als „Stand-Alone“-Programm agieren. Die in Tab. 3.1 angeführten „m-Scripts“ wurden vom Autor programmiert und getestet. Die Aufrufmöglichkeiten *cmd* und *F5* in Tab. 3.1 bedeuten, dass es möglich ist das Script

Scriptname	Aufgabe	Aufrufmöglichkeit
CAMDA_Analyser.m	Hauptanwendung	cmd, F5
camda_calibration.m	Erstellung des Kalibrationsvektors	auto, cmd, F5
camda_filereader.m	Einlesen der Audiodateien & Terzfilterung	auto
camda_swlcalculator.m	Berechnung des L_w	auto, cmd, F5
camda_plotter.m	Erstellen von Plots	auto, cmd, F5
camda_pmatrix_swlcalculator.m	Berechnung des L_w mit Laden einer P-Matrix	cmd, F5

Tabelle 3.1.: Die Scripts zur Auswertung in MATLAB

direkt mit dem Namen aus dem Kommandofenster von MATLAB[®] heraus, oder bei geöffnetem Quellcode des Scripts mit der Taste F5, aufzurufen. *auto* bedeutet, dass das entsprechende Script bei einem kompletten Auswertungsdurchlauf von der Hauptanwendung CAMDA_Analyser.m automatisch mit den notwendigen Variablen aufgerufen wird. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass sich alle Scripts im selben Ordner befinden.

Die einzelnen Scripts werden nachfolgend in 3.4.2.1 näher umrissen.

3.4.2.1. Verarbeitung der gemessenen Audiodaten

Zur Durchführung einer kompletten Auswertung der Schalleistung sind zusätzlich weitere Funktionen notwendig. Ein Teil der in Tab. 3.2 aufgelisteten Funktionen wurde im Zuge einer Diplomarbeit von Alois Sontacchi [9] programmiert und wird von den nachfolgend behandelten Scripts aufgerufen. Der Rest besteht aus frei erhältliche Scripts die, auf der vom MATLAB[®]-Hersteller MATHWORKS betriebenen Community-Seite „MATLAB[®]Central“ (<http://www.mathworks.com/matlabcentral/>), über die Suchfunktion, recht leicht zu finden sind. Diese wurden zum Teil aufgrund ihrer, gegenüber den herkömmlichen MATLAB[®]-Funktionen, erweiterten Möglichkeiten (z.B. *mmpolar.m*)

Functionname	Aufgabe	Autor
abewertung.m	Berechnung des A-bewerteten Signals	Alois Sontacchi
ADSGN.m	Berechnung der Koeffizienten eines Bewertungsfilters nach A-Kurve	Alois Sontacchi
LEQ.m	Berechnung einer Folge von Energieäquivalenten Leistungen	Alois Sontacchi
mmpolar.m	Erstellen von erweitert definierbaren Polardiagrammen	D.C. Hanselman
OCT3DSGN.m	Berechnung der Koeffizienten eines Terzbandfilters	Alois Sontacchi
OCTDSGN.m	Berechnung der Koeffizienten eines Oktavbandfilters	Alois Sontacchi
oktavfilterbank.m	Filterung eines Signals in Oktavbänder	Alois Sontacchi
progressbar.m	alternative Anzeige der Berechnungsdauer	Steve Hoelzer
terzfilterbank.m	Filterung eines Signals in Terzbänder	Alois Sontacchi
timebar.m	kleinere alternative Anzeige der Berechnungsdauer	Chad English

Tabelle 3.2.: Zusätzliche Funktionen zur Auswertung in MATLAB

verwendet. Bei anderen war die Verwendung auf die leichter zu verwendenden Übergabeparameter und die Recheneffizienz zurückzuführen (z.B. `timebar.m`). Die jeweiligen Autoren sind ebenfalls in Tab. 3.2 zu finden. Das Flussdiagramm in Abb. 3.5 gibt einen Überblick über die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Scripts, die weiter unten beschrieben werden.

CAMDA_Analyser.m Dieses Script beinhaltet alle notwendigen Schritte um eine vollständige Auswertung der aufgezeichneten Daten durchzuführen. Bei Start diese Scripts werden die anderen Teile des gesamten „Scriptpakets“ zur Schalleistungsauswertung werden der Reihe nach aufgerufen (inklusive aller Abfragen und Dialoge zur Ordnerauswahl). Am Ende der Auswertung ermöglicht dieses Script die Speicherung der Auswertungsdaten in *.mat-Dateien um zur weiteren Begutachtung nicht noch einmal die gesamte Auswertungsprozedur durchlaufen zu müssen. Das Laden von bereits abgespeicherten Auswertungen ist später möglich und geht wesentlich schneller von statten. Dafür ist allerdings das weiter unten beschriebene Script `camda_pmatrix_swlcalculator.m` zuständig.

Input: kein

Output: *P*-Matrix (**P**), Kalibrationsvektor (**cfc**), Luftdruck (**B**), Lufttemperatur (**T**) (in *.mat-Datei)

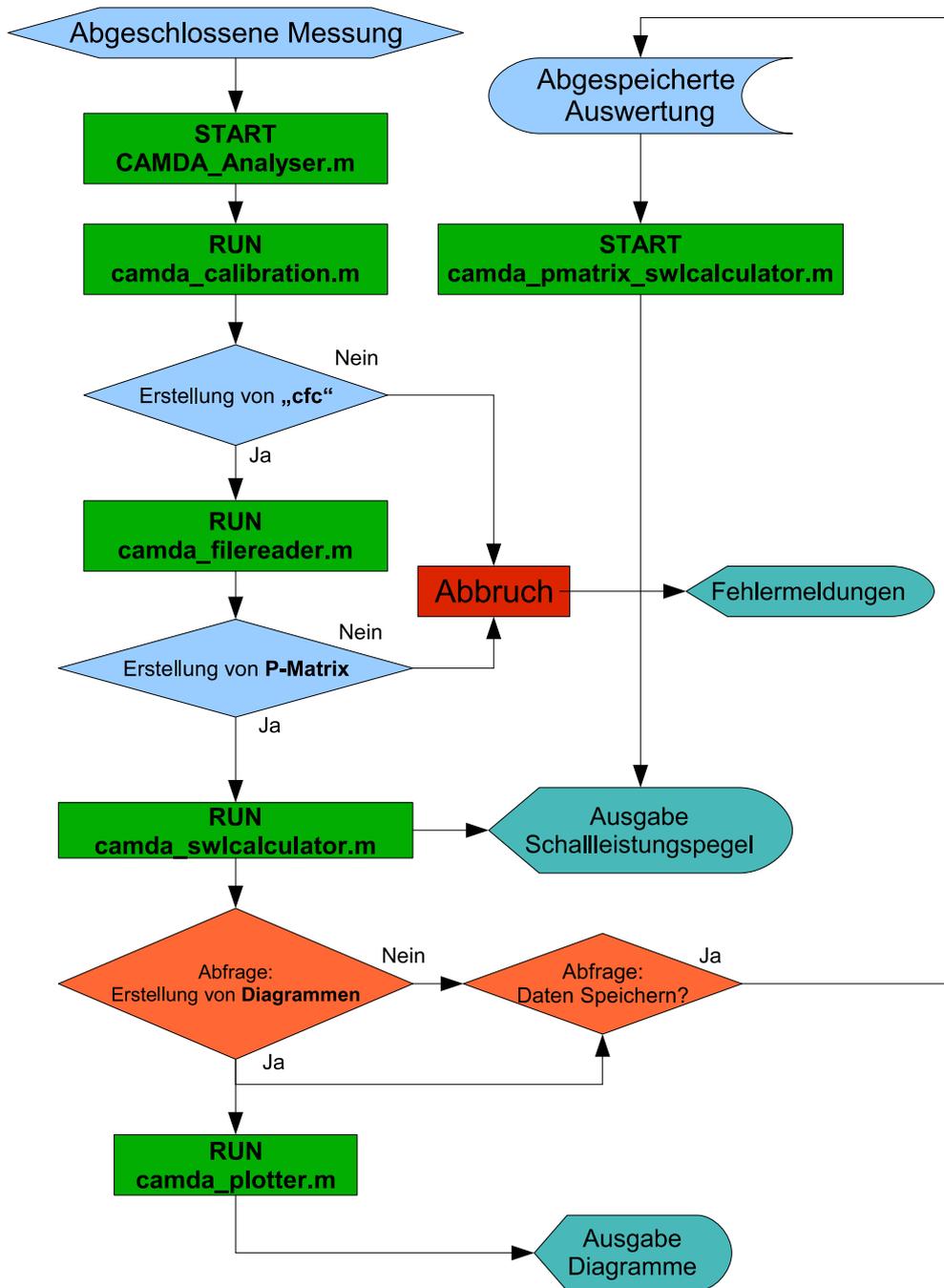


Abbildung 3.5.: Flussdiagramm der Auswertungsanwendung

camda_calibration.m In diesem Script wird die Basis für die Auswertung gelegt. Die in 3.5.1 erstellte Kalibrationsdatei kommt hier zum Einsatz. Diese wird eingelesen und anschließend daraus pro Kanal ein Kalibrationsfaktor errechnet. Alle 14 Faktoren werden in einen Kalibrationsvektor („cfc“) geschrieben. Dieser wird auch zusammen mit der P-Matrix am Ende einer kompletten Auswertung in eine *.mat-Datei abgespeichert um eine spätere Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Input: *Kalibrationsdatei* (*.txt-Datei)

Output: *Kalibrationsvektor (cfc)*

camda_filereader.m Der Zuständigkeitsbereich diese Scripts umfasst das Einlesen aller „Multiwave“-Dateien einer Messung, das Filtern der Daten mit Hilfe des Scripts `terzfilterbank.m`, sowie das Speichern des ausgewerteten Schallpegels in eine Matrix mit 3 Dimensionen (sog. „P-Matrix“). Diese 3 Dimensionen sind die *Schrittnummer*, die *Mikrofonposition* und der *Terzbandschallpegel*. In Abb. 3.6 ist zur besseren Veranschaulichung die Struktur der P-Matrix dargestellt. Dabei wird für die maximale Anzahl der Schritte von der standardmäßig eingestellten Azimutaufösung von 20 Grad ausgegangen. Außerdem ist der Wertebereich der möglichen Terzbänder variabel, zur Zeit aber auf 28 Bänder von 25Hz bis 12.5kHz festgelegt. Eine Reduktion der Bänder (vor allem der nicht besonders relevanten tieffrequenten Bänder unterhalb 100Hz) bewirkt obendrein eine Verkürzung der Rechendauer bei der Filterung der aufgezeichneten Audiodateien. Die Anzahl der Mikrofonpositionen ist durch die Konstruktion des universellen Gestells auf 14 beschränkt, was einer elevatorischen Auflösung von 10 Grad im Bereich von -45 bis 90 Grad der Horizontalebene entspricht. Beim Filtern kommt auch die Aufnahmedauer pro Position zum Tragen. Laut [2], S.17 ist für eine untere Mittenfrequenz von 200Hz das Geräusch mindestens 10s aufzunehmen. Daher wird die Aufnahmedauer der Aufzeichnungsanwendung in 3.4.1 standardmäßig auf 10 Sekunden gesetzt. Die P-Matrix ist

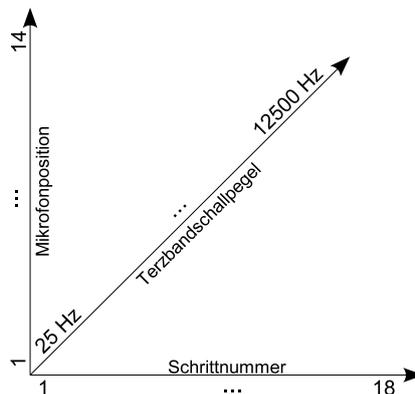


Abbildung 3.6.: Datenstruktur der P-Matrix

ebenfalls Bestandteil der wichtigen Auswertungsdaten, die bei Bedarf in eine *.mat-Datei abgespeichert werden können. Dieses Script kann als einziges des gesamten Scriptpakets nicht direkt als Stand-Alone Anwendung fungieren, da die Kalibrierungswerte der einzelnen Mikrofonpositionen zwingend notwendig sind.

Im Zuge der Entwicklung der Auswertungsanwendung wurde nach mehreren Versuchen festgestellt, dass die MATLAB[®]-Funktion `wavread` anscheinend nur Audiodateien mit einer Kanalanzahl von 2^N (für $N \geq 0$) (also 1, 2, 4, 8, ... Kanäle) einliest. Deshalb musste die Kanalanzahl von 14 auf 16 erhöht werden, obwohl damit 2 Kanäle ungenutzt bleiben bzw. unnötigerweise aufgezeichnet werden und damit Festplattenplatz verschwenden. Die 2 leeren Kanäle werden in diesem Script allerdings wieder entfernt.

Input: Kalibrationsvektor (`cfc`), Audiodateien („Multiwave“-Dateien)

Output: *P*-Matrix (`P`)

camda_swlcalculator.m Die in diesem Script durchgeführte Berechnung der Schallleistung wurde nach Gl. 2.5 implementiert. Zusätzlich wird jedoch noch ein (negativer) Korrekturvektor *C_Behringer* aufgeschlagen. Dieser machte sich zunächst bei der Betrachtung der unterschiedlichen Messergebnisse aus Graz und Klagenfurt im Frequenzgang ab ca. 2kHz bemerkbar. Daher wurde ein Vergleich der Impulsantwortmessungen eines exemplarischen *Behringer ECM8000* Mikrofons und eines sehr genauen *G.R.A.S. TYPE 40AF* Messmikrofons (spezifiziert als „TYP 0“ bzw. „TYP 1“ nach IEC 61672-1) durchgeführt. Dabei wurde tatsächlich eine Differenz bis zu 3dB (bei ca. 12kHz) im Frequenzgang ab ca. 2kHz festgestellt. Das lässt auf eine nicht vollständige Freifeldentzerrung der Behringer-Mikrofone hin schließen. Die verwendete Korrekturkurve ist in Abb. 3.7 als Differenz der Frequenzgänge der beiden Mikrofone dargestellt. Zu beachten ist hierbei, dass bei der tatsächlichen Berechnung die Werte des Korrekturvektors für Frequenzen unter 100Hz auf 0 gesetzt werden, da die Messunsicherheit hier zu groß ist und diese außerdem für die Vermessung von Küchengeräten nicht besonders relevant sind.

Input: *P*-Matrix (`P`)

Output: Unbewertete Terzschallleistungspegel (`LW`), *A*-bewertete Terzschallleistungspegel (`LWA`), Unbewerteter Gesamtschallleistungspegel (`L_W`), *A*-bewerteter Gesamtschallleistungspegel (`L_W_A`)

Im Zuge der Recherche zum *Behringer ECM8000* musste leider auch festgestellt werden, dass eine nach [2] notwendige Spezifizierung des Mikrofons als Klasse 1 (TYP 1) nach IEC61672-1:2002 nicht vorhanden bzw. erhältlich ist. Daher kann (zumindest laut Normanforderungen) keine Schallleistung der Genauigkeitsklassen 1 & 2 ermittelt werden. Da aber die Ergebnisse nun zusätzlich mittels Referenzmikrofon korrigiert werden und mit denen aus Klagenfurt gut korrelieren⁸, sind sie durchaus als richtig und genau zu betrachten. Zumal alle anderen Erfordernisse aus [2] weitestgehend erfüllt sind.

⁸siehe dazu die Ausführungen in 5.1

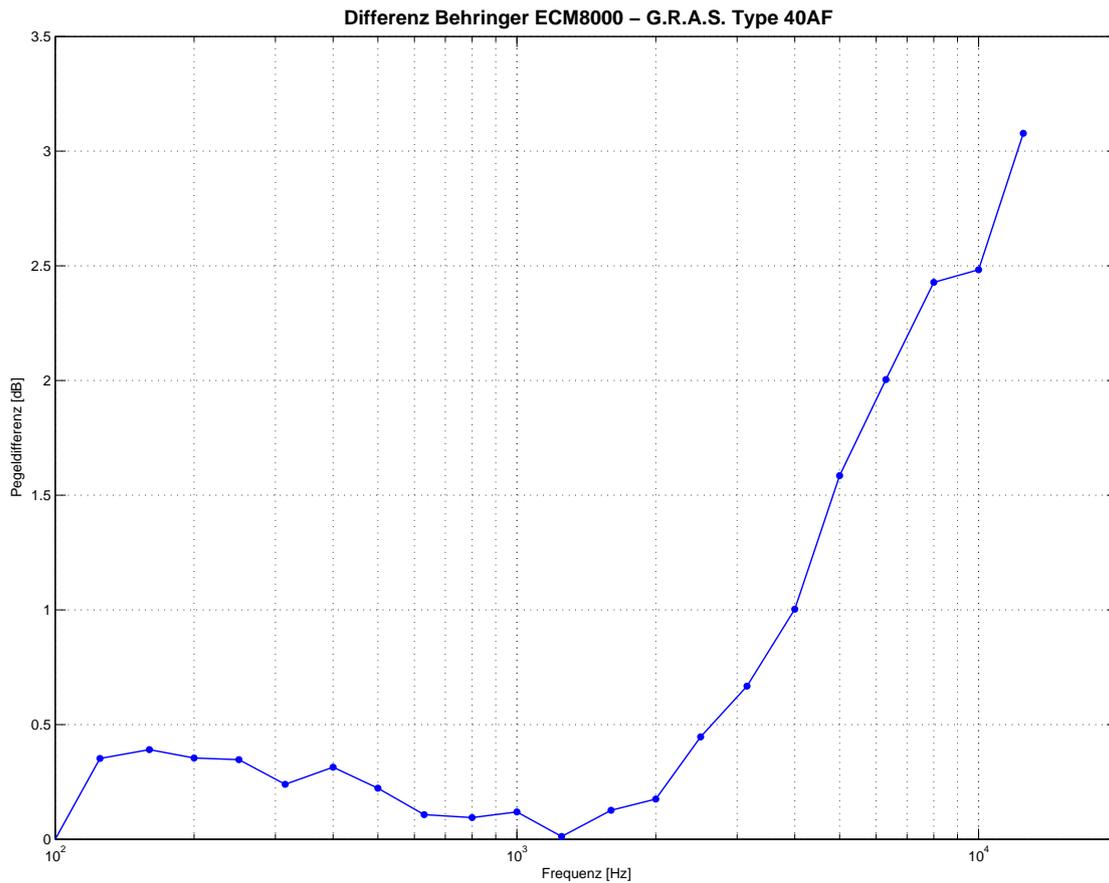


Abbildung 3.7.: Korrekturvektor $C_{Behringer}$ als Differenz des gemessenen Frequenzganges der Mikrofone *Behringer ECM8000* und *G.R.A.S. TYPE 40AF*

camda_plotter.m Dieses Script erstellt aus den berechneten Daten der P-Matrix einige illustrierende Diagramme, die wichtige Informationen über das vermessene Objekt enthalten. Eine detaillierte Beschreibung folgt gesondert in 3.4.2.2.

Input: *P-Matrix* (**P**), *Luftdruck* (**B**), *Lufttemperatur* (**T**)

Output: verschiedene Diagramme (siehe 3.4.2.2), Diagramme als *.fig-Dateien

camda_pmatrix_swlcalculator.m Im Grunde besteht dieses Script aus einem einfachen Abfragedialog zum Laden einer vorhandenen Auswertung, die in *.mat-Dateien abgespeichert sind. Die Berechnung des Schalleistungspegels ist ident mit der des oben beschriebenen Scripts `camda_swlcalculator.m`.

Input: *P-Matrix* (**P**), *Luftdruck* (**B**), *Lufttemperatur* (**T**) (aus *.mat-Datei)

Output: *Unbewertete Terzschalleistungspegel* (**LW**), *Abewertete Terzschalleistungspegel* (**LWA**), *Unbewerteter Gesamtschalleistungspegel* (**L_W**), *Abewerteter Gesamtschalleistungspegel* (**L_W_A**)

3.4.2.2. Visualisierung der Auswertung

Am Ende einer kompletten Auswertung erhält man als Ausgabe den Schalleistungspegel des vermessenen Objekts (durch `camda_swlcalculator.m`), sowie einige dazugehörige beschreibende Diagramme bzw. Plots (z.B. die Abbildungen in Kapitel 4). Das den Diagrammen bzw. Plots zu Grunde liegende Script `plotter_camda.m` kann bei vorhandener P-Matrix auch direkt aufgerufen werden. Ansonsten wird es bei der kompletten Auswertung von `CAMDA_Analyser.m` aufgerufen. Es stellt folgende Grafiken dar: Die in Tab. 3.3

Diagrammtyp	Größe	Räumliche Position	Frequenzen
Polardiagramm	dB SPL	Horizontalebene, 0°	250 – 8000Hz in Oktaven
Polardiagramm	dB SPL	Vertikalebene, 0°/180°	250 – 8000Hz in Oktaven
Polardiagramm	dB SPL	Vertikalebene, 20°/200°	250 – 8000Hz in Oktaven
Polardiagramm	dB SPL	Vertikalebene, 40°/220°	250 – 8000Hz in Oktaven
Polardiagramm	dB SPL	Vertikalebene, 60°/240°	250 – 8000Hz in Oktaven
Polardiagramm	dB SPL	Vertikalebene, 80°/260°	250 – 8000Hz in Oktaven
Polardiagramm	dB SPL	Vertikalebene, 100°/280°	250 – 8000Hz in Oktaven
Balkendiagramm	dB SWL	—	25 – 12500Hz in Terzen

Tabelle 3.3.: Erstellte Diagramme des Scripts `camda_plotter.m`

angegebenen Gradwerte sind als „Abstrahlrichtungen“ des Messobjektes zu verstehen, da dieses Script die Umlaufrichtung ändert. D.h. die Gradwerte entsprechen nun nicht mehr den Drehtellerpositionen, wie dies auch in der P-Matrix der Fall ist, sondern den tatsächlichen Richtungen rund um das Gerät herum. Natürlich wird hier keine echte abgestrahlte Richtungsinformation dargestellt sondern lediglich die reinen Schalldruckpegelwerte an

der entsprechenden Mikrofonposition, da über diese nur globale Aussagen über das akustische Verhalten des Geräts getroffen werden können. Über genaue Ursachen und folglich den genauen Ursprung eines bestimmten Verhaltens können keine detaillierten Aussagen gemacht werden (z.B. welches Gewinde oder welcher Bauteil bestimmte Schwingungen verursacht). Für die hier benötigten Auswertungszwecke ist allerdings der allgemeine Begriff „Abstrahlrichtung“ schlüssiger. Verschwiegen werden darf natürlich auch nicht, dass sämtliche Polardiagramme aus den einzelnen gemessenen Schritten zusammengesetzt werden. Insbesondere bei den Vertikaldarstellungen ist das von Bedeutung. Die linke Hälfte (durchgezogene Linie) entspricht der Vorderseite, die rechte Hälfte (punktierter Linie) der Hinterseite. Es liegt also einige Zeit zwischen den um 180° verschobenen Messschritten. Daher kann es zu „Sprüngen“ der Kurven an den Übergangsstellen der beiden kommen. Die in Tab. 3.3 erwähnten Oktavbänder werden unmittelbar aus den von der Auswertung vorliegenden Terzpegelwerten errechnet (Vorgangsweise wird z.B. in [3] beschrieben).

Einige Teile des gesamten MATLAB[®]-Programmcodes der Auswertung mit zusätzlichen Beschreibungen befinden sich in Anhang A.

3.5. Messablauf

Das Prinzip eines Ablaufs einer vollständigen Schalleistungsmessung am IEM ist in Abb. 3.8 als Flussdiagramm dargestellt. Auf die bereits beschriebenen Teile wie z.B. die Software wird hier nicht mehr näher eingegangen. Es werden in den folgenden Abschnitten zusätzlich zur globalen Beschreibung des Messablaufs noch die fehlenden Teile genauer behandelt. Bevor mit einer Schalleistungsmessung begonnen wird, müssen folgende Vorkehrungen getroffen und beachtet werden:

- *Der akustische Mittelpunkt des Messobjekts muss sich möglichst im geometrischen Zentrum des Bogengestells befinden*
D.h. die Distanz zu allen Mikrofonen sollte möglichst gleich sein, um die in 2.2 getroffenen Bedingungen zu erfüllen. Die einzelnen Distanzen der Mikrofone zum akustischen Mittelpunkt sollten notiert werden, da sie später evtl. wieder benötigt werden. Beim nachfolgend verwendeten Gerät „HR1704“ wurde das akustische Zentrum ein wenig unterhalb der Ankupplung des Bechers angenommen.
- *Alle digitalen Geräte in der Messkette müssen synchronisiert werden*
- *Der Vorhang der Messkoje sollte nicht vollständig geschlossen werden*
Der Grund dafür wird in Kap. 5 näher erklärt
- *Der Hintergrundgeräuschpegel sollte so niedrig wie möglich gehalten werden*
Unter normalen Bedingungen und bei Messung von eher lauten Küchengeräten ist die von [2] vorgegebene Differenz von 20dB zwischen Geräuschquellenpegel und

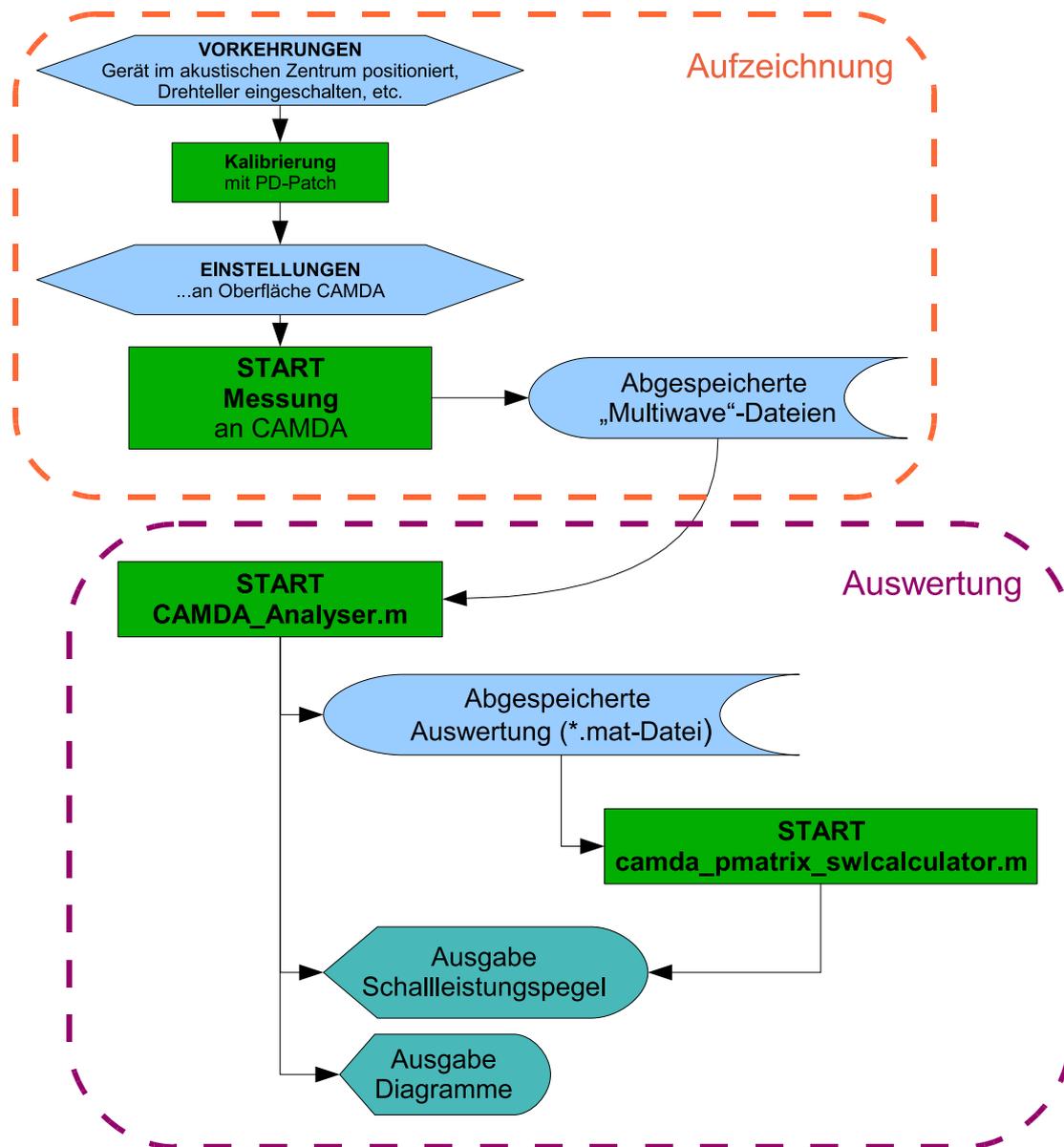


Abbildung 3.8.: Flussdiagramm des gesamten Messablaufs zur Ermittlung der Schalleistung am IEM

Fremdgeräuschpegel an jeder Mikrofonposition leicht zu erfüllen. Dann sind nämlich keine Pegelkorrekturen notwendig.

- *Die Lufttemperatur und der Luftdruck müssen notiert werden, um später bei der Auswertung berücksichtigt zu werden*

3.5.1. Kalibrierung

Zu Beginn ist eine Kalibrierung der Mikrofone unbedingt notwendig, um den als Audiodatei aufgenommenen Werten einen entsprechenden physikalischen Schalldruck (in Pa) bzw. Schalldruckpegel (in dB, bezogen auf $20\mu\text{Pa}$) zuweisen zu können. Vor jeder Messreihe⁹ wird die Kalibrierung der Mikrofone mit Hilfe eines speziellen akustischen Kalibrators (nähere Informationen siehe Typenbeschreibung in Anhang B) durchgeführt. Auf der Softwareseite wird auf den bereits existierenden PD-Patch `App_calibration_patch.pd` zurückgegriffen¹⁰. Dieser ist am Rechner BALI zu starten. Der Patch erkennt den Kanal an dem das lauteste Signal (in diesem Fall das des Kalibrators) anliegt. Vor Beginn der Kalibrierung sollte ein „Reset“ der zu schreibenden Textdatei durchgeführt werden. Auf jedes Mikrofon wird nun nacheinander der Kalibrator für ca. 10 Sekunden gesteckt. Der Patch berechnet den RMS-Mittelwert des anliegenden Signals der letzten 1.5 Sekunden und schreibt anschließend diesen zusammen mit der zugehörigen Kanalnummer als dBFS-Wert¹¹ in eine Textdatei. Man erhält so bei 10 Sekunden Kalibrationsdauer pro Mikrofon ca. 6 dBFS-Werte. Die Textdatei kann nach Beendigung der Kalibrierung abgespeichert werden und wird später bei der Auswertung wieder benötigt. Man sollte allerdings die Datei noch mit einem Texteditor bearbeiten um „Ausreißer“, die beim Auf- und Abstecken vorkommen zu eliminieren! Diese sind leicht durch Differenzen von $> 1\text{dBFS}$ zu den restlichen Werten des Kanals zu erkennen. Vor einer allzu starken Schwankung der Werte wird zwar später bei der Auswertung gewarnt, aber man erspart sich damit ein mögliches nachträgliches Neu-Kalibrieren.

3.5.2. Messung

Der Messvorgang besteht aus der Aufnahme des Geräusches in Schritten von x Grad um das Gerät herum in Audiodateien von jeweils y Sekunden Länge. x und y sind in der grafischen Benutzeroberfläche einzustellen (siehe Abs. 3.4.1.1), wobei für x ein Minimalschritt von 5 Grad möglich ist und die sinnvolle Aufnahmedauer y pro Schritt 10 Sekunden beträgt¹².

⁹Bezieht sich in diesem Fall auf mehrere unmittelbar aufeinander folgende Messungen

¹⁰Autor: Franz Zotter

¹¹dB **F**ull **S**cale - gibt den dB-Wert bezogen auf die maximale digitale Aussteuerung (0dBFS) an; besitzt daher immer negative Werte (z.B. -11.5dBFS)

¹²Die Gradbeschränkung nach unten hin ist vom Drehteller her vorgegeben; die Aufnahmedauer bestimmt laut [2] die Genauigkeit der Mittelung bzw. die gültige untere Grenzfrequenz des aufgenommenen

Dazu ist zunächst an BALI der Shortcut `CAMDA_backend` aufzurufen, mit dem die Aufzeichnungsanwendung aus 3.4.1.2 gestartet wird. Alle weiteren Schritte erfolgen am Rechner SUMATRA. Dort wird ebenfalls ein Shortcut (`CAMDA V0.9 (Alpha)`) aufgerufen, der die Benutzeroberfläche startet. Vor Beginn einer Messung muss noch die Steuereinheit des Drehtellers im Rechner-Rack eingeschaltet werden. Nachdem die in 3.4.1.1 beschriebenen Einstellungen getroffen wurden, muss noch der Drehteller einmalig initialisiert werden¹³. Nach einschalten des Messobjekts kann an CAMDA der Messvorgang gestartet werden. Der weitere Ablauf läuft, sofern keine Besonderheiten einen benutzergesteuerten Abbruch verlangen, vollautomatisch ab. Weitere Messungen sind nach erneuter Initialisierung des Drehtellers jederzeit unmittelbar möglich (eine entsprechende Statusmeldung in CAMDA macht darauf aufmerksam).

3.5.3. Auswertung

Zur Auswertung der aufgezeichneten Daten muss das Script `CAMDA_Analyser.m` in MATLAB aufgerufen werden. Voraussetzung für die korrekte Funktion der Auswertung ist, dass sich alle in den Tabellen 3.1 und 3.2 erwähnten *.m-Dateien im selben Ordner befinden, aus dem `CAMDA_Analyser.m` aufgerufen wird. Jegliche weitere Eingriffe des Benutzers werden per Dialog-/Frageboxen bzw. Datei-/Ordnerauswahl abgefragt. Dazu wird als erstes die *.txt-Datei mit den Kalibrationswerten aus 3.5.1 benötigt. Danach wird der Ordner in dem sich die Audiodaten der Messung befinden abgefragt. Anschließend folgt die Eingabe der (hoffentlich) zuvor notierten Lufttemperatur und des Luftdrucks. Je nach Aufnahmedauer pro Schritt kann das Filtern der Audiodaten einige Minuten in Anspruch nehmen. Abgeschlossen wird die Auswertung mit Abfragen zum Speicherort der *.mat-Datei in der sich die P-Matrix, der Kalibrationsvektor *cfc*, sowie Luftdruck und Lufttemperatur befinden und der Möglichkeit der Betrachtung der beschreibenden Diagramme. Der unbewertete & A-bewertete Schalleistungspegel, sowie die Information zur Korrektur in Bezug auf Lufttemperatur und Luftdruck sind im Kommandofenster in MATLAB[®] einzusehen.

Die so entstandenen Ergebnisse können nun detaillierter untersucht werden und sind mit Hilfe des Scripts `camda_pmatrix_swlcalculator.m` jederzeit schnell wieder verfügbar, da die langwierige Filterung komplett entfällt.

menen Geräusches bei der Auswertung (siehe dazu 3.4.2.1, `camda_filereader.m`)

¹³Die notwendige sequentielle Abfolge ist im CAMDA-Hauptfenster Punkt für Punkt beschrieben

4. Auswertungen

In diesem Kapitel wenden wir uns den Auswertungen der, aus den nach Abschnitt 3.5 durchgeführten, Messungen zu. Das von Hrn. Thomas Sigot (Projektbetreuer seitens Philips DAP, Klagenfurt) vorgeschlagene Testgerät war ein Blender (Standmixer) des Typs „HR1704“. Es handelt sich dabei um ein dem Low-Cost Segment zugeordnetes Produkt der Firma Philips. Entscheidungskriterien für die Auswahl des zu vermessenden Testgeräts waren der erwartete hohe Geräuschpegel, sowie eine mögliche Streuung der Seriengeräte. Insgesamt 4 originalverpackte, willkürlich einer Palette entnommene, Seriengeräte wurden zur Verfügung gestellt. Zur Messung wurden 3 grundlegende Szenarien herangezogen:

1. Mit Aufsatzbecher und 500ml Wasser befüllt
2. Mit Aufsatzbecher im Leerlauf auf der höchsten zur Verfügung stehenden Stufe
3. Ohne Aufsatzbecher

Diese 3 Möglichkeiten begründen sich in den dadurch zu erwartenden deutlich verschiedenen Geräuschspektren. Es soll gezeigt werden, dass grundsätzlich die Möglichkeit der Detektion von unterschiedlich ausgeprägten Schalleistungsspektren am IEM gegeben ist. Die Menge von 500ml (entspricht in etwa einem zur Hälfte gefüllten Becher) wurde nach einigen Versuchen als beste Möglichkeit gewählt. Bei größerer Befüllung (bis zu 1l wären möglich) bestünde die Gefahr, dass aufgrund der Bauweise das Gerät bei längerem Betrieb umkippen könnte. Die Ankopplung des Bechers an die Basisplattform ist nicht unkritisch und darf daher nicht ausser Acht gelassen werden. Schon kleinere Abweichungen in der Ankopplung können erhebliche akustische Veränderungen nach sich ziehen. Da die Befestigung des Bechers nicht sehr straff ist, kann sich unter Umständen auch während der Messung das akustische Verhalten ändern. In einer Untersuchung dazu wurde festgestellt das sich allgemein über einen typischen Messzeitraum von ca. 10 Minuten das Verhalten eines „HR1704“ im kleineren Rahmen verändert. Der Gesamtschalleistungspegel kann um ca. 1dB (einzelne Terzbänder auch deutlich mehr) variieren und die Höhe der Grundfrequenz kann sich ebenfalls bis zu 3 Prozent verändern. Es ist daher wichtig diesen Aspekt bei den anschließenden Ausführungen zu beachten, da diese auch die Genauigkeit der Ergebnisse beeinflussen kann. Dennoch kann man im wesentlichen von einer korrekten Schalleistungsmessung ausgehen, da kleinere Variationen der zeitlichen Mittelung zum Opfer fallen.

4.1. Analyse von 4 „HR1704“

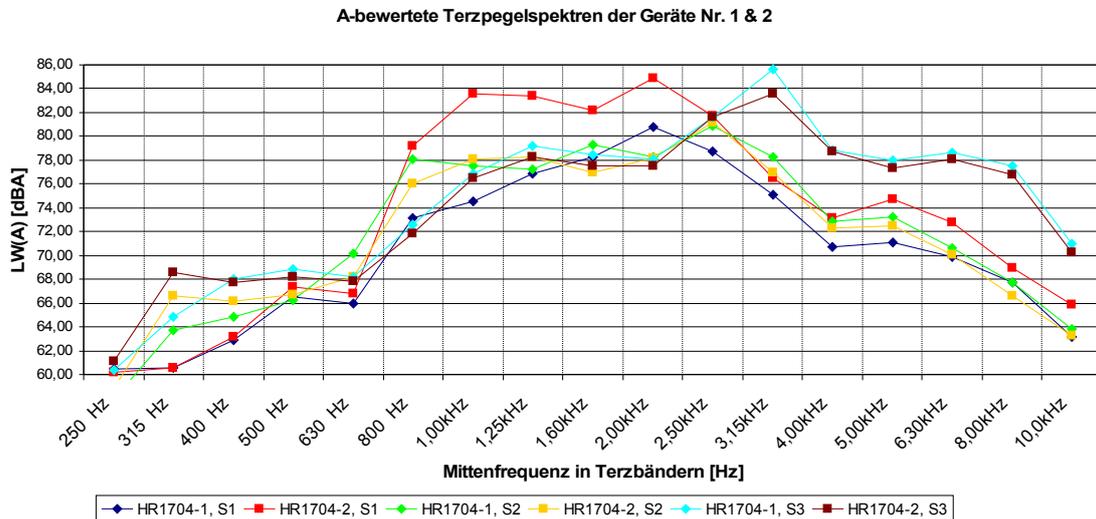


Abbildung 4.1.: A-bewertetes Terzschalleistungsspektrum $L_{w(A)}$ der **Messung der Geräte Nr. 1 und 2 am IEM**

Gerät	Szenario 1		Szenario 2		Szenario 3	
	L_w [dB]	$L_{w(A)}$ [dB(A)]	L_w [dB]	$L_{w(A)}$ [dB(A)]	L_w [dB]	$L_{w(A)}$ [dB(A)]
HR1704 Nr.1	86.0	86.5	87.4	87.8	90.0	90.4
HR1704 Nr.2	90.6	91.1	87.1	87.3	89.2	89.5
HR1704 Nr.3	86.1	86.5	87.8	87.5	—	—
HR1704 Nr.4	86.4	86.8	90.2	89.8	—	—

Tabelle 4.1.: Unbewertete (L_w) und A-bewertete ($L_{w(A)}$) Gesamtschalleistungspegel aller im Zuge dieser Projektarbeit vermessenen Geräte und Szenarien im Überblick

Die Auswertung der Messungen erfolgte wie in 3.4.2 beschrieben. Es werden für die Polardiagramme (wie in 3.4.2.2 bereits erwähnt) jeweils 3 Terzbänder zu einem Oktavband zusammengefasst um den Überblick zu bewahren. Sowohl bei den Horizontal-, als auch bei den Vertikalplots sind die gemessenen Schalldruckpegelwerte für das jeweilige Oktavband zu sehen. Man kann somit ansatzweise auf das Abstrahlverhalten schließen. Die in den nachfolgenden Abschnitten diskutierten Ergebnisse beruhen auf den Messungen vom 25.7.2006. Dabei wurden alle 4 Geräte mit und ohne Wasser vermessen. Um eine Verwechslung der Einzelteile zu vermeiden wurden sowohl die Aufsatzbecher und

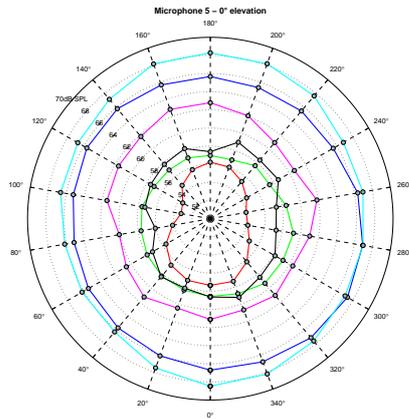
deren Deckel, als auch die Basisplattformen durchnummeriert. Am 1.9.2006 wurde zusätzlich eine Messung ohne Aufsatzbecher an den Geräten Nr. 1 und Nr. 2 durchgeführt. Abb. 4.1 zeigt die Ergebnisse der Messungen der Geräte Nr. 1 und 2 in Terzbändern als Überblick. Jede einzelne Messung wird in den folgenden Abschnitten jeweils kurz analysiert und die Ausführungen mit Diagrammen illustriert. In Tab. 4.1 sind alle gemessenen A-bewerteten und unbewerteten *Gesamtschallleistungspegel* im Vergleich zu finden. Im Zuge der Einzelbeschreibungen wird darauf Bezug genommen.

4.1.1. HR1704 Nr.1

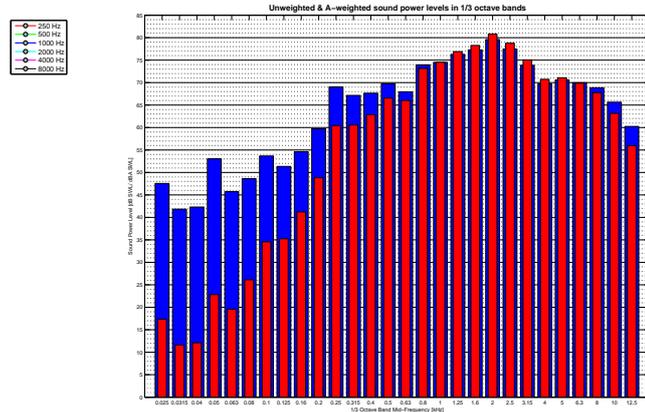
Als wichtiges akustisches Merkmal stechen in Abb. 4.2(a) die im jeweiligen Oktavband in alle Richtungen nahezu gleich starken Schalldruckpegel hervor. Dies bestätigt gleich als allererstes die in Kap. 3.3 aufgestellte Vermutung, dass es sich bei kleinen Küchengeräten um Kugelstrahler niedriger Ordnung handelt. Die Vertikaldarstellungen 4.2(c) und 4.2(d) bekräftigen dies weitgehend. Einem Strahler 1. Ordnung (Dipol) entspräche noch am ehesten das 250Hz-Oktavband. Ansonsten kann man von einer Abstrahlung nahe der 0. Ordnung ausgehen. Wie aus dem allgemeinen subjektiven Höreindruck der Testgeräte im Vorfeld schon zu erahnen war, dominieren vor allem die Oktavbänder mit Mittenfrequenzen von 1kHz und 2kHz das Geräuschktrum. Im in Terzen aufgelösten Schalleistungsspektrum (Abb. 4.2(b)) tritt diese Tatsache noch deutlicher in Erscheinung. Ebenfalls erkennbar ist hier, dass Frequenzanteile unter 250Hz bereits eine Differenz von mehr als 10dB zu den höheren Frequenzbändern aufweisen. Durch die A-Bewertung kommt dieser Aspekt noch schwerwiegender zum Tragen, da sie annähernd die Frequenzabhängigkeit der menschlichen Geräuschempfindung nachbildet. Daher beeinflussen die tieferen Frequenzen den Gesamtschallleistungspegel nur marginal. Das in diesem Teil des Frequenzspektrums einzige nennenswerte Terzband ist das 250Hz-Band. Es beinhaltet die Grundfrequenz des Motorgeräusches. Dies wurde gesondert durch eine zusätzlich durchgeführte FFT-Analyse einer Aufnahme festgestellt. Für dieses Szenario liegt diese Frequenz bei ca. 270Hz und variiert abhängig von der tatsächlichen Drehzahl. Dieser Wert gilt innerhalb gewisser Schwankungstoleranzen auch für die anderen vermessenen Geräte.

Bei den Messungen ohne Wasser (Szenario 2) steht der Vergleich zur Messung mit Wasser (Szenario 1) im Vordergrund. In Abb. 4.3(a) und Abb. 4.3(b) ist zu erkennen das bei diesem Szenario tiefere Frequenzbänder noch weniger Leistung beinhalten als mittlere und hohe Bänder. Die höhere Drehzahl des Motors, durch fehlen einer Gegenkraft dürfte die Ursache sein. Weiters auffällig ist, dass bei den Vertikaldarstellungen 4.3(c) und 4.3(d) das 2kHz-Oktavband nach oben hin weniger stark ausgeprägt ist, als bei den Abbildungen 4.2(c) und 4.2(d). Der Grund hierfür liegt vermutlich im besonderen Abstrahlverhalten des Bechers in Verbindung mit Wasser als Masselement. Die weiter oben erwähnte Grundfrequenz des Motors ist mit diesem Szenario bei ca. 320Hz zu finden. Sie ergibt sich unmittelbar aus der höheren Drehzahl im Leerlauf. Auch hier gilt

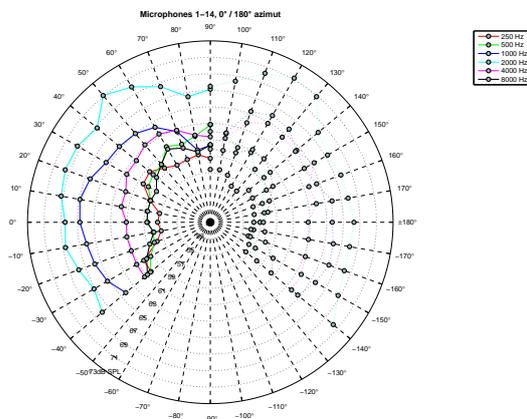
4. Auswertungen



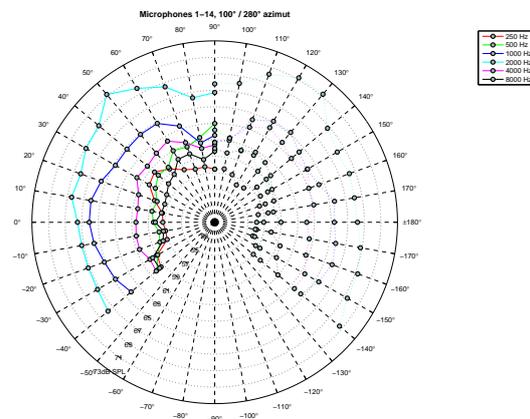
(a) Horizontalschnitt bei 0 Grad Elevation



(b) L_w (blau) & $L_{w(A)}$ (rot)



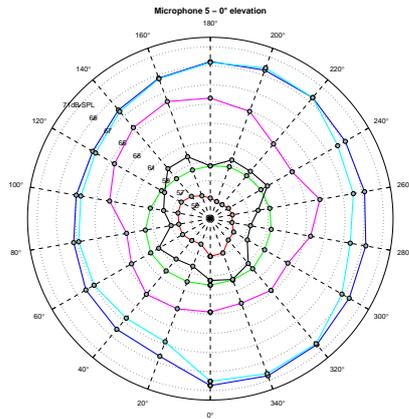
(c) Vertikalschnitt bei 0/180 Grad Azimut



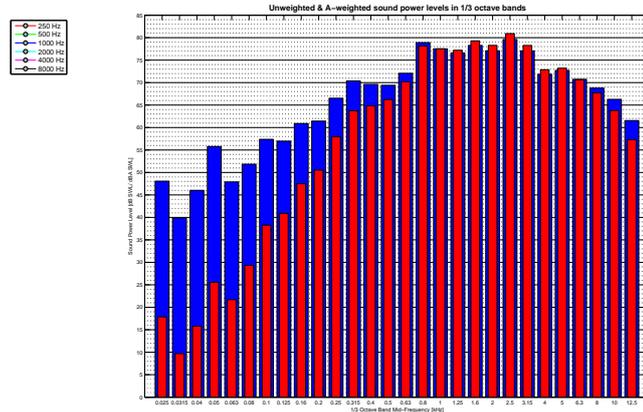
(d) Vertikalschnitt bei 100/280 Grad Azimut

Abbildung 4.2.: Diagramme der Messung von HR1704-1, Szenario 1

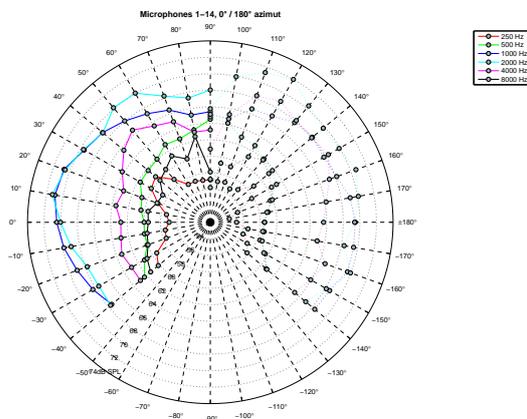
4. Auswertungen



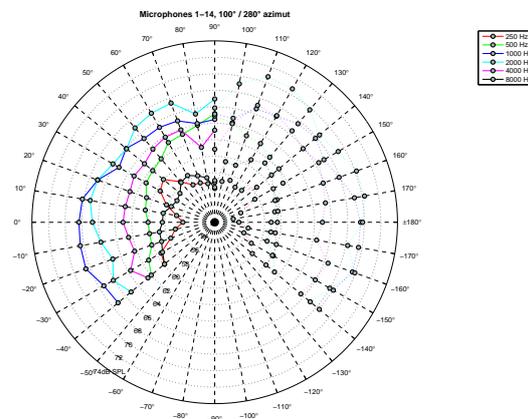
(a) Horizontalschnitt bei 0 Grad Elevation



(b) L_w (blau) & $L_{w(A)}$ (rot)



(c) Vertikalschnitt bei 0/180 Grad Azimut



(d) Vertikalschnitt bei 100/280 Grad Azimut

Abbildung 4.3.: Diagramme der Messung von HR1704-1, Szenario 2

wieder die, im vorherigen Absatz erwähnte, eingeschränkte Gültigkeit für alle weiteren vermessenen Geräte.

Wenn man nun schlussendlich die Gesamtschalleistungspegel der Szenarien 1 und 2 für das Gerät Nr. 1 betrachtet, geht daraus hervor, dass das Gerät im Leerlauf um etwas mehr als 1dB mehr Schalleistung abgibt, als mit Wasser befüllt. Dies erscheint durch die höhere Drehzahl, sowie eine gewisse Dämpfung durch das Wasser zunächst plausibel. Dass sich diese Schlussfolgerung leider nicht auf alle vermessenen Geräte anwenden lässt, zeigt unter anderem das in 4.1.2 ausgewertete Gerät Nr. 2.

Die Messung ohne Aufsatzbecher wird in 4.1.5 gesondert diskutiert.

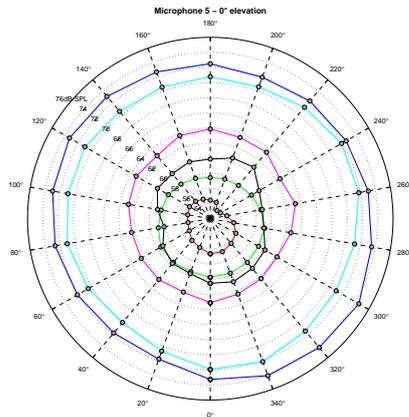
4.1.2. HR1704 Nr.2

Die Darstellungen des Gerätes Nr. 2 im Szenario 1 in Abb. 4.4 ähneln grundsätzlich denen des Gerätes Nr. 1 (siehe Abb. 4.2). Bemerkenswert sind aber die großen Pegelunterschiede in den einzelnen Bändern. So differiert das bedeutende 2kHz-Oktavband¹ an manchen Abstrahlrichtungen um mehr als 6dB, was sich natürlich in Summe auch auf den Gesamtschalleistungspegel beträchtlich auswirkt. Hier beträgt die Differenz zum Gerät Nr. 1 nahezu 4dB (siehe Tab. 4.1). Bei genauerer Betrachtung stellt sich im Vergleich mit den anderen Geräten der Eindruck ein, dass es sich bei diesem Gerät im Szenario 1 um eine Art „Ausreißer“ handelt. Eine fehlerhafte Messung kann weitestgehend ausgeschlossen werden, da die Messung des Szenario 2 desselben Gerätes (siehe Auswertung nächster Absatz) unmittelbar anschließend erfolgte. Ein etwaiger systematischer Kalibrierungsfehler hätte sich ansonsten auch auf diese auswirken müssen, was aber offensichtlich nicht der Fall war, da die Messwerte denen der anderen Geräte im selben Szenario sehr ähneln. Eine gravierende Veränderung des akustischen Verhaltens während des Messvorganges kann, aufgrund der sehr guten Symmetrie der beiden Hälften der Vertikaldarstellungen, ebenfalls ausgeschlossen werden. Als mögliche Ursache für den deutlich höheren Gesamtschalleistungspegel kann eine besondere Form der Resonanz im befüllten Zustand in Betracht gezogen werden. Diese könnte trotz gezielt gut erfolgter Ankopplung des Bechers durch eine etwas losere Mechanik des Geräts ausgelöst worden sein.

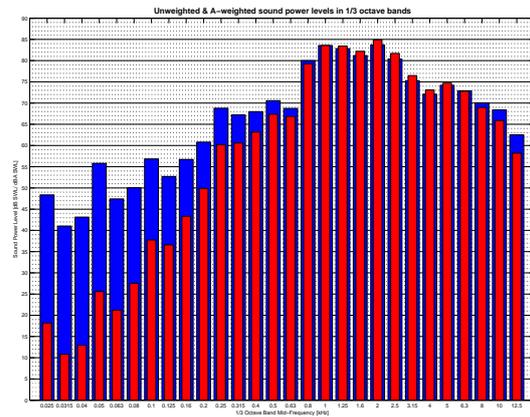
Erstaunlich erscheint im Vergleich der geringe Gesamtschalleistungspegel des Gerätes Nr. 2 im Szenario 2. Nach den Ergebnissen des Gerätes Nr. 1 zu schließen, wäre logischerweise im Leerlauf ein höherer Gesamtschalleistungspegel zu erwarten gewesen, als mit Wasser befüllt. Dies ist aber offensichtlich nicht der Fall. Sollte die, im Absatz zuvor erwähnte, Möglichkeit eines Ausreißers zutreffen, würde sich der Gesamtschalleistungspegel recht gut in das allgemeine Bild in Tab. 4.1 einfügen. Die weiteren Auffälligkeiten in diesem Szenario beschränken sich auf den für den Leerlauf etwas unregelmäßigen Verlauf

¹Auf eine größere psychoakustische Bedeutung lässt schon alleine die Tatsache schließen, dass im Frequenzbereich von ca. 1-4kHz das menschliche Gehör aufgrund dessen Anatomie am empfindlichsten ist

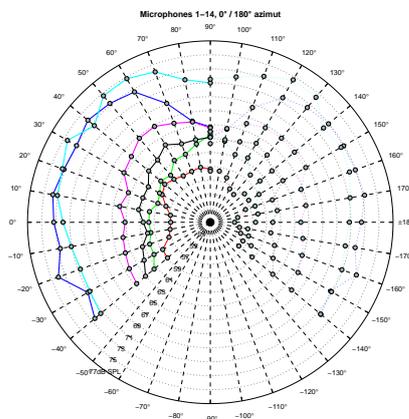
4. Auswertungen



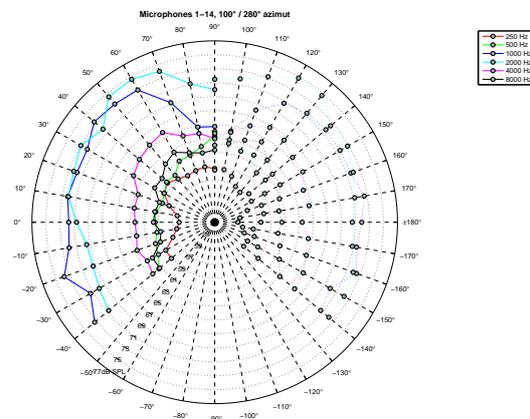
(a) Horizontalschnitt bei 0 Grad Elevation



(b) L_w (blau) & $L_{w(A)}$ (rot)



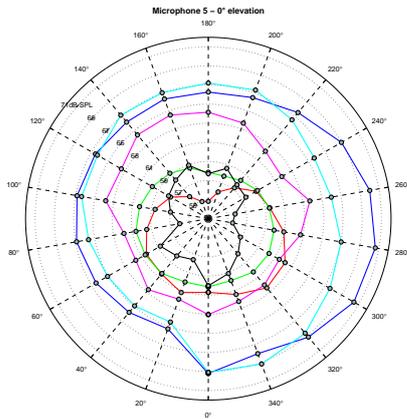
(c) Vertikalschnitt bei 0/180 Grad Azimut



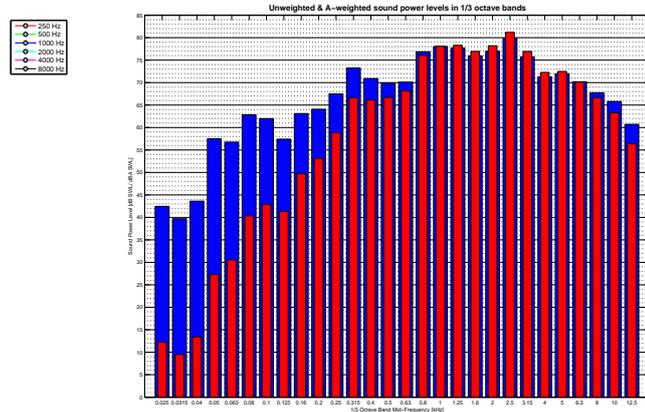
(d) Vertikalschnitt bei 100/280 Grad Azimut

Abbildung 4.4.: Diagramme der Messung von HR1704-2, Szenario 1

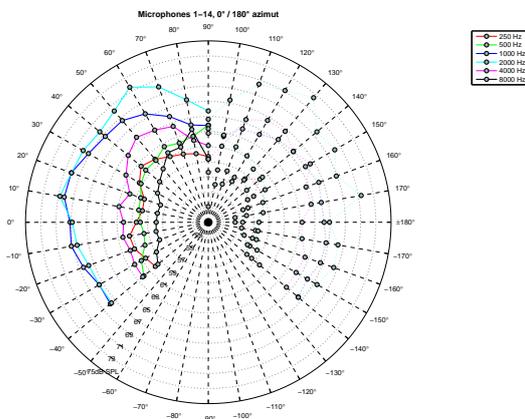
4. Auswertungen



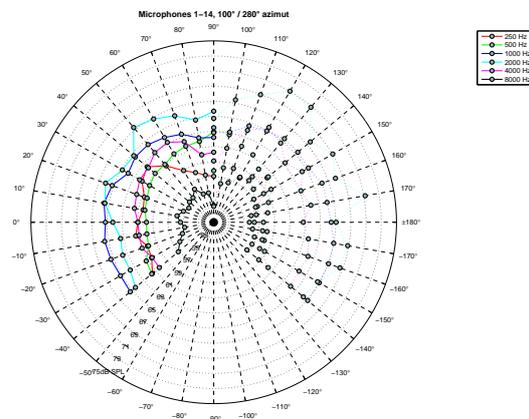
(a) Horizontalschnitt bei 0 Grad Elevation



(b) L_w (blau) & $L_{w(A)}$ (rot)



(c) Vertikalschnitt bei 0/180 Grad Azimut



(d) Vertikalschnitt bei 100/280 Grad Azimut

Abbildung 4.5.: Diagramme der Messung von HR1704-2, Szenario 2

des Horizontalschnitts (siehe Abb. 4.5(a)) und die leichte Asymmetrie der Vertikaldarstellungen (siehe Abb. 4.5(c) und 4.5(d)). Der doch recht heftige Einbruch der Terzbänder unterhalb von 800Hz in Abb. 4.5(b) ist ähnlich dem des Szenario 1, fällt jedoch etwas weniger stark aus (vgl. Abb. 4.4(b)). Bei genauerer Betrachtung trifft das auf nahezu alle Schalleistungsspektren zu, nur, dass diese Tatsache bei diesem Gerät deutlicher zu Tage tritt.

Für die Messung ohne Aufsatzbecher wird wiederum auf 4.1.5 verwiesen.

4.1.3. HR1704 Nr.3

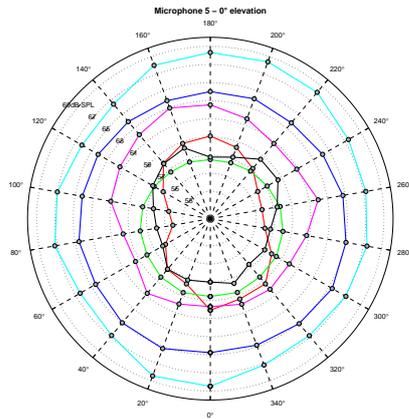
Aus den Diagrammen in Abb. 4.6 kann man dem Gerät Nr. 3 für das Szenario 1 **im großen und ganzen** eine starke Ähnlichkeit zum Gerät Nr. 1 bescheinigen. Auch der Blick auf den Gesamtschalleistungspegel in Tab. 4.1 bestätigt dies. Sowohl die Form der mutmaßlichen Abstrahlung, als auch das gemessene Schalleistungsspektrum kann man somit als „typisch“ für dieses Gerät bezeichnen. Bei näherer Betrachtung stechen bei diesem Gerät jedoch einige nicht unmittelbar offensichtliche Aspekte ins Auge. Im Vergleich zu den Geräten Nr. 1 und 2 scheinen hier die tiefen Frequenzen etwas dominanter zu sein. Vor allem das 250Hz-Terzband des Schalleistungsspektrums, das die in 4.1.1 beschriebene Grundfrequenz des Motors für dieses Szenario beinhaltet, scheint bei diesem Gerät etwas stärker abgestrahlt worden zu sein (siehe Abb. 4.6(b)). Die Differenz in besagtem Terzband zu den Geräten Nr. 1 und 2 beträgt ca. 3dB.

Wesentlich eindeutiger ist die Differenz im 315Hz-Terzband in Szenario 2 (siehe Abb. 4.7). Selbst nach der A-Bewertung (die immerhin einen Abzug von 6.6dB für dieses Terzband vorsieht!) beträgt der Unterschied z.B. zum Gerät Nr. 2 beachtliche 7dB(A). Das erklärt im Grunde auch die Differenz von 0.7dB (L_w) bzw. 0.2dB ($L_{w(A)}$) zum Gerät Nr. 2, bei dem die tieferen Frequenzen eher schwach ausgeprägt sind, da ab einem solchen Niveau auch tiefe Frequenzbänder einen wesentlichen Beitrag zum Gesamtschalleistungspegel leisten. Die höheren Frequenzbänder weisen maximale Differenzen von 3dB auf. Folge dessen kann man bei diesem Gerät generell eine Tendenz zur ausgeprägteren Übertragung der Motorgrundfrequenz feststellen, während der höherfrequente Bereich keine signifikanten Unterschiede zu den anderen gemessenen Geräten aufweist.

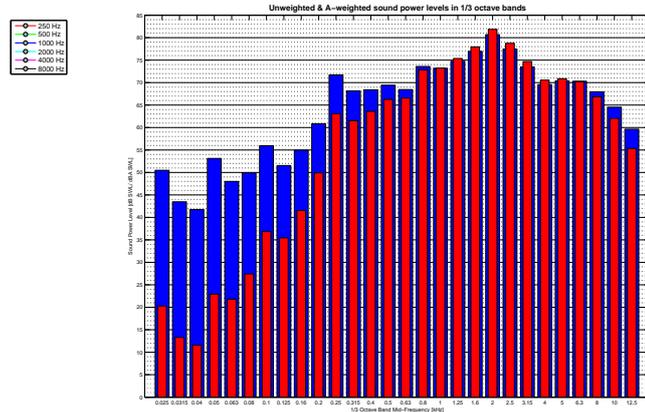
4.1.4. HR1704 Nr.4

Im Unterschied zu den Geräten Nr. 1, 2 und 3 ist beim Gerät Nr. 4 zu berücksichtigen, dass es schon ca. 2 Monate länger als Testgerät bzw. Messobjekt im Einsatz war. Eine größere Anzahl an Betriebsstunden kann sich natürlich unter Umständen auch auf das akustische Verhalten auswirken. Wie aber Vergleich zu den Auswertungen der anderen Geräte zu erkennen ist, spielt diese Tatsache bei dem vorliegenden Gerätetyp allem Anschein nach eine untergeordnete Rolle.

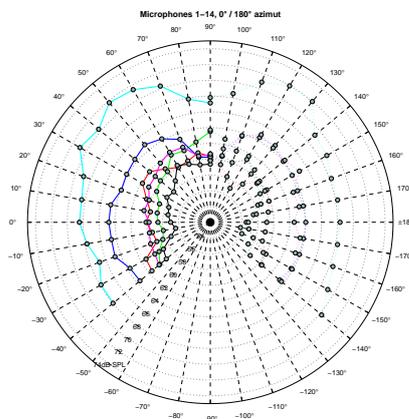
4. Auswertungen



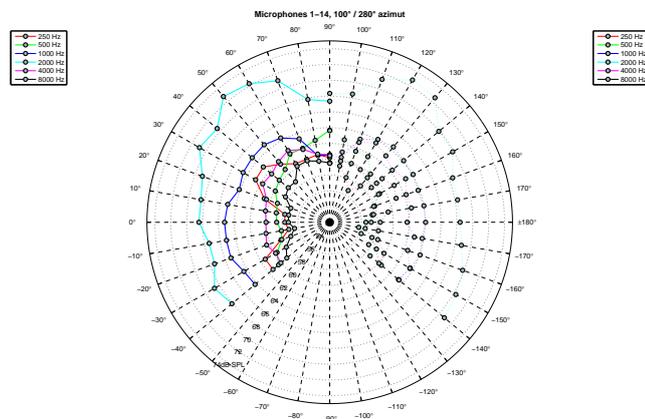
(a) Horizontalschnitt bei 0 Grad Elevation



(b) L_w (blau) & $L_{w(A)}$ (rot)



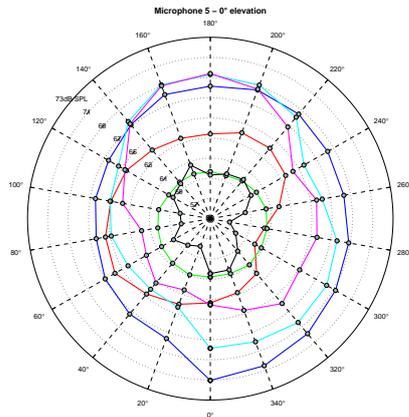
(c) Vertikalschnitt bei 0/180 Grad Azimut



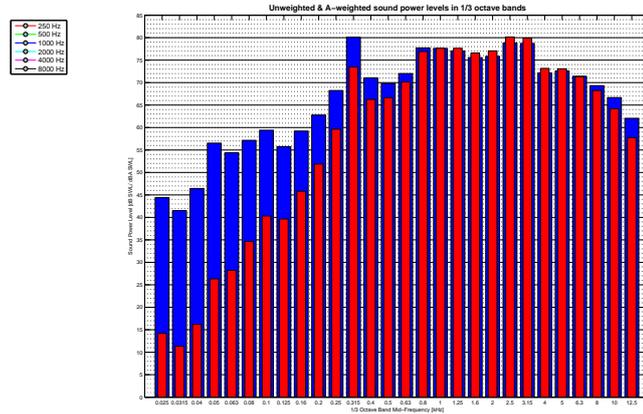
(d) Vertikalschnitt bei 100/280 Grad Azimut

Abbildung 4.6.: Diagramme der Messung von HR1704-3, Szenario 1

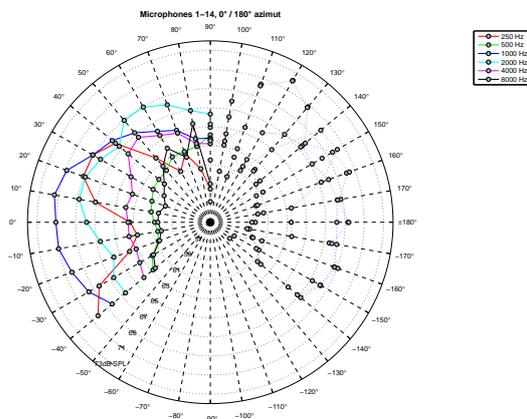
4. Auswertungen



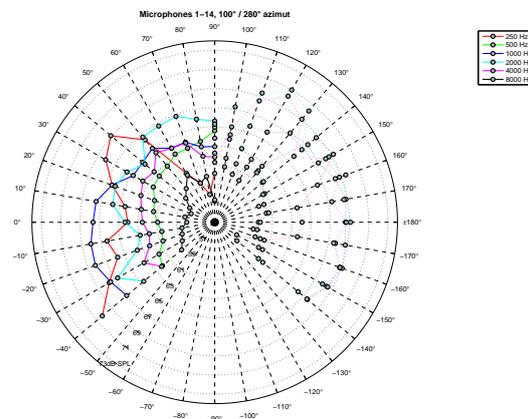
(a) Horizontalschnitt bei 0 Grad Elevation



(b) L_w (blau) & $L_{w(A)}$ (rot)



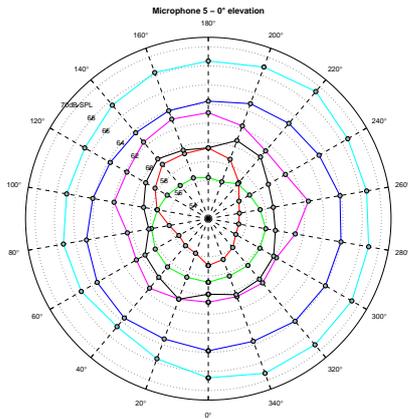
(c) Vertikalschnitt bei 0/180 Grad Azimut



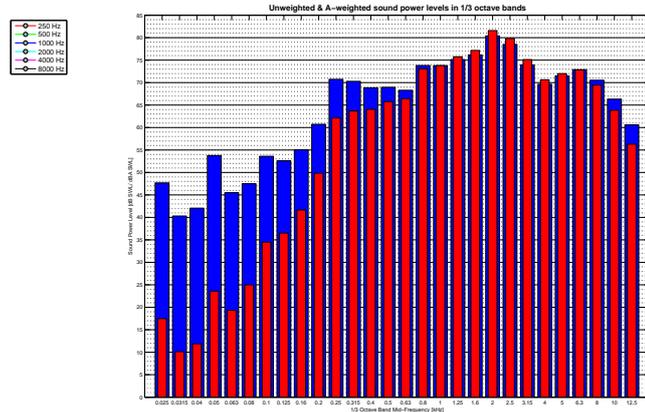
(d) Vertikalschnitt bei 100/280 Grad Azimut

Abbildung 4.7.: Diagramme der Messung von HR1704-3, Szenario 2

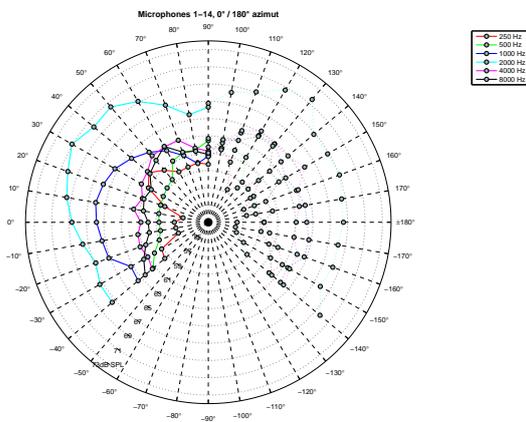
4. Auswertungen



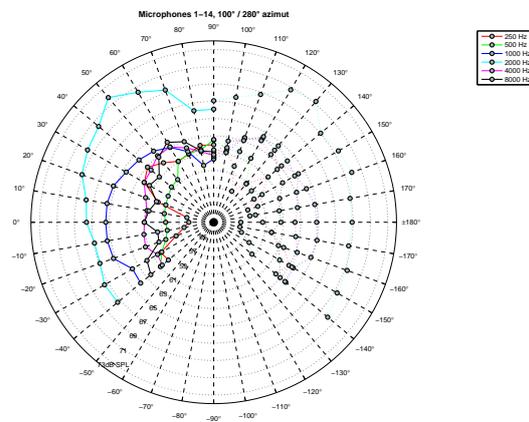
(a) Horizontalschnitt bei 0 Grad Elevation



(b) L_w (blau) & $L_{w(A)}$ (rot)



(c) Vertikalschnitt bei 0/180 Grad Azimut



(d) Vertikalschnitt bei 100/280 Grad Azimut

Abbildung 4.8.: Diagramme der Messung von HR1704-4, Szenario 1

In der Horizontaldarstellung (Abb. 4.8(a)) des Gerätes Nr. 4 im Szenario 1 sind wesentliche Ähnlichkeiten zu den Geräten Nr. 1 und 3 festzustellen². Wie auch in den Vertikaldarstellungen in Abb. 4.8(c) und 4.8(d) zu erkennen ist, ist tendenziell bei diesem Gerät das 8kHz-Oktavband stärker ausgeprägt als bei den anderen Geräten. Im Schallleistungsspektrum ist dies nur beim genauen Hinsehen zu erkennen (siehe Abb. 4.8(b)). Für den Gesamtschallleistungspegel ausschlaggebender dürfte die Tatsache sein, dass das Gerät Nr. 4 im Szenario 1 in den hohen Frequenzbänder (ab 5kHz) mehr Leistung abstrahlt, als die Geräte Nr. 1 und 3. Ein Blick auf die Tabelle 4.1 zeigt daher folgerichtig auch einen Unterschied von 0.3dB(A) des $L_{w(A)}$ von Gerät Nr. 4 zu den Geräten Nr. 1 und 3.

Unverhältnismäßig hoch fällt im Schalleistungsspektrum der Pegel des 315HzTerzbandes aus. Nachdem im Szenario 1 keine grundsätzlich erhöhte Abstrahlung der Motorgrundfrequenz festgestellt werden konnte, kann es sich hierbei nur um eine besondere Form der Resonanz handeln. Dementsprechend hoch fällt im Vergleich auch der Gesamtschallleistungspegel aus, der den der anderen Geräte um ca. 2dB übertrifft. Im Gegensatz zu Gerät Nr. 2 trifft Gerät Nr. 4 aber, obwohl etwas überhöht, trotzdem den generell erkennbaren Trend (Szenario 2 ruft größere Gesamtschallleistungspegel hervor, als Szenario 1). Ob dies auf das tatsächliche Verhalten des Gerätes (z.B. Gehäuse, Becher, Motor etc.) oder einen evtl. Messfehler zurückgeführt werden kann, lässt sich mit den hier zur Verfügung stehenden Mitteln bzw. Analysemethoden eher schwer feststellen. Für diese Art der Analyse gibt es andere, besser geeignete Methoden, die in 6.1.2 angesprochen werden.

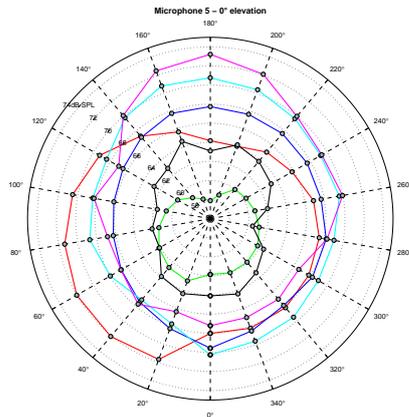
4.1.5. HR1704 Nr.1 & 2 mit Szenario 3

Die Messungen ohne Becher nehmen eine gewisse Sonderstellung ein. Auf Wunsch von Philips DAP Klagenfurt wurde zusätzlich eine Messung der Basisplattform ohne Becher vorgenommen. Das Augenmerk lag dabei primär darauf, den Einfluss des Bechers auszuklammern und daraus eventuelle Rückschlüsse ziehen zu können.

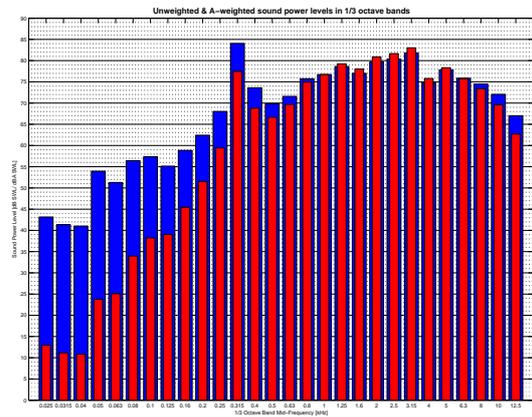
Der in Abb. 4.10 dargestellte Vergleich der Horizontalschnitte der Messung der drei verschiedenen Szenarien des Gerätes Nr. 1 ist sehr aussagekräftig. Eindeutig zu erkennen sind in Abb. 4.10(c) die sehr ausgeglichenen Schallpegel der Oktavbänder in allen Richtungen, mit Ausnahme des 4kHz-Bandes. Das spricht grundsätzlich für die zuvor schon öfters geäußerten Verdachtsmomente in Richtung Aufsatzbecher. Je nach Befüllungsstand beeinflusst der Aufsatzbecher maßgeblich das akustische Verhalten des gesamten Blenders. Bei Gerät Nr. 2 ergeben sich die gravierend verschiedenen Gesamtschallleistungspegel bzw. Schalleistungsspektren mit hoher Wahrscheinlichkeit darauf zurückzuführen. Die deutlich verschiedenen Schalleistungsspektren der 3 Szenarien in Abb. 4.11

²Gerät Nr. 2 wird hier bewusst außen vor gelassen, da es im Vergleich zu den anderen drei Geräten wesentliche Abweichungen aufweist und somit für einen Direktvergleich weniger gut geeignet ist

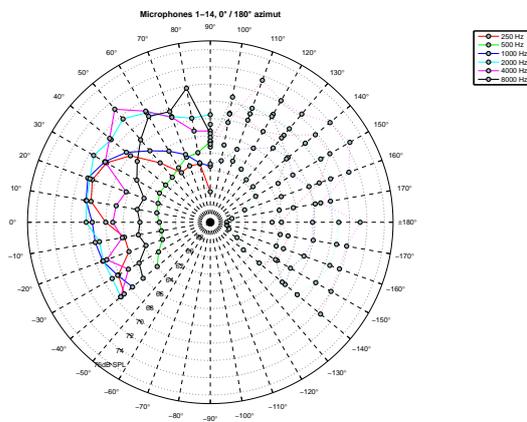
4. Auswertungen



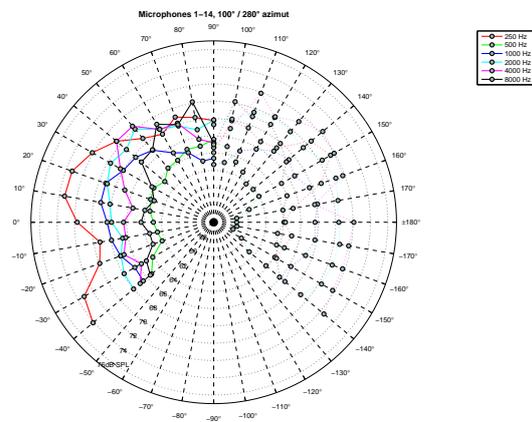
(a) Horizontalschnitt bei 0 Grad Elevation



(b) L_w (blau) & $L_{w(A)}$ (rot)



(c) Vertikalschnitt bei 0/180 Grad Azimut



(d) Vertikalschnitt bei 100/280 Grad Azimut

Abbildung 4.9.: Diagramme der Messung von HR1704-4, Szenario 2

4. Auswertungen

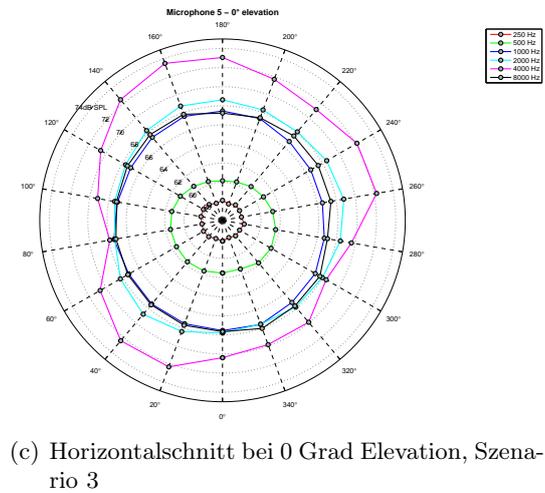
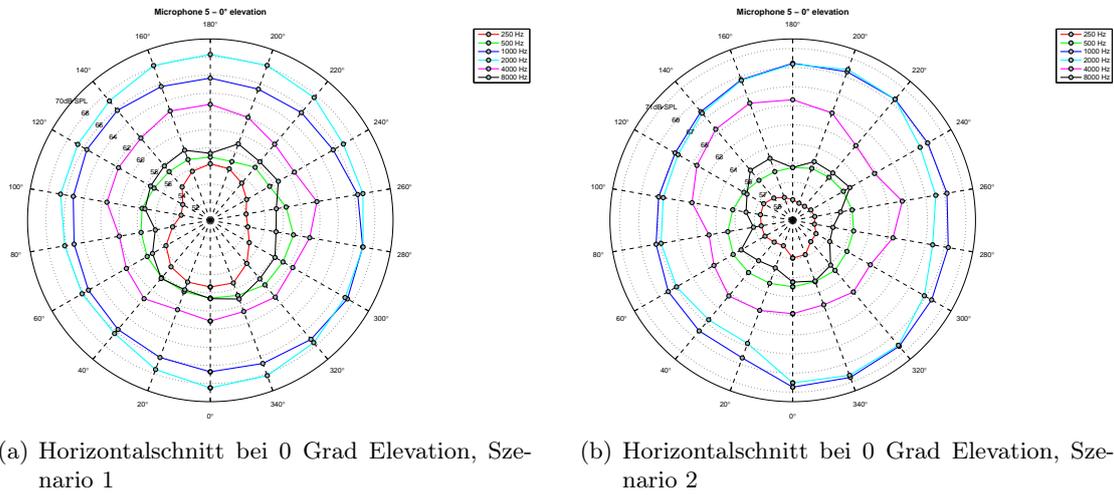
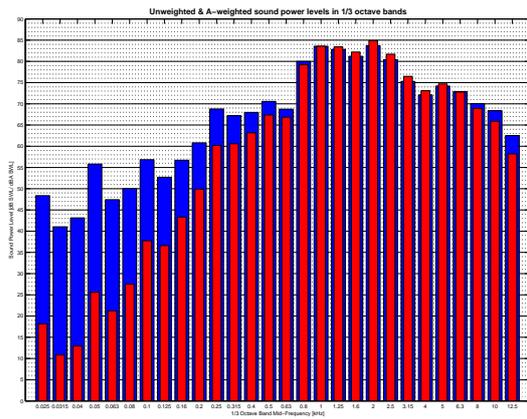


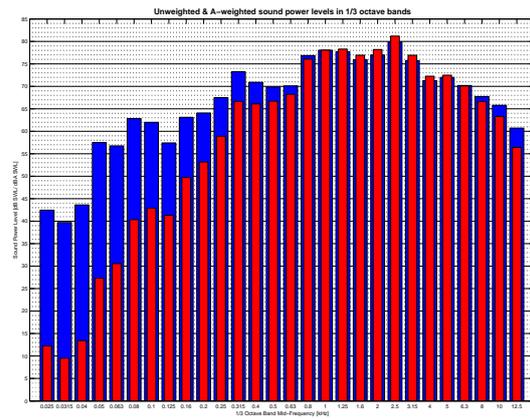
Abbildung 4.10.: Diagramme der Messung von HR1704-1, Szenarien 1 (4.10(a)), 2 (4.10(b)) & 3 (4.10(c)) im Vergleich

4. Auswertungen

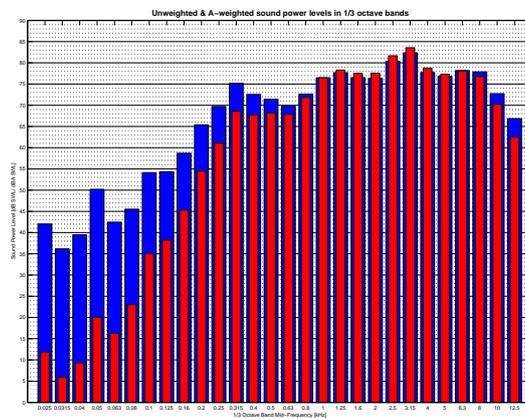
sind ein weiteres klares Indiz dafür. Untermauert wird dies durch die vergleichsweise relativ eng beieinander liegenden Gesamtschalleistungspegelwerte der Geräte Nr. 1 und 2 im Szenario 3 in der Tabelle 4.1. Hier entfällt der Einfluss des Bechers. Zusätzlich ist in der Tab. 4.1 leicht zu erkennen, dass allgemein die Pegelwerte der Geräte Nr. 1, 3 und 4 recht stringent sind. Daher kann man sich durchaus auf die Richtigkeit der Ergebnisse der Messungen der Geräte Nr. 1 und 2 im Szenario 3 stützen und für das Gerät Nr. 2 im Szenario 2 ein Ausnahmeverhalten attestieren.



(a) Schalleistungsspektrum in Terzen, Szenario 1



(b) Schalleistungsspektrum in Terzen, Szenario 2



(c) Schalleistungsspektrum in Terzen, Szenario 3

Abbildung 4.11.: Schalleistungsspektren in Terzbändern der Messung von HR1704-2, Szenarien 1 (4.11(a)), 2 (4.11(b)) & 3 (4.11(c)) im Vergleich

4.2. Zusammenfassung der Auswertungsergebnisse des Blenders „HR1704“

Die Ergebnisse der Messungen deuten auf eine recht konstante Abgabe der Schalleistung des Blenders „HR1704“ hin. Allen 4 vermessenen Geräten ist ein eingeschränkter Frequenzbereich von ca. 250-10000Hz gemeinsam, der je nach Szenario minimal variieren kann. Die am Anfang dieses Kapitels aufgestellten Szenarien erbrachten folgende Reihenfolge in Bezug auf die gemessenen A-bewerteten Gesamtschallleistungspegel (beginnend mit dem größten):

1. Szenario 3 (von 89.5-90.4dB(A))
2. Szenario 2 (von 87.3-89.8dB(A))
3. Szenario 1 (von 86.5-91.1dB(A))

Hiermit bestätigt sich auch sofort die ursprünglich geäußerte Idee mehrerer Szenarien.

Es wurde festgestellt, dass einige Anomalien und Einzelphänomene den durchgehend gleich bleibenden messtechnischen Eindruck trübten. Die meisten dieser Merkwürdigkeiten können mit hoher Wahrscheinlichkeit dem durchaus unberechenbaren Verhalten des Aufsatzbechers zugeschrieben werden. Bei Gerät Nr. 2 ist der Einfluss des Bechers die vorerst einzige logische Ursache der merkwürdigen Messergebnisse in Szenario 2, zumal es ohne Becher (Szenario 3) sogar einen kleineren Gesamtschallleistungspegel als das Gerät Nr. 1 abgibt. Die Möglichkeit eines „Ausreißers“ darf aber ob der recht harmonischen Ergebnisse der anderen Geräte nicht ausgeschlossen werden. Dazu Bedarf dieses Thema aber sicherlich noch einer genaueren weiterführenden Untersuchung mit anderen Analysemitteln (siehe dazu auch die Erläuterungen in 6.1.2).

Die Sichtung der Messergebnisse soll in Zukunft bei eventueller regelmäßiger Durchführung natürlich, wie in der Zusammenfassung am Beginn dieser Arbeit gefordert, möglichst transparent und griffig zu gleich sein. Daher wurde ein Vorschlag eines möglichen standardisierten Messprotokolls erarbeitet, der, wie auch die gesamte Schalleistungsmessung, konsequenterweise an [2] angelehnt ist. Ein Beispiel eines solchen standardisierten Messprotokolls befindet sich in Anhang B.3.

Die vorliegenden Auswertungen haben bereits einen guten Überblick über die Genauigkeit der Aussagen gegeben. Nähere Beschreibungen zur Messgenauigkeit und Konformität zu den ISO-Normen befinden sich in Kapitel 5.

5. Vergleich der Messumgebungen

Ein noch offener und wichtiger Aspekt ist bislang die Richtigkeit und Gültigkeit der vorgelegten Auswertungen bzw. Messergebnisse. Daher widmet sich dieses Kapitel einerseits den Vergleichen der Messungen der Messkoje am IEM in Graz und des kleinen Messraumes bei Philips in Klagenfurt. Andererseits werden die zusätzlichen, zur Überprüfung der Messkoje in Graz, durchgeführten Analysen, sowie die daraus resultierend getroffenen Maßnahmen besprochen.

5.1. Vergleich Der Messergebnisse IEM und Philips

Wie schon in 2.1.1 erläutert kommt in Klagenfurt das Hallraumverfahren in angenäherter Form zum Einsatz. Dabei kommt ein Messsystem der Firma *Larson Davis* zum Einsatz. Es misst die Schalleistung mit 5 Mikrofonen, die auf einer angedachten Halbkugel möglichst zufällig angeordnet sind. Diese Anordnung wurde bei Instandsetzung von Philips-internen Akustikern auf eine möglichst gute Schalleistungsmessung nach [1] optimiert. Daher kann man von den direkten Vergleichen der Messergebnisse aus Graz und Klagenfurt eine gute Korrelation erwarten. Die bereits im vorangegangenen Kapitel 4 besprochenen Ergebnisse werden nachfolgend mit den Vergleichsdaten der in Klagenfurt durchgeführten Messungen verglichen. In Tab. 5.1 ist anzumerken, dass die Anforderung

Gerät	Szenario 1		Szenario 2		Szenario 3	
	Philips	IEM	Philips	IEM	Philips	IEM
HR1704 Nr.1	87.1	86.5	83.9	87.8	—	90.4
HR1704 Nr.2	89.6	91.1	88.6	87.5	—	89.5
HR1704 Nr.3	86.2	86.5	88.0	86.8	—	—
HR1704 Nr.4	88.5	86.8	87.2	89.8	—	—

Tabelle 5.1.: A-bewertete Gesamtschalleistungspegel ($L_{w(A)}$ in dB) aller vermessenen Geräte und Szenarien bei Philips und am IEM im Überblick

einer Messung ohne Becher erst zu einem späteren Zeitpunkt aktuell wurde und deshalb nur am IEM stattfand. Generell ist anzumerken, dass man keine eindeutige Korrelation zwischen den beiden Messplätzen bei den Gesamtschalleistungspegeln erkennen kann. Ausserdem ist bei Gerät Nr. 4 der Vergleich mit Vorsicht zu genießen, da die Messung bei Philips im Februar stattfand und jene am IEM im Juli. Es ist zu beachten, dass bei den

5. Vergleich der Messumgebungen

Betrachtungen nachträglich der Korrekturvektor $C_Behringer$ bei den Ergebnissen der IEM-Messungen mit eingerechnet wurde. In Abb. 5.1 ist dazu beispielhaft ein Vergleich

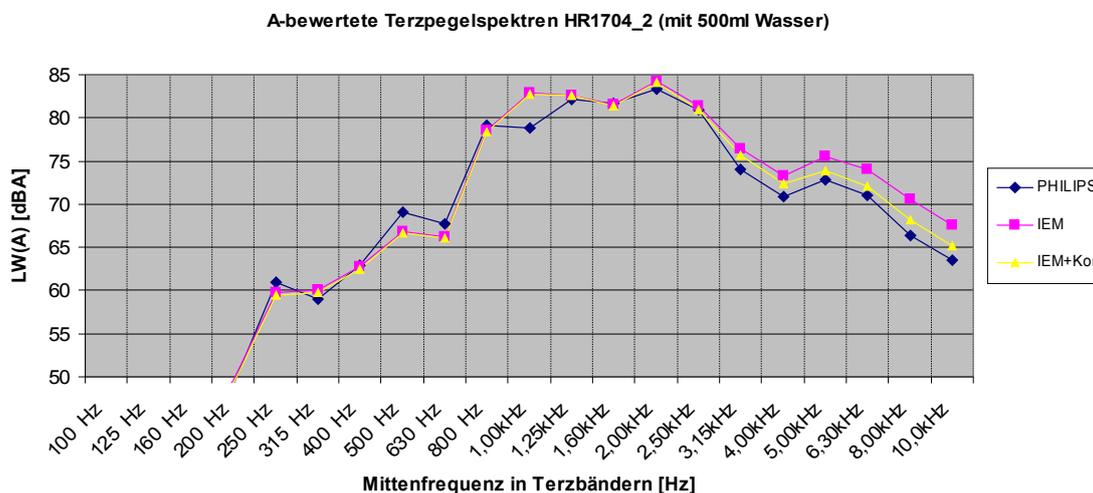


Abbildung 5.1.: HR1704 Nr.2, Szenario 1: Terzschalleistungsspektrum der Messung am IEM *mit* und *ohne* Korrektur und bei Philips

mit Korrektur und *ohne* Korrektur dargestellt. Ursprünglich führte die Sichtung der Direktvergleiche der Messergebnisse aus Graz und Klagenfurt, wie bereits in 3.4.2.1 auf Seite 24 angesprochen, zur näheren Untersuchung des verwendeten Messmikrofons *Behringer ECM8000*. Der Unterschied zwischen der mit $C_Behringer$ korrigierten (IEM+korr) und der unkorrigierten (IEM) Kurve in Abb. 5.1 ist offensichtlich. Des weiteren ist bei höheren Frequenzen die deutlich bessere Übereinstimmung der korrigierten Messung vom IEM und der Messung bei Philips augenscheinlich. Somit erhält die Korrektur eine weitere bedeutende Legitimierung¹ und sollte bei Verwendung des *Behringer ECM8000* in Zukunft zur Korrektur eingesetzt werden.

Die Vergleichsdiagramme der weiteren Geräte² ergaben keine eindeutige Aussage in Bezug auf eine signifikante Über- oder Unterbewertung beider Messräume, was auch durch die Werte in Tab. 5.1 belegbar ist. Das war auch nicht unbedingt zu erwarten. Deshalb wurden die ab 5.2.1 genauer beschriebenen Referenzmessungen am IEM durchgeführt um die Genauigkeit der dort durchgeführten Schalleistungsmessungen zu definieren. Im großen und ganzen sehen sich die Messergebnisse aus Graz und Klagenfurt sehr ähnlich. Um aber herauszufinden ob die Signifikanz der Differenzen zwischen den vermessenen Geräten höher ist, als die zwischen den beiden Messumgebungen, wurde eine

¹neben der bescheinigten Messgenauigkeit des Vergleichsmikrofons (siehe dazu 3.4.2.1)

²auf eine Einzelbeschreibung aller Vergleichsdiagramme aller Geräte wird hier zugunsten einer übersichtlicheren globaleren Beschreibung der Ergebnisse bewusst verzichtet

grobe statistische Varianzanalyse³ durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die mittlere Abweichung der Geräte untereinander größer ist, als diejenige zwischen den beiden Messumgebungen. Dies sagt uns also das eine Variation im Schalleistungsspektrum des Gerätes schwerer wiegt, als eine mögliche Variation der Messumgebung (durch Fehler). Die Anforderung der Detektion von signifikanten Änderungen im Schalleistungsspektrum vermessener Haushaltsgeräte ist somit erfüllt.

Zu den Messungen aus Klagenfurt bleibt noch anzumerken, das trotz der erfolgten Optimierung der Mikrofonanordnung sich bei bestimmten Frequenzen mehr oder weniger starke Stehwellen ausbilden können, die das Ergebnis in einzelnen Terzbändern verzerren können. Weitere Ursachen für Differenzen der Messergebnisse wie z.B. zeitlich Schwankungen, Betriebsdauer und Betriebsstunden, wurden unter anderem schon bei den Auswertungen in Kapitel 4 behandelt.

5.2. Verifikation der Messkoje

Um die Richtigkeit der am IEM durchgeführten Messungen und der daraus getroffenen Aussagen zu **untermauern wurden** die 2 nachfolgend beschriebenen Arten von Referenzmessungen durchgeführt.

5.2.1. Referenzmessung mit tropfenförmigem Speziallautsprecher „Knopper“

Entwurf und Realisation des Lautsprechers „Knopper“ waren Bestandteil einer vorangegangenen Diplomarbeit von Stefan Warum [10]. Der tropfenförmige Lautsprecher wurde dabei in Hinblick auf eine möglichst gerichtete Abstrahlung in die 0° Richtung (also nach vorne) optimiert und verhält sich um diese Achse nahezu rotationssystemmetrisch. Es wurden zur Dokumentation die Impulsantworten des Lautsprechers im Freifeld in Schritten von 10 Grad rund um den Lautsprecher herum gemessen. Ein wichtiges Kriterium für die Verwendung dieses Lautsprechers als Referenz ist dessen starke Bündelung (= Strahler höherer Ordnung) nach vorne hin. Diese Art der Abstrahlung stellt, wie bereits in 3.1 und 3.3 erwähnt, höhere Anforderungen an die Messumgebung. Bei einem positivem Ergebnis bei dieser Messung kann man bei Strahlern niedriger Ordnung, wie z.B. dem HR1740 o.ä., gesichert von einer genauen Schalleistungsmessung ausgehen.

Die Idee bestand nun darin zu überprüfen, inwiefern sich die, nach dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren, *gemessene Schalleistung* von der, aus den aus [10] verfügbaren Impulsantworten, *simulierten Schalleistung* unterscheidet. Dazu wurde der Lautsprecher mit weißem Rauschen angesteuert und in Schritten von 20 Grad vermessen. Die Auswertung wurde nach derselben Prozedur wie in Kap. 4 verwendet, durchgeführt. In Abb.

³da hierbei nur Daten von 3 vermessenen Geräten vorliegen ist die statistische Aussagekraft natürlich etwas geschwächt; nichtsdestotrotz lassen sich aber grundlegende Trends sehr wohl anhand der

5. Vergleich der Messumgebungen

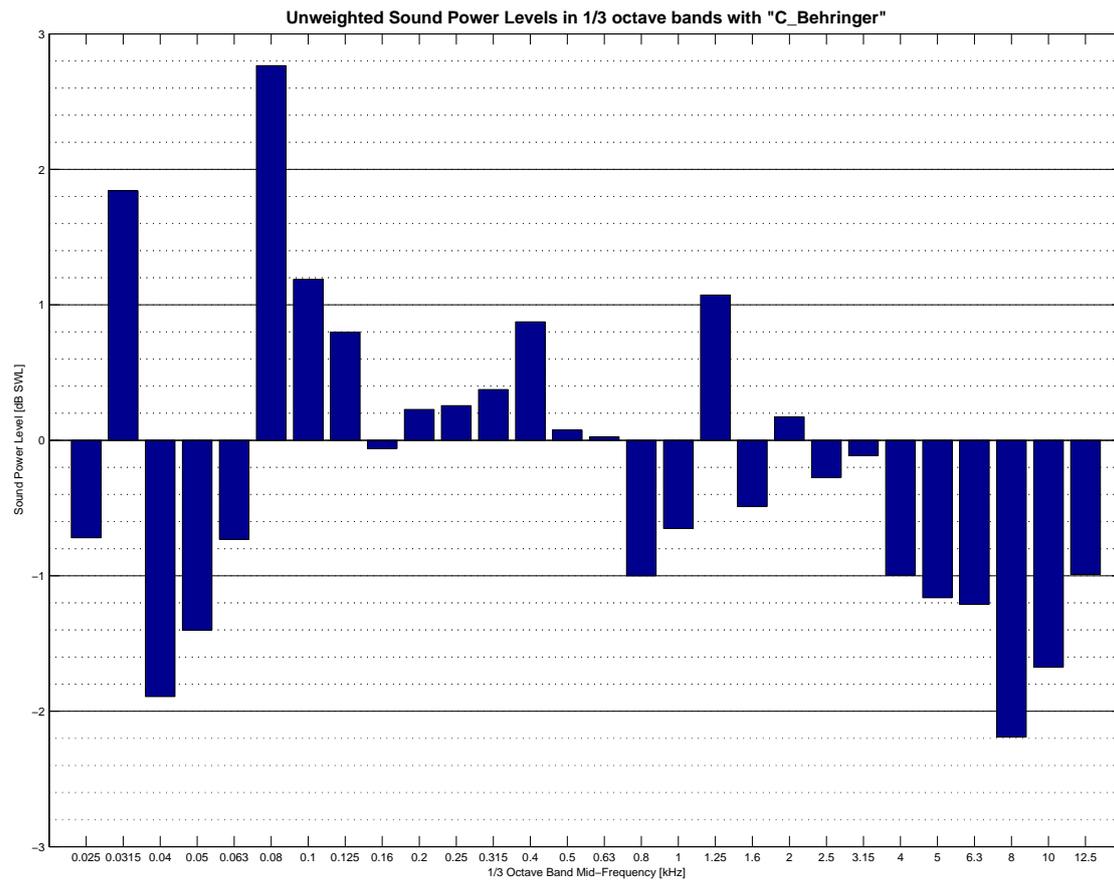


Abbildung 5.2.: Differenz zwischen *simulierten* und *gemessenen* Terzschalleistungspegeln

5.2 sind die Differenzen zwischen den einzelnen Terzbändern des *gemessenen* und *simulierten* Terzschalleistungsspektrums ersichtlich. Dabei ist auch zu erkennen, dass die Abweichungen, bis auf das durch den Lautsprecher am stärksten gebündelte 8kHz-Band, alle Terzbänder von 100Hz bis 12.5kHz innerhalb der von [2] geforderten maximalen Abweichung von 1.5dB bleiben⁴.

5.2.2. Referenzmessung mit „2-Flächen-Verfahren“ nach ISO3745

Zusätzlich zu der in 5.2.1 behandelten Referenzmessung wurde noch eine Qualifikation des Raumes nach dem in [2] als alternatives Verfahren vorgesehenen „2-Flächen-Verfahren“ durchgeführt. Dieses wurde 1975 durch Gerhard Hübner [5] vorgestellt und bietet die Möglichkeit einerseits die Einhaltung des Entfernungsgesetzes zu überprüfen und andererseits eine allenfalls notwendige Berechnung einer Raumkorrektur. Dazu ist zu der bereits bestehenden Hüllfläche S_1 eine zweite geometrisch ähnliche alternative Hüllfläche S_2 aufzustellen, die einen anderen Abstand zur Schallquelle als S_1 besitzt. Dabei dürfen Reflexionen von Raumbegrenzungsflächen und das Nahfeld der Schallquelle nicht außer acht gelassen werden. Um auch hier die Messbedingungen zu verschärfen, kam auch hier der Tropfenlautsprecher als Schallquelle zum Einsatz. Wie in Abb. 5.3 zu sehen, war



Abbildung 5.3.: Messung nach 2-Flächen-Verfahren am IEM

mittleren Abweichung zeigen

⁴[2] schreibt maximal zulässige Abweichungen vom Entfernungsgesetz ($1/r$) vor; für $f < 630 = 1.5\text{dB}$, $800 < f < 5000 = 1.0\text{dB}$ und $f > 6300 = 1.5\text{dB}$

zur Durchführung dieser Messung ein etwas aufwendigerer Umbau des Messaufbaus notwendig. Es wurden 14 Mikrofongalgen am Gestell montiert und darauf die Mikrofone exakt 50cm näher von der ursprünglichen Position hin zum akustischen Mittelpunkt des Lautsprechers gerückt.

In [5] werden 4 grundlegende Raumtypen definiert und für diese 4 zugehörige Korrekturfaktoren, die direkt vom L_w abgezogen werden können, hergeleitet. Typ „C“ wird als „semireverberant room“ (reflexionsarmer Halbraum) bezeichnet und entspricht am ehesten den akustischen Gegebenheiten der Messkoje am IEM. Man erwartet sich für so einen Raumtyp grundsätzlich positive Korrekturwerte, da durch die Halligkeit etwas zu viel gemessen wird. Die Berechnung der Raumkorrektur ergab, dass grundsätzlich keine Raumkorrektur notwendig ist, da der Bereich ab 300Hz recht gut mit dem Entfernungsgesetz übereinstimmt. Ein negativer Ausreißer bei 650Hz trübt dabei allerdings den Eindruck. Dies war auch der Grund für die weiteren Untersuchungen der akustischen Umgebung in 5.3.

5.3. Akustische Optimierungsmaßnahmen

Der im Zuge der Messung in 5.2.2 aufgetretene Ausreißer bei 650Hz wirft neue Fragen auf. Eine mögliche Erklärung ist der Vorhang, der bei Mikrofonposition 5 für 650Hz exakt auf halber Wellenlänge (27cm) entfernt liegt. Denkbar wäre dabei, dass eine ungünstige Reflexion bzw. Stehwelle an dieser Position eine Auslöschung verursacht. Um das zu hinterfragen wurden zusätzlich Untersuchungen in diese Richtung angestellt. Es wurden dabei 4 Möglichkeiten vermessen:

- Vorhang geschlossen
- Vorhang offen
- Vorhang mit Spalt von 27cm offen
- Vorhang mit Spalt von 54cm offen

Die Varianten mit wenig geöffnetem Vorhang wurden so ausgelegt, dass der offen stehende Spalt nicht unmittelbar zentriert (bezogen auf die Mikrofonposition) wurde um dadurch mögliche geometrische Reflexionseffekte der Vorhangkanten zu unterdrücken. Als Anregungssignal wurde ein logarithmischer Sweep mit Dauer von 2 Sekunden verwendet. Nach mehreren Messungen wurde eine leicht bessere Unterdrückung des 650Hz-Bandes bei Öffnung des Vorhanges um 27cm festgestellt. Eine endgültige Auf- bzw. Erklärung für den extremen **Eibaruch** in 5.2.2 ist dies aber auch nicht. **Dies müsste noch zu einem späteren Zeitpunkt durch zusätzliche Analysen verfolgt werden um eine endgültige Raumkorrektur berechnen zu können.**

Schon vor den eigentlichen Messungen wurde das Gestell, an dem die Mikrofone befestigt sind mit absorbierendem Material verkleidet, da sich im Zuge der Testmessungen

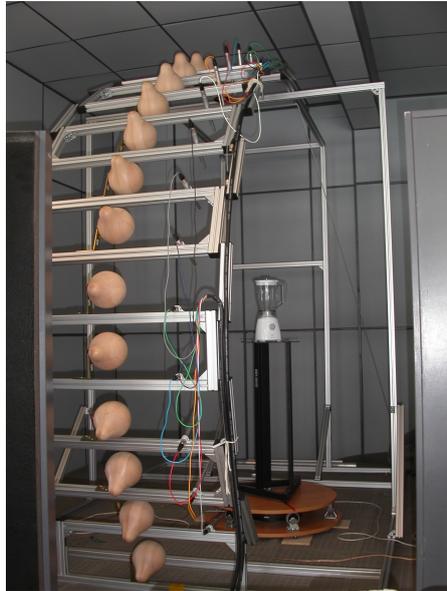


Abbildung 5.4.: Die Messkoje am IEM ohne Gestellverkleidung

leichte Überhöhungen bei 2kHz bemerkbar machten. Abb. 5.4 zeigt den Stand der Messkoje vor der Verkleidung. Der Unterschied zu Abb. 3.1 auf Seite 12 ist offensichtlich.

6. Schlussfolgerungen

Abschließend werden in diesem Kapitel die Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf die möglichen Erweiterungen und Optimierungen des Messverfahrens, sowie des Messvorganges gegeben.

6.1. Mögliche Verbesserungen

6.1.1. Software

Die entwickelte, vorgestellte Software könnte in Zukunft noch in mancherlei Hinsicht erweitert werden. In PD wäre eine weiterführende grafische Oberfläche denkbar, um eine schnellere Einschulung eines weniger fachkundigen Messpersonals durchführen zu können. Auch in MATLAB[®] wäre eine grafische Oberfläche per Hilfsprogramm GUIDE möglich, würde aber auch einen vergleichsweise hohen Aufwand darstellen. Kleinere Erweiterungen wären u.a. eine Erkennung von Fehlern in der Kalibrationsdatei und eine komfortablere Durchführung des Kalibrierungsvorganges mittels Referenzquelle. Eine weitere sinnvolle Erweiterung der Auswertungsanwendung wäre die bereits zuvor erwähnte automatische Erstellung von Messprotokollen auf Basis einer Active-X Ansteuerung von Microsoft[®] WORD direkt aus MATLAB[®] heraus. Die von „MATLAB[®] Central“ verfügbare Basisfunktion `WriteToWordFormMatlab.m` ist dazu verfügbar und müsste entsprechend erweitert und umgeschrieben werden.

6.1.2. Gezieltere Analysemethoden

Die in 4.1.5 angesprochenen möglichen Probleme bezüglich des Aufsatzbechers des Geräts „HR1704“ könnten z.B. mit einem Laservibrometer genauer untersucht werden. Diese optische Verfahren hat viele Vorteile gegenüber akustischen Verfahren. So könnten Schwingungen gewisser Bauteile und des Bechers gezielt sichtbar gemacht werden ohne eine Beeinflussung der Raumakustik. Schwingungsdifferenzen zwischen 2 Punkten könnten weiters Aufschlüsse über das Zusammenspiel des Bechers und des Basisgerätes zulassen.

Zusätzlich wäre noch eine gezielte Untersuchung der akustischen Richtungsabhängigkeit des Messobjektes mittels Schallintensitätssonde möglich.

6.2. Fazit

Die durchgeführten Messungen haben grundsätzliche Tendenzen des vermessenen Gerätetyps „HR1704“ hin zu folgenden Punkten gezeigt:

1. Nahezu kugelförmige Abstrahlung (Strahler 0. Ordnung)
2. Präsenster Frequenzbereich von ca. 300Hz bis 10kHz
3. Hohe Schwankungen in Pegel und Frequenz zwischen mehreren Geräten desselben Typs
4. Abstrahlverhalten zum Großteil vom Aufsatzbecher abhängig

Diese Erkenntnisse konnten anschließend anhand von Referenzmessungen gefestigt werden und dokumentieren somit die Gültigkeit der Messergebnisse am IEM.

6.3. Ausblick

Neuere Erkenntnisse (siehe [7]) zeigen, dass durch detailliertere Untersuchungen auf dem Gebiet der Abschätzung bzw. Korrektur von Messfehlern bei Anwendung des Hüllflächenverfahrens, durch noch detailliertere Untersuchungen, durchaus weitere Verbesserungen der Schalleistungsmessungen möglich sind.

Die in dieser Arbeit aufgestellten technischen Grundlagen zur Erfassung der komplexen Akustik kleiner Haushaltsgeräte stellt somit wie gefordert die Basis bzw. einen wichtigen Meilenstein der psychoakustischen Optimierung von Haushaltsgeräten und für die nachfolgende Diplomarbeit zum Thema „Untersuchung akustischer Optimierungsmethoden für Haushaltsgeräte“ dar.

Literaturverzeichnis

- [1] ÖNORM EN ISO 3744 *Akustik - Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene*, 1994. 2, 2.1, 5.1
- [2] ÖNORM EN ISO 3745 *Akustik - Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume*, 2003. 2, 2.1, 2.2, 2.2, 2.2, 3.2, 3.4.2.1, 3.4.2.1, 3.5, 12, 4.2, 5.2.1, 5.2.2, 4, B.2.1, B.3
- [3] FASOLD, WOLFGANG und EVA VERES: *Schallschutz + Raumakustik in der Praxis*. Verlag für Bauwesen, Berlin, 1. Auflage, 1998. 3.4.2.2
- [4] HÜBNER, GERHARD: *Analysis of errors in measuring machine noise under free-field conditions*. J. Acoust. Soc. Am., 54(4), 1973. 2.2, 3.3
- [5] HÜBNER, GERHARD: *Qualification procedures for free-field conditions for sound-power determination of sound sources and methods for the determination of the appropriate environmental correction*. J. Acoust. Soc. Am., 61(2), 1977. 5.2.2, 5.2.2
- [6] HÜBNER, GERHARD: *Messung und Beurteilung der Geräuschemission*. In: HECKL, MANFRED und HELMUT A. MÜLLER (Herausgeber): *Taschenbuch der technischen Akustik*, Kapitel 6, Seiten 126–159. Springer-Verlag, 2. Auflage, 1994. 2.1, 2.1.1
- [7] LOYAU, THIERRY: *Uncertainties due to the measurement surface (angle and impedance) and to the number of microphones for the A-weighted sound power level determination using sound pressure measurements*. Euronoise 2006, 2006. 6.3
- [8] SCHICK, AUGUST: *Schallbewertung - Grundlagen der Lärmforschung*. Springer-Verlag, 1990.
- [9] SONTACCHI, ALOIS: *Entwicklung eines Modulkonzeptes für die psychoakustische Geräuschanalyse unter MatLab*. Diplomarbeit, Universität für Musik und darstellende Kunst, Graz, 1998. 3.4.2.1

- [10] WARUM, STEFAN: *Messung von Außenohrübertragungsfunktionen und directionalen Raumimpulsantworten als Basis der Auralisation realer Räume*. Diplomarbeit, Universität für Musik und darstellende Kunst, Graz, 2003. 5.2.1
- [11] WESELAK, WERNER und GERHARD GRABER: *Raumakustik*. Skriptum zur Lehrveranstaltung, 2004. 2.2

A. Anhang - MATLAB[®]-codes

Als Ergänzung sind nachfolgend einige relevante MATLAB[®]-Programmcodes angeführt. Da der gesamte Code auch ausführlich auskommentiert ist, sind dies daher nur Ausschnitte aus dem tatsächlichen vollständigen Quellcode.

A.1. CAMDA_Analyser.m

Dieses Script ruft mit dem Befehl `run` alle anderen benötigten Scripts nacheinander auf, was lediglich bei den Fehlermeldungen Probleme bereiten kann. Bei einer Programmierung als Functions würde dies ebenfalls entfallen.

```
36 if exist('cal')==0
37 %     cfc=camda_calibration;
38 %     [P]=camda_filereader(cfc);
39 %     [LW, LWA, L_W, L_W_A]=camda_swlcalculator(P);
40     run camda_calibration;
41     run camda_filereader;
42     run camda_swlcalculator;
43
44 elseif exist('cfc')>0
45     disp('Already calibrated! Please delete "cfc" from workspace to re-
46         calibrate!')
47     run camda_filereader;
48     run camda_swlcalculator;
49
50 elseif exist('cal')>0
51     warndlg('Calibrationfile already found in workspace - file is being
52         overwritten!')
53     run camda_calibration;
54     run camda_filereader;
55     run camda_swlcalculator;
56 end
```

A.2. camda_calibration.m

```

24 % The calibration file is loaded here
25 [cal_file,cal_path]=uigetfile('*.txt','Select the calibration file');
26
27 % Check if loading successful
28 if isequal(cal_file,0)
29     errordlg('No calibration file specified!')
30     return
31 else
32     cal=load(fullfile(cal_path, cal_file));
33     disp('Your calibration file is: ')
34     disp(fullfile(cal_path, cal_file))
35
36 % This section contains the scaling factors for the soundfiles due to
37 % calibration in order to get real SPL values (in pascal). The vector
38 % containing the scaling factors is named cfc (CalibrationFactorChannel).
39 % To calculate the mean values for each cfc element, at least 4
40 % values should be taken into account. (The values are being
41 % delogarithmized
42 % beforehand!).
43 maxchno=max(cal(:,1)); % find maximum channel no. in specified calibration
44 % file
45 % maxchno=14; % manual setting of maximum channel no.
46 % if isequal(max(cal(:,1)),maxchno) % check if maxchno equals the max.
47 % channel no. in file
48 for ii=1:maxchno
49     h_index=find(cal(:,1)==ii); % find all calibration values for each
50     % mic channel
51     if isempty(h_index) % check if calibration values exist for current
52     % channel
53         dlgtmp=sprintf('The calibration value for mic no. %0.f is
54         % missing!',ii);
55         warndlg(dlgtmp) % error dialog
56         cal_mean(ii)=NaN; % fill vector with 0 because there is no
57         % value available
58     else
59         if std(cal(h_index,2)) <= 0.25 % check if standard deviation of
60         % corresponding channel values too high (in dB)
61             cal_mean(ii)=94-10*log10(mean(10.^(cal(h_index,2)./10)));
62             % write mean values to vector
63         else
64             warndlg('Calibrationfile may be corrupt (standard
65             % deviation of at least one channel's values > 0.25dB!)'
66             )
67             % else show dialog to warn user to check calibration file
68             % for
69             % errors, but still proceed

```

```

61         cal_mean(ii)=94-10*log10(mean(10.^(cal(h_index,2)./10)));
62     end % if end
63 end % if end
64 end
65 clear cfc; % clear in case there already existed one
66 % All 14 cfc's are now saved to a vector for further calculation
67 cfc=(10.^(cal_mean./20))*(0.00002); %
68 % else
69 %     errordlg('Maxmimum no. of channels in calibrationfile is wrong!')
70
71 % end % if end
72
73 end % if end

```

A.3. camda_filereader.m

```

32 % Check if calibration is existing and valid to start reading & filtering
33 if exist('cfc')==0 % if no.1
34     errordlg('No calibration conducted! Please start again!')
35 elseif length(cfc)<14
36     errordlg('Calibrationfile damaged! Please start again!')
37 elseif isequal((sum((find(cfc)==0))),0)==0
38     errordlg('Calibrationfile empty! Please start again!')
39 else
40 % Let user choose directory and set list of files in directory
41 measfile_dir=uigetdir('','Please choose the directory containing the
    measurement files...');
42
43 % Check if files are being loaded properly
44 if isequal(measfile_dir,0) % if no.2 % check if action was canceled to
    abort reading
45     errordlg('No file location specified!')
46 else
47     disp('Your soundfiles directory: ')
48     disp(measfile_dir)
49     measfile_list=dir(fullfile(measfile_dir, '*.wav')); % only wavefiles
    from the chosen directory are taken into account
50
51     totalsteps=size(measfile_list,1); % number of steps is recognized by
    number of wavefiles in archive!
52
53 % a)
54 clear sig; % free-up memory
55 h_time = timebar('Reading & Filtering','Overall Progress...'); % open "
    overall progress" status bar
56 for stepcount=1:totalsteps

```

```

57     str=sprintf('Reading step %02.0f',stepcount); % status output
58     disp(str)
59
60     sig=wavread(fullfile(measfile_dir, measfile_list(stepcount).name)); %
        reading specified wavefile(s)
61
62     %     ATTENTION: Old multiplying procedure
63     %     sig=sig(:,1:14)*diag(cfc); % multiplying read signal with according
        calibration factors
64
65 % b), c) & d)
66     str=sprintf('Filtering step %02.0f',stepcount); % status output
67     disp(str)
68     progressbar(0,[0.375,0.415]) % open status bar for each step being
        filtered
69     for ii=1:14
70         %%% A-Filterung fehlt bzw. wird derzeit bei LW_A mit diskreten
            Werten durchgefuehrt...
71         [p,f]= terzfilterbank(cfc(ii)*sig(:,ii),44100); % multiplying
            signal with according calibration factor & 1/3 octave
            filtering
72         % P...final 3D matrix containing stepno., channelno. & sound
73         % pressure levels for each centrefrequency of the 1/3 octave bands
74         P(stepcount,ii,:)=p;
75         progressbar(ii/14,[0.375,0.415]) % update status bar for filtering
            step process
76     end
77     str=sprintf('Finished filtering of step %02.0f',stepcount); % status
        output to let user know which step is being processed
78     disp(str)
79
80 % e)
81     clear sig;
82     timebar(h_time,stepcount/totalsteps) % update status bar for overall
        progress of reading & filtering
83 %     clc;
84
85 end
86 close(h)
87
88
89 end % if no.1 end
90
91 end % if no.2 end

```

A.4. camda_swcalculator.m

```

24 if exist('P')==0 % check if a P-matrix exists
25     errordlg('No P-Matrix found!')
26
27 elseif isequal(size(P),size(zeros(totalsteps,14,28)))==0 % check if given
    P-matrix is valid
28     errordlg('P-Matrix seems to be damaged (i.e. wrong sized)! Please load
        a valid one or start again!')
29
30 else
31
32 if exist('B')==0 & exist('T')==0
33 % Question dialog for static pressure & temperature (Will ONLY be
    necessary for
34 % "legacy" P-matrices which do NOT contain 'B' & 'C!')
35 prompt = {'Enter static air pressure [hPa]:','Enter temperature [°C]:'};
36 dlg_title = 'Please enter the necessary environmental data'; % title
37 num_lines = 1;
38 def = {'1021','25'}; % set defaults
39 answer = str2double(inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def));
40
41 B=(answer(1))*10^2; % entered in hPa! Either to be measured by an
    according
42
43     % device or get static pressure from:
44     % http://www.zamg.ac.at or
45     % http://wetter.orf.at/oes
46 T=answer(2); %temperature
47 end % if "environmental data" end
48
49 B_0=1.101325*10^5; % reference pressure according to ISO 3745
50 C_1=-10*log10((B/B_0)*sqrt((313.15/(273.15+T))));
51 C_2=-15*log10((B/B_0)*(296.15/(273.15+T)));
52 % Meteorological correction for LW calculation
53 C=C_1+C_2;
54
55 % Correction factor due to inadequancies of Behringer ECM 8000 microphones
56 % (Reference Microphone: G.R.A.S. Type 40AF)
57 C_Behringer=[0 0 0 0 0 0 0 -0.35 -0.39 ...
58     -0.35 -0.35 -0.24 -0.31 -0.22 -0.11 -0.09 -0.12 -0.01 ...
59     -0.13 -0.18 -0.45 -0.67 -1 -1.56 -2 -2.43 -2.48 -3.08];
60 % NOTE: Frequencies below 100Hz are set to 0 due to measurement
61 % uncertainties!)
62
63 disp('Calculating Sound Power Level...');
64
65 steps=totalsteps; % set the "steps"-variable of this script/function
66 % Radii of distances between acoustical source & each microphone on the
67 % arc support
68 % R = [1.39 1.39 1.4 1.39 1.38 1.36 1.34 1.33 1.32 1.29 1.28 1.30 1.32
    1.32]; % mics 1 - 14

```

A. Anhang - MATLAB®-codes

```

68 % R = [1.39 1.42 1.43 1.42 1.41 1.37 1.35 1.32 1.29 1.26 1.26 1.26 1.26
        1.26]; % mics 1 - 14 (date: 07.06.2006 with new mic clamps)
69 R = [1.34 1.40 1.42 1.42 1.42 1.40 1.38 1.37 1.34 1.32 1.33 1.33 1.34
        1.34]; % mics 1 - 14 (date: 25.07.2006 with new support)
70 % R = [1.43 1.43 1.47 1.45 1.43 1.38 1.34 1.31 1.28 1.24 1.24 1.23 1.25
        1.25]; % mics 1 - 14 (date: 01.09.2006 for room evaluation with
        knopper speaker)
71
72
73 % Calculation of surface area of the spherical segment (Polkappe) (at 90
        degrees elevation angle)
74 % A(14) is the weighting factor of the surface area of the spherical
        segment
75 A(14)=(2*pi*R(14)^2*(1-cos(5*pi/180)))/steps;
76
77 % Calculation of surface areas for all other segments
78 % A is a vector containing weighting factors for each surface area
79 lb=5; % initial value for lower elevation bound
80 ub=15; % initial value for upper elevation bound
81
82 for ii=14-1:-1:1 % count backwards (negative) (change "14" to "length(cfc)
        " for different no. of mics)
83     A(ii)=(2*pi*(R(ii)^2)*(cos(lb*pi/180)-cos(ub*pi/180)))/steps; %
        calculation of surface areas for all other segments
84     lb=ub; % moving boundaries to next succeeding elevatorial segment (+
        10 degrees)
85     ub=ub+10;
86 end
87
88 % Calculate all planes of the virtual sphere surrounding the acoustical
        source
89 for ii=1:steps
90     for k=1:28 % for all 1/3 octave centre frequencies
91         % Lpf_help(ii,k)=sum(A.*10.^(P(ii,:,k)./10)); % old calculation
            method
92         p_help(ii,k)=sum(0.00002^2*A.*10.^(P(ii,:,k)./10));
93     end
94 end
95
96 % Lpf...sound pressure level of whole plane around the source (
        Messflächenschalldruckpegel)
97 % Lpf=10*log10(1/sum(A(1:14)*steps)*sum(Lpf_help(ii,:),1)); % old
        calculation method
98 p_area=1/sum(A(1:14).*steps)*sum(p_help(:,,:),1);
99 Lpf=10*log10(p_area/(0.00002^2));
100
101 % LW...unweighted sound power levels (according to [1])
102 % LW=Lpf+10*log10(4*pi*R^2); % ...sphere surrounding the acoustical source
103 LW=(Lpf+10*log10(4*pi*(mean(R.^2))))+C_Behringer+C'; % transpose for
        easier paste to excel

```

```

104
105 % C_A...represents a discrete valued A-weighting filter (1/3 octave bands)
      (according to [1,2])
106 C_A=[-30.2,-30.2,-30.2,-30.2,-26.2,-22.5,-19.1,-16.1,-13.4,...
107      -10.9,-8.6,-6.6,-4.8,-3.2,-1.9,-0.8,0.0,0.6, ...
108      1.0,1.2,1.3,1.2,1.0,0.5,-0.1,-1.1,-2.5,-4.3];
109
110 % LWA...A-weighted sound power levels (according to [1])
111 LWA=LW+C_A'; % transpose for easier paste to excel
112
113 % L_W...the overall unweighted Sound Power Level (according to [1])
114 L_W=10*log10(sum(10.^((LW)./10)));
115
116 % L_W_A...the overall A-weighted Sound Power Level (according to [1])
117 L_W_A=10*log10(sum(10.^((LW+C_A').)/10))); % transpose for easier paste to
      excel
118
119 % Output of result
120 str=sprintf('The calculated unweighted Sound Power Level (LW) is %.1f dB',
      L_W);
121 disp(str)
122 str=sprintf('The calculated A-weighted Sound Power Level (LWA) is %.1f dBA
      ',L_W_A);
123 disp(str)
124 str=sprintf('Static pressure during measurement: %.4e Pa',B);
125 disp(str);
126 str=sprintf('Room temperature during measurement: %0.1f °C',T);
127 disp(str);
128 str=sprintf('Maximum added meteorological correction: %02.2f dB',C);
129 disp(str);
130
131 end % if end

```

A.5. camda_plotter.m

Hier ist nur der Beispielcode eines Diagramms angeführt.

```

98 % I. 0 degrees
99 % subplot(2,2,1);
100 zerodeg = figure('Name','Vertical view 0°/180°','NumberTitle','off');%,'
      WindowStyle','docked');
101
102 % left hand side (0 degrees) - line
103 % for plotfreqinc=plotminfreq:plotfreqinc:plotminfreq+(plotfreqno*
      plotfreqinc)
104 set(mmpolar(pi/180*(-40:thetaelev:90),plot_P(startstep,:,2),'-or', ... %
      250Hz

```

```

105     pi/180*(-40:thetalev:90),plot_P(startstep,:,3),'-og', ... %
        500Hz
106     pi/180*(-40:thetalev:90),plot_P(startstep,:,4),'-ob', ... %
        1000Hz
107     pi/180*(-40:thetalev:90),plot_P(startstep,:,5),'-oc', ... %
        2000Hz
108     pi/180*(-40:thetalev:90),plot_P(startstep,:,6),'-om', ... %
        4000Hz
109     pi/180*(-40:thetalev:90),plot_P(startstep,:,7),'-ok'), ... %
        8000Hz
110     'LineWidth',1.5,'MarkerSize',6,'MarkerFaceColor',[.6 .7 .7],'
        MarkerEdgeColor','k')
111 hold on
112 % right hand side (180 degrees) — line
113 set(mmpolar(pi/180*(90:thetalev:220),fliplr(plot_P(startstep+dec180,:,2))
        ,':or', ... % 250Hz
114     pi/180*(90:thetalev:220),fliplr(plot_P(startstep+dec180,:,3))
        ,':og', ... % 500Hz
115     pi/180*(90:thetalev:220),fliplr(plot_P(startstep+dec180,:,4))
        ,':ob', ... % 1000Hz
116     pi/180*(90:thetalev:220),fliplr(plot_P(startstep+dec180,:,5))
        ,':oc', ... % 2000Hz
117     pi/180*(90:thetalev:220),fliplr(plot_P(startstep+dec180,:,6))
        ,':om', ... % 4000Hz
118     pi/180*(90:thetalev:220),fliplr(plot_P(startstep+dec180,:,7))
        ,':ok'), ... % 8000Hz
119     'LineWidth',1.5,'MarkerSize',6,'MarkerFaceColor',[.6 .7 .7],'
        MarkerEdgeColor','k')
120
121 mmpolar('RLimit',[minlevel maxlevel],'RTickValue',[minlevel:2:maxlevel],'
        TZeroDirection','West', ...
122     'TDirection','cw','TTickDelta',thetalev,'RTickUnits','dB SPL','
        RTickAngle',305, ...
123     'RTickOffset',.005,'TGridLineStyle','—','RGridLineStyle',':','
        RGridLineWidth',0.2)
124 set(gca,'XLim',[-1.1 1.1],'YLim',[-1.1 1.1])
125 legend('250 Hz','500 Hz','1000 Hz','2000 Hz','4000 Hz','8000 Hz','Location
        ','NorthEastOutside')
126 title('Microphones 1–14, 0° / 180° azimuth','FontSize',12,'Fontweight','
        Bold')

```

B. Anhang - Sonstiges

B.1. Messkojendaten

Von den Raumabmessungen ist noch die Dicke des Absorptionsmaterials bzw. der Holzkonstruktion abzuziehen sind. Diese sind in Tab. B.1 in der dritten Spalte ersichtlich. Zur Absorption wurden folgende poröse Absorber eingebaut:

Breite:	3.89m	2 * -8cm
Höhe:	3.40m	-12cm - 8cm
Tiefe:	3.45m	-8cm

Tabelle B.1.: Messkojenabmessungen

Boden: *Eurofoam 5000-080*, Dicke: 8cm

Wand: *Eurofoam 5000-050*, Dicke: 5cm

Ein Moltonvorhang schließt die gesamte Messkoje an der Vorderseite ab. Um Reflexionen zu vermeiden, ist er ungefähr um den Faktor 1.5 breiter als notwendig und daher leicht gewellt.

B.2. Verwendete Gerätschaften

Auf die Datenblätter des im Rahmen dieser Projektarbeit verwendeten Equipments wird mit direkten URL's verwiesen. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit waren alle Datenblätter unter den genannten Adressen online erreichbar.

B.2.1. Kalibratoren

Cirrus CR:511E Für die *Behringer ECM8000* Mikrofone kam ein *Cirrus CR:511E* Kalibrator zum Einsatz (Spezifikation: IEC60942-1988, Klasse 1L & Klasse 2).

Datenblatt: http://www.cirrusresearch.de/pdf/files/CR510_neu_email.pdf

Larson Davis LD200 Zusätzlich wurde für Vergleichszwecke ein *Larson Davis LD200* (Spezifikation: IEC60942-2003, Klasse 1) für die *G.R.A.S. TYPE 40AF* Mikrofone verwendet.

Datenblatt: http://www.larsondavis.com/docs/manuals/CALI200_Rev_D.pdf

Laut oben referenzierter Datenblätter sind damit beide Kalibratoren auch für Messungen nach [2] gültig.

B.2.2. Mikrofone

Behringer ECM8000 Wie bereits in 3.4.2.1 festgestellt, ist dieses Mikrofon leider nicht genauer spezifiziert. Ein Blick auf das Datenblatt offenbart dies. Auch auf Anfrage konnte (oder wollte) die Firma Behringer keine detaillierteren Angaben oder Datenblätter bereitstellen.

Datenblatt: http://www.behringerdownload.de/ECM8000/ECM8000_C_Specs.pdf

G.R.A.S. Type 40AF Im Gegensatz zum Behringer ECM8000 liefert das Datenblatt dieses Mikrofons genaue Angaben.

Datenblatt: http://www.grasinfo.dk/documents/pd_40AF_ver_13_09_02.PDF

B.2.3. Vorverstärker & AD-Wandler

Behringer ADA8000 Streng genommen ist auch dieser Vorverstärker bzw. AD-Wandler nicht nach den erforderlichen Normen spezifiziert. Da er aber durchaus gute Rauschwerte aufweist und er auch sonst während der Projektarbeit nicht negativ in Erscheinung trat kann dies sicherlich im Gegensatz zu den Messmikrofonen vernachlässigt werden. Der Behringer ADA8000 besitzt 8 kombinierte Line bzw. Mikrofonvorverstärker und kann diese ins digitale „ADAT[®] Lightpipe“¹ Format wandeln.

Datenblatt: http://www.behringerdownload.de/ADA8000/ADA8000_SPECS_Rev_C.pdf

B.2.4. Sonstiges Equipment

RME ADI-648 Dieses Interface stellt wie in Abb. 3.2 zu sehen die Brücke zwischen den vielen Messkanälen und dem Aufzeichnungsrechner her. Die eintreffenden optischen „ADAT[®] Lightpipe“ Signale werden zusammengefasst und über ein einziges Lichtwel-

¹Alesis Digital Audio Tape - eigentlich die Abkürzung für ein professionelles mehrkanaliges Aufzeichnungssystem auf S-VHS Basis; gleichzeitig versteht man mit dem Zusatz „Lightpipe“ auch die damit eingeführte optische Schnittstelle, die 8 Kanäle mit 44.1kHz bzw. 48kHz Samplingfrequenz und einer Wortbreite von 24Bit übertragen kann

lenleiterkabel im MADI² Format, zur Gegenstelle in Form der nachfolgend aufgelisteten digitalen Audiokarte im Aufnahmerechner geführt.

Datenblatt: http://www.rme-audio.de/download/adi648_2_d.pdf

RME HDSP MADI Dieses spezielle PCI Audiointerface besitzt sowohl optische als auch elektrische Ein- und Ausgänge für das MADI-Format.

Datenblatt: http://www.rme-audio.de/download/hdspmadi_d.pdf

B.3. Exemplarischer Messbericht

In diesem Abschnitt wird ein Messbericht in einer, wie in späterer Folge evtl. als Standard für den „produktiven Betrieb“ angedachten, Form vorgestellt. Dabei werden, wie auch schon bei der Messung der Schalleistung, möglichst die Vorgaben aus [2] berücksichtigt. Als weitere Vorlage wurde auch das von Philips intern verwendete Protokoll herangezogen. Es wird mit Microsoft[®] Word erstellt. Damit wäre Zukunft auch die in 6.1.1 beschriebene automatische Erstellung eines solchen Protokolls machbar. Das auf anschließend eingefügte Protokoll wurde zuvor ins PDF Format gewandelt und wird hier eingerahmt dargestellt.

²Multichannel Audio Digital Interface - ein professionelles digitales Multikanalformat; kann entweder optisch per Lichtwellenleiter oder elektrisch per BNC-Kabel geführt werden mit einer maximalen Anzahl von 64 Kanälen bei 24Bit und 48kHz oder 32 Kanälen bei 24Bit und 96kHz

Messprotokoll

Auswertung der Messung am IEM

Erstellt am: 01.12.2006

1. Messobjekt

Typ(enbeschreibung): Kleines Küchengerät, Standblender

Gerätebezeichnung: HR1704-00

Hersteller: Philips DAP Klagenfurt

Maße: 14x45x14cm (BxHxT), mit Becher

2. Messbedingungen & Messverfahren

Verfahren: Schallleistungsmessung mit Drehteller nach [2], angelehnt an [1]

Betriebszustand: Leerlauf ohne Befüllung mit aufgesetztem Becher

Aufstellungsbedingungen: Stehend auf massiver Holzplatte (BxT=14x14cm, Dicke 2cm) befestigt an einem höhenverstellbarem Stativ

Gewählter akustischer Mittelpunkt: Etwas unterhalb des Anknüpfungspunktes Becher zu Basisgerät

3. Akustische Umgebung

Raummaße: 3.74x3.20x3.37m(BxHxT) (inkl. Absorptionsmaterial)

Raumbeschreibung & Raumbeschaffenheit: Raum ist an allen Seiten (Wände, Decke, Boden) außer der Frontseite absorbierend verkleidet. Der Boden ist mit Absorptionsmaterial ausgelegt und darüber als Trittschutz ein Metallgitter ausgelegt. Zusätzlich ist zur akustischen Verbesserung an der Frontseite ein Zugvorhang angebracht.

Bodenverkleidung: Eurofoam 5000-080, Dicke 8cm

Verkleidung Wände & Decke: Eurofoam 5000-050, Dicke 5cm

Vorhang: Moltonvorhang mit 1.5-facher Breite

Sonstige Objekte: In der Messkoje befanden sich außer dem Messobjekt selbst während der Messungen lediglich der Drehteller, das Stativ, sowie das Alu-Gestell an dem die Messmikrofone befestigt waren.

Akustische Eignung: Die Messumgebung wurde einer Prüfmessung mittels 2-Flächen Verfahren (siehe dazu [1]) unterzogen. Laut den Ergebnissen in [2] ist im interessierenden Frequenzbereich von x-xHz eine Messung in diesem Raum auch nach [1] gültig.

4. Verwendete Messgeräte

Messgeräte: 14x Behringer ECM8000 Messmikrofone
2x Behringer ADA8000 Vorverstärker & AD-Wandler
1x RME ADI648 bidirektionaler ADAT zu MADI Konverter
1x RME HDSP MADI Soundkarte

Kalibrierung: Einzelkalibrierung aller 14 Mikrofone vor der Messung mittels Cirrus CR:511E Kalibrator mit 94dB bei 1 kHz.

5. Messergebnisse

5.1 Schalleistungspegel

A-bewerteter Gesamtschalleistungspegel ($L_{w(A)}$): xx.x dBA
Unbewerteter Gesamtschalleistungspegel (L_w): xx.x dB

5.2 Diagramme

Hier werden 4 beschreibende Diagramme abgebildet

1. Horizontalschnitt auf 0° Ebene (auf Höhe Mikrofonposition 5)
2. Vertikalschnitt bei 0°/180° Azimut
3. Vertikalschnitt bei 100°/280° Azimut
4. Unbewertetes und A-bewertetes Terzschalleistungsspektrum

Ort, Messdatum & verantwortliche Person(en):

Messkoje IEM, Inffeldgasse 10, 1. Stock; xx.xx.2006; Max Mustermann

6. Anmerkungen & Allfälliges

Die gesamte Messung kann offiziell aufgrund fehlender, nach [1] erforderlichen Spezifikationen einzelner Messgeräte, leider nicht einer Genauigkeitsklasse

Seite 2/3

zugeordnet werden. Den Ergebnissen der Raumprüfung zufolge ist aber mindestens von einer Eignung nach Genauigkeitsklasse 2 auszugehen; im interessierenden Frequenzbereich  utlich sogar noch genauer.

Literatur

[1] ÖNORM EN ISO 3745 *Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume*, 2003.

[2] SEREINIG, Roman: *Psychoakustische Optimierung von Haushaltsgeräten*. Toningenieur-Projekt, Universität für Musik und darstellende Kunst, Graz, 2006.