

Luca Langgartner BSc

Tool for Measurement of Directivity Patterns

Toningenieur-Projekt

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Eric Kurz

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arlangegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und einhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich ge	die den benutzten Quellen wörtlich und
	(Unterschrift)

Kurzfassung

In den meisten Anwendungsfällen der Raumakustik wird eine frequenzunabhängige omnidirektionale Schallabstrahlung der Schallquelle angenommen. Leider können bei raumakustischen Messungen die meisten Schallquellen diesen Anforderungen auf Grund ihrer Geometrie und der Schallbündelung der verwendeten Lautsprecher-Chassis bei hohen Frequenzen nicht gerecht werden. Bei verschiedenen Anwendungen, beispielsweise der raumakustischen Simulation oder der Auralisation, wird für ein genaueres Verständnis die Richtcharakteristik der Schallquelle benötigt. In diesem Toningenieur-Projekt wurde ein Messaufbau zur Bestimmung der Richtcharakteristik von Schallquellen sowie eine flexible Mess-Software entwickelt.

Tool for Measurement of Directivity Patterns

Inhaltsverzeichnis

Eid	desst	attliche Erklärung	Ш
Κι	ırzfas	ssung	V
1	Einl	eitung	9
2	The	eoretischer Hintergrund	11
	2.1	Kugelförmige Schallquelle und Fernfeldbedingung	11
	2.2	Richtwirkung	11
	2.3	Wellengleichung in sphärischen Koordinaten	12
		2.3.1 Wellengleichung	12
	2.4	Sphärische Harmonische	14
	2.5	Richtcharakteristik mit Sphärischen Harmonischen	15
	2.6	Das SOFA-Format	16
3	Mes	ssaufbau	17
	3.1	Mikrofonanordnung	17
	3.2	Drehteller	18
	3.3	Signalwege	20
4	Pros	grammaufbau	21
	4.1	Graphische Oberfläche	21
	4.2	Dateneingabe und Einstellungen	22
		4.2.1 Abspeichern eines Presets	24
	4.3	Kalibrierung und Messung	24
		4.3.1 Kalibrierung	24
		4.3.2 Durchführung einer Messung	24
	4.4	Steuerung des Drehtellers	25
	4.5	Entzerrung der gemessenen Frequenzgänge	26
	4.6	Darstellung der Messergebnisse	26
	4.7	Speichern der Messergebnisse	27
		4.7.1 Erzeugung eines Berichtes	28
		4.7.2 Abspeichern im SOFA-Format	29
	4.8	Flussdiagramm	30
5	Test	tmessung	31
6	Zus	ammenfassung und Ausblick	39
Ar	hang	g A	XLIII

Einleitung

Für die einfache Charakterisierung von Schallquellen werden üblicherweise spektrale und zeitliche Merkmale betrachtet. Ein weiteres wichtiges Merkmal ist die räumliche Abstrahlcharakteristik der Schallquellen, d.h. die frequenzabhängige Schallabstrahlung der Schallquellen in allen Raumrichtungen. Als Schallquellen können beispielsweise Musikinstrumente, Sprecher bzw. Sänger oder auch Lautsprecher betrachtet werden. Die Betrachtung der Richcharakteristik ist auch bei Schallempfängern von Bedeutung, beispielsweise bei der räumlichen Charakterisierung von Mikrofonen oder der Vermessung von Außenohrübertragungsfunktionen (HRTF - Head Related Transfer Function). Für die vollständige Charakterisierung oder Simulation eines Schallereignisses müssen somit die Richtungsabhängigkeit der spektralen und zeitlichen Merkmale von Schallquelle bzw. -empfänger untersucht werden.

Die Messung und Modellierung der Richcharakteristik von Schallquellen hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen und findet in verschiedenen Bereichen der Akustik Anwendung. Beispielsweise kann somit untersucht werden wie sich die Richtcharakteristik von Musikinstrumenten auf das Hörerlebnis [1] oder auf gewisse raumakustische Eigenschaften auswirkt [2]. Eine weitere Anwendung findet sich in der Virtual Reality [3], [4] und der raum- und elektroakustischen Simulation. Für die Darstellung von Richtcharakteristiken wurde die Anwendung von sphärischen Harmonischen schon im Jahre 1980 vorgeschlagen [5]. Diese Darstellung hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen [6].

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines Programms und Aufbaus zur automatisierten Messung, Auswertung und Darstellung von Richtcharakteristiken diverser Schallquellen vorgestellt. Der Aufbau besteht derzeit aus einer halbkreisförmigen Anordnung von 13 Mikrofonen und einem automatisierten Drehteller. Die Messung und die anschließende Signalverarbeitung wurden in einer Matlab-App implementiert.

2

Theoretischer Hintergrund

In folgendem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen bezüglich der Messung und der Verarbeitung von Richtcharakteristiken vorgestellt.

2.1 Kugelförmige Schallquelle und Fernfeldbedingung

Schallquellen, beispielsweise Musikinstrumente oder Lautsprecher, strahlen Schall nicht in allen Richtungen und bei allen Frequenzen mit dem gleichen Schalldruck ab. Die Richtungsabhängigkeit der Schallabstrahlung wird als Richcharakteristik definiert. Als einfachster Fall kann eine imaginäre kugelförmige Quelle, welche gleichmäßig pulsiert, betrachtet werden. Bei dieser imaginären Schallquelle erfolgt eine gleichmäßige Schallabstrahlung in allen Raumrichtungen und diese besitzt somit eine omnidirektionale Richtcharakteristik. Unter realen Bedingungen kann diese Richtcharakteristik nur bei Frequenzen, deren Wellenlängen wesentliche größer als die Abmessungen der realen Schallquelle sind, erzeugt werden [1]. Für omnidirektionale Schallabstrahlung muss der Zusammenhang $\lambda \gg l$ gelten, wobei λ die Wellenlänge der abgestrahlten Frequenz ist und l die größte räumliche Abmessung der Schallquelle darstellt. Für die Wellenzahl $k=\frac{2\pi}{\lambda}$ muss somit $k\ll\frac{2\pi}{l}$ für omnidirektionale Schallabstrahlung gelten. Mit der Wellenzahl k kann ebenfals die Fernfeldbedingung untersucht werden. Das Fernfeld ist

Mit der Wellenzahl k kann ebenfals die Fernfeldbedingung untersucht werden. Das Fernfeld ist charakterisiert durch die Relation $k \cdot r \gg 1$. Mit der Annahme, dass $k \cdot r > 2$ sei und einem Radius r kann für die Fernfeldbedingung folgende Gleichung aufgestellt werden:

$$k \cdot r > 2 \implies \frac{2 \pi f}{c} \cdot r > 2 \implies f > \frac{c}{\pi r}$$
 (2.1)

Der benutzte Aufbau besitzt eine Radius von ≈ 1.4 m und somit kann ab einer Frequenz von ≈ 78 Hz die Erfüllung der Fernfeldbedingung erreicht werden. Unter dieser Frequenz treten Nahfeldeffekte auf, wodurch die Messung unzuverlässig wird.

In den folgenden Abschnitten werden für die Winkelangaben von Azimuth und Zenith die Formelzeichen φ und ϑ benutzt.

2.2 Richtwirkung

Schallquellen und -empfänger lassen sich durch deren räumliche Richtwirkung charakterisieren. In der Literatur werden unterschiedliche Definitionen der Richtcharakteristik angegeben [1], [7]–[9]. Vereinfacht kann die Richtcharakteristik als Verhältnis zwischen dem Schalldruck in allen Richtungen und dem in einer Referenzrichtung definiert werden. Folgend werden die Definitionen nach [9] angegeben.

Der Richtungsfaktor $D_0(\vartheta,\varphi)$ wird definiert als:

$$D_0(\vartheta,\varphi) = \frac{p(r,\vartheta,\varphi)}{p(r,\vartheta_0,\varphi_0)}$$
(2.2)

wobei $p(r, \vartheta, \varphi)$ der im Fernfeld, bei $k_0 r \gg 1$, auf einer Kugeloberfläche mit Radius r gemessene Schalldruck und $p(r, \vartheta_0, \varphi_0)$ der Schalldruck in eine Referenzrichtung bei gleichem Radius (meist eine Symmetrieachse) ist. Aus dieser Definition lassen sich weitere Größen ableiten, welche folgend angegeben werden.

Durch Bildung des Betragsquadrates von Gleichung 2.2 erhält man den Richtungskoeffizienten:

$$D_0^2(\vartheta,\varphi) = \frac{|p(r,\vartheta,\varphi)|^2}{|p(r,\vartheta_0,\varphi_0)|^2}$$
(2.3)

Mechel definiert ebenso den Richtungswert, welcher sich aus dem Verhältnis zwischen quadriertem gemessenen Schalldruck und dem Mittelwert der Schalldrücke über die Richtungen ϑ und φ ergibt. Dieser Richtungswert gibt die Änderung der Schallabstrahlung in allen Richtungen an und ist definiert als:

$$D_{\rm m}(\vartheta,\varphi) = \frac{|p(r,\vartheta,\varphi)|^2}{\langle |p(r,\vartheta,\varphi)|^2 \rangle_{\vartheta,\varphi}}$$
(2.4)

Aus Gleichung 2.3 kann der *Richtungsindex* berechnet werden:

$$D_{L0}(\vartheta,\varphi) = 10 \cdot \lg D_0^2(\vartheta,\varphi) \tag{2.5}$$

Aus dem Richtungswert kann schließlich die *Directivity* in logarithmischer Darstellung abgeleitet werden.

$$D_{Lm}(\vartheta,\varphi) = 10 \cdot \lg D_m(\vartheta,\varphi) \tag{2.6}$$

Für die Darstellung der Richtcharakteristiken im entwickelten Messprogramm wird die normierte Directivity benutzt welche sich aus Gleichung 2.6 ableiten lässt. Hiermit ist die Darstellung der Richtcharakteristik immer normiert, wodurch der Schwerpunkt in der Darstellung auf die Richtungsinformationen gelegt wird.

2.3 Wellengleichung in sphärischen Koordinaten

In folgendem Absatz wird die Herleitung der Wellengleichung nach [8] vorgestellt.

2.3.1 Wellengleichung

Die lineare verlustfreie Wellengleichung für den Schalldruck in der Zeitdomäne kann nach [6], [8] wie folgt angeschrieben werden:

$$\Delta p(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{c^2} \ddot{p}(\mathbf{r}, t) \tag{2.7}$$

Hierbei ist \mathbf{r} ein Vektor im \mathbb{R}^3 -Raum, t die Zeitvariable, c die Schallgeschwindigkeit, $\nabla = \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}$ der Gradient, $\Delta = \nabla^T \nabla$ der Laplace-Operator, $\dot{(\cdot)} = \partial/\partial t$ die erste und $\dot{(\cdot)} = \partial^2/\partial^2 t$ die zweite Ableitung nach der Zeit.

Unter der Verwendung der Relation

$$\mathcal{F}\left(\frac{\partial p(t)}{2\pi}\right) = -i\omega\bar{p}(\omega),\tag{2.8}$$

wobei $\bar{p}(\omega)$ die stationäre Lösung darstellt, kann die Fouriertransformation der Wellengleichung berechnet werden, woraus sich die Helmholtz-Gleichung ergibt:

$$\Delta p(\mathbf{r}, \omega) + k^2 p(\mathbf{r}, \omega) = 0 \tag{2.9}$$

Das Koordinatensystem wird in die sphärische Domäne gebracht.

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cdot \sin \vartheta \cos \varphi \\ r \cdot \sin \vartheta \sin \varphi \\ r \cdot \cos \vartheta \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad \tilde{\mathbf{r}} = \begin{pmatrix} r \\ \vartheta \\ \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \arctan \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \right) \\ \arctan \left(\frac{y}{x} \right) \end{pmatrix}$$
(2.10)

Gleichung 2.7 kann mit Hilfe der Koordinatentransformation in Gleichung 2.10 wie folgt ausgeschrieben werden:

$$\Delta p(\mathbf{r}, t) = \Delta_r p(\mathbf{r}, t) + \Delta_{\vartheta} p(\mathbf{r}, t) + \Delta_{\varphi} p(\mathbf{r}, t)$$
(2.11)

$$= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\sin \vartheta \frac{\partial p}{\partial \vartheta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \vartheta} \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$
(2.12)

Durch das Trennen der Variablen und den Produktansatz kann eine homogene Lösung der Helmholtzgleichung nach [8] gefunden werden.

$$p(\tilde{\mathbf{r}}, t) = p(r, \vartheta, \varphi, t) = R(r)\Theta(\vartheta)\Phi(\varphi)T(t)$$
(2.13)

Aus dem Produktansatz ergeben sich vier Differentialgleichungen, wobei m und n ganze Zahlen sind.

$$\frac{\mathrm{d}^2\Phi}{\mathrm{d}\varphi} + m^2\Phi = 0 \tag{2.14}$$

$$\frac{1}{\sin \vartheta} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\vartheta} \left(\sin \vartheta \frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}\vartheta} \right) + \left[n(n+1) - \frac{m^3}{\sin^2 \vartheta} \right] \Theta = 0 \tag{2.15}$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r} \left(r^2 \frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}r} \right) + k^2 R - \frac{n(n+1)}{r^2} = 0 \tag{2.16}$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\mathrm{d}^2 T}{\mathrm{d}t^2} + k^2 T = 0 \tag{2.17}$$

Weiterhin können die allgemeinen Lösungen dieser Differentialgleichungen gefunden werden:

$$\Phi(\varphi) = \Phi_1 e^{jm\varphi} + \Phi_2 e^{-jm\varphi} \tag{2.18}$$

$$\Theta(\vartheta) = \Theta_1 P_n^m(\cos \vartheta) + \Theta_2 Q_n^m(\cos \vartheta) \tag{2.19}$$

$$R(r) = R_1 h_n^{(1)}(kr) + R_2 h_n^{(2)}(kr)$$
(2.20)

$$T(\omega) = T_1 e^{j\omega t} + T_2 e^{-j\omega t}$$
(2.21)

 $P_n^m(x)$ und $Q_n^m(x)$ geben die zugehörigen Legendre-Funktionen erster und zweiter Art an. $h_n^{(1)}(x)$ und $h_n^{(2)}(x)$ sind die sphärischen Hankel-Funktionen erster und zweiter Art. Die Variable m muss

ganzzahlig sein um eine Diskontinuität in Azimutrichtung zu vermeiden. Durch $m \in \mathbb{Z}$ kann in Gleichung 2.18 der Term Φ_2 Null gesetzt werden. Auch der Term Θ_2 kann Null gesetzt werden, da die Legendre-Funktionen zweiter Art Polstellen bei $\vartheta = 0$ und $\vartheta = \pi$ besitzen und somit dort singulär sind. Die Variable n muss ganzzahlig sein um Singularitäten an den Polstellen zu vermeiden [8], [10].

2.4 Sphärische Harmonische

Die Sphärischen Harmonischen, auch Kugelflächenfunktionen genannt, sind ein Satz vollständiger und othonormaler Eigenfunktionen des Winkelanteils des Laplace-Operators. Die Kugelflächenfunktionen entstehen durch Kombination von Gleichung 2.18 und Gleichung 2.19.

$$Y_{n,m}(\vartheta,\varphi) = \sqrt{\frac{(2n+1)}{4\pi} \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} \cdot P_n^m(\cos\vartheta) e^{jm\varphi}$$
 (2.22)

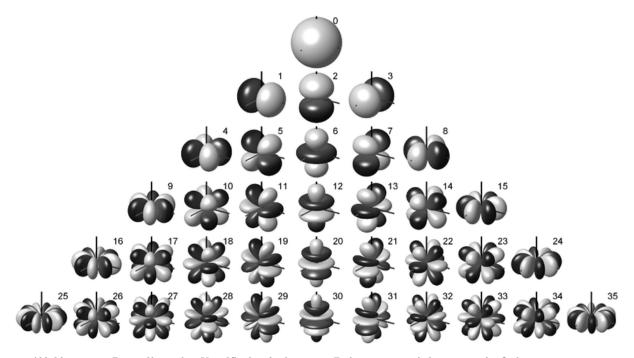


Abbildung 2.1: Darstellung der Kugelflächenfunktionen. Zeilenweise wird die steigende Ordnung $0 \le n \le 5$ dargestellt; Spaltenweise, von der Mitte aus, werden die 2n+1 Harmonischen mit Grad $-n \le m \le n$ dargestellt. [11]

Die negativen sphärischen Harmonischen Funktionen können mit folgender Gleichung aus den positiven Funktionen berechnet werden:

$$Y_{n,m}(\vartheta,\varphi) = (-1)^m \cdot (Y_{n,m}(\vartheta,\varphi))^*$$
(2.23)

Da die Kugelflächenfunktionen orthonormal sind wird das innere Produkt zweier Kugelflächenfunktionen gleich eins falls beide gleiche Ordnung besitzen und es gilt folgende Gleichung:

$$\int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\pi} Y_{n,m}(\vartheta,\varphi) [Y_{n',m'}(\vartheta,\varphi)]^* \sin \vartheta \, d\vartheta d\varphi = \delta_{nn'} \delta_{mm'}$$
 (2.24)

Die Kronecker Delta Funktion δ_{xy} ist 1 für den Fall, dass x=y und ansonsten 0. Für jeden vollständigen Satz an orthonormalen Funktionen $U_n(\zeta)$ existiert eine Vollständigkeitsrelation

gegeben durch:

$$\sum_{n=1}^{\infty} U_n^*(\zeta') U_n(\zeta) = \delta(\zeta' - \zeta)$$
(2.25)

Durch Kombination von Gleichung 2.24 und Gleichung 2.25 ergibt sich die Vollständigketsrelation der Kugelfächenfunktionen.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^{n} Y_{n,m}(\vartheta,\varphi) Y_{n,m}(\vartheta',\varphi')^* = \delta(\varphi - \varphi') \delta(\cos \vartheta - \cos \vartheta')$$
 (2.26)

Aufgrund der Orthogonalität und Vollständigkeit der Kugelflächenfunktionen kann gezeigt werden, dass jede beliebige Funktion auf einer Kugeloberfläche durch Kugelflächenfunktionen ausgedrückt werden kann.

2.5 Richtcharakteristik mit Sphärischen Harmonischen

In [12] wird die Richtcharakteristik als das abgestrahlte akustische Feld um eine Kugel welche die Schallquelle gerade noch einschließt definiert, d.h.:

$$W(r, \vartheta, \varphi, \omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^{n} \underbrace{\breve{W}_{n,m}(\omega) h_n^{(1)} \left(\omega \frac{r}{c}\right)}_{\mathring{W}_{n,m}(r,w)} Y_{n,m}(\vartheta, \varphi)$$
(2.27)

Hierbei stellt $h_n^{(1)}(\cdot)$ die n-te sphärische Hankel Funktion dar und $Y_{n,m}(\vartheta,\varphi)$ sind die sphärischen harmonische Basisfunktionen welche in Abschnitt 2.4 eingeführt wurden. $\check{W}_{n,m}$ sind die Koeffizienten welche Informationen über die Richtcharakteristik der Schallquelle enthalten und wie folgt ausgedrückt werden:

$$\check{W}_{n,m} = \frac{1}{h_n^{(1)}(\omega \frac{R}{c})} \int \int_{S^2} W(R, \vartheta, \varphi, \omega) \, Y_{n,m}(\vartheta, \varphi) \, d\Omega \tag{2.28}$$

 $W(R, \vartheta, \varphi, \omega)$ ist eine bekannte Richtcharakteristik auf einer sphärischen Oberflache mir Radius R welche die Schallquelle einhüllt, S^2 ist die Einheitssphäre und Ω ist ein infinitesimales Flächenelement darauf.

Um in der Praxis auf $W_{n,m}$ zu schließen kann eine Anpassung der Koeffizienten nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (least-squares fit) aus einer Reihe diskreter Messpunkte erfolgen. Gegeben seien L Messpunkte $\mathbf{r}_q = [R, \vartheta_q, \varphi_q]$ mit den Winkeln ϑ_q, φ_q für $q_l = 1, \ldots, L$. Die dazugehörigen gemessenen Richtcharakteristiken W_q können in einem Spaltenvektor als $\mathbf{W} = [W_1, \ldots, W_L]^T$ angeschreiben werden. Gleichung 2.27 kann für n < N als Vektror-Matrix Multiplikation angeschrieben werden:

$$\mathbf{W} = \mathbf{Y} \, \mathring{\mathbf{W}} \tag{2.29}$$

Hierbei ist \mathbf{Y} eine $N \times N$ -Matrix von Kugelflächenfunktionen

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{0,0}(\vartheta_1, \varphi_1) & Y_{1,-1}(\vartheta_1, \varphi_1) & \dots & Y_{N,N}(\vartheta_1, \varphi_1) \\ Y_{0,0}(\vartheta_2, \varphi_2) & \ddots & \ddots & Y_{N,N}(\vartheta_2, \varphi_2) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ Y_{0,0}(\vartheta_L, \varphi_L) & Y_{1,-1}(\vartheta_L, \varphi_L) & \dots & Y_{N,N}(\vartheta_L, \varphi_L) \end{bmatrix}$$
(2.30)

und

$$\mathbf{\mathring{W}} = [\mathring{W}_{0,0}(R,\omega), \mathring{W}_{1,-1}(R,\omega), \dots, \mathring{W}_{N,N}(R,\omega)]^T$$
(2.31)

Falls $L \ge (N+1)^2$ kann Gleichung 2.29 mit Hilfe einer Moore-Penrose-Pseuodinversen, angeschrieben als $(\cdot)^{\dagger}$, gelöst werden, sodass

$$\mathring{\mathbf{W}} = \mathbf{Y}^{\dagger} \mathbf{W} \tag{2.32}$$

Mit diesen Koeffizienten kann schließlich mittels Gleichung 2.27 auf die Richtcharakteristik der Schallquelle rückgeschlossen werden.

2.6 Das SOFA-Format

Das SOFA-Dateiformat (Spatially Oriented Format for Acoustics) wurde zur Speicherung räumlich orientierter akustischer Daten entwickelt. Beispielsweise können hiermit Außenohrübertragungsfunktionen (HRTFs) und binaurale oder räumliche Raumimpulsantworten (BRIRs, SRIRs) abgespeichert werden. SOFA wurde von der Audio Engineering Society (AES) als AES69-2015 standardisiert [13], [14], wobei der Fokus auf Austauschbarkeit und Erweiterbarkeit gelegt wurde. Das Dateiformat eignet sich ebenso zum Abspeichern und Austausch von Lautsprecherrichtcharakterstiken [15]. Um das Abspeichern der gemessenen Daten zu ermöglichen, muss auf dem Rechner die Matlab SOFA API¹ installiert sein. Das SOFA-Format beinhaltet verschiedene Objekte, welche wie folgt definiert sind:

- Receiver beschreibt einen akustischen Sensor wie beispielsweise ein Ohr oder ein Mikrofon. Im SOFA-Format kann eine beliebige Anzahl Sensoren angelegt werden.
- Listener ist das Objekt welches die Receiver beinhaltet, beispielsweise ein Kunstkopf oder ein Mikrofonarray.
- *Emitter* beschreibt eine Schallquelle im Messaufbau. Auch die Anzahl dieser ist frei wählbar.
- Source beinhaltet alle Emitter im Messaufbau, wie beispielsweise bei einem Lautsprecherarray oder einem Chor.
- Room beinhaltet Informationen über den Messraum. Bei Messungen in einer reflexionsarmen Umgebung kann diese Information vernachlässigt werden.

Diese Objekte werden untereinander mittels karthesischen oder sphärischen Koordinaten in Verbindung gesetzt. Im SOFA-Format werden neben den Messdaten ebenso die Metadaten der Messung abgespeichert.

https://sourceforge.net/projects/sofacoustics/



In folgendem Kapitel wird der für die Messungen benötigte physische Aufbau beschrieben. Dieser besteht aus der halbkreisförmigen Mikrofonanordnung, dem Drehteller mit Lautsprecherstativ und den dazugehörigen Signalwegen.

3.1 Mikrofonanordnung

Für den Aufbau wurden 13 Behringer ECM-8000² benutzt. Diese wurden mit Manfrotto 035 Super Clamps auf einem aus zwei Viertelkreistraversen bestehenden Halbkreis in einem Abstand von $\Delta\vartheta=15^\circ$ befestigt. Die Traversen werden mittels zweier einstellbarer Stative auf die gewünschte Höhe gebracht. In Abbildung 3.1 ist die benutzte Mikrofonanordnung abgebildet. Im derzeit als Messraum benutzten Aufnahmeraum des SPSC Tonstudios³ ist die Montage eines vollständigen Traversenkreises nicht möglich, da dafür eine Raumhöhe von mindestens 3 m nötig wäre. Daher ist es derzeit von Nöten den Lautsprecher bei der Hälfte der Messung zu wenden und so die Abstrahlung in der unteren Halbebene aufzunehmen. Mit der Montage eines vollständigen Kreises würden für eine zenitale Auflösung von $\Delta\vartheta=15^\circ$ 24 Mikrofone benötigt werden. Die benutzten Mikrofone haben den Nachteil, dass deren Betrags- und Phasenfrequenzgänge eine große Streuung aufweisen. In Kapitel 6 werden diesbezüglich mögliche Verbesserungsvorschläge und aktuelle Projekte vorgestellt.

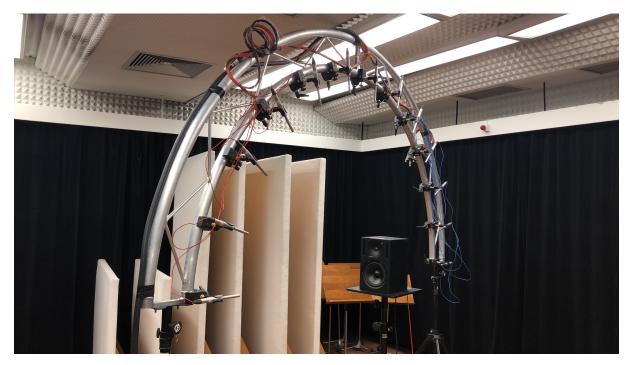


Abbildung 3.1: Halbkreisförmige zwei-Punkt Traversenanordnung mit angebrachten Mikrofonen.

https://www.thomann.de/de/behringer_ecm_8000.htm

https://www.spsc.tugraz.at/lab-facilities/recording-studio.html

3.2 Drehteller

Ein grundlegender Teil des Messaufbaus ist der Drehteller. Dieser besteht aus einer Bodenplatte, auf welcher alle elektromechanischen Komponenten montiert sind, und einem darauf liegenden Teller mit einer Teleskopstange zur Montage des zu vermessenden Lautsprechers. Auf diese Teleskopstange kann eine Tischhalterung oder eine Gewindehalterung montiert werden. Die elektromechanischen Komponenten teilen sich auf in:

- Drehtisch IEF Werner DT 80/100H⁴
- Servoverstärker IEF Werner LV servoTEC $S2^5$
- Spannungsversorgung
- Not-Aus-Schalter
- Freigabeschalter
- Verkabelung

Im Servoverstärker können 16 verschiedene absolute oder relative Positionen mittels der mitgelieferten Software (IEF Werner S2 Commander) abgespeichert werden. Diese können schließlich über die digitalen Eingänge des Servoverstärker aufgerufen werden. Der Servoverstärker bietet neben den erwähnten digitalen Eingängen weitere Verbindungsmöglichkeiten, wie beispielsweise RS 232, RS 485, CANopen (DS 402), Ethernet und USB.

Es wurde entschieden dem Benutzer die Möglichkeit einzuräumen zwischen einer azimutalen Auflösung von $\Delta \varphi = [5^{\circ}, 10^{\circ}, 15^{\circ}]$ zu wählen. Eine feinere oder gröbere azimutale Auflösung ist für die Aufnahme von Richtcharakteristiken nicht üblich. Es wurde entschieden die relativen Positionsangabe und weitere nützliche Positionen, wie beispielsweise die Rückkehr zum Startpunkt oder die Referenzfahrt, direkt im Servoverstärker abzuspeichern. Diese können schließlich mit Hilfe der Herstellersoftware S2 Commander aufgerufen werden. Genauere Ausführungen hierzu werden in Abschnitt 4.4 beschrieben. Ein Bild des aufgebauten Drehtellers ist in Abbildung 3.2 ersichtlich. In Abbildung 3.3 sind die oben angeführten elektromechanischen Komponenten abgebildet.

https://www.ief.de/produkte/komponenten/drehtische/dt-80100/

⁵ https://www.ief.de/produkte/komponenten/steuerungstechnik/lv-servotec-s2-fs/



 $Abbildung\ 3.2:\ Drehteller\ mit\ Teleskopstange\ und\ Lautsprecher.$



 $Abbildung\ 3.3:\ Elektromechanische\ Komponenten\ des\ Drehtellers.$

3.3 Signalwege

Für die Messung der Richtcharakteristik eines Lautsprechers sind insgesamt mindestens 14 Audiokanäle notwendig. Es handelt sich dabei um 13 Mikrofoneingänge und einen Ausgangskanal hin zum Lautsprecher. Das derzeit am LAWO mc²66 Mischpult konfigurierte Preset benutzt im Aufnahmeraum die ersten 13 Mikrofoneingänge und den zweiten Ausgangskanal. Die Kanäle werden im Mischpult gepatcht und im Aufnahmerechner mit der App verbunden.

Für die Steuerung des Drehtellers wurde, wie schon in Abschnitt 3.2 erwähnt, eine Netzwerkverbindung gewählt. Die Steuerung erfolgt über einen zweiten Rechner mit der Software S2 Commander, wie in Abbildung 3.4 dargestellt ist.

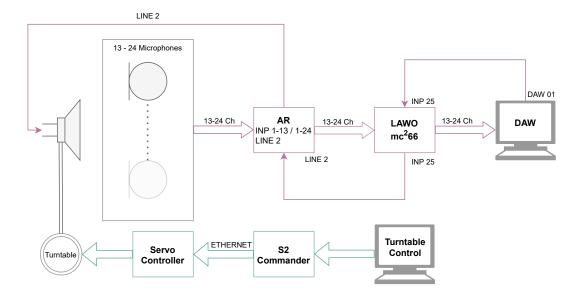


Abbildung 3.4: Flussdiagramm der Signalwege des Messaufbaus zur Messung der Abstrahlcharakteristiken.

4

Programmaufbau

4.1 Graphische Oberfläche

In diesem Abschnitt wird der Aufbau der programmierten App zur Messung und Darstellung von Richtcharakteristiken von Lautsprechern erläutert. Das Design der App wurde möglichst schlicht und übersichtlich gehalten. Die App, deren Startseite in Abbildung 4.1 ersichtlich ist, unterteilt sich in vier verschiedene Sektionen (Tabs):

- Input Data: In dieser Sektion werden Metadaten und Einstellungen abgespeichert.
- Measurement : Diese Sektion ist der Durchführung der Messung gewidmet.
- View: Die Messergebnisse werden nach den nötigen Berechnungen in dieser Sektion dargestellt.
- Save: Die letzte Sektion dient dem Abspeichern der Daten und der Auswahl der gewünschten Formate.

Genauere Details zu den einzelnen Sektionen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Bei den durchgeführten Messungen handelt es sich um Impulsantwortmessungen. Hierfür wird die aus der ITA-Toolbox [16] stammende itamstf - Klasse verwendet. Viele der Einstellungen welche in der ersten Sektion getätigt werden beziehen sich auf diese Klasse. Für die weitere Signalverarbeitung wurden keine weiteren Klassen aus der ITA-Toolbox benutzt.

Der genaue Ablauf des Programms wird in Abschnitt 4.8 graphisch, mit Hilfe eines Flussdiagramms abgebildet.

Die App wurde mit dem Akronym "TMDP" benannt. Dieses steht für Tool for Measurement of Directivity Patterns und wird auch für weitere Namensgebungen benutzt, beispielsweise der .tmdpps Preset-Files oder des .tmdpf-Files zum Abspeichern einer vollständigen Messung.

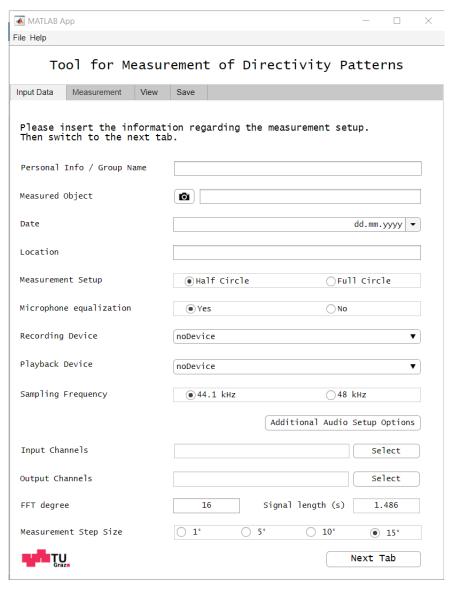


Abbildung 4.1: Startseite der TMDP-App.

4.2 Dateneingabe und Einstellungen

Wie in Abbildung 4.1 dargestellt wird, werden auf der Startseite der App die erforderlichen Dateneingaben und Einstellungen durchgeführt. Damit zum nächsten Tab und somit zum nächsten Messabschnitt gewechselt werden kann, müssen die notwendigen Informationen auf der Startseite angegeben worden sein. Die einzelnen Eingabefelder werden im folgenden Absatzt beschrieben:

- Personal Info / Group Name: In diesem Eingabefeld soll angegeben werden wer bzw., im Falle der Messdurchführung im Zuge einer Lehrveranstaltung, welche Gruppe die Messung durchgeführt hat. Diese Information kann im "Save"-Tab zur automatischen Erstellung eines Ordners benutzt werden.
- Measured Object: In diesem Feld soll die genaue Marke und das Modell des zu vermessenden Lautsprechers und womöglich auch die genaue Seriennummer angegeben werden. Es kann hier ebenfalls ein Bild zur genauen Identifikation hochgeladen werden.
- Date: Die Eingabe des Datums der Messung passiert automatisiert basierend auf jenen im Rechner. Diese Information wird bei Benutzung eines Presets nicht eingefügt.

- Location: In diesem Feld soll der genaue Ort, an dem die Messung durchgeführt wird, angegeben werden.
- Measurement Setup: Hier kann zwischen der Messung mit der Mikrofonanordnung im Halbkreis oder im ganzen Kreis ausgewählt werden.
- Microphone Equalization: Hier kann ausgewählt werden ob die Mikrofonentzerrung durchgeführt werden soll.
- Recording Device: Hier erfolgt die Auswahl des Aufnahmegerätes. Es werden hier die ASIO-Geräte welche vom Rechner erkannt werden aufgelistet.
- Playback Device: Hier wird das Abspielgerät, welches in den meisten Fällen dem Aufnahmegerät entspricht, ausgewählt.
- Sampling Frequency: Hier kann die Abtastfrequenz des Aufnahmegerätes eingestellt werden. Die aktuelle Auswahl wird vom gewählten Aufnahmegerät übernommen.
- Additional Audio Setup Options: Mit dem Drücken dieses Knopfes werden weitere Einstellmöglichkeiten der ITA-Toolbox [16] aufgerufen.
- Input Channels: Hier werden die gewählten Eingangskanäle angegeben. Um diese Auszuwählen muss auf den "Select"-Knopf gedrückt werden. Dadurch geht ein weiteres Fenster, in welchem Ein- und Ausgangskanäle ausgewählt werden können, auf. Es werden standardmäßig die ersten 13 bzw. 24 Eingangskanäle und der erste Ausgangskanal ausgewählt.
- Output Channels: In diesem Feld werden die gewählten Ausgangskanäle angezeigt. Die Vorgehensweise ist die selbe wie bei der Auswahl der Eingangskanäle. Das Fenster zur Auswahl der Kanäle ist in Abbildung 4.2 ersichtlich.
- FFT Degree and Signal length: Hier kann der FFT-Grad und dadurch auch die Sweep-Länge eingestellt werden.
- Measurement Step Size: Mit dieser Einstellung kann entschieden werden in welcher azimutalen Auflösung $\Delta \varphi$ sich der Drehteller bewegt.

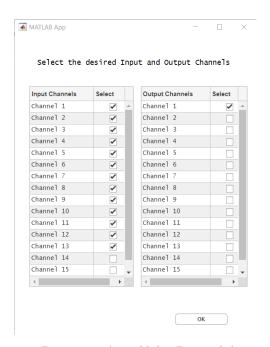


Abbildung 4.2: Fenster zur Auswahl der Ein- und Ausgangskanäle.

4.2.1 Abspeichern eines Presets

In der oberen Menüleiste kann unter File > Save Preset ein Preset abgespeichert werden. Das Preset ist dafür gedacht, bei Notwendigkeit wiederholter Messungen, immer die gleichen Einstellungen und Angaben aufrufen zu können. Dadurch können vergleichbare Messungen mit geringerem Zeitaufwand durchgeführt werden. Im Preset, welches die Dateiendung .tmdpps besitzt, werden alle oben erläuterten Einstellungen abgespeichert. Unter File > Load Preset kann ein Preset aufgerufen werden, wodurch alle Einstellungen und Angaben übernommen werden. Nur das genaue Datum und die Uhrzeit werden nicht aus dem Preset ausgelesen.

4.3 Kalibrierung und Messung

Der nächste Tab in der App ist der Durchführung der Messung gewidmet. Um diesen Bereich erreichen zu können müssen alle notwendigen Eingaben und Einstellungen im "Input Data"-Tab eingetragen sein oder von einem Preset-File geladen worden sein. Eine Abbildung dieser Seite ist in Abbildung 4.3 ersichtlich.

4.3.1 Kalibrierung

Der erste Schritt nach dem Erreichen dieser Seite ist die Mikrofonkalibrierung, bei der für jedes einzelne Mikrofon dessen Sensitivität ermittelt werden muss. Für diesen Zweck wird die in der ITA-Toolbox eingebundene graphische Oberfläche genutzt. Ein Klasse 1 Schallkalibrator der Firma Brüel & Kjær wird auf ein einzelnes Mikrofon aufgesteckt und das entsprechende Mikrofon wird kalibriert. Dieser Vorgang wird subsequent für jedes Mikrofon des Messaufbaus wiederholt. Durch diese Kalibrierung wird nicht nur die Sensitivität des Mikrofons sondern jene der gesamten Messkette, samt AD-Wandlung und Vorverstärkung, ermittelt. Da dieser Prozess zeitaufwendig ist und die Sensitivität sich bei der Durchführung mehrerer Messungen mit dem gleichen Messaufbau nicht ändert, besteht die Möglichkeit diese Daten im in Unterabschnitt 4.2.1 erläuterten Preset-File abzuspeichern und bei einer zukünftigen Messung wieder aufzurufen. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die eingestellten Vorverstärkungspegel im LAWO mc²66 Mischpult immer gleich bleiben. Diese werden demnach für alle Kanäle gleich eingestellt und schließlich in der App eingegeben. Beim Aufrufen eines Preset wird der Nutzer darauf hingewiesen die Pegel der Vorverstärker im LAWO mc²66 entsprechend einzustellen.

4.3.2 Durchführung einer Messung

Nachdem die Kalibrierung durchgeführt wurde, kann die tatsächliche Messung gestartet werden. Die Messung verläuft automatisiert, jedoch besteht bei Benutzung der Halbkreisanordnung die Notwendigkeit den Lautsprecher bei der Hälfte der Messungen um die Achse der Normalabstrahlung um 180° zu drehen. Während der Messung wird dem Nutzer die aktuelle Position angegeben und graphisch dargestellt und es besteht jederzeit die Möglichkeit die Messung abzubrechen. Für die Durchführung der Messung wird die aus der ITA-Toolbox stammende itamstf-Struktur benutzt, welcher die notwendigen Einstellungen im "Input Data"-Tab übermittelt wurden. Im Zuge der Messung wird ein Exponential-Sweep durch den Lautsprecher abgespielt und die Impulsantwort des Lautsprechers an jeder Mikrofonposition aufgenommen. Die Impulsantworten werden schließlich auf 2048 Samples zugeschnitten und in einer für weitere Berechnungen nützlichen Anordnung abgespeichert. Danach wird der Drehteller um den angegebenen Winkelsschritt $\Delta \varphi$ weiterbewegt. Nach einer vollständigen Messung stehen die Impulsantworten in einer dreidimensionalen Matrix $[M \times N_{\varphi} \times N_{\vartheta}]$ zur Verfügung. Hierbei stellt N_{φ} die Anzahl der azimutalen

Abtastpunkte, N_{ϑ} die Anzahl der Datenpunkte in zenitaler Richtung und M die Länge der Impulsantworten dar.

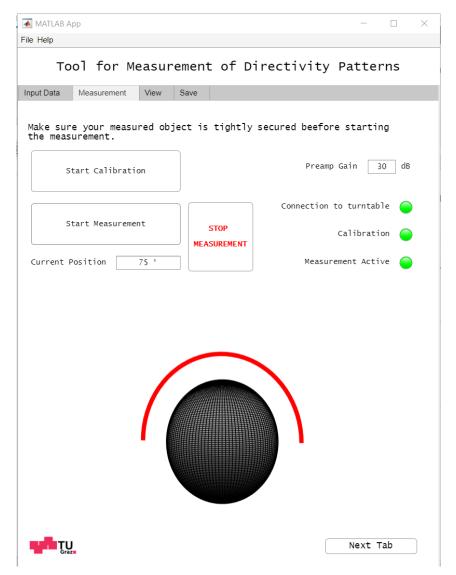


Abbildung 4.3: Durchführung einer Messung in der TMDP-App.

4.4 Steuerung des Drehtellers

Durch die Nutzung eines Drehtellers kann eine schnelle und präzise Messung von Richtcharakteristiken durchgeführt werden. Der Aufbau und die Funktionsweise des Drehtellers wurde in Abschnitt 3.2 eingeführt, hier wird die Steuerung dessen erläutert. Zur Steuerung des Drehtellers wird zurzeit die Herstellersoftware (IEF WERNER S2 Commander) auf einem gesonderten Rechner benutzt. Der erste Schritt für die Nutzung des Drehtellers ist die Ethernet-Verbindung herzustellen. Nach dem Öffnen der Herstellersoftware, wird der Nutzer gefragt welche Verbindungsart ausgewählt werden soll, wobei UDP (Ethernet) ausgewählt werden soll. Es muss hierbei darauf geachtet werden, dass die richtigen IP-Einstellungen getätigt wurden. Bei der Benutzung eines neuen PCs kann zuerst die Verbindung durch USB erfolgen und schließlich die richtige IP-Adresse eingefügt werden oder die Suchfunktion unter Options > Communication >

die Einstellungen direkt vom Drehteller übernommen werden. Danach soll zuerst eine Referenzfahrt getätigt werden wofür der Freigabeschalter gedrückt sein muss. Schließlich können die gewünschten Positionen angefahren werden und eine Messung durchgeführt werden. Eine genaue Bedienungsanleitung kann in Anhang A gefunden werden.

4.5 Entzerrung der gemessenen Frequenzgänge

Nach der Durchführung erster Messungen im Aufnahmeraum des Tonstudios in der Inffeldgasse 12 der Technischen Universität ${\rm Graz}^6$ und der Auswertung dieser wurden mehrfache Einbrüche in den gemessenen Frequenzgängen bemerkt. Diese führten zu stark verzerrten Darstellungen der Richtcharakteristik. Die Ursache dieser Einbrüche liegt womöglich bei Reflexionen an den Traversen und an den Raumbegrezungsflächen welche schließlich zu frequenzabhängigen Auslöschungen führen. Um dieses Problem zu lösen wurden die aufgenommenen Impulsantworten zunächst auf 2048 Samples gekürzt, da man davon ausgehen kann, dass spätere Samples keinen Direktschall mehr enthalten. Ebenso werden die gemessenen Frequenzgänge mit Hilfe der MAT-LAB-Funktion smoothspectrum⁷ geglättet. Diese Funktion berechnet den i-ten oktavbandgeglätteten spektralen Koeffizienten als Summe der Gauss-gefensterten Spektren um die Mittenfrequenz f(i) [17].

4.6 Darstellung der Messergebnisse

Beim Übergang in den "View"-Tab wird zunächst die in Abschnitt 4.5 eingeführte Glättung der gemessenen Spektren durchgeführt. Wie in Abbildung 4.4 ersichtlich, wird dem Nutzer schließlich die Möglichkeit geboten die Richtcharakteristik bei der gewünschten Frequenzen darstellen zu lassen. Hierbei kann der Nutzer entscheiden die gewünschten Frequenzen in Oktav- oder Terzbandschritten darzustellen. Hierzu können sowohl die Pfeiltasten als auch der Schieberegler genutzt werden. Der Nutzer kann ebenso die Richtcharakteristik bei einer spezifischen Frequenz durch direkte Eingabe oder mit dem Schieberegler darstellen lassen. Die Darstellung kann schließlich beliebig rotiert, verkleinert oder vergrößert werden. Die Darstellung der Messergebnisse basiert auf den in Abschnitt 2.5 eingeführten theoretischen Grundlagen. Zunächst werden mit einem LMS-Algorithmus die Koeffizienten der sphärische Harmonischen den Messdaten angepasst. Diese Koeffizienten \mathring{W} werden schließlich zur Berechnung der Richtcharakteristiken nach Gleichung 2.27 benutzt. Die programmierten Funktionen basieren auf den in [12] eingeführten Grundlagen und Funktionen⁸.

⁶ https://www.spsc.tugraz.at/lab-facilities/recording-studio.html

⁷ https://github.com/IoSR-Surrey/MatlabToolbox

⁸ https://github.com/AppliedAcousticsChalmers/sound-source-directivities

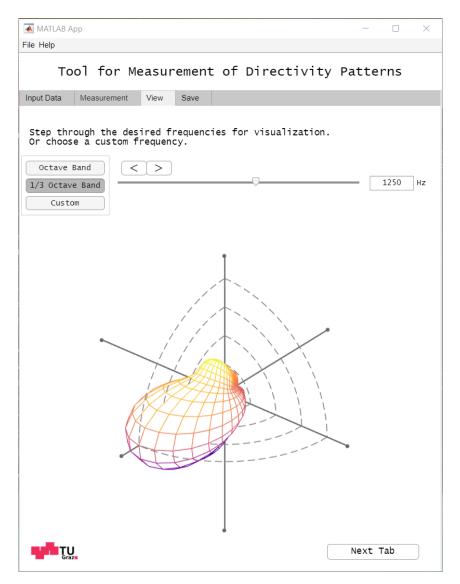


Abbildung 4.4: Darstellung der Messergebnisse in der TMDP App.

4.7 Speichern der Messergebnisse

In der letzten Programmsektion können die Messergebnisse in verschiedenen Formaten abgespeichert werden. Der Aufbau dieser Sektion ist in Abbildung 4.5 ersichtlich. An erster Stelle kann der Nutzer den Ordner auswählen in dem die Daten abgespeichert werden. Alternativ wird dem Nutzer die Möglichkeit geboten direkt einen neuen Ordner mit den angegebenen persönlichen Daten bzw. dem Namen des vermessenen Objektes als Namen in einem vordefinierten Pfad per Knopfdruck zu erstellen. Der nächste Schritt besteht in der Auswahl der darzustellenden Frequenzen. Hier gibt es die Möglichkeit zwischen Oktav-, Terbandauflösung oder händisch eingetragenen Frequenzen zu wählen. Diese Auswahl ist für die Erzeugung des PDF Reports und der Bilder notwendig. Schließlich kann der Nutzer wählen in welchen Formaten er die Daten abgespeichert haben will. Zur Auswahl stehen ein PDF Report, einzelne Bilder im .jpg- und .eps-Format, die Abspeicherung im .SOFA-Format ebenso wie das Abspeichern der vollständigen Messdaten im .tmdpf-Format oder das Abspeichern eines Presets im .tmdpps-Format. Wie schon in Abschnitt 4.2 angedeutet, sind die Presets dafür gedacht die Metadateneingabe und den Kalibrierungsprozess zu beschleunigen. Das .tmdpf-Format ist hingegen dafür gedacht die vollständigen Messdaten, d.h. alle Einstellungen und Eingaben, die Kalibrierdaten, die aufgenommenen Impulsantworten und Frequenzgänge, sowie die berechneten Koeffizienten und Messpositionen abzuspeichern. Das File kann schließlich für spätere Auswertungen und Berechnungen direkt in der TMDP-App unter File > Open Full Measurement oder in MATLAB geöffnet werden. Um das File in MATLAB zu öffnen ist folgender Befehl nötig:



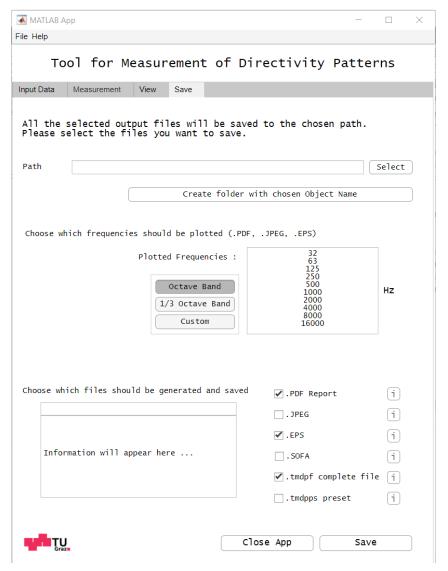


Abbildung 4.5: Speicher-Sektion in der TMDP-App.

4.7.1 Erzeugung eines Berichtes

Für den Nutzer besteht die Möglichkeit der Erzeugung eines Berichtes in .PDF-Format. Dieses enthält die eingegebenen Informationen und getätigten Einstellungen und ebenso die Darstellungen der Richtcharakteristiken bei den ausgewählten Frequenzen. Hiermit wird dem Nutzer eine übersichtliche Zusammenfassung der durchgeführten Messung zur Verfügung gestellt. Für die Erzeugung des Berichtes erzeugt die App zunächst ein .tex-File welches direkt kompiliert wird. Es ist deswegen nötig auf dem Rechner MikTex und das Paket graphicx installiert zu haben.

4.7.2 Abspeichern im SOFA-Format

Der Nutzer hat ebenso die Möglichkeit die Messdaten im SOFA-Format abzuspeichern, welches den Austausch dieser erleichtert. Die Grundlagen des SOFA-Dateiformats (Spatially Oriented Format for Acoustics) wurden in Abschnitt 2.6 vorgestellt. Um das Abspeichern im SOFA-Format zu ermöglichen, muss die entwickelte SOFA-API für Matlab auf dem benutzten Rechner installiert sein.

4.8 Flussdiagramm

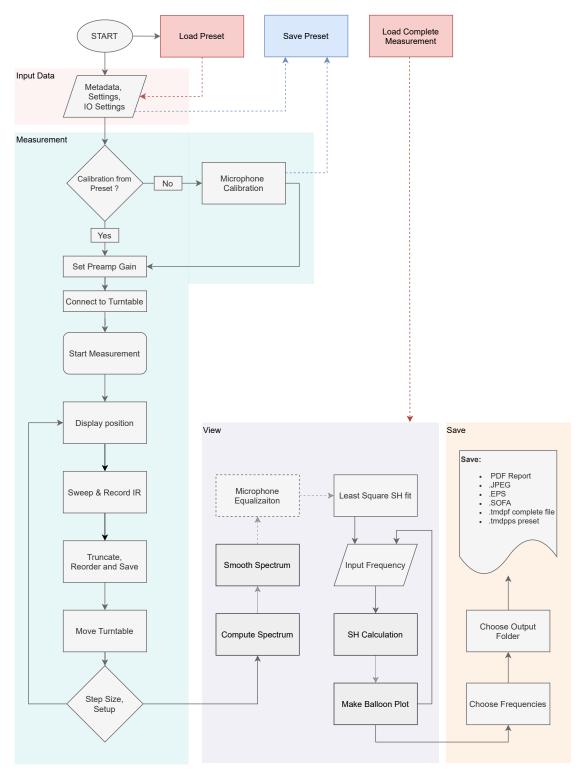


Abbildung 4.6: Flussdiagramm der TMDP-App zur Messung von Lautsprecherrichtcharakteristiken.

5

Testmessung

In folgendem Abschnitt wird der Ablauf einer Testmessung mit dem in Kapitel 3 und 4 präsentierten Messaufbau und der TMDP-App erklärt. Dieser soll als Vorlage für künftige Messungen dienen.

Aufbau und Inbetriebnahme

Traversen

Der erste Schritt besteht im Aufstellen der Traversen und der Positionierung und Verkabelung der Mikrofone. Ein geeigneter Weg ist den Aufbau am Boden zu tätigen und das Konstrukt in einem zweiten Schritt aufzustellen. Zunächst müssen die Traversen und die Ständer zusammengeschraubt werden. Schließlich werden die Mikrofonklemmen an den gekennzeichneten Stellen angebracht (die Markierung soll zentral unter den Klemmen liegen, außer an den beiden äußeren Klemmen) und die Mikrofone aufgesetzt. Hierbei muss beachtet werden, dass die Mikrofone in der richtigen Reihenfolge angebracht werden, falls ein Preset mit Kalibrationsdaten benutzt werden soll. Die Mikrofonschachteln sind von 1 bis 13 nummeriert und die Mikrofone sollen von links nach rechts angebracht werden. In Abbildung 5.2 werden die Mikrofone 1 bis 4 angebracht. Diese werden anschließend mit dem Multicore-Kabel verbunden, welches mit Hilfe von Kabelbindern ebenfalls an den Traversen festgemacht werden muss. Bei der Positionierung der Mikrofone soll schon zu diesem Zeitpunkt darauf geachtet werden, dass alle Mikrofone möglichst in der gleichen Position auf den Klemmen stecken und das alle Mikrofone auf den Mittelpunkt des halbkreisförmigen Messaufbaus zeigen. Danach kann der Messaufbau aufgestellt werden und in eine zentrale Raumposition gebracht werden.



Abbildung 5.1: Vollständig zusammengestellter und verkabelter halbkreisförmiger Aufbau.



Abbildung 5.2: Anbringen der Mikrofone 1 bis 4 auf den Klemmen an der Traverse.

Drehteller

Der nächste Schritt besteht im Zusammenbau des Drehtellers. Die gesamte Konstruktion befindet sich in einem Hardschalenkoffer und kann komplett aus diesem entnommen werden. Alternativ kann auch nur der Deckel des Hartschalenkoffers entfernt werden. Falls nötig, muss die Drehscheibe am Servomotor angeschraubt werden und schließlich muss die Distanzstange angeschraubt und der verwendete Aufsatz angebracht werden. Der Drehteller soll in der Mitte des Halbreises positioniert werden, wobei mit Hilfe eines Lasermessgerätes gearbeitet werden soll. Anschließend kann der Lautsprecher samt Stromversorgung und XLR-Verbindung angebracht werden.

Verbindungen

Die Mikrofone sollen schließlich an die im Aufnahmeraum stehende Stagebox angesteckt werden. Bei Benutztung der Halbkreisanordnung sollen die Kanäle 1-13 benutzt werden. Wie in Abbildung 5.3 sichtbar ist, muss dafür eine Breakout-Box benutzt werden. Bei der durchgeführten Messung wurden für die Mikrofone 1 bis 7 die roten Multicore-Kabel 1 bis 7 benutzt und für die Mikrofone 8 bis 13 wurden die blauen Kabel 1 bis 6 benutzt. Der zu vermessende Lautsprecher wird am zweiten Ausgang der Stagebox angeschlossen. Nach diesem Schritt kann auf dem Mischpult das geeignete Preset aufgerufen werden und die korrekte Funktionsweise der Mikrofone getestet werden. Der Drehteller wird mit 2 Ethernet-Kabeln über die Patchbay zwischen Aufnahmeraum und Regieplatz mit dem PC zur Steuerung des Drehtellers verbunden.

Mikrofonpositionen und Absorber

Sobald der gesamte Aufbau samt den Verbindungen steht, werden die Mikrofonpositionen feinjustiert und es können schließlich poröse Absorber rund um den Drehteller gelegt werden. Bodenreflexionen werden somit weitgehend eliminiert. Ebenfalls können die mobilen Absorberwände im Studio rund um den Aufbau aufgestellt werden. In Abbildung 5.4 ist der vollständige Aufbau samt absorbierendem Materialien in dessen Umfeld ersichtlich.

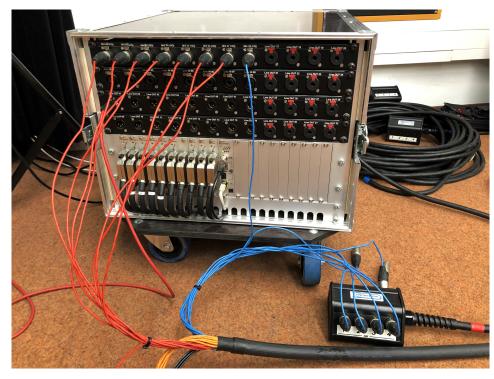


Abbildung 5.3: Eingangskanäle an der Stagebox.



Abbildung 5.4: Vollständiger Messaufbau mit absorbierendem Materialien am Boden und an den vertikalen Begrenzungsflächen.

Verbindung mit dem Drehteller

Auf dem Rechner zur Steuerung des Drehtellers muss nun das Programm S2 Commander geöffnet und die Ethernet-Verbindung mit dem Drehteller hergestellt werden. Vor Beginn der Messung muss der Freigabeschalter am Drehteller betätigt werden und eine Referenzfahrt durchgeführt werden. Im Programm kann hierfür die Funktion "Ziele anfahren" ausgewählt werden. Nach der Durchführung der Referenzfahrt wird der Lautsprecher auf das Mikrofon 1, das erste Mikrofon links, ausgerichtet. Das Fenster "Ziele anfahren" wird schließlich auch für das Ansteuern des Drehtellers benutzt. Wie in Abbildung 5.5 ersichtlich, können in diesem Fenster alle eingespeicherten absoluten und relativen Positionen angefahren werden. In Tabelle 5.1 sind die eingespeicherten Positionen und die zugehörigen $\Delta \varphi$ sowie die 0°-Position angeführt.



Abbildung 5.5: Das "Ziele Anfahren"-Fenster für die Durchführung der Referenzfahrt und die Ansteuerung des Drehtellers.

Position	Befehl
0	Fahre auf 0° (Startposition)
1	+15°
2	-15°
3	+10°
4	-10°
5	+5°
6	-5°

Tabelle 5.1: Eingespeicherte absolute und relative Positionen zur Ansteuerung des Drehtellers.

Dem Anhang A und Abschnitt 4.4 können weitere Informationen zur Verbindung mit dem Drehteller entnommen werden.

Routing am Lawo mc² 66

Die Ein- und Ausgangskanäle am Lawo mc²66 müssen korrekt geroutet werden um die Verbindung mit dem Rechner zu gewährleisten. Die Mikrofonkanäle werden auf die Eingangskanäle des DAW-"Directory" geroutet. Der erste Ausgangskanal aus dem DAW-"Directory" wird auf einen physischen Kanal am Mischpult und schließlich auf den zweiten Ausgangskanal im Aufnahmeraum geroutet. Die Ausgangslautstärke kann somit direkt über den Fader manipuliert werden. Das korrekte Routing kann durch Laden des Presets 20210614_Langgartner bzw. ROUTING_TMDP am Lawo mc²66 aufgerufen werden. Das Studiohandbuch⁹ bietet Auskunft über die Bedienung des Lawo mc²66.

https://download.spsc.tugraz.at/lab_facilities/recording_studio/Studiohandbuch_1.7.pdf

Durchführung einer Messung mit der TMDP-App

Nachdem der Aufbau und die Inbetriebnahme getätigt wurde kann schließlich die TMDP-App auf dem Studiorechner gestartet werden und die Messung durchgeführt werden.

Eingabe der Metadaten und Einstellungen

Nach dem Öffnen der App werden auf der Startseite die Eingabe der Metadaten und Einstellungen für die Messung getätigt. Diese Informationen können ebenso durch das Öffnen eines Presets oder einer vollständigen Messung eingegeben werden. Weitere Angaben zu diesem Punkt können dem Abschnitt 4.2 entnommen werden.

Kalibrierung

Nachdem die erforderlichen Daten auf der Startseite eingegeben wurden, kann zum nächsten Tab gewechselt werden. Auf dieser Seite wird nun erstmals die Kalibrierung der Mikrofonsensitivitäten durchgeführt, falls diese nicht von einer Preset-Datei geladen wurde. Die Vorverstärkungspegel am Lawo mc²66 müssen für alle Kanäle gleich eingestellt werden. Falls die Kalibrierdaten aus einer Preset-Datei geladen wurden, wird man darauf hingewiesen welchen Vorverstärkungspegel man am Lawo mc²66 einstellen muss. Für die Kalibrierung wird ein Klasse 1 Schallkalibrator auf ein Mikrofon gesteckt und dieses schließlich kalibriert indem den Anweisungen am Bildschirm gefolgt wird. Es erscheint ein Dialogfenster der ITA-Toolbox, welches in Abbildung 5.6 abgebildet ist. Als erstes soll auf die "Calibrate"-Taste gedrückt werden, worauf der gemessene Frequenzgang und die berechnete Sensitivität angezeigt werden. Ist der Wert plausibel, kann dieser akzeptiert werden und der Schallkalibrator auf das nächste Mikrofon gesetzt werden. Nach der Kalibrierung soll der am Lawo mc²66 eingestellte Vorverstärkungspegel, welcher für alle Kanäle gleich sein soll, in das Eingabefeld in der TMDP-App eingetragen werden.



Abbildung 5.6: Dialogfenster zur Sensitivitätskalibrierung der ITA-Toolbox.

Messung

Nachdem die Kalibrierung durchgeführt wurde kann schließlich die Messung gestartet werden. Man beachte, dass der Lautsprecher vor dem Start der Messung auf der richtigen Position sei. Nach dem Klicken der "Start Measurement"-Taste erfolgt die erste Messung. Danach wird der Nutzer darauf hingewiesen mittles der Software IEF Werner S2 Commander den Drehteller um $\Delta \varphi$ zu rotieren. Hier muss beachtet werden, dass jene Position angeklickt wird welche dem auf der Startseite angegebenen Winkelschritt entspricht (siehe Tabelle 5.1). Nachdem in der App bestätigt wurde, dass der Drehteller bewegt wurde,wird die nächste Messung durchgeführt. Nachdem die Position $180^{\circ} - \Delta \varphi$ erreicht wurde, muss schließlich der Lautsprecher um die Achse

seiner Normalabstrahlung um 180° gedreht werden. Der Drehteller wird durch Anklicken der Taste 0 im "Ziele Anfahren"-Fenster (siehe Abbildung 5.5) wieder auf die Startposition gebracht. Anschließend wird der zweite Teil der Messung in gleicher Weise durchgeführt.

Darstellung

Nach der Durchführung der Messung kann zum "View"-Tab gewechselt werden um die Messergebnisse anzuzeigen. Hier kann mittels Schieberegler oder Pfeiltasten zwischen einzelnen Frequenzen gewechselt werden und die entsprechende Richtcharakteristik angezeigt werden. Man hat die Möglichkeit zwischen Oktav-, Terzbandauflösung oder beliebigen Frequenzen zu wählen. In Abbildung 5.7 kann die Richtcharakteristik eines Neumann KH120A Lautsprechers bei 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 4000 Hz betrachtet werden. Man erkennt deutlich wie der Lautsprecher von einer annähernd kugelförmigen Schallabstrahlung bei tiefen Frequenzen zu einer immer gerichteteren Abstrahlung bei hohen Frequenzen neigt.

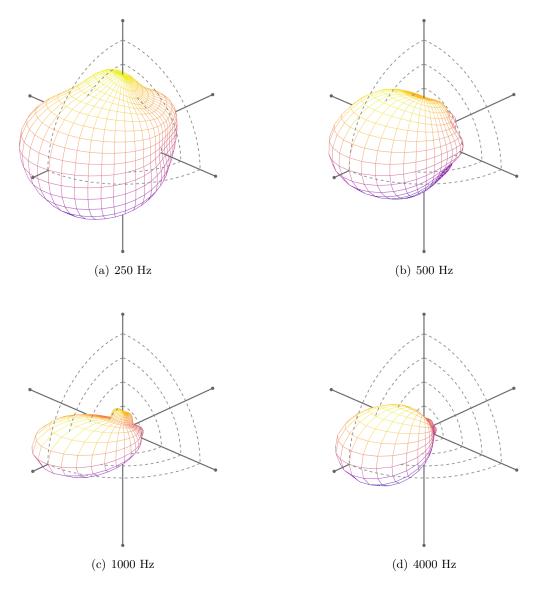


Abbildung 5.7: Richtcharakteristik eines Neumann KH120A Lautsprechers bei 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 4000 Hz.

Abspeichern

Nach der Beobachtung der Darstellung der Richcharakteristiken, kann schließlich zum letztem Tab gewechselt werden. Hier besteht die Möglichkeit die Richtcharakteristik bei den gewünschten Frequenzen in verschiedenen Formaten abzuspeichern. Erstmals kann hier der gewünschte Speicherort ausgewählt werden worauf die gewünschten Frequenzen und Speicherformate ausgewählt werden können. Zur Auswahl stehen ein PDF Report, einzelne Bilder im .jpg- und .eps-Format, die Abspeicherung im .SOFA-Format und das Abspeichern der vollständigen Messdaten im .tmdpf-Format oder eines Presets im .tmdpps-Format.

6

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Projektarbeit wurde die Entwicklung eines Messaufbaus und Programmes zur automatisierten Messung, Darstellung und Auswertung von Lautsprecherrichtcharakteristiken beschrieben. Der entwickelte Messaufbau besteht aus einer halbkreisförmigen Anordnung von 13 Messmikrofonen und einem automatisierten Drehtellers. Für die Durchführung der Messung und die darauf folgende Signalverarbeitung wurde die TMPD-App entwickelt. Diese in MATLAB programmierte Software ermöglicht die Eingabe aller relevanten Metadaten und Einstellungen, die Sensitivitätskalibrierung und Durchführung der Messung und die anschließende Darstellung und Abspeicherung der aufgenommenen Richtcharakteristiken. In Kapitel 2 wurden die für die Entwicklung dieses Projektes benötigten theoretischen Grundlagen vorgestellt. In Kapitel 3 wurde die Struktur des physischen Messaufbaus beschrieben. Im folgenden Kapitel 4 wurde der Aufbau und die Funktionsweise der entwickelten Messoftware und die damit verbundenen Arbeitsschritte erläutert. Kapitel 5 veranschaulicht die Durchführung einer Testmessung und soll als Anleitung für kommende Messungen dienen.

Die mit dem Messaufbau durchgeführten Messungen liefern plausible Ergebnisse und erleichtern die Ermittlung von Richtcharakteristiken. Die programmierte Software läuft fehlerfrei, schnell und verlässlich. Trotzdem gibt es während den Messungen einige Probleme welche in Zukunft behoben werden müssen. In den folgenden Absätzen werden die auftretenden Probleme und mögliche Ansätze zur Behebung dieser beschrieben.

Wie in Abschnitt 4.5 angedeutet, fallen bei Betrachtung der gemessenen Frequenzgänge mehrere spektralen Einbrüche auf. Diese entstehen womöglich durch Reflexionen an den Raumbegrenzungsflächen und an der Traverse. Zum jetzigen Zeitpunkt werden diese Einbrüche mit einem Glättungsalgorithmus korrigiert, wodurch jedoch die Messung in einem gewissen Maße verfälscht wird. Um dies zu vermeiden wäre es von Vorteil die Reflexionen mit physischen Vorrichtungen unterdrücken zu können. Die Reflexionen an der Traverse könnten vermieden werden indem diese mit absorbierendem Material umkleidet werden oder indem dieses Material direkt auf den Mikrofongehäusen angebracht wird, wie in [10] vorgeschlagen. Für die Beseitigung der Reflexionen an den Raumbegrenzungsflächen ist nur die Nutzung eines größeren oder stärker bedämpften Raumes (z.B. eines reflexionsarmen Vollraumes) zielführeund. Die benutzten Traversen sind hohl und besitzen dadurch eine prägnante Eigenfrequenz, welche bei Anregung während der Messungen einen negativen Einfluss auf die gemessene Richtcharakteristik hat. Um dieses Mitschwingen zu vermeiden, könnten die Traversen mit Polyurethanschaum gefüllt werden, wodurch diese Eigenfrequenz unterdrückt werden könnte.

Die geringe Höhe des für die Messung benutzten Raumes hat den Nachteil, dass bei der Hälfte der Messung die Notwendigkeit besteht den Lautsprecher um die Achse der Normalabstrahlung um 180° zu drehen. Dies ist einerseits zeitaufwendig, kann zu Positionierungsfehlern führen und beschränkt die Anwendbarkeit auf Lautsprecher welche in dieser gedrehten Position stabil stehen können. Dieses Problem kann nur gelöst werden, in dem ein größerer Raum zur Verfügung steht oder ein kleinerer Messaufbau benutzt wird. In zweitem Fall muss beachtet werden, dass die Fernfeldbedingung nur mehr ab einer höheren Frequenz erfüllt werden könnte weil sich dadurch der Abstand der Messmikrofone zur Schallquelle verringern würde. Einerseits könnte dadurch ein voller Kreis aufgebaut werden, wodurch die Messzeit verkürzt werden könnte, jedoch zusätzliche Ausrüstung nötig wäre. Andererseits könnte bei Benutzung einer geeigneten Räumlichkeit

mit der vorhandenen Ausrüstung ein vertikaler halbkreisförmiger Messaufbau realisiert werden. Ebenso muss beachtet werden, dass die benutzten Mikrofone, trotz eines sehr guten Preis-Leistungs-Verhältnis, untereinander große Unterschiede in ihren Betrags- und Phasenfrequanzgängen aufweisen. Dies könnte ebenso einen negativen Einfluss auf die Messergebnisse haben, indem keine mit einem anderen Messaufbau oder einer anderen Mikrofonreihenfolge reproduzierbaren Messungen getätigt werden können. Zu diesem Zweck wird im Zuge einer laufenden Bachelorarbeit an der Erstellung einer Filterdatenbank zur Entzerrung der benutzten Mikrofone gearbeitet. Wie schon in Abschnitt 4.2 eingeführt, wird dem Nutzer die Möglichkeit gegeben die benutzten Mikrofone zu entzerren. Hierzu ist es wichtig, dass die Mikrofone in der richtigen Reihenfolge auf der Traverse angebracht sind, denn folgend solle bei jedem Mikrofonsignal ein entsprechender Entzerrungsfilter angewendet werden.

Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit kann sicherlich auch in der automatisierten Steuerung des Drehtellers gesehen werden. Wie in Abschnitt 3.2 angegeben, erfolgt die Steuerung derzeit manuell über die Herstellersoftware auf einem gesonderten Rechner. Dies stellt natürlich eine mögliche Fehlerquelle dar und ist nur als Übergangslösung zu sehen. In Zukunft soll die Steuerung des Drehtellers keinen Eingriff des Nutzers erfordern und in automatisierter Weise über die TMDP-App erfolgen. Um dies zu ermöglichen, wird gerade an einer Lösung gearbeitet wobei mit Hilfe eines Raspberry PIs und Relaisschaltungen auf die digitalen Eingänge der Servosteuerung zugegriffen werden soll. Hiermit können die in der Servosteuerung gespeicherten absoluten und relativen Positionen angefahren werden. Der Raspberry PI soll durch eine Netzwerkverbindung die nötigen Befehle von der TMDP-App erhalten, wodurch eine automatisierte Messung erfolgen kann

Durch wenige Änderungen am Programm könnte der Messaufbau ebenfalls zur Messung von Richtcharakteristiken beliebiger Schallquellen benutzt werden. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit für den hier präsentierten Aufbau könnte die Schalleistungsmessug mittels Hullflächenverfahren nach EN ISO 3740 bis 3747 sein. Die Geometrie des Aufbaus wäre für diese Art von Messung geeignet, jedoch müsste untersucht werden ob die Qualität der benutzten Mikrofone und Vorverstärker für eine derartige Messung hoch genug wäre.

Tool for Measurem	nent of Directivity I	Patterns		

Literatur

- [1] J. Meyer, Acoustics and the performance of music: Manual for acousticians, audio engineers, musicians, architects and musical instrument makers. Springer Science & Business Media, 2009.
- [2] F. Otondo und J. H. Rindel, "The influence of the directivity of musical instruments in a room," *Acta acustica united with Acustica*, Jg. 90, Nr. 6, S. 1178–1184, 2004.
- [3] M. Noisternig, F. Zotter und B. F. Katz, "Reconstructing sound source directivity in virtual acoustic environments," in *Principles and Applications of Spatial Hearing*, World Scientific, 2011, S. 357–372.
- [4] S. Bilbao, J. Ahrens und B. Hamilton, "Incorporating source directivity in wave-based virtual acoustics: Time-domain models and fitting to measured data," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Jg. 146, Nr. 4, S. 2692–2703, 2019.
- [5] G. Weinreich und E. B. Arnold, "Method for measuring acoustic radiation fields," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Jg. 68, Nr. 2, S. 404–411, 1980.
- [6] F. Zotter, Analysis and synthesis of sound-radiation with spherical arrays. na, 2009.
- [7] D. T. Blackstock, Fundamentals of physical acoustics, 2001.
- [8] E. G. Williams, Fourier acoustics: sound radiation and nearfield acoustical holography. Academic press, 1999.
- [9] F. Mechel, Formulas of acoustics. Berlin London: Springer, 2008, ISBN: 978-3-540-76832-6.
- [10] M. Pollow, Directivity patterns for room acoustical measurements and simulations. Logos Verlag Berlin GmbH, 2015, Bd. 22.
- [11] F. Zotter und M. Frank, Ambisonics: A practical 3D audio theory for recording, studio production, sound reinforcement, and virtual reality. Springer Nature, 2019.
- [12] J. Ahrens und S. Bilbao, "Computation of spherical harmonic representations of source directivity based on the finite-distance signature," *IEEE/ACM Transactions on Audio*, Speech, and Language Processing, Jg. 29, S. 83–92, 2020.
- [13] P. Majdak, *Sofa specifications*. Adresse: https://www.sofaconventions.org/mediawiki/index.php/SOF A_specifications.
- [14] P. Majdak, Y. Iwaya, T. Carpentier, R. Nicol, M. Parmentier, A. Roginska, Y. Suzuki, K. Watanabe, H. Wierstorf, H. Ziegelwanger u. a., "Spatially oriented format for acoustics: A data exchange format representing head-related transfer functions," in Audio Engineering Society Convention 134, Audio Engineering Society, 2013.
- [15] M. Brandner, M. Frank und D. Rudrich, "Dirpat—Database and viewer of 2D/3D directivity patterns of sound sources and receivers," in Audio Engineering Society Convention 144, Audio Engineering Society, 2018.
- [16] M. Berzborn, R. Bomhardt, J. Klein, J.-G. Richter und M. Vorländer, "The ITA-Toolbox: An open source MATLAB toolbox for acoustic measurements and signal processing," in Proceedings of the 43th Annual German Congress on Acoustics, Kiel, Germany, Bd. 2017, 2017, S. 6–9.
- [17] E. Kurz, "Efficient prediction of the listening area for plausible reproduction," Masterarbeit, Graz University of Technology, 2018.

Tool for Measurement of Di	rectivity Patterns	

Anhang A

Drehtellersteuerung mittels IEF Werner S2 Commander

In folgendem Absatz wird die Nutzung der Software S2 Commander 4.1.4201.1.1 der Firma IEF Werner zur Steuerung des Drehtellers zur Messung von Richtcharakteristiken beschrieben.

Für die Verbindung mit dem Drehteller stehen dem Nutzer drei verschiedene Verbindungsmöglichkeiten zur Verfügung: USB, RS232 und UDP (Ethernet). Falls bei der vorherigen Benutzung des Drehtellers eine andere Verbindungsart benutzt wurde, wird beim öffnen der Software die Warnung wie in Abbildung 1 angezeigt, worauf man die gewünschte Verbindungsart auswählen muss. Sollte die Verbindung mittels UDP (Ethernet) erstmals nicht funktionieren, soll die Verbindung mittels USB aufgebaut werden und schließlich die Einstellungen unter Optionen > Kommunikation > Kommunikationsparameter UDP (Ethernet) untersucht werden. Hier kann ebenso die Funktion Netzwerk durchsuchen... genutzt werden.

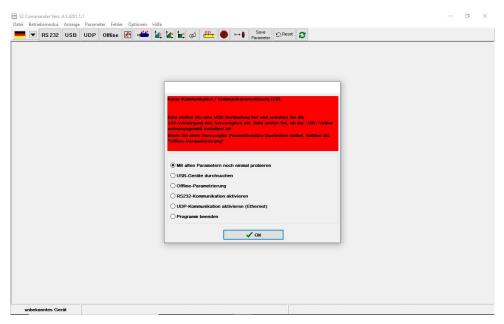


Abbildung 1: Fehlermeldung beim Start des Programmes falls bei vorheriger Benutzung eine andere Verbindungsart benutzt wurde.

Nachdem die Verbindung erfolgreich aufgebaut wurde kann die Taste "Ziele anfahren" gedrückt werden worauf ein Fenster (siehe Abbildung 2) aufgeht. Um den Drehteller schließlich betätigen zu können muss die Freigabetaste gedrückt werden (um diese während einer Messung gedrückt zu halten ist das Anbringen eines Kabelbinders von Nutzen). In Abbildung 3 sieht man, dass nach dem Drücken der Freigabetaste die gewünschten Ziele angefahren werden können oder eine Referenzfahrt durchgeführt werden kann. Vor der Inbetriebnahme sollte eine Referenzfahrt durchgeführt werden, bei welcher sich der Drehteller auf die Startposition bei 0° bewegt. Anschließend können die gewünschten Positionen angefahren werden, wobei direkt auf die Nummerntasten gedrückt oder die gewünschte Nummer manuell eingegeben werden kann. Die derzeit eingespeicherten Positionen sind in Tabelle 1 beschrieben.

Position	Befehl
0	Fahre auf 0° (Startposition)
1	+15°
2	-15°
3	+10°
4	-10°
5	+5°
6	-5°

Tabelle 1: Eingespeicherte absolute und relative Positionen zur Ansteuerung des Drehtellers.

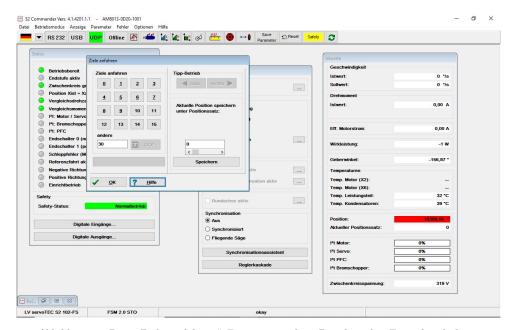
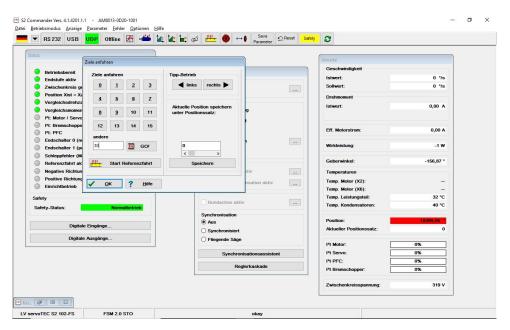


Abbildung 2: Das "Ziele anfahren"-Fenster vor dem Drücken des Freigabeschalters.



 $Abbildung \ 3: \ Das \ "Ziele \ anfahren"-Fenster \ nach \ dem \ Dr\"{u}cken \ des \ Freigabeschalters.$

Um weitere Positionen eingeben zu können, kann die Funktion "Ziele parametrieren" genutzt werden. In diesem Fenster kann links die Position ausgewählt werden welche modifiziert werden soll. Auf der ersten Seite, welche in Abbildung 4 ersichtlich ist, kann ausgewählt werden ob die neue Position absolut, relativ oder relativ bezogen auf das letzte Ziel sein soll. Auf der nächsten Seite kann der Winkelschritt, die Geschwindigkeit und Beschleunigung angegeben werden. Weitere Einstellungen sind für die aktuelle Nutzung nicht erforderlich.

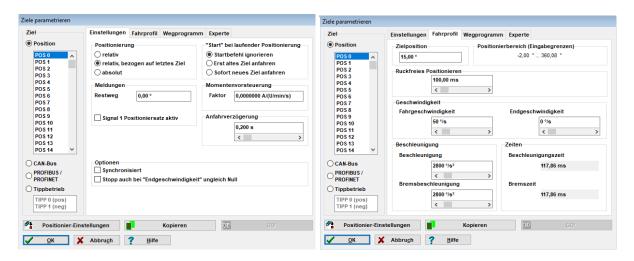


Abbildung 4: Das "Ziele parametrieren"-Fenster.