



Hochschule der Medien Stuttgart

Fakultät Electronic Media

Über MEMS-Mikrofontechnologie und deren Eignung im professionellen Audiobereich

Eine anwendungsbezogene Untersuchung im Jahr 2017

Bachelorarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering

Autor: Massimo Ehrhard
MatNr. 28093

vorgelegt am: 31.08.2017

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt
2. Betreuer: Dipl.-Ing. (FH) Tobias Gmoser

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Massimo Ehrhard, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Über MEMS-Mikrofontechnologie und deren Eignung im professionellen Audiobereich - Eine anwendungsbezogene Untersuchung im Jahr 2017“ 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 ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester), § 23 Abs. 2 Master-SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Unterschrift :

Ort, Datum :

Sperrvermerk

Die vorliegende Arbeit beinhaltet interne und vertrauliche Informationen der Firma beyerdynamic GmbH & Co. KG. Die Weitergabe des Inhalts der Arbeit im Gesamten oder in Teilen sowie das Anfertigen von Kopien oder Abschriften - auch in digitaler Form - sind grundsätzlich untersagt. Ausnahmen bedürfen der schriftlichen Genehmigung der Firma beyerdynamic GmbH & Co. KG.

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit den Grundlagen der MEMS-Mikrofontechnologie und ihrer prinzipiellen Eignung im professionellen Audiobereich im Bezug auf technische sowie subjektiv empfundene Audioqualität. Zunächst werden grundlegende funktionale Zusammenhänge in elektroakustischen Wandlern dargelegt, welche für die spätere Klassifikation der Messergebnisse wichtig sind. In einem zweiten Schritt wird der grundlegende Aufbau und die Funktionsweise von MEMS-Mikrofonen erläutert. Der Hauptteil dieser Arbeit ist eine ausführliche vergleichende messtechnische Erfassung der tontechnischen Qualitätsparameter von MEMS-Mikrofonen; dieser wird durch eine Erfassung der empfundenen Audioqualität ergänzt. Dabei werden miniaturisierte Elektretmikrofone ähnlicher Baugröße zu Vergleichszwecken herangezogen.

Die Bachelorarbeit wurde vom 01.06.2017 bis zum 31.08.2017 bei der beyerdynamic GmbH & Co. KG in Heilbronn im Bereich R&D Microphones erstellt.

Abstract

This thesis is focusing on MEMS microphone technology and its principal qualification for professional audio applications in regards of technical specifications and perceived audio quality. First fundamental functional dependencies in electroacustical transducers are given. These are important to understand the latter classification of measurement data. This is followed by an explanation of the fundamental design and mode of operation of MEMS microphones. The main part of this thesis is made up of detailed comparative measurements of MEMS microphone characteristics, which are supplemented by a short test of perceived audio quality. To have a comparative basis miniaturised electret condenser microphones are also covered in this measurements.

This bachelor thesis was made between June, 1st and August, 31st 2017 at beyerdynamic GmbH & Co. KG, Heilbronn, Germany in the R&D Microphones department.

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung	3
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	11
1 Einleitung	12
1.1 Problemstellung und Relevanz	12
1.2 Zielsetzung	13
1.3 Aufbau	13
2 Theoretische Grundlagen	14
2.1 Allgemeines	14
2.1.1 Akustische Grundelemente	14
2.1.2 Helmholtz-Resonator	14
2.1.3 Gehörrichtige Bewertung von Schallpegeln	14
2.1.4 Harmonische Verzerrungen: THD bzw. Klirrfaktor	15
2.2 Mikrofonbau	15
2.2.1 Definition: Mikrofon (Empfänger- und Wandlerprinzipien)	16
2.2.2 Empfängerprinzip: Druckempfänger	17
2.2.3 Wandlerprinzip: elektrostatisch, NF-Schaltung	19
2.2.4 Technische Daten	21
3 Mikrofontechnologien in Miniaturbauweise	24
3.1 MEMS-Mikrofone	24
3.1.1 Definition: mikroelektromechanisches System	24
3.1.2 Herstellungsverfahren	24
3.1.3 Aufbau und Eigenschaften MEMS-Mikrofon	27
3.2 Elektret-Mikrofone	30
4 Untersuchte Mikrofone	32
4.1 MEMS-Mikrofone	32
4.2 ECM	37
5 Messtechnische und subjektive Erfassung und Auswertung	40
5.1 Entwicklung der Platine für die MEMS-Testmikrofone	40
5.2 Durchführung	43
5.2.1 Messtechnische Erfassung	43
5.2.1.1 Übertragungsfaktor und Frequenzgang	46
5.2.1.2 Klirrfaktor (THD) und Grenzschalldruckpegel	48
5.2.1.3 Mikrofonrauschen	50
5.2.2 Subjektive Erfassung am Beispiel von Sprache	50
5.3 Beobachtungen und Ergebnisse	53
5.3.1 Messtechnische Erfassung	53
5.3.1.1 Übertragungsfaktor und Frequenzgang	53
5.3.1.2 Klirrfaktor (THD) und Grenzschalldruckpegel	58
5.3.1.3 Mikrofonrauschen	66
5.3.2 Subjektive Erfassung am Beispiel von Sprache	69
5.4 Diskussion und Abschätzung	71
5.4.1 Messtechnische Erfassung	71

5.4.2 Subjektive Erfassung am Beispiel von Sprache	74
5.5 Zusammenhänge	74
6 Fazit und Ausblick	76
Literaturverzeichnis	77
Anhang	80

Abbildungsverzeichnis

1	Bewertungskurven von Schallpegeln: A-Bewertung nach IEC 651 und CIRR-1k Bewertung nach CCIR 468	15
2	Prinzipieller Aufbau eines Mikrofons	16
3	Prinzip des Aufbaus einer Kapsel eines Druckempfängers	17
4	Schema des elektrostatischen Wandlers in NF-Schaltung	20
5	Grundsätzlicher Fertigungsablauf der Siliziumtechnologie	25
6	Grundstruktur der CMOS-Technologie	26
7	Querschnitt beim isotropen (a) und anisotropen (b) Ätzprozess	26
8	Schematische Darstellung der Prozessschritte der Oberflächenmikromechanik (Beispiel: freistehender Balken)	27
9	Schematischer Aufbau des Sensors in einem MEMS-Mikrofon	29
10	Schematischer Aufbau des Sensors in einem MEMS-Mikrofon	29
11	InvenSense ICS-40618	33
12	InvenSense ICS-40730: Unterseite	34
13	InvenSense ICS-40730: Oberseite ohne Gehäusedeckel	34
14	ICS-40730 Membran	35
15	ICS-40730 Schalleinlassöffnung	35
16	ICS-40730 Unterseite	35
17	Sonion O11BC03	35
18	Akustika BMU563R	36
19	STMicroelectronics MP23AB01DH	36
20	TDK T4071	37
21	beyerdynamic H56	38
22	beyerdynamic DT291 PV MKII	39
23	Sonion ECMs	39
24	MEMS-Mikrofon Testplatine am Stück	40
25	MEMS-Mikrofon <i>Testfinger</i>	41
26	Frequenzgang des Referenzmikrofons bei der Frequenzgangsmessung	48
27	Frequenzgang SPL des beyerdynamic DT 880 Pro Ω , gemessen am künstlichen Ohr nach IEC 60318-1 bei 1 mW. Die Kurve wurde mit einem gleitendem Mittelwert über eine 1/3 Oktavband-Breite gemittelt.	51
28	0°-Frequenzgang aller getesteten MEMS-Mikrofone bei Versorgungsspannung mit bestem THD-Verlauf	53
29	0°-, 45°-, 90°- und 180°-Frequenzgang des InvenSense ICS-40730	56
30	0°-Frequenzgang aller getesteten ECM bei Versorgungsspannung mit bestem THD-Verlauf	57
31	0°-Frequenzgang des Sonion 8044 bei zwei unterschiedlichen Versorgungsspannungen am unteren sowie oberen Ende des laut der elektrischen Kenndaten erlaubten Bereichs ($U_{\text{Versorgung blau}} = 0,9 \text{ V}$, $U_{\text{Versorgung rot}} = 4,9 \text{ V}$)	58
32	0°- und 180°-Frequenzgang des Sonion 89PC01	59
33	MEMS-Mikrofone: THD-Verläufe 1	60
34	MEMS-Mikrofone: THD-Verläufe 2	60
35	MEMS-Mikrofone: THD-Verläufe 3	61
36	ECM: THD-Verläufe 1	62
37	ECM: THD-Verläufe 2	62
38	MEMS-Mikrofone: Anteile geradzahlgiger und ungeradzahlgiger Harmonischer bei $f = 1 \text{ kHz}$ und $\text{THD} = 1 \%$ - Teil 1	63
39	MEMS-Mikrofone: Anteile geradzahlgiger und ungeradzahlgiger Harmonischer bei $f = 1 \text{ kHz}$ und $\text{THD} = 1 \%$ - Teil 2	63

40	MEMS-Mikrofone: Anteile geradzahlicher und ungeradzahlicher Harmonischer bei $f = 1$ kHz und THD = 1 % - Teil 3	64
41	ECM: Anteile geradzahlicher und ungeradzahlicher Harmonischer bei $f = 1$ kHz und THD = 1 % - Teil 1	64
42	ECM: Anteile geradzahlicher und ungeradzahlicher Harmonischer bei $f = 1$ kHz und THD = 1 % - Teil 2	65
43	MEMS-Mikrofone: dimensionslose und rein qualitative Darstellung des THD für Grundswingungen im Bereich von 1 kHz bis 20 kHz bei 100 dB SPL ($f = 1$ kHz)- Glättung über 1/3-Oktave	66
44	60 Sekunden andauernde Aufzeichnung des Mikrofonrauschens	67

Tabellenverzeichnis

1	MEMS-Mikrofone: metrische und elektrische Kenndaten	32
2	ECM: metrische und elektrische Kenndaten	33
3	MEMS-Mikrofone und ECM: Kenndaten	54

Abkürzungsverzeichnis

ECM	Elektretkondensatormikrofon
ECMs	Elektretkondensatormikrofons
MEMS	mikroelektromechanisches System
MEMS	mikroelektromechanischen Systemen
FET	Feldeffekttransistor
FETs	Feldeffekttransistoren
JFET	Sperrschicht-Feldeffekttransistor
NF	Niederfrequenz
HF	Hochfrequenz
SMD	surface mount device
AP	Audio Precision
ASIC	Application Specific Integrated Circuitry
SOI	Silicon-on-Insulator
AC	alternating current
DC	direct current
HF	Hochfrequenz
THD	Total Harmonic Distortion

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Relevanz

Mit der Erfindung des Halbleiters Mitte des 20. Jahrhunderts schrieb die Elektronikindustrie einen schnellen und rasanten Werdegang des „besser, schneller und trotzdem kleiner“. ¹ Nahezu zeitgleich entwickelte sich in diesen Jahren auch die Telekommunikation. Heutzutage besitzt ein jeder gleich mehrere Telekommunikationsgeräte, die gerne klein und natürlich tragbar sein sollen.

Die genannten Entwicklungen elektronischer Telekommunikationsgeräte unter Aspekten der Kompaktheit und Leistungsfähigkeit forderten auch entsprechend kompakte und leistungsfähige Mikrofone. Mit der Erfindung des Elektretkondensatormikrofons (ECMs) durch Drs. Gerhard Sessler und Jim West in den frühen 1960er Jahren in den Bell Laboratories, New Jersey (USA) war der Grundstein der Miniaturisierung von hochwertigen Mikrofonen gelegt. Das Elektretmikrofon verkaufte sich durch den Einbau in Consumerelektronik in den folgenden Jahrzehnten milliardenfach und wurde schnell zur meistverkauften Mikrofonbauart der Welt.²

Im Jahre 1983 meldete Gerhard Sessler zusammen mit Dietmar Hohm ein Patent unter dem Namen *Silicon-based capacitive transducers incorporating silicon dioxide electret an*³, welches die Grundlage einer neuen kapazitiven Mikrofontechnologie in Miniaturbauweise bildete: das Siliziummikrofon oder MEMS-Mikrofon in seiner heutigen Form war geboren. Diese Mikrofonbauart blieb in ersten Entwicklungsstufen jedoch hinter den damaligen Elektretmikrofonen zurück; sie konnte sich bezüglich der Audioqualität nicht mit ihnen messen.

Seit dem Jahr 2002 – in dem Knowles das erste kommerziell erhältliche MEMS-Mikrofon auf den Markt brachte – wurden viele Entwicklungen in eben diesem Bereich getätigt; nicht zuletzt vorangetrieben durch die Tatsache, dass Apple seit 2010 in ihren Telekommunikationsprodukten wie iPhone und iPad ausschließlich auf MEMS-Mikrofone setzt und auf Elektretkondensatormikrofone gänzlich verzichtet.⁴

Im Jahre 2013 lagen die Verkaufszahlen von MEMS-Mikrofonen mit etwa zweieinhalb Milliarden verkaufter Exemplare bereits über denen von Elektretkondensatormikrofonen. Erwartete Verkaufszahlen im Jahr 2019 sprechen von über sechseinhalb verkauften Exemplaren⁵ Doch diese Verkaufszahlen spiegeln lediglich die starke Verbreitung von MEMS-Mikrofonen in Consumer-Produkten wieder; im professionellen Audiobereich werden sie ‚noch immer‘ nicht eingesetzt.

¹[Büttgenbach, 2016]: S. 13

²vgl. [Elko und Kieran P. Harney, 2009]: S. 4

³vgl. [Elko und Kieran P. Harney, 2009]: S. 9

⁴vgl. [Hopf, 2011]

⁵vgl. [Wood, 2015]

1.2 Zielsetzung

Diese Bachelor Thesis befasst sich mit der Frage, inwiefern MEMS-Mikrofone im Jahr 2017 für den Einsatz in professionellen Audioprodukten geeignet sind. Dabei werden sowohl die prinzipielle technischen Eignung als auch eine mögliche Anwendung anhand eines Nackenbügelmikrofons untersucht. Die Grundlage bildet dabei zunächst eine grundlegende Beschreibung sowie anwendungsorientierte Analyse der Technologie und seiner Möglichkeiten. Den Hauptteil dieser Arbeit bildet eine vergleichende messtechnische sowie subjektive Untersuchung renommierter MEMS-Mikrofone im Jahr 2017 mit Elektretkondensatormikrofonen ähnlicher Dimensionen, welche die unter Abschnitt 4 beschriebenen grundlegenden Technologien aufweisen.

Sie entsteht im Rahmen einer Untersuchung bei der deutschen Firma beyerdynamic, welche seit 1925 professionelle Audioprodukte entwickelt und selbst fertigt. Beyerdynamic setzt seit vielen Jahren in mehreren Produkten Elektretkondensatormikrofone ein und leistet besonders im Miniaturmikrofonbereich seit Anbeginn der Firmengeschichte intensive Entwicklungsarbeit.

1.3 Aufbau

Um die der Arbeit zugrundeliegende Frage zufriedenstellend zu beantworten, wird nach einem einführenden theoretischen Teil, der die wichtigen Begrifflichkeiten zum Verständnis dieser Bachelor Thesis erläutert, zunächst die grundlegende Technologie und Theorie hinter MEMS-Mikrofonen dargestellt. In diesem Zusammenhang soll auch die Funktionsweise von Elektretkondensatormikrofonen kurz behandelt werden. Anschließend erfolgt eine umfangreiche mess- sowie hörtechnische Erfassung der unter Abschnitt 4 vorgestellten Mikrofonauswahl.

Mithilfe der messtechnischen sowie dem Hörversuch entnommenen Ergebnisse soll zum Abschluss der Arbeit eine Abschätzung gegeben werden.

2 Theoretische Grundlagen

Das 2. Kapitel dieser Arbeit enthält die theoretischen Grundlagen, welche zum Verständnis der weiteren Untersuchungen nötig sind. Dabei sollen die nötigen Definitionen und Kenngrößen der Akustik und Mikrofontechnik beschrieben und in übersichtlicher Form dargestellt werden.

2.1 Allgemeines

2.1.1 Akustische Grundelemente

Die akustischen Elemente sind ein Sonderfall der mechanischen Grundelemente Masse, Feder und Reibungswiderstand in dem Sinne, dass sie Ausführungsformen letzterer in der Akustik darstellen. Diese Analogien lassen sich mit dem isomorphen Verhalten und der gleichen Topologie zwischen mechanischen, elektrischen und akustischen Zweipolen begründen und sollen im Folgenden kurz, rein qualitativ beschrieben werden:⁶

- **akustische Masselemente** werden durch kurze, beidseitig offene Rohre gebildet
- **akustische Federelemente** werden durch kurze, einseitig geschlossene Rohre gebildet
- **akustische Dämpfungselemente** werden durch meist dünne Ausströmröhrchen in Verbindung mit Hohlräumen gebildet

2.1.2 Helmholtz-Resonator

Der Helmholtz-Resonator wird aus einem Hohlraum und einer dem Hohlraum zugänglichen Öffnung gebildet. Die Luftsäule in der Öffnung und der Hohlraum selbst bilden ein schwingungsfähiges System, bei dem der Hohlraum die Feder und die Luftsäule in der Öffnung die Masse darstellen. Für eine kreisförmige Öffnung ergibt sich die Resonanzfrequenz aus

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi R^2}{(L + \frac{\pi}{2})V}} \quad (1)$$

wobei L die Länge und R den Radius der zylindrischen Luftsäule, c die Schallgeschwindigkeit und V das Volumen des Hohlraumes beschreiben.⁷

2.1.3 Gehörrichtige Bewertung von Schallpegeln

Die sogenannte gehörrichtige Bewertung von Schalldruckpegeln wird in der Messtechnik verwendet, um die Eigenschaften des Gehörs (welches den Schalldruck in Abhängigkeit der Frequenz unterschiedlich bewertet) zu berücksichtigen.⁸ Es gibt verschiedene durch Normen festgelegte Filterkurven, wobei hier die in der Messtechnik übliche A-Bewertung nach

⁶vgl. [Lerch et al., 2009]: S. 290-292

⁷[Lerch et al., 2009]: S. 294

⁸vgl. [Dickreiter, 2008a]: S. 7

IEC 651 und CIRR-1k Bewertung nach CCIR 468 kurz grafisch dargestellt sein sollen:

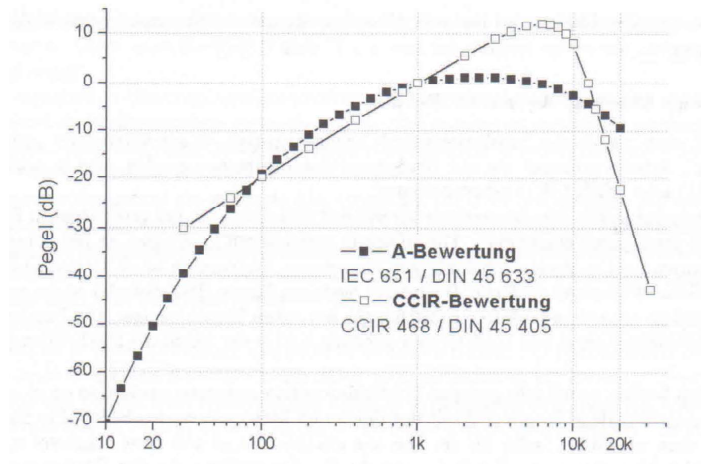


Abbildung 1: Bewertungskurven von Schallpegeln: A-Bewertung nach IEC 651 und CIRR-1k Bewertung nach CCIR 468⁹

2.1.4 Harmonische Verzerrungen: THD bzw. Klirrfaktor

Der Total Harmonic Distortion bzw. Klirrfaktor ist ein Maß für die harmonischen Verzerrungen eines Systems. Er beschreibt das Verhältnis der Spannungen U_n aller erzeugten Oberwellen (Harmonische der Frequenz $f_n = n \cdot f$ zur Gesamtausgangsspannung U_{ges} bei Anregung mit f :¹⁰

$$THD_{\text{ges}} = k_{\text{ges}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2}}{U_{\text{Ges}}} \quad (2)$$

Der THD bzw. Klirrfaktor n-ter Ordnung bezeichnet dabei das Verhältnis der einzelnen Oberwellen U_n zur Gesamtspannung U_{ges} :

$$k_n = U_n / U_{\text{ges}} \quad (3)$$

Der THD bzw. Klirrfaktor wird in der Regel prozentual dargestellt.

2.2 Mikrophonbau

In dieser Arbeit werden MEMS-Mikrofone, die als kapazitiver Schallwandler arbeiten, mit Elektretkondensatormikrofonen verglichen, sodass in diesem Unterkapitel hauptsächlich auf den Aufbau und die Funktion von Kondensatormikrofonen eingegangen wird. Des Weiteren basieren die Untersuchungen dieser Arbeit auf Druckempfängern; dass Empfängerprinzip des Druckgradienten wird folglich nicht erläutert.

⁹[Görne, 2007]: S. 154

¹⁰vgl. [Weinzierl, 2008]: S. 400

2.2.1 Definition: Mikrofon (Empfänger- und Wandlerprinzipien)

Mikrofone sind Schallwandler, die Schallenergie in elektrische Energie umwandeln; genauer: sie wandeln Schallschwingungen in elektrische Wechselspannungen um. Dies geschieht wie in Abbildung 2 dargestellt in zwei Stufen: zuerst wird eine sehr leichte, dünne elastisch eingespannte oder frei schwingende Membran als Schallempfänger zu erzwungenen Schwingungen angeregt (akustisch-mechanischer Wandler, beim Mikrofon inklusive der umgebenden Konstruktion als *Kapsel* bezeichnet), danach wandelt das an den Schallempfänger gekoppelte Wandlersystem die mechanischen Schwingungen in elektrische Schwingungen bzw. Wechselspannung um (elektromechanischer Wandler). Das Prinzip der Umwandlung der Schallschwingung in eine mechanische Schwingung wird als Empfängerprinzip und das der Wandlung von der mechanischen in die elektrische Schwingung als Wandlerprinzip beschrieben.¹¹

Das Empfängerprinzip gibt auch an, auf welche Schallfeldgröße die Membran des Mikrofons reagiert: auf den Schalldruck oder eine Schalldruckdifferenz (bzw. den Schalldruckgradient) zwischen Membranvorder- und rückseite. Das Empfängerprinzip hängt also davon ab, wie man die Membran dem Schallfeld aussetzt.¹²

Die möglichen Wandlerprinzipien lassen sich in zwei Kategorien einordnen: Elongationswandler geben eine der Auslenkung der Membran proportionale Wechselspannung ab (z.B. Kondensatormikrofone). Im Gegensatz dazu liefern Schnellewandler eine Ausgangsspannung, welche proportional zur Geschwindigkeit der Membran ist (z.B. Tauchspulenmikrofone).¹³ Diese zwei Wandlerprinzipien lassen sich elektromechanisch auf verschiedene Weisen umsetzen, so z.B. nach dem elektrostatischen Prinzip in Niederfrequenz (NF) Schaltung wie in gängigen Kondensatormikrofonen.

Da das Wandlerprinzip wesentlichen Einfluss auf die fundamentalen Übertragungseigenschaften hat, werden Mikrofone in erster Linie nach ihrem Wandlerprinzip klassifiziert.

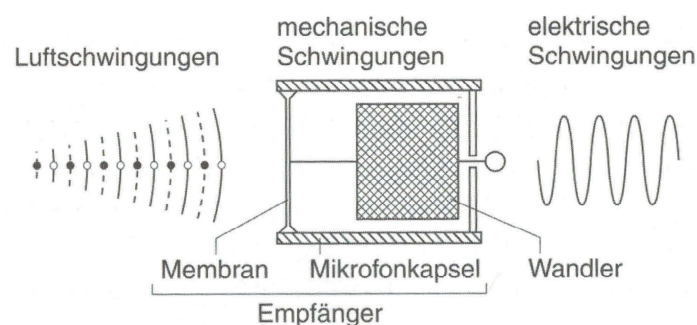


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau eines Mikrofons¹⁴

¹¹vgl. [Dickreiter, 2008c]: S. 56

¹²vgl. [Dickreiter, 2011]: S. 94

¹³vgl. [Boré und Peus, 2002]: S. 9

¹⁴[Dickreiter, 2011]: S. 95

2.2.2 Empfängerprinzip: Druckempfänger

Bei einem Druckempfänger schwingt die Membran als Teil einer abgeschlossenen luftdichten Kammer und wird somit nur durch Druckschwankungen der Schallwelle bewegt. Lediglich eine kleine wohldefinierte Öffnung im Gehäuse ist für den Ausgleich des atmosphärischen Drucks vorgesehen. Wie allgemein bekannt hat der Schalldruck keine Richtungsinformationen und somit haben Druckempfänger keine Richtwirkung: sie haben eine kugelförmige Richtcharakteristik. Die Membran bei Druckempfängern kann sehr hoch eingespannt werden.¹⁵

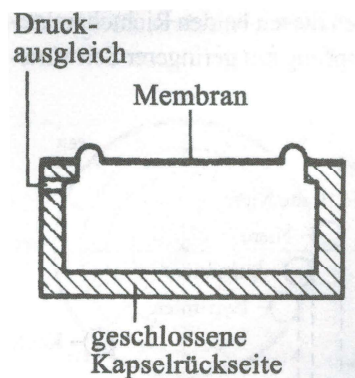


Abbildung 3: Prinzip des Aufbaus einer Kapsel eines Druckempfängers¹⁶

Schalldruckwandlung

Nach den Gesetzen der Physik gilt für den Druck p , welcher auf eine ebene Fläche der Größe A wirkt

$$p = \frac{F}{A} \quad (4)$$

wobei ist F die auf die Fläche senkrecht einwirkende Kraft beschreibt. Der Schalldruck p als skalare Wechselgröße wirkt nach diesem Grundgesetz auf die Mikrofonmembran eines Druckempfängers mit der Fläche A . Durch die Gesetzmäßigkeiten der nachgiebigen Membran als mechanisch wirksame Feder lässt sich nach dem Hookeschen Gesetz für lineare Federn und kleine Auslenkungen s schließen:

$$p \propto s \quad (5)$$

Diese Annahme kann für die Größenordnungen der Membranbewegung im Mikrofongebiet, welche bei einem Schalldruckpegel von $L_p = 94$ dB etwa $s = 10$ nm entspricht¹⁷ als hinreichend klein und somit im linearen Federbereich des Membranmaterials angenommen werden.

¹⁵vgl. [Dickreiter, 2011]: S. 94

¹⁶[Dickreiter, 2008c]: S. 128

¹⁷vgl. [Görne, 2007]: S. 46

Druckempfänger als Feder-Masse-Schwinger

Die unter Abschnitt 2.2.2 beschriebene lineare Abhängigkeit zwischen dem auf die Membran wirkenden Schalldruck und deren Auslenkung alleine beachtet nicht die Abhängigkeiten des einfachen gedämpften Feder-Masse-Systems der aufgehängten Membran bzw. der Membran und im umgebenden Kapselgehäuse. Es bildet sich eine Resonanzfrequenz f_{reso} aus bis zu dem die Schwingungsamplitude ansteigt und darüber abfällt.¹⁸ Für die Resonanzfrequenz gilt unter Vernachlässigung der Reibung in erster Näherung¹⁹:

$$f_{\text{reso}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{mn}} \quad (6)$$

mit m die Gesamtmasse und n die Gesamtnachgiebigkeit des schwingungsfähigen Systems darstellen.

Diese Resonanz führt ohne Resonanzdämpfung im Resonanzfall zu einer Zerstörung des schwingungsfähigen Systems und somit im Fall eines Mikrofons zur Zerstörung der Membran. Aus diesem Grund und um einen möglichst linearen Frequenzgang und ein gutes Impulsverhalten des Mikrofons zu erreichen, wird die Resonanz ausreichend gedämpft.

Materialeigenschaften der Mikrofonmembran

Die Membran eines schwingungsfähigen Systems wird durch folgende fundamentale Materialkonstanten definiert: die Dichte ρ und das Elastizitätsmodul E .²⁰

Die Dichte des Materials bestimmt zusammen mit den Abmessungen bzw. dem Volumen der Membran deren Masse m nach der Vorschrift $m = \rho V$, wobei V für das Volumen steht. Die Einheit der Dichte ρ ist kg/m^3 . Das Elastizitätsmodul $E = \sigma/\epsilon$ beschreibt den Zusammenhang zwischen der mechanischen Spannung (Normalspannung, nicht Schubspannung) $\sigma = F/A$ und der Dehnung $\epsilon = \Delta l/l_0$, wobei $\Delta l = l - l_0$ die Längenänderung zur ursprünglichen Länge l_0 bei der Verformung eines festen Körpers bei linear-elastischem Verhalten ist. Die Einheit des Elastizitätsmoduls E ist $\text{N}/\text{m}^2 = \text{Pa}$.

Die Mikrofonmembran sollte sehr leicht und damit dünn sein, um leicht zum Schwingen angeregt werden zu können und damit sehr empfindlich zu sein; dieser Zusammenhang lässt sich physikalisch durch die Masseträgheit der Membran beschreiben. Eine Membran geringer Masseträgheit kann folglich sehr exakt kurzen Impulsen und Einschwingvorgängen folgen, die wie [Peus, 1976] beschreibt sehr wichtig für den Klang eines Mikrofons sind. Messbar ist das Verhalten bei kurzen definierten Impulsen mit der ebenfalls von [Peus, 1976] beschriebenen Impulsmessung. Des Weiteren muss die Membran jedoch eine ausreichende Steifigkeit besitzen, um auch hohen Schalldrücken und damit Membranauslenkungen ausgesetzt werden zu können ohne in einen Bereich zu kommen, der zu hohen Verzerrungen führt. Die Größe der Membran und damit die Wandlerfläche steht im direkten Zusammenhang mit der Stärke des Schalldrucks, der auf die Membran wirkt und sie zum Schwingen bringen kann, damit wird

¹⁸vgl. [Weinzierl, 2008]: S. 317

¹⁹vgl. [Veit, 2012]: S. 22

²⁰vgl. [Petersen, 1982]

sofort klar, dass eine kleinere Membranfläche weniger Schalldruck in elektrische Energie wandeln kann und damit unempfindlicher wird; der Übertragungsfaktor des Mikrofons sinkt. Bei Kondensatormikrofonen besteht die Membran in der Regel aus polymeren Kunststoffen (z.B. Mylar), da dieser sehr gute mechanische Eigenschaften besitzt.

