

Bachelorarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien

Diffusschallübertragung von Kleinmembran- Kondensatormikrofonen

vorgelegt von Christian Knörzer
an der Hochschule der Medien Stuttgart
am 17. März 2014

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt
Zweitprüfer: Dr. Helmut Wittek

Hiermit versichere ich, Christian Knörzer, an Eides Statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Diffusschallübertragung von Kleinmembran-Kondensatormikrofonen“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 23 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO der HdM) sowie die strafrechtlichen Folgen (gem. § 156 StGB) einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

(Ort, Datum)

(Unterschrift)

Kurzfassung

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Diffusschallübertragung von Kleinmembran-Kondensatormikrofonen. Dabei werden acht verschiedene Mikrofone der Firma Schoeps auf ihre technische Arbeitsweise, die resultierende Richtcharakteristik und deren Zusammenhang mit der frequenzabhängigen Diffusschalldämpfung untersucht.

Die verwendeten Mikrofone sind (geordnet nach Bündelungsgrad) der reine Druckempfänger CCM 2, das Grenzflächenmikrofon BLM 03 Cg, die Kardioide CCM 4 und V4 U, der reine Druckgradient CCM 8, die Superniere CCM 41 sowie das analoge Richtrohr-Mikrofon CMIT 5 U und das digitale Richtrohr-Mikrofon SuperCMIT.

Druckempfänger wie das CCM 2 haben einen grundsätzlich sehr linearen Frequenzgang, sind aber von einer zunehmenden Schallbündelung zu hohen Frequenzen hin betroffen. Grund dafür sind die endlich kleinen Kapselmaße. Diffuse Schallanteile wandeln sie daher dumpfer als direkte Schallanteile. Druckgradienten haben einen weniger linearen Frequenzgang. Vor allem bei tiefen Frequenzen können sie nicht mit Druckempfängern mithalten. Die Phänomene der Schallbündelung durch Schallabschattung und Druckstau treten hier dafür nicht in Erscheinung, weshalb Freifeld- und Diffusfeldfrequenzgang (abgesehen vom Nahbesprechungseffekt) theoretisch fast gleich gestaltet werden können. Analoge Richtrohrmikrofone bündeln Schall grundsätzlich sehr frequenzabhängig. Je höher die Frequenz, desto größer die Bündelung. Daher wird Diffusschall dumpfer übertragen als Direktschall. Das SuperCMIT versucht mittels eines Beamforming-Algorithmus, diffuse mittlere und tiefe Frequenzanteile herauszufiltern und im Pegel zu senken.

Für die Untersuchungen wurden Aufnahmen in einer Kirche in Mönchsfeld getätigt, welche gute akustische Bedingungen versprach. Dabei wurden ein Flügel und ein Sänger im diffusen Schallfeld, genauer mit einem Abstand des dreifachen Hallradius aufgenommen. Bei der Analyse der Aufnahmen zeigte sich, dass das CCM 2 den erwarteten dumpferen, aber ausgeglichenen Klang liefert. Das Grenzflächenmikrofon konnte bei den Höranalysen der musikalischen Signale meist überzeugen. Das CCM 4 und CCM 41 lieferten sehr „spitze“ und weniger ausgewogene Klänge als das CCM 2. Das V4 U hielt, was die Entwicklungspapiere versprachen und klang weniger aufdringlich. Überraschend gut und ausgeglichen waren die Ergebnisse des CMIT 5 U, sowohl im Hörtest als auch im sichtbaren Frequenzspektrum. Das SuperCMIT hatte bei fehlendem Direktschall ein wenig mehr Probleme und übertrug musikalische Signale ein wenig verfärbt.

Die Aufnahmeergebnisse wurden in eine Webseite integriert, um einen Direktvergleich der Mikrofone ohne weitere Software der Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

Abstract

This bachelor thesis deals with the transmission of diffuse sound of small-diaphragm condenser microphones. Eight different microphones by the brand « Schoeps » are examined in respect of their technical functioning, the resulting directionality and their coherences with their frequency-dependant attenuation of diffuse sound.

The microphones used in this thesis are (ordered by their directivity factor) the pressure transducer CCM 2, the boundary-layer microphone BLM 03 Cg, the cardioids CCM 4 and V4 U, the pure gradient transducer CCM 8, the super-cardioid CCM 41, the analogue shotgun-microphone CMIT 5 U and the digital shotgun SuperCMIT.

Pressure transducers like the CCM 2 generally have a flat frequency response. Their transmission of diffuse sound, however, is affected by a frequency-dependant bundling of high frequencies due to the finitely small capsule. Using a pressure transducer, diffuse sound therefore sounds more “muffled” than direct sound. The frequency response of gradient transducers is usually less balanced. On the other hand, this kind of transducer does not have to deal with phenomena like bundling through shadowing and doubling sound pressures, which is why in theory the frequency responses for direct and diffuse sound can be designed almost congruently – aside from the proximity effect. The directivity of analogue shotgun-microphones inherently depends on the frequency. The higher the frequency, the higher the directivity. Thus diffuse sound is also transmitted more muffled than direct sound. With the help of a beam forming algorithm, the SuperCMIT tries to detect diffuse low and middle-range frequencies and reduce their level.

As part of the studies of this thesis, a pianist and a singer were recorded in an acoustically promising church in Mönchsfeld. The microphones were placed in the diffuse sound field in a distance of the triple reverberation radius. The analyses revealed the expected dull, but – within itself – well-balanced sound provided by the CCM 2. The boundary-layer microphone mostly delivered a convincing sound during the hearing analysis. The CCM 4 and CCM 41 sounded a bit sharper than and not as well-balanced as the CCM 2. The V4 U basically kept all the promises that were made in the development papers and was less obtrusive than the CCM 4. The results of the CMIT 5 U were surprisingly good and well-balanced, both in the hearing analysis and the visible frequency responses. The SuperCMIT seemed to be a little more challenged with the lack of direct sound and caused a slight coloration of the musical sounds.

The results of the recordings were integrated in a website to provide a direct comparison of the microphones without any further required software.

Inhalt

1.	Vorwort.....	6
2.	Die Schallwandler	8
2.1	Wichtige Kenngrößen	8
2.3	Das CCM 8.....	13
2.4	Das CCM 4.....	14
2.5	Das V4 U.....	16
2.6	Das CCM 41.....	17
2.7	Das CMIT 5 U.....	17
2.8	Das SuperCMIT 2 U.....	19
2.9	Das BLM 03 Cg.....	20
3.	Die Schallquellen	22
3.1	KAWAI-Flügel.....	22
3.2	Gesang	24
3.3	ADAM A5X	24
4.	Der Aufnahmerraum.....	27
4.1	Wichtige Kenngrößen	27
4.2	Rechnerische Ermittlungen	30
4.3	Messungen	33
5.	Die Aufnahmen	36
5.1	Der Aufbau	36
5.2	Die Musikstücke	37
5.3	Erwartete Ergebnisse.....	37
5.4	Analyse der Ergebnisse.....	42
5.4.1	Erste Eindrücke	42
5.4.2	Das Flügel-Solostück	44
5.4.3	Flügel mit Gesang	45
5.4.4	Rauschen	46
6.	Die Vergleichsplattform	52
6.1	Anforderungen	52
6.2	Die Implementierung.....	52
7.	Fazit	56
7.1	Tontechnisches Fazit	56
7.2	Umsetzung der Bachelorarbeit.....	57

1. VORWORT

Eine gute Tonaufnahme enthält möglichst wenig Diffusschall.

Wenngleich dies für Sprachaufnahmen in Film, Fernsehen und Rundfunk im Hinblick auf Sprachverständlichkeit und Nachbearbeitungsmöglichkeiten so stimmen mag, muss man hierbei spätestens, wenn es um Musikaufnahmen geht, differenzieren. Im Bereich der E-Musik ist der Diffusschall ein fester Bestandteil der Aufzeichnung. Entsprechende Konzertsäle sind akustisch darauf abgestimmt. Bis zu einem gewissen Grad ist ein Diffusschallanteil hier also gewünscht. Aber auch was die U-Musik angeht, kann man obige Aussage nicht einfach so stehen lassen. Denn auch wenn man sich dabei auf den Direktschall konzentriert und versucht, Diffusschallanteile möglichst klein zu halten, könnten deren Unlinearitäten das Klangbild unschön verfärben. Es spielt also auch die „Qualität“ der vom Schallwandler übertragenen Diffusschallanteile eine Rolle. Hauptverantwortlich hierfür ist zunächst einmal der Raum selbst. Mit einem akustisch „schlechten“ Raum werden diffuse Schallanteile ebenfalls nicht gut klingen. Ganz egal, welches Mikrofon man verwendet. Man könnte sagen, je besser der Raum akustisch optimiert wurde, desto stärker sind die Einflüsse des Mikrofons auf die Qualität der diffusen Schallanteile zu gewichten.

Bei der Entwicklung des „V4 U“, dem neuesten Mikrofon aus dem Hause Schoeps, wurde großen Wert darauf gelegt, nicht nur frontalen Schall möglichst linear zu übertragen, sondern auch Diffusschall in einer den Gesang klanglich unterstützenden Art und Weise zu wandeln. Das V4 U ist nämlich ein Studio-Gesangsmikrofon.

Diese Abschlussarbeit nimmt sich die besondere Auseinandersetzung der Entwickler des V4 U mit der Übertragung diffuser Schallanteile als Anlass, auch einen genaueren Blick auf die „Diffusschallwandlung“ der anderen Kleinmembran-Kondensator-Mikrofone des Karlsruher Mikrofonherstellers zu werfen. Dabei sollen mit einem Blick auf die technische Funktionsweise des Mikrofons, auf Polardiagramme, frequenzabhängige Diffusschalldämpfungen und nicht zuletzt auch auf den Freifeldfrequenzgang und den Aufnahmeraum Zusammenhänge zwischen der Arbeitsweise des Mikrofons und den Auswirkungen auf den Klang musikalischer Signale untersucht werden.

Im Zuge dieser Untersuchungen soll versucht werden, Unterschiede anhand von Aufnahmen im Diffusfeld auch hörbar zu machen. Die Ergebnisse dieser Aufnahmen sollen mit einer für den Vergleich erstellten Webseite der Öffentlichkeit bzw. den potentiellen Kunden der Firma Schoeps zugänglich gemacht werden. Der Fokus dieser Bachelorarbeit liegt aber weniger auf der Erstellung der Plattform für den Vergleich, sondern hauptsächlich auf den technischen und akustischen Zusammenhängen der getätigten Aufnahmen.

Bei allen, die mir bei der Umsetzung dieser Abschlussarbeit geholfen haben, möchte ich mich herzlich bedanken. Dies gilt insbesondere für die Firma Schoeps für das Verleihen der Mikrofone, Dr. Helmut Wittek und Prof. Oliver Curdt für ihre Hilfe bei der Themenfindung und die fachliche Unterstützung, Dominique Jourdan für das Musizieren und Helfen bei den Probeaufnahmen, Markus Rebholz für seine Hilfe bei den Aufnahmen und den Musikern Masako Kamikawa und Doganay Sahin für die Erlaubnis, ihre Probe mitschneiden zu dürfen.

Vorwort

Im folgenden Kapitel wird zunächst auf die Arbeitsweise der einzelnen untersuchten Mikrofone eingegangen.

2. DIE SCHALLWANDLER

Die im später folgenden Versuch erzielten Aufnahme-Ergebnisse werden weitestgehend vom Diffusschallfrequenzgang der eingesetzten Mikrofone abhängen. Der Diffusschallfrequenzgang ist im Normalfall direkt abhängig von der Richtcharakteristik eines Schallwandlers. (Eine Ausnahme hierzu bildet das später erklärte Richtrohrmikrofon SuperCMIT.) Um alle nötigen Zusammenhänge verständlich zu machen, beschäftigt sich ein großer Teil dieser Arbeit daher mit Ursachen und Auswirkungen der Richtcharakteristiken der verwendeten Mikrofone. Dazu zunächst einige grundsätzliche Erläuterungen.

2.1 Wichtige Kenngrößen

Diffusschall ist definitionsgemäß Schall, der mit gleicher Intensität aus allen Richtungen eintrifft.¹ Der *Diffusschallfrequenzgang* beschreibt die frequenzabhängige Wandlung von diffusem Schall und kann entweder rechnerisch durch die Integration der Richtcharakteristiken über alle Frequenzen hinweg, oder durch das Messen des Mikrofon-Frequenzganges im Diffusfeld eines Hallraumes mit weißem Rauschen ermittelt werden.² Mit Ausnahme des SuperCMIT wurde bei den verwendeten Mikrofonen vom Hersteller der rechnerische Weg gewählt. Der Diffusschallfrequenzgang beim SuperCMIT wurde gemessen. Dies funktioniert allerdings nur bis zu einer unteren Grenzfrequenz f_u , welche abhängig vom Volumen V des Hallraumes ist:

$$f_u = 125 * \sqrt[3]{\frac{180}{V}} \quad (\text{Formel 1})^3$$

„Mittlungen über mehrere Messorte sowie Verwendung von Terzrauschen verringern den Einfluss eines nicht-idealen Messraumes. Die Messorte müssen dabei [...] mindestens um den Hallradius r_H [...] von der Schallquelle und den Wänden entfernt sein.“⁴

Eine *Richtcharakteristik* wird in Form eines Polardiagrammes dargestellt. Der Übertragungsfaktor M des Mikrofons wird hier für bestimmte Frequenzen (oft in Terz- oder Oktavabstand) in Abhängigkeit des Schalleinfallswinkels φ abgebildet, normiert auf den Übertragungsfaktor bei $\varphi = 0^\circ$. Mathematisch betrachtet gilt also für den „Richtfaktor“ s :

¹ Vgl. Friesecke (2007), S. 414.

² Vgl. Webers (2007), S. 256.

³ Schneider (2008), S. 410.

⁴ Ebd., S. 410.

$$s(\varphi) = \frac{M_0(\varphi)}{M_0(0^\circ)} \quad (2)^5$$

Symmetrische Richtcharakteristiken werden – wie bei den hier untersuchten Mikrofonen auch – oft nur einseitig dargestellt. Folgende Formel beschreibt eine idealisierte, rotationssymmetrische „Richtcharakteristik erster Ordnung“ bei Kombination von Druckempfänger (siehe „CCM 2“) und Druckgradient (siehe „CCM 8“) normiert auf $s(0^\circ)=1$:

$$s(\varphi) = A + (1 - A) * \cos \varphi \quad (3)^6$$

A steht für den prozentualen Anteil des Druckempfänger-Prinzips am Schallwandler. Normalerweise wird der Betrag $|s(\varphi)|$ angegeben, um Bereiche invertierter Polarität einfacher darzustellen. Die Messung der Richtcharakteristik erfolgt im Freifeld mit ebenen Wellen. Das Mikrofon wird dazu auf einer steuerbaren Drehscheibe befestigt und um eine senkrecht zur Schalleinfallrichtung stehenden Achse gedreht. Der Frequenzgang wird dann mit reinen Sinustönen, Terzrauschen oder sogenannten „Sweeps“ (Sinustöne mit gleitender Frequenz) gemessen, wobei letztere eine Glättung des Frequenzganges bewirken.⁷ Bei Druckgradienten wird im Bereich der geringsten Empfindlichkeit bzw. der größten Auslöschung (also bei Nieren z.B. bei 180°) oft mit Terzrauschen gemessen, da hier schon kleinste Störungen des Schallfeldes (z.B. durch Stative, Halterungen oder Reflexionen im Messraum) unkorrekte Welligkeiten im Kurvenverlauf verursachen.⁸ Die Ursache für die verschiedenen Richtcharakteristiken liegt in der physikalischen Arbeitsweise der Mikrofone und wird in den nächsten Abschnitten erklärt.

Man unterscheidet bei Mikrofonen zwischen dem Freifeld- und dem Diffusfeld-Übertragungsfaktor. Der Freifeld-Übertragungsfaktor M_0 wird im Freifeld mit ebenen Wellen gemessen. Das Mikrofon wird nur aus einer Richtung beschallt und innerhalb des Hallradius der Schallquelle platziert. Der Diffusfeld-Übertragungsfaktor M_{Diff} wird entweder im Diffusfeld gemessen oder aus M_0 und dem Bündelungsgrad γ berechnet.⁹

$$M_{Diff} = \frac{M_0}{\sqrt{\gamma}} \quad (4)^{10}$$

Der Bündelungsgrad γ (oder auch *directivity factor*, kurz *DF*) beschreibt als quadriertes Verhältnis zwischen Freifeld- und Diffusfeld-Übertragungsfaktor die Richtwirkung eines Schallwandlers. Er kann aber auch als Verhältnis der elektrischen Leistung P_e oder als quadriertes Spannungsverhältnis gelesen werden. Einfacher ausgedrückt gibt er den Faktor an, um welchen aufgenommene Diffusschallanteile größer wären als bei einem Kugelmikrofon gleicher Empfindlichkeit.¹¹ Berechnet werden kann er auch aus dem Integral der Richtungskfaktoren $s(\varphi)$:

⁵ Schneider (2008), S. 399.

⁶ Ebd., S. 330.

⁷ Vgl. Ebd., S. 409.

⁸ Vgl. Friesecke (2007).

⁹ Vgl. Schneider (2008), S. 398.

¹⁰ Ebd., S. 398.

¹¹ Vgl. Pawera (2003), S. 40.

$$\gamma = \frac{P_{e \text{ dir}}}{P_{e \text{ diff}}} = \frac{M_{0^\circ \text{ dir}}^2}{M_{\text{diff}}^2} = \frac{u_{0^\circ \text{ dir}}^2}{u_{\text{diff}}^2} = \frac{2}{\int_0^\pi s^2(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi} \quad (5)^{12}$$

Das *Bündelungsmaß* γ (*directivity index*, kurz *DI*) oder auch die *Diffusschalldämpfung* ist der zehnfache logarithmierte Bündelungsgrad in dB. Mindestens eine dieser Größen wird benötigt, um den für diese Arbeit sehr wichtigen *relativen Abstandsfaktor* (*distance factor*, kurz *DSF*) herauszufinden. Er beschreibt den Entfernungsfaktor, um welchen ein gerichtetes Mikrofon weiter von der Schallquelle entfernt aufgestellt werden muss als ein reiner Druckempfänger, um dasselbe Verhältnis aus Direkt- und Diffusschall zu erhalten. Der DSF steht als theoretischer Wert für verschiedene Richtcharakteristiken zur Verfügung und kann sehr einfach berechnet werden, indem man die Wurzel aus dem Bündelungsgrad γ zieht.¹³

Weitere, für die Praxis bedingt brauchbare, aber im Zuge der Betrachtung der Richtcharakteristik interessante Größen sind die *REE* (*Random Energy Efficiency* oder *Directional Efficiency*), *REF* (*Random Energy – Front*), *REB* (*Random Energy – Back*) und der *UDI* (*Unidirectional Index*). Die REE gibt als Kehrwert des Bündelungsgrades die aufgenommene Schallenergie im Verhältnis zum Kugelmikrofon an, die REF ist die nur über den vorderseitigen Halbraum integrierte, die REB die nur über den rückseitigen Halbraum integrierte REE. Der UDI bildet das Verhältnis von REF zu REB.¹⁴

Bei allen verwendeten und hier erklärten Mikrofonen handelt es sich um Kleinmembran-Kondensatormikrofone der Karlsruher Firma Schoeps.

2.2 Das CCM 2

Der Name „CCM“ betitelt Mikrofone der Kompakt-Serie der Schoeps-Mikrofone. Im Unterschied zur anderen, in Tonstudios häufiger anzutreffenden „Colette“-Serie sind CCM-Kapseln nicht austauschbar, sondern fest mit dem stark miniaturisierten Vorverstärker in einem Gehäuse verbaut, was die Mikrofone noch einmal deutlich kleiner macht. Die Kapseln selbst sind identisch, sodass sich von Versuchsergebnissen eines CCM 2 auch Rückschlüsse auf das entsprechende Schoeps MK 2 ziehen lassen.



Abbildung 1: Das CCM 2, ein reiner Druckempfänger

Beim CCM 2 handelt es sich um einen klassischen, freifeldentzerrten Druckempfänger. Die innere Kapsel des Mikrofons ist also durch die Membran schalldicht von der Umgebung getrennt. Lediglich eine sehr kleine Öffnung im Gehäuse sorgt für einen langsamen, atmosphärischen Druckausgleich.¹⁵ Die Membran wird bewegt, wenn der Druck vor ihr vom Druck des Kapselinneren abweicht. Auch von hinten oder seitlich eintreffender Schall bewirkt eine Schalldruckänderung vor der Membran, wenn die

¹² Vgl. Franz (1990), S. 306 u. Schneider (2008), S. 400.

¹³ Vgl. Sengpiel: Relativer Abstandsfaktor, <http://www.sengpielaudio.com/RelativerAbstandsfaktor.pdf>

¹⁴ Vgl. Schneider (2008), S. 331f.

¹⁵ Vgl. Dickreiter (1997), S. 162.

Schallwellen um die Mikrofonskapsel herum gebeugt werden können. Dies funktioniert – abhängig von der Größe der Kapsel bzw. des Gehäuses – bis zu Frequenzen von ca. 10000 Hz.¹⁶ Unterhalb dieser Frequenz werden also Schallereignisse aus allen Richtungen gleichermaßen aufgenommen, was eine kugelförmige Richtcharakteristik zur Folge hat ($s(\varphi)=1$). Für die Diffussschallwandlung interessant ist die Abweichung von der idealen Kugelform bei Frequenzen oberhalb dieser 10000 Hz. Den Abweichungen liegen drei Phänomene zugrunde:

1. Eine Abschottung von rückwärtig oder seitlich eintreffendem Schall: Ist die Wellenlänge im Bereich der Kapselgröße, so wird Schall nur schwächer bis gar nicht mehr um die Kapsel gebeugt.
2. Interferenzerscheinungen durch schräg auf die Membran einfallenden Schall
3. Druckstau durch den an der Membran reflektierten Schall¹⁷

Insgesamt erfährt das Mikrofon eine zu hohen Frequenzen hin zunehmende Richtwirkung. Die beiden ersten Phänomene könnten in der Theorie dadurch beseitigt werden, dass man die Kapselgröße derart dimensioniert, dass die Kapsel erst für Frequenzen oberhalb des für den Menschen hörbaren Frequenzspektrums zu einem Hindernis wird, bzw. dass erst oberhalb von 20 kHz Interferenzen entstehen können. Hierzu müsste die Kapsel – und damit der Membrandurchmesser – stark verkleinert werden (etwa auf einen Membrandurchmesser von 5 mm)¹⁸. Damit würde die Empfindlichkeit des Überträgers zu klein werden. Studiomikrofone können daher einen Durchmesser von ca. 15 mm nicht unterschreiten.¹⁹ Die hier verwendeten CCM-Mikrofone kommen dem mit einem Durchmesser von 20mm schon sehr nahe.²⁰ Trotzdem stellt sich auch beim CCM 2 ab einer Frequenz von etwa 10 kHz eine Richtungsabhängigkeit ein.

Geht man vom grundsätzlichen Übertragungsprinzip des Kondensator-Druckempfängers aus, so nimmt der Übertragungsfaktor (oder auch die „Empfindlichkeit“) laut A. Friesecke bei konstantem Schalldruck zu hohen Frequenzen hin mit 6dB/Oktave ab.²¹ Dem liegt zugrunde, dass die Membran bei hohen Frequenzen eine geringere Auslenkung erfährt, da auch die Auslenkung der Luftteilchen zu hohen Frequenzen hin abnimmt.²² Um dem entgegenzuwirken, werden elektrostatische Druckempfänger „hoch abgestimmt“, d.h. die Resonanzfrequenz des Gesamtsystems wird an das obere Ende des zu übertragenden Frequenzspektrums gelegt.²³

Laut T. Görne und einigen anderen Autoren ist der theoretische Frequenzgang des Druckempfängers als Elongationswandler allerdings naturgemäß flach. Die Auslenkung der Membran ist proportional zum auftreffenden Schalldruck; dabei kann die Änderungsgeschwindigkeit beliebig sein. Auch bei einer Frequenz, die gegen Null strebt (was einer atmosphärischen Luftdruckänderung gleichkommen würde), wäre theoretisch ein Membran-Ausschlag zu messen.²⁴ In der Praxis verhindert das die schon erwähnte kleine Öffnung des Gehäuses. Die Amplitude der Membran-Auslenkung bleibt zu hohen Frequenzen hin konstant. Ab dem Erreichen der Resonanzfrequenz

¹⁶ Vgl. Dickreiter (1997), S. 163.

¹⁷ Vgl. ebd., S. 163.

¹⁸ Vgl. ebd., S. 164

¹⁹ Vgl. ebd., S. 164

²⁰ Vgl. Schoeps-Mikrofone Catalog 6, S. 54

²¹ Vgl. Friesecke (2007), S. 408.

²² Vgl. Boré u. Peus (2002), S. 32.

²³ Vgl. Franz (1990), S. 327.

²⁴ Vgl. Görne: Mikrofone in Theorie und Praxis (2011), S. 53f.

verhindert die Massehemmung eine weitere lineare Übertragung des Schalldrucks und die Membran-Auslenkung nimmt quadratisch mit $1/f^2$ (also mit 12 dB pro Oktave) zu hohen Frequenzen hin ab.²⁵

Egal, welcher Erklärung man nun Glauben schenkt, so entspricht der theoretische Frequenzgang des Kondensator-Kugelmikrofons stets dem eines Tiefpasses zweiter Ordnung mit der Resonanzfrequenz der Kapsel als Grenzfrequenz.²⁶

Diese Resonanzfrequenz f_r hängt von der Masse m der Membran und des zwischen Membran und Gegenelektrode eingeschlossenen Luftvolumens, sowie von der Direktions- bzw. Rückstellkraft D ab:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (6)^{27}$$

Eine hohe Abstimmung verlangt gemäß der Formel nach einer großen Direktionskraft. Diese steht aber wiederum im Gegensatz zu einer hohen Empfindlichkeit des Mikrofons, da Spannungsänderungen am Ausgangswiderstand proportional zur Membranauslenkung sind:

$$U_{\sim} \sim U_0 * \frac{a}{d_0} \quad (7)^{28}$$

$U_{\sim}$: Ausgangsspannung; U_0 : Polarisationsspannung; a : Membranauslenkung; d_0 : Ruheabstand der Elektroden

In der Praxis geht man einen Kompromiss ein: Man setzt z.B. die Rückstellkraft D der straff eingespannten, sehr leichten Membran durch sogenannte „Sacklöcher“, also Bohrungen in der Gegenelektrode, welche das eingeschlossene Luftvolumen komprimierbar machen, herab, erhöht damit die Wandler-Empfindlichkeit und senkt die Resonanzfrequenz auf den Bereich der höchsten zu übertragenden Frequenzen ab.²⁹ Wie genau Sack- oder Durchgangslöcher, angekoppelte Kammern und sich ergebende Resonanzfrequenzen und Dämpfungen aufeinander abgestimmt werden, hängt auch von dem beabsichtigten Anwendungsbereich des Mikrofons ab. Ziel ist meist ein linearer Verlauf des Frequenzganges; sei es im Diffusfeld (wie z.B. beim CCM3 oder MK3 der Schoeps-Mikrofone) oder (wie beim CCM2 und MK2) im Freifeld. Eine entsprechende Freifeld- oder Diffusfeld-Entzerrung kann man auch gleichwertig mit einem elektrischen Filter nachbilden.³⁰ Eine Diffusschall-, Rückwärts- und Seitwärtsdämpfung ist bei der Kugel natürlich nicht gegeben, beträgt also 0 dB.³¹

²⁵ Vgl. Görne, Mikrofone in Theorie und Praxis (2011), S. 54.

²⁶ Vgl. ebd., S. 54.

²⁷ Webers (2007), S. 254.

²⁸ Vgl. Schneider (2008), S. 325.

²⁹ Vgl. Webers (2007), S. 254.

³⁰ Vgl. Wuttke (1994).

³¹ Vgl. ETI Detmold: Richtcharakteristiken, http://old.hfm-detmold.de/eti/projekte/semesterarbeiten/mikro-richtchar/gradienten_charakteristiken.pdf, S.1.

2.3 Das CCM 8

Das CCM 8 ist wie das MK 8 ein reiner Druckgradientenempfänger, hat also eine achtförmige Richtcharakteristik. Beim Druckgradienten wird die Gegenelektrode nicht nur mit Vertiefungen (wie die „Sacklöcher“ des Druckempfängers), sondern mit vollständig durchgehenden Bohrungen versehen.³² Dadurch ist die Membran beidseitig dem Schall ausgesetzt. Sie wird daher dann ausgelenkt, wenn die Schalldrücke auf beiden Seiten der Membran unterschiedlich groß sind; die Membran reagiert also auf die Druckdifferenz.³³ Im Fernfeld, unter der Annahme, dass der Abstand r zur Schallquelle sehr viel größer ist als der Wegunterschied d zwischen Membranvorder- und Membranrückseite, gilt folgende Proportionalität zwischen dieser Druckdifferenz Δp und der Wellenlänge λ :



Abbildung 2: Das CCM 8, ein reiner Druckgradientenempfänger

$$\Delta p \sim 2 \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right) * \cos \varphi \quad (8)^{34}$$

Daraus kann man ablesen, dass sich, egal welchen Schalleinfallswinkel φ man wählt, ein Maximum des (positiven oder negativen) Druckunterschieds ergibt, wenn

$$\left| \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right) \right| = 1$$

Dies wiederum ist gegeben, wenn

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{1}{2} + n, \quad n \in \mathbb{N}_0$$

Mit $c = \lambda f$ erhält man

$$f_g = \frac{c}{2d} + \frac{nc}{d}, \quad n \in \mathbb{N}_0$$

Für alle Grenzfrequenzen f_g , die in genannter Relation zur Wegdifferenz d stehen, ergibt sich ein Maximum der Druckdifferenz, da die Phasendifferenz zwischen Membranvorder- und Rückseite 180° beträgt. Für die Mikrofonherstellung ist nur das erste f_g für $n = 0$ von Interesse. Unterhalb von f_g hat der Druckgradient eine positive Steigung, oberhalb nimmt er in gleichem Maße wieder ab.³⁵ Bei dynamischen Wandlern bedeutet das laut A. Friessecke, dass auch der theoretische Frequenzgang Steigungen von ± 6 dB aufweist, weshalb diese dann tiefenabgestimmt werden müssen, um unterhalb von f_g auf einen linearen Frequenzgang zu kommen. Beim elektrostati-

³² Vgl. Boré & Peus (2002), S. 33.

³³ Vgl. Schneider (2008), S. 330.

³⁴ Ebd., S. 334.

³⁵ Vgl. Weinzierl (2004), http://www.ak.tu-berlin.de/fileadmin/a0135/Unterrichtsmaterial/Skripte/KT_I_v9.pdf

schen Wandler ist dies nicht so. Der bis zu f_g hin ansteigende Druckgradient sorgt für eine konstante Luftteilchenbewegung; die Luftteilchen schwingen schneller um ihren Ruhepunkt, legen dadurch bei gleichem Schalldruck aber die gleiche Strecke zurück wie bei tieferen Frequenzen. Elektrostatische Druckgradienten haben also bis zur Übergangsfrequenz f_g einen flachen Frequenzgang.³⁶ Weil dieser oberhalb von f_g nicht mehr zu realisieren ist, wird f_g an die obere Grenze des zu übertragenden Spektrums gelegt, bzw. d so dimensioniert, dass es der halben Wellenlänge der obersten zu übertragenden Frequenz entspricht.³⁷

Die Membranresonanz wird in die Mitte des Frequenzspektrums gelegt, die Membran also weicher aufgehängt als beim Druckempfänger. Das schwingende System wird dann durch Luftreibung soweit bedämpft, dass die Resonanzfrequenz im Frequenzgang nicht mehr auszumachen ist.

Die sich ergebende Richtcharakteristik bei einem reinen Druckgradienten lässt sich durch folgende richtungsabhängige Übertragungsfunktion (normiert auf $s(0^\circ) = 1$) beschreiben:

$$s(\varphi) = \cos \varphi \quad (9)^{38}$$

Seitlicher Schalleinfall (90° und 270°) wird vom Druckgradienten also ignoriert, die maximale Membranauslenkung erfolgt bei Schalleinfall von 0° oder 180° . Schall, der auf die Membranrückseite trifft, führt allerdings zu einem der Membranvorderseite gegenphasigem Signal. Dies macht den Einsatz des Druckgradienten für die MS-Stereophonie möglich.³⁹ Der Bündelungsgrad (DF) eines reinen Druckgradienten ist 3, der Abstandsfaktor beträgt dementsprechend ca. 1,73. Die REE von 0,33 ergibt sich aus einer REF und einer REB von jeweils 0,17. Der UDI ist also 1, Schall von vorne wie hinten wird gleich stark gewandelt.⁴⁰ Anders ausgedrückt hat das CCM8 als Mikrofon mit Achtercharakteristik eine Diffusschalldämpfung von -4,8 dB, eine Rückwärtsdämpfung von 0 dB und eine Seitwärtsdämpfung von $-\infty$ dB.⁴¹ Die Achtercharakteristik ist also besonders dann von großem Vorteil, wenn vor allem seitlicher Schalleinfall ausgeblendet werden soll oder sich zwei aufzunehmende Sprecher oder Instrumentalisten gegenüberstehen. Mikrofone wie das CCM 8 oder das MK 8, welche nur die Achtercharakteristik besitzen, gibt es relativ wenige auf dem Markt.⁴²

2.4 Das CCM 4

Streng genommen ist das CCM 4 als Mikrofon mit Nierencharakteristik eine Mischung aus Druckgradient und Druckempfänger, in der Praxis hat sich allerdings auch für Nieren eine Bezeichnung als Druckgradient durchgesetzt. Die Kapsel entspricht der des MK 4 aus der Colette-Serie.

³⁶ Vgl. Friesecke (2007), S. 411.

³⁷ Vgl. Webers (2007), S. 256.

³⁸ Vgl. Friesecke (2007), S. 411.

³⁹ Vgl. Dickreiter (1997), S. 166.

⁴⁰ Vgl. Schneider (2008), S. 331.

⁴¹ Vgl. ETI Detmold: Richtcharakteristiken, http://old.hfm-detmold.de/eti/projekte/semesterarbeiten/mikro-richtchar/gradienten_charakteristiken.pdf, S.6.

⁴² Vgl. Dickreiter (1997), S. 167.

Wie beim CCM 8, ist auch beim CCM 4 die Membran für den Schall von beiden Seiten erreichbar, die Gegenelektrode ist also schalldurchlässig. Der Unterschied zur Achtercharakteristik in der technischen Ausführung liegt darin, dass die Gegenelektrode zu einem mechanischen, akustischen, phasendrehenden Laufzeitglied erweitert wird.⁴³ Dadurch wird die mittlere Wegdifferenz zwischen Membranvorder- und Membranrückseite beeinflusst. Im Vergleich zur Achtercharakteristik wird die Laufzeit durch das Laufzeitglied so erweitert, dass sie bei rückwärtigem Schalleinfall den Wegunterschied Δd um die Kapsel zur Membranvorderseite wettmacht. Sie wird also um $\Delta d/c$ vergrößert. In der Praxis werden Laufzeitglieder bei den meisten Kleinmembran-Kondensatormikrofonen in „Stäbchenform“ durch mit Gaze verschlossene Öffnungen des Kapselbeckers realisiert, welche durch den akustischen Reibungswiderstand die Schallgeschwindigkeit auf dem Weg zur Membranrückseite herabsetzen. Alternativ wird (v.a. bei Großmembran-Mikrofonen) Schall durch Labyrinth-artige Kanäle umgeleitet, um die notwendige Verzögerung zu erzwingen.⁴⁴



Abbildung 3: Das CCM 4 mit zum MK 4 identischer Kapsel

Das Ergebnis ist eine Richtcharakteristik aus einer sich bei frontalem Schalleinfall additiv und bei rückwärtigem Schalleinfall subtraktiv zur Hälfte überlagernder Kugel und Acht.

$$s(\varphi) = 0,5 + 0,5 * \cos \varphi \quad (10)^{45}$$

Auch obige Gleichung ist normiert auf $s(0^\circ) = 1$. Bei einer vollen Empfindlichkeit in 0° -Richtung werden seitliche Schallereignisse mit einer um etwa die Hälfte (-6 dB) reduzierten Empfindlichkeit aufgenommen. Als einzige Richtcharakteristik werden bei der Niere rückwärtige Schallereignisse (zumindest in der Theorie) vollständig ausgeblendet. Für die Praxis kann man davon ausgehen, dass rückwärtiger Schall auf gut ein Zehntel im Vergleich zu frontalem Schall, also um einen Wert zwischen 20 und 30 dB, reduziert wird.⁴⁶

Die Gegenelektrode sorgt beim CCM 4 genau wie bei anderen Mikrofonen mit Nierencharakteristik nicht nur für die nötige Laufzeitverlängerung, sondern wirkt auch als akustischer Tiefpass. Bohrungen, Schlitze und Hohlräume lassen sie teils als akustischer Energiespeicher, teils als Reibungswiderstand arbeiten, die dafür sorgen, dass Frequenzen ab einer Übergangsfrequenz die Gegenelektrode nicht mehr passieren können. Diese Übergangsfrequenz wird in den Bereich gelegt, in dem der Druckgradient der Kapsel maximal ist. Im Sperrbereich des Tiefpasses arbeitet das Mikrofon dann als Druckempfänger.⁴⁷ Durch eine geschickte Abstimmung von Mikrofondurchmesser, Schalllaufzeiten und der Übergangsfrequenz wird der Übergang zum Druckempfänger so gut kaschiert, dass der Wechsel des Empfängerprinzips im Polardiagramm

⁴³ Vgl. Franz (1990), S. 308.

⁴⁴ Vgl. Görne, Tontechnik (2008), S. 262.

⁴⁵ Vgl. Schneider (2008), S. 331.

⁴⁶ Vgl. Pawera (2003), S. 37.

⁴⁷ Vgl. Boré & Peus (2002), S. 33.

nicht auszumachen ist. Die abnehmende Wirkung des Druckgradienten wird dann langsam vom zunehmenden Druckstau des Druckempfängers abgelöst.⁴⁸

Der Bündelungsgrad einer Niere beträgt genau wie bei der Acht 3, der Abstandsfaktor damit also ebenfalls ca. 1,73. Die REE von 0,33 wird bei der Niere mit einer REF von 0,29 und einer REB von 0,04 allerdings sehr viel ungleicher aufgeteilt. Dementsprechend liegt der UDI auch bei 7.⁴⁹ Die Diffusschalldämpfung beträgt -4,8 dB, Rück- und Seitwärtsdämpfung sind im Vergleich zur Achtercharakteristik vertauscht und betragen $-\infty$ bzw. -6 dB.

2.5 Das V4 U

Das Schoeps V4 U ist genau wie das CCM 4 ein Mikrofon mit Nierencharakteristik. Es arbeitet also nach dem gleichen Wandler- und Empfängerprinzip, weist aber aufgrund der Bauform entscheidende Unterschiede auf. Die Bauform ist das Resultat des Verwendungszwecks. Das V4 U wurde speziell als Studio-Gesangsmikrofon konzipiert. Was die Diffusschallwandlung angeht, wurde daher nicht das Ziel gesetzt, den Raum eins zu eins abzubilden, sondern ihn angenehm klingen zu lassen.⁵⁰ Laut V4 U Development Paper ist dies der Fall, „wenn er nicht auffällig hervortritt und wenn er im hochfrequenten Bereich gedämpft wird. Für den Diffusfeld-Frequenzgang bedeutet dies: So gerade wie möglich, nie überbetont in einzelnen Frequenzbereichen sowie zu hohen Frequenzen abfallend.“⁵¹ Zum Ausgleich der Höhenverluste im Diffusfeld war außerdem eine Höhenanhebung im Freifeld geplant.⁵² Beide Voraussetzungen findet man vor allem bei Großmembran-Mikrofonen. Der Abfall zu hohen Frequenzen hin setzt wegen der größeren Kapsel und der daraus resultierenden Schallabschattung früher ein als beim Kleinmembranmikrofon. Eine Höhenanhebung betrifft wegen der größeren Fläche, welche die Membran bildet, und dem daraus entstehenden Druckstau ebenfalls schon tiefere Frequenzen.



Abbildung 4: Das V4 U, ein neues Studio-Gesangsmikrofon

Gleichzeitig will man aber die Vorteile eines Kleinmembran-Mikrofons erhalten. Diese äußern sich beispielsweise darin, dass die Polardiagramme für die verschiedenen Frequenzgänge allgemein eine größere Konstanz aufweisen; sie sind deckungsgleicher. Die Frequenzgänge für Einfallrichtungen außerhalb der 0°-Achse weichen also weniger von dem der 0°-Achse ab. Weitere Vorteile wären die Impulstreue und die Neutralität.⁵³

Mithilfe einer Ringscheibe um die Membran wurde versucht, allen Anforderungen an ein ideales Studio-Gesangsmikrofon gerecht zu werden. Dadurch vergrößert sich der Kapseldurchmesser

⁴⁸ Vgl. Boré & Peus (2002), S. 21.

⁴⁹ Vgl. Schneider (2008), S. 331.

⁵⁰ Vgl. Wittek: V4 U Development Paper (2013).

⁵¹ Ebd.

⁵² Vgl. ebd.

⁵³ Vgl. Pawera (2003), S. 25.

auf 33mm und Beugungs- und Druckstauerscheinungen treten schon bei niedrigeren Frequenzen auf als z.B. beim CCM 4.⁵⁴

2.6 Das CCM 41

Das CCM 41 ist eine Superniere. Es ist damit ebenfalls eine Mischform aus Druckempfänger und Druckgradient, allerdings mit einer anderen Gewichtung als bei der Niere. War die Gewichtung bei der Niere noch 50% zu 50%, so steht bei der Superniere der Druckgradient mit 63% im Vordergrund. Die Richtcharakteristik betrachtend ordnet es sich zwischen Niere und Acht, genauer zwischen Niere und Hypernieren ein. Normiert auf $s(0^\circ) = 1$ gilt:

$$s(\varphi) = 0,37 + 0,63 * \cos(\varphi) \quad (11)^{55}$$



Abbildung 5: Das CCM 41, eine "Superniere"

Erreicht wird diese Richtcharakteristik durch Laufzeitglieder mit geringeren Laufzeiten als bei der Niere. Seitlicher Schalleinfall hat damit eine geringere mittlere Phasendifferenz und wird stärker gedämpft (um etwa -9 dB)⁵⁶, Schalleinfall direkt von hinten allerdings nicht ganz ausgeblendet. Insgesamt ist die Richtwirkung der Superniere höher als die der Niere, bei tiefen und mittleren Frequenzen ist sie mit einem kurzen Richtrohrmikrofon vergleichbar.⁵⁷ Der Bündelungsgrad beträgt 3,73, die Diffusschalldämpfung -5,7 dB. Der Abstands faktor ergibt damit 1,93.⁵⁸ Ein REE von 0,27 setzt sich aus der REF von 0,25 und der REB von 0,02 zusammen. Mit einem UDI von 13,9 weist die Superniere das größte Empfindlichkeitsverhältnis zwischen vorderem und hinterem Halbraum auf.⁵⁹ Wie bei der Acht ergibt ein rückwärtiger Schalleinfall auch hier ein Ausgangssignal mit invertierter Polarität.⁶⁰

2.7 Das CMIT 5 U

Das CMIT 5 U ist ein Interferenzempfänger bzw. ein Richtrohrmikrofon mit Keulencharakteristik. Früher wurde bei Richtrohrmikrofonen ein Bündel unterschiedlich langer, dünner Rohre vor die Membran angebracht. Heute verwendet man ein mit seitlichen Schalleinlässen versehenes Richtrohr, welches nach vorne schalloffen ist und nach hinten direkt an die Membran angrenzt.⁶¹ Bei frontalem Schalleinfall addieren sich alle Schallanteile im Richtrohr gleichphasig. Es kommt dabei zu einem sehr ausgeprägten Druckstau effekt, wodurch auch relativ tiefe Frequenzen um bis zu 6

⁵⁴ Vgl. Wittek: V4 U Development Paper (2013).

⁵⁵ Vgl. Friesecke (2007), S. 412.

⁵⁶ Dickreiter (1997), S. 171.

⁵⁷ Vgl. Schoeps-Mikrofone Catalog 6, S. 25.

⁵⁸ Vgl. Friesecke (2007), S. 415.

⁵⁹ Vgl. Schneider (2008), S. 330f.

⁶⁰ Vgl. ebd., S. 335.

⁶¹ Vgl. Dickreiter (1997), S. 171.

dB angehoben werden.⁶² Schallanteile aus anderen Richtungen jedoch ändern im Rohr ihre Ausbreitungsrichtung und überlagern sich dabei mit einer frequenz- und richtungsabhängigen Phasendifferenz. Das Ergebnis ist eine teilweise bis vollständige Auslöschung des Schallsignals durch destruktive Interferenz.⁶³ Laut Görne beschreibt folgende Funktion das Richtverhalten eines Richtrohrmikrofons:

$$\Gamma(\varphi, l, \lambda) = \frac{\sin(\pi \frac{l}{\lambda} * (\cos \varphi - 1))}{\pi \frac{l}{\lambda} * (\cos \varphi - 1)} = \text{si} \left(\pi \frac{l}{\lambda} * (\cos \varphi - 1) \right) \quad (12)^{64}$$

Bei einem Einfallswinkel φ ist die Richtwirkung also abhängig vom Verhältnis aus Rohrlänge l und Wellenlänge λ . Ab einem Verhältnis von 1 entsteht durch das Rohr eine mit f zunehmende, keulenförmige Richtwirkung. Um dem entgegenzuwirken, werden die Schalleinlässe mit einer feinen Gaze bedeckt. Damit nimmt der Strömungswiderstand im Rohr zu hohen Frequenzen hin zu, was das Rohr für diese Frequenzen effektiv „verkürzt“ und den Faktor l/λ konstanter werden lässt.⁶⁵ Ganz beseitigt werden kann die Frequenzabhängigkeit der Richtcharakteristik damit aber nicht. Die Keulenform wird trotzdem zu hohen Frequenzen hin schmäler. Damit tiefe Frequenzen ebenfalls eine Bündelung erfahren, wird die Mikrofonskapsel am Ende des Rohrs als Niere, Super- oder Hyperniere ausgeführt. Bei Super- bzw. Hypernieren entsteht dadurch leider auch eine Rückkeule für tiefe Frequenzen, bei einer Niere könnte der Sprung der Richtwirkung zu hohen Frequenzen zu groß ausfallen.

Da das Richtrohrmikrofon nur bei tiefen und mittleren Frequenzen als Druckgradient (im Sinne des allgemeinen Sprachgebrauches) arbeitet, darf der Schallumweg zur Membranrückseite größer sein als bei Mikrofonen, die auch höhere Frequenzen als Druckgradient übertragen müssen. Dadurch erhöhen sich die Druckdifferenzen für den unteren Frequenzbereich und die Membran muss weniger nachgiebig sein wie z.B. bei einer Acht. Damit ist das Richtrohr auch etwas weniger empfindlich gegen Erschütterungen und Griffgeräusche, allerdings trotzdem weit empfindlicher als Druckempfänger.⁶⁶

Das Verhältnis l/λ sagt auch aus, dass die Grenzfrequenz der rohrabhängigen Bündelung mit steigender Rohrlänge sinkt. Die Länge eines Shotgun-Mikrofons gibt einen sofortigen visuellen Eindruck über die längste Wellenlänge, bei der eine Richtwirkung erzielt wird.⁶⁷ Für herkömmliche Richtrohrmikrofone lässt sich zusammengefasst also sagen:

Je länger das Richtrohr, desto ...

- ... stärker die Auslöschungen bei einem Winkel ungleich null;
- ... tiefere Frequenzen sind von der Auslöschung betroffen;
- ... impraktikabler ist das Mikrofon;
- ... stärker die Verfälschung des Klangbildes bei seitlichem Schalleinfall.

⁶² Vgl. Boré u. Peus (2002), S. 57.

⁶³ Vgl. Webers (2007), S. 261.

⁶⁴ Görne: Tontechnik (2008), S. 269.

⁶⁵ Vgl. Boré u. Peus (2002), S. 57.

⁶⁶ Vgl. ebd., S. 59.

⁶⁷ Vgl. Nisbett (2003), S. 67.

Die Herausforderung der Mikrofon-Hersteller besteht nun darin, einen Kompromiss zwischen ersteren und letzteren beiden Punkten zu finden. Wegen der Klangfarbenartefakte werden Richtrohre im Normalfall nicht bei Musikaufnahmen verwendet. Bei Sprachaufnahmen für Film- und Fernsehproduktionen dagegen sind Richtrohmikrofone nicht mehr wegzudenken und helfen dann sehr, wenn das Kamerabild einen Einsatz sehr nahe an der Schallquelle unmöglich macht.

2.8 Das SuperCMIT 2 U

Das SuperCMIT 2 U ist eine Weiterentwicklung des herkömmlichen Richtmikrofons. Es enthält eine zweite, rückwärtsgerichtete Kapsel und einen eingebauten, digitalen Signalprozessor. Die zwei Kapseln werden mit einem kleinstmöglichen Abstand eingebaut, sodass der Abstand der Membranen zueinander nur 3 cm beträgt. Für Frequenzen bis 3 kHz kommt das einer Koinzidenz gleich.⁶⁸ Die Signale der beiden eingebauten Kapseln werden nach Impedanzwandlung und Symmetrierung in digitale Signale gewandelt und anschließend in den DSP eingespeist.⁶⁹ Hier werden sie mit einer Fast-Fourier-Transformation in neun verschiedene Frequenzbänder zerlegt. Aus den unteren acht Frequenzbändern werden individuell mit Zeit-Frequenz-adaptiver Signalverarbeitung diffuse Schallanteile heraus gerechnet, das oberste Teilband bleibt unbearbeitet.⁷⁰ Die rückwärtige Membran und ein Beamforming-Algorithmus werden also nur für tiefe und mittlere Frequenzen genutzt, hohe Frequenzen erfahren „nur“ die Richtwirkung durch das Richtrohr-Element. Die Teilbänder werden dann wieder summiert. Am Ausgang steht neben dem durch den DSP bearbeiteten Signal auch das unbearbeitete Signal des Richtrohmikrofons zur Verfügung.

Durch die Kombination von Richtrohrsignal und digitaler Signalverarbeitung wird beim SuperCMIT 2 U eine wesentlich höhere Richtwirkung erreicht als bei herkömmlichen Richtrohr-Mikrofonen vergleichbarer Länge. Eine Richtwirkung wird hier auch für mittlere und tiefe Frequenzen erreicht, womit Klangfarbenartefakte weitgehend vermieden werden. Des Weiteren wird die Rückkeule im Pegel reduziert.

Mit drei Schaltern kann der Nutzer zudem einen Trittschallfilter oder einen Shelvingfilter für die Höhen (um Verluste eines eventuell eingesetzten Windschutzes auszugleichen) einschalten, und zwischen zwei unterschiedlichen Presets des Algorithmus hin- und herschalten. Diese bestimmen die „Aggressivität“, mit welcher der DSP Diffusschall versucht, heraus zu rechnen. Das herstellerseitig für Normalsituationen empfohlene Preset 1 bewirkt eine gute und sehr stabile Bündelung; Preset 2 berechnet eine sehr starke Bündelung, die schnell in einer sehr unkontrollierten bzw. inkonsistenten Aufnahme resultieren kann. Für schnelle Impulse und ortsfeste Schallquellen macht der Einsatz des zweiten Presets dennoch manchmal Sinn. Im späteren Versuch wird aufgrund der breiteren Anwendung das Preset 1 verwendet.

Wie eingangs schon erwähnt, besteht bei herkömmlichen Mikrofontypen ein direkter Zusammenhang zwischen dem Polardiagramm des Mikrofons und dessen Diffusfeld-

⁶⁸ Vgl. Wittek: Die Entwicklung des SuperCMIT (2011), S. 2.

⁶⁹ Vgl. ebd., S. 3.

⁷⁰ Vgl. ebd., S. 4f.

Übertragungsfaktor, welcher durch Aufsummieren der Anteile aus den verschiedenen Richtungen errechnet werden kann.⁷¹ Für das SuperCMIT 2 U gilt das nicht: „[...]die Diffusschallabsenkung passiert unabhängig vom Polardiagramm nur für als diffus erkannten Schall.“⁷²

2.9 Das BLM 03 Cg

Das BLM 03 Cg ist ein Grenzflächenmikrofon, es besteht also aus einem bündig in eine (in diesem Fall runde) Fläche eingebauten Druckempfänger. Solange die Abmessung der Grenzfläche größer als die Wellenlänge ist, kann sich Schall nicht um diese Fläche herum beugen. Es ergibt sich also eine halbkugelförmige Richtcharakteristik.

Grenzflächenmikrofone machen sich das Phänomen des Druckstaus nicht nur für hohe Frequenzen, sondern – abhängig von der Größe der schallharten Fläche um die Membran herum – auch für mittlere bis tiefe Frequenzen zu Nutze.

„An reflektierenden Oberflächen herrschen besondere akustische Bedingungen, denn alle Schallwellen, die des Direktschalls und der Reflexionen, sind unmittelbar an der Oberfläche gleichphasig.“⁷³



Abbildung 6: Das BLM 03 Cg, das Kleinere der beiden Grenzflächenmikrofone der Firma Schoeps

Abhängig vom Einfallswinkel führt der Druckstau zu Pegelanhebungen von 0 dB (Schalleinfall parallel zur Grenzfläche) bis 6 dB (orthogonaler Schalleinfall), also bis zu einer Verdopplung der Ausgangsspannung gegenüber „normalen“ Druckempfängern.⁷⁴ Die Anhebung p richtet sich in etwa nach der Funktion $p = p_0 \cos(\varphi)$, mit $p_0 = 6\text{dB}$.⁷⁵ Die Größe bzw. der Durchmesser d der schallharten Fläche, auf der das Mikrofon angebracht wird, entscheidet über den Verlauf des Frequenzganges zu tiefen Frequenzen hin. Sie bestimmt die untere Grenzfrequenz f_u , bis zu welcher der Druckstau effekt die Pegelanhebungen hervorruft. Genauer gilt hier:

$$f_u \geq \frac{c}{2d} \quad (13)^{76}$$

Die Größe d der Fläche bezieht man z.B. auf den Durchmesser einer Scheibe, oder – bei Rechtecken – auf den doppelten Abstand vom Mikrofon zur nächsten Kante.⁷⁷ Ein linearer Frequenzgang ist nur oberhalb von f_u möglich. Die notwendige Höhe der Platte, in welche die Kapsel

⁷¹ Vgl. Wittek: Die Entwicklung des SuperCMIT (2011), S. 8.

⁷² Ebd. S. 8.

⁷³ Pawera (2003), S. 86.

⁷⁴ Vgl. ebd., S. 86.

⁷⁵ Vgl. Sengpiel: Druckstau bei Mikrofonen mit Kugelcharakteristik (2009), <http://www.sengpielaudio.com/DruckstauBeiMikrofonenMitKugelcharakteristik.pdf>

⁷⁶ Schneider (2008), S. 350.

⁷⁷ Vgl. Pawera (2003), S. 85.

montiert ist, führt an den Kanten der Platte zu Beugungen und Reflexionen, welche im höheren Frequenzbereich Interferenzen und kleine Welligkeiten im Frequenzgang verursachen.⁷⁸ Grundsätzlich bleibt die halbkugelförmige Richtcharakteristik aber auch bei hohen Frequenzen erhalten, da Beugungen und Schallschatten nur in sehr geringem Maße auftreten.

Wird die Membran möglichst klein gehalten (5 - 12 mm), so können Interferenzen bei seitlichem Schalleinfall vermieden werden.

Die Nutzung des Druckstaus über den gesamten Frequenzbereich hinweg macht auch eine Unterscheidung zwischen Freifeld- und Diffusfeldentzerrungen für Grenzflächenmikrofone hinfällig.⁷⁹

Bei Platzierung des Mikrofons an einer Raumkante oder in einer Ecke kann der Übertragungsfaktor weiter um 6 bzw. 12 dB erhöht werden.⁸⁰ Davon kann beim folgenden Versuch allerdings kein Gebrauch gemacht werden, da sich dadurch auch das Verhältnis aus Direkt- und Diffusschall ändern würde. Genau wie der untere Bereich des Frequenzgangs ist auch der Bündelungsgrad beim Grenzflächenmikrofon von der Platzierung abhängig. Da das Mikrofon als Druckempfänger arbeitet, könnte man meinen, dass es wie das Kugelmikrofon einen Bündelungsgrad von 1 bzw. ein Bündelungsmaß von 0 dB hat, Schall also nicht gebündelt wird. Dies stimmt allerdings nicht. Wegen der Richtungsabhängigkeit der Druckstauwirkung hat der Grenzflächeneffekt einen größeren Einfluss auf Direktschall als auf Diffusschall. Man kann es sich auch so vorstellen, dass der Diffusschallanteil dadurch sinkt, dass Reflexionen an der Fläche, in welche das Mikrofon eingebaut ist oder auf welcher es platziert wurde, für die Schallwandlung keine Rolle spielen.⁸¹ Der Bündelungsgrad beträgt daher annähernd 2 dB, das Bündelungsmaß 3 dB und der Abstandsfaktor liegt bei ca. 1,4.⁸² In Raumkanten würde sich das Bündelungsmaß auf 6 dB, in Ecken auf 9 dB erhöhen,⁸³ da in dem Fall Reflexionen an zwei bzw. 3 Wänden des Raumes „keine Rolle mehr spielen“.

Eingesetzt werden Grenzflächenmikrofone z.B. als Tischmikrofone bei Konferenzen oder Diskussionen und vergleichbaren Situationen, bei welchen mit anderen Mikrofonen Kammfiltereffekte auftreten würden. Wegen der Unauffälligkeit werden sie auch gerne am Bühnenrand bei Theateraufführungen eingesetzt.⁸⁴ Insgesamt sind die Ergebnisse beim Einsatz von Grenzflächenmikrofonen immer stark abhängig vom Aufnahmerraum. Bei einem Raum mit geeigneter Akustik kann man mit einer unauffälligen Platzierung zweier Grenzflächen am Boden zwei bis drei Meter von der Schallquelle entfernt gute AB-Stereoaufnahmen von E-Musik, Blasorchestern und Chören erzielen.⁸⁵

⁷⁸ Vgl. Schneider (2003), S. 349f.

⁷⁹ Vgl. Görne: Tontechnik (2008), S. 270.

⁸⁰ Vgl. Schneider (2003), S. 350.

⁸¹ Vgl. Friesecke (2007), S. 409.

⁸² Vgl. Görne: Tontechnik (2008), S. 270.

⁸³ Vgl. ebd., S. 270.

⁸⁴ Vgl. Pawera (2003), S. 90.

⁸⁵ Vgl. ebd., S. 89.

3. DIE SCHALLQUELLEN

Die Mikrofone werden bei den Aufnahmen im Rahmen dieser Arbeit zwei unterschiedlichen Schallsignalen ausgesetzt. Zum einen einem technischen Signal in Form eines Rauschens, das im Zusammenspiel mit dem Raumklang Tendenzen der Diffusschallwandlung der Mikrofone verdeutlichen soll, vor allem was die Übertragung hoher Frequenzen betrifft. Zum anderen wird ein musikalisches Signal im Diffusfeld aufgenommen, welches die Auswirkungen der unterschiedlichen Diffusfeld-Frequenzgänge in der Praxis hörbar machen soll.

3.1 KAWAI-Flügel

Als musikalisches Signal wurde ein Stück auf einem Flügel der japanischen Marke Kawai eingespielt.

Der Flügel als Instrument mit geschlagener Saite hat mit den Schlaginstrumenten den längsten Ausklingvorgang.⁸⁶ Eine kontinuierliche Klangerzeugung als „quasistationären Zustand“⁸⁷ gibt es aufgrund der Hammermechanik nicht. Die Töne des Klaviers bzw. des Flügels bestehen also aus dem Einschwing- und dem Ausklingvorgang.⁸⁸ Der Einschwingvorgang dauert etwa 10 bis 30 Millisekunden und ist sehr geräuschhaltig, der Ausklingvorgang hat im tiefen Tonbereich eine Dauer von 20 bis 30 Sekunden und dauert im hohen Tonbereich etwa 5 bis 10 Sekunden an.⁸⁹ Dies gilt natürlich nur, wenn nicht früher abgedämpft wird. Für den Fall hat der Flügel eine kurze Ausschwingzeit von 20 ms.⁹⁰ Da beim eingespielten Stück alle Töne relativ schnell bedämpft werden, stellt die Unterscheidung zwischen Ausschwingvorgang des Instruments und Nachhall im Raum kein Problem dar.

Wichtig für die Untersuchungen dieser Arbeit ist vor allem das Frequenzspektrum des Flügels. Der Tonumfang reicht zunächst einmal vom A'' bis zum c'''''. Anders ausgedrückt decken die Grundtöne des Flügels genau wie die des Klaviers einen Frequenzbereich von 27,5 bis 4186 Hz ab.⁹¹ Vor allem für Druckgradienten-Empfänger sollten die tiefsten Flügel-Grundtöne also durchaus eine Herausforderung darstellen. Der Abstand der Grundtöne beträgt dabei in der heute verwendeten gleichstufig temperierten Stimmung einen Faktor von 106/100, was dann den 100 Cent entspricht.⁹²

Die Obertonamplitude ist zu hohen Frequenzen hin gleichmäßig abnehmend, wobei der Grundton nur in der unteren Lage nicht die lauteste Harmonische darstellt.⁹³ Die Ausbildung der Obertöne ist – wie bei den meisten akustischen Instrumenten – auch beim Flügel von der Anschlagsstärke abhängig. Generell gilt: Je stärker der Anschlag der Saite, desto mehr Teiltöne werden

⁸⁶ Vgl. Dickreiter (1997), S. 80.

⁸⁷ Ebd., S. 88.

⁸⁸ Vgl. ebd., S. 75.

⁸⁹ Vgl. ebd., S. 80.

⁹⁰ Vgl. Friesecke (2007), S. 179.

⁹¹ Vgl. ebd., S. 179.

⁹² Vgl. Dickreiter (1997), S. 79.

⁹³ Vgl. ebd., S. 88.

gebildet und desto höher der Pegel jener Harmonischen.⁹⁴ In den unteren Tonlagen erhält man damit einen Obertonbereich von bis zu 3 kHz⁹⁵, in den oberen Tonlagen reichen die Frequenzkomponenten bei extremem Anschlag bis über 10 kHz hinaus.⁹⁶ Die höchsten Obertöne sind beim c''' zu erwarten.⁹⁷ Der Resonanzboden des Flügels sorgt für einen Hauptformanten im Bereich zwischen 100 und 1000 Hz;⁹⁸ sonstige Formantbereiche sind selten vorhanden. Der Dynamikumfang des Flügels ist mit ca. 45 dB recht groß.⁹⁹

Beim Anschlag einer Taste werden beim Flügel und Klavier mit Ausnahme der tiefsten Töne bis zu drei Saiten angeschlagen. Dadurch entstehende Schwebungen und die ausgeprägten Geräuschkomponenten beim Einschwingvorgang sorgen für den charakteristischen Flügel- bzw. Klavierklang.¹⁰⁰ Weiterhin ist der Klang des Flügels auch stark von der Stellung des Deckels abhängig. Ein weiter geöffneter Deckel lässt den Flügel lauter und präsenter klingen.¹⁰¹ Da eine Dämpfung hoher Frequenzen ein großer Nachteil für die Untersuchung dieser Arbeit wäre, war der Flügeldeckel bei den Aufnahmen so weit wie möglich geöffnet.

Für bessere klangliche Eigenschaften gegenüber dem Klavier sorgen beim Flügel bessere Abstrahlbedingungen.¹⁰² Eine Bündelung der Schallabstrahlung erfolgt beim Flügel jedoch genau wie bei anderen Instrumenten und bei Lautsprechern in Abhängigkeit vom Verhältnis aus Schallquellengröße und Wellenlänge; d.h. auch die Schallquellen besitzen eine Richtcharakteristik, die vor allem bei akustischen Instrumenten bisweilen sehr viel komplexere und uneinheitlichere Formen annimmt, als man es von Richtcharakteristiken der Mikrofone her kennt. Letztendlich formt das frequenzabhängige Abstrahlungsverhalten der Schallquelle maßgeblich den diffusen Schall im Raum.

Im Allgemeinen kann man davon ausgehen, dass Schall in tiefen Lagen unter ca. 250 Hz kugelförmig abgestrahlt wird und darüber in mittleren und hohen Lagen eine zunehmende Richtwirkung erfährt.¹⁰³ Eine genauere Untersuchung dessen im Bezug auf den Flügel als Schallquelle zeigt Andreas Friesecke in der „Audio-Enzyklopädie“ auf Seite 179. Eine rechnerische Ermittlung eines Fernfeldfrequenzganges mittels Integration lässt sich damit selbstverständlich nicht durchführen. Es wird aber ersichtlich, dass sich die Abstrahlung hoher, für die Präsenz, Klarheit und Durchsichtigkeit verantwortlicher Frequenzanteile auf einen relativ schmalen Bereich begrenzt.¹⁰⁴

Bei der Aufnahme im Direktfeld gibt die Richtcharakteristik die Möglichkeit, Einfluss auf den Klangcharakter des Instruments zu nehmen. Im Diffusfeld interessiert allerdings nur die Summe der Richtcharakteristiken über alle Frequenzen hinweg und wie sich diese einerseits auf den Frequenzgang des Diffusschalls und andererseits auf den Abstandsfaktor auswirkt. Denn eine gerichtete Schallabstrahlung erweitert den Hallradius in der 0°-Richtung für eine bestimmte Fre-

⁹⁴ Vgl. Dickreiter (1997), S. 76.

⁹⁵ Vgl. ebd., S. 88.

⁹⁶ Vgl. Pawera (2003), S. 149.

⁹⁷ Vgl. Meyer: Die Richtcharakteristik des Flügels (1965), S. 1086.

⁹⁸ Vgl. Friesecke (2007), S. 179.

⁹⁹ Vgl. Dickreiter (1997), S. 77f.

¹⁰⁰ Vgl. ebd., S. 88.

¹⁰¹ Vgl. Friesecke (2007), S. 178.

¹⁰² Vgl. Dickreiter (1997), S. 88.

¹⁰³ Vgl. Pawera (2003), S. 149.

¹⁰⁴ Vgl. Friesecke (2007), S. 179.

quenz um den Faktor $\sqrt{\gamma_a}$, bei Blechblasinstrumenten kann das im höheren Frequenzbereich bis zu einem Faktor von 10 gehen, im Schnitt beträgt der Faktor etwa 1,5 bis 2.¹⁰⁵

Eingespielt wurde der Flügel von Masako Kamikawa, einer Klavierpädagogin, welche Klavier und Klavierkammermusik in Mannheim und Stuttgart studierte.

3.2 Gesang

Über die Flügelbegleitung sang Doganay Sahin, ein Rock-/Pop-Sänger, Frontman der Rockband "Öpücük", der als Songwriter Lieder in türkischer und englischer Sprache verfasst.

Die Gesangsstimme des Menschen deckt mit den Grundtönen allgemein einen Frequenzbereich ab, welcher von 65Hz für Bassstimmen bis zu 1047Hz für Sopranstimmen reicht.¹⁰⁶ Mit Einbezug der Obertöne nimmt das Spektrum für Vokale im Normalfall oberhalb von 3500 Hz mit 25dB/Oktave ab, bei stimmhaften Zischlauten reichen Klanganteile bis zu 8000Hz, bei stimmlosen sogar bis etwa 12000 Hz.¹⁰⁷

Anders als etwa beim Flügel wird der Klang der Gesangsstimme von einer Vielzahl unterschiedlicher Formanten geprägt.

„Eine wichtige Eigenschaft der Formanten besteht darin, dass ihre Frequenzlage vom umgebenden Raum nicht beeinflusst wird, während sich andere Eigenschaften des Klangspektrums – wie beispielsweise die Steilheit des Pegelabfalls zu tiefen und zu hohen Frequenzen hin – je nach Frequenzcharakteristik der Nachhallzeit verändern können.“¹⁰⁸

Der Hauptformant der Gesangsstimme ist derweil für die gesungenen Vokale unterschiedlich; bei männlichen Gesangsstimmen liegt der erste Formant in etwa zwischen 150 und 900 Hz und der zweite zwischen 500 und 3000 Hz; der Grundton bei tiefen Lagen kann um bis zu 20 dB leiser ausfallen als dessen stärkste Obertöne.¹⁰⁹ Eine Besonderheit der Gesangsstimme ist der sogenannte Sängerformant, welcher unabhängig vom gesungenen Vokal etwa zwischen 2300 und 3000 Hz liegt und welchen ausgebildete Sänger bewusst einsetzen können, um sich gegen Begleitinstrumente besser durchzusetzen.¹¹⁰

3.3 ADAM A5X

Beim A5X-Lautsprecher handelt es sich um einen relativ neuen Zwei-Wege-Studiomonitor der Berliner Firma ADAM. Ein 5,5-Zoll großer Mid-woofer aus Carbon, Rohacell und Glasfaser arbeitet bis zur Übergangsfrequenz von 2500 Hz, ab welcher der X-ART Hochtöner übernimmt.¹¹¹ Der Name steht für die „eXtended Accelerating Ribbon Technology“¹¹², welche von der Firma

¹⁰⁵ Vgl. Dickreiter (1997), S. 97.

¹⁰⁶ Vgl. Friesecke (2007), S. 158.

¹⁰⁷ Vgl. Meyer: Kirchenakustik (2003), S. 70.

¹⁰⁸ Meyer: Musikalische Akustik (2008), S. 129.

¹⁰⁹ Vgl. Meyer: Kirchenakustik (2003), S. 69.

¹¹⁰ Vgl. Meyer: Musikalische Akustik (2008), S. 141.

¹¹¹ Vgl. <http://www.adam-audio.com/de/pro-audio/products/a5x/technical-data>.

¹¹² <http://www.adam-audio.com/de/technology/x-art>.

ADAM entworfen wurde und eine andere Arbeitsweise als das Kolbenprinzip herkömmlicher Hochtöner beinhaltet. Die Membran des X-Art ist lamellenartig gefaltet. Je nach Eingangssignal schließen oder öffnen sich die einzelnen „Falten“ des Hochtöners und bewirken damit eine Luftbewegung. Diese Arbeitsweise hat laut Hersteller¹¹³ mehrere Vorteile:

Die Bewegungsgeschwindigkeit der angetriebenen Luft weist bei konventionellen Membranen dieselbe Geschwindigkeit wie die Membranbewegung auf. Durch die Faltung stehen die Geschwindigkeiten von Luft- und Membranbewegung beim X-Art jedoch in einem Verhältnis von etwa vier zu eins.¹¹⁴ Die Wirkung ist vergleichbar mit dem Zufallen lassen eines liegenden, leicht geöffneten Buches.¹¹⁵

Dadurch, dass man es mit vielen zusammenarbeitenden dünnen Membranteilen zu tun hat, entfällt das Problem des Aufbrechens einer Gesamtmembran in Teilmembranen zu hohen Frequenzen hin.¹¹⁶

Die akustisch wirksame Membranfläche vergrößert sich durch die Faltung im Vergleich zum auf dem Kolbenprinzip basierenden Hochtöner. Die Fläche der sichtbaren Schallaustrittsöffnung steht mit der akustisch wirksamen Fläche im Verhältnis von eins zu zweieinhalb.

Im Prinzip resultiert die Arbeitsweise des X-Art-Hochtöners (auch hier gemäß der Herstellerangaben) in einem hohen Wirkungsgrad, einer größeren Dynamik, einem sehr linearen Impedanz- und Phasenverlauf und nicht zuletzt einem erweiterten Frequenzspektrum, welches von 2500 Hz bis zu 50000 Hz reicht.¹¹⁷ Ob diese zusätzlichen 30000 Hz im nicht-hörbaren Frequenzbereich einen wirklichen Vorteil bringen, sei einmal dahingestellt.

Bei den Untersuchungen dieser Arbeit soll der ADAM A5X mit der Wiedergabe von Rauschen zusammen mit einem diffusfeld-entzerrten Kugelmikrofon eine Art Referenzsignal bilden, welches die Frequenzantwort des Raumes widerspiegeln soll. Da natürlich auch der Lautsprecher selbst in der Wiedergabe gewisse Unlinearitäten verursacht, darf man bei der Betrachtung des entstehenden Referenzsignals nicht allzu sehr ins Detail gehen; gröbere Abweichungen der „Raumantwort“ von der 0 dB-Achse (die es im Diffusfeld vor allem bei höheren Frequenzen geben sollte) können so jedoch ermittelt werden. Unlinearitäten des Messmikrofons sollten bei günstiger Platzierung denen des Lautsprechers gegenüber sehr klein sein.

¹¹³ <http://www.adam-audio.com/de/technology/x-art>.

¹¹⁴ Vgl. ebd.

¹¹⁵ Vgl. <http://www.amazona.de/test-adam-audio-a5x-aktiv-lautsprecher/2/>

¹¹⁶ Vgl. <http://www.adam-audio.com/de/technology/x-art>

¹¹⁷ Vgl. ebd.

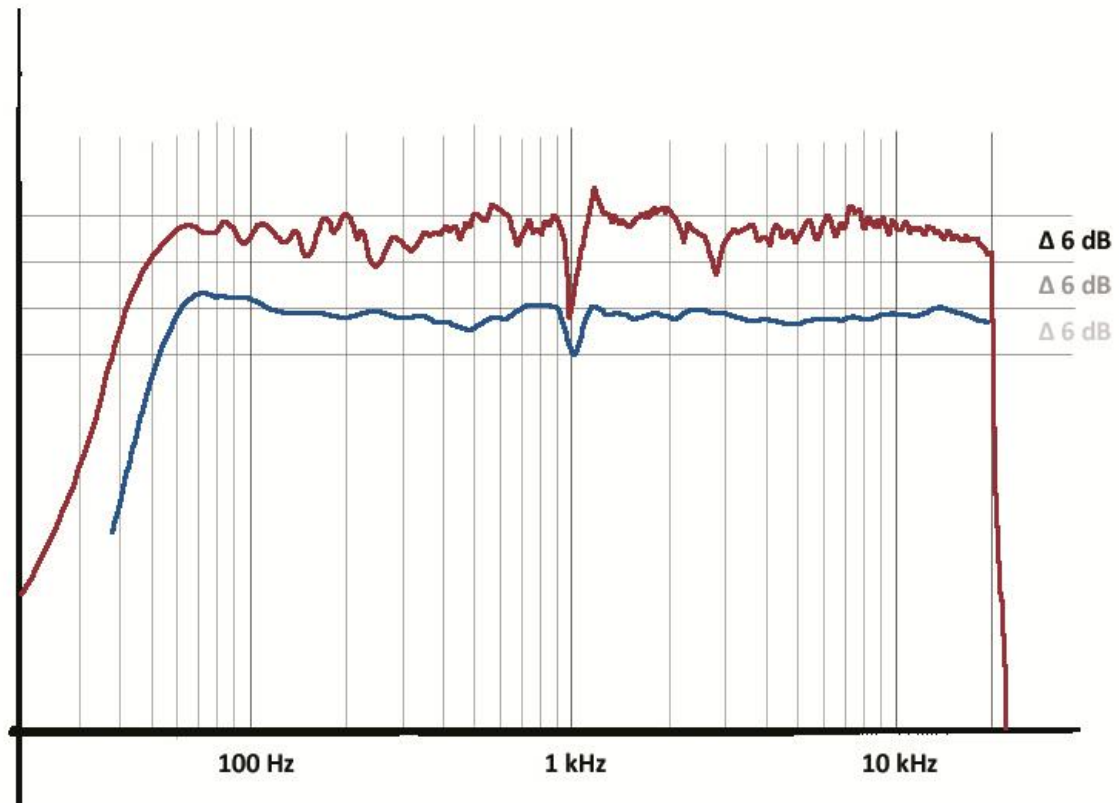


Abbildung 7: Frequenzgänge des ADAM A5X, rot: ungeglätteter Verlauf der eigenen Messung, blau: Messung des Musikportals „Bonedo“

Die akustische Ausmessung des A5X durch das Musikportal „Bonedo“¹¹⁸ zeigt einen – zumindest für die Preisklasse – sehr ausgeglichenen Frequenzgang mit einer leichten Überhöhung im Bassbereich und einem deutlichen Einbruch bei etwa 1 kHz, welchen der Autor mit Interferenzen am Messort begründet.¹¹⁹ Bei eigenen Ausmessungen des eingesetzten Lautsprechers wurde dieser Einbruch noch deutlicher festgestellt; was die These, dass es sich um einen Messort-begründeten Fehler handelt, dennoch in keinsten Weise widerlegt, da bei den eigenen Messungen nur provisorisch versucht werden konnte, den Raum akustisch dem Ideal eines schalltoten Messraumes näher zu bringen. Auch andere drastische Einbrüche (wie z.B. bei ca. 2,8 kHz) sind eher dem Raum zuzuschreiben. Eine Bassüberhöhung ist im ungeglätteten Verlauf der Messkurve nicht zu sehen; der Tiefenabfall ab der unteren Grenzfrequenz von 50 Hz erscheint bei den eigenen Messungen weniger abrupt. Die dem Graphen zu entnehmende obere Grenzfrequenz von 20 kHz resultiert aus der Begrenzung des Sweeps als Messsignal auf jene obere Hörgrenze.

Beide Messungen beziehen sich allerdings auf das Direktfeld auf der 0°-Achse des Lautsprechers.

¹¹⁸ <http://www.bonedo.de/artikel/einzelansicht/adam-audio-a5x.html>.

¹¹⁹ Vgl. <http://www.bonedo.de/artikel/einzelansicht/adam-audio-a5x/2.html>.

4. DER AUFNAHMERAUM

4.1 Wichtige Kenngrößen

Bei allen Aufnahmen spielt auch der Raum eine Rolle. Bei klassischen Produktionen kann man davon ausgehen, dass 50% des Klangcharakters der Aufnahme ein Ergebnis der Wahl des Raumes ist.¹²⁰ Bei der vorliegenden Arbeit sind Raumeinflüsse noch stärker zu gewichten. Vor allem was akustisch unbehandelte Räume anbelangt, sind die Ergebnisse von im Diffusfeld aufgenommenen Schallereignissen hauptsächlich vom Raum selbst abhängig. „Klangverfärbungen“ des Mikrofons spielen dann eine dem Raum untergeordnete Rolle. Daher werden im folgenden Kapitel die Aufnahmeräume auf ihre akustischen Besonderheiten und ihre Rolle im Versuch hin untersucht.

Da bei einem Vergleich der Diffusschallwandlung von eben jenem Diffusschall auch genug vorhanden sein muss, ist ein wichtiges Kriterium die „Halligkeit“, bzw. die Nachhallzeit des Raumes. Diese ergibt sich als Abklingvorgang des diffusen Schallfeldes aus einer Summe vieler Reflexionsvorgänge mit unterschiedlichen zeitlichen Abständen.¹²¹ Während die Anzahl der auftretenden Schallrückwürfe (z.B. von den Begrenzungsflächen des Raumes) pro Zeiteinheit mit dem Quadrat der Zeit zunimmt, nimmt deren Intensität mit der Zeit ab. Außerdem verhält sich die Anzahl der Schallrückwürfe pro Zeiteinheit umgekehrt proportional zum Raumvolumen.¹²² Schließlich müssen die Schallwellen bei größeren Räumen zwischen den Reflexionen größere Wege zurücklegen. Der aus allen Schallrückwürfen entstehende Nachhall im Raum folgt statistischen Gesetzen. Dies ist jedoch nur der Fall, wenn die Resonanzen des Raumes in ihrer Frequenz so dicht beieinander liegen, dass sie durch gegenseitige Überlagerung einen mehr oder weniger linearen Frequenzgang bilden und nicht einzeln hervortreten.¹²³ Das ist erst ab einer bestimmten, vom Raum anhängigen Grenzfrequenz gegeben. Schroeder stellte für diese Grenzfrequenz f (auch der Name Schroeder-Frequenz oder Großraumfrequenz sind geläufig¹²⁴) folgendes Verhältnis zur Nachhallzeit T und dem Volumen V auf:

$$f = 2000 * \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (14)^{125}$$

Vor allem in kleinen Räumen mit hoher Nachhallzeit folgen tiefe Frequenzen also nicht dem statistischen Verhalten.¹²⁶ Einzeln hervortretende Resonanzen entstehen nicht nur unterhalb der

¹²⁰ Vgl. Görne: Tontechnik (2008), S. 90.

¹²¹ Vgl. Meyer: Kirchenakustik (2003), S. 28.

¹²² Vgl. ebd., S. 28.

¹²³ Vgl. ebd., S. 29.

¹²⁴ Vgl. Görne: Tontechnik (2008), S. 72.

¹²⁵ Meyer: Kirchenakustik (2003), S. 29.

¹²⁶ Vgl. ebd., S. 29.

angesprochenen Grenzfrequenz, sondern auch oberhalb durch das Phänomen der stehenden Wellen, also zwischen parallel verlaufenden, schallharten Begrenzungsflächen.¹²⁷

„In durchschnittlichen Räumen ist der Frequenzgang bei tiefen Frequenzen kammfilterartig und wird mit steigender Frequenz [ab obiger Grenz- oder Schroeder-Frequenz] allmählich linear, abgesehen von der Betonung oder Absenkung einzelner Frequenzbereiche gemäß der Nachhallzeit.“¹²⁸

Was die Raumakustik betrifft, lassen sich oberhalb der Schroeder-Frequenz einige wichtige Größen ausrechnen. So zum Beispiel die oben schon erwähnte Nachhallzeit T , welche die älteste und auch bekannteste Größe der Raumakustik darstellt.¹²⁹ Sie gibt die Zeit an, in welcher ein Schallereignis im Raum einen Schalldruckpegelabfall von 60 dB erfährt bzw. die Zeit, in welcher der Schalldruck auf ein Tausendstel des Anfangswertes sinkt.¹³⁰ Da der Zuhörer das Abklingen eines Schallereignisses nur bis zum Verschwinden dessen im Störpegel des Umgebungslärmes wahrnehmen kann, hängt die subjektiv empfundene Nachhalldauer natürlich auch vom Anfangspegel des Schallereignisses und vom Störpegel ab. Für die objektive Nachhallzeit T eines Raumes spielt das allerdings keine Rolle, sie lässt sich entweder mithilfe eines Impulses oder Ausschaltvorgangs und eines (analogen oder digitalen) Pegelschreibers messen oder anhand der Faktoren des Raumvolumens V [m³], des Absorptionsvermögens A [m²] bzw. des dimensionslosen mittleren Absorptionsgrades α_m und der Gesamtoberfläche des Raumes S [m²] berechnen.

$$T = 0,163 * \frac{V}{A} \quad (15)^{131}$$

$$T = 0,163 * \frac{V}{-S * \ln(1 - \alpha_m)} \quad (16)^{132}$$

Erstere Formel, die sogenannte „Sabinesche Nachhallformel“, ist eine Vereinfachung für kleine Absorptionsgrade von bis zu ca. 0,25, während letztere – die sogenannte Eyringsche Nachhallformel – auch bei größeren Absorptionsgraden und damit kürzeren Nachhallzeiten gilt.¹³³ Beide Formeln berücksichtigen im Gegensatz zur sogenannten Knudsenschen Nachhallformel die Luftabsorption nicht, sind für die Praxis allerdings genau genug.¹³⁴ Das Schallabsorptionsvermögen A ist eine Größe, welche alle Absorptionsgrade und Teilflächen eines Raumes einschließt. Man muss sich dies also so vorstellen, dass alle Teilflächen S_n mit ihren spezifischen Absorptionsgraden α_n zu einer Fläche A mit dem Absorptionsgrad $\alpha = 1$ aufsummiert werden.¹³⁵

$$A = \sum_1^n \alpha_n * S_n \quad (17)^{136}$$

¹²⁷ Vgl. Meyer: Kirchenakustik (2003), S. 29.

¹²⁸ Görne: Tontechnik (2008), S. 91f.

¹²⁹ Vgl. Ahnert & Tennhardt (2008), S. 188.

¹³⁰ Vgl. ebd., S. 188.

¹³¹ Friesecke (2007), S. 60.

¹³² Ebd., S. 60.

¹³³ Vgl. Dickreiter (1997), S. 32.

¹³⁴ Vgl. ebd., S. 32.

¹³⁵ Vgl. Webers (2007), S. 86.

Der Absorptionsgrad einer Fläche ist allerdings frequenzabhängig. Folgerichtig ist auch die Nachhallzeit als Funktion der Frequenz zu betrachten, welche den Klang des gesamten Diffusschalls verfärbt. Daher wird die Nachhallzeit bei der akustischen Ausmessung eines Raumes für mehrere Frequenzen, üblicherweise in Terz- oder Oktavabständen von 125 Hz bis 4 kHz, bestimmt.

Auch für das Verhältnis von Direkt- und Diffusschall in einem Raum gibt es eine statistische Berechnung. Diese Größe ist eine Funktion der Entfernung zur Schallquelle. In einem bestimmten Abstand r_H zu der selbigen hat dieses Verhältnis in Abhängigkeit zum Raumvolumen V und der Nachhallzeit T den Betrag 1. Den Abstand r_H nennt man Hallradius.¹³⁷

$$r_H = 0,057 * \sqrt{\frac{V}{T}} \quad (18)^{138}$$

Diese Formel geht von einem Kugelstrahler als Schallquelle und einer kugelförmigen Richtcharakteristik beim Schallwandler aus. In der Literatur finden sich daher verschiedene Adaptionen der Gleichung zur Realitätsnaheren Bestimmung. Der „effektive Hallradius“ r_{Heff} nach Dickreiter bezieht den Bündelungsgrad γ_Q der Schallquelle mit ein, während Friesecke auch den Bündelungsgrad γ_M des Mikrofons berücksichtigt.¹³⁹

$$r_{Heff} = 0,057 * \sqrt{\frac{V}{T} \gamma_Q} \quad (19)^{140}$$

$$r_H = 0,057 * \sqrt{\frac{V}{T} \gamma_Q \gamma_M} \quad (20)^{141}$$

Alle diese Formeln vernachlässigen die Luftabsorption, sind aber in der Regel ebenfalls für die Praxis genau genug. Zu beachten ist jedoch, dass auch diese Formeln wegen der Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit und der Bündelungsgrade von Schallquelle und Schallwandler (siehe Kapitel 3 und 2) für tiefe und hohe Frequenzen sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern. Für ein Nierenmikrofon vergrößert sich beispielsweise der mit der ersten Hallradius-Formel errechnete Wert für tiefere Frequenzen um den Faktor 2 bis 5, für hohe Frequenzen um bis zu 10.¹⁴²

Ab einer Entfernung, die dem dreifachen Hallradius entspricht, geht man davon aus, dass der Direktschallanteil vernachlässigbar ist, und man sich also im „reinen“ Diffusfeld befindet.¹⁴³ Für die Aufnahmen im Rahmen dieser Arbeit empfiehlt sich – schon was die Praktikabilität betrifft –

¹³⁶ Webers (2007), S. 86.

¹³⁷ Vgl. ebd., S. 170.

¹³⁸ Pawera (2003), S. 55.

¹³⁹ Vgl. Dickreiter (1997), S. 37.

¹⁴⁰ Vgl. Effektiver Hallradius nach Dickreiter (1997), S. 37.

¹⁴¹ Hallradius nach Friesecke (2007), S. 472.

¹⁴² Vgl. Dickreiter (1997), S. 38.

¹⁴³ Vgl. Friesecke (2007), S. 473.

ein möglichst kleiner Hallradius und eine dementsprechend große Nachhallzeit, um den Direkt-schallanteil klein halten zu können.

Es ist aber auch deswegen von Vorteil, da lange Nachhallzeiten im Allgemeinen eine bessere Verteilung des Schalls auf alle Punkte und Richtungen im Raum bedeuteten. Die Diffusität ist also besser. Der ideale Aufnahmeort für einen Vergleich der Diffusschallwandlung wäre sicherlich das diffuse Schallfeld eines Hallraumes. Für den potenziellen Mikrofonkäufer mag es allerdings schwierig sein, eine Verbindung zwischen den Ergebnissen einer derart „unnormalen“ Aufnahmesituation und möglichen Auswirkungen auf seine eigenen Aufnahmen herzustellen. Daher wurde als realitätsnaher und trotzdem im Hinblick auf das Diffusfeld ausreichend guter Aufnahmeort eine Kirche gewählt.

Die evangelische Kirche der Gemeinde „Himmelsleiter“ in Mönchfeld vereinte gute akustische Bedingungen mit dem Vorhandensein eines Flügels.

Sie wurde in den Jahren 1965/1966 gebaut und 2009 komplett umgestaltet und renoviert;¹⁴⁴ kann also durchaus zu den Kirchenneubauten gezählt werden. Bei den Umbauten wurde auch stark auf akustische Gegebenheiten geachtet. Man findet im gesamten Gottesdienstraum der Kirche daher kaum parallele Begrenzungsflächen, was eine Berechnung von Nachhallzeiten und Hallradien zunächst einmal erschwert, durch die geförderte Diffusität im Raum dieser Arbeit allerdings sehr zugute kommt. Im Hauptraum (Bereich A in Abbildung 8) wurde eine Deckenverkleidung aus Holzlatten gewählt, in den Nischen B und C wurden absorbierende Elemente unter der relativ niedrigen Decke angebracht. Als Sitzgelegenheiten findet man gepolsterte Stühle vor. Trotz der akustischen Optimierung empfindet man den Raum für eine moderne Kirche mit der gegebenen Größe als durchaus „hallig“. Der Nachhall selbst klingt subjektiv sehr angenehm.

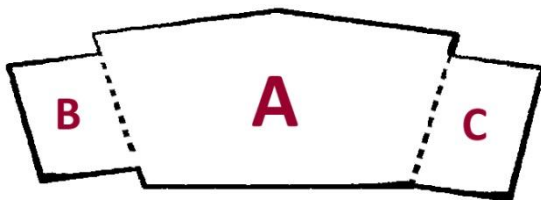


Abbildung 8: Skizze des Grundrisses der evangelischen Kirche in Mönchfeld

4.2 Rechnerische Ermittlungen

Diesen subjektiven Eindruck sollen einige wenige Rechnungen nun begründen:

Die Grundfläche der Kirche lässt sich ungefähr in die geometrischen Formen der rechtwinkligen Dreiecke für A_2 und A_3 , ein Rechteck für A_1 und zwei Parallelogramme für B und C einteilen. Die Gesamtfläche des Bodens S_1 ergibt dann:

$$S_1 = 2 \cdot (A_1 + A_2 + A_3) + B + C = 214 \text{ m}^2$$

¹⁴⁴ Vgl. <http://www.ev-ki-stu.de/gemeinden/moenchfeld/>.

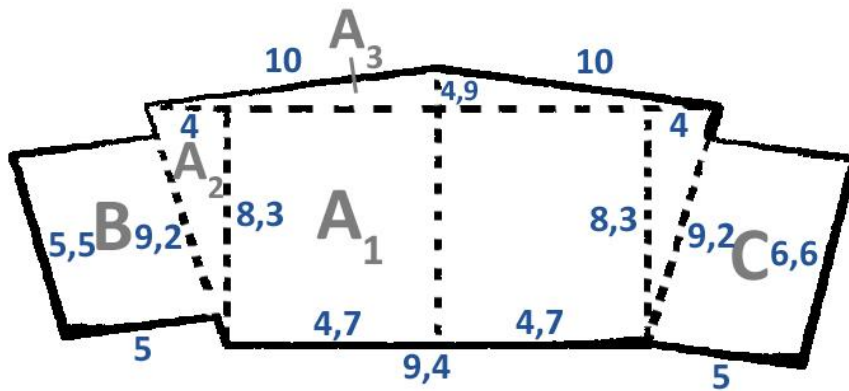


Abbildung 9: Grundriss der Kirche mit horizontalen Streckenmaßen in Meter. Abbildung nicht maßstabsgetreu!

Der Fußboden ist in der kompletten Kirche gefliest, ist aber etwa zu einem Drittel mit gepolsterten Stühlen zugestellt. Für das Absorptionsvermögen erhält man damit der Reihe nach für den unbestuhlten (α_{fl}) und den bestuhlten (α_{st}) Bereich:

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
α_{Fl}^{145}	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
$S_{\text{Fl}}^* \alpha_{\text{Fl}} [\text{m}^2]$	1,43	1,43	2,85	2,85	4,28	4,28
α_{St}^{146}	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
$S_{\text{St}}^* \alpha_{\text{St}} [\text{m}^2]$	34,9	47,1	57,0	62,7	58,5	49,9

Auch die Wand- und Deckenkonstruktion ist aufgrund der Dachschrägen relativ komplex. In allen Bildern sind Raumhöhen rot, horizontale Raummaße Blau gekennzeichnet.

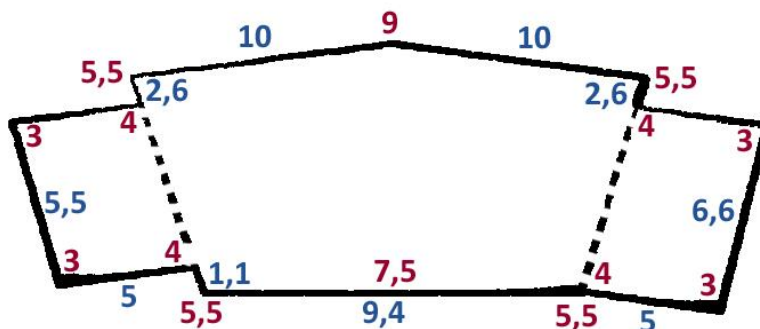


Abbildung 10: Längen (blau) und Höhen (rot) der Begrenzungsflächen des Aufnahme-raumes in Meter

¹⁴⁵ Meyer: Kirchenakustik (2003), S. 163.

¹⁴⁶ <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-RT60Koeff.htm>.

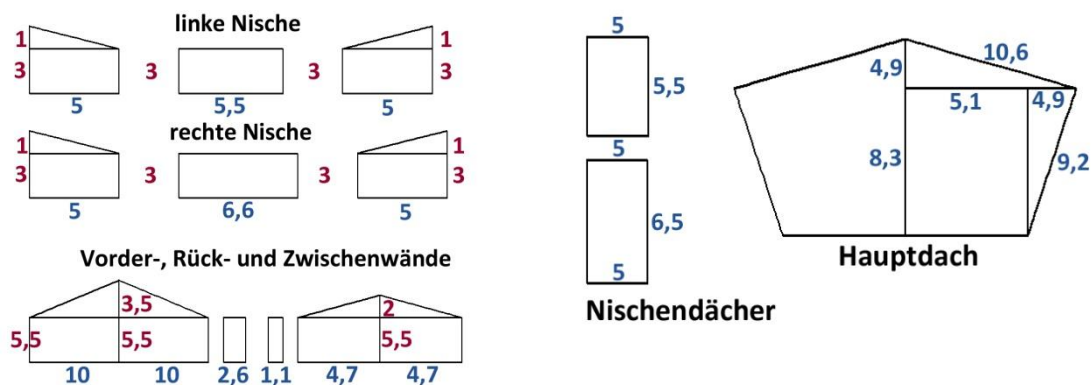


Abbildung 11: Deckenmaße [m]

Abbildung 12: Wandbemaßungen [m]

Ausgehend von diesen mit einem Entfernungsmesser gemessenen Werten ergeben sich folgende Flächen für die Wände und Dächer:

Die mit glattem Putz verkleideten Wände der Nischenbereiche B und C haben zusammen eine Fläche S_2 von 106,3 m².

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
α_2^{147}	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
$S_2 * \alpha_2$ [m ²]	2,13	2,13	3,19	4,25	5,32	5,32

Vorder- und Rückwand des Gottesdienstraumes sind – mit Ausnahme einer großen Fensterfront in der Vorderseite und der in die Rückseite eingebauten Orgel – mit Rauputz verkleidet. Die folgende Tabelle geht von einer Rauputzfläche S_3 von insgesamt 182 m² aus.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
α_3^{148}	0,05	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12
$S_3 * \alpha_3$ [m ²]	9,12	9,12	12,8	16,4	18,2	21,9

Die Fensterfront kommt auf eine Fläche S_4 von etwa 35 m². Der Absorptionsgrad nimmt beim Fensterglas im Gegensatz zur verputzten Fläche zu hohen Frequenzen hin ab.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
α_4^{149}	0,25	0,15	0,10	0,05	0,03	0,03
$S_4 * \alpha_4$ [m ²]	8,75	5,25	3,50	1,75	1,05	1,05

Die mit glatten Holzbalken verkleidete Decke des Hauptraumes kommt auf eine Quadratmeterzahl von 87,5. Ähnlich wie beim Fensterglas, allerdings weniger stark, nimmt auch bei einer glatten Holzverkleidung der Absorptionsgrad mit der Frequenz ab.

¹⁴⁷ Vgl. Meyer: Kirchenakustik (2003), S. 160.

¹⁴⁸ Vgl. ebd., S. 160.

¹⁴⁹ Vgl. ebd., S. 160.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
α_s^{150}	0,28	0,10	0,07	0,06	0,06	0,06
$S_s \cdot \alpha_s$ [m ²]	24,5	8,75	6,13	5,25	5,25	5,25

Die beiden großen Absorberelemente mit Lochplatten an den Decken der Nischenräume ergeben eine Fläche von etwa 60,5 m². Über den genauen Absorptionsgrad kann hier nur spekuliert werden. Die folgende Tabelle orientiert sich an den Angaben für akustische Deckenfliesen von Sengpiel.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
α_{Ab}^{151}	0,70	0,66	0,72	0,92	0,88	0,75
$S_{Ab} \cdot \alpha_{Ab}$ [m ²]	42,4	39,9	43,6	55,7	53,2	45,4

Rechnet man alle Teilflächen $A_n = S_n \cdot \alpha_n$ zusammen, so erhält man für die verschiedenen Frequenzen folgende Werte:

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
A_{ges} [m ²]	123,2	113,7	129,0	148,9	145,8	133,1

Mit der Sabinschen Nachhallformel und dem errechneten Raumvolumen von ca. 1260 m³ ergeben sich folgende Nachhallzeiten:

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T_{60} [s]	1,67	1,81	1,59	1,38	1,41	1,54

Für eine Kirche erscheinen diese Werte ungewöhnlich klein. Eine subjektiv empfundene Nachhalldauer würde man in den Bereich von zwei bis drei Sekunden legen. Davon abgesehen sind die Werte über die verschiedenen Frequenzen hinweg sehr konstant. Die gemittelte Nachhallzeit von 1,57 s resultiert in einer Schroederfrequenz von 70,5 Hz. Von einer statistischen Verhaltensweise des Diffusschalls ist also erst ab dieser Frequenz auszugehen.

4.3 Messungen

Ob diese als zu kurz empfundenen Ergebnisse der Nachhallzeit-Berechnung wirklich stimmen können, wurde in Messungen der akustischen Raum-Parameter nachgeprüft. Die Messungen wurden mit der Messsoftware „CARMA“ (=Computer Aided Room Analyser)¹⁵² durchgeführt. Als Messsignal wurden durch die Software bereitgestellte logarithmische Sweeps über den ADAM-Monitor abgespielt, mit dem Druckempfänger CCM 2 in unterschiedlichen Abständen aufgenommen und durch die Software ausgewertet. Der Lautsprecher wurde dafür für alle Messun-

¹⁵⁰ <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-RT60Koeff.htm>.

¹⁵¹ Ebd.

¹⁵² Bedienungsanleitung CARMA 4

gen auf dem Flügel platziert und in dessen Hauptausstrahlrichtung ausgerichtet, um zur Aufnahmesituation vergleichbare Bedingungen herzustellen. Gemessen wurde mehrmals an drei Positionen (Nummern 1 bis 3 im Bild) im Raum. Der Pfeil stellt die (Haupt-) Abstrahlrichtung des Lautsprechers dar.

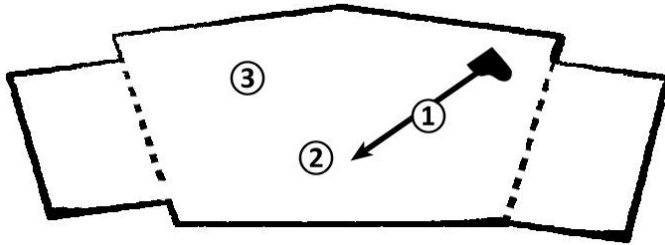


Abbildung 13: Grundriss der Kirche mit Position des Flügels bzw. der Box und den drei verschiedenen Positionen des Messmikrofons

Die Ergebnisse der Messungen werden in folgender Tabelle dargestellt (alle Zeitangaben in Sekunden):

f (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
Position 1	Messung 1	1,894	1,512	1,506	1,469	1,403	1,241
	Messung 2	1,616	1,791	1,983	1,907	1,844	1,480
Position 2	Messung 1	1,713	1,458	1,478	1,309	1,410	1,240
	Messung 2	1,906	1,497	1,346	1,410	1,415	1,248
	Messung 3	1,959	1,460	1,419	1,376	1,416	1,224
	Messung 4	1,889	1,461	1,407	1,376	1,395	1,234
Position 3	Messung 1	1,787	1,496	1,373	1,555	1,433	1,247
	Messung 2	1,452	1,464	1,410	1,484	1,422	1,229
gemittelt		1,777	1,517	1,490	1,486	1,467	1,268

Die Messungen bestätigen in etwa die berechneten Nachhallzeiten. Zu hohen Frequenzen fallen diese gemäß den Messungen relativ konstant ab. Schön zu sehen ist dies auch im von der Software berechneten Wasserfalldiagramm.

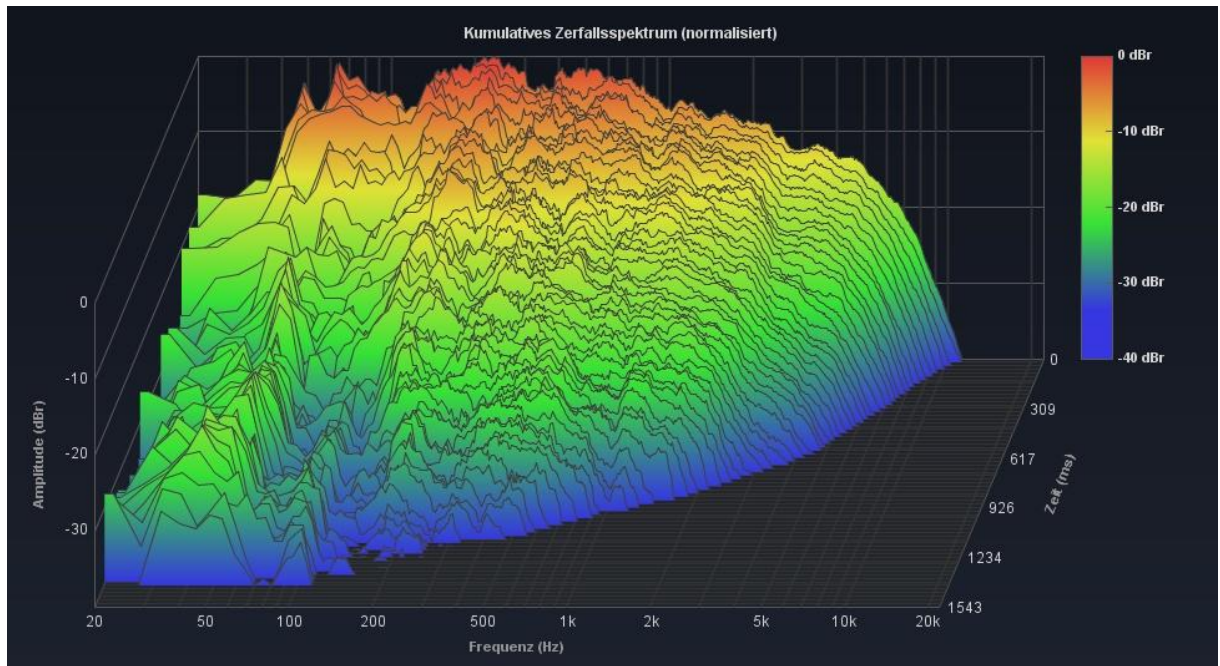


Abbildung 14: Wasserfalldiagramm einer der Raum-Messungen

Abweichungen von einem statistischen Verhalten sind hier schon ab etwa 100 Hz zu erkennen. Im statistischen Bereich scheint der Raum laut diesem Diagramm frei von Resonanzen zu sein.

Aufgrund des für eine Kirche relativ geringen Volumens ergeben sich für diese Arbeit ausreichend kleine Hallradien:

f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
r_H (m)	1,52	1,64	1,66	1,66	1,67	1,80

Der Mittelwert aus den angegebenen Hallradien beträgt 1,66 m.

5. DIE AUFNAHMEN

5.1 Der Aufbau

Die acht Mikrofone wurden in einer Linie in unterschiedlichen Entfernungen gemäß ihren Bündelungsgraden bzw. Abstandsfaktoren Richtung Flügel zeigend in ca. 1,5 Metern Höhe aufgestellt. Das BLM 03 wurde auf den Boden gelegt. Die Entfernungen wurden so gewählt, dass die Mikrofone den maximalen Abstand zur Schallquelle und damit das höchste Diffusschall- / Direktschallverhältnis aufweisen, ohne dieses Verhältnis unterschiedlich groß werden zu lassen. Für die Position des Druckempfänger CCM 2 wurde daher eine Entfernung von 5 Meter festgelegt. Alle anderen Abstände orientierten sich daran, d.h. von kleiner zu großer Entfernung reihten sich dahinter das Grenzflächenmikrofon BLM 03 mit einer Entfernung von 7 Metern, dann die Nieren CCM 4 und V4 U auf gleicher Höhe mit dem Druckgradienten CCM8 in 8,65 Meter Entfernung, dahinter wiederum die Superniere CCM 41 mit einem Abstand von 9,65 Metern und schließlich das CMIT in 10,5 und das SuperCMIT in 14,5 Meter Entfernung. Der Abstandsfaktor von 3,5 beim SuperCMIT wurde bewusst nicht eingehalten, da es aufgrund der Nähe zur Rückwand und der niedrigeren Decke im Nischenbereich ohnehin Reflexionen stärker ausgesetzt sein würde.

Mit einem gemittelten Hallradius von 1,66 Metern standen die Mikrofone (unter Einbeziehung derer Bündelungsgrade) also im 3,01-fachen Hallradius, womit man davon ausgehen kann, dass Schalldruckpegelanteile des Direktschalls vernachlässigbar klein sind.¹⁵³

Der Flügeldeckel wurde in Richtung der Mikrofone maximal geöffnet, der Sänger stand rechts neben dem Flügel mit dem Gesicht den Mikrofonen zugewandt.

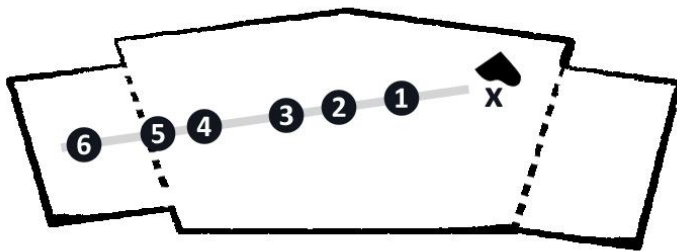


Abbildung 15: Skizze des Aufbaus mit unterschiedlichen Mikrofon-Positionen

In Abbildung 15 ist die Position des Sängers mit einem « X » markiert. Entlang der grauen Linie reihten sich an Position 1 das CCM 2, an Position 2 das BLM 03 Cg, an Position 3 standen nebeneinander das CCM 4, das CCM 8 und das V4 U ; Position 4 war durch das CCM 41 besetzt, an Position 5 war das CMIT 5 U, an letzter Position das SuperCMIT.

¹⁵³ Vgl. Friesecke (2007), S. 473.

5.2 Die Musikstücke

Aufgenommen wurden zum einen ein Ausschnitt eines klassischen Klavier-Solostücks und ein vom Sänger verfasstes und von der Pianistin für die Besetzung aus Flügel und Gesang adaptiertes Stück, das Elemente des Pops und der Klassik vereint.

Beim Klavier-Solostück handelt es sich um ein Spätwerk des ungarischen Komponisten Franz Liszt namens „Csárdás macabre“ aus dem Jahre 1882¹⁵⁴. Das Werk wird geprägt durch den Quintintervall und eine sehr große Dynamik. Die dadurch auch vorhandenen Passagen mit starkem Anschlag und vielen zu erwartenden Obertönen sind für diese Arbeit besonders interessant.

5.3 Erwartete Ergebnisse

Dieses Kapitel widmet sich theoretischen Überlegungen über die – anhand der Bauart, der Richtcharakteristik, des Freifeldfrequenzgangs, falls gegeben der Diffusfeld-Dämpfung und sonstiger Mikrofon-spezifischer Eigenschaften – erwarteten Ergebnisse. Die frequenzabhängige Diffusfelddämpfung für vier der acht Mikrofone wird in Abbildung 16 dargestellt und beschreibt den Pegelunterschied in der Übertragung diffusen Schalls zur Übertragung von Direktschall als Funktion der Frequenz.

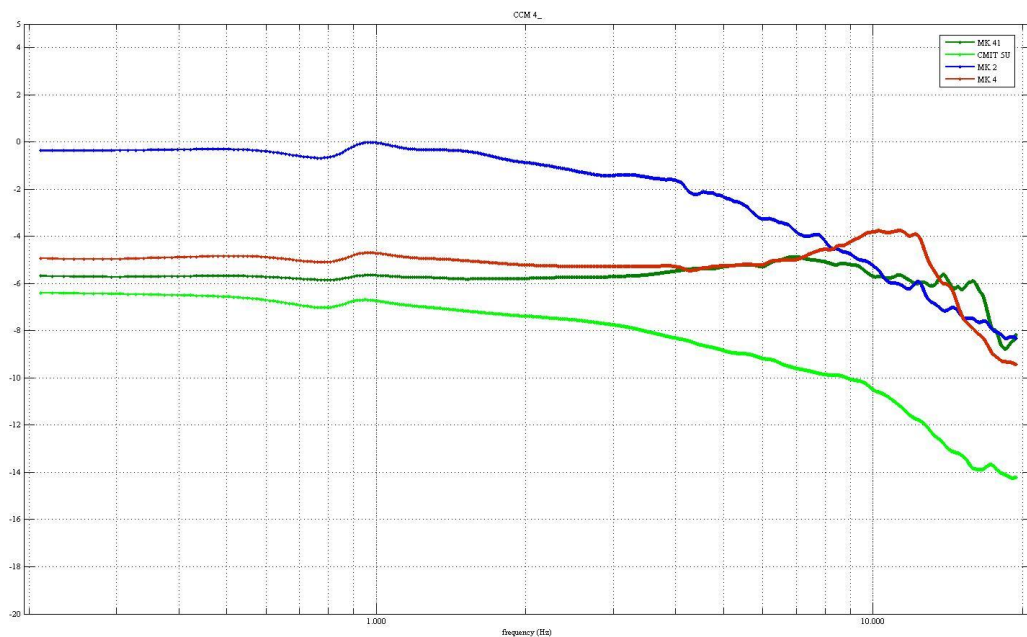


Abbildung 16: Vom Hersteller berechnete Diffuschalldämpfungen von CCM 2 (blau), CCM 4 (rot), CCM 41 (dunkelgrün) und CMIT 5 U (hellgrün)

¹⁵⁴ http://www.klassika.info/Komponisten/Liszt/Tanz/Searle_617/index.html.

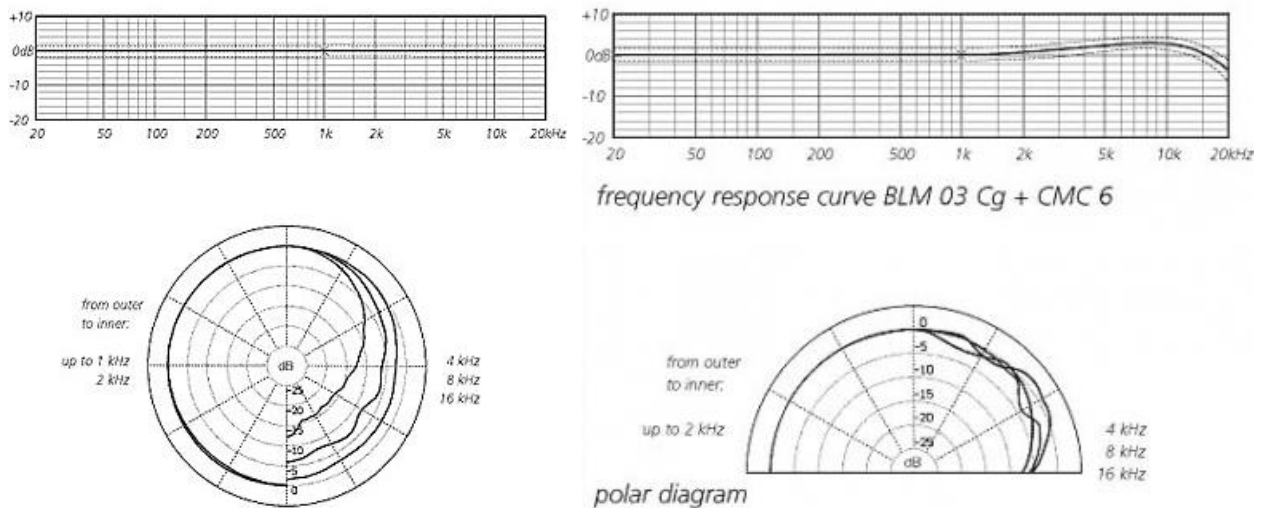


Abbildung 18: Freifeldfrequenzgang und Polardiagramm des CCM 2 und des MK 2

Abbildung 17: Freifeldfrequenzgang und Polardiagramm des BLM 03 Cg

Der Freifeldfrequenzgang des **CCM 2** (s. Abbildung 18) zeigt eine konstant horizontale Kurve. Es gibt keine Höhenanhebung, die im Diffusfeld durch Kapselabmessungen erzeugte Verluste auszugleichen vermag. Diese Freifeldentzerrung sollte also auch bei den Aufnahmen dieser Arbeit einen recht deutlichen Höhenverlust verursachen, der aber laut Polardiagramm des Herstellers vergleichsweise spät einsetzt. Denn erst ab 8 kHz ist zwischen 90° und 180° eine Pegelabsenkung von ca. 7 dB angegeben. Das Diagramm der frequenzabhängigen Diffusfeld-Dämpfung zeigt überraschenderweise schon eine konstante Pegelabnahme ab 2 kHz, welche sich bis zu einer Differenz von -8 dB bei 20 kHz steigert, allerdings wird das musikalische Signal bzw. dessen „Raumantwort“ in diesem Frequenzbereich nicht mehr allzu viel hergeben. Vergleicht man dagegen Aufnahmen von weißem oder rosa Rauschen, sollte das CCM 2 im Vergleich zu einem Diffusfeld-entzerrten Kugelmikrofon dumpf wirken, jedoch ohne dabei eine bestimmte Frequenz hervorzuheben.

Im mittleren und tiefen Frequenzbereich dagegen ist auch im Diffusfeld mit einer sehr linearen Übertragung zu rechnen. Das CCM 2 sollte auch diffuse Signale bis zur unteren Hörgrenze von 20 Hz aufnehmen. Diese folgen im gegebenen Raum allerdings keinem statistischen Verhalten. Auf Frequenzen knapp darüber müsste es deutlich stärker reagieren als die anderen Mikrofone – mit Ausnahme des **BLM 03 Cg**.

Die Grenzfläche wurde bei den Aufnahmen auf den Boden des Kirchenraumes gelegt – also auf einen gefliesten, schallharten Untergrund. Damit müsste sich auch deren lineare Übertragungsbandbreite auf Frequenzen bis zur unteren Hörgrenze erweitern. Im oberen Freifeldfrequenzgang sorgt eine offensichtlich tiefere Resonanzfrequenz der Kapsel (etwa bei 10 kHz) im Vergleich zum CCM 2 für einen leichten Abfall zwischen 15 und 20 kHz. Der Druckstauereffekt kann beim BLM 03 einen Höhenverlust nicht ausgleichen, da er bei Positionierungen wie in diesem Fall bei allen Frequenzen gleichermaßen wirkt. Allerdings tritt keine Richtwirkung auf, was den Höhenverlust des Freifeldfrequenzganges im Vergleich zum CCM2 im Diffusfeld mehr als wettmachen sollte.

Ein Blick auf das Polardiagramm (s. Abbildung 17) zeigt für hohe Frequenzen sich recht wirr kreuzende Linien, die aber von der grundsätzlichen Form der Halbkugel nicht stark abweichen. Die alle in schwarz gehaltenen Linien lassen keine rechte Unterscheidung zwischen der 4-kHz-, der 8-kHz- und der 16-kHz-Linie zu. Man kann aber davon ausgehen, dass eine Integration der Linien dieser Frequenzgänge über den Winkel einen deutlich weniger starken Höhenabfall im Diffusfeldfrequenzgang zur Folge haben müsste, als dies beim CCM2 der Fall ist. (Insgesamt dürfte dieser Diffusfeldfrequenzgang mit Ausnahme kleiner Welligkeiten dem Freifeldfrequenzgang sehr ähnlich sehen.)¹⁵⁵ Während das BLM 03 bei tiefen und mittleren Frequenzen eine ähnlich lineare Übertragung wie das CCM 2 gewährleisten sollte, ist im Bereich ab 8 kHz daher sogar mit höheren Pegeln zu rechnen. Es wird unter den gegebenen Voraussetzungen also ein brillanterer Klang erwartet.

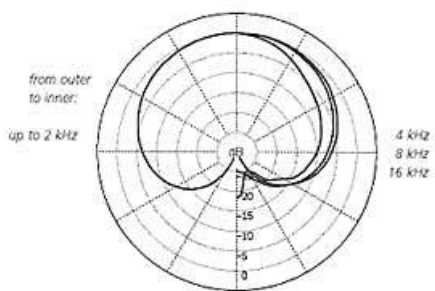
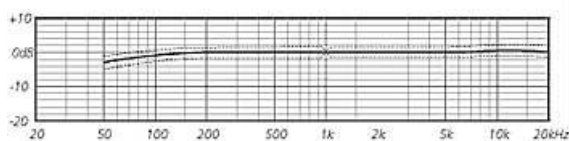


Abbildung 20: Freifeldfrequenzgang und Polardiagramm des CCM 4 und des MK 4

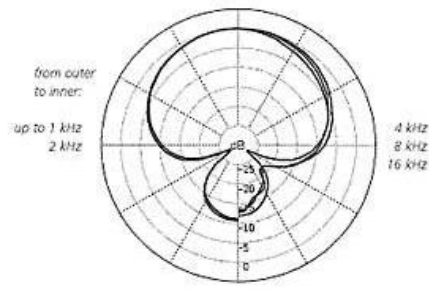
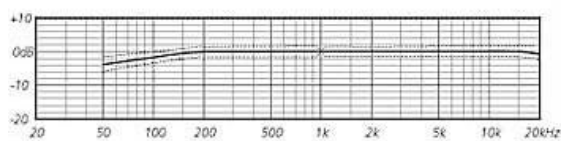


Abbildung 19: Freifeldfrequenzgang und Polardiagramm des CCM 41 bzw. MK 41

Vom **CCM 4** wiederum ist wegen dem Empfängersprinzip mit einer weniger starken Übertragung der Tiefen zu rechnen. Die Mitten sollten wie bei der Kugel ausgewogen klingen. In den Höhen verspricht das Polardiagramm (s. Abbildung 20) eine ähnlich gute Leistung wie die der Grenzfläche. Die 4- und die 8-kHz-Linie weicht im Datenblatt ungewöhnlich wenig von der Linie ab, welche für Frequenzen bis 2 kHz gilt. Erst die 16-kHz-Linie zeigt eine Differenz von ca. 5 dB. Der Übergang vom Druckgradienten- zum Druckempfängerprinzip wurde offensichtlich sehr geschickt konstruiert. Auch dieses Mikrofon müsste beim direkten Vergleich also heller klingen als das CCM 2. Im Freifeldfrequenzgang findet man eine leichte Anhebung knapp über 10 kHz. Das Polardiagramm gibt leider keine Informationen über die Richtcharakteristik bei dieser Resonanzfrequenz, daher überrascht ein Blick auf die Diffusfeld-Dämpfung des CCM 4 bzw. MK 4 mit einer deutlichen Überhöhung zwischen 10 und 12 kHz, während der Pegelabfall danach sehr steil ausfällt. Diese Überhöhung wird das Mikrofon wohl noch heller klingen lassen als das Grenzflächenmikrofon, über welches leider keine Grafik zur Diffusfeld-Dämpfung vorliegt.

Einen noch ausgeglicheneren Eindruck, was das Polardiagramm angeht, macht die Superniere **CCM 41** (s. Abbildung 19). Alle Linien liegen sehr eng beieinander. Die minimalen Dämpfungen

¹⁵⁵ Vgl. Schneider (2008), S. 350.

der 8-kHz- und 16-kHz-Kurve auf 45° werden auf 135° in der Summe wieder ausgeglichen. Der Wandlungsprinzip-bedingte „Bass Roll-Off“ setzt schon leicht früher ein als beim CCM 4, genauer schon knapp unterhalb von 200 Hz. Für den Bereich des statistischen Diffusfeldes macht dies jedoch nur einen Unterschied von 2 bis 3 dB aus. Insgesamt sollte dieses Mikrofon, was hohe Frequenzen betrifft, einem diffusfeldentzerrten Druckempfänger am nächsten kommen. Auch die Diffusfeld-Dämpfungs-Linie wartet bei diesem Mikrofon nicht mit einer Überraschung auf,

sondern bestätigt die im Polardiagramm angezeigte Konstanz.

Das letzte Mikrofon der CCM-Serie in diesem Vergleich ist das **CCM 8**. Der reine Druckgradient hat im Bassbereich den am frühesten einsetzenden Pegelabfall; er beginnt schon über 200 Hz. Der vom Hersteller beschriebene „helle“ Klang¹⁵⁶ könnte sich auf das (empfängerspezifische) Fehlen von sehr tiefen Frequenzen beziehen. Als untere Grenzfrequenz besteht das Datenblatt trotzdem auf den 40 Hz, genau wie bei der Niere und der Superniere. Die obere Grenzfrequenz ist allerdings mit 16 kHz um 4 kHz niedriger als bei allen anderen hier behandelten Mikrofonen. Die Membranresonanz wurde vermutlich bei 8 kHz angesetzt. Bis zu dieser Frequenz ist auch das Polardiagramm äußerst homogen. Die 4-kHz-Linie ist kongruent zur 2-kHz-Linie, bei 8 kHz sieht man minimale Abweichungen. Erst die 16-kHz-Linie bildet eine bedeutend schmalere Form. Auch der 0°-Wert für 16 kHz dürfte beim CCM 8 schon niedriger ausfallen als bei tieferen Frequenzen. Die (so auch übliche) Normierung im Polardiagramm auf den jeweiligen 0°-Wert lässt das schnell vergessen. Eine Normierung auf den 0°-Wert von 1 kHz aller Linien wäre für die Zwecke dieser Arbeit hilfreicher. Von den Diffusschall-Aufnahmen des CCM 8 sind also ab etwa 10 kHz zu höheren Frequenzen hin und ab 200 Hz zu tiefen Frequenzen hin stärkere Pegelabfälle zu erwarten.

Im Vergleich zu den anderen Mikrofonen der CCM-Serie könnte es etwas mittenbetont klingen.

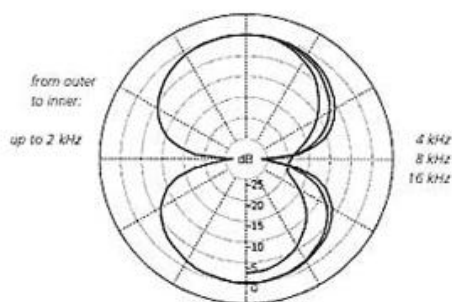
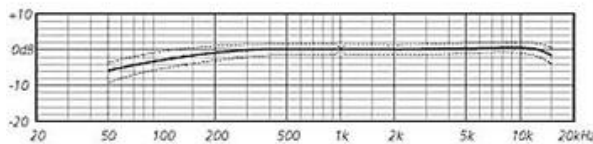


Abbildung 22: Freifeldfrequenzgang und Polardiagramm des CCM 8 bzw. MK 8

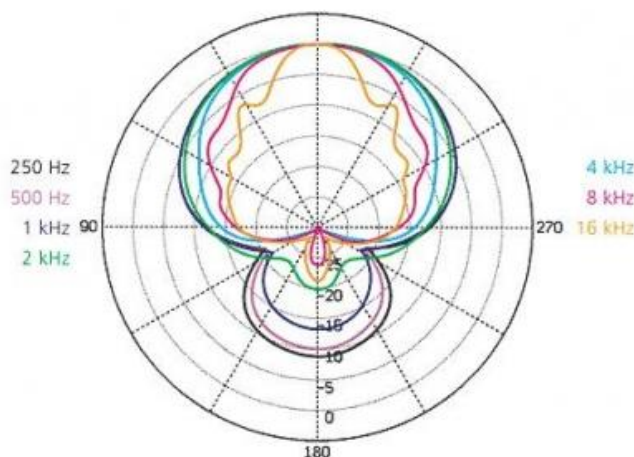
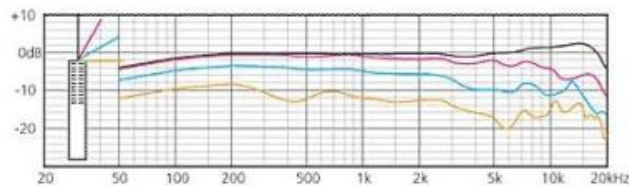


Abbildung 21: oben: Freifeldfrequenzgänge des CMIT 5 U aus verschiedenen Richtungen, darunter: Polardiagramm des CMIT 5 U

¹⁵⁶ Vgl. <http://www.schoeps.de/de/products/ccm8>.

Das CMIT 5 U hat durch das Richtrohr eine zu hohen Frequenzen hin stark zunehmende Bündelung (s. Abbildung 21). Bis 1 kHz sorgt die Kapsel für eine Supernierenform der Richtcharakteristik, darüber geht es mehr und mehr in Richtung Keulenform. Auch an den Frequenzgängen für die verschiedenen Einfallsrichtungen kann man erkennen, dass hohe Frequenzen ab ca. 3 kHz für Richtungen abseits von 0° gedämpft aufgenommen werden. Das CMIT 5 U sollte in den Höhen also einen ähnlich dumpfen Klangcharakter aufweisen wie das CCM 2, aufgrund des Empfängerprinzips der Kapsel aber tiefe Frequenzen weniger stark übertragen. Grundsätzlich sollte man von einem Richtrohrmikrofon was die Diffusschallwandlung angeht die unausgeglichene Übertragung erwarten. Das Diagramm der Diffusfeld-Dämpfung widerspricht dem allerdings mit einer sehr konstant abfallenden Kurve.

Für eine weniger große Bevorzugung tiefer Frequenzen könnte der Algorithmus des SuperCMIT sorgen. Während der Freifeldfrequenzgang mit dem des CMIT 5 U identisch ist, zeigt der hier verfügbare Diffusfeld-Frequenzgang im Preset 1 eine recht gleichmäßige Dämpfung der Frequenzen im Bereich von 50 Hz bis 4 kHz (s. Abbildung 23). Die Frequenzen oberhalb berücksichtigt der Algorithmus nicht, weshalb sich die (grüne) Kurve schnell dem unbearbeiteten Signal (schwarze Kurve) annähert. Bei 7 kHz entsteht eine Überhöhung, wodurch Frequenzen zwischen 5 und 10 kHz gegenüber den anderen bevorzugt werden. Oberhalb von 10 kHz ist der Pegelabfall wieder sehr konstant. Bis auf den Bereich um die 7 kHz kann der Algorithmus das Missverhältnis zwischen Tiefen und Höhen etwas geraderücken.

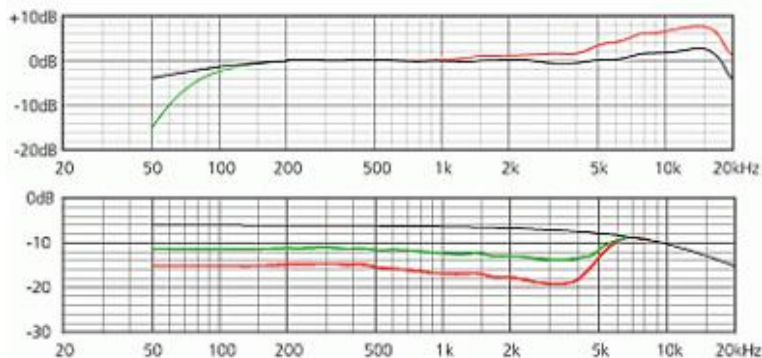


Abbildung 23: oben: Freifeldfrequenzgang des SuperCMIT mit Filtereinstellungen (grün: Low-Cut, rot: High-Shelving-Filter); darunter: Diffusschallfrequenzgänge für Kanal 2 (schwarz), Kanal 1 mit Preset 1 (grün) wie verwendet und Kanal 1 mit Preset 2 (rot)

Man muss jedoch bedenken, dass der Algorithmus stets versucht, Direktschall und Diffusschall zu trennen und letzteren im Pegel abzusenken. Zum einen bedeutet dies, dass die Diffusschall-Dämpfung und das Polardiagramm nicht in direktem Zusammenhang miteinander stehen, weshalb an dieser Stelle auf eine Betrachtung desselbigen verzichtet wird, zum anderen stellt sich dadurch auch die Frage: Was macht ein Algorithmus, der diffuse Schallanteile absenken soll, wenn praktisch keine direkten Schallanteile vorhanden sind?

Abschließend einen Blick auf das V4 U: Im Polardiagramm liegen die Linien ganz ähnlich wie beim CCM 4 bis 8 kHz sehr eng beieinander (s. Abbildung 24), die Diagramme sind nahezu kongruent. Davon abweichend entwickelt sich ab 2 kHz eine kleine Rückkeule. Zusätzlich zur im Freifeldfrequenzgang ersichtlichen Pegelanhebung im hohen Frequenzbereich trägt die Rückkeule ihren Teil zur Anhebung im Diffusfeld-Frequenzgang (Cyan-farbige Linie) knapp über 5 kHz bei. Aufgrund zunehmender Bündelung, die durch die Ringscheibe einen Tick stärker ausfällt als

beim CCM 4, geht die Übertragung ab 10 kHz dann konstant zurück. Der Diffusfeld-Frequenzgang weist also wie beim CCM 4 auch eine Betonung in den Höhen auf; diese im Vergleich tiefer angesetzte Resonanzfrequenz scheint aber stärker bedämpft zu sein. Der entstehende „Peak“ hat damit eine geringere Güte, womit der Linienverlauf homogener wirkt als beim CCM 4. Ein „Bass-Roll-Off“ mit geringer Steigung (< 2 dB pro Oktave) setzt ab ca. 150 Hz ein. Die Helligkeit des Klanges sollte sich irgendwo unterhalb von CCM 4 und CCM 41 und oberhalb vom CCM 2 einordnen.

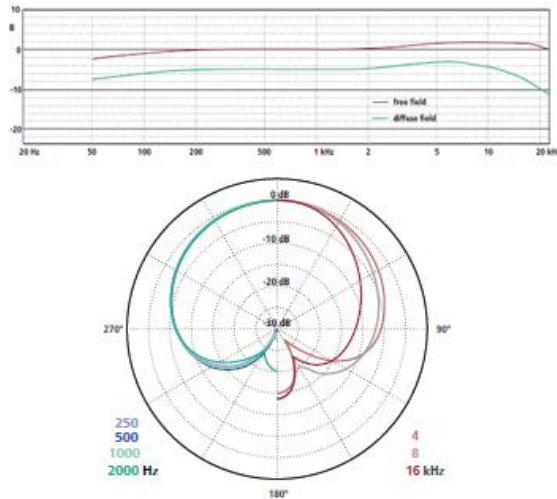


Abbildung 24: oben: Freifeld- und Diffusfeldfrequenzgang des V4 U, unten: Polardiagramm des V4 U

5.4 Analyse der Ergebnisse

Beim Lesen der folgenden Analyse sollte man sich stets dessen bewusst sein, dass die hier aufgezeigten Ergebnisse nicht ohne weiteres auf eine normale Aufnahme zu übertragen sind. Es handelt sich nur um eine frequenzabhängige Analyse des mit verschiedenen Mikrofonen aufgenommenen diffusen Schalls; es können also nur Tendenzen aufgezeigt werden, inwiefern vom Raum zurückgeworfene Schallereignisse bei der akustisch-elektrischen Wandlung eine weitere Färbung durch das Mikrofon erfahren könnten. Wie anfangs schon erwähnt, sind die Raumeinflüsse normalerweise größer als die Färbung des Mikrofons. Je nachdem, wie dicht mikrofoniert wird und wie groß die Nachhallzeit ist, spielen die ermittelten Tendenzen eine der eventuellen Färbung des Direktschallanteils mehr oder weniger stark untergeordnete Rolle.

Aus den Aufnahmen wurden verschiedene Liedausschnitte gewählt, sodass zum Vergleich sowohl Flügel-Solo-Aufnahmen, als auch die Kombination mit einem Sänger sowie bloßes weißes und rosa Rauschen zur Verfügung stehen. Die einzelnen Abschnitte wurden dann anhand der durchschnittlichen Lautheit mit einer Genauigkeit von einem Zehntel dB auf den gleichen Pegel gebracht.

5.4.1 Erste Eindrücke

Beim erstmaligen Direktvergleich der Aufnahmen fällt einem vermutlich zunächst auf, dass die klanglichen Unterschiede zwischen den Mikrofonen trotz der sehr unterschiedlichen Arbeitswei-

sen erstaunlich gering sind. Vor allem bei den Aufnahmen des Flügels muss man schon genauer hinhören, um Unterschiede auszumachen. Dies bestätigt auch ein Blick auf das durchschnittliche Frequenzspektrum während einer ca. 17-sekündigen Piano-Forte-Passage im Liedausschnitt aus Liszts „Csárdás macabre“. Die Bandbreite des Diagrammes reicht von 20 Hz bis 22 kHz, der Abstand der horizontalen Hilfslinien repräsentiert eine Pegeldifferenz von 3 dB.

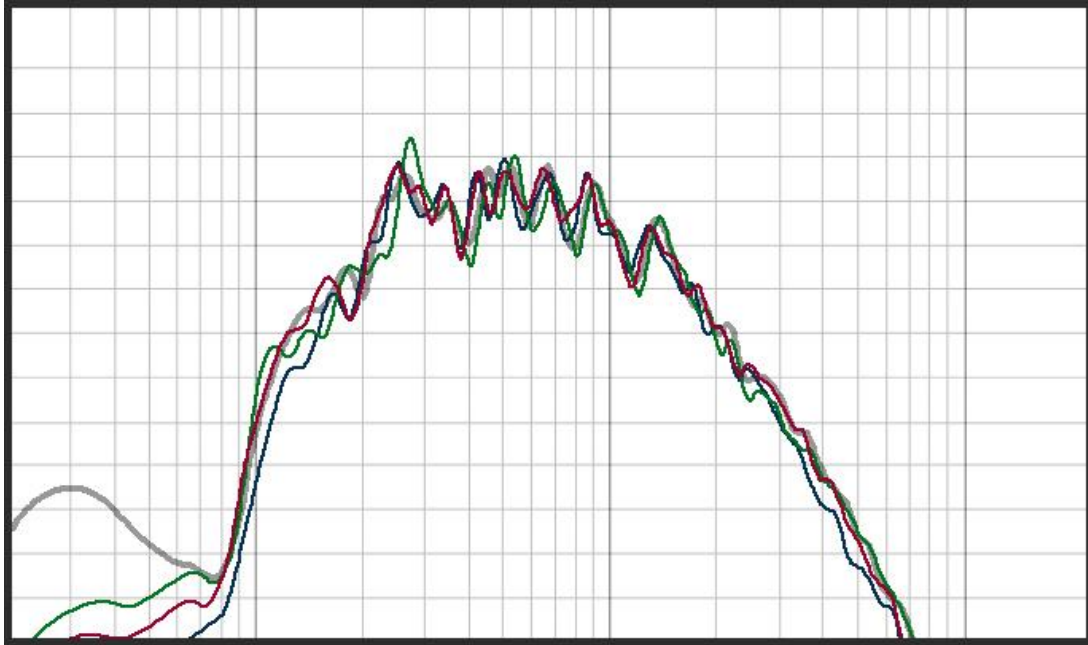


Abbildung 25: Gemitteltetes Frequenzspektrum eines 17-sekündigen Ausschnittes aus dem Piano-Solostück „Csárdás macabre“ von Franz Liszt, aufgenommen von verschiedenen Mikrofonen.

Beim Vergleich zwischen BLM 03 Cg (grün), CCM4 (rot), SuperCMIT (blau) und dem durch digitales Filtern nachträglich diffusfeld-entzerrten CCM 2 (grau) als Referenzsignal, welches das Spektrum des Instruments und die Raumantwort kombiniert darstellen soll, zeigen sich lediglich im Bassbereich größere Unterschiede. Auch wenn in diesem Fall die Unterschiede einhergehen mit den Unterschieden der Empfängerprinzipien und daraus resultierender Frequenzgänge, ist dieser Bereich laut der Raumausmessungen nicht Teil des statistischen Diffusfelds, wodurch die Unterschiede nicht eindeutig an den Mikrofonen festzumachen sind, sondern auch ein Resultat der unterschiedlichen Positionierungen sein können.

Auch wirkt das Signal des SuperCMIT etwas indirekter als das des CMIT 5 U, was mit der Aufstellung und der Nähe zur Rückwand zu tun haben könnte. Der im Kapitel 2.1 erwähnte Wandabstand von mindestens dem einfachen Hallradius wurde allerdings eingehalten. Der Gesamtklang der Mikrofone macht zunächst also einen sehr einheitlichen Eindruck. Ein wenig aus der Reihe fällt lediglich das CCM 8, welches im direkten Vergleich etwas an Tiefen und Höhen vermissen lässt; es wirkt dadurch etwas blechern. Nichtsdestotrotz macht die Analyse eines über die Zeit gemittelten Spektrums der musikalischen Audiodaten über mehrere Sekunden aufgrund der geringen hör- und sichtbaren Unterschiede wenig Sinn. Mit Durchschnittswerten kann man lediglich beim Rauschen argumentieren. Die feinen Unterschiede bei Musikaufnahmen lassen sich optisch im Frequenzdiagramm besser mit Maximalpegelbetrachtungen über der Frequenz an bestimmten Stellen ausarbeiten; akustisch muss man sich bestimmte Töne des Flügels oder der Stimme in verschiedenen Höhenlagen herauspicken und diese direkt vergleichen, um die entscheidenden Unterschiede herauszuhören.

5.4.2 Das Flügel-Solostück

Folgende Erkenntnisse wurden beim Vergleich einzelner Töne aus dem Piano-Solostück von Franz Liszt gewonnen:

Das CCM 2 überzeugt im Vergleich der Mikrofone mit einem vollen Klang und einem insgesamt ausgeglichenen Klangbild. Bässe haben im Vergleich die höchste Präsenz. Hohe Flügeltöne dagegen werden pegelmäßig sehr zurückhaltend wiedergegeben, klingen in sich aber unverfälscht und ausgewogen.

Beim BLM 03 Cg werden tiefe Flügeltöne ähnlich gut wie beim CCM 2 wiedergegeben. Hohe Flügeltöne wirken in den Grundtönen allerdings nicht lauter als beim CCM 2. Deren Obertöne jedoch sind etwas präsenter als beim CCM 2. Dadurch klingen hohe Töne des Flügels qualitativ noch etwas differenzierter. Vor allem beim Ausklingen hoher Töne macht das BLM 03 Cg einen besseren Eindruck.

Das CCM 4 wiederum gibt die erste Harmonische hoher Flügeltöne stärker wieder als die beiden Druckempfänger. Die Wiedergabe der weiteren Harmonischen scheint aber im Frequenzspektrum „nicht so weit hoch zu reichen“. Hohe Töne klingen also etwas lauter, aber auch qualitativ schlechter. In den Tiefen kann die Niere mit dem CCM 2 und dem BLM 03 Cg erwartungsgemäß nicht mithalten. Dadurch werden die Partialschwingungen bzw. die Obertöne der tiefsten Saiten des Flügels stark hervorgehoben.

Auch das V4 U gibt Bässe weniger stark wieder. Dadurch klingt es genau wie das CCM 4 heller als die beiden Druckempfänger, auch wenn es, was die Harmonischen hoher Flügeltöne betrifft, subjektiv „weniger hoch kommt“ als das BLM 03 Cg. Insgesamt ist der Klang des V4 U relativ nahe an dem des CCM 4, wirkt aber einen Hauch weniger präsent, da hohe Töne des Flügels im Pegel etwas geringer ausfallen. Es ordnet sich hier irgendwo zwischen dem CCM 2 und dem CCM 4 ein.

Das CCM 8 hat im Vergleich die stärkste subjektiv wahrgenommene Mittenbetonung. Die Bässe fallen noch etwas schmaler aus als bei den Nieren-Mikrofonen, was aber aufgrund des Freifeldfrequenzganges auch nicht anders zu erwarten war. Was allerdings überrascht, ist, dass auch die Obertöne hoher gespielter Töne relativ schwach ausfallen, obwohl sie mit einem Frequenzbereich von bis zu 10 kHz noch weit von der oberen Grenzfrequenz des Freifeldfrequenzganges des CCM 8 entfernt sind und eine Bündelung der Richtcharakteristik im Vergleich zum CCM 2 sehr spät einsetzt und sehr viel geringer ausfällt. In den Grundtönen klingen hohe Töne ähnlich präsent wie beim CCM 4. Insgesamt schneidet das Klangbild des CCM 8 im Vergleich mit den anderen hier analysierten Mikrofonen aber qualitativ am schlechtesten ab. Die Klangunterschiede zwischen diesem Mikrofon und den anderen sind die Einzigen, welche man beim Anhören der Aufnahmen von „Csárdás macabre“ auch auf weniger hochwertigen und neutralen Lautsprechern gut hören kann. Es klingt durch die Mittenbetonung subjektiv „billiger“.

Das CCM 41 klingt sehr hell. Hohe Flügeltöne sind deutlich lauter als beim CCM 2 und beim BLM 03 Cg; sie klingen, was den Pegel und das Obertonspektrum anbelangt in etwa wie beim CCM 4. Bei den Tiefen ordnet es sich ebenfalls in der gleichen Ebene ein wie die beiden Nierenmikrofone.

Das CMIT 5 U klingt dunkler als das CCM 41. Dies ist hier nicht nur der Tatsache geschuldet, dass sehr hohe Töne deutlich leiser wiedergegeben werden, sondern auch einer lautereren Darstellung der tiefen Frequenzen. Die verglichenen tiefen Flügeltöne klingen beim CMIT 5 U eher nach denen der Druckempfänger. Da die Kapsel genau wie beim CCM 41 eine Superniere ist, überrascht dieser Unterschied zunächst. Man muss allerdings bedenken, dass alle Aufnahmen in ihrer Lautheit angeglichen wurden. Dämpft ein Mikrofon im Vergleich also die Höhen stärker als ein anderes, so wird der Gesamtpegel nach oben hin korrigiert, um die Dämpfung auszugleichen. Dadurch werden natürlich die tiefen Frequenzen im Pegel erhöht. Etwas mehr als die unterste Oktave des Flügels liegt laut Raummessungen unter der Schroeder-Frequenz. So könnte man eine Bassanhebung auch auf eine „ungünstige“ Positionierung schieben. Eine Positionierung in einem Druckbauch ist z.B. nicht auszuschließen, aber aufgrund der Raumbedingungen (Es gab fast keine parallelen Wände; der Abstand zu jeder Begrenzungsfläche betrug mindestens den einfachen Hallradius; Begrenzungsflächen allgemein wurden akustisch für den Verwendungszweck optimiert) auch deutlich zu hinterfragen. In diesem Fall kann man davon ausgehen, dass die Bassbetonung durch die Pegelangleichung zustande kam.

Das SuperCMIT hat eine schwächere Wiedergabe tiefer Töne des Flügels als das CMIT 5 U. Der Algorithmus scheint also trotz vernachlässigbar geringem Direktschallanteil tiefe Frequenzen auszublenden bzw. im Pegel zu senken. Da zusätzlich die Höhen genau wie beim CMIT 5 U gedämpft werden, war die Lautheitsangleichung eine höhere Pegelverstärkung als beim analogen Richtrohr. Im Ergebnis werden hohe Flügeltöne im Pegel in etwa wiedergegeben wie beim CMIT, also etwas leiser als beim CCM 41, aber die Aufnahme wirkt insgesamt etwas schwammiger und unnatürlicher als beim CMIT 5 U. Auch bei dieser Betrachtung muss man sich der Positionierung bewusst sein: Das SuperCMIT wurde durch die nicht zu verhindernde Wand-Nähe (der Abstand betrug zwei bis drei Meter) möglicherweise etwas mehr den frühen Reflexionen ausgesetzt als die anderen Mikrofone.

5.4.3 Flügel mit Gesang

Im Folgenden sollen die von Pianistin und Sänger gemeinsam eingesungenen Stücke analysiert werden. Was die Dämpfung hoher Frequenzen durch die Frequenzabhängigkeit der Richtcharakteristik betrifft, sind Zischlaute besonders interessant, da diese in der gegebenen Besetzung die höchsten Frequenzanteile enthalten und damit die Mikrofone vor die größte „Herausforderung“ stellen.

Wie auch beim Piano-Solostück klingt das CCM 2 beim Anhören des Duos im Vergleich dumpfer als die anderen Mikrofone, für sich aber trotzdem ausgewogen. Die Bässe reichen erwartungsgemäß im Spektrum sehr weit nach unten. Zischlaute wie ein gesungenes „Ts“ oder ein stimmloses „S“ sind sehr unaufdringlich und integrieren sich durch die stärkere Bedämpfung hoher Frequenzen gut in den Gesamtklang. Insgesamt überzeugt das Mikrofon durch Natürlichkeit.

Das BLM 03 Cg macht einen etwas helleren Eindruck, klingt aber weniger „offen“ als das CCM 2, verursacht also möglicherweise größere Verfärbungen. Bei den hohen Frequenzen kann es nicht mit dem nachträglich erzeugten „CCM 3“-Signal mithalten. Dieses wurde aus dem CCM 2 durch eine digitale Anpassung des Freifeldfrequenzganges, also eine Höhenanhebung um 6 dB bei ca. 12 kHz gewonnen. Dieser Vorgang ist der mechanischen Verringerung der Resonanzfre-

quenz bzw. der Diffusfeldentzerrung gleichwertig.¹⁵⁷ Auch bei den Zischlauten fällt beim BLM 03 Cg die – im Vergleich zum CCM 2 zumindest etwas anders klingende – Färbung auf. Welches der beiden Mikrofone diese „schöner“ überträgt, bleibt wohl eine Geschmacksfrage. Beim Grenzflächenmikrofon scheinen die Zischlaute etwas länger auszuklingen.

Das V4 U klingt erstaunlicherweise noch etwas heller als das BLM 03 Cg; der Blick auf die Polarogramme im vorigen Kapitel ließ anderes vermuten. Ein wenig ist dies aber wohl auch den fehlenden bzw. im Vergleich weniger starken Tiefen zuzuschreiben. Die „S“-Laute klingen erwartungsgemäß schärfer als beim Druckempfänger.

Das CCM 4 klingt im Vergleich zum V4 U etwas weniger ausgewogen, hat einen etwas „spitzen“ und weniger „offenen“ Klang. Das sorgt einerseits insgesamt für etwas mehr „Helligkeit“ bzw. Präsenz in den Höhen, andererseits sind gesungene „S“-Laute weitaus aufdringlicher und penetranter. Mit entsprechenden Lautsprechern wirkt das CCM 4 hier eher „giftig“.

Ganz ähnlich aufdringlich bis „giftig“ bei Zischlauten klingt das CCM 8. „S“- und „Ts“-Laute werden laut übertragen und heben sich dadurch stark vom Gesamtklang ab. Die Laute wirken aber wie bei der Niere eingefärbt. Dadurch, dass das Spektrum offensichtlich sehr hohe Frequenzen stärker bedämpft als das CCM 4, klingt der reine Druckgradient zudem etwas „blecherner“.

Das CCM 41 klingt ein bisschen heller als das V4 U, das Spektrum scheint hier insgesamt im Vergleich noch ein wenig nach oben verschoben zu sein. Zischlaute werden ähnlich laut wie beim CCM 4 übertragen, wirken jedoch durch eine subjektiv wahrgenommene größere Ausgeglichenheit und eine weitaus geringere Färbung weniger penetrant. Auch das CCM 41 klingt dumpfer als das diffusfeldentzernte „CCM 3“.

Die beiden Richtrohre haben erstaunlicherweise beide einen helleren Klangcharakter als die Kugel. Das SuperCMIT derweil scheint auch hier tiefe Frequenzen zu reduzieren. Die Mitten klingen jedoch etwas unnatürlich, was dem Ganzen einen seltsam belegten Charakter verleiht. Die Ähnlichkeit des Klanges der Verfärbung mit Kammfilter-Artefakten lässt aber auch vermuten, dass die Verfärbung ein Resultat der Überlagerung früher Reflexionen durch die gegebene Wand- und Deckennähe ist. Zischlaute sind bei beiden Richtrohren relativ stark bedämpft und integrieren sich wie beim CCM 2 in den Gesamtklang. Besonders beim SuperCMIT erscheinen sie neben dem Flügel sehr leise.

5.4.4 Rauschen

Das aufgenommene Rauschen soll Unterschiede im Frequenzgang sichtbar machen und eine Reflexion der Höranalyse anhand der Frequenzgänge möglich machen. Dafür wurden etwa zehn Sekunden rosa und weißes Rauschen aufgenommen. Die Aufnahmen wurden dann in einer Schleife abgespielt und an das Signal an einen Frequenzanalysator weitergegeben, der das über die Zeit gemittelte Spektrum anzeigte. Jede Aufnahme wurde so lange abgespielt, bis sich nichts mehr am angezeigten Spektrum änderte. Die beim rosa Rauschen zu hohen Frequenzen mit -3

¹⁵⁷ Vgl. Wuttke (1994).

dB pro Oktave abnehmende Amplitude wurde mit einer um 3 dB pro Oktave zunehmenden Anzeige ausgeglichen.¹⁵⁸

Beim Anhören der Aufnahmen des Rauschens fällt zunächst einmal auf, dass die Klangunterschiede zwischen den Mikrofonen sehr viel größer sind als bei den Musikaufnahmen. Außerdem lässt sich beim Umschalten zwischen den Mikrofonen bei manchen Mikrofonen dem aufgenommenen Rauschen eine ungefähre, wahrgenommene Tonhöhe zuordnen, während das bei anderen eher schwerfällt oder auch gar nicht möglich ist. Dabei spielt es keine Rolle, ob man sich Aufnahmen von weißem oder rosa Rauschen anhört. Die Tonhöhe bleibt die gleiche. Das Phänomen wurde besonders bei den Druckgradienten und den Kombinationen aus Druckempfängern und Druckgradienten festgestellt. Während beim CCM 2, dem BLM 03 Cg und dem SuperCMIT keine Tonhöhe zugeordnet werden kann, fällt dies beim CCM 8 und CCM 41 relativ leicht. Bei den beiden Nieren und dem CMIT 5 U ist es deutlich schwerer.

Das heißt allerdings nicht, dass im Spektrum selbst diese wahrgenommene Frequenz eine Überhöhung aufweist. Vermutlich handelt es sich um die Summe sehr kleiner Überhöhungen im Grundtonbereich, die im Gehirn – auf ähnliche Art und Weise wie Formanten – den Eindruck einer Tonhöhe entstehen lassen. Es wird anhand der Aufnahmen des Rauschens jedenfalls sehr schön hörbar, dass die Schallsignale von den Mikrofonen in gewisser Weise unterschiedlich eingefärbt werden.

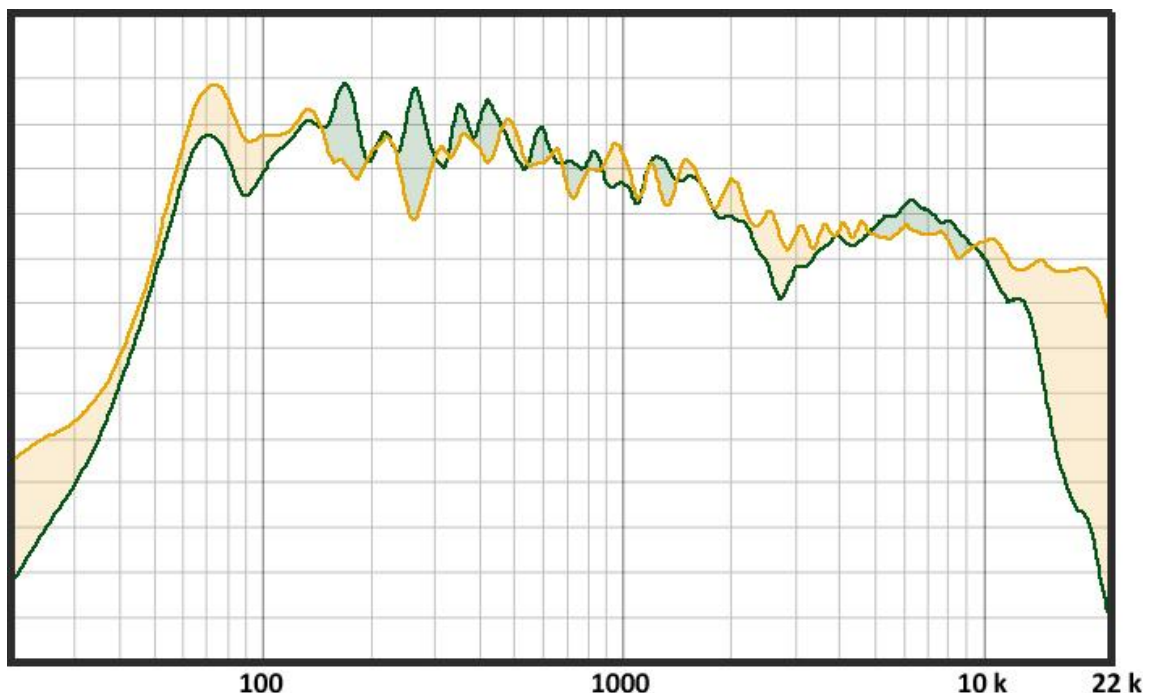


Abbildung 26: Frequenzspektrum von rosa Rauschen, aufgenommen mit dem CCM 2 (gelb) und dem BLM 03 Cg (grün). Horizontale Hilfslinien repräsentieren 3 dB-Differenzen

Ein Blick auf das Frequenzspektrum des CCM 2 (s. Abbildung 26) bei der Wiedergabe von rosa Rauschen bestätigt die in der Höranalyse festgestellte Ausgewogenheit des Klangbildes und die hohe Präsenz der Bässe. (Man muss beachten, dass der Pegelabfall bei tiefen Frequenzen hier größtenteils dem Lautsprecher und damit dem Messsignal zuzuschreiben ist. Vergleiche dazu Abschnitt 3.3 ADAM A5X.) Eine Pegelabnahme zu hohen Frequenzen hin setzt nicht erst bei der

¹⁵⁸ Vgl. Friesecke (2007), S. 155.

in Abschnitt 2.2 erwarteten Untergrenze der Bündelung von ca. 10 kHz ein, sondern erstreckt sich tatsächlich wie in Abbildung 16 praktisch über den gesamten Frequenzgang. Die Steigung der Abnahme fällt dafür betragsmäßig niedrig aus. Mit Ausnahme eines kleinen Einbruchs bei 250 Hz ist der Pegelverlauf beim CCM 2 recht linear. Das Rauschen klingt relativ dumpf.

Das BLM 03 Cg überrascht nach den durchaus als positiv zu bewertenden Höreindrücken durch ein auffällig unausgewogenes Frequenzspektrum (s. Abbildung 26). Von 70 bis 100 Hz reagiert es um etwa 3 dB unempfindlicher. Im Bereich zwischen 150 bis 500 Hz (und damit deutlich innerhalb des statistischen Diffusschalls) sind mehrere Pegelmaxima anzutreffen. Am erstaunlichsten ist aber der Einbruch bei ca. 2,6 kHz. Die Kanten am Gehäuse des Grenzflächenmikrofones müssten für eine derartige Frequenz mit einer Wellenlänge von etwa 13 cm eine relativ geringe Höhe haben und dürften kein großes Hindernis darstellen. Nach diesem Minimum steigt die Empfindlichkeit bis zum Maximum knapp oberhalb von 6 kHz wieder an und fällt danach relativ gleichmäßig wieder ab.

Hört man sich das aufgenommene Rauschen an, so klingt das BLM 03 Cg dumpfer als das CCM 2. Beim Vergleich der musikalischen Aufnahmen war das Gegenteil der Fall. Der Grund dafür liegt sehr wahrscheinlich in dem nach oben hin stark begrenzten Spektrum des musikalischen Signals, dessen Obertöne nur bis knapp über 10 kHz reichen. Die im vorigen Kapitel wahrgenommene größere Helligkeit des Klanges muss ihren Ursprung im Bereich der größeren Empfindlichkeit zwischen 5 und 9 kHz und der geringeren Tiefen-Übertragung haben. Der starke Höhenabfall ab 11 oder 12 kHz war für das musikalische Signal nicht mehr ausschlaggebend, macht sich beim Rauschen allerdings stark bemerkbar.

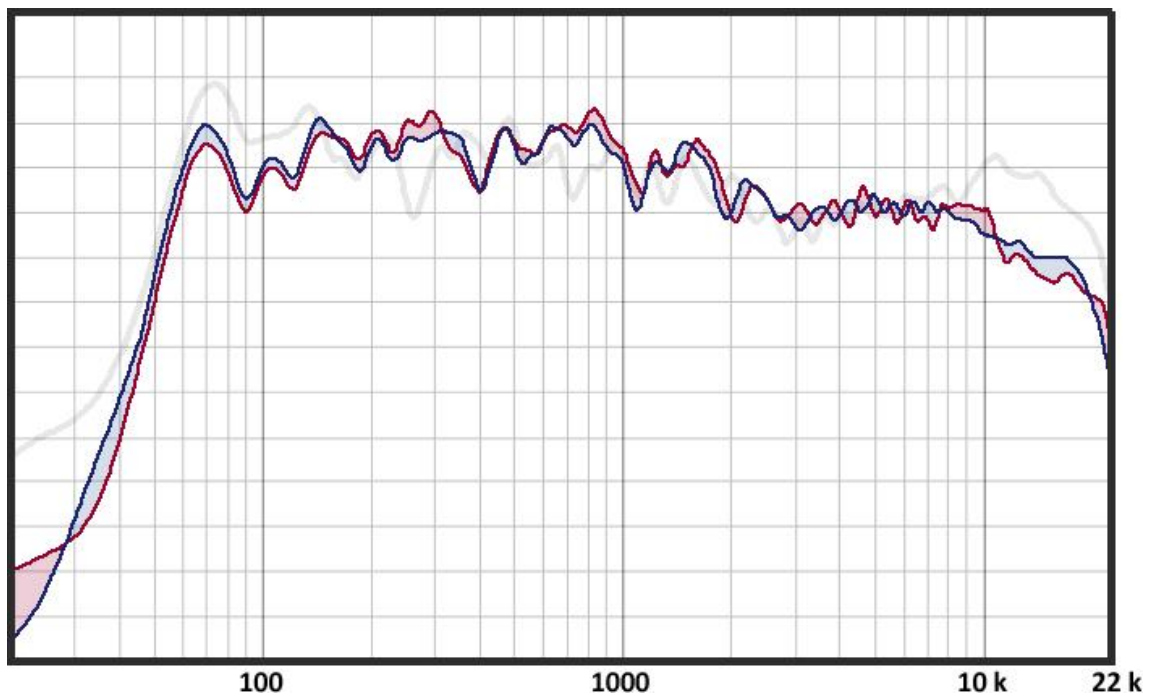


Abbildung 27: Frequenzgänge der Aufnahme von rosa Rauschen, mit dem CCM 4 (rot), dem V4 U (blau) und (grau im Hintergrund) dem "CCM 3"

Der Vergleich der beiden Nierenmikrofone CCM 4 und V4 U (s. Abbildung 27) offenbart beim rosa Rauschen im Frequenzgang optisch kaum Unterschiede. Auch die Unausgeglichenheit der Diffusfeldämpfung des CCM 4 in Abbildung 16 kommt bei diesen Aufnahmen nicht heraus. Die auffällige Resonanzfrequenz oberhalb von 10 kHz resultiert hier nur in einem kaum bemerkens-

werten „Plateau“ zwischen 8 und 10 kHz. Lediglich der Höhenabfall des V4 U ab ca. 8 kHz macht auch hier im Frequenzgang einen gleichmäßigeren Eindruck als der des CCM 4. Zwischen 70 und 110 Hz sind beide Mikrofone um etwa 3 dB leiser als das CCM 2 oder das CCM 3, zwischen 5 kHz und 10 kHz haben sie größere Pegel als das CCM 2, wodurch der hellere Klang zu begründen ist. Die größere Aufdringlichkeit und Unausgewogenheit des CCM 4 gegenüber dem V4 U kann der Vergleich dieses Diagrammes aber nicht erklären. Die Färbung des Rauschens selbst klingt beim V4 U etwa einen Ganzton tiefer als beim CCM 4.

Das CMIT zeigt einen dem CCM 2 sehr ähnlichen Verlauf des Frequenzspektrums (s. Abbildung 28), ist nur insgesamt ein wenig ungleichmäßiger bzw. welliger. Dies gilt z.B. für den Frequenzbereich von 4 bis 9 kHz. Der Grund dafür wird die Arbeitsweise des Richtrohres sein. Das Rauschen klingt auch etwas mehr gefärbt. Trotzdem entspricht der Pegelverlauf in Abbildung 16 im Prinzip genau wie der im vorigen Kapitel gewonnene Höreindruck dem Resultat dieses Frequenzspektrums. Man kann also davon ausgehen, dass diffuse Schallanteile vom CMIT 5 U mit einer in sich ausgewogenen Höhendämpfung übertragen werden.

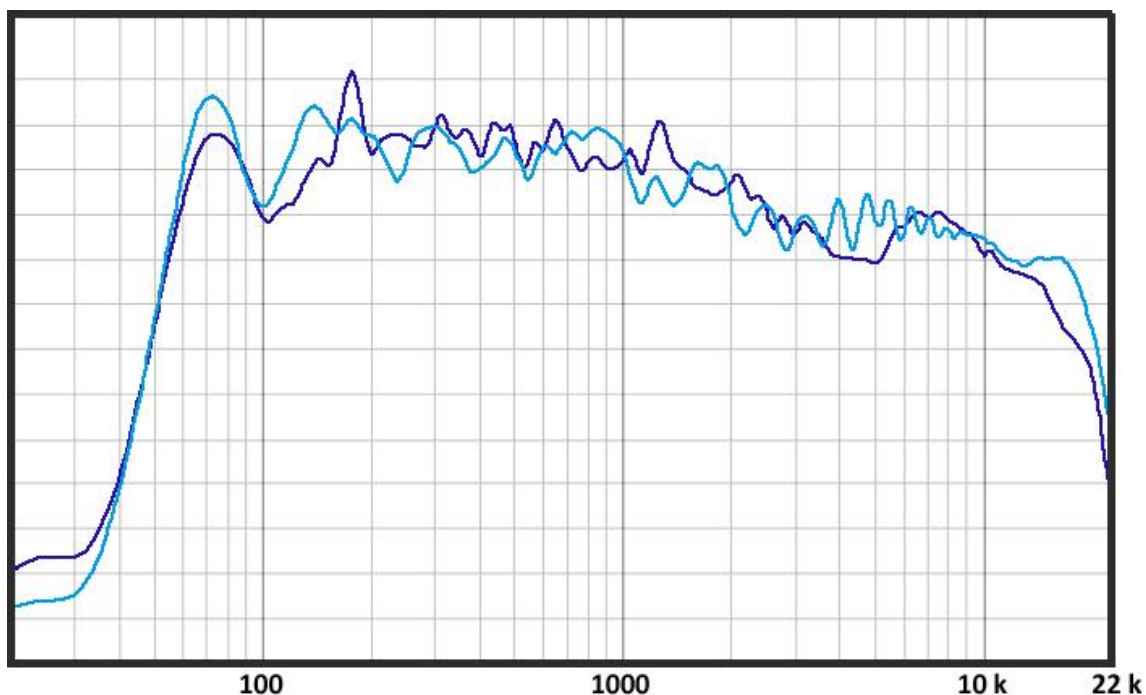


Abbildung 28: Frequenzgänge des CMIT 5 U (hellblau) und des SuperCMIT (dunkelblau) bei der Aufnahme von rosa Rauschen im Diffusfeld

Da das SuperCMIT tiefe diffuse Schallanteile auszublenden vermag, müsste man nach der Pegelangleichung von einem weniger stark ausgeprägten Höhenabfall ausgehen, als dies beim CMIT der Fall ist. Abbildung 28 bestätigt das nicht. Zwischen 70 und 150 Hz ist der Pegel um 2 bis 3 dB geringer als beim CMIT, darüber sind die Pegel bei den unteren Mitten in etwa gleich und auch beim SuperCMIT im Vergleich zu den Höhen lauter. Der Frequenzgang des SuperCMIT ist insgesamt unausgewogener als der des CMIT 5 U. Nach einem Minimum bei 100 Hz (da mehrere Mikrofone ein Senke in diesem Bereich aufweisen, ist das wohl einer Raum-Mode zuzuschreiben) ist eine auffällige Spitze bei ca. 170 Hz zu sehen. Zwischen 4 und 5 kHz hat der Frequenzgang eine Senke, nach welcher bei 7 kHz eine deutliche Überhöhung auszumachen ist. Die letzteren beiden Unlinearitäten sind auch so in dem vom Hersteller veröffentlichten Diagramm in Abbildung 23 (siehe grüne Linie für Preset 1) auszumachen. Laut diesem Diagramm

sollte die Dämpfung durch den Algorithmus mittlere und tiefe Frequenzen derart absenken, dass die Überhöhung bei 7 kHz den höchsten Pegel im Frequenzdiagramm aufweisen müsste. Die in Abschnitt 5.4.3 verglichenen Zischlaute des Sängers hätten in diesem Fall sicherlich eine sehr viel größere Intensität. In Abbildung 28 ist diese Überhöhung aber um 9 dB leiser als die höchste Stelle bei 170 Hz, weshalb dieses Diagramm auch glaubhaft macht, dass Zischlaute sich wenig vom Gesamtklang abgehoben haben. Einen eindeutigen Kammfilter-Effekt, der die beschriebene Unnatürlichkeit erklären würde, zeigt das Diagramm auch nicht. Als ganzzahliges Vielfaches der Pegelspitze bei 170 Hz sind mit gutem Willen bei 680 Hz und 1260 Hz ebenfalls Überhöhungen auszumachen. Die erste zu erwartende Überhöhung bei 340 Hz bleibt aber aus. Sonstige Pegelspitzen und -absenkungen stehen in keinem erkennbaren ganzzahligen Verhältnis. Beim Anhören des Rauschens macht das SuperCMIT sogar einen besseren (bzw. weniger färbenden) Eindruck als das CMIT 5 U. Es verleiht dem Rauschen keinen „Tonhöhen-Charakter“.

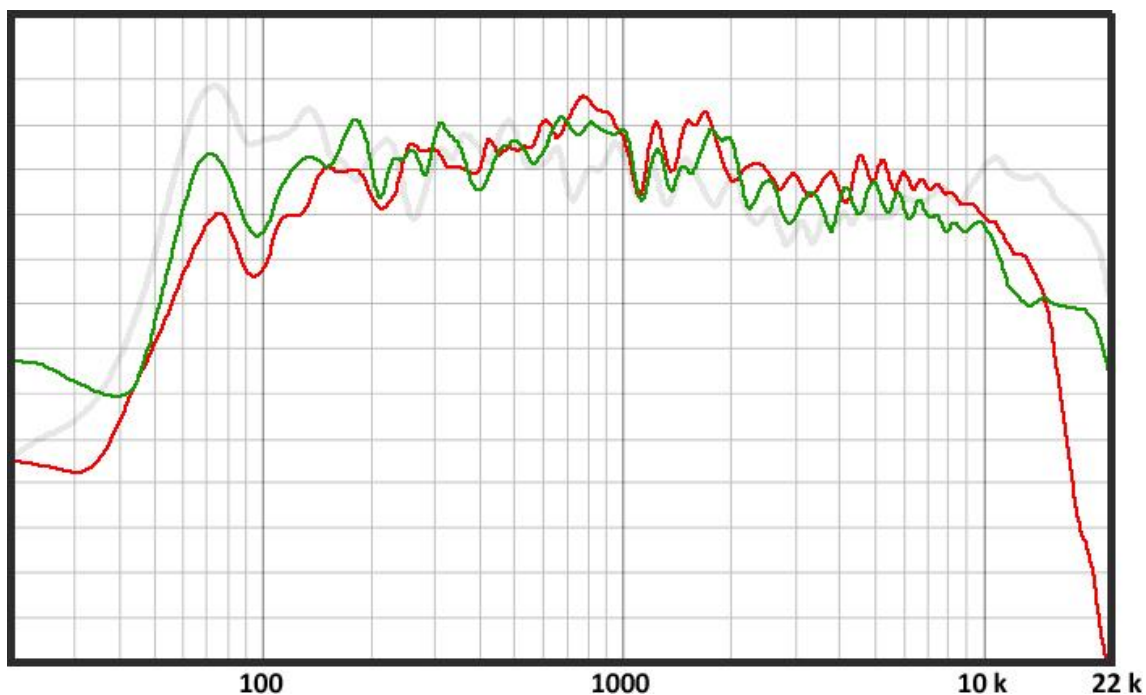


Abbildung 29: Frequenzgänge von rosa Rauschen, im Diffusfeld aufgenommen mit dem CCM 41 (grün), dem CCM 8 (rot) und dem diffusfeldentzerrten CCM 2 (grau) als Referenz

Das Spektrum des CCM 8 in Abbildung 29 unterstreicht die in der Höranalyse wahrgenommene schwächste Tiefenübertragung des Mikrofons. Das Maximum zwischen 70 und 80 Hz fällt beim reinen Druckgradienten 8 dB leiser aus. Dies ist eine Schwäche des Empfängerprinzips und auch schon im Freifeldfrequenzgang des Mikrofons zu sehen. Die den „blechernen“ Klang verursachende Mittenbetonung zeigt sich in diesem Diagramm recht deutlich: Ein Anstieg der Empfindlichkeit ist bis ca. 800 Hz zu erkennen, danach scheint der Pegel bis zu den höchsten übertragenen Frequenzen mehr oder weniger linear abzunehmen. Die Senke knapp über 1 kHz ist bei allen Mikrofonen vorhanden und dem Raum zuzuschreiben (vgl. z.B. auch Abbildung 25). Dem mit dem CCM 8 aufgenommenen Rauschen lässt sich – genau wie beim CCM 41 – eine relativ eindeutige Tonhöhe zuordnen.

Das Diagramm des CCM 41 (ebenfalls Abbildung 29) macht einen ausgeglicheneren Eindruck als das CCM 8, kann aber vor allem in den Höhen den besseren Höreindruck im Vergleich zum CCM 4 nicht bestätigen. Die Überhöhung zwischen 8 und 10 kHz fehlt zwar, doch der Pegelabfall

oberhalb von 10 kHz fällt noch etwas stärker aus. Da weder das V4 U noch das CMIT (die beiden dem CCM 4 und CCM 41 am nächsten stehenden Mikrofone) diesen Rückgang knapp oberhalb von 10 kHz aufweisen, ist der Pegelabfall auch kein Raumeinfluss. Das Diagramm weist relativ große Abweichungen von der angegebenen Diffusschalldämpfung in Abbildung 16 auf.

6. DIE VERGLEICHSPLATTFORM

6.1 Anforderungen

Um die Ergebnisse bzw. die Aufnahmen dieser Arbeit der Öffentlichkeit und damit dem potentiellen Kundenkreis zugänglich zu machen, wurde eine Webseite erstellt, mit deren Hilfe ein Mikrofonvergleich ohne weitere Soft- oder Hardware (mit Ausnahme von guten Lautsprechern) möglich ist. Die Webseite musste daher folgenden Anforderungen genügen:

1. Es müssen mindestens acht Audiofiles abgespielt werden können
2. Es muss ein Umschalten zwischen verschiedenen Audiodateien möglich sein. Das neue angewählte Mikrofon muss an der Stelle wiedergegeben werden, bis zu welcher das bisherige Audiofile abgespielt worden ist. Dabei dürfen weder ein Sprung, noch eine hörbare Pause entstehen. Das Umschalten selber darf kein Störgeräusch („Knacksen“) verursachen, muss aber auditiv wahrgenommen werden können. Es darf also keinen fließenden Übergang zwischen den Audiofiles geben.
3. Es muss zwischen beliebigen Audiofiles hin- und hergeschaltet werden können, d.h. es muss auch möglich sein, von Audiodatei Nummer 2 auf Datei Nummer 8 zu wechseln, und nicht nur eine Datei weiter oder zurück zu springen.
4. Da das Anklicken der Maustaste oder aber in manchen Fällen ein Tastendruck der Tastatur als störend empfunden werden kann, muss eine Steuerung über beide Eingabegeräte möglich sein.
5. Die Webseite soll dem Nutzer zusätzliche Informationen über das der angewählten Audiodatei entsprechende Mikrofon anzeigen. Dazu gehören Polardiagramme, eine kurze Erklärung zu Besonderheiten des Mikrofons und die frequenzabhängige Diffusschalldämpfung.

6.2 Die Implementierung

Die Implementierung der Webseite wurde mit Hilfe des neuen Audio-Tags in HTML 5 umgesetzt, da dieses Element das Abspielen einer Audiodatei und deren Integrierung in eine Webseite sehr einfach macht. Auch das Laden der Webseite und der Dateien geht mit diesem Audio-Tag sehr schnell. Allerdings sind die Funktionen der Audio-Tags alleine (möglicherweise noch) zu eingeschränkt und für den Vergleich verschiedener, „parallel“ abzuspielender Audiospuren unzureichend.

Beim Umschalten zwischen den Mikrofonen müssen drei verschiedene Dinge geschehen: Das bisherige File muss gestoppt werden; die aktuelle Abspielposition muss dem bisherigen File entnommen werden; die neue Audiodatei muss an diese Position „vorgespult“ werden und anschließend abgespielt werden. Spätestens hier reichen die vom Audio-Tag mitgelieferten Funktionen nicht mehr aus. Denn die Positionsberechnung mithilfe der Funktion „CurrentTime“ arbeitet mit Integer-Werten, also mit ganzen Zahlen, die die Menge an verstrichenen Sekunden angeben. Durch diese Rundung der Abspielposition würde beim Umschalten meist ein „Springen“

des Tons entstehen, der vom Vergleich ablenken würde. Daher wurde das Abspeichern der aktuellen Position mit einer in JavaScript programmierten Stoppuhr gelöst.

```
var startTime;
var thisTime;
function getPlayTime(){
    thisTime = new Date();
    return (thisTime.getTime() - startTime)/1000;
}
```

Ein weiteres Problem waren Störgeräusche in Form eines Knacksens beim Umschalten, welche dadurch entstehen, dass die Wiedergabe eines laufenden Audiofiles an einer Position mit einem Wert ungleich null unterbrochen wird oder ein Anderes mit einem Sample mit einem Wert ungleich null gestartet wird. Die entstehende Flanke mit einer gegen Unendlich strebenden Steilheit ist mit einer Sprungfunktion vergleichbar und enthält (theoretisch) alle Frequenzen.

Um dem verursachten Störgeräusch zu entgehen, musste der Übergang vom einen zum anderen Audiofile mittels eines kurzen Crossfades geschehen. Kurz musste er deshalb sein, da eine zu lange Überblendung das Wahrnehmungsvermögen für Klangunterschiede erheblich schwächen würde. Der Audio-Tag liefert allerdings keine Blenden-Funktion mit. Daher muss hier auf Skript-Sprachen zurückgegriffen werden. Es wurden mehrere Möglichkeiten für eine Crossfade-Funktion ausprobiert. Zunächst wurden eigens in JavaScript programmierte Funktionen mit Schleifen, welche die Lautstärke des Audio-Tags Schritt für Schritt erhöhen bzw. erniedrigen, verwendet. Diese konnten jedoch entweder die Störgeräusche nicht beseitigen oder verursachten eine hörbare Pause beim Wechsel. Auch verschiedene im Internet angebotene Lösungen mittels einzubindender Libraries für Audiodaten wurden ausprobiert. Bei der notwendigen Kürze der Überblendungen konnten aber auch diese leichte Störgeräusche nicht verhindern. Letztendlich wurde eine eigene Funktion in JavaScript geschrieben, die unter Zuhilfenahme der „animate“-Funktion von JQuery für eine Überblendung sorgt. Ein leichtes Knacksen ist leider auch bei dieser Funktion beim Wechsel zu vernehmen. Die beim Anwählen des gewünschten Mikrofons ausgeführte Funktion sieht folgendermaßen aus:

```
1  function myPlay(thatFile){
2
3  if (isPlaying == true && thatFile!=nowPlaying &&
4  document.getElementById("audio"+formerOne).paused) {
5
6  document.getElementById("audio"+thatFile).currentTime = getPlayTime();
7
8      //Übergang mit Fader:
9      document.getElementById("audio"+nowPlaying).volume=1;
10     document.getElementById("audio"+thatFile).volume=0;
11     document.getElementById("audio"+thatFile).play();
12
13     $("#audio"+nowPlaying).animate({volume: 0}, 300,
```

```

14     function(){this.pause()});
15     $("#audio"+thatFile).animate({volume: 1}, 300);
16
17     formerOne = nowPlaying;
18     nowPlaying = thatFile;
19
20     document.getElementById("Bar").style.left = (thatFile*136)+"px";
21     writeDesc(thatFile);
22
23 } else {
24     return
25 }

```

Die erste „if“-Klammer (Zeile 3 und 4) sorgt dafür, dass die Funktion nur unter drei Bedingungen ausgeführt werden kann:

1. Der „Play-Button“ muss gewählt worden sein
2. Das gewählte Audiofile ist nicht jenes, das gerade abgespielt wird
3. Die letztmalig vorgenommene Überblendung ist bereits abgeschlossen

Zeile 6 setzt die Startzeit der gewählte Audiodatei auf die richtige Position. Zeile 10 schaltet die Datei zunächst auf „stumm“; Zeile 11 startet die Wiedergabe. Zeilen 13 bis 15 führen mit der „Lautstärke-Animation“ die Überblendung aus. Die Zahl 300 gibt die Dauer der Blende in Millisekunden an. Als „Callback“-Funktion, welche ausgeführt wird, wenn die erste Audiodatei ausgeblendet wurde, stoppt die HTML5-Funktion „pause()“ die Wiedergabe. Danach werden in den folgenden Zeilen globale Variablen neu belegt und die von der Webseite angezeigten Informationen zum Mikrofon aktualisiert.

In der Menüleiste kann zwischen verschiedenen Aufnahmen für den Vergleich ausgewählt werden. Die Menüpunkte sind jeweils mit einer eigenen HTML-Datei verknüpft. Darunter befindet sich eine Reihe aus Bildern der Mikrofone, die als Buttons funktionieren, damit der Anwender dem Klangeindruck und den Informationen ein Produkt zuordnet. Die Mikrofone sind von links nach rechts nach der Größe des Abstandes zur Schallquelle bzw. von rechts nach links nach dem Bündelungsgrad sortiert. Um zwischen den Mikrofonen hin- und herschalten zu können muss der Anwender zunächst die Wiedergabe starten. Dies geschieht entweder mit einem Mausklick auf das erste Bild oder durch Betätigung der „Escape“-Taste. Ein „Key-Listener“ interpretiert die Eingaben über die Tastatur und erlaubt ein Umschalten via Pfeiltasten und den Zahlen 1 bis 8. Das Abbrechen der Wiedergabe geschieht auf die gleiche Weise wie der Start. Dabei wird folgende Funktion ausgeführt:

```

1  function startStop(){
2
3  if(isPlaying==false){
4
5      document.getElementById("audio1").currentTime=0;

```

```
6    document.getElementById("audio1").volume=1;
7    document.getElementById("audio1").play();
8    isPlaying = true;
9    nowPlaying = 1;
10   formerOne = 2;
11   document.getElementById("StartStopButton").src="images/big/Stop.jpg";
12   thisTime = null;
13   var startDate = new Date();
14   startTime = startDate.getTime();
15   document.getElementById("Bar").style.left = "137px";
16   writeDesc(1);
17
18 }else{
19
20     $("#audio"+nowPlaying).animate({volume: 0}, 1000, function()
21 {this.pause()});
22     isPlaying = false;
23     document.getElementById("StartStopButton").src="images/big/Start.jpg";
24     startDate = null;
25     thisTime = null;
26     nowPlaying = null;
27     document.getElementById("Bar").style.left = "0px";
28     formerOne = 2;
29     writeDesc(0);
30 }
```

Der erste Teil der Funktion beinhaltet das Starten der Wiedergabe. Die Wiedergabe wird hier immer mit dem CCM 2 begonnen und beginnt nach jedem Anhalten von vorne. Da die Audiofiles selbst am Anfang und Ende eine Blende besitzen, ist bei Beginn der Wiedergabe kein Fade nötig. Zeile 11 tauscht das angezeigte Bild in eines mit Stoppsymbol um. Gespeicherte Zwischenzeiten werden in Zeile 12 verworfen. Der Startzeitpunkt der Wiedergabe wird in Zeile 13 gespeichert.

Beim Anhalten der Wiedergabe wird die Audiodatei in Zeile 20 ausgeblendet und alle Werte zurückgesetzt, um eine erneute Wiedergabe zu ermöglichen.

Falls möglich, wird eine Verwendung der Webseite mit Mozilla Firefox empfohlen, da die Webseite auf diesen Browser zugeschnitten wurde. Es wird in der Folgezeit versucht werden, die Seite für alle Browser gleichermaßen kompatibel zu gestalten. Die HTML-Dateien sowie alle dazugehörigen Audio- und Bilddaten werden der Firma Schoeps zur weiteren Gestaltung und Verwendung zur Verfügung gestellt.

7. FAZIT

7.1 Tontechnisches Fazit

Alle technischen Betrachtungen und objektive wie subjektive Analysen zusammengefasst, kommt diese Arbeit für die verwendeten Mikrofone zu folgenden Ergebnissen:

Das CCM 2 verhält sich in allen Analysen wie anhand des Empfängerprinzips und der zur Verfügung stehenden technischen Angaben erwartet. Die einzige Überraschung war der gleichmäßige Höhenabfall des Frequenzspektrums des aufgenommenen Rauschens über das gesamte Spektrum hinweg, obwohl eine Bündelung aufgrund der geringen Kapselgröße erst bei sehr hohen Frequenzen eintreten dürfte. Mit nachträglicher, digitaler Diffusfeld-Entzerrung liefert das CCM 2 bei Musikaufnahmen auch im Diffusfeld gute Ergebnisse.

Vom im Abschnitt 5.3 erwarteten brillanten Klang des BLM03 Cg ist nur bei den reinen Klavieraufnahmen etwas zu hören; die anderen Schallquellen dringen in höhere Frequenzbereiche vor und offenbaren dort unerwartete Schwächen.

Das V4 U präsentiert sich im Diffusfeld durchweg sehr ausgewogen. Es zeigt eine größere Ausgeglichenheit und wirkt weniger penetrant als das CCM 4, da die Ringscheibe offensichtlich für ein etwas dumpferes Ergebnis sorgt. Die Ergebnisse dieser Aufnahmen bestätigen den Anspruch des Mikrofons, diffuse Schallanteile in einer das Direktsignal aufwertenden bzw. tragenden Form umzusetzen.

Das CCM 8 enttäuscht ein wenig. Es wird meist als Bestandteil eines MS-Stereo-Aufbaus verwendet. Dadurch ist es in der Klassik relativ großen Anteilen diffusen Schalls ausgesetzt. Obwohl das Richtdiagramm was die Diffusschallwandlung betrifft den anderen Mikrofonen gegenüber keine Schwächen offenbart, war es das einzige Mikrofon, welches bei allen Vergleichen den subjektiv schlechtesten Klangeindruck hinterließ. Es war das einzige Mikrofon, bei welchem man auch auf nicht-studiokonformen Wiedergabegeräten einen Qualitätsunterschied ausmachen konnte. Gleichwohl darf man nicht davon ausgehen, dass alle MS-Stereoaufnahmen mit dem Schoeps CCM 8 blechern oder qualitativ minderwertig klingen. Man muss einerseits bedenken, dass es sich hier „nur“ um die diffusen Schallanteile handelt, die bei musikalischen Aufnahmen eine untergeordnete Rolle spielen sollten. Zudem ist die Kritik auf einem sehr hohen Niveau einzuordnen. Leider haben es die technischen Mittel unmöglich gemacht, weitere Mikrofone anderer Hersteller in den Test einzubeziehen, um das Niveau des ganzen Mikrofon-Sets zu „normalisieren“.

Im Anschluss an die Aufnahmen für diese Arbeit wurde das Musikerduo auch noch musikalisch „richtig“ in der Kirche aufgenommen. Der Flügel wurde dafür (auch aufgrund des Fehlens zweier gleicher Exemplare) mit der MS-Methode aus CCM 4 und CCM 8 abgenommen. Diffuse Schallanteile waren groß genug, um keinen künstlichen Hall zumischen zu müssen. Das Ergebnis war eine durchaus zufriedenstellende, hochwertige Flügelaufnahme mit dem CCM 8 als Wandler des Seitensignals. Die Frage, ob an dieser Stelle nicht noch etwas mehr rauszuholen wäre, bleibt

allerdings im Raum stehen. Die Analysen bestätigen in jedem Fall die Übertragungstechnische Überlegenheit der reinen Druckempfänger im Hinblick auf die Linearität gegenüber reinen Druckgradienten und zeigen auf, dass diese Überlegenheit selbst im diffusen Schallfeld Bestand hat.

Das CCM 41 machte in der Höranalyse musikalischer Signale einen guten Eindruck, kann aber die Erwartungen nach der Betrachtung der Polardiagramme und der Diffusschalldämpfung nicht ganz erfüllen. Im Test mit Rauschen offenbarte es unerwartete Schwächen in Form von Unlinearitäten und Einfärbungen. Für Musikaufnahmen mit großen Diffusschall-Anteilen kann es trotzdem aufgrund des guten Höreindrucks bedenkenlos eingesetzt werden.

Das CMIT 5 U überzeugt durch eine erstaunlich ausgeglichene Übertragung diffusen Schalls. Das war bei einem Richtrohr-Mikrofon nicht zu erwarten. Die Bündelung durch das Richtrohr funktioniert offensichtlich gut (Abstandsfaktor 2,1), trotzdem klingt der Diffusschall nicht dunkler als beim CCM 2. Durch die für ein Richtrohrmikrofon sehr unverfälschte Übertragung empfiehlt sich das CMIT 5 U damit auch für Musikaufnahmen, falls die Umstände eine entferntere Mikrofonierung erfordern.

Die Ergebnisse des SuperCMIT sind aufgrund der völligen Zweckentfremdung in Ordnung; jedoch offenbart es in der Höranalyse durchweg eine gewisse Unnatürlichkeit. Eine Vermeidung von Klangfarbenartefakten wie vom Hersteller angepriesen war unter den „Extrembedingungen“ dieser Aufnahmen nicht der Fall. Für Musikaufnahmen mit großen diffusen Schallanteilen ist der Einsatz des SuperCMIT nach den Ergebnissen dieser Arbeit nicht empfehlenswert. Um eine sicherere Aussage zum Übertragungsverhalten machen zu können, müsste man die Aufnahmen in einer größeren Kirche wiederholen, in welcher das SuperCMIT günstiger positioniert werden kann.

7.2 Umsetzung der Bachelorarbeit

Bei der Umsetzung der Aufnahmen und der Webseite als Vergleichsplattform lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

Das HTML5-Audio-Tag mag das schnelle Einbinden einer Audiodatei in eine Webseite möglich machen, alle nur ein wenig darüber hinausgehende Funktionen (wie in diesem Fall die Synchronisierung mehrerer Files oder Überblendungen) verlangen dann aber trotzdem eine intensive Auseinandersetzung mit Skriptsprachen und browserabhängigen Eigenschaften von Audiodaten.

Unterschiede der verschiedenen Empfängerprinzipien in der Diffusschallwandlung konnten im Allgemeinen hör- bzw. sichtbar gemacht werden. Dabei zum Teil aufgetretene größere Abweichungen zwischen Höreindruck und Frequenzspektrum des Rauschens verlangen eigentlich nach mehreren Aufnahmen an unterschiedlichen Stellen im Raum. Durch die vorgegebene Position des Instruments, der begrenzten Raumfläche und den zeitlichen Rahmen war das leider nicht möglich.

Bei der Auswertung konnte generell nie genau gesagt werden, ob Einbrüche und Überhöhungen im Frequenzgang die Folge einer unausgeglichene Richtcharakteristik des Mikrofons oder einfach nur Raumeinflüsse sind. Dazu hätte im Vorfeld der Aufnahme jede einzelne Mikrofonposition akustisch ausgemessen werden müssen. Dies wiederum erfordert aufgrund der

Entfernung zur Schallquelle von bis zu 14,5 m ein sehr lautes Messsignal, das mit der vorhandenen Technik nicht zu realisieren war. Um also definitiv sagen zu können, ein Mikrofon übertrage diffuse Schallanteile mit bestimmten Unlinearitäten, müsste man derartige Aufnahmen in vielen verschiedenen Räumen (idealerweise auch in einem Hallraum) unter Einbeziehung eines Messmikrofons durchführen und danach vergleichend analysieren.

Des Weiteren wäre es – wie früher schon erwähnt – interessant gewesen, einige Standard-Mikrofone anderer Hersteller in die Analysen einbeziehen zu können. Beispielsweise wäre ein Vergleich zwischen einem Neumann Großmembran-Mikrofon und dem Schoeps V4 U oder die Einbindung eines Mikrofons einer anderen Preisklasse durchaus reizvoll gewesen, war aber mit der vorhandenen Technik nicht möglich.

Literaturverzeichnis

ADAM Audio GmbH. (kein Datum). *ADAM A5X Technische Daten*. Abgerufen am 13. März 2014 von <http://www.adam-audio.com/de/pro-audio/products/a5x/technical-data>

Ahnert, W., & Tennhardt, H.-P. (2008). Raumakustik. In S. Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik* (S. 181-266). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Boré, G., & Peus, S. (2002). *Mikrofone - Arbeitsweise und Ausführungsbeispiele*. Berlin: Georg Neumann GmbH.

Detmold, E. (kein Datum). *Richtcharakteristiken*. Abgerufen am 27. Februar 2014 von http://old.hfm-detmold.de/eti/projekte/semesterarbeiten/mikro-richtchar/gradienten_charakteristiken.pdf

Dickreiter, M. (1997). *Handbuch der Tonstudioteknik* (6. verbesserte Ausg., Bd. 1). (SRT, Hrsg.) München: K.G. Saur Verlag.

Evangelische Kirche Stuttgart. (4. Dezember 2012). *Gesamtkirchengemeinde Himmelsleiter*. Abgerufen am 15. Februar 2014 von <http://www.ev-ki-stu.de/gemeinden/moenchfeld/>

Franz, D. (1990). *Elektroakustik*. München: Franzis-Verlag.

Frießecke, A. (2007). *Die Audio-Enzyklopädie*. München: K.G. Saur.

Görne, T. (2010). *Mikrofone in Theorie und Praxis* (überarbeitete und erweiterte Ausg.). Aachen: Elektor-Verlag.

Görne, T. (2008). *Tontechnik* (aktualisierte Auflage Ausg., Bd. 2). (P. D. Schmidt, Hrsg.) München: Carl Hanser Verlag.

Hillenbrand, D. M. (kein Datum). *Klassika - Die deutschsprachigen Klassikseiten*. Abgerufen am 26. Februar 2014 von http://www.klassika.info/Komponisten/Liszt/Tanz/Searle_617/index.html

Hoffmann, F. K. (23. Januar 2012). *Test: Adam Audio, A5X, Aktiv-Lautsprecher*. Abgerufen am 10. Februar 2014 von <http://www.amazona.de/test-adam-audio-a5x-aktiv-lautsprecher/2/>

Idektron GmbH und Co KG. *Bedienungsanleitung CARMA 4*. Bochum.

Meyer, J. (1965). Die Richtcharakteristik des Flügels. *Vortrag Europäischer Kongreß Berlin 1965* (S. 1085-1090). Berlin: Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.

Meyer, J. (2003). *Kirchenakustik*. Frankfurt am Main: Verlag Erwin Bochinsky.

Meyer, J. (2008). Musikalische Akustik. In S. Prof. Dr. Weinzierl, & S. Prof. Dr. Weinzierl (Hrsg.), *Handbuch der Audiotechnik* (S. 123-180). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Nisbett, A. (2003). *The Sound Studio: Audio Techniques for Radio, Television, Film and Recording*. Oxford: Focal Press.

Pawera, N. (2003). *Mikrofonpraxis - Tipps und Tricks für Bühne und Studio* (4. komplett überarbeitete und erweiterte Auflage Ausg.). Bergkirchen: PPV MEDIEN GmbH.

- Schneider, M. (2008). Mikrofone. In P. D. Weinzierl, & P. D. Weinzierl (Hrsg.), *Handbuch der Audiotechnik* (S. 313-420). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schoeps GmbH. (2011). *Catalog 6*. Karlsruhe: Schalltechnik Dr.-Ing. SCHOEPS GmbH.
- Schoeps GmbH. (2014). *Produktübersicht*. Abgerufen am 13. März 2014 von <http://www.schoeps.de/de/products>
- Schoeps GmbH. (5. September 2013). *Studio-Gesangsmikrofon V4 U*. Abgerufen am 2. Februar 2014 von http://www.schoeps.de/de/downloads/catalogues_and_brochures
- Sengpiel, E. (März 2009). *Druckstau bei Mikrofonen mit Kugelcharakteristik*. Abgerufen am 16. Januar 2014 von <http://www.sengpielaudio.com/DruckstauBeiMikrofonenMitKugelcharakteristik.pdf>
- Sengpiel, E. (kein Datum). *Relativer Abstandsfaktor*. Abgerufen am 14. Januar 2014 von <http://www.sengpielaudio.com/RelativerAbstandsfaktor.pdf>
- Sengpiel, E. (kein Datum). *Tontechnik-Recher*. Abgerufen am 20. Februar 2014 von <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-RT60Koeff.htm>
- Webers, J. (2007). *Handbuch der Tonstudientechnik*. Pöng: Franzis Verlag GmbH.
- Weinzierl, P. D. (2004). *Kommunikationstechnik I*. Abgerufen am 18. Januar 2014 von http://www.ak.tu-berlin.de/fileadmin/a0135/Unterrichtsmaterial/Skripte/KT_I_v9.pdf
- Wittek, D. H. (Januar 2011). *Die Entwicklung des SuperCMIT*. Abgerufen am 8. Februar 2014 von <http://www.schoeps.de/de/downloads/papers>
- Wittek, D. H. (2013). *V4 U Development Paper*. Abgerufen am 2. März 2014 von <http://www.schoeps.de/de/downloads/papers>
- Wuttke, J. (1994). *Kleines Kompendium*. Karlsruhe: 18. Tonmeistertagung.

Abbildungsverzeichnis

Solange nicht anders angegeben, wurden alle Abbildungen in Kapitel 2 und alle Diagramme in Abschnitt 5.3 der Schoeps-Homepage (<http://www.schoeps.de/de/products>) entnommen und gegebenenfalls mit Photoshop bearbeitet.

Abbildung 1: Das CCM 2, ein reiner Druckempfänger	10
Abbildung 2: Das CCM 8, ein reiner Druckgradientenempfänger	13
Abbildung 3: Das CCM 4 mit zum MK 4 identischer Kapsel	15
Abbildung 4: Das V4 U, ein neues Studio-Gesangsmikrofon	16
Abbildung 5: Das CCM 41, eine "Superniere"	17
Abbildung 6: Das BLM 03 Cg, das Kleinere der beiden Grenzflächenmikrofone der Firma Schoeps	20
Abbildung 7: Frequenzgänge des ADAM A5X, rot: ungeglätteter Verlauf der eigenen Messung, blau: Messung des Musikportals "Bonedo" (blaue Frequenzkurve von http://www.bonedo.de/artikel/einzelansicht/adam-audio-a5x/2.html)	26
Abbildung 8: Skizze des Grundrisses der evangelischen Kirche in Mönchfeld	30
Abbildung 9: Grundriss der Kirche mit horizontalen Streckenmaßen in Meter. Abbildung nicht maßstabsgetreu!	31
Abbildung 10: Längen (blau) und Höhen (rot) der Begrenzungsflächen des Aufnahmeraumes in Meter	31
Abbildung 11: Deckenmaße [m]	32
Abbildung 12: Wandbemaßungen [m]	32
Abbildung 13: Grundriss der Kirche mit Position des Flügeld bzw. der Box und den drei verschiedenen Positionen des Messmikrofons	34
Abbildung 14: Wasserfalldiagramm einer der Raum-Messungen	35
Abbildung 15: Skizze des Aufbaus mit unterschiedlichen Mikrofon-Positionen	36
Abbildung 16: Vom Hersteller berechnete Diffusschalldämpfungen von CCM 2 (blau), CCM 4 (rot), CCM 41 (dunkelgrün) und CMIT 5 U (hellgrün), zur Verfügung gestellt von Helmut Wittek	37
Abbildung 17: Freifeldfrequenzgang und Polardiagramm des BLM 03 Cg	38
Abbildung 18: Freifeldfrequenzgang und Polardiagramm des CCM 2 und des MK 2	38
Abbildung 19: Freifeldfrequenzgang und Polardiagramm des CCM 41 bzw. MK 41	39
Abbildung 20: Freifeldfrequenzgang und Polardiagramm des CCM 4 und des MK 4	39
Abbildung 21: oben: Freifeldfrequenzgänge des CMIT 5 U aus verschiedenen Richtungen, darunter: Polardiagramm des CMIT 5 U	40
Abbildung 22: Freifeldfrequenzgang und Polardiagramm des CCM 8 bzw. MK 8	40
Abbildung 23: oben: Freifeldfrequenzgang des SuperCMIT mit Filtereinstellungen (grün: Low-Cut, rot: High-Shelving-Filter); darunter: Diffusschallfrequenzgänge für Kanal 2 (schwarz), Kanal 1 mit Preset 1 (grün) wie verwendet und Kanal 1 mit Preset 2 (rot)	41

Abbildung 24: oben: Freifeld- und Diffusfeldfrequenzgang des V4 U, unten: Polardiagramm des V4 U, dem V4 U Produktblatt (siehe http://www.schoeps.de/de/downloads/catalogues_and_brochures) entnommen _____	42
Abbildung 25: Gemittelttes Frequenzspektrum eines 17-sekündigen Ausschnittes aus dem Piano-Solostück „Csárdás macabre“ von Franz Liszt, aufgenommen von verschiedenen Mikrofonen. _____	43
Abbildung 26: Frequenzspektrum von rosa Rauschen, aufgenommen mit dem CCM 2 (gelb) und dem BLM 03 Cg (grün). Horizontale Hilfslinien repräsentieren 3 dB-Differenzen _____	47
Abbildung 27: Frequenzgänge der Aufnahme von rosa Rauschen, mit dem CCM 4 (rot), dem V4 U (blau) und (grau im Hintergrund) dem "CCM 3" _____	48
Abbildung 28: Frequenzgänge des CMIT 5 U (hellblau) und des SuperCMIT (dunkelblau) bei der Aufnahme von rosa Rauschen im Diffusfeld _____	49
Abbildung 29: Frequenzgänge von rosa Rauschen, im Diffusfeld aufgenommen mit dem CCM 41 (grün), dem CCM 8 (rot) und dem diffusfeldentzerrten CCM 2 (grau) als Referenz _____	50

Formelverzeichnis

- (1) Untergrenze für Messung des Diffusschallfrequenzganges, laut Schneider (2008):

$$f_u = 125 * \sqrt[3]{\frac{180}{V}}$$

- (2) Richtfaktor gemäß Schneider (2008):

$$s(\varphi) = \frac{M_0(\varphi)}{M_0(0^\circ)}$$

- (3) Richtcharakteristik erster Ordnung laut Schneider (2008):

$$s(\varphi) = A + (1 - A) * \cos \varphi$$

- (4) Diffusfeld-Übertragungsfaktor laut Schneider (2008):

$$M_{Diff} = \frac{M_0}{\sqrt{V}}$$

- (5) Bündelungsgrad laut Franz (1990) und Schneider (2008):

$$\gamma = \frac{P_{e\ dir}}{P_{e\ diff}} = \frac{M_{0^\circ\ dir}^2}{M_{diff}^2} = \frac{u_{0^\circ\ dir}^2}{u_{diff}^2} = \frac{2}{\int_0^\pi s^2(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi}$$

- (6) Resonanzfrequenz laut Webers (2007)

$$f_r = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{D}{m}}$$

- (7) Membranauslenkung des Kondensatormikrofons laut Schneider (2008):

$$U_{\sim} \sim U_0 * \frac{a}{d_0}$$

- (8) Druckdifferenz beim Druckgradienten laut Schneider (2008):

$$\Delta p \sim 2 \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right) * \cos \varphi$$

- (9) Richtcharakteristik für Druckgradienten laut Friessecke (2007):

$$s(\varphi) = \cos \varphi$$

- (10) Richtcharakteristik für Nierenmikrofone laut Schneider (2008):

$$s(\varphi) = 0,5 + 0,5 * \cos \varphi$$

(11) Richtcharakteristik für Supernieren laut Friesecke (2007):

$$s(\varphi) = 0,37 + 0,63 * \cos(\varphi)$$

(12) Richtverhalten eines Richtrohrmikrofons laut Görne (Tontechnik, 2008):

$$\Gamma(\varphi, l, \lambda) = \frac{\sin(\pi \frac{l}{\lambda} * (\cos \varphi - 1))}{\pi \frac{l}{\lambda} * (\cos \varphi - 1)} = \operatorname{si}\left(\pi \frac{l}{\lambda} * (\cos \varphi - 1)\right)$$

(13) Untere Grenzfrequenz für den Druckstauereffekt bei Grenzflächenmikrofonen laut Schneider (2008):

$$f_u \geq \frac{c}{2d}$$

(14) Schroederfrequenz oder Großraumfrequenz laut Meyer (Musikalische Akustik, 2008):

$$f = 2000 * \sqrt{\frac{T}{V}}$$

(15) Sabinesche Nachhallformel laut Friesecke (2007):

$$T = 0,163 * \frac{V}{A}$$

(16) Eyringsche Nachhallformel laut Friesecke (2007):

$$T = 0,163 * \frac{V}{-S * \ln(1 - \alpha_m)}$$

(17) Zusammenfassung der Absorptionsgrade unter Fläche „A“ laut Webers (2007):

$$A = \sum_1^n \alpha_n * S_n$$

(18) Hallradius laut Pawera (2003):

$$r_H = 0,057 * \sqrt{\frac{V}{T}}$$

(19) Effektiver Hallradius nach Dickreiter (1997):

$$r_{H_{eff}} = 0,057 * \sqrt{\frac{V}{T}} \gamma_Q$$

(20) Hallradius mit Einbezug von Bündelungsgrad von Schallquelle und Mikrofon laut Friesecke (2007):

$$r_H = 0,057 * \sqrt{\frac{V}{T}} \gamma_Q \gamma_M$$

Nicht im Verzeichnis erfasste Formeln wurden aus den erfassten Formeln abgeleitet oder gelten als allgemein bekannt.