2.2.3 Wandlerprinzip: elektrostatisch, NF-Schaltung

Der elektrostatische Wandler besteht aus einer leitfähigen Membran und einer starren Gegenelektrode, die durch einen Luftspalt getrennt sind und somit einen Kondensator bilden, dessen Kapazität typischerweise bei 10 bis 100 pF liegt. Die Membranschwingung führt zu einer Veränderung der Kapazität des Kondensators und steuert dadurch das Ausgangssignal.²¹ Das Ausgangssignal wird also niederfrequent auf die Gleichspannung moduliert und besitzt daher die Bezeichnung NF-Schaltung im Gegensatz zur hier nicht behandelten HF-Schaltung. Der elektrostatische Wandler ist ein sogenannter Steuerwandler, da der Kondensator ohne Zuführen von Energie kein elektrisches Signal erzeugen kann. Er benötigt eine Kapselvorspannung U_0 in Bereich von typischerweise 60 bis 200 V, welche durch eine externe Gleichspannung (Polarisationsspannung) gespeist wird. Damit bei einer Kapazitätsänderung nicht sofort ein Ausgleichsstrom fließt und die Spannung über dem Kondensator konstant bleibt, befindet sich parallel zur Wandlerkapazität ein sehr großer Ladewiderstand R_L (typischerweise 100 M Ω bis 1 G Ω). Dieser ist so dimensioniert, dass bei langsam in der Praxis auftretenden Kapazitätsänderungen noch kein Ausgleichsstrom fließt; dabei bilden Kondensator und Ladewiderstand einen RC -Hochpass und werden meist so aufeinander abgestimmt, dass eine untere Grenzfrequenz von 20 Hz als untere Grenze des Hörbereichs erreicht wird.

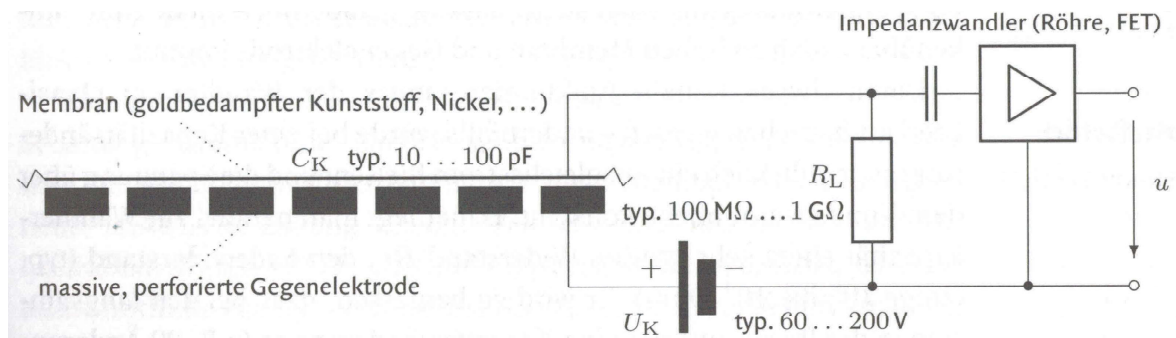
Impedanzwandler

Der NF-Kondensatorwandler mit seinem sehr großen Ladewiderstand stellt mit einer Quellimpedanz im Gigaohm-Bereich eine sehr hochohmige Quelle dar. Das abgegebene Signal eignet sich also nicht zur Signalübertragung über längere Strecken, da es in Verbindung mit der Kabelkapazität zu starken Dämpfungen des Pegels und der Höhen kommen würde. Es wird eine Herabsetzung des Ausgangswiderstands des elektrostatischen Wandlers benötigt, die mit Hilfe des häufig fehlerhaft als Vorverstärker bezeichneten Impedanzwandlers im weiteren Signalverlauf herabgesetzt wird.²²

Impedanzwandler besitzen folgende Eigenschaften: Sie liefern eine Spannungsverstärkung von etwa 1, eine große Stromverstärkung und besitzen einen sehr großen Eingangswiderstand und einen sehr großen Ausgangswiderstand. Umgesetzt werden Impedanzwandler mit Feldeffekttransistoren (FETs), Bipolartransistoren oder Elektronenröhren (Trioden, Pentoden), wobei bei Mikrofonen nur FETs oder Elektronenröhren für diesen Zweck zum Einsatz kommen.

²¹vgl. [Lerch et al., 2009]: S. 336

²²vgl. [Görne, 2015]: S. 261

Abbildung 4: Schema des elektrostatischen Wandlers in NF-Schaltungs²³

Empfängergesetz des elektrostatischen Wandlers

Bei der Herleitung des Empfängergesetzes (Beschreibung der mechanisch-elektrischen Umwandlung) für den elektrostatischen Wandler nach [Lerch et al., 2009], geht man davon aus, dass der Wandler im Leerlauf betrieben wird und damit die Elektronenladung Q_0 auf dem Kondensator konstant ist. Es kommt aufgrund des hohen Ladewiderstands R_L und des hohen Eingangswiderstands des Impedanzwandlers nicht zu einem Abfließen der Ladung. Die Wandlerkapazität C des Kondensators ist nach den bekannten Gesetzen für einen Plattenkondensator durch

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{s_0 + s} \quad (7)$$

gegeben, wobei ϵ_0 die elektrische Feldkonstante, A die Fläche des Wandlers bzw. der Kondensatorplatten, s_0 den Ruhezustand Membran-Gegenelektrode und s die Auslenkung der Membran darstellt. Wie bereits erläutert ist die Elektronenladung auf den Kondensator konstant, sodass für die am Mikrofon abfallende Gesamtspannung folgt

$$U = U_0 + u = \frac{Q_0}{C} \quad (8)$$

Setzt man nun C aus Gl. (7) in (8) ein, erhält man

$$C = \frac{Q_0(s_0 + s)}{\epsilon_0 A} \quad (9)$$

und folglich ergibt sich für die Leerlauf-Ausgangsspannung u des Mikrofon

$$u = \frac{Q_0 s}{\epsilon_0 A} = E_0 s \quad (10)$$

wobei $E_0 = Q_0/\epsilon_0 A$ die elektrische Feldstärke im Luftspalt des Mikrofon angibt. Dies zeigt, dass der NF-Kondensatorwandler als Elongationswandler eine FREQUENZUNABHÄNGIGE AUSGANGSSPANNUNG PROPORTIONAL ZUR MEMBRANAUSLENKUNG liefert. Dabei ist unbedingt zu beachten, dass diese Frequenzunabhängigkeit lediglich für den elektroakustischen Wandler nach dem elektrostatischen Wandlungsprinzip an sich gilt. Etwaige Frequenzabhängigkeiten

²³[Görne, 2015]: S. 259

in nachfolgender Elektronik wie dem Impedanzwandler und anderen signalkonditionierenden oder -verstärkenden Bauteilen sind prinzipiell möglich, sollen an dieser Stelle jedoch aufgrund zu hoher Komplexität nicht betrachtet werden, da es den Umfang dieser Arbeit übersteigen würde.

2.2.4 Technische Daten

Die Beschreibungen der Eigenschaften von Mikrofonen erfolgt nach dem 4. Teil der Norm für elektroakustische Geräte, der [IEC 60268-4, 2014].²⁴

Der **Übertragungsfaktor (oder auch -Koeffizient) M** wird von vielen Herstellern und Anwendern auch als Empfindlichkeit bezeichnet und gibt das Verhältnis des effektiven elektrischen Ausgangsspannung und des Schalldrucks am Ort des Mikrofons in mV/Pa an. Gemessen wird dabei in einem reflexionsarmen Raum mit einem Sinuston der Frequenz $f=1$ kHz und einem Schalldruck von 1 Pa = 94 dB SPL. Dabei wird in der Regel der sogenannte Betriebs-Übertragungsfaktor anstatt des im nächsten Abschnitt beschriebenen Leerlauf-Übertragungsfaktors angegeben, welcher laut Norm mit einem Abschluss gleich der fünfachen Nennimpedanz (vergleichbar mit dem Anschluss des Mikrofons an ein typischen Mikrofonvorverstärker) gemessen wird. Eine weitere Unterscheidung wird nach Freifeld-, Diffusfeld-, Nahbesprechungs- und Druckübertragungsfaktor getätigt. In der Regel wird mit dem angegebenen Übertragungsfaktor der Freifeldübertragungsfaktor im ungestörten Freifeld einer ebenen Welle angegeben (Messung im Abstand von einem Meter), für den eine Freifeldkalibrierung des zur Messung eingesetzten Bezugsmikrofons nötig ist. Da der Betriebsübertragungsfaktor am Ausgang des Mikrofons gemessen wird, beinhaltet sie den Einfluss des integrierten Impedanzwandlers bzw. Vorverstärkers.

Im nicht-europäischen Raum ist eine Angabe des gleichwertigen **Übertragungsmaßes L_M** üblich, welcher das Verhältnis des Übertragungsfaktors M zum Bezugsübertragungsfaktor $M_R = 1$ V/Pa darstellt und folgendermaßen gebildet wird

$$L_M = 20 \lg \frac{M}{M_R} \quad (11)$$

Die **Leerlaufübertragungsfaktor M_0** gibt das Verhältnis der vom elektroakustischen Wandler erzeugten elektrischen Spannung und dem Schalldruck auf das Wandlerelement an. Im Gegensatz zum Betriebsübertragungsfaktor M ist der Einfluss des Impedanzwandlers bzw. Vorverstärkers nicht enthalten. Der Leerlaufübertragungsfaktor gilt daher für den Fall offener Elektroden, bei dem der Wandler durch keine zusätzliche Beschaltung am Ausgang (kapazitiv) belastet wird; er muss also an den offenen Mikrofonklemmen gemessen werden.

Der **Frequenzgang** bezeichnet die Übertragungsfunktion eines Mikrofons und gibt wie in [IEC 60268-4] geschrieben ist „das Verhältnis der Ausgangsspannung als Funktion der Frequenz eines sinusförmigen Signals zur Ausgangsspannung bei einer festgelegten Frequenz

²⁴[Dickreiter, 2008c]

(oder zur mittleren Ausgangsspannung über ein schmales Frequenzband), ausgedrückt in Dezibel und bei konstantem Schalldruck und festgelegtem Einfallswinkel“ an. Der Frequenzgang wird auf die Ausgangsspannung bei $f = 1$ kHz und somit den dort geltenden Übertragungsfaktor bezogen. Auch der Frequenzgang wird - falls nicht anders angegeben - unter Freifeldbedingungen im Abstand von einem Meter gemessen und bezieht sich somit auf eine senkrecht zur Bezugsachse ausbreitende ebene Welle. In dieser Arbeit ist mit der Begrifflichkeit Frequenzgang immer der Amplituden- bzw. Betragsfrequenzgang gemeint, der Phasengang wird nicht weiter beachtet.

Der **Übertragungsbereich** gibt den nutzbaren Frequenzbereich des Mikrofons an und kann direkt im Frequenzgangprotokoll abgelesen werden. Die Grenzen des Übertragungsbereichs sind nach der Studionorm definiert und sind diejenigen Frequenzen, bei denen der Ausgangspegel des Mikrofons gegenüber dem Pegel bei 1 kHz um 3 dB gefallen ist (-3 dB-Übertragungsbereich). Der *Übertragungsbereich* ist mit der *Bandbreite* des Mikrofons gleichzusetzen.

Die **Eigenstörspannung** ist die am Mikrofonausgang (bzw. an der Nennabschlussimpedanz) gemessene Stör- bzw. Rauschspannung, wenn kein Schall auf das Mikrofon trifft und dieses auch sonst keinem elektrischen oder magnetischen Störfeld ausgesetzt ist.²⁵ Dieser Begriff wird so in bei der Beschreibung von Mikrofonen kaum verwendet. Das Rauschverhalten ist ein sehr kritischer Punkt bei der Einordnung der Qualität von Mikrofonen, da das Mikrofonsignal und somit auch das Mikrofonrauschen sehr weit verstärkt wird.

Als **Geräuschspannung** U_{Ger} wird die physiologisch bewertete Eigenstörspannung angegeben. Der gemessene Effektivwert wird nach [IEC 61672-1] mit einen A-Filter bewertet. Daneben sieht die [IEC 60268-1] noch die Bewertung des Quasi-Spitzenwerts bzw. Q-Peak mittels CCIR 468-3 bzw. CCIR-1k Filter vor. In der Regel sind beide Angaben aufgeführt. Durch die Bewertungsfilter wird die größere subjektive Störwirkung von Frequenzen über 1 kHz berücksichtigt.

Der **Ersatzgeräuschpegel** L_{Ger} (**ENL - Equivalent Noise Level**) ist das logarithmierte Verhältnis aus Geräuschspannung und der Spannung, die ein rauschfreies Mikrofon mit der Empfindlichkeit M_0 für einen Referenzschalldruck von $p_0 = 2 \cdot 10^5$ Pa liefern würde²⁶:

$$L_{\text{Ersatz}} = 20 \log \frac{U_{\text{Ger}}}{M_0 p_0} \quad (12)$$

Es ist noch darauf hinzuweisen, dass mit A-Filter bewertete Pegel um 10 bis 13 dB niedriger liegen als die der physiologisch richtigeren CCIR-Bewertung. Anstelle des Ersatzgeräuschpegel wird umgangssprachlich oft auch der Begriff „Ersatzlautstärke“ verwendet.

Der **Geräuschpegelabstand** SNR ist das logarithmierte Verhältnis der Ausgangsspannung des Mikrofons bei einem Schalldruck von 1 Pa und der Geräuschspannung U_{Ger} . Als Bezugswert für den SNR wird die A-bewertete Geräuschspannung verwendet.

$$SNR = 20 \log \frac{M_0 \cdot 1Pa}{U_{\text{Ger}}} \quad (13)$$

²⁵vgl. [Dickreiter, 2008c]: S. 121

²⁶vgl. [Weinzierl, 2008]: S. 402

Der **Grenschalldruckpegel** gibt in der Regel an, bis zu welchem Schallpegel ein Klirrfaktor von nicht mehr als 0,5 % am Mikrofonausgang (meist inkl. Vorverstärker) garantiert werden kann.²⁷ Er wird jedoch je nach Mikrofonhersteller auch teilweise erst bei 1 % gemessen. Die Differenz aus Grenschalldruckpegel und Ersatzgeräuschpegel ergibt den Dynamikbereich des Mikrofons.

²⁷vgl. [Dickreiter, 2008c]: S. 123

3 Mikrofontechnologien in Miniaturbauweise

Das 3. Kapitel befasst sich mit den grundlegenden Herstellungsverfahren und der Funktion von MEMS- und Elektretmikrofonen, welche prinzipbedingt in Miniaturgröße vorliegen bzw. in miniaturisierter Größe gebaut werden können.

3.1 MEMS-Mikrofone

3.1.1 Definition: mikroelektromechanisches System

Ein mikroelektromechanisches System (MEMS) bezeichnet ein mechatronischen System mit dreidimensionalen Strukturen im Mikrometerbereich. Sie vereinen Logikelemente und mikromechanische Strukturen in einem Chip und können so mechanische und elektrische Informationen trotz geringster Baugröße verarbeiten.²⁸ Dabei wurde diese Mikromechatronik entscheidend durch Entwicklungen der Mikroelektronik unterstützt, da Fertigungstechnologien aus eben diesem Bereich auch in mikromechanischen Bereichen Anwendung fanden.²⁹ Die meisten Bauelemente dieser Bauart sind Sensoren (z.B. Drucksensoren bei MEMS-Mikrofonen) und Aktoren, wobei auch Oszillatoren und Filter gefertigt werden können. Silizium stellt das weitverbreitete Material für die Fertigung von MEMS dar. Dank gleicher Herstellungsverfahren wie für Halbleiterbauteile lassen sich MEMS günstig und in Massen fertigen.³⁰

3.1.2 Herstellungsverfahren

Die Herstellung von mikroelektromechanischen Systemen baut auf Herstellungsverfahren der Silizium- bzw. Halbleitertechnologie auf. Im Folgenden werden zunächst die grundlegenden Schritte bei der Herstellung von zwei- und dreidimensionalen Strukturen in Silizium dargestellt. Für die einwandfreie Funktion von Halbleiterbauteilen wie Transistoren ist die Reinheit der verwendeten Halbleiterkristalle von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund wurde in den ersten Transistoren noch Germanium-Kristalle wegen ihrer einfacheren Herstellungsmöglichkeiten eingesetzt, ehe sich Mitte der 1960er Jahre Silizium als Substrat durchsetzte. Ausschlaggebend dafür waren vor allem die hohe Verfügbarkeit und die hervorragenden elektrischen und chemischen Eigenschaften sowie einfachen Herstellungsverfahren von Siliziumdioxid SiO_2 , welches zur Isolation und Dotierungsmaskierung (siehe Abschnitt 3.1.2) benutzt wird.³¹

Grundlegende Prozessschritte der Siliziumtechnologie

Die Prozesse der Siliziumplanartechnologie bilden die Grundlage für die Fertigung von mikrosystemtechnischen Bauelementen. In Letzterer gibt es jedoch nicht nur planare, sondern

²⁸vgl. [Schnabel, 2017]

²⁹vgl. [Büttgenbach, 2016]: S. 4

³⁰vgl. [Schnabel, 2017]

³¹vgl. [Büttgenbach, 2016]: S. 14

wie im Falle von MEMS-Mikrofonen auch dreidimensionale Strukturen, sodass im Weiteren allgemeiner von Siliziumtechnologie gesprochen wird. Der Begriff Silizium-Wafer wird im Zusammenhang der Siliziumtechnologien oft verwendet und meint die entsprechenden Silizium-Schichten.

Abbildung 5 stellt den grundlegenden Prozess der letztgenannten Technologie und ihrer Fertigungsschritte dar und kann folgendermaßen beschrieben werden³²: (a) Grundlage für den Prozess bildet ein gereinigtes Silizium-Substrat, auf das (b) in einem additiven Prozessschritt eine sogenannte Maskierschicht für den Ätzprozess aufgebracht wird. Im dritten Schritt (c) folgt eine lichtempfindliche Schicht, der sogenannte Fotoresist, welcher später durch Belichten mit UV-Licht über einer Maske die gewünschte Strukturierung des späteren Ätzprozesses im Substrat bestimmt. Durch eine Entwicklerlösung werden nun die Bereiche (abhängig davon, ob ein positives oder negatives Fotoresist benutzt wurde) herausgelöst (e). Die in (b) erzeugte Dünnschicht wird nun in (f) mittels Ätzen durch Übertragen der Fotoresiststruktur strukturiert. Nach Entfernen des Fotoresists (g) kann nun die gewünschte Struktur in das Substrat mittels Ätzen übertragen und die Dünnschicht wiederum entfernt werden (i). Neben dem Herausätzen der gewünschten Bereiche aus dem Substrat ist auf diese Art und Weise auch ein Dotieren des Substrats in den nicht durch die Dünnschicht geschützten Bereichen möglich, welches durch Eindiffundieren oder Implantation von Dotieratomen erfolgt. Dieser Prozess bildet die Grundlage der CMOS-Technologie und lässt Strukturen wie in Abbildung 6 entstehen.

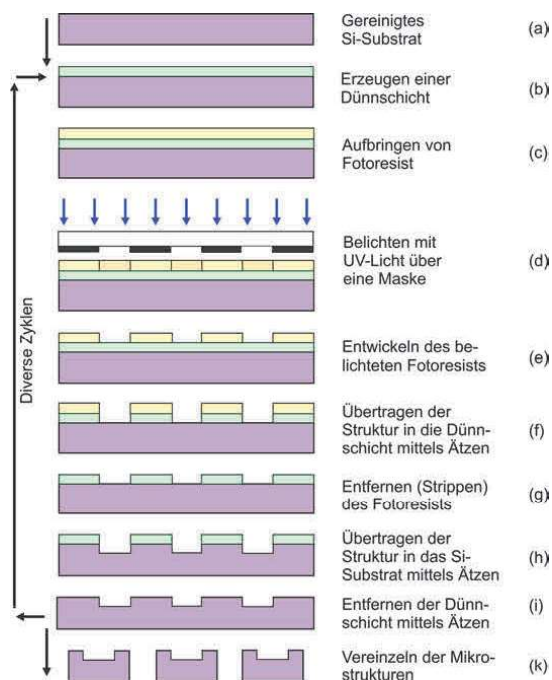


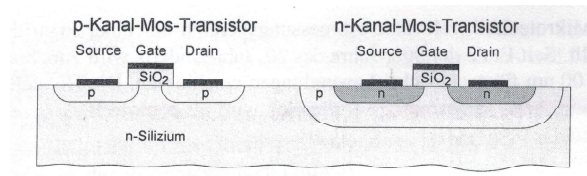
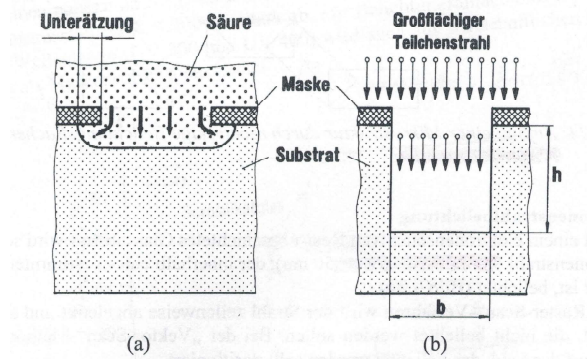
Abbildung 5: Grundsätzlicher Fertigungsablauf der Siliziumtechnologie³³

³²vgl. [Büttgenbach, 2016]: S. 17

³³[Büttgenbach, 2016]: S. 17

³⁴[Schlaak, 2007]: S. 4

³⁵[Schlaak, 2007]: S. 30

Abbildung 6: Grundstruktur der CMOS-Technologie³⁴Abbildung 7: Querschnitt beim isotropen (a) und anisotropen (b) Ätzprozess³⁵

Der beschriebene Prozess stellt auch die Grundlagen der **Volumenmikromechanik** bzw. **Bulkmikromechanik (Substraktivtechnik)** dar, da es durch kontrolliertes Heraus- bzw. Freiätzen und durch Unterätzen mit Hilfe des anisotropen Ätzens zu freistehenden Membranen bzw. genereller kontrolliert hergestellten Hohlräumen kommt.

Der Strukturierungsprozess ist neben der Struktur des Fotoresists also abhängig von der Art des Ätzprozesses. Es werden zwei Ätzprozesse unterschieden: das **isotrope und anisotrope Ätzen**. Isotrop bedeutet dabei, dass der Materialabtrag in allen Richtungen mit gleicher Ätzrate fortschreitet, wobei dabei eine seitliche Unterätzung der Maskierungsschicht erfolgt, die annähernd der Ätztiefe entspricht (siehe Abbildung 7 (a)). Somit sind auf diese Weise schmale und tiefe Ätzgräben nicht herstellbar, da die Breite der Ätzstruktur proportional zur Ätztiefe zunimmt. Bei einem rein anisotropen Ätzprozess mit dem sogenannten Stahlverfahren hingegen, entstehen senkrechte Seitenwände, sodass die Breite der Ätzstruktur b unabhängig von der Ätztiefe h ist (siehe Abbildung 7 (b)).³⁶

Ein weiterer Prozess der Herstellung freistehender Membranen wird mit der **Oberflächenmikromechanik (Additivtechnik)** erreicht, bei der im Gegensatz zur Volumenmechanik (Strukturierung des Substrates an sich) zuerst Mikrostrukturen auf der Oberfläche des Substrates erzeugt werden. Sie entstand in den 1980er Jahren bei intensiven Untersuchungen zur Herstellung frei beweglicher Mikrostrukturen³⁷ und ist auch heutzutage in diesem Bereich der üblicherweise durchgeführte Prozess. Abbildung 8 stellt das Verfahren anschaulich dar³⁸: (a) Zuerst wird auf der Oberseite des Substrats die sogenannte Opferschicht abgeschieden und mit den üblichen bereits beschriebenen Prozessen strukturiert (b). Sie bestimmt den Abstand und die Struktur der Funktionsschicht, die im nächsten Schritt abgeschieden wird (c). Auch diese Funktionsschicht kann nun noch weiter strukturiert werden (d) und im nächsten Schritt durch selektives Ätzen der Opferschicht freigestellt werden (e). Somit wird die Funktionsschicht frei

³⁶vgl. [Schlaak, 2007]: S. 29-30

³⁷vgl. [Büttgenbach, 2016]: S. 65

³⁸vgl. [Büttgenbach, 2016]: S. 65

beweglich und ist an den Seiten weiterhin fest mit dem Substrat verankert. Damit das **selektive Ätzen** zum Freistellen der Mikrostrukturen funktioniert, wird vorzugsweise eine Materialkombination aus Silizium als Substrat, Siliziumdioxid als Opferschichtmaterial und polykristallinem Silizium als Funktionsmaterial genutzt, denn mit Ätzlösungen auf der Basis von Fluorwasserstoffsäure (HF) kann Siliziumdioxid selektiv gegenüber Silizium geätzt werden. Mithilfe mehrerer Opfer- und Funktionsschichten können nach diesem Prozess komplexe und mehrschichtige frei bewegliche Mikrostrukturen erzeugt werden.

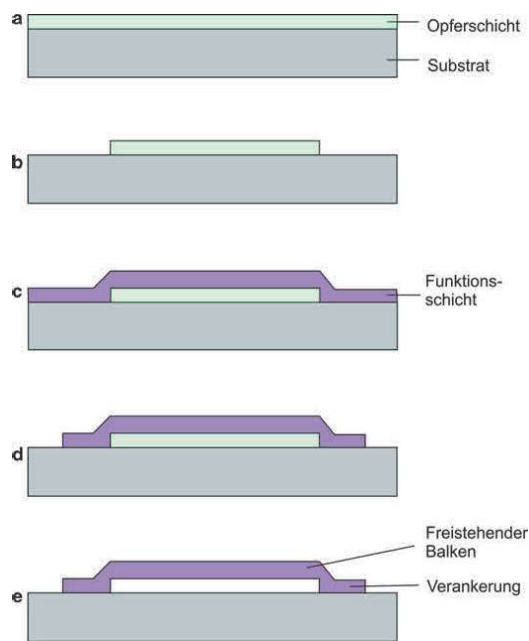


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Prozessschritte der Oberflächenmikromechanik (Beispiel: freistehender Balken)³⁹

3.1.3 Aufbau und Eigenschaften MEMS-Mikrofon

MEMS-Mikrofone setzen sich aus speziell für Mikrofone entwickelten Drucksensoren, welche als elektroakustische Wandler fungieren und darauffolgenden signalverarbeitenden Application Specific Integrated Circuitry (ASICs) zusammen. Die ASICs dienen dabei sowohl als der für Kondensatormikrofone typische Impedanzwandler, jedoch verstärken sie auch das Ausgangssignal des Sensors. Ebenso liefern sie die für das kapazitive Wandlerprinzip notwendige Polarisationsspannung. Dabei sind nicht selten komplexe elektrische Schaltungen im Halbleitersubstrat zu finden, die das Signal konditionieren und aufarbeiten. Welche Schritte genau in diesem ASIC stattfinden, sind herstellenspezifisch. Da MEMS-Mikrofone in gleichen Fertigungsprozessen wie Halbleiter hergestellt werden, werden sie wie die meisten gängigen Bauteile dieser Kategorie auch als surface mount device ausgeführt und kommen folglich auf Leiterplatten aufgebracht zur Verwendung. Neben den häufig anzufindenden Bauformen, bei denen die Impedanzwandlung und Signalverstärkung in einem dem eigentlichen Drucksensors nebenbefindlichen ASIC durchgeführt wird, gibt es auch Bauformen und Entwicklungen, die das MEMS-Mikrofon und dessen Membran direkt in einen CMOS-Halbleiter integrieren.⁴⁰ So

³⁹[Büttgenbach, 2016]: S. 66

⁴⁰vgl. [Neumann und Gabriel, 2003]

findet die elektroakustische Schallwandlung, die Impedanzwandlung und Signalverstärkung direkt auf dem gleichen Substrat statt.

Mögliche Aufbauten In Abbildung 9 sind schematisch beide möglichen Aufbauten von MEMS-Mikrofonen dargestellt. Es wird in erster Linie unterschieden, ob es sich um ein sogenanntes *top port* oder *bottom port* Mikrofon handelt. Dies wird anhand der Lage der Schalleinlassöffnung definiert, welche sich entweder auf der Oberseite oder Unterseite des Mikrofongehäuses befindet. Dadurch wird auch festgelegt, ob das Mikrofon ober- oder unterhalb der Mikrofonplatine für Schall empfindlich ist, da bei *bottom port* Mikrofonen ein Loch in der Leiterplatte einen Tunnel zur Schalleinlassöffnung bilden muss. Bauartbedingt kommt es bei den MEMS-Mikrofonen in *top port* bzw. *bottom port* Bauweise zu unterschiedlich ausgeprägten akustischen Hohlräumen vor bzw. hinter der Membran/dem Sensor (vgl. Abbildung 9), welche Einfluss auf die akustische Performance der Bauteile haben.

Drucksensor Abbildung 10 zeigt den schematischen Aufbau eines Drucksensors in einem MEMS-Mikrofon, das als elektrostatischer Wandler arbeitet. Man erkennt als wichtigste Komponenten die Membran und die gelochte Gegenelektrode. Eine besonders elegante Fertigungsmöglichkeit der Oberflächenmikromechanik bietet die Fertigung eines solchen Sensors aus einem sogenannten Silicon-on-Insulator (SOI)-Wafer als Ausgangsmaterial.⁴¹ SOI-Wafer bestehen aus einem Basis-Silizium-Wafer, einer darauf befindlichen Schicht eines elektrisch isolierenden Materials (häufig Siliziumdioxid), gefolgt von einer qualitativ hochwertigen Schicht definierter Dicke aus einkristallinem Silizium. In der Herstellung kann so die obere Schicht des SOI-Wafers aus einkristallinem Silizium als Gegenelektrode dienen, in die die benötigten Öffnungen bzw. Gruben (sogenannte Sacklöcher) mit Hilfe definierter anisotroper Ätzprozesse geätzt werden können. Über der Gegenelektrode wird dann eine Schicht Siliziumdioxid als Abstandshalter zur darüber liegenden Membran aus polykristallinem Silizium abgeschieden. Nach der elektrischen Kontaktierung der Membran und Gegenelektrode wird die Membran dann durch selektives Ätzen mit Flußsäure (HF), welche Siliziumoxid ätzt, Silizium jedoch nicht, von der Rückseite her freigeätzt. Dabei wird das Substrat als die ganz unten befindliche Schicht des Aufbaus vorher zuerst anisotrop freigeätzt, bevor die zeitlich wohl definierte isotrope und selektive Ätzung des Siliziumoxids mit Flußsäure stattfindet. Es bildet sich so der Freiraum zwischen Gegenelektrode und Membran, jedoch die Abstandshalter links und rechts des Hohlraums bleiben aufgrund der zeitlichen Begrenzung des Ätzprozesses noch bestehen. Die elektrische Kontaktierung der Membran und Gegenelektrode im Drucksensor findet per Bonddrähten zum daneben befindlichen ASIC statt, der die Polarisationsspannung liefert.

Membran Die Membran eines MEMS-Mikrofons wird entweder nach den Prozessen der Oberflächenmikromechanik als frei bewegliche Funktionsschicht aus polykristallinem Silizium geätzt oder es findet der bereits beschriebene Ätzprozess aus einem SOI-Wafer statt.

⁴¹[Büttgenbach, 2016]: S. 72-73

⁴²[STMICROELECTRONICS,]: S. 6-7

⁴³[Büttgenbach, 2016]: S. 72

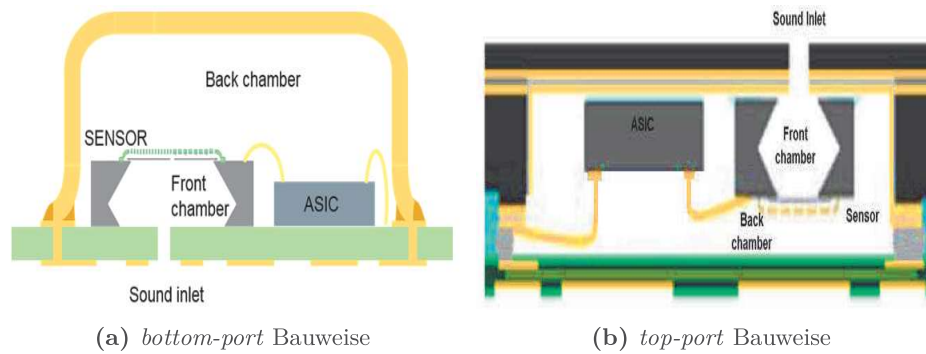


Abbildung 9: Schematischer Aufbau eines MEMS-Mikrofon⁴²

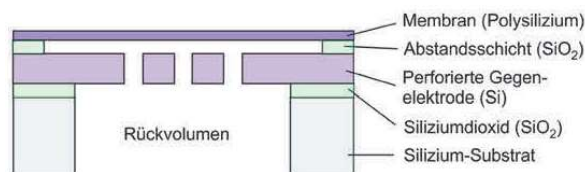


Abbildung 10: Schematischer Aufbau des Sensors in einem MEMS-Mikrofon⁴³

Es ist zu beachten, dass bei unterschiedlichen Herstellern auch andere Technologien und Materialien zum Einsatz kommen.⁴⁴ So sind verschiedene Membranmaterialien, -dicken und -durchmesser bei unterschiedlichen Herstellern anzutreffen. Des Weiteren gibt es große Unterschiede im Design und der Herstellung der Membranaufhängung, welche zur Steigerung der Empfindlichkeit die Membran durch federnde Prozesse deutlich weicher aufhängen und damit trotz geringer Membranfläche und geringer Polarisationsspannung eine ausreichende Empfindlichkeit erreichen.

Die Materialeigenschaften von Silizium werden nach [Petersen, 1982] folgendermaßen charakterisiert:

- Silizium besitzt eine hervorragende Kristallstruktur und ist in hoher Reinheit verfügbar. Diese Eigenschaften geben Silizium hervorragende elektrische Eigenschaften als Halbleiter und sind auch auf die mechanischen übertragbar: Es kann eine gleichbleibende Materialstruktur mit gleichbleibenden Eigenschaften über eine große Fläche gewährleistet werden, was die Zuverlässigkeit und die Wiederkehrbarkeit für mehrere Exemplare gleicher Herstellungsart erhöht.
- Sogenannte Dünnschicht- und die bereits erläuterten photolithographischen Herstellungsprozesse machen die Herstellung einer sehr hohen Vielfalt an extrem kleinen, hochfeinen Strukturen in hoher Perfektion möglich. Durch Batch-Prozesse können diese feinen Strukturen wiederum in sehr großen Mengen hergestellt werden.
- Fundamentale Materialeigenschaften von einkristallinem Silizium lassen sich beschreiben durch folgende Kenndaten aus Dichte $\rho = 2,3 \text{ g/cm}^3$ und Elastizitätsmodul $E = 1 \text{ kPa}$

⁴⁴vgl. [Büttgenbach, 2016]: S.68

3.2 Elektret-Mikrofone

Elektretkondensatormikrofone (ECMs) unterscheiden sich in ihrem grundsätzlichen Aufbau nicht von sogenannten Echkondensatormikrofonen in NF-Schaltung. Der prinzipielle Unterschied liegt in der Dauerpolarisation des kapazitiven Wandlerelements, sodass keine Spannung zum Laden des Kondensators benötigt wird. Damit fällt der komplexe Teil der Ladeelektronik weg, sodass Elektretmikrofone unproblematisch in kleineren Gehäusedimensionen gebaut werden können. Zur weiterhin notwendigen Impedanzwandlung des hochohmigen Wandler-signals kommen Feldeffekttransistors (FETs) bzw. zumeist Sperrschicht-Feldeffekttransistors (JFETs) in Sourcefolger-Schaltung zum Einsatz. Diese Impedanzwandler benötigen lediglich eine geringe Versorgungsspannung.

Die Dauerpolarisation des kapazitiven Wandlerelements wird mit Hilfe eines Elektrets realisiert. Elektrete sind Stoffe, die elektrisch polarisiert bleiben, nachdem sie einem starken elektrischen Feld ausgesetzt worden sind. Sie fungieren somit bei Anwendung im Kondensatormikrofon als permanent geladenes Dielektrikum, welches ohne eine benötigte Ladespannung ein elektrisches Feld im Luftspalt zwischen Membran und Gegenelektrode erzeugt. Dabei kommen in modernen Elektretmikrofonen die Fluor-Polymere PTFE und FEP (besonders bekannt unter dem Markenname *Teflon*) in Schichtdicken von 6 bis 25 μm aufgrund ihrer hervorragenden elektrischen Eigenschaften zu Einsatz. Die erwähnten Polymermaterialien werden mit negativer Polarität aufgeladen, da sich dies als die zeitlich stabilere Aufladung erwiesen hat⁴⁵. Dieses Elektret kann nun entweder direkt in Form einer Elektretfolie als Membran Anwendung finden oder aber mit der festen Gegenelektrode verklebt werden. Im ersteren Fall wird der kapazitive Wandler dann als *Elektret-Mikrofon* bezeichnet, während der Fall der Aufbringung des Elektrets auf der Gegenelektrode als *Back-Elektret-Mikrofon* bezeichnet wird. Die bei Fluorpolymerenelektreten in guter Näherung als Oberflächenladung wirksame Polarisation erzeugt so durch Influenz eine positive Flächenladung auf der anderen Elektrode des Kondensators. Dieser Ladungsunterschied äußert sich in einer festen Polarisationsspannung, die in der Größenordnung von 100 V liegt. Da sich die Fluorpolymere aufgrund ihrer schlechten mechanischen Eigenschaften als Membranmaterial nicht besonders gut eignen, werden in qualitativ hochwertigen Elektretmikrofonen oftmals metallisierte Kunststoff-folien aus den gleichen Materialien wie in qualitativ hochwertigen Echkondensatormikrofonen benutzt.⁴⁶

Für das elektrische Feld im Luftspalt des Plattenkondensators gilt bei Anwendung des Elektrets:

$$E_0 = \frac{\sigma d}{\epsilon_0(\epsilon_r + d)} \quad (14)$$

wobei σ die Oberflächenladungsdichte, d die Elektretdicke und ϵ_r die relative Dielektrizitätskonstante des Elektretmaterials bezeichnet. Wie für das konventionelle Kondensatormikrofon ist so die Ausgangs-Leerlaufspannung gemäß Gleichung 10 durch $u = E_0 s$ und die Empfindlichkeit durch $M = E_0 n A$ gegeben.

⁴⁵vgl. [Lerch et al., 2009]: S. 358

⁴⁶vgl. [Lerch et al., 2009]: S. 359

Es gelten also weiterhin die proportionalen Zusammenhänge aus Schalldruck p , auf die Membran wirkende Kraft F , der daraus resultierenden Auslenkung s und abgegebenen Ausgangsspannung u für kleine und kolbenförmige Auslenkungen der Membran wie bei einem über einen Ladewiderstand durch eine Polarisationsspannung aufgeladenen NF-Kondensatormikrofon:
 $p \propto F \propto s \propto u$.

4 Untersuchte Mikrofone

In diesem Kapitel sollen die in dieser Arbeit untersuchten Mikrofone kurz vorgestellt werden. Dabei stehen Parameter, die die Akustik und somit tontechnische Qualität der Mikrofone beeinflussen im Vordergrund. Des Weiteren werden an dieser Stelle auch Bilder gezeigt, die den Aufbau und die Struktur der einzelnen Mikrofone anschaulich darstellen. Es ist zu beachten, dass die Hersteller der untersuchten Mikrofone selbst keine konkreten Auskünfte über den Aufbau und die angewendeten Technologien in ihren Mikrofonen geben. Die im Folgenden gegebenen Informationen beruhen somit auf Recherchen zu von den genannten Firmen umgesetzten wissenschaftlich zugänglichen Entwicklungen, Patenten als auch selbstständigen Forschungstätigkeiten an einzelnen Mikrofonen und wollen keinen Anspruch auf Vollständigkeit geben. Alle gegebenen Informationen sind auf dem Stand der Fertigstellung dieser Arbeit, dem 31.08.2017.

In Tabelle 4 und Tabelle 2 sind für die folgenden Untersuchungen wichtige Abmessungen und elektronische Kenndaten sowohl der MEMS- als auch der Elektretmikrofone zusammengetragen.

Mikrofon	port	$d_{\text{Schalleinlass}}$ [mm]	Gehäuse [mm ³]	$U_{\text{Versorgung}}$ [V]	Ausgang
InvenSense					
ICS-40730	bot.	1.500	4.72 x 3.76 x 3.50	1.50 - 3.63	sym.
ICS-40618	bot.	0.375	3.50 x 2.65 x 0.98	2.20 - 3.63	sym.
TDK					
T4071	bot.	0.750	3.35 x 2.50 x 0.98	1.52 - 3.60	sym.
Sonion					
O11BC03	bot.	0.250	3.35 x 2.50 x 1.29	0.88 - 1.40	unsym.
STMicro.					
MP23AB01DH	bot.	0.350	3.35 x 2.5 x 0.98	2.30 - 3.60	sym.
Akustica					
BMU563R	bot.	0.325	3.50 x 2.65 x 0.98	1.62 - 3.60	unsym.

Tabelle 1: MEMS-Mikrofone: metrische und elektrische Kenndaten

4.1 MEMS-Mikrofone

InvenSense ICS-40618

Das ICS-40618 ist ein MEMS-Mikrofon des US-amerikanischen Herstellers InvenSense. Das Unternehmen InvenSense agiert sehr vielseitig in der Sparte von mikroelektromechanischen Systemen und stellt Sensoren für verschiedene Anwendungen her wie Beschleunigungsmesser, Gyroskope, Kompass und eben Mikrofone. Während des Verfassens dieser Arbeit vom

Mikrofon	Beschaltung	$d_{\text{Gehäuse}}$ [mm]	$h_{\text{Gehäuse}}$ [mm]	$U_{\text{Versorgung}}$ [V]
beyerdynamic				
H56	2-pol.	3.00	?	2.00 - 9.00
DT291 PV MKII	3-pol.	5.80	2.00	1.50 - 10.00
MM 1	2-pol.	5.80	2.00	1.50 - 10.00
Sonion				
8044	3-pol.	2.56	3.00	0.80 - 5.00
89PC01	3-pol.	2.56	3.00	0.80 - 3.60

Tabelle 2: ECM: metrische und elektrische Kenndaten

01.06 bis zum 31.08.2017 wurde InvenSense von TDK gekauft. Die Grundlage der InvenSense MEMS-Mikrofone liefert eine Technologie, welche durch [Weigold et al., 2006] beschrieben wurde. Diese basiert auf einer 0,5 mm breiten Membran, welche an Federn aufgehängt ist, um die Empfindlichkeit bei geringer Vorspannung zu maximieren. Die Gegenelektrode wird vom Silicon-on-Insulator-Wafer, der die Grundlage des Sensors bildet, geformt. Die ein Mikrometer dicke Membran ist aus Polysilizium abgeschieden.

Das ICS-40618 besitzt einen für aktuelle MEMS-Mikrofone typischen Footprint von 3.50 auf 2.65 Millimeter und ist ein *bottom-port* Mikrofon mit symmetrischem Signalausgang. In Abbildung 11 sind drei Bilder des Mikrofans zu sehen. Es handelt sich um eine einfache Schalleinlassöffnung mit einem Durchmesser von $d_{\text{Schalleinlass}} = 0,375$ mm. Der Membran des Drucksensors zeigt sich aus der Sicht der perforierten Gegenelektrode als achteckig. Drucksensor und zugehöriger signalkonditionierender ASIC befinden sich nicht auf dem gleichen Substrat. Das Signal des Drucksensors wird über zwei Bonddrähte abgegriffen und dem ASIC überreicht.

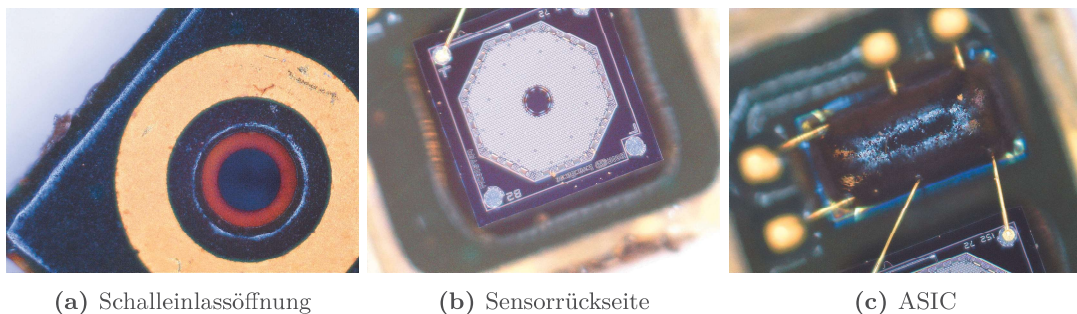


Abbildung 11: InvenSense ICS-40618

InvenSense ICS-40730

Das ICS-40730 hat die größten Gehäuseabmessungen aller getesteten MEMS-Mikrofone in dieser Arbeit mit einem Footprint von 4,72 auf 3,76 mm und einer Höhe von für MEMS-Verhältnisse äußerst ungewöhnlichen 3,5 mm. Auch der Durchmesser der Schalleinlassöffnung ist mit 1,5 mm sehr groß und zeigt wie Abbildung 16 intern eine weitere Verstrebung. Es handelt sich wie beim ICS-40618 ebenfalls um ein *bottom-port* Mikrofon mit symmetrischer

Signalausgabe. Unter Abbildung 16 und Abbildung 13 sind vier Bilder des Mikrofons mit geöffnetem Mikrofongehäuse zu sehen. Man erkennt, dass anders als beim bereits betrachteten ICS-40618 vier Membranen gleicher Abmessungen nebeneinander angeordnet sind und somit effektiv eine vierfache Membranfläche entsteht. Die Membran ist hier strukturell ähnlich aufgebaut und aufgehängt wie beim ICS-40618 aus dem gleichen Hause, jedoch zeigt sich eine stärkere Lochung der Gegenelektrode. Die Signalkonditionierung findet auch hier auf dem von oben schwarz gefärbten ASIC neben dem Drucksensor statt.

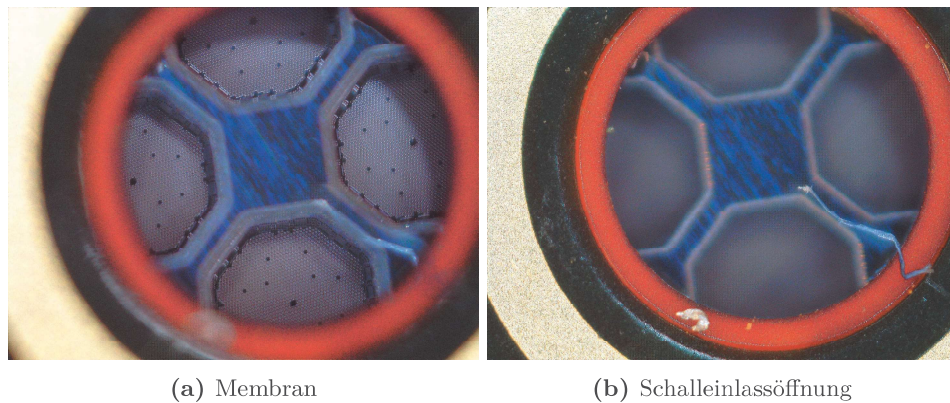


Abbildung 12: InvenSense ICS-40730: Unterseite

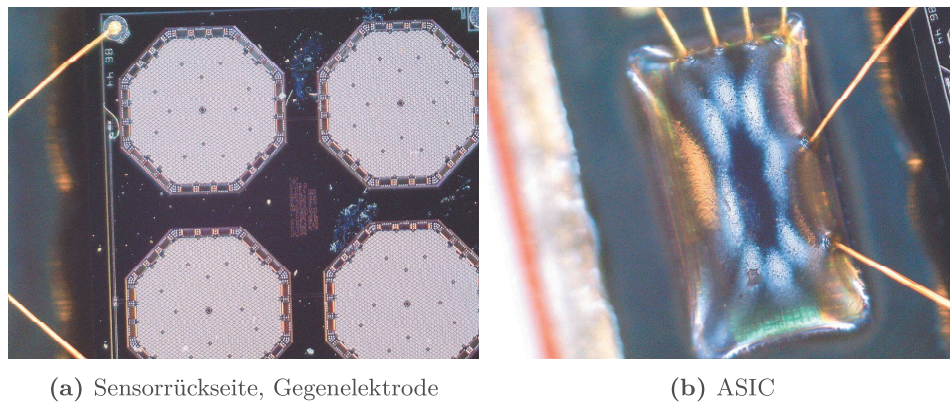


Abbildung 13: InvenSense ICS-40730: Oberseite ohne Gehäusedeckel

Sonion O11BC03

Sonion ist ein dänischer Hersteller elektroakustischer Wandler. In der Geschichte kommerzieller MEMS-Mikrofone brachte Sonion 2005 ihr erstes Mikrofon unter dem Namen *SiMic* auf den Markt. Dieses bestand aus einem MEMS-Sensorelement und einem ASIC auf dem gleichen Silizium-Substratträger mit Abmessungen von gerade einmal 2,6 mm x 1,6 mm x 0,865 mm.⁴⁷ Die Entwicklung dieses Mikrofons begann 1993 als eine Kollaboration mit dem Mikroelektronik-Zentrum an der Technischen Universität Dänemark (DTU). Im Jahre 2014 schloss sich Sonion jedoch der MEMS-Sparte von InvenSense an, sodass im Sonion O11BC03 auch ein InvenSense Drucksensor zu finden ist (siehe Abbildung 17)⁴⁸. Die Schalleinlassöffnung zeigt bei diesem Mikrofon eine runde Form mit einem Durchmesser

⁴⁷vgl. [Citakovic et al., 2009]

⁴⁸vgl. [Sonion, 2017]

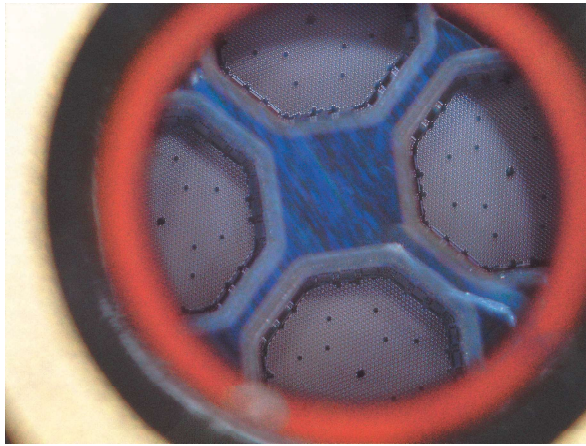


Abbildung 14: ICS-40730 Membran

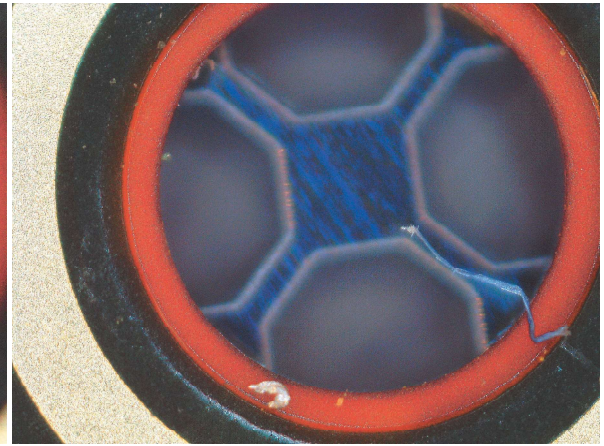
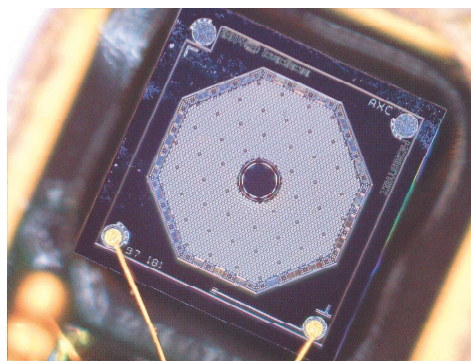


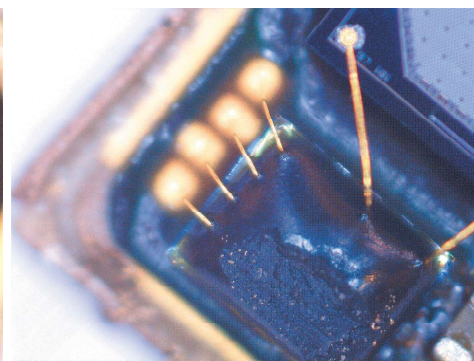
Abbildung 15: ICS-40730 Schalleinlassöffnung

Abbildung 16: ICS-40730 Unterseite

von $d_{\text{Schalleinlassöffnung}} = 0,250 \text{ mm}$, der somit die kleinste Öffnung für den Schall in diesem Test darstellt. Der Footprint ist $3,35 \text{ mm} \times 2,50 \text{ mm} \times 1,29 \text{ mm}$. Auffällig ist, dass die Gegenelektrode bei diesem Modell die stärkste Durchlochung aller InvenSense Drucksensoren zeigt.



(a) Sensorrückseite



(b) ASIC

Abbildung 17: Sonion O11BC03

Akustika BMU563R

Die Akustika MEMS-Mikrofontechnologie, welche erstmals im Jahr 2006 in einem Produkt auf den Markt kam, basiert auf einem Mikrofon, das [Neumann und Gabriel, 2003] im Jahr 2003 beschrieben haben: Es handelt sich um ein komplett in einen Standard-CMOS-Chip integriertes Mikrofon. Die Membran wird dabei von der oberen Metall- und Oxidschicht des CMOS-Wafers gebildet; es kommt zu einem schlangenartigen Metall- und Oxid-Gewebepattern, welches die Membran formt. Das darunter liegende Polysilizium wird weggeätzt, um eine aufgehängte Membran zu erlangen. Des Weiteren wird das Metall-Oxid-Gewebe mit einem Polymer beschichtet, um es luftdicht als Membran zu verschließen. Abschnitt 4.1 zeigt die Gegenelektrode des Akustika BMU563R. Es lässt sich aus dieser Perspektive erkennen, dass sie Membran rund geformt ist im Gegensatz zu den Membranen der InvenSense Mikrofone eine andere Membranaufhängung Einsatz findet. Die Abmessungen des Gehäuses sind mit $3,5$

mm x 2,65 mm x 0,98 mm bemessen, während die Schalleinlassöffnung $d_{\text{Schalleinlass}} = 0,325$ mm zählt.

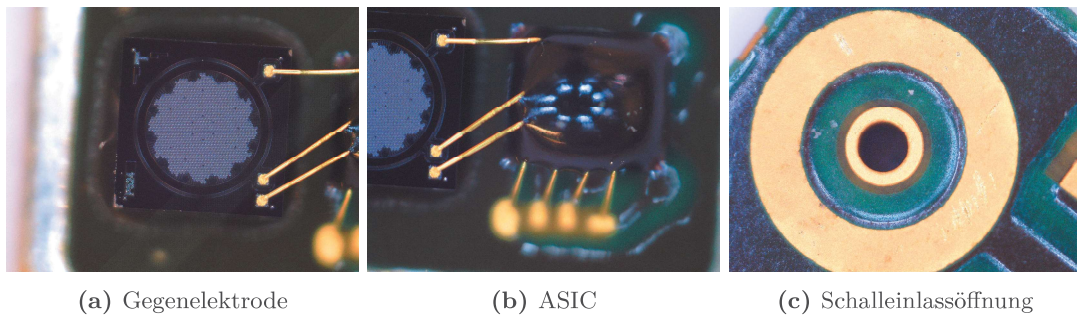


Abbildung 18: Akustika BMU563R

STMicroelectronics MP23AB01DH

STMicroelectronics sind ein in der Spate der MEMS-Mikrofone renommiertes Unternehmen⁴⁹. Das STMicroelectronics MP23AB01DH zeigt wie in Abbildung 19 zu erkennen eine rechteckig geformte Membran, welche segelartig in zwei Hälften aufgehängt ist. Die Membranfläche des Drucksensors fällt aufgrund dieser Form sehr groß aus im Vergleich zu den anderen hier getesteten Modellen. Interessant in Abbildung 19 zu sehen ist der ASIC, welcher nicht geschwärzt ist und dessen Schaltung folglich optisch etwas genauer analysiert werden kann. Die Gehäuseabmessungen sind mit 3,35 mm x 2,5 mm x 0,98 mm exakt gleich wie die beim nun im Folgenden vorgestellten TDK T4071. Die Schalleinlassöffnung ist $d_{\text{Schalleinlass}} = 0,350$ mm groß.

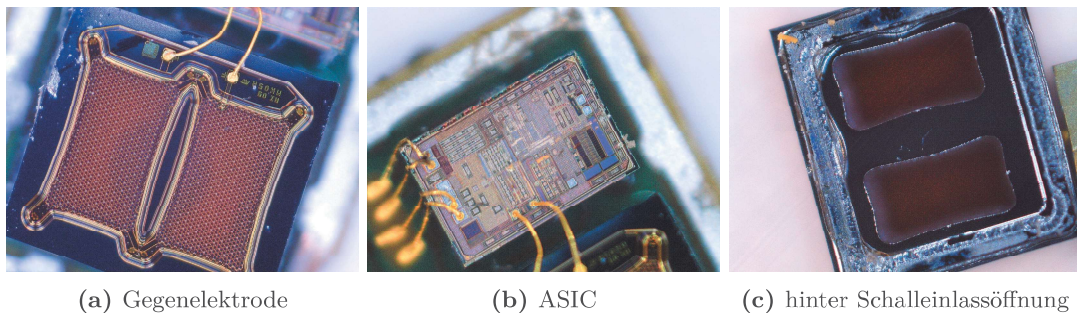


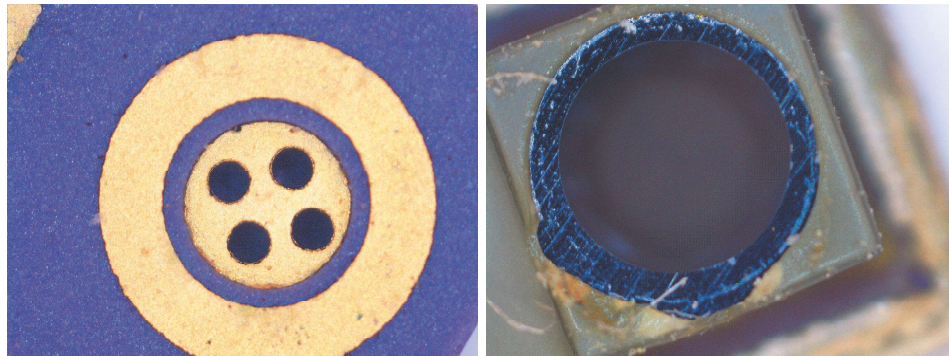
Abbildung 19: STMicroelectronics MP23AB01DH

TDK T4071

Das TDK T4071 ist eine Entwicklung des deutschen Unternehmens EPCOS, welches der TDK Group angehört. Der unter Abschnitt 4.1 erwähnte Kauf von InvenSense durch TDK wird diese Kooperation möglicherweise beenden. Das TDK T4071 zeigt sich nicht sehr auskunftsfreudig beim selbständigen Erfassen seines Aufbaus; die Gegenelektrode und der ASIC sind durch eine Abdeckung geschützt wie Abbildung 20 zeigt. Auffällig ist die Schalleinlassöffnung, welche einen großen Durchmesser von $d_{\text{Schalleinlass}} = 0,75$ mm bietet, jedoch in vier

⁴⁹vgl. [Vigna, 2015]

kleinere Öffnungen unterteilt ist. Die Gehäuseabmessungen liegen bei 3,35 mm x 2,5 mm x 0,98 mm.



(a) Schalleinlassöffnung

(b) Mikrofonrückseite ohne Gehäuse

Abbildung 20: TDK T4071

4.2 ECM

beyerdynamic H56

Das beyerdynamic H56 ist ein Nackenbügelmikrofon mit einer Elektretkapsel. Letztere hat einen Membrandurchmesser von 3 mm und ist als 2-polige Elektretkapsel ausgeführt. Der Speisewiderstand ist hierbei nach firmeninternen Messungen auf $R = 10 \text{ k}\Omega$ bei einer Versorgungsspannung von $U_{\text{Versorgung}} = 5 \text{ V}$ eingestellt worden. Die Kapsel ist nach den unter Unterabschnitt 3.2 beschriebenen Parametern nach dem aktuellen Stand der Technik aufgebaut. Nackenbügelmikrofone finden vor allem in Fernsehshows und auch auf Tagungsbühnen oder in Konferenzumgebungen Anwendung, wo das Mikrofon zwar sichtbar sein darf, jedoch gerne möglichst unauffällig sein soll. Aus diesem Grund ist es auch sehr schmal und unauffällig gebaut, sowie in Hautfarbe ausgeführt.

Eine tiefer reichende Betrachtung des Aufbaus der Kapsel (und auch aller weiteren vorgestellten Elektretmikrofone) soll nicht gegeben werden, da dies den Schwerpunkt der MEMS Mikrofontechnologie, der in dieser Arbeit behandelt wird, zu stark verlassen würde.

beyerdynamic DT291 PV MKII

Das beyerdynamic DT291 PV MKII ist ein Headset, welches unter anderem Anwendung im Kommentatorbereich findet. Es ist im Gegensatz zum beyerdynamic H56 optisch deutlich auffälliger, da es hinter und nicht vor der Kamera bzw. hinter und nicht vor dem potentiellen Publikum benutzt wird. Die Elektretkapsel ist somit auch größer und besitzt einen Gehäusedurchmesser von 5,6 mm. Sie ist im Gegensatz zum beyerdynamic H56 3-polig verschaltet und wird mit einem Speisewiderstand von $R = 10 \text{ k}\Omega$ betrieben.

Sonion 8044 und Sonion 89PC01

Das dänische Unternehmen Sonion liefert bereits ein MEMS-Mikrofon in diesem Vergleich und soll auch zwei Elektretmikrofone - das Sonion 8044 und 89PC01 - beisteuern, welche mit einem Gehäusedurchmesser von 2,54 mm am unteren Limit der im Jahr 2017 hergestellten Miniaturelektretmikrofone liegen.

Somit ist mit ihnen auch die Miniaturisierungsgrenze der Elektretmikrofone erreicht; und das mit Gehäuseabmessungen, die einen Durchmesser von 2,54 mm und eine Gehäusehöhe von 3 mm aufrufen. Tabelle 1 zeigt, dass das den Abmessungen der MEMS-Mikrofone sehr nahe kommt, wenn auch der Gehäusedurchmesser effektiv in zwei Dimensionen zählt.

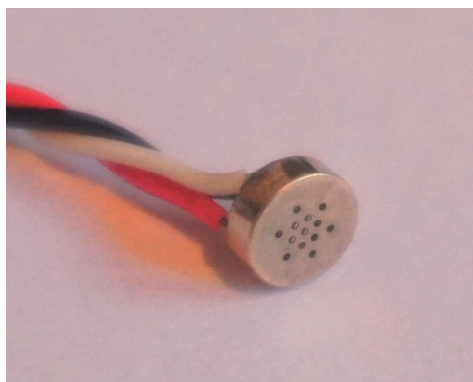
Doch bedeutet Gehäuseabmessung natürlich nicht gleich Membranfläche und so gehen die Elektretmikrofone an der unteren Miniaturisierungsgrenze mit etwa 2,5 mm Durchmesser und die MEMS-Mikrofone mit etwa 0,5 mm Durchmesser der Membran in diesen Vergleich.



Abbildung 21: beyerdynamic H56⁵⁰

⁵⁰<http://shop.gowild.ch/pi.php/BEYERDYNAMIC-TG-H56c-tan-Opus-Headset-Mikrofon-Kugel-beige.html>. Zuletzt geprüft am 29.08.2017

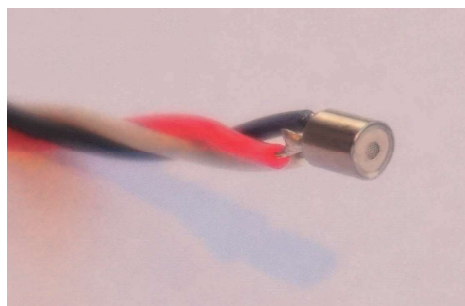
⁵¹<http://origin-www.fullcompass.com/prod/280299-Beyerdynamic-DT-291-PV-MKII-80>. Zuletzt geprüft am 29.08.2017



(a) ECM

(b) fertiges Produkt⁵¹**Abbildung 22:** beyerdynamic DT291 PV MKII

(a) 8044



(b) 89PC01

Abbildung 23: Sonion ECMs

5 Messtechnische und subjektive Erfassung und Auswertung

Dieses Kapitel befasst sich mit der messtechnischen und subjektiven Erfassung und Auswertung der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen MEMS- und Elektretmikrofone. Zuerst wird die vorausgegangene Entwicklung einer Platine für die surface mount MEMS-Mikrofone beschrieben. Im Weiteren sind die Durchführung der Teststudien als auch deren Ergebnisse, sowie eine abschließende Diskussion und Abschätzung letzterer dargestellt.

5.1 Entwicklung der Platine für die MEMS-Testmikrofone

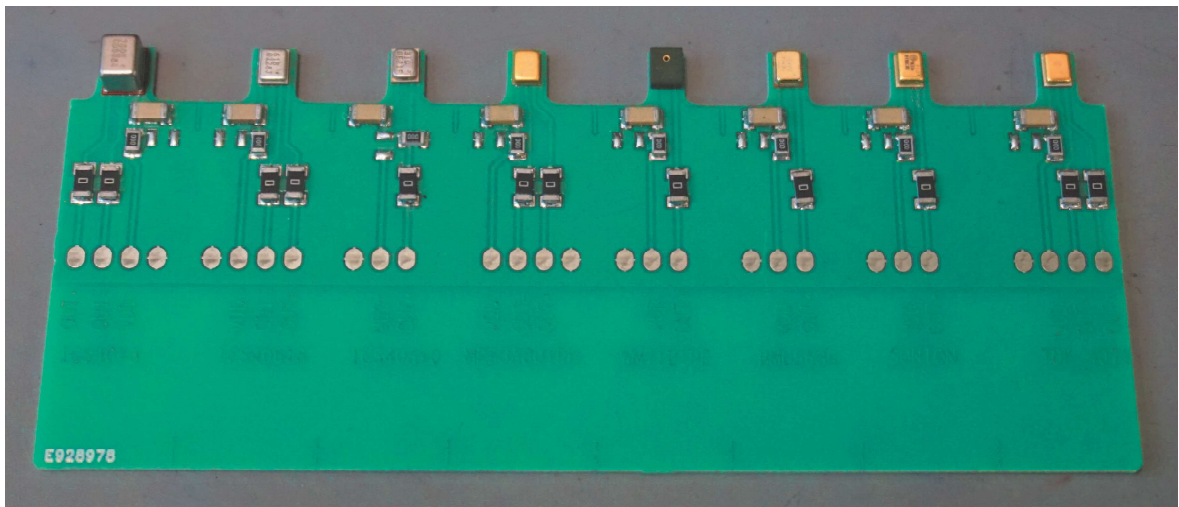
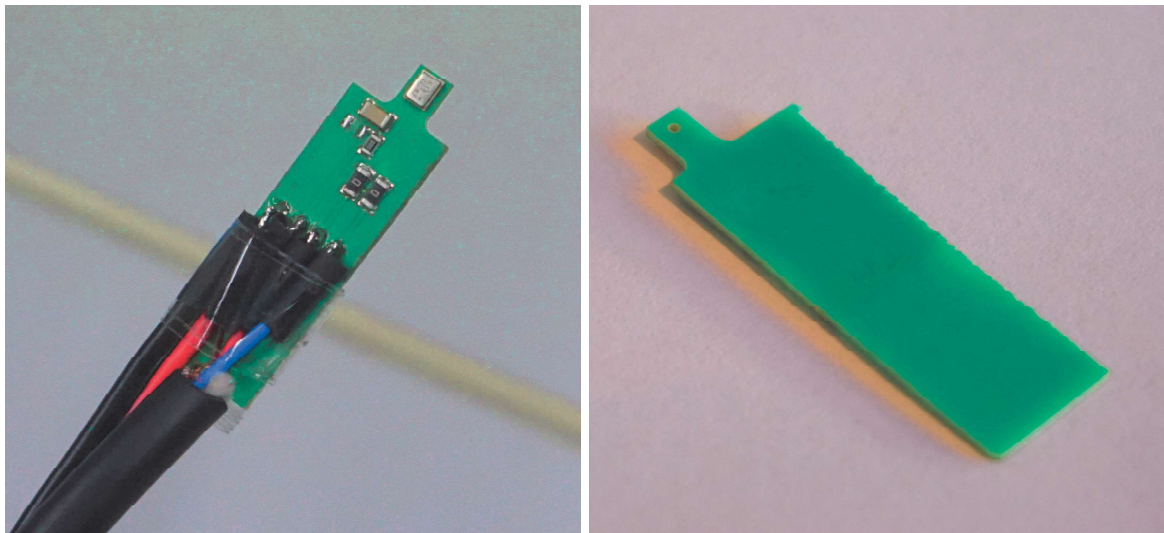


Abbildung 24: MEMS-Mikrofon Testplatine am Stück

MEMS-Mikrofone werden als surface mount devices (SMDs) direkt auf einer Platine aufgelötet. Um die im Abschnitt 4 dargestellten MEMS-Mikrofone anwendungsgerecht testen zu können, wurde für diese Arbeit eine Platine für letztere entwickelt. Das Schaltbild, der Bestückungsplan sowie eine Darstellung der Lochungen und deren Durchmesser sind im Anhang unter ??, Abschnitt 6 und ?? zu finden. In dieser Arbeit werden nur *bottom port* MEMS-Mikrofone untersucht, da deren Bauart generell eine bessere Performance bietet. Dies ist begründet durch die unterschiedlich großen Hohlräume vor und hinter dem Drucksensor im MEMS-Mikrofongehäuse und soll hier nicht weiter ausgeführt werden. Des Weiteren kann so durch Eingrenzung eine bessere Vergleichbarkeit der verschiedenen Modelle und Bauarten gewährleistet werden. Auf den technischen Zeichnungen (Abbildung 42 bis 44) ist jedoch zu erkennen, dass zu Beginn dieser Arbeit generell zwei Mikrofone mehr und unter letzteren auch ein *top port* Mikrofon geplant waren. Diese Mikrofone sollen an anderer Stelle jedoch nicht mehr erwähnt werden; ihr Ausfall ist mit technischem Versagen zu begründen.

Bei der Entwicklung der Platine musste auf verschiedene Aspekte geachtet werden, wobei den akustischen Parametern im Zuge des Themas dieser Arbeit besondere Beachtung geschenkt wurde. Folgende Konstruktionsparameter der Platine sind wichtig für die Performance der darauf befindlichen MEMS-Mikrofone:

(a) MEMS-Mikrofon *Testfinger*-Vorderseite(b) MEMS-Mikrofon *Testfinger*-RückseiteAbbildung 25: MEMS-Mikrofon *Testfinger*

- Die Löcher in der Platine, welche zu den auf der Unterseite für den Schall offenen MEMS-Mikrofonen führen, sind akustisch wirksam und bilden mit dem in der Vorderkammer des MEMS-Mikrofons eingeschlossenen Luft ein schwingungsfähiges System mit einer Resonanz, welches für eine einfache Abschätzung als Helmholtz-Resonator betrachtet werden kann. Dabei wird angenommen, dass die Bohrung in der Platine den gleichen Durchmesser wie die Schalleinlassöffnung besitzt. Die stets kleinere Schalleinlassöffnung liefert lediglich eine mögliche Verschiebung zu einer höheren Frequenz. Um sowohl die größt- als auch kleinstmögliche Resonanz zu bestimmen, wird das InvenSense ICS-40730 mit einem Bohrungsdurchmesser von 2 mm und ICS-40618 mit einem Bohrungsdurchmesser von lediglich 0,7 mm gewählt. Dies liefert bei einer groben Abschätzung der Vorderkammer des Drucksensors (Messung am geöffneten Gehäuse) ein Volumen von $V_{\text{Vorderkammer ICS-40618}} = 1\text{mm} \cdot 1\text{mm} \cdot 0,25\text{mm} = 0,25\text{mm}^3$ sowie nachdem das ICS-40730 einen vierfachen InvenSense Drucksensor besitzt $V_{\text{Vorderkammer ICS-40730}} = 0,25\text{mm}^3 \cdot 4 = 1\text{mm}^3$. Die Radien der Öffnungen sind nach ?? $r_{\text{ICS-40618}} = 0,7\text{mm}$ und $r_{\text{ICS-40730}} = 2\text{mm}$ sowie die Länge der Luftsäule die für die Testplatine gewählte Platinendicke $L = 1\text{mm}$. Nach der bekannten Formel für die Helmholtz-Resonanz ergibt sich: $f_{\text{ICS-40618}} = 93487\text{Hz}$ sowie $f_{\text{ICS-40730}} = 95090\text{Hz}$. Die durch die Platine ausgebildete Resonanz liegt als weit außerhalb des Hörbereichs und kann vernachlässigt werden.
- Die Platine bildet ein akustisches Hindernis. Es gilt, dass sich für Schallwellen ab einer Wellenlänge, für die $\lambda \geq 4d$ gilt, wobei d die Größe des Hindernisses darstellt, eine hörbare Abschattung ausbildet.⁵² Die Platine ist absichtlich so entwickelt, dass an der Stelle des Mikrofons ein kleiner Platinenfinger entsteht, der nicht viel größer als die tatsächlichen Abmessungen des Mikrofons ist. Somit kann eine möglichst geringe Beeinflussung durch das Hindernis in Form der Platine gewährleistet werden. Betrachtet man die in ?? gelisteten Abmessungen der Platinenfinger für die einzelnen Mikrofone ist die Länge mit $l = 5,5\text{ mm}$ für jedes Mikrofon gleich, während die Breiten in einem

⁵²vgl. [Cosmos Indirekt, 2017]

Bereich von $b_{\min} = 3,3$ mm bis $b_{\max} = 4,9$ mm liegen. Zieht man diese Dimensionen für eine Abschätzung der Abschattung heran, ergibt sich für die Länge l ein rechnerischer Schallschatten ab $f = 15591$ Hz, während die Werte für die Breite aufgrund der geringeren Abmessungen erst im Bereich von $f = 17500$ Hz bis $f = 25985$ Hz liegen. Diese grobe Abschätzung des Schallabschattung zeigt also, dass ab etwa 15 bis 16 kHz mit einer wahrnehmbaren Abschattung gerechnet werden kann. Generell muss bei MEMS-Mikrofonen als SMDs immer mit dem negativen Einfluss der Platine gerechnet und beim Produktdesign geplant werden.

- MEMS-Mikrofone müssen mit Hilfe des Reflow-Lötens auf der Platine angebracht werden. Dabei sind unbedingt die Vorgaben des entsprechenden Herstellers für Löttemperatur bzw. Lötprofil und das Aufbringen der Lötpaste auf die Bauteile zu beachten. Da die Bauteile des Drucksensors als auch des an den Drucksensor anschließenden ASICs aus Halbleiterstrukturen bestehen, sind letztere empfindlich gegen starke Hitze. Neben der Hitze muss beim Design der Platine und beim Lötprozess darauf geachtet werden, dass keine Lötpaste in die Schalleinlassöffnung des Mikrofons läuft und es zerstört; hierbei ist vor allem der rings um die Schalleinlassöffnung nötige Lötstopplack zur nächsten Lötstelle, als auch die wohldosierte Menge der Lötpaste ausschlaggebend.

All die in letzterer Aufzählung genannten Aspekte wurden beim Platinendesign dieser Arbeit beachtet, sodass über diese Abschätzungen hinaus nicht mit negativen Einflüssen gerechnet werden muss.

Des Weiteren wurde die Platine so entwickelt, dass ein Einsatz in fortführenden Untersuchungen im Rahmen des Projektes *MEMS-Mikrofone* bei der beyerdynamic GmbH & Co. KG gewährleistet werden kann. Die Leiterbahnen, welche dem Mikrofon die Versorgungsspannung liefern, sind mit einem Spannungsteiler ausgestattet, der den Anschluss an die für Miniaturelektretmikrofone üblichen Speisespannungswandler wie den in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen beyerdynamic MA-PVA gewährleistet. Diese industrieüblichen Speisewandler liefern zumeist eine Ausgangsspannung von 5 V; ?? zeigt deren Anschlussmöglichkeiten. Mit Hilfe des Spannungsteilers ist es also möglich, die Versorgungsspannung von den üblichen 5 V auf die von MEMS-Mikrofonen Benötigte herabzusetzen. An den Ausgängen der MEMS-Mikrofone wurden Koppelkondensatoren vorgesehen. Diese dienen zur Entkopplung des DC-Signalanteils vom AC-Nutzsignal. Ein weiterer Kondensator (oder mehrere Kondensatoren parallel) ist an der Zuleitung der Versorgungsspannung direkt vor dem Mikrofon auf Masse geschaltet. Dieser soll zuallererst die Versorgungsspannung vor typischem HF-Noise sieben und ist auf $C = 100$ nF dimensioniert. Ein weiterer Kondensator kann parallel geschaltet werden (und in der praktischen Anwendung gestapelt werden), um die Versorgungsspannung am Spannungsteiler zu stabilisieren. Im Anwendungsfall der MEMS-Mikrofone sind $C = 10$ μ F eine passende Wahl, dessen Dimensionierung an dieser Stelle aber nicht weiter besprochen werden soll. Der Spannungsteiler wurde bei den nachfolgenden Untersuchungen nicht genutzt, da die Versorgungsspannung ständig variiert werden musste; Grund hierfür sind die Untersuchungen der Abhängigkeiten des Frequenzgangs, Rausch- und Verzerrungsverhaltens von letzterer. Des Weiteren wurde auf die Koppelkondensatoren verzichtet, um mögliche Einflüsse der Letzteren bei der Analyse zu vermeiden. Lediglich der HF-Sieb kondensator mit C

= 100 nF kam direkt am Bauteil an der die Versorgungsspannung zuführenden Signalleitung zum Einsatz.

5.2 Durchführung

Dieser Abschnitt liefert die ausführliche Untersuchung und Erfassung verschiedener qualitätsbezogener Parameter der in Abschnitt 4 vorgestellten Mikrofone. Da mögliche Abhängigkeiten der untersuchten Parameter von der Versorgungsspannung nicht ausgeschlossen werden können, wird letztere für jeden Parameter im laut Datenblättern zulässigen Spannungsbereich in Schritten von etwa $U_{\text{Versorgung}} = 0,5 \text{ V}$ variiert; dies liefert bei den meisten Mikrofonen die drei Spannungswerte 2,5 V, 3 V sowie 3,5 V.

5.2.1 Messtechnische Erfassung

Um bei der messtechnischen Erfassung mögliche, jedoch bei sehr guten Audiomesssystemen unübliche systemische Messdifferenzen verschiedener Messsysteme zu vermeiden, wurden die im folgenden dargestellten Messungen alle mit dem selben Messsystem, dem Audio Precision (AP) APX 525, durchgeführt, welcher in diesem Abschnitt 5.2.1 kurz vorgestellt und charakterisiert wird.

Die Messreihen zur Ermittlung der einzelnen Kenndaten fanden, um mögliche Störungen durch Umgebungs- und Witterungseinflüsse zu vermeiden, in direkter zeitlicher Abfolge statt. Ebenso befinden sich die Räumlichkeiten, in denen die Messreihen stattfanden, unter nahezu gleichen gesteuerten klimatischen Bedingungen.

Um eine komplette Fehlerhaftigkeit des APX 525 auszuschließen, wurde zu Beginn der Messreihen eine unabhängige, jedoch gleichwertige Messung des Frequenzgangs und Geräuschspannungsabstands aller getesteten Mikrofone durchgeführt. Die auf diese Art und Weise ermittelten Werte untermauern die Signifikanz der Messreihen. Des Weiteren wurde zu Beginn der Messreihen ein kurzer Vergleich von je zwei gleichwertigen Mikrofonen gemacht, um den Defekt eines einzelnen Mikrofons auszuschließen.

Audio Precision APx525 Der Audio Precision APx525 ist ein Audio-Messsystem bzw. Audio-Analysator der Firma Audio Precision aus Beaverton, Oregon (USA). Die Firma Audio Precision bildet mit ihren Audio-Messsystemen nach eigenen Angaben und persönlichen Erfahrungen des Verfassers in der Audiobranche den Standard weltweit. Aufgrund seiner hochwertigen und für Messungen im Audiobereich abgestimmten Elektronik arbeitet er sehr rauscharm und linear. Er besitzt sowohl symmetrische als auch unsymmetrische Ein- und Ausgänge und kann mit der zugehörigen APx-Software für unterschiedliche Messungen optimal eingerichtet werden; Letzteres ist für die verschiedenen Untersuchungen dieser Arbeit durchgeführt worden, jedoch soll die Einrichtung nicht im Detail beschrieben werden.

Nachfolgend sollen die wichtigsten Messunsicherheiten des Messsystems gegeben werden, welche für die richtige Darstellung der Messungen von Belang sind⁵³:

ANALYSATOREIGENSCHAFTEN:

- Größte Bandbreite: >90 kHz
- Amplitudenunsicherheit (1 kHz): $\Delta\hat{A}_{\text{Ana.}} = \pm 0.05$ dB
- Amplitudenfrequenzgang (20 Hz–20 kHz): $\Delta\hat{A}_{\text{Ana.Frequenzgang}} = \pm 0.008$ dB
- Eigenrauschen (bei 20 kHz Bandbreite): 1.3 μV
- Eigen-THD+N, (bei 20 kHz Bandbreite): -105 dB + 1.4 μV

GENERATOREIGENSCHAFTEN:

- Frequenzbereich für Sinussignale: 0.1 Hz bis 80 kHz
- Frequenzunsicherheit: 2 ppm
- Amplitudenunsicherheit: $\Delta\hat{A}_{\text{Gen.}} = \pm 0.05$ dB
- Amplitudenfrequenzgang (20 Hz–20 kHz): $\Delta\hat{A}_{\text{Gen.Frequenzgang}} = \pm 0.008$ dB
- Eigen-THD+N, (bei 20 kHz Bandbreite): -105 dB + 1.4 μV

ROHDE & SCHWARZ HM7042-5 Der ROHDE & SCHWARZ HM7042-5⁵⁴ ist ein Netzteil für Laboranwendungen. In allen in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurde es als Spannungsquelle für die Versorgungsspannungen der getesteten Mikrofone benutzt. Die von ihm ausgegebene Spannung besitzt eine Restwelligkeit, welche laut Datenblatt typischerweise im Bereich von ≥ 100 μV_{eff} (3Hz...300kHz) liegt. Es ist davon auszugehen, dass die Restwelligkeit in diesem Bereich keinen signifikanten Einfluss auf die Messwerte hat oder zu stark streuenden Messergebnissen - besonders bei der Rauschmessung - führt. Des Weiteren ist dem Datenblatt eine typische Unsicherheit der ausgegebenen Spannung von $\Delta u = \pm 75$ mV zu entnehmen; auch diese wird aufgrund der erwarteten geringen Versorgungsspannungsabhängigkeiten im Kleinbereich vernachlässigt.

Messunsicherheiten Jede Messung besitzt einen Messfehler, der berechnet, abgeschätzt und für weitere Schlussfolgerungen fortgepflanzt werden muss. Deshalb soll an dieser Stelle kurz die allgemeine Vorgehensweise wissenschaftlicher Fehlerbetrachtung und -Rechnung erläutert und dargestellt werden, welche im weiteren Verlauf dieser Arbeit auch so angewendet wird.

Prinzipiell ist zu unterscheiden zwischen statistischen und systematischen Messfehlern. Systematische Messfehler führen zu einseitigen Abweichungen vom *wahren* Wert und sind prinzipiell schwer erfassbar und oft schwer zu erkennen⁵⁵. Jedoch ist ein systematischer Fehler reproduzierbar und folglich zumindest teilweise korrigierbar. Ursachen für systematische Messfehler können generelle Unvollkommenheiten der Messgeräte, Rückwirkungen des Messgerätes bzw. -prozesses auf die Messgröße oder Umwelteinflüsse sein. Statistische Fehler können nur bei Mehrfachmessung unter gleichen Bedingungen bestimmt werden. Dabei fällt

⁵³vgl. [Audio Precision, 2017]

⁵⁴vgl. [ROHDE & SCHWARZ GmbH & Co. KG, 2017]

⁵⁵vgl. [Wagner, 2016]: S. 10

auf, dass sich die einzelnen Messwerte voneinander unterscheiden und um den *wahren* Wert streuen. Solche Abweichungen sind unvermeidlich, jedoch der statistischen Analyse zugänglich.

Für die in dieser Arbeit bestimmten Messgrößen können folgende Aussagen getroffen werden:

- **ÜBERTRAGUNGSFAKTOR UND FREQUENZGANG:** Diese Messgrößen besitzen keinen statistischen Charakter. Es ist aufgrund des festen, rein durch das Messsystem gesteuerten Messaufbaus auch mit keinen anderweitigen Abweichungen zufälliger Natur wie Abweichungen beim Ablesen, Abweichungen durch Reaktionsvermögen oder Unsicherheiten bei der Skaleninterpolation zu rechnen. Des Weiteren gibt es keine variablen Umgebungstemperaturen, die auf das Messergebnis Einfluss nehmen könnten. Aus diesen Gründen ist es auch ausreichend, die Messung genau einmal durchzuführen. Es müssen jedoch die systematischen Unsicherheiten des Messsystems APx525 sowohl bei der Signalausgabe (siehe Generatoreigenschaften), als auch bei der Signalaufnahme (siehe Analyseigenschaften) beachtet werden. Des Weiteren ist mit einer systematischen Unsicherheit bei der Positionierung des Prüflings am gleichen Ort des Referenzmikrofons zu rechnen (siehe Absatz 5.2.1.1). Die genannten systematischen Fehler pflanzen sich linear fort, sodass eine einfache lineare Fehlerfortpflanzung für die gemessene vom Mikrofon abgegebene Spannung Anwendung finden kann:

$$\Delta U = \sqrt{\Delta L_p^2 + \Delta \hat{A}_{\text{Gen.}}^2 + \Delta \hat{A}_{\text{Gen.Frequenzgang}}^2 + \Delta \hat{A}_{\text{Ana.}}^2 + \Delta \hat{A}_{\text{Ana.Frequenzgang}}} \quad (15)$$

Hierbei ist sowohl bei der Bestimmung des Übertragungsfaktors bei $f = 1$ kHz als auch bei der eigentlichen Frequenzgangmessung die Unsicherheit des Amplitudenfrequenzgangs zu beachten, da der Übertragungsfaktor bei $f = 1$ kHz aus der Frequenzgangmessung bestimmt wird. Der Fehler ΔL_p bezeichnet den Fehler der Positionierung des Prüflings. Hierbei wird die Positionsunsicherheit auf $\Delta x = \pm 0,01$ m abgeschätzt. Daraus folgt nach den allgemein bekannten Gesetzen der Schalldruckpegelabnahme mit der Entfernung r im Freifeld:

$$\Delta L_p[dB] = L_{p1} - L_{p2} = L_{p1} - (L_{p1} - |20 \log(\frac{r_1}{r_2})|) \quad (16)$$

Dabei ist L_{p1} der gemessene Schalldruckpegel am Prüfling in $r_1 = 1,00$ m Entfernung und es gilt $r_2 = r_1 + \Delta x = 1,01$ m. Der Fehler der Messung des Übertragungsfaktors und Frequenzgangs setzt sich also zusammen zu $\Delta U = \pm 0,12dB$.

- **KLIRRFAKTOR (THD) UND GRENZSCHALLDRUCKPEGEL:** Auch bei dieser Messung besitzen die Messgrößen keinen statistischen Charakter und es kann von festen systematischen Messfehlern ausgegangen werden. Wie unter Abschnitt 5.2.1 dargestellt, besitzt das Messsystem einen Eigen-THD von -105 dB. Um die Auswertung der Messergebnisse zu vereinfachen, wird dieser als vorherrschender Fehler der THD-Messungen angesehen und von weiteren Fehlereinflüssen durch Amplitudenabweichungen der Spannungsmessung abgesehen. Damit gilt ein THD < -105 dB zur anregenden Grundschwingung als nicht mehr signifikant. Dies ist vor allem bei der Betrachtung der Messergebnisse zur

Zusammensetzung des THD zu beachten. Ein signifikanter Einfluss zum Gesamt-THD ist in dieser Größenordnung nicht zu erwarten.

- **MIKROFONRAUSCHEN:** Neben den systematischen Fehlern in Form des Eigenrauschens des Messsystems APx525 ist hat diese Messung auch einen statistischen Fehler aufgrund des statistischen Charakters von Rauschen. Dieser statistische Fehler in Form der Standardabweichung kann direkt mit dem APx525 aus dem jeweils eine Minute lang aufgezeichneten Rauschpegel nach bekannten Vorschriften⁵⁶ der Statistik berechnet werden. Nach folgender Vorschrift setzt sich bei dieser Messung der Messfehler nach Fehlerfortpflanzung zusammen:

$$\Delta U = \sqrt{\Delta \hat{U}_{\text{stat.}}.^2 + \Delta \hat{A}_{\text{Ana.}}.^2 + \Delta \hat{A}_{\text{Ana. Frequenzgang}}.^2} \quad (17)$$

Bei der Beurteilung des Fehlers der Rauschmessung ist der statistische Fehler fundamental und somit wird vereinfachend angenommen: $\Delta U = \Delta \hat{U}_{\text{stat.}}$.

Die Fehler der einzelnen Messungen lassen sich also auf folgende Beziehungen abschätzen, denen in jeglicher weiterer Beurteilung der Messergebnisse Beachtung geschenkt werden muss. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden sie jedoch in den Graphen nicht als Fehlerbalken dargestellt. Bei tabellarischen Darstellungen wie in Tabelle 3 werden die signifikanten Stellen der Messgrößen entsprechend der Messfehler gewählt. Bei der Beschreibung und Beurteilung wurde also stets den Messfehlern ausreichend Beachtung geschenkt.

5.2.1.1 Übertragungsfaktor und Frequenzgang

Der Frequenzgang wurde entsprechend der Verordnungen der [IEC 60268-4, 2014] unter Freifeldbedingungen im reflexionsarmen Raum in den Firmengebäuden der beyerdynamic GmbH gemessen. Auch der Leerlaufübertragungsfaktor M_0 wurde dort normgerecht bestimmt. Dieser reflexionsarme Raum hat nach firmeninternen Konstruktionsbeschreibungen eine untere Grenzfrequenz von $f = 70$ Hz. Diese untere Grenzfrequenz gibt Auskunft darüber, bis zu welcher unteren Frequenz noch verlässliche Aussagen über den Frequenzgang getroffen werden können; darunter kann keine den Freifeldbedingungen genügende ebene Welle mehr garantiert werden.

Es gibt zwei Methoden zur Messung des Frequenzgangs: die Komparations- (Vergleichs-) und die Substitutions- bzw. Ersetzungsmethode, wobei erstere häufiger Anwendung findet und bei den Messungen in dieser Arbeit auch genutzt wurde. Bei dieser Art der Messung befinden sich Referenz und Prüfling zeitgleich und dicht nebeneinander im Messraum. Nach der Messung wird der ermittelte Frequenzgang des Messmikrofons von dem des zu prüfenden Mikrofons abgezogen. Einflüsse des Raums und Lautsprechers werden auf diese Weise kompensiert. Diese Methode eignet sich besonders für alle kleinen Mikrofone. Bei größeren Mikrofonen ist der Einfluss des Prüflings auf das einwirkende Schallfeld nicht mehr vernachlässigbar und es kommt zu Schallreflektionen am Mikrofongehäuse, die die Schallverteilung am Messmikrofon und somit die ganze Messung stören.⁵⁷ Die Substitutionsmethode und das damit verbundene

⁵⁶vgl. [Wagner, 2016]: S. 20

⁵⁷vgl. [Görne, 2007]: S. 160

aufeinanderfolgende Messen der Referenz und des Prüflings zeigen in diesem Fall ein besseres Messverhalten.

Neben dem charakteristischen 0° (Vorwärts)-Frequenzgang wird auch der 45° -, 90° -, 135° - und 180° (Rückwärts)-Frequenzgang aufgezeichnet. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf eventuelle Abschattungseffekte und Interferenzen am Mikrofon bzw. Mikrofongehäuse ziehen, die eine unregelmäßigen Verlauf der letzteren Frequenzgänge am theoretisch richtungsunabhängigen, vollständig linearen Druckempfänger verursachen. Besonders aussagekräftig sind in diesem Zusammenhang der Vorwärts- und Rückwärts-Frequenzgang, sodass diesen in der folgenden Diskussion auch am meisten Beachtung geschenkt werden soll. Gleichbleibende und äquidistante Drehungen um die Mikrofonachse werden mit einem elektronisch gesteuerten Drehteller realisiert. Auf eine Darstellung der möglichen bauartbedingten Richtungsabhängigkeiten als Polardiagramm wird bewusst verzichtet, da diese Darstellung nach der Norm [IEC 60268-4, 2014] lediglich die Richtungsabhängigkeit der Oktavmittelfrequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, 8000 Hz und 16000 Hz berücksichtigt und mögliche Veränderungen, die diese acht Frequenzen nicht betreffen, gar nicht darstellt. Richtungsabhängige Frequenzgänge über das komplette Spektrum sind somit deutlich präziser und aussagekräftiger und werden deshalb in dieser Arbeit gewählt.

Die Messungen sind mit einem Brüel & Kjaer Typ 2669 Messmikrofon als Referenzmikrofon durchgeführt worden. Dieses Messmikrofon wurde mit einem Brüel & Kjaer Nexus Messverstärker auf eine Empfindlichkeit von 1 mV/Pa gebracht. Der verwendete Messlautsprecher war ein Zweiwege-Koaxialsystem mit einem firmenintern konstruierten Gehäuse und einer ART SLA-2 Endstufe. Das Brüel & Kjaer 2669 entspricht als renommiertes 1/2-Zoll-Messmikrofon den Anforderungen an die Linearität im Übertragungsverhalten bei einer Frequenzgangsmessung als Referenz.⁵⁸ Das Wiedergabesystem zeigt keine linearen Übertragungseigenschaften im kompletten Frequenzspektrum wie Abbildung 26 zeigt; dies ist hauptsächlich durch die welligen Wiedergabeigenschaften des Messlautsprechers und in geringerem Masse durch Einflüsse des Raumes begründet. Eine absolute Linearität ist jedoch für Messlautsprecher weder erforderlich, noch erreichbar.⁵⁹ Mit Hilfe der Komperationsmethode werden die Unebenheiten des Wiedergabesystems aufgehoben und haben bei der späteren Betrachtung der Messergebnisse keinen Einfluss mehr. Das zu prüfende Mikrofon wurde für die Messungen des Frequenzgangs direkt symmetrisch an das APx525 angeschlossen. Als Eingangsimpedanz für das zu prüfende Mikrofon wurden $R = 200 \text{ k}\Omega$ gewählt und das Mikrofon folglich unbelastet gemessen; dies ist mit der Messung des Leerlaufübertragungsfaktors gleichzusetzen. Das Messmikrofon wurde mit $R = 100 \text{ k}\Omega$ unsymmetrisch abgeschlossen. Die Bandbreite des APx525 wurde auf 90kHz bei einer Samplingrate von 192 kHz eingestellt, was für den menschlichen Hörbereich mehr als ausreichend ist. Der Hochpass des Systems wurde so gewählt, dass es AC-gekoppelt ohne DC-Anteil arbeitete. Dies bewirkt ein Abschneiden der Signalanteile unter $f = 10 \text{ Hz}$. Als Tiefpass wirken lediglich die Einschränkungen des Analog-Digital-Wandlers und dessen nach oben beschränkten Passbands; dieser Tiefpass wirkt jedoch außerhalb des Hörbereichs und ist folglich zu vernachlässigen.

⁵⁸vgl. [Brüel & Kjaer, 2017]

⁵⁹vgl. [Görne, 2007]: S. 155-156

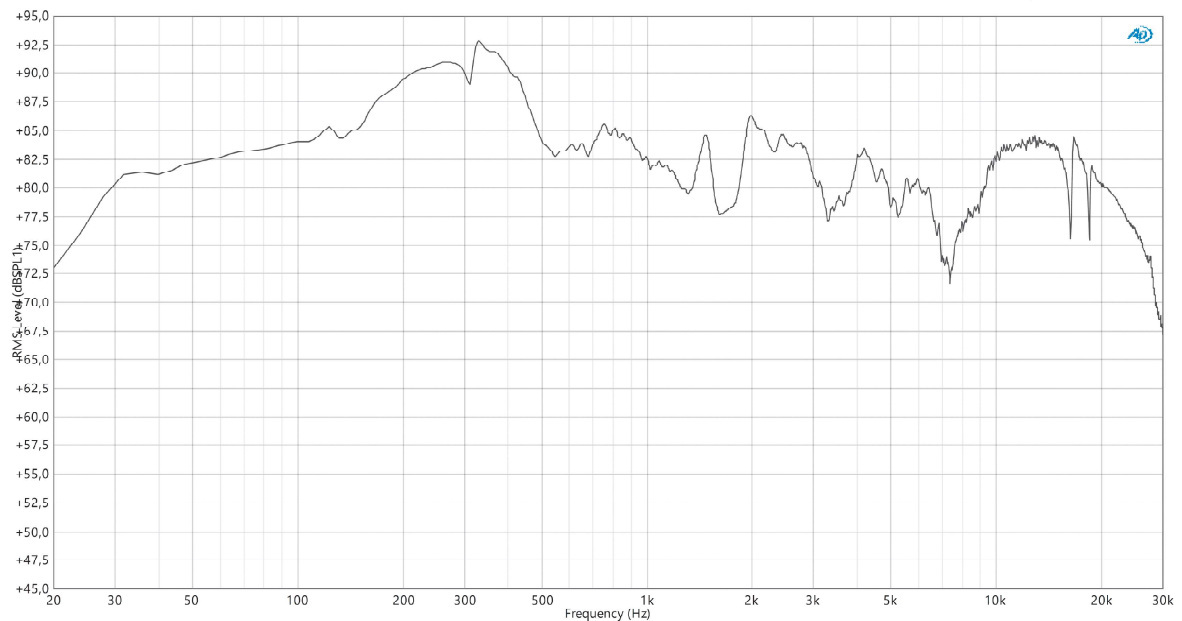


Abbildung 26: Frequenzgang des Referenzmikrofon bei der Frequenzgangsmessung

5.2.1.2 Klirrfaktor (THD) und Grenschalldruckpegel

Für akustische Klirrmessungen ist es notwendig, extrem hohe Schalldrücke unverzerrt zu erzeugen. Nur so können die geringen Verzerrungen der Mikrofonkapsel gemessen werden, ohne durch Verzerrungen des Wiedergabesystems überlagert zu werden. Der Klirrfaktor wird bei $f = 1$ kHz mit Hilfe eines auf diese Frequenz abgestimmten Helmholtzresonantors gemessen. Der Prüfling wird hierbei direkt an der Rohrmündung des Resonator platziert, wo sehr hohe Schalldrücke entstehen und das Mikrofon so auf seine akustische Belastbarkeit geprüft werden kann. Messungenauigkeiten sind ab Schalldruckpegeln von $L_p > 140$ dB zu erwarten, da der Resonator dann selbst zu verzerren beginnt.⁶⁰ Der Helmholtzresonator wird mit einem eingebauten Lautsprecher und zugehörigem Leistungsverstärker angeregt. Mit einem Helmholtzresonator ist es nicht möglich nichtlineare Verzerrungen bei tieferen Frequenzen zu messen, da die Luftbewegung im Rohr zu starken Windgeräuschen führen würde. Gerade im tieffrequenten Bereich treten Verzerrungen der Mikrofonkapsel jedoch stärker in Erscheinung, da der Membranhub größer ist.

In dieser Arbeit wird der typischerweise als Klirrfaktor oder THD bezeichnete prozentuale Anteil an nichtlinearen Verzerrungen für $f = 1$ kHz als Verlauf mit steigendem Schalldruckpegel L_p gemessen. Dabei werden 60 Messpunkte für die vom Mikrofon abgegebene Spannung im Bereich von 10 mV bis 2 V aufgezeichnet. Diese Messpunkte werden in der späteren Darstellung der Ergebnisse als Rauten dargestellt. Des Weiteren wird exakt derjenige Schalldruckpegel L_p bestimmt für den $\text{THD} = 1\%$ gilt. Dieser Wert entspricht den bei Miniaturmikrofonen in der Regel angegebenen Grenschalldruckpegel. Bei renommierten Mikrofonherstellern ist dieser für typische Klein- oder Großmembranmikrofone jedoch oftmals für $\text{THD} = 0,5\%$ definiert. In der [IEC 60268-4, 2014] ist sowohl eine Angabe für $\text{THD} = 0,5\%$ als auch $\text{THD} = 1\%$ zulässig.

Um die Zusammensetzung des THD genauer zu untersuchen, wird eine weitere Messung

⁶⁰vgl. [Görne, 2007]: S: 157

durchgeführt: Der Schalldruckpegel L_p , bei dem $\text{THD} = 1\%$ erreicht wird, wird mit dem Helmholtzresonator für $f = 1\text{ kHz}$ erzeugt. Dann werden die harmonischen Verzerrungen $H_2 = 2\text{ kHz}$, $H_3 = 3\text{ kHz}$, $H_4 = 4\text{ kHz}$, ... bis $H_{10} = 10\text{ kHz}$ gemessen und zum Pegel der Grundschwingung bei $f = 1\text{ kHz}$ ins Verhältnis gesetzt. Auf diese Art und Weise können die Verzerrungsanteile aufgeschlüsselt und die Zusammensetzung aus geradzahligem und ungeradzahligem Harmonischen dargestellt werden. Dies hat großen Anteil am charakteristischen Klang des Mikrofons.⁶¹

Da der THD bzw. THD-Verlauf für $f = 1\text{ kHz}$ alleine nicht ausreicht, um das Verzerrungsverhalten eines Mikrofons vollständig zu charakterisieren, folgt eine Messung des THDs für Grundschwingungen im Bereich von 20 Hz bis 20 kHz . Diese Messung liefert jedoch auch Signalanteile in Form von Verzerrungen $> 20\text{ kHz}$ und muss folglich genau interpretiert werden, um deren Einfluss im Hörbereich richtig abzuschätzen. Diese Messung wird durchgeführt, indem ein Brüel & Kjaer Typ 2669 Messmikrofon (verstärkt mit zugehörigem Messverstärker Brüel & Kjaer 2609) als Referenz neben dem Prüfling vor einer Lautsprecherbox in einem Abstand von etwas 30 cm platziert wird. Diese Messung ist wie die Frequenzgangmessung komparativ und vergleicht den vom Messmikrofon aufgenommenen THD mit dem des Prüflings. So kann durch Differenzbildung die spektralen THD-Anteile des Prüflings gemessen und dargestellt werden, ohne dass Verzerrungsanteile des Lautsprechers Einfluss haben. Das Brüel & Kjaer Typ 2669 Messmikrofon kann nach Datenblatt für die Schalldruckpegel L_p der Messung als verzerrungsfrei angenommen werden. Das Messmikrofon wird in dieser Messung auch genutzt, um die Schalldruckpegel L_p im Abstand von 30 cm an der Mikrofonposition eindeutig zu bestimmen.

Bei allen Messungen nichtlinearer Verzerrungen wird der Prüfling direkt symmetrisch an das APx525 angeschlossen. Als Eingangsimpedanz wird $R = 200\text{ k}\Omega$ gewählt und das Mikrofon folglich unbelastet gemessen. Das Messmikrofon bei der spektralen THD-Messung wird ebenfalls mit $R = 200\text{ k}\Omega$ symmetrisch abgeschlossen. Auch der Lautsprecher der spektralen THD-Messung sowie der Helmholtzresonator werden symmetrisch mit einer Quellimpedanz von $R = 40\text{ }\Omega$ angesteuert. Die Bandbreite des APx525 liegt bei 90 kHz (Samplingrate = 192 kHz), ein Hochpass bzw. AC-Coupling bei $f = 10\text{ Hz}$ ist eingestellt. Als Tiefpass wirkt lediglich der Bandpass des Analog-Digital-Wandlers, welcher keinen Einfluss auf den hörbaren Bereich hat. Nähere Informationen zu den technischen Daten des firmeninternen Helmholtzresonators und des dazugehörigen Leistungsverstärkers sowie des bei der spektralen THD-Messung benutzten Lautsprechers liegen dem Verfasser dieser Arbeit leider nicht vor; es kann aber angenommen werden, dass Helmholtzresonator inklusive Leistungsverstärker keinen signifikanten THD unterhalb Schalldruckpegeln von $L_p = 140\text{ dB SPL}$ generieren. Ein Einfluss des vom Lautsprecher bei der spektralen THD-Messung generierten Eigen-THDs ist aufgrund der Auswertung anhand einer Vergleichsmethode mit dem Brüel & Kjaer Typ 2669 Messmikrofon auszuschließen.

⁶¹vgl. [Sengpiel,]

5.2.1.3 Mikrofonrauschen

Das in der Überschrift genannte Mikrofonrauschen schließt als Überbegriff mehrere der in Unterunterabschnitt 2.2.4 definierten Begriffe ein: die Eigenstörspannung, die Geräuschspannung U_{Ger} , den Ersatzgeräuschpegel L_{Ger} und den Geräuschpegelabstand SNR . Dabei ist zu beachten, dass alle diese Begrifflichkeiten auf der Messung der Geräuschspannung U_{Ger} beruhen und sich ausschließlich aus ihr fortpflanzen. Die Geräuschspannung U_{Ger} wird nach der ([IEC 60268-4, 2014]: S. 30 und 47) in einem sogenannten schallgedämmten Messvolumen, welches im deutschsprachigen Raum auch als Rauschbombe bezeichnet wird, gemessen. Dieses Messvolumen ist gegenüber Schall, Wind, Stoß, Vibration und gegen elektrische und magnetische äußere Felder abgeschirmt. Die Resonanzfrequenz dieses Systems sollte unter 10 Hz liegen, damit ein Einfluss dieser im Hörbereich ausgeschlossen werden kann. Die vom Eigenrauschen herrührende bewertete Ausgangsspannung - Geräuschspannung U_{Ger} wird gemessen, indem die bewerteten Messungen nach [IEC 60268-1:1985] verwendet werden. Psophometrische Quasi-Spitzen Spannungsmessungen entsprechend [IEC 60268-1:1985], 6.2.2, werden ebenfalls mit einbezogen und in Tabelle 3 dargestellt.

Auch bei allen rauschbezogenen Messungen wird der Prüfling direkt symmetrisch an das APx525 angeschlossen. Als Eingangsimpedanz wird $R = 200 \text{ k}\Omega$ gewählt und das Mikrofon folglich unbelastet gemessen. Die Bandbreite des APx525 liegt weiterhin bei 90kHz (Samplingrate = 192 kHz), ein Hochpass bzw. AC-Coupling bei $f = 10 \text{ Hz}$ ist eingestellt. Als Tiefpass wirkt lediglich der Bandpass des Analog-Digital-Wandlers, welcher keinen Einfluss auf den hörbaren Bereich hat.

5.2.2 Subjektive Erfassung am Beispiel von Sprache

Mit der im letzten Abschnitt beschriebenen messtechnischen Erfassung grundlegender Qualitätsparameter von Mikrofonen können Rückschlüsse auf den Mikrofonklang gezogen werden. Aber wie der renommierte und weltbekannte Mikrofonhersteller Neumann auf seiner Homepage ausdrückt, müssen auch Hörtests gemacht werden um den Klang eines Mikrofons vollständig beurteilen zu können.⁶²

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit auch ein subjektiver Vergleich der untersuchten Mikrofone in Form eines Hörtests durchgeführt. Hierbei ist jedoch unbedingt darauf zu achten, dass dieser Vergleich lediglich als Ergänzung zu den dargestellten Messergebnissen zu sehen ist. Auf der dieser Arbeit beiliegenden Daten-CD sind alle durchgeführten Tonaufnahmen zu eigenen Vergleichszwecken zu finden. Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse des Hörtests beruhen aufgrund der Vielschichtigkeit der zu klassifizierenden Phänomene und der zeitlichen Beschränkung dieser Arbeit lediglich auf Erkenntnissen eines ausgewählten Experten Hörerkreises und sind folglich wissenschaftlich nicht auf statistischen Erhebungen gewachsen. Bei der Durchführung des Hörtests wurde jedoch inständig darauf geachtet, dass er unvoreingenommen und ohne voriges Wissen der Ergebnisse der messtechnischen Erfassung abgehalten wurde.

⁶²vgl. [Georg Neumann GmbH, 2015]

Um die in den folgenden Kapiteln getätigten subjektiven Aussagen mit der messtechnischen Auswertung in Verbindung zu bringen, sollen folgende Querverbindungen nach [[Görne, 2007]: S. 159] an dieser Stelle dargestellt werden; diese beziehen sich jedoch lediglich auf spektrale Auswertungsaspekte und können nur einen groben Überblick über die möglichen subjektiv empfundenen Klangeindrücke geben:

- Frequenzüberhöhung bei tiefen Frequenzen: Klang *warm, mulmig*
- Frequenzabfall bei tiefen Frequenzen: Klang *dünn*
- Frequenzüberhöhung bei mittleren Frequenzen um 1 kHz: Klang *topfig, aggressiv*
- Frequenzüberhöhung bei mittleren Frequenzen oberhalb von 1 kHz: Klang *präsent, aggressiv*
- Frequenzüberhöhung bei hohen Frequenzen: Klang *hell, spitz*
- Frequenzabfall bei hohen Frequenzen: Klang *dumpf, gedeckt*
- unregelmäßiger, kammfilterartiger Frequenzgang: Klang *hohl, phasig*

Alle Tonaufnahmen wurden mit einem Audient iD14⁶³ und dem beyerdynamic MA-PVA gemacht. Dabei wurde eine Samplingrate von 96 kHz und eine Bittiefe von 24 bit gewählt, um eine möglichst hohe Bandbreite aufzuzeichnen und somit auch mögliche hochfrequente Störungen darstellen zu können. Die subjektive Auswertung fand mit dem halboffenen beyerdynamic DT-880 Pro als Abhöre statt, während ebenfalls das Audient iD14 als Ausgabegerät dient. Die technischen Daten des Audient iD14 unter gegebenem Link zeugen von einer ausreichend guten Performance des Gerätes bei der Signalverstärkung sowie AD- und DA-Wandlung, die an dieser Stelle nicht weiter untersucht werden sollen. Viel kritischer einzustufen ist der elektroakustische Wandler auf der Wiedergabeseite, ein beyerdynamic DT-880 Pro (halboffener ohrumschließender Kopfhörer). Dessen Eigenschaften sind in Abbildung 27 anhand des Frequenzgangs, welcher am künstlichen Ohr bei 1 mW nach [IEC 60318-1] gemessen wurde, dargelegt. Die Kurve wurde mit einem gleitendem Mittelwert über eine 1/3 Oktavband-Breite gemittelt.

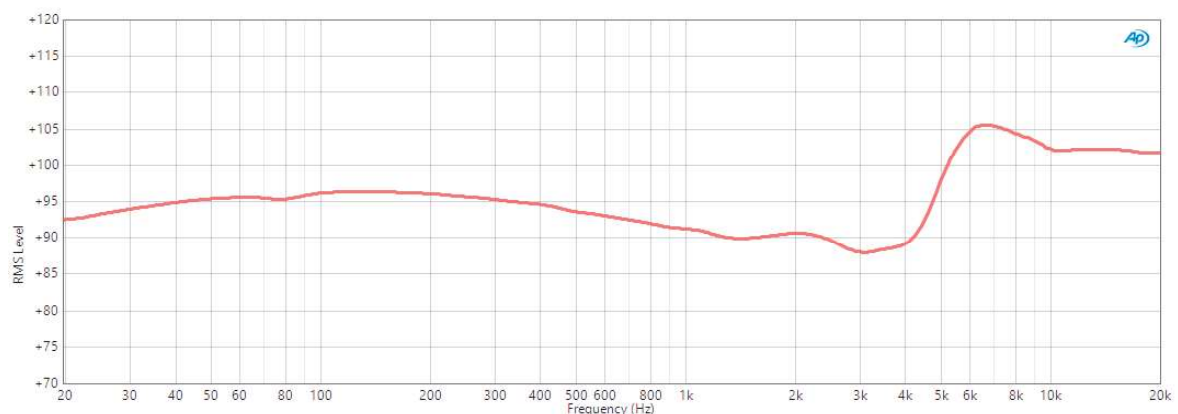


Abbildung 27: Frequenzgang SPL des beyerdynamic DT 880 Pro Ω, gemessen am künstlichen Ohr nach IEC 60318-1 bei 1 mW. Die Kurve wurde mit einem gleitendem Mittelwert über eine 1/3 Oktavband-Breite gemittelt.

⁶³vgl. [Audient Ltd., 2017]

beyerdynamic MA-PVA Der beyerdynamic MA-PVA⁶⁴ ist ein Speisewandler für beyerdynamic Elektretmikrofone. Er wandelt die 48 V Phantomspeisung eines Mikrofonvorverstärkers, welche von Echkondensatormikrofonen benötigt wird, in die von den meisten Elektretmikrofonen benötigte Versorgungsspannung von 5 V um. Dabei findet intern auch eine Spannungsanpassung statt, die die hochohmige Abschlussimpedanz von Elektretmikrofonen an die in der Norm⁶⁵ festgelegte Nennabschlussimpedanz von Mikrofonen (200 Ω) anpasst. Der MA-PVA hat nach einer selbst durchgeführten Messung eine Eingangsimpedanz von 38 $k\Omega$ bei Belastung mit einer bei Elektretmikrofonen üblichen Abschlussimpedanz von 1 $k\Omega$. Somit kommt es bei allen im Abschnitt 4 gelisteten MEMS- und Elektretmikrofonen zu einer Spannungsüberanpassung und somit nicht zu einer Dämpfung des Mikrofonsignals, welche zu einem Verlust im oberen Frequenzbereich des hörbaren Spektrums führen kann. Der MA-PVA wird lediglich im Hörvergleich dieser Arbeit zur Spannungsanpassung an die Eingangsimpedanz des verwendeten Audiointerfaces Audient iD14 verwendet.

Sprache Der Einsatz von Miniaturmikrofonen erfolgt aufgrund ihrer durch die geringe Baugröße bedingten schlechteren akustischen Eigenschaften gerne in Umgebungen, bei denen das Mikrofon versteckt oder möglichst unauffällig platziert werden muss. Eine mögliche Anwendung, welche in dieser Arbeit näher thematisiert werden soll, ist das Nackenbügelmikrofon zur Abnahme von Sprache, ähnlich dem beyerdynamic H56. Aus diesem Grund ist dieser Hörvergleich auch als Vergleich zum besagten beyerdynamic H56 konstruiert. Gesprochene Sprache ist wiederum ein breitbandiges Signal und eignet sich folglich eignet es sich sehr gut, um die Qualität von Mikrofonen zu beurteilen.⁶⁶

Die Aufnahme der Sprache fand mit angezogenem Nackenbügelmikrofon beyerdynamic H56 um das linke Ohr bzw. an der linken Gesichtshälfte und einem an der rechten Gesichtshälfte platzierten MEMS-Mikrofon statt. Dabei wurde mit einem Spiegel in steter Regelmäßigkeit überprüft, dass sich das MEMS-Mikrofon an der selben Position wie das Nackenbügelmikrofon auf der anderen Seite des Mundes befand. Die Position beider Mikrofonkapseln wurde dabei etwa 2 cm vom Mundwinkel entfernt auf Höhe des Mundes im Wangenbereich als eine übliche Position für Nackenbügelmikrofone gewählt. Zur Vermeidung von Popplauten wurde jeweils ein Schaumstoffwindschutz verwendet. Um zwei verschiedene Sprechlautstärken testen zu können, wurde im Abstand von 30 cm direkt vor dem Sprecher ein SPL-Meter aufgebaut. Dieses wurde auf eine A-bewertete Schallpegelmessung mit einer langsamen Zeitbewertung eingestellt. Damit konnten während des Sprechens nun zwei Sprechlautstärken realisiert werden: zum einen eine normale Sprechlautstärke von 64 dB(A) und eine sehr laute Sprechlautstärke von 80 dB(A), welche in jeweils 30 cm Entfernung gemessen wurden.⁶⁷

Der gesprochene Text dieser Aufnahmen beinhaltet Wörter, die laut Duden und gut1.de zu den 100 am häufigsten Vorkommenden in deutschsprachigen Texten zählen. Er ist [Hirt, 2017]

⁶⁴vgl. [beyerdynamic GmbH & Co. KG, 2017]

⁶⁵[IEC 60268-4, 2014]

⁶⁶vgl. [Dickreiter, 2008b]

⁶⁷vgl. [Dickreiter, 2008b]: S. 53

entnommen, der letzteren für die Entwicklung einer virtuellen Konferenz konstruierte. Durch die Wahl dieses Textes kann ausgeschlossen werden, dass sehr seltene Wörter benutzt werden, welche eine Mikrofonbauart besser abbilden kann. Im Rahmen dieser Arbeit kann lediglich ein Test mit deutscher Sprache durchgeführt werden. Andere Sprachen, die sich aufgrund ihrer Phonetik stark von der deutschen Sprache unterscheiden, können an dieser Stelle nicht getestet werden. Des Weiteren wird eine Eingrenzung auf eine männliche Stimme vollzogen. Prinzipiell ist zu beachten, dass verschiedene menschliche Stimmen möglicherweise mit verschiedenen Mikrofonen besser harmonieren und einen der Empfindung nach besseren Klang erzeugen.⁶⁸ Dies untermauert nochmals den eher ergänzenden Stellenwert der subjektiven Erfassung in dieser Arbeit. In Anhang kann der gesprochene Text unter F eingesehen werden.

5.3 Beobachtungen und Ergebnisse

5.3.1 Messtechnische Erfassung

5.3.1.1 Übertragungsfaktor und Frequenzgang

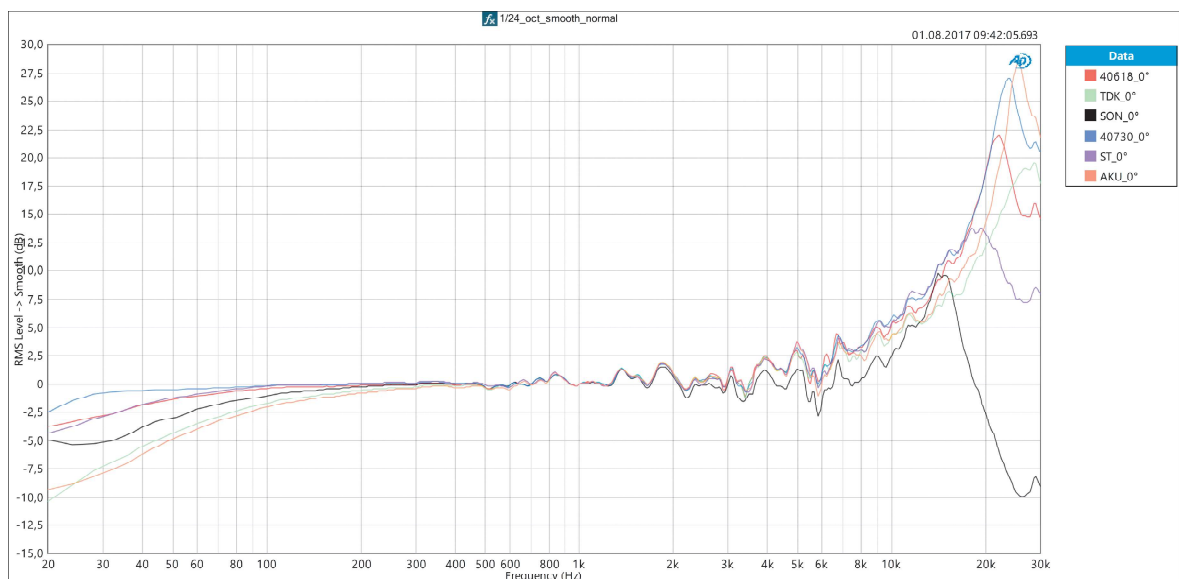


Abbildung 28: 0°-Frequenzgang aller getesteten MEMS-Mikrofone bei Versorgungsspannung mit bestem THD-Verlauf

Die in diesem Kapitel befindlichen Abbildungen der Frequenzgänge benutzen Abkürzungen für die einzelnen Mikrofone in ihren Legenden. Es gilt für alle MEMS-Mikrofone: 40618 = InvenSense ICS-40618, TDK = TDK T4071, SON = Sonion O11BC03, 40730 = InvenSense ICS-40730, ST = STMicroelectronics MP23AB01DH und AKU = Akustica BMU563R. Für alle ECM gilt: 89PC01 = Sonion 89PC01, 8044 = Sonion 8044, DT291 = beyerdynamic DT291 PV MKII und H56 = beyerdynamic H56.

In Abbildung 28 sind die 0°-Frequenzgänge (Betragsfrequenzgänge) aller getesteten MEMS-Mikrofone dargestellt. Dabei ist die Versorgungsspannung bereits so gewählt, dass das Rauschenverhalten und besonders des THD-Verhalten optimale Werte annehmen; das heißt es gilt

⁶⁸vgl. [Görne, 2007]: S. 177

Mikrofon	Versorgungs- spannung [V]	Übertragungs- faktor [mV/Pa]	Übertragungs- bereich (-3dB) [Hz]	Grenzschalldruckpegel bei 1 % THD [dB SPL]	SNR [dB (A, RMS)]	SNR [dB (CCIR, Q-Peak)]
MEMS-Mikrofone						
InvenSense ICS-40618	3.5	12	30 - 8000	121	65	54
InvenSense ICS-40730	3.5	25	20 - 8000	118	72	60
Sonion O11BC03	1.4	13	50 - 10000	113	68	56
Akustica BMU563R	3.5	12	80 - 8000	123	64	53
STMicroelectronics MP23AB01DH	3.5	13	30 - 8000	122	65	52
TDK T4071	3.5	13	70 - 8000	132	64	52
ECM						
beyerdynamic H56	5	7	50 - 20000	126	59	46
beyerdynamic DT291 PV MKII	5	7	20 - 20000	138	59	47
Sonion 8044	4.9	6	60 - 20000	128	60	48
Sonion 89PC01	3.5	27	75 - 18000	113	70	56

Tabelle 3: MEMS-Mikrofone und ECM: Kenndaten

$U_{\text{Versorgung}} = 3,5 \text{ V}$ und für das Sonion O11BC03 gilt $U_{\text{Versorgung}} = 1,4 \text{ V}$. Aus diesen Frequenzgangsmessungen unter Leerlaufbedingungen werden auch die Leerlaufübertragungsfaktoren bei $f = 1 \text{ kHz}$ bestimmt, die in Tabelle 3 zu finden sind.

Die dargestellten Frequenzgänge sind alle auf 0 dB normalisiert und mit einem gleitenden Mittelwert in einer 1/24-Oktavbandbreite geglättet. Dabei wurde absichtlich keine stärkere Glättung gewählt, um die sogenannte Mikrostruktur noch erkennen zu können. Eine stärkere Glättung ist jedoch durchaus üblich. Trotz der Glättung über 1/24-Oktavbandbreite fällt bei allen Mikrofonen eine deutliche Welligkeit von etwa $\pm 2 \text{ dB}$ im Bereich von 1,5 bis 7 kHz auf. Diese Welligkeit ist auch noch im Bereich ab 7 kHz zu erkennen, jedoch in deutlich geringerer Ausprägung. Prinzipiell sind aber keine breitbandigen und starken Einbrüche und Überhöhungen zu verzeichnen. Da alle Mikrofone diese Welligkeit in nahezu identischer Form aufweisen, sollte in einem ersten Schritt von einem systematischen Messfehler ausgegangen werden; dieser könnte durch Abschattungseffekte und bzw. oder durch einen zu groß gewählten Abstand zwischen Referenz und Prüfling bei der Komperationsmethode begründet sein, der in dieser Form als Fehler in der Abschätzung der Messunsicherheiten nicht betrachtet worden ist. Weitere Messungen mit anders gewählter Platzierung der Mikrofone und Nutzung der Substitutionsmethode zeigten andere, jedoch ähnlich wellige Ergebnisse. Es ist also von fundamentalen Messproblemen im Messraum auszugehen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter erörtert werden können.

Die ersten getätigten Messungen des Frequenzgangs in den Grenzen des menschlichen Hörbereichs von 20 Hz bis 20 kHz zeigten ab etwa 8 kHz einen starken Anstieg, der für beide InvenSense Modelle sogar bis zu einer Überhöhung von 20 dB bei 20 kHz reichte. Da der Verlauf recht glockenförmig in Erscheinung trat, wurde entschlossen den Messbereich auf 20 Hz bis 30 kHz auszuweiten. Diesen Bereich kann sowohl das Messsystem APx525 als auch das Wiedergabesystem ohne Weiteres abdecken. Somit sind nun die bereits erwähnten, nahezu für alle Mikrofone gleichförmigen Anstiege ab 3 kHz in vollem Umfang zu erkennen. Es können Überhöhungen von bis zu 29 dB (Akustika BMU563R) gemessen werden, die jedoch bis auf das STMicroelectronics MP23AB01DH und das Sonion O11BC03 alle außerhalb des Hörbereichs über 20 kHz liegen. Betrachtet man die maximale Überhöhung innerhalb des Hörbereichs, hat das Sonion O11BC03 mit etwa 9 dB bei 15 kHz die geringsten Abweichungen vom linearen Verlauf. Das STMicroelectronis MP23AB01DH besitzt sein Maximum bei etwa 19 kHz mit einer Stärke von 14 dB und beginnt danach im Hörbereich wieder zu fallen. Von den Modellen, die ihr Überhöhungsmaximum oberhalb von 20 kHz haben, zeigt das TDK T4071 mit 12,5 dB bei 20 kHz den geringsten Anstieg, während beide InvenSense Modelle am steilsten ansteigen und einen etwa 19 dB größeren Pegel bei 20 kHz liefern. Die möglichen Ursachen dieser Überhöhung sollen unter Unterabschnitt 5.4 diskutiert werden.

Betrachtet man den Bereich tiefer Frequenzen fallen Unterschiede in den Frequenzgängen der verschiedenen Mikrofone auf: Das TDK T4071 sowie das Akustika BMU563R erreichen den -3 dB-Punkt bei etwa 70 bzw. 80 Hz, während das Sonion O11BC03 noch bis 50 Hz herunter reicht. Das InvenSense ICS-40618 sowie das STMicroelectronis MP23AB01DH liefern -3B bei 30 Hz und das InvenSense ICS-40730 schafft es laut Frequenzschrieb sogar bis 20 Hz herunter.

Dabei setzen die Änderungen im Bassbereich bereits bei 300 Hz (-3 dB bei 80/70/50 Hz), sowie 100 Hz (-3 dB bei 30 Hz) ein, während das InvenSense ICS-40730 recht steilflankig erst bei etwa 30 Hz mit der Empfindlichkeit in eben diesem Bereich nachlässt. Diese Werte müssen aufgrund der unteren Grenzfrequenz von 70 Hz im für die Messungen benutzen reflexionsarmen Raum jedoch mit einem großen Fehler beaufschlagt werden und sind somit nur Schätzwerte.

Wie im einleitenden Teil dieses Kapitels beschrieben wurde zu Beginn der Untersuchungen zum Frequenzgang der MEMS-Mikrofone eine Abhängigkeit des Letzteren von der Versorgungsspannung untersucht. Dabei konnte bei fünf MEMS-Mikrofonen keine Abhängigkeit von der Versorgungsspannung festgestellt werden, das Sonion O11BC03 zeigte jedoch einen Anstieg der Empfindlichkeit frequenzspezifisch von etwa 0,5 dB bei der Erhöhung der Versorgungsspannung von 0,9 V auf 1,4 V.

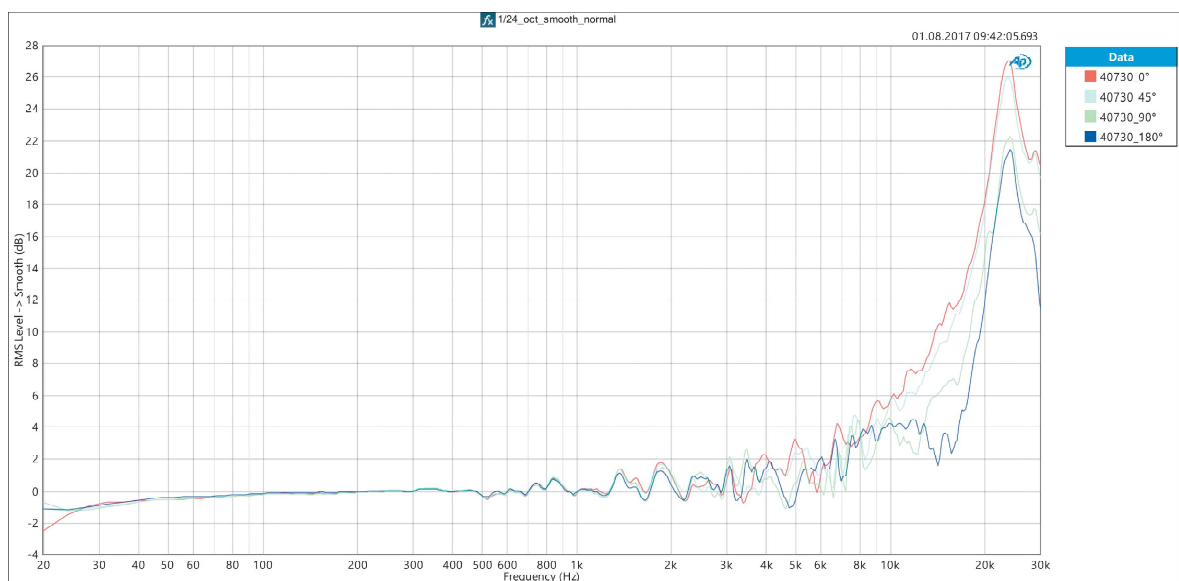


Abbildung 29: 0°-, 45°-, 90°- und 180°-Frequenzgang des InvenSense ICS-40730

Neben dem 0°-Frequenzgang wurden auch Frequenzgänge bei 45°, 90°, 135° und 180° gemessen. Besonderes Augenmerk lag hierbei auf der Betrachtung und Analyse des Vorwärts- und Rückwärtsfrequenzgangs, da diese bei Druckempfängern durch Abschattung von Schall und den Druckstauereffekt entartet werden können und folglich keinen gänzlich frequenzunabhängigen Druckempfänger mehr ausbilden. Bei allen MEMS-Mikrofonen zeigt sich bei 14 bis 17 kHz ein recht starker Einbruch von etwa 8 dB. Bis 10 kHz sind Vorwärts- und Rückwärtsfrequenzgang nahezu gleichförmig, ehe sich ein Empfindlichkeitsverlust bis zu den erwähnten 8 dB im Rückwärtsfrequenzgang entwickelt. Auf den starken Einbruch folgt wiederum eine Annäherung der Kurven bis auf etwa 1 dB, die sich jedoch bei der bereits beschriebenen Überhöhung wiederum auf 2 bis 6 dB zwischen Vorwärts- und Rückwärtsfrequenzgang je nach Mikrofon erhöht. Etwas anders ist die Performance des STMicroelectronics MP23AB01DH an dieser Stelle zu beschreiben, dessen Rückwärtsfrequenzgang nach einem starken Einbruch bei 14 kHz einen Abstand von etwa 3 bis 4 dB zum Vorwärtsfrequenzgang besitzt und auch die folgende Überhöhung im Vergleich zum Vorwärtsfrequenzgang etwas verschoben ausbildet. Das Sonion O11BC03 besitzt seine Überhöhung genau in dem Bereich, in dem im Rück-

wärtsfrequenzgang starke Einbrüche zu verzeichnen sind, sodass diese ebenfalls um etwa 8 dB gedämpft ist. Exemplarisch sein nun in Abbildung 29 der Vorwärts- und Rückwärtsfrequenzgang des InvenSense ICS-40730 in den Farben rot und blau dargestellt. Dieser zeigt neben dem bereits beschriebenen alle MEMS-Mikrofone betreffenden Verhalten eine etwa 2 dB starke doppelte Vertiefung im Einbruch bei 15 kHz, die sonst in keinem Mikrofon zu finden ist. Abbildung 29 zeigt des Weiteren auch beispielhaft den typischen Verlauf der 45°- und 90°-Frequenzgänge der MEMS-Mikrofone anhand des InvenSense ICS-40730. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass 0°- und 45°-Frequenzgang nahezu identisch verlaufen, ehe es dann ab 90° zu einer stärkeren Abschwächung ab etwa 10 kHz kommt, die sich ähnlich auch im 135°- und 180°-Frequenzgang äußert. Der 135°-Frequenzgang ist in Abbildung 29 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

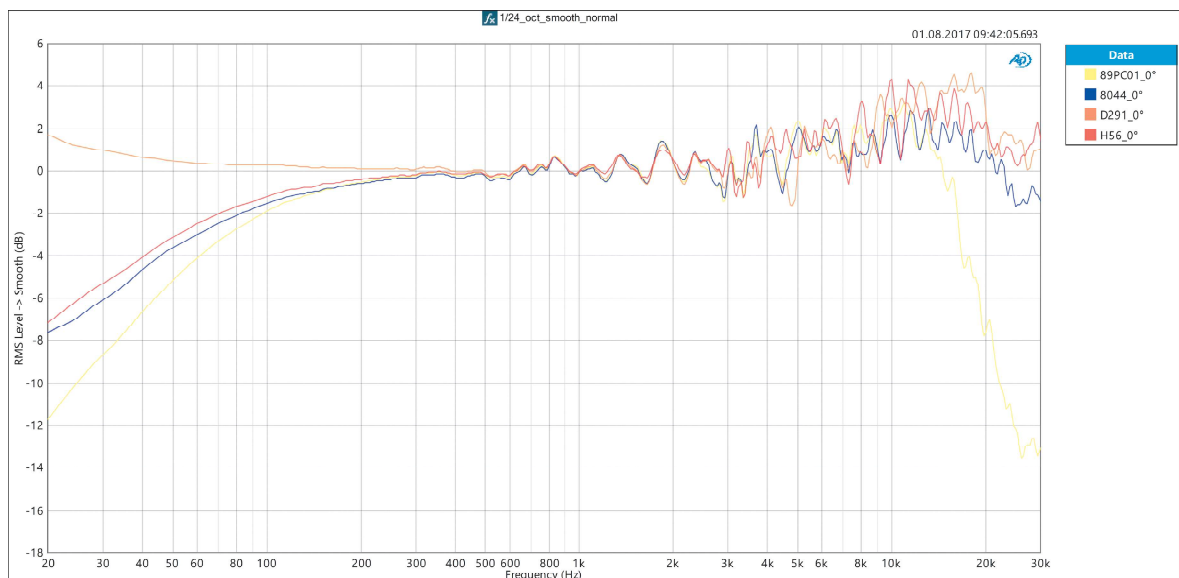


Abbildung 30: 0°-Frequenzgang aller getesteten ECM bei Versorgungsspannung mit bestem THD-Verlauf

In Abbildung 30 sind die 0°-Frequenzgänge aller getesteter ECM (ebenfalls normalisiert und mit einem gleitenden Mittelwert in einer 1/24-Oktavbandbreite geglättet) dargestellt. Es fällt sofort auf, dass diese nicht die MEMS-typischen Überhöhungen aufweisen. Sie besitzen generell einen deutlich lineareren Frequenzgang, obwohl auch hier die starke durch systematische Messfehler bedingte Welligkeit im Bereich von ± 2 dB in Erscheinung tritt. Ab etwa 3 kHz zeigt sich jedoch auch eine allmählichen Erhöhung um 2 bis 4 dB, die bei 10 kHz erreicht ist und bis 20 kHz (und somit bis zum Ende des menschlichen Hörbereichs) andauert. Hier ist das Sonion 89PC01 herauszunehmen, welches ab bereits 12 kHz wieder steil abfällt und -7,5 dB bei 20 kHz liefert.

Im Bassbereich zeigen sich deutliche Unterschiede: Die kompakten ECM Bauformen beyerdynamic H56, Sonion 8044 und Sonion 89PC01 liefern -3 dB, -3,5 dB bzw. sogar nur -5 dB bei 50 Hz, während das beyerdynamic DT291 PV MKII bei 20 Hz sogar einen Anstieg von 2 dB verzeichnet. Diese fallenden Veränderungen im Tiefmitten- und Bassbereich setzen bei den ECM recht früh ein und beginnen bereits ab 300 Hz mit einer allmählichen Reduktion der Empfindlichkeit.

Wie alle untersuchten MEMS-Mikrofone wurden die 3-poligen ECM Sonion 8044 und 89PC01

mit unterschiedlichen Versorgungsspannungen innerhalb des in den elektrischen Kenndaten vorgegebenen Bereichs näher betrachtet. Dabei fällt auf, dass mit höherer Versorgungsspannung ein Anstieg in den Höhen zu verzeichnen ist. In Abbildung 31 ist beispielhaft der 0° -Frequenzgang des Sonion 8044 bei zwei unterschiedlichen Versorgungsspannungen am unteren sowie oberen Ende des laut der elektrischen Kenndaten erlaubten Bereichs dargestellt ($U_{\text{Versorgung blau}} = 0,9 \text{ V}$, $U_{\text{Versorgung rot}} = 4,9 \text{ V}$), welcher einen allmählichen Anstieg um etwa 3 dB ab 4 kHz zeigt.

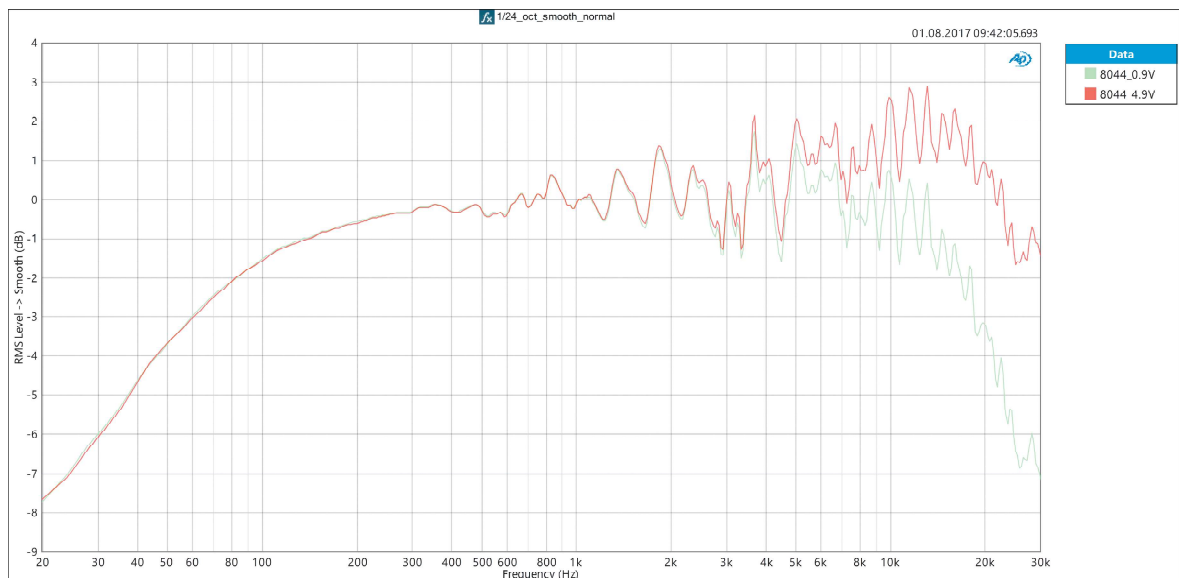


Abbildung 31: 0° -Frequenzgang des Sonion 8044 bei zwei unterschiedlichen Versorgungsspannungen am unteren sowie oberen Ende des laut der elektrischen Kenndaten erlaubten Bereichs ($U_{\text{Versorgung blau}} = 0,9 \text{ V}$, $U_{\text{Versorgung rot}} = 4,9 \text{ V}$)

Bei der Betrachtung der richtungsspezifischen Frequenzgänge zeigen die ECM deutlich weniger unterschiedliche Verläufe als die MEMS-Mikrofone. Es kommt zu maximalen Abweichungen im Bereich von 2 bis 3 dB und keinen auffälligen Einbrüchen wie es zum Beispiel bei den MEMS-Mikrofonen im Bereich um 15 kHz der Fall ist. Beispielhaft sei im Folgenden der Vorwärts- und Rückwärtsfrequenzgang des Sonion 8044 in Abbildung 32 dargestellt.

5.3.1.2 Klirrfaktor (THD) und Grenzschalldruckpegel

THD+N Verläufe In den folgenden sechs Abbildungen sind die THD+N-Verläufe der getesteten MEMS-Mikrofone bei unterschiedlichen Versorgungsspannungen innerhalb der den Datenblättern entnommenen Spannungsbereiche dargestellt. Die Rauten in den Graphen stellen dabei die einzelnen Messpunkte dar. Im Folgenden wird statt THD+N nur von THD gesprochen. Es sind keine signifikanten Unterschiede zwischen der Messung des THD+N und des THD zu erwarten, da das Rauschen bei unterschiedlichen Versorgungsspannungen $U_{\text{Versorgung}}$ wie in Absatz 5.3.1.3 dargestellt nicht signifikant variiert. Die einzelnen MEMS-Mikrofone erreichen zwar - ebenfalls unter Absatz 5.3.1.3 zu lesen - unterschiedliche Rauschwerte, aber dessen Einfluss kann nach den Berechnungen des THD+N ebenfalls als vernachlässigbar angenommen werden. Die Angabe des THD+N ist mittlerweile gebräuchlicher und kann als

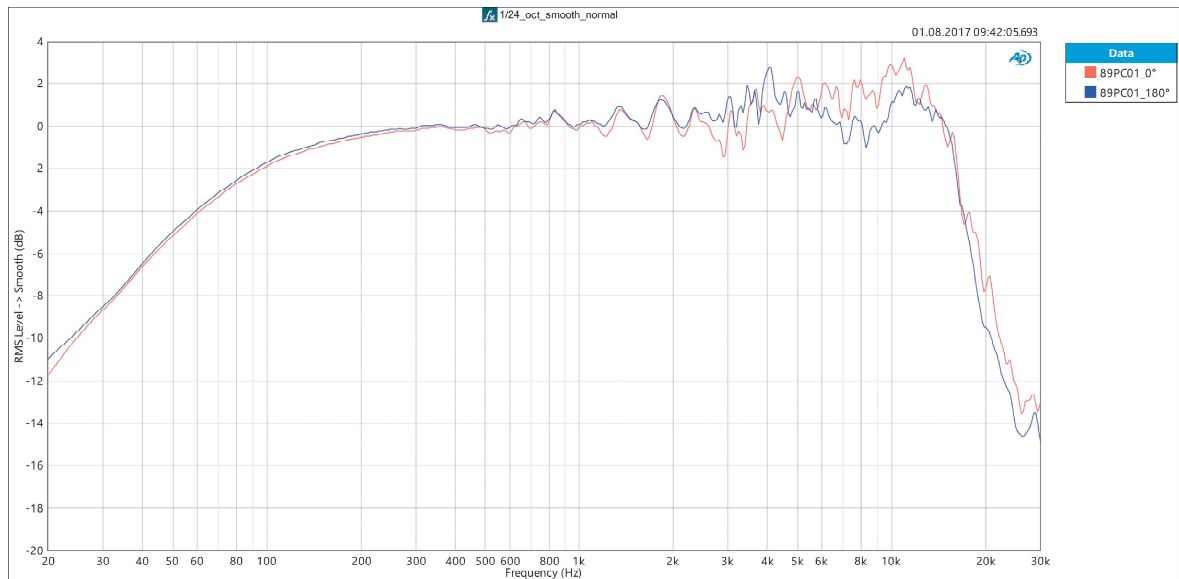


Abbildung 32: 0°- und 180°-Frequenzgang des Sonion 89PC01

sinnvoller betrachtet werden, da so auch die viel wahrnehmbaren breitbandigen Störungen erfasst werden und nicht nur die einzelnen Harmonischen.⁶⁹

Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Modellen der verschiedenen Hersteller, sowohl bei den typischen Werten für den Grenzschalldruckpegel $\text{THD} = 1\%$, sowie auch in den Verlaufsformen der Kurven. In Tabelle XXX wird eine Auflistung der erreichten Grenzschalldruckpegel bei $\text{THD} = 1\%$ gegeben. Klar herauszustellen ist jedoch, dass alle betrachteten MEMS-Mikrofone mit zunehmender Versorgungsspannung $U_{\text{Versorgung}}$ länger verzerrungsfrei arbeiten, sofern es nicht zu einem bei allen $U_{\text{Versorgung}}$ gleichbleibendem Verzerrungsverhalten kommt.

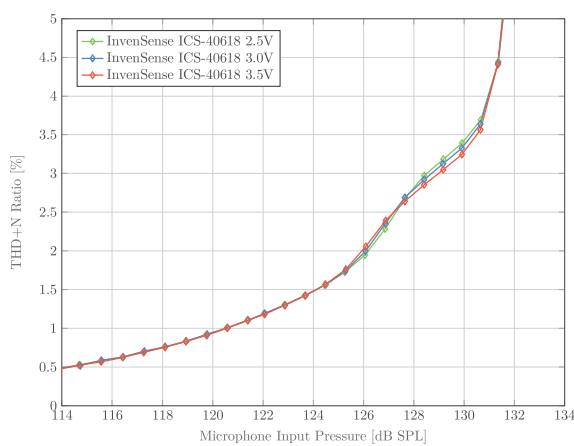
Beide InvenSense Modelle, das ICS-40618 und das ICS-40730, zeigen eine vergleichsweise flach ansteigende, leicht gebogene Kurve. Dabei kann beim ICS-40618 erst bei etwa 2% THD und einem Schalldruckpegel von 126 dB SPL am Mikrofon ein deutlicher Anstieg der Steigung festgestellt werden; dieser nimmt zunächst jedoch keinen typischen stark steigenden linearen, sondern einen beinahe kubischen Verlauf, ehe er bei $131,5\text{ dB SPL}$ stark linear ansteigt. Das Mikrofon zeigt also bis zu etwa 126 dB SPL einen allmählichen Anstieg von THD, der damit möglicherweise recht unauffällig hörbar zunimmt. Das ICS-40730 zeigt nach ähnlich flachem Anstieg zu Beginn bei bereits etwa 118 dB SPL und 1% THD einen deutlich steileren Anstieg, der ab 120 dB SPL und 2% THD nahezu senkrecht verläuft. Der THD bei einer Versorgungsspannung von $U_{\text{Versorgung}} = 1,5\text{ V}$ verläuft im Bereich von 112 bis 116 dB SPL wohl durch einen Messfehler begründet so unregelmäßig wie dargestellt.

Beim Sonion O11BC03 kommt es zu einem allmählichen, nahezu linearen Anstieg des THD bis etwa 117 dB SPL bei $1,5\%$ THD, ehe die Verzerrungswerte sehr steil ansteigen. Das Akustika BMU563R zeigt ein auffälliges Verhalten in diesem Vergleich, da es bis zu - im Falle einer angelegten Versorgungsspannung von $U_{\text{Versorgung}} = 3,5\text{ V}$ - einem Schalldruckpegel von 122 dB SPL äußerst geringe Verzerrungswerte im Bereich von $0,2$ bis $0,25\%$

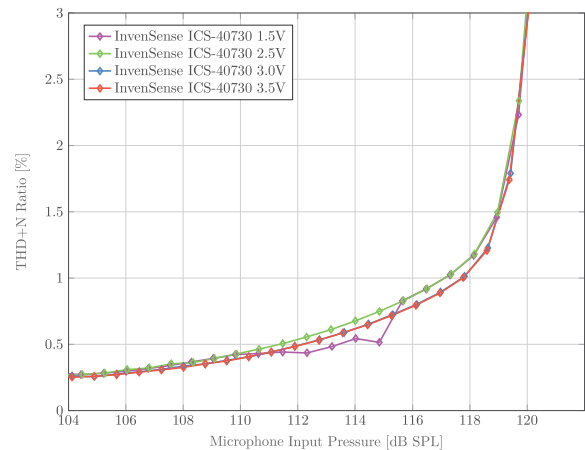
⁶⁹[Weinzierl, 2008]: S. 1146

liefert. Danach ist ein plötzlich einsetzender linearer Anstieg mit hoher Steigung zu verzeichnen.

Das STMicroelectronics MP23AB01DH zeigt einen sehr speziellen Verlauf, der sich bis zu 0,5 % THD und 121 dB SPL sehr flach verhält, es dann zu einem steilen linearen Anstieg bis zu beinahe 2 % THD bei 122,5 dB SPL kommt und die Verzerrungswerte danach wieder sinken bis zu 124,5 dB SPL und 1,6 % THD. Darauf folgt ein flacherer Anstieg als zuvor. Dieses Mikrofon zeigt also ähnlich wie das Akustica BMU563R eine starke Nichtlinearität im Verlauf in Form eines *Knicks* bereits unter bzw. im Bereich von 0,5 % THD. Beide Mikrofone sind also auf eine sehr weit reichende Verzerrungsarmut unter dem für Studiomikrofone gebräuchlichen Grenzwert bei 0,5 % THD für den Grenzschalldruckpegel konstruiert. Das TDK T4071 reiht sich in die eben erwähnte Reihe von Mikrofonen ein, da es bei etwa 0,6 % THD und 132 dB SPL (oder sogar nur 0,5 % THD bei 129,75 dB SPL für $U_{\text{Versorgung}} = 1,6 \text{ V}$) den sehr steilen Anstieg von Verzerrungen verzeichnet. Dieses Mikrofon ist besonders herauszustellen, da es den höchsten Schalldruckpegel bei maximal 1 % THD wiedergeben kann und dabei sogar bei 132 dB SPL lediglich 0,6 % THD liefert.

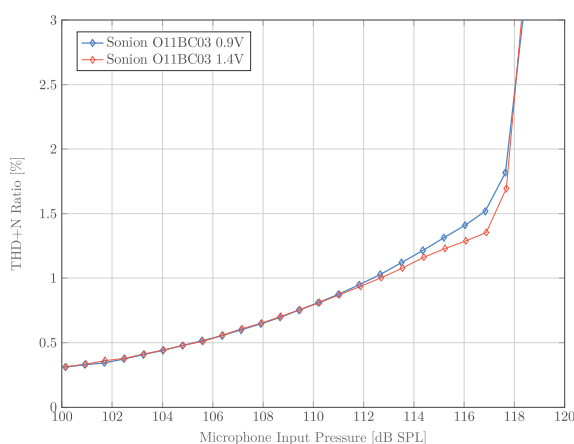


(a) InvenSense ICS-40618

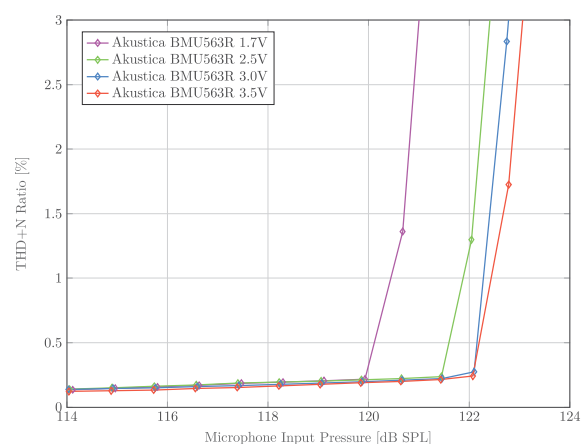


(b) InvenSense ICS-40730

Abbildung 33: MEMS-Mikrofone: THD-Verläufe 1

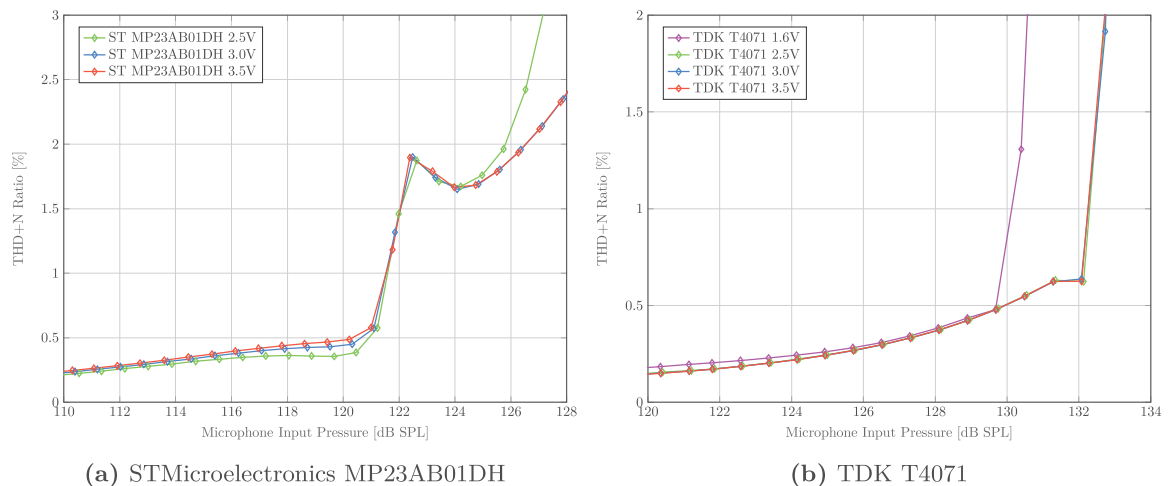


(a) Sonion O11BC03



(b) Akustica BMU563R

Abbildung 34: MEMS-Mikrofone: THD-Verläufe 2



(a) STMicroelectronics MP23AB01DH

(b) TDK T4071

Abbildung 35: MEMS-Mikrofone: THD-Verläufe 3

Die Miniaturelektretmikrofone zeigen insgesamt ein weniger auffälliges und vielfältiges Verhalten, was den THD+N-Verlauf betrifft. Das beyerdynamic H56 liefert einen flach, nahezu linear, jedoch leicht gebogen ansteigenden Verlauf bis zu exakt 1 % THD bei 126 dB SPL, ehe es zu einem typischen sehr steilen Anstieg kommt. Das beyerdynamic DT 291 PV MKII zeigt einen ähnlichen Verlauf, der sich jedoch kurz vor 0,8 % THD bei 137,5 dB SPL wieder etwas absenkt. Danach folgt der übliche sehr steile Anstieg.

Beide Sonion Miniaturelektretmodelle zeigen eine starke Abhängigkeit von der Versorgungsspannung $U_{\text{Versorgung}}$, was das Verzerrungsverhalten betrifft. Auffällig ist hier, dass mit höherer Spannung auch der THD-Verlauf eine andere Form annimmt. Die Verläufe beider Modelle 8044 und 89PC01 sind bei $U_{\text{Versorgung}} = 0,9 \text{ V}$ gebogen und beinahe halb-parabelförmig, während bei höherer und maximal zulässiger Versorgungsspannung eine Art *Knick* in der Kurve kurz vor dem sehr steilen Anstieg zum Ende des maximal übertragbaren Schalldruckpegels entsteht. Im Bereich vor diesem *Knick* werden die Verläufe flacher. Bei hoher Versorgungsspannung nähern sie sich auch der Form der beiden beyerdynamic Modelle mit optimal eingestelltem Arbeitswiderstand an; man kann somit festhalten, dass bei den dreipoligen Sonion-Miniaturelektretmodellen mit bereits eingebautem Arbeitswiderstand letzterer so dimensioniert ist, dass er den Impedanzwandler bei größtmöglicher Versorgungsspannung vom Arbeitspunkt her optimal einstellt. Das Sonion 8044 ($U_{\text{Versorgung}} = 4,9 \text{ V}$) erreicht generell höhere maximale Schalldruckpegel und ist mit 1 % THD bei 128 dB SPL ähnlich leistungsstark wie das beyerdynamic H56. Beim Sonion 89PC01 ist auch bei höherer Versorgungsspannung der Kurvenverlauf noch halb-parabelförmig und liefert somit einen weniger harten und plötzlichen Anstieg der Verzerrungen. Bei 1 % THD und 113 dB SPL ist jedoch auch ein Anstieg der Steigung zu erkennen.

THD-Zusammensetzung In Abbildung 38 bis Abbildung 42 sind die Anteile geradzahlgiger (H2, H4, H6, H8 und H10) und ungeradzahlgiger (H3, H5, H7 und H9) Harmonischer im Verhältnis zur Grundfrequenz bzw. der 1. Harmonischen $f = 1 \text{ kHz}$ (F) bei THD = 1 % dargestellt. H2 entspricht somit $f = 2 \text{ kHz}$, H3 = 3 kHz und so weiter. Bei der Betrachtung und dem Vergleich der Abbildungen ist unbedingt auf die Achsenskalierung der Ordinate zu achten, da sie nicht einheitlich ist.

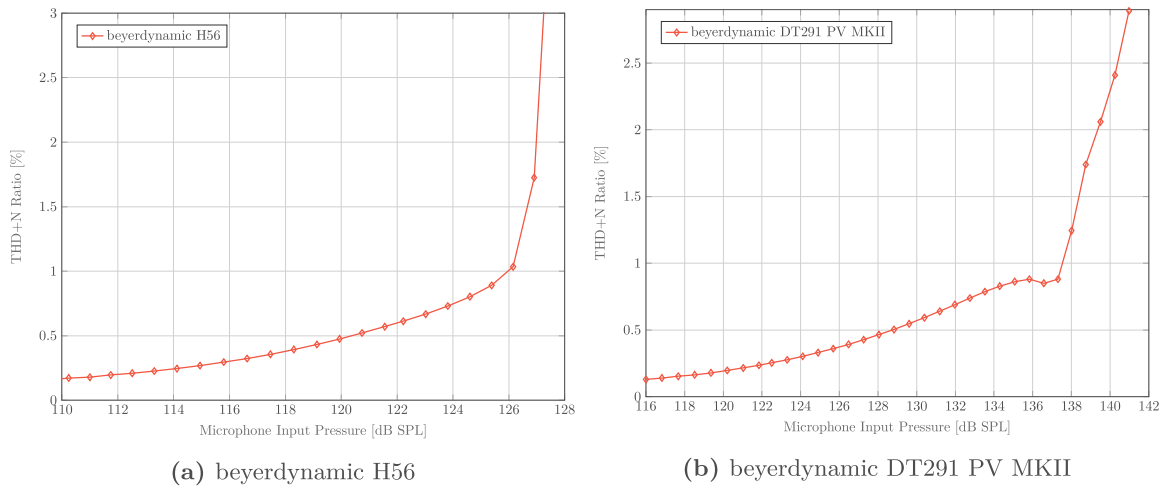


Abbildung 36: ECM: THD-Verläufe 1

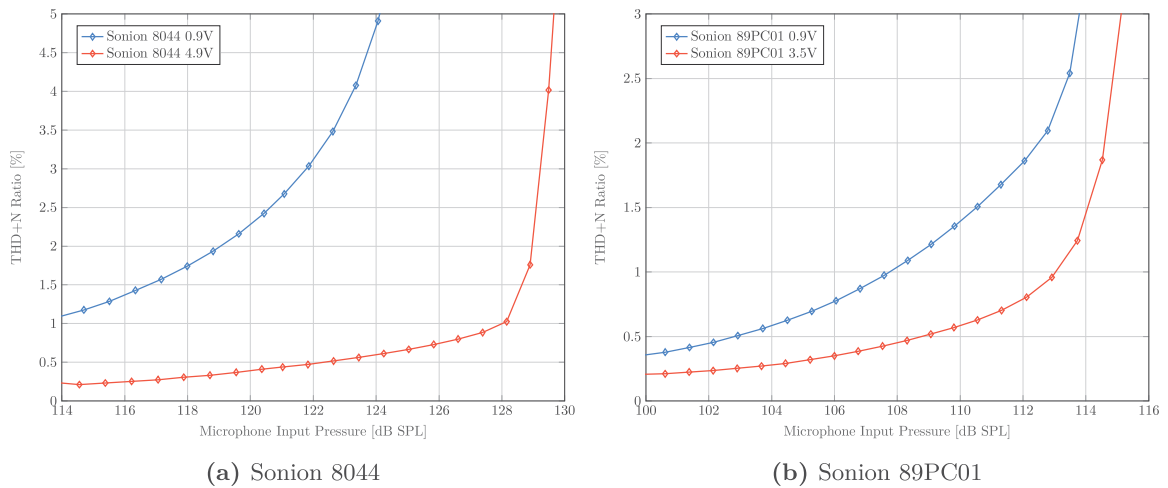


Abbildung 37: ECM: THD-Verläufe 2

Des Weiteren ist der Fehler der THD-Messung unbedingt in Betracht zu ziehen, welcher durch das Eigen-THD des APx525 Messsystems begrenzt ist: Es sind folglich keine signifikanten Messergebnisse ab -107 dB Dämpfung zur Grundschwingung F mehr zu erwarten. IN DER FOLGENDEN ANALYSE UND BEOBACHTUNGSDARSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE WERDEN MESSGRÖSSEN IN EBEN DIESEM BEREICH ZUR BESSEREN BESCHREIBUNG ZWAR ERWÄHNT, EINE AUSSAGE KANN DIESEN JEDOCH NICHT MEHR BEIGEMESSEN WERDEN.

Bei beiden InvenSense Modellen, dem ICS-40618 und dem ICS-40730, kommt es zu einer prinzipiell abfallenden Ausprägung aller Harmonischer mit H2 bei -40 dB und H10 bei etwa -115 dB zur Grundfrequenz $f = 1$ kHz (F). Jedoch ist die starke Ausbildung der ungeradzahigen Harmonischen ab H5 auffällig, die wesentlich stärker in Erscheinung treten als die höheren geradzahigen Anteile ab H4. H3 ist trotzdem geringer ausgeprägt als H2; beim InvenSense ICS-40730 jedoch lediglich etwa 10 dB niedriger. Das Sonion O11BC03 zeigt eine ähnliche Abstufung beginnend mit H2 in einem Verhältnis von -40 dB zu F, wobei hier die ungeradzahigen Harmonischen erst ab H7 eine stärkere Ausprägung zeigen als die Geradzahigen. H10 ist bei -108 dB zu F zu finden. Akustikas BMU563R besitzt ein deutlich gleichförmiger ausgeprägtes Obertonspektrum mit Harmonischen geradzahiger sowie ungeradzahiger Art

in Abstufungen von 1 bis maximal 5 dB, sodass zwischen H2 und H10 über alle Harmonischen hinweg lediglich eine Dämpfung von 11 dB zu verzeichnen ist. H2 liegt hier 6 dB niedriger als bei den bereits betrachteten InvenSense Modellen und dem Sonion O11BC03 bei -46 dB zur Grundfrequenz F. H10 ist folglich bei -57 dB zu finden. Das STMicroelectronics MP23AB01DH zeigt einen abfallenden Verlauf der Harmonischen, der jedoch nicht so stark ausgeprägt ist wie bei InvenSense oder Sonion und bei H10 mit -72,5 dB endet. H2 liegt bei -42,5 dB zur Grundfrequenz F. Somit sind die Harmonischen generell gleichmäßiger ausgeprägt; lediglich die starke Ausprägung von H5 im Vergleich zu H4 ist auffällig und stört den ansonsten konstant fallenden Charakter der Verteilung. Das TDK T4071 liefert mit H2 bei -58 dB zu F den größten Abstand zur ersten Harmonischen. Im weiteren Verlauf steigt die Ausprägung der Harmonischen bis zu H4 sogar an, ehe sie wieder leicht fallen und mit H10 bei -58 dB in gleicher Ausprägung wie H2 abschließen. Interessant ist, dass es beim TDK T4071 im Gegensatz zu allen anderen untersuchten MEMS-Mikrofonen sogar zu einer stärkeren Ausprägung von H3 im Vergleich zu H2 kommt.

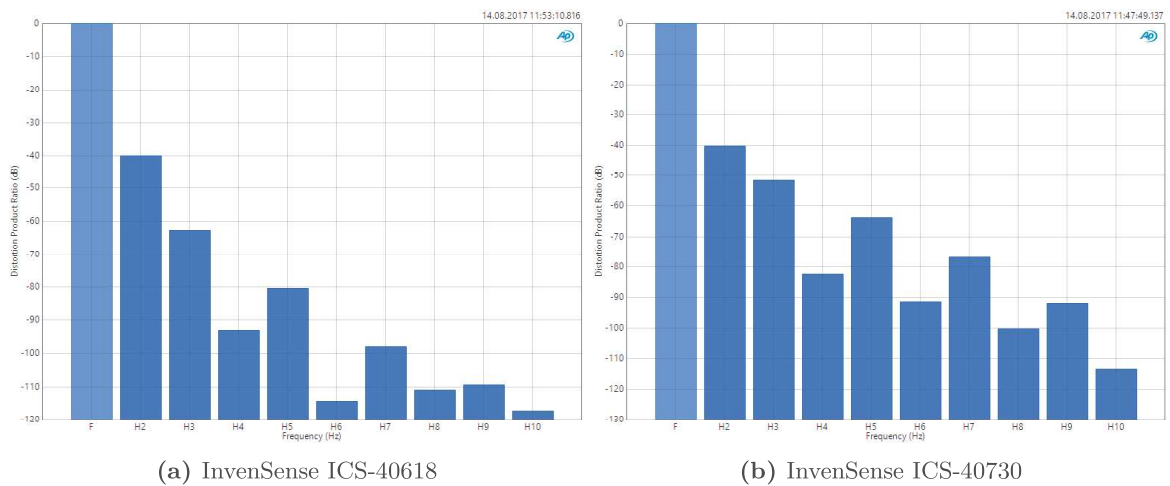


Abbildung 38: MEMS-Mikrofone: Anteile geradzahlicher und ungeradzahlicher Harmonischer bei $f = 1$ kHz und THD = 1 % - Teil 1

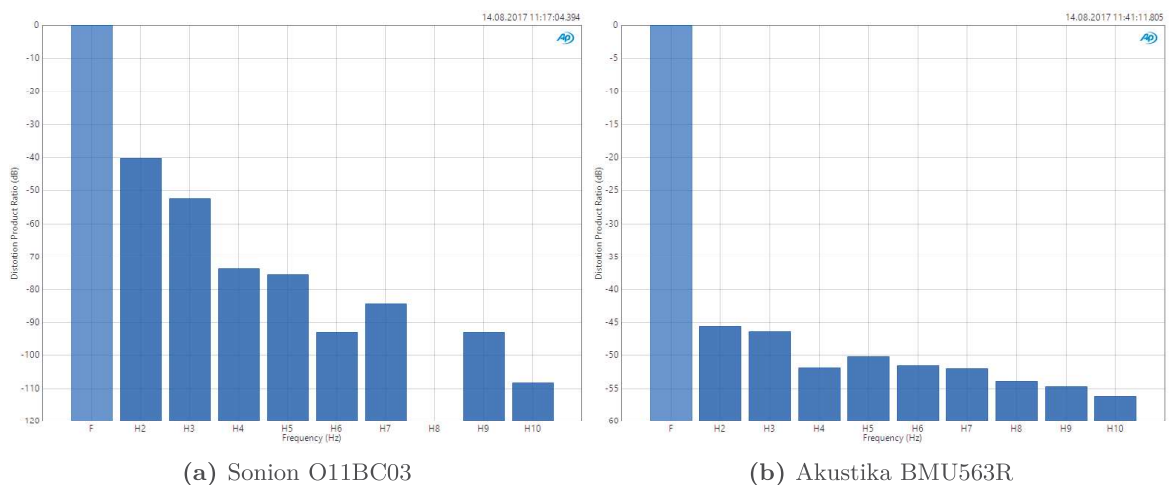


Abbildung 39: MEMS-Mikrofone: Anteile geradzahlicher und ungeradzahlicher Harmonischer bei $f = 1$ kHz und THD = 1 % - Teil 2

Nun sollen die Ergebnisse der Messungen für die Miniaturelektretmikrofone in ähnlicher Weise kurz dargestellt werden: Das beyerdynamic H56 liefert ein sehr ähnliches Obertonspektrum

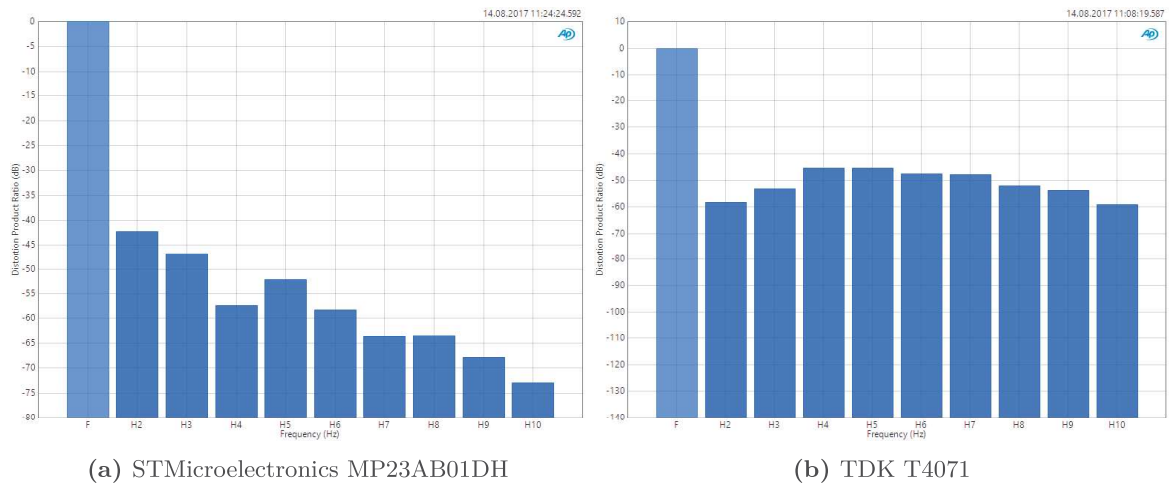


Abbildung 40: MEMS-Mikrofone: Anteile geradzahlicher und ungeradzahlicher Harmonischer bei $f = 1$ kHz und THD = 1 % - Teil 3

wie das InvenSense ICS-40730 MEMS-Mikrofon beginnend bei H2 mit -40 dB bis zu H10 mit -102 dB. Dabei sind die ungeradzahlichen Harmonischen ab H5 ebenfalls sehr stark ausgeprägt, treten jedoch etwas schwächer in Erscheinung als beim InvenSense ICS-40730. Das beyerdynamic DT291 PV MKII zeigt ein mit -48 dB schwächer ausgeprägtes H2 und steigt mit dem H3 auf -42,5 dB an, ehe es konstant bis zu H10 und -97,5 dB fällt. Beim Sonion 8044 sowie Sonion 89PC01 stellt sich ein fallender Charakter von H2 bei etwa -40 dB bis zu H10 bei etwa -100 dB dar. Die Verteilung der harmonischen zwischen H2 und H10 ist jedoch unterschiedlich: Das 8044 liefert ab H5 deutlich hervorgetretene ungeradzahliche Harmonische, während das 89PC01 mit H6 und H8 zwei hervortretende geradzahliche Harmonische zeigt und konstant im Pegel der Obertöne fällt.

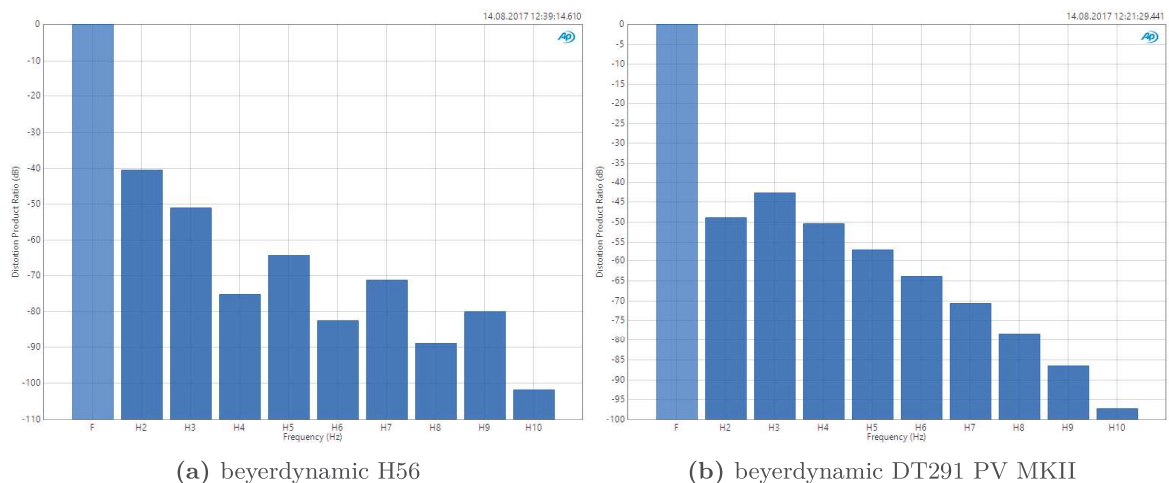


Abbildung 41: ECM: Anteile geradzahlicher und ungeradzahlicher Harmonischer bei $f = 1$ kHz und THD = 1 % - Teil 1

THD spektral Abbildung 43 zeigt eine dimensionslose und rein qualitative Darstellung der Ergebnisse der spektralen THD-Messung bei 100 dB SPL für alle untersuchten MEMS-Mikrofone. Die Darstellung ist folgendermaßen zu interpretieren: Die Abszisse steht für THD = 0 %. Die Kurven in der Grafik zeigen die qualitative Ausprägung des THD der auf der Abszisse dargestellten Frequenz als Grundschwingung. Es sind absichtlich nur die MEMS-

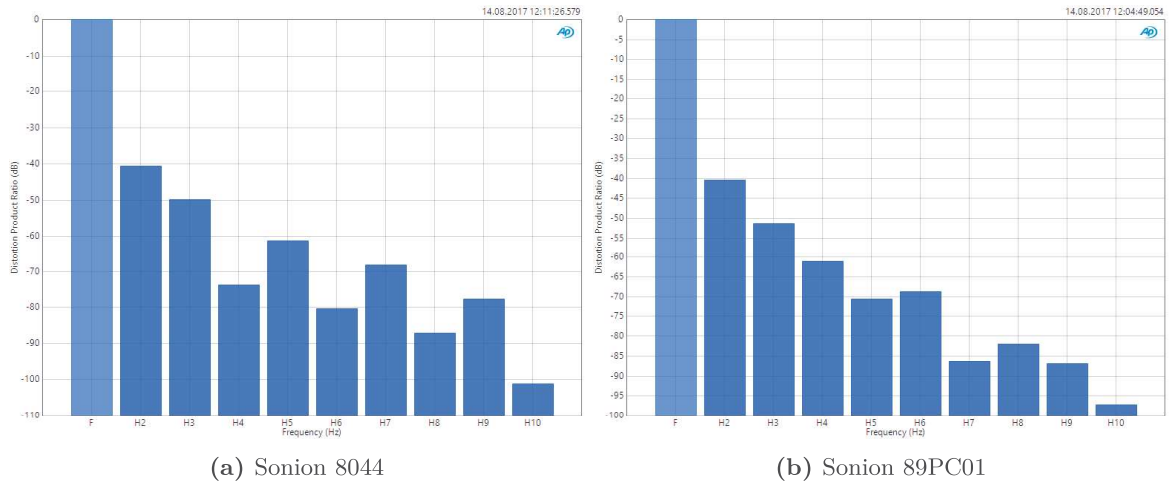


Abbildung 42: ECM: Anteile geradzahlgiger und ungeradzahlgiger Harmonischer bei $f = 1$ kHz und THD = 1 % - Teil 2

Mikrofone in der Grafik dargestellt, da nur letztere THD bei einem Schalldruckpegel von lediglich 100 dB SPL in diesem Bereich zeigen. Es gilt zu beachten, dass nur die Harmonischen bis zu einer Grundfrequenz von $f = 10$ kHz noch in den menschlichen Hörbereich fallen, welcher bis etwa 20 kHz reicht. Bei Beachtung dieser Verhältnisse zeigt das TDK T4071 das geringste spektrale THD und auch das STMicroelectronics MP23AB01DH liefert gute Ergebnisse mit einem stärkeren Anteil bei etwa 3,5 bis 7 kHz. Das Akustika BMU563R, sowie die beiden InvenSense Modelle ICS-40618 und ICS-40730 zeigen besonders ab 6 kHz eine deutlich stärkere Ausprägung des THD als die Modelle von TDK und STMicroelectronics. Sonions O11BC03 zeigt ein stark anderes Verhalten und bildet im Bereich von 3 bis 5 kHz und auch ab etwa 8,5 kHz ein stärkeres THD aus, wobei der Anstieg ab 8,5 kHz sehr steil und äußerst stark ist und erst bei etwa 15 kHz wieder zu sinken beginnt.

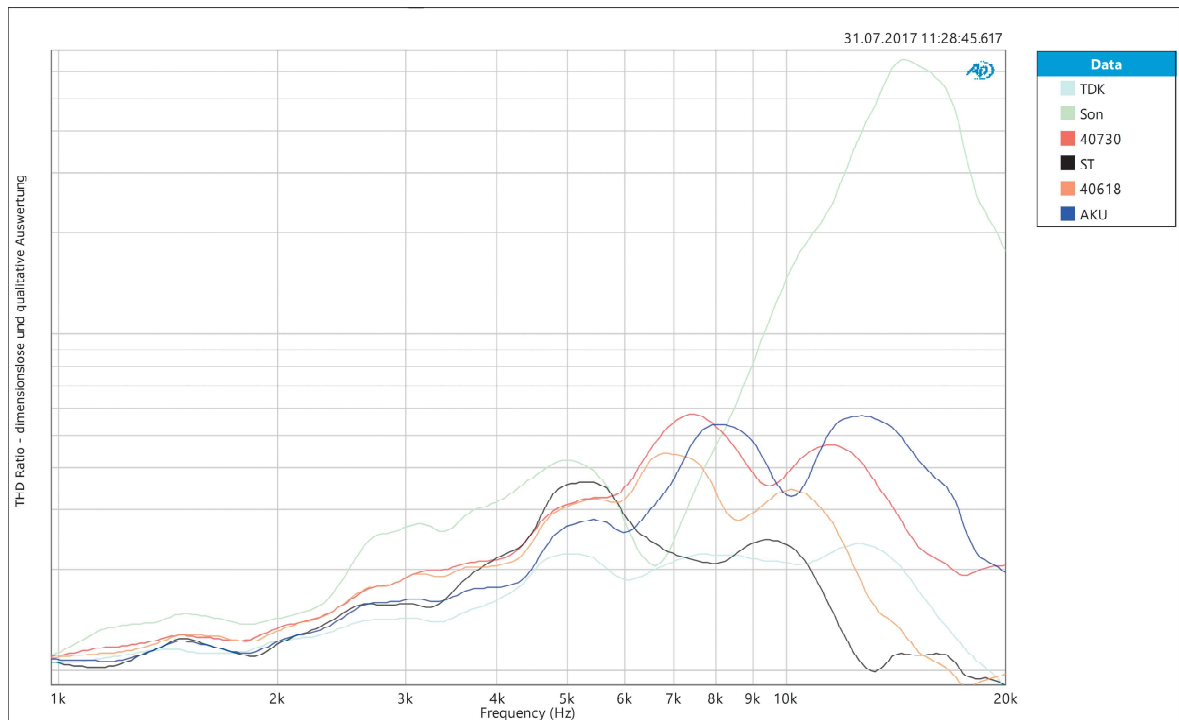


Abbildung 43: MEMS-Mikrofone: dimensionslose und rein qualitative Darstellung des THD für Grundschwingungen im Bereich von 1 kHz bis 20 kHz bei 100 dB SPL ($f = 1$ kHz)- Glättung über 1/3-Oktave

5.3.1.3 Mikrofonrauschen

Bei der Untersuchung des Mikrofonrauschens wurde ebenfalls eine Abhängigkeit von der Versorgungsspannung untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass dieses unter Einbezug der statistischen Schwankungen des Rauschens und der daraus resultierenden Standardabweichung nicht von Letzterer im untersuchten Bereich (Versorgungsspannungen von $U_{\text{Versorgung}} = 2,5$ bis $3,5$ V bei allen MEMS-Mikrofonen bis auf das Sonion O11BC03, welches bei $U_{\text{Versorgung}} = 0,9$ V und $1,4$ V untersucht wurde) abhängig ist. Da die Auswertung dieser Ergebnisse aufgrund der vielen generierten Messdaten eine sehr große Darstellung erfordert, wird sie in dieser Arbeit nicht vollends ausgeführt. Sie kann jedoch auf dem beiliegenden Datenträger eingesehen werden. Tabelle 3 soll als Zusammenstellung der für jedes Mikrofon bestimmten besten Kenndaten (und somit für alle Mikrofone diejenigen, welche bei der höchsten getesteten und erlaubten Versorgungsspannung gemessen wurden) verstanden werden. In ihr sind aus Gründen der Übersicht gleich die üblichen Geräuschpegelabstände SNR für die A-bewertete Effektivwertmessung (RMS) und die Quasi-Spitzenwertmessung mit CCIR 468-3 bzw. CCIR-1k Filter gegeben; die gemessenen Geräuschspannungen U_{Ger} inklusive statistischem Fehler sowie der Ersatzgeräuschpegel L_{Ger} sind ebenfalls in der Darstellung auf dem beigelegten Datenträger zu finden.

Es zeigen sich für alle MEMS-Mikrofone mit ähnlichem Footprint ($3,5$ mm x $2,65$ mm bzw. $3,35$ mm x $2,5$ mm) recht ähnliche SNR im Bereich von 64 dB(A, RMS) für das TDK T4071 und 68 dB(A, RMS) für das Sonion O11BC03 (bzw. 52 dB(CCIR, Q-Peak) beim TDK T4071 bis 56 dB (CCIR, Q-Peak) beim Sonion O11BC03). Aus dieser Reihe heraus fällt das InvenSense ICS-40730 mit einem deutlich höheren SNR von 72 dB(A, RMS) bzw. 60 dB(CCIR, Q-Peak). An dieser Stelle sei darauf hingewiesen und erwähnt, dass wie unter

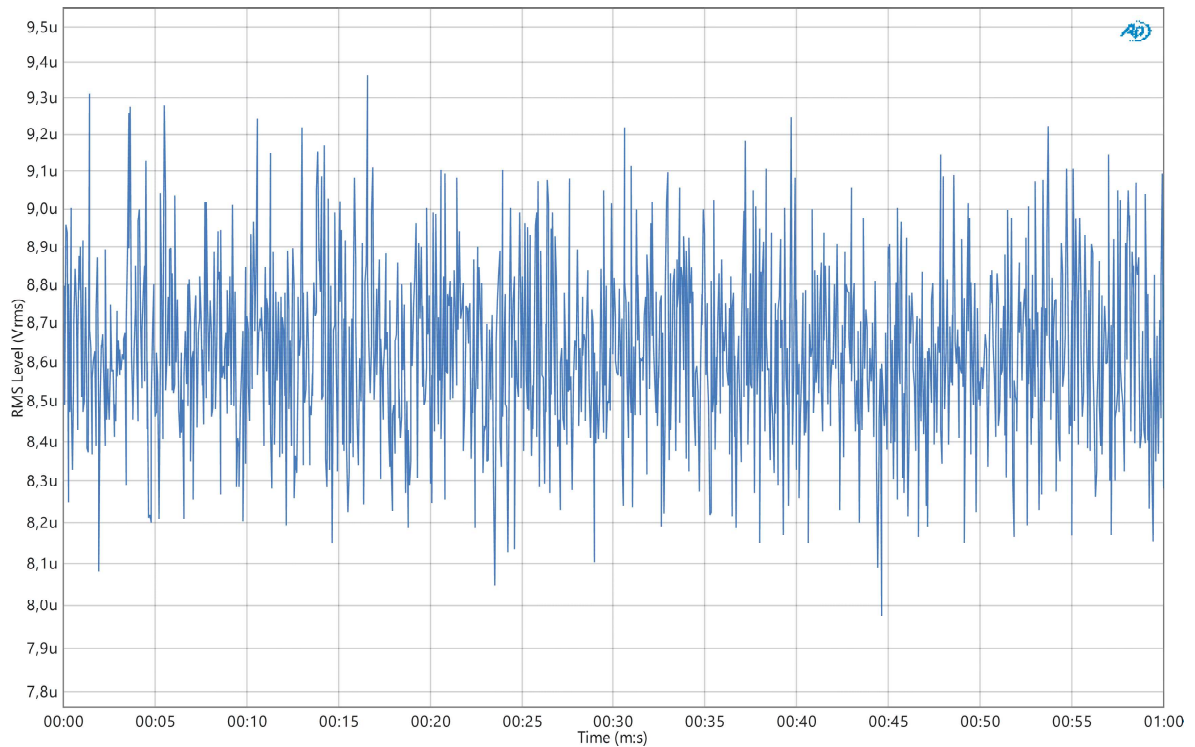


Abbildung 44: 60 Sekunden andauernde Aufzeichnung des Mikrofonrauschens

Abschnitt 4 zeigt das ICS-40730 eine vierfache Membranfläche im Vergleich zu den anderen MEMS-Mikrofonen besitzt. Dies zeigt, dass durch den linearen Zusammenhang zwischen Membranfläche und dem vom Mikrofon daraus gewandelten Schalldruck ein höheres Nutzsignal erreicht und der Rauschabstand erhöht werden kann. Das von den Sensoren generierte Rauschen addiert sich aufgrund der Unkorreliertheit hierbei im Vergleich zur Signalspannung lediglich mit der Wurzel nach den Vorschriften der geometrischen Addition⁷⁰; dadurch wird ein verbesserter Rauschabstand erreicht.

Um einen direkten Vergleich des Rauschverhaltens zu den getesteten Elektromikrofonen zu ziehen, sollen nun am Ende dieses beschreibenden Abschnitts auch die Ergebnisse der THD-Messungen mit einbezogen werden: Es zeigt sich bei den Elektromikrofonen eine direkte Abhängigkeit zwischen der Empfindlichkeit, dem erreichten Grenzschalldruckpegel und dem *SNR*. Empfindlichere Mikrofone rauschen weniger stark, da sie eine hohe Signalspannung durch einen großen Membranausschlag generieren, jedoch die fundamentalen Rauschanteile nicht direkt von der Signalstärke abhängig sind. Es bildet sich somit ein besserer *SNR*. Aufgrund der weichen Membranaufhängung wird jedoch nur ein geringer Grenzschalldruckpegel erreicht, da die Membran früher in den nichtlinearen Bereich der möglichen elastischen Verformung des Membranmaterials kommt. Wird die Membran nun andererseits fester eingespannt, werden nur geringere Membranausschläge und somit proportional niedrigere Signalspannungen bei jedoch gleichem Schalldruckpegel vom Mikrofon ausgegeben. Damit sinkt das *SNR* zum ansonsten gleich bleibenden fundamentalen elektrisch bedingten Rauschen. Aufgrund der festeren Membraneinspannung erreicht Letztere erst bei höheren Schalldruckpegeln ein nichtlineares Verhalten. Diese Beschreibungen betrachten nun nur den eigentlichen Membranausschlag; jedoch können bestimmte Phänomene des Verzerrungs- und Rauschverhal-

⁷⁰vgl. [Beis, 2015]

tens auch mit Hilfe des auf einen bestimmten Arbeitsbereich eingestellten dahinter liegenden Impedanzwandlers argumentativ betrachtet werden. Dies wird der Einfachheit halber nun jedoch nicht berücksichtigt. Die Elektretmikrofone ähnlicher Gehäuseabmessungen (vgl. zum Beispiel Sonion 8044 und 89PC01) erreichen schlechtere als auch bessere Ergebnisse, wenn man allein das Rauschverhalten betrachtet; jedoch müssen diese ins Verhältnis zum erreichten Grenzschalldruckpegel gesetzt werden. Betrachtet man zum Beispiel das Sonion 89PC01 wird zwar ein SNR von 70 dB(A,RMS) erreicht, jedoch liegt der Grenzschalldruckpegel bereits bei 113 dB SPL. Mit diesem Mikrofon ist am ehesten noch das InvenSense ICS-40730 unter den MEMS-Mikrofonen zu vergleichen, welches ein SNR von 72 dB(A, RMS) bei einem Grenzschalldruckpegel von 118 dB SPL erreicht. Das Sonion 8044 sowie das beyerdynamic H56 zeigen mit einem SNR von 60 bzw. 59 dB(A; RMS) ein schlechteres Rauschverhalten als alle MEMS-Mikrofone im Test und das bei einem von MEMS-Mikrofonen durchaus auch erreichbarem Grenzschalldruckpegel von 128 resp. 126 dB SPL. Ein Vergleich mit z.B. dem mit einem Footprint von 3,5 mm x 2,65 mm ähnlich großen TDK T4071 bietet sich an dieser Stelle da; Letzteres erreicht bei einem SNR von 64 dB(A,RMS) einen Grenzschalldruckpegel von 132 dB SPL. Alleine unter diesen Aspekten betrachtet liefert die MEMS-Mikrofontechnologie also durchaus brauchbare Performance. Auffällig ist, dass MEMS-Mikrofone jedoch die klare Abhängigkeit von SNR und Grenzschalldruckpegel nicht zeigen, sondern bei Empfindlichkeiten von 12 bis 13 mV/Pa sehr unterschiedliche Grenzschalldruckpegel liefern. Aufgrund dieses Verhaltens kann angenommen werden, dass es zu komplexeren die Performance der MEMS-Mikrofone steuernden Prozessen in den ASICs als bei einem einfachen Impedanzwandler im Elektretmikrofon kommt. In den weiteren Betrachtungen wird diesbezüglich auch die Resonanzbedämpfung der Membran eine Rolle spielen; eine geringe Resonanzbedämpfung hat wiederum direkten Einfluss auf die Empfindlichkeit des Mikrofons. Dadurch kann eine höhere Empfindlichkeit bei jedoch kleinerem (linearen) Übertragungsbereich erreicht werden.

Bei all diesen Betrachtungen muss beachtet werden, dass eine festere Einspannung der Membran nicht nur die direkte Spannkraft, sondern auch die federnde Wirkung des beim Druckempfänger auf der Rückseite der Membran befindlichen Luftvolumens bedeuten kann.

5.3.2 Subjektive Erfassung am Beispiel von Sprache

Die Ergebnisse des Hörtests mit gesprochener Sprache sollen im Folgenden nun für jedes Mikrofon erläutert und mögliche Querverweise zwischen den Mikrofonen - falls möglich - gegeben werden. Dabei wird jedes Mikrofon direkt aufeinanderfolgend bei der normal lauten Sprechlautstärke von 64 dB(A) im Abstand von 30 cm und danach bei der lauten Sprechlautstärke von 80 dB(A) beschrieben. Zur besseren Nachvollziehbarkeit können die Aufnahmen auch der dieser Arbeit beigelegten DVD entnommen werden. Alle Vergleiche, die gezogen werden und nicht anderweitig gekennzeichnet sind, beziehen sich auf das beyerdynamic H56. Die Ausdrucksweise in diesem Teil der Arbeit ist aufgrund ihrer subjektiven Natur recht unwissenschaftlich und informell; dies lässt sich jedoch aufgrund der durch subjektive Empfindungen gemachten Beobachtungen nicht vermeiden. Im weiteren Verlauf soll versucht werden diese subjektiven Empfindungen durch Zusammenhänge mit der messtechnischen Analyse zu untermauern.

Das **beyerdynamic H56** Elektretmikrofon liefert einen recht ausgeglichenen Klang mit gut abgebildetem Grundtonbereich und präsenten Mitten. Die Höhen neigen bei S-Lauten besonders bei lauter Besprechung zum Zischen. Es wirkt insgesamt recht impulsfest und kann auch zwei aufeinanderfolgende laute S-Laute wie beim Halbsatz *'statt mit der zeit zu gehen'* stabil und feinzeichnend abbilden.

Das **InvenSense ICS-40618** MEMS-Mikrofon zeigt bei normaler Besprechung einen generell angenehmen und ausgeglichenen Klang, der überraschend ähnlich zu dem des beyerdynamic H56 ist. Das Mikrofon liefert auch ähnlich stark ausgeprägte S-Laute. Bei lauter Besprechung klingt das ICS-40618 weiterhin recht angenehm und im Bassbereich sogar vollwertiger. Es tut sich der Eindruck auf, dass es etwas mehr Struktur durch zusätzliche Signalanteile bekommen hat. Bei *'wie Sie sehen werden'* kommt es zu einem starken Klingeln der S-Laute, das durch hohe Verzerrungsanteile gekennzeichnet ist.

Das **InvenSense ICS-40730** zeigt einen ähnlichen Klangcharakter wie das ICS-40618 aus gleichem Hause. Dabei wirkt es jedoch in den mittleren Frequenzen härter und insgesamt etwas weniger vollwertig, sowohl im Vergleich zum beyerdynamic H56 als auch zum ICS-40618. Trotz allem liefert es einen ausgeglichenen Charakter mit beinahe ähnlichen S-Lauten wie das beyerdynamic H56. Auffällig ist hier der starke Raumklang, welcher besonders durch diffuse Anteile im hohen Frequenzbereich in Erscheinung tritt. Bei lauter Besprechung zeigt das ICS-40730 ein starkes Klingeln bei S-Lauten, welches einen verzerrten und spitzen Klang entstehen lässt. Der Klang bleibt auch hier generell ähnlich zum beyerdynamic H56, wirkt dabei jedoch weniger stark ausgeprägt in den Tiefmitten.

Das **Sonion O11BC03** liefert bei normaler Sprechlautstärke einen dumpferen Klang mit weniger stark ausgeprägten S-Lauten als das beyerdynamic H56. Dadurch besitzt es im hohen Frequenzbereich einen bei S-Lauten zwar angenehmen Klangcharakter, wirkt allgemein aber eher bedeckt und für die vollständige Abbildung von Sprache unvollständig. Bereits bei normaler Besprechung wirkt das Sonion O11BC03 leicht verzerrt. Bei lauter Besprechung bekommt der Klang des Mikrofons spürbar mehr Signalanteile durch Verzerrungen und wirkt

deutlich spitzer und unangenehmer. Besonders im hohen Frequenzbereich sind diese Verzerrungen deutlich, z.B. bei den Aussagen *'und dabei sehe ich gar nicht alt aus'* und *'aber darauf kann man keine Häuser bauen'*.

Das **Akustica BMU563R** liefert einen im Vergleich zu den anderen MEMS-Mikrofonen als sehr unangenehm empfundenen Klang. Es wirkt sehr dünn und scharf in den Höhen und zischt nicht nur bei S-Lauten hörbar. Bei *'werden wir große Probleme bekommen'* sind des Weiteren auch viele unangenehme Klicks und Pops zu hören, die dieses Mikrofon beim Einschwingen von harten Lauten mit hohem Luftanteil liefert. Bei lauter Besprechung wirkt der Klang noch hohler als bei normaler Besprechung mit weiterhin starker Neigung zu zischenden S-Lauten; ein aggressiver hochmittenlastiger Klang stellt sich ein, der auf mehr Verzerrungen in eben diesem Bereich schließen lässt. Positiv zu erwähnen ist jedoch, dass das Rauschen bei diesem Mikrofon sehr unauffällig bleibt.

Das **STMicroelectronics MP23AB01DH** zeigt dazu im Gegensatz einen sehr auffällig hörbaren Rauschpegel. Der Klang ist jedoch als vollwertig mit leicht zurückgenommenen Mitten im Vergleich zum beyerdynamic H56 zu bezeichnen und wirkt dabei nicht hohl. Die S-Laute sind präsent, jedoch in geringerer Ausprägung als andere MEMS-Mikrofone in diesem Vergleich. Bei lauter Besprechung ist der Klang ähnlich gut, wobei die S-Laute dann zu Klingeln beginnen wie z.B. bei *'es ist immer schön nichts zu tun'*.

Das **TDK T4071** wirkt im Vergleich zum beyerdynamic H56 klanglich etwas weniger offen, leicht artifiziell und bedeckt. Trotzdem liefert es eine vollwertige und gute Sprachabbildung. Es zeigt bei lauter Besprechung im Vergleich zu gleich lauter Besprechung des beyerdynamic H56 einen empfundenen Anstieg hoher Frequenzen, der es somit in diesem Fall fast ausgeglichener klingen lässt als bei normal lauter Besprechung. Ein leichtes Klingeln und daraus resultierendes Verschmieren der S-Laute ist wahrnehmbar.

Das **beyerdynamic DT291 PV MKII** klingt insgesamt deutlich runder und schöner als das beyerdynamic H56. Besonders der vergleichsweise sehr tief reichende Bassbereich und insgesamt weniger harte Höhen zeichnen es aus. Sehr auffällig sind dabei die deutlich angenehmeren SCH-Laute, welche vom Mikrofon naturgetreu übertragen werden und keinen scharfen Klangcharakter erhalten. Das extrem mittige Rauschen des Mikrofons ist deutlich hörbar. Bei lauter Besprechung bleibt der Klang weiterhin sehr gut und offen; es sind keine Einschränkungen in der Performance wahrzunehmen.

Das **Sonion 8044** zeigt einen ähnlichen Klangcharakter wie das beyerdynamic H56. Dabei wirkt es jedoch etwas stimmiger und weniger scharf in den Hochmitten und Höhen. Bei lauter Besprechung werden die Unterschiede zum beyerdynamic H56 jedoch größer und das Sonion 8044 klingt deutlich stimmiger, welches sich besonders im Grundtonbereich äußert (z.B. *'guten Tag zusammen'*). Die Höhen bleiben dabei angenehm (*'jetzt finden sie'*). Auffällig ist jedoch das hörbare Rauschen.

Das **Sonion 89PC01** zeigt den wohl größten Klangunterschied zum beyerdynamic H56: Es klingt gefühlt viel erhabener, mit mehr Dynamik und Struktur in der Stimme. Dies ist auch an der Wellenform mit feinen Strukturen zu erkennen. Im hohen Frequenzbereich klingt es des Weiteren sehr offen. Beispiele für den guten Klang sind *'es ist immer schön nichts zu tun und*

stehen zu bleiben, statt mit der Zeit zu gehen oder *'jetzt finden Sie, wir alle dürfen so viel nehmen wie wir brauchen'*. Auch bei lauter Besprechung verhält sich das Mikrofon noch sehr angenehm. Es sind Verzerrungen wahrnehmbar, die jedoch gefühlt hauptsächlich im Grundtonbereich liegen und dadurch weniger unangenehm und auffällig sind. Die Textstelle *'aber darauf kann man keine Häuser bauen* ist hierfür ein gutes Beispiel.

Folgendes lässt sich abschließend zur klanglichen Analyse noch festhalten: Alle MEMS-Mikrofone liefern im Vergleich zu den ECM einen auffälligeren diffusen räumlichen Anteil auch bei naher Besprechung. Dieser ist besonders stark im hochfrequenten Bereich ausgeprägt und lässt so die Empfindung einer schallharten Räumlichkeit entstehen.

5.4 Diskussion und Abschätzung

In diesem Kapitel sollen die unter Unterunterabschnitt 5.2.1 und Unterunterabschnitt 5.2.2 angestellten Beobachtungen unter der Forschungsfrage der Eignung von MEMS-Mikrofonen zur Nutzung im professionellen Audiobereich diskutiert und abgeschätzt werden. Dabei wird die empfundene Audioqualität am Beispiel der Aufnahme von Sprache in der Ausführungsweise eines Nackenbügelmikrofons diskutiert.

5.4.1 Messtechnische Erfassung

Die messtechnische Erfassung zeigt deutliche Unterschiede zwischen den getesteten MEMS-Mikrofonen unterschiedlicher Bauart, welche vor der Untersuchung in Abschnitt 4 kurz dargestellt wurden. Neben prinzipiell ähnlichen, aber trotzdem nicht gleichen Frequenzgängen und Geräuschpegelabständen, welche sich um bis zu 8 dB(A,RMS) unterscheiden, ist es vor allem das unterschiedliche Verzerrungsverhalten, welches sich stark unterscheidet. Die Unterschiede zwischen den Elektretmikrofonen dieses Tests zeigen zusammenhängende Veränderungen des Rauschverhaltens, der Mikrofonempfindlichkeit und des damit verbundenen Grenzschalldruckpegels. Die Frequenzgänge liefern dabei ähnliche Ergebnisse.

Die MEMS-Mikrofone zeigen alle im Bereich von 10 bis 30 kHz eine schmalbandige Überhöhung, welche 9 bis 29 dB erreichen kann. Dabei ist die Bandbreite dieser Überhöhungen nicht bei allen getesteten Mikrofonen gleich. So zeigt das Akustica BMU563R eine schmale, jedoch sehr hohe Überhöhung und das TDK T4071 eine Breitere und weniger stark ausgeprägte. Die Mittenfrequenzen liegen ebenfalls bei allen Mikrofonen an unterschiedlichen Stellen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die elektrischen signalverstärkenden und -konditionierenden Maßnahmen in den ASIC der verschiedenen Mikrofone keine solch verstärkenden steilflankigen Formen in diesem Bereich annehmen, denn in erster Linie würde sich in diesem Fall die Frage nach der Sinnhaftigkeit der Verstärkung stellen. In Unterabschnitt 5.1 ist gezeigt, dass die Resonanzen der Schalleinlassöffnungen bzw. der Schalleitungen in der durchlochten Platine um dem dahinter liegenden Luftvolumen als angenäherter Helmholtz-Resonator nicht in diesen Bereich des Frequenzspektrums fallen, sondern höher liegen. Mit diesen Abschätzungen kann die These aufgestellt werden, dass es sich bei den ausgebildeten Überhöhungen um die schwach gedämpften Resonanzen des schwingungsfähigen Systems aus der Membran

des im MEMS-Mikrofon integrierten Drucksensors und der in den umgebenden Hohlräumen angekoppelten Luft handelt. Diese Resonanzen besitzen für jedes untersuchte Mikrofon unterschiedliche Resonanzfrequenzen und sind unterschiedlich stark gedämpft, was sich in einer sich verändernden Resonanzbandbreite bzw. Resonanzschärfe äußert. Eine einfache optische Feststellung in Abschnitt 4 zeigt hierbei eine stärkere Durchlochung der Gegenelektrode des InvenSense ICS-40730 im Vergleich zum ICS-40618, welche in Verbindung mit dem deutlich größeren angeschlossenen Luftvolumen des großen Gehäuses eine weniger starke Dämpfung des schwingungsfähigen Systems ergibt. Diese Beobachtungen decken sich wiederum auch mit den messtechnisch erfassten Frequenzgängen der beiden letztgenannten Mikrofone und unterstützen die getätigten Aussagen bzgl. der Ursache der Überhöhungen. Durch die geringe Dämpfung der Membranschwingung kann trotz der im Mikrometerbereich liegenden Membranfläche eine hohe Empfindlichkeit erreicht werden, sodass einsensorige MEMS-Mikrofone in der Regel eine Empfindlichkeit von 12 mV/Pa aufweisen können, wie die messtechnische Analyse dieser Arbeit zeigt.

Die erfassten Unregelmäßigkeiten in den Rückwärtsfrequenzgängen der Mikrofone liegen - wie die Lage der in Unterabschnitt 5.1 bestimmten theoretisch ersten abgeschatteten und somit kritischen Frequenzen zeigt - eben genau in diesem durch hörbare Abschattung einsetzenden Bereich. Es kann jedoch nicht gedeutet werden, warum es in diesem Bereich um etwa 15 kHz zu einem solch starken Einbruch kommt, der für $f > 15$ kHz wieder rückgängig verläuft. Mit einer Stärke von etwa 8 dB sind die Einbrüche sehr stark und liefern aufgrund ihrer ausgeprägten Breite gerade im Bereich zwischen 10 und 20 kHz eine deutliche Abnahme der Richtungsunabhängigkeit, die für Miniaturmikrofone gleicher Größe wie zum Beispiel die beiden getesteten Elektretmikrofone Sonion 8044 und 89PC01 untypisch ist. Aufgrund der im Fall von Elektretmikrofonen beinahe mit dem Gehäuse abschließenden Membran sind Abschattungseffekte durch die Rückwärtsbeschallung weniger stark. Der abschattende Einfluss der Platine bei MEMS-Mikrofonen zeigt sich bereits ab einer seitlichen Beschallung von 90° deutlich, jedoch ist der starke Einbruch von 8 dB erst bei Rückwärtsbeschallung zu erkennen.

Bei alleiniger Betrachtung des Mikrofonrauschens zeigen die MEMS-Mikrofone eine erstaunlicherweise sehr gute Performance im Vergleich zu Elektretmikrofonen gleicher Gehäusebaugröße. Dieser vergleichsweise hohe SNR trotz sehr kleiner Membranfläche lässt sich durch die geringe Dämpfung mit ausgeprägten Membranresonanzen und der damit steigenden Empfindlichkeit begründen. Hierbei sei erläutert, dass im allgemeinen die Geräuschspannung eines Mikrofons abhängig von dessen Empfindlichkeit (und somit auch dessen Membranfläche) ist. Rauschen setzt sich bei einem elektrostatischen Druckwandler neben dem Brownschen Rauschen durch die thermodynamisch Begründete Bewegung von Luftteilchen vor allem durch die Rauscheigenschaften der nachgeschalteten Elektronik in Form des Rauschanteils eines Ladewiderstands R_L und des Impedanzwandlers, sowie weiterer verstärkender Bauelemente zusammen. Ein mechanisch sehr empfindliches Mikrofon führt bei gleichem Schalldruck große Membranbewegungen im Vergleich zu einem mechanisch weniger empfindlichem Mikrofon aus, die aufgrund von $s \propto u$ in einer hohen Signalspannung am Ausgang des elektrostatischen Wandlers resultieren. Diese hohe Ausgangsspannung liefert in folgenden elektronischen

Signalführungen einen großen Abstand zu deren fundamentaler Rauschzusammensetzung und somit einen guten SNR . Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass das für die kleine Membranfläche der MEMS-Mikrofone vergleichsweise gute SNR durch eine geringere Resonanzbedämpfung des schwingungsfähigen Systems erzielt wird; dies wiederum grenzt den -3dB Übertragungsbereich des Mikrofons stark ein. In der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchung können so Übertragungsbereiche der MEMS-Mikrofone von etwa 80 Hz (je nach Mikrofon auch tiefer) bis 8 kHz erreicht werden. Eine interessante Betrachtung ist an dieser Stelle die Folgende: Die moderne HD-Telefonie liefert mit den Übertragungsstandards Linear PCM 16 und PCMA 16 mit 16 kHz Abtastrate einen möglichen Übertragungsbereich von 50 Hz bis 7 kHz⁷¹. Es lässt sich folglich die These stellen, dass alle MEMS-Mikrofone im Test auf diesen Standard und den Einsatz in Telekommunikationsgeräte optimiert worden sind und diese Abstimmung bei MEMS-Mikrofonen im Jahr 2017 in den meisten Fällen getroffen wird.

Die Elektretmikrofone im Test zeigen hierbei deutlich unterscheidbare Abstimmungen: Erstens Mikrofone steiferer Membraneinspannung, damit einhergehender geringerer Empfindlichkeit und aufgrund der Steifigkeit der Membran hohem Grenzschalldruckpegel, jedoch schlechterem SNR wie zum Beispiel das Sonion 8044 und zweitens Mikrofone mit weicher eingespannter Membran, welche deutlich empfindlicher sind und somit einen besseren SNR liefern, aber einen geringeren Grenzschalldruckpegel besitzen. Der geringere Grenzschalldruckpegel ist dadurch begründet, dass die Membran aufgrund der weichen Aufhängung sehr große Auslenkungen macht und somit schneller in den nichtlinearen Elastizitätsbereich des Membranmaterials kommt oder sogar an die Gegenelektrode anstößt. Des Weiteren sind durch zu große Signalspannungen aus dem elektrostatischen Wandler auch Übersteuerungen der dahinter liegenden Elektronik wie dem Impedanzwandler möglich. Der THD-Verlauf zeigt sich dabei trotz unterschiedlicher Abstimmungen recht ähnlich und lediglich verschoben.

Die MEMS-Mikrofone dieses Tests zeigen das für die Elektretmikrofone beschriebene Verhalten nicht, sondern liefern bei ähnlicher Empfindlichkeit zwischen den Mikrofonen gleicher Gehäuseabmessungen einen deutlich unterschiedlichen THD-Verlauf. Das lässt darauf schließen, dass die unterschiedlichen Membranmaterialien, sowie -aufhängungen als auch deren elektroakustische Abstimmung im Substrat sowie auch das elektronische Design der ASIC einen entscheidenden Einfluss auf das THD-Verhalten bei sonst gleicher Membrangröße und Gehäuseabmessungen haben. Die Zusammensetzungen des THD sind dabei im Vergleich zu Mikrofonen ähnlicher Grenzschalldruckpegel jedoch nicht signifikant unterschiedlich; auch der Vergleich zu den getesteten Elektretmikrofonen liefert keine verwertbaren Ergebnisse. Auffällig ist jedoch der bei Elektretmikrofonen in dieser Form nicht vorhandene THD von Grundschnwingungen im Bereich über 10 kHz, der sicher neben den prinzipiell anderen THD-Verläufen ein wichtiger Aspekt bei der empfundenen Audioqualität darstellt. Dieser starke Anstieg der Verzerrungswerte für Grundschnwingungen über 10 kHz lässt einen Zusammenhang mit den sehr schwach gedämpften Membranresonanzen vermuten. Aufgrund starker Auslenkungen im Resonanzbereich kommt es zu starkem THD.

⁷¹vgl. [Wikipedia, 2017]

Zieht man einen direkten technischen Vergleich zwischen den MEMS-Mikrofonen und den ECM zeigen letztere eine breiteres mögliches Anwendungsspektrum bei ähnlicher bis besserer Qualität der technischen Übertragung und eignen sich damit eher für die Anwendung in professionellen Audioprodukten mit hohem Anspruch. Grundlegend dafür ist vor allem der breitere (lineare) Übertragungsbereich, welcher bei den MEMS-Mikrofonen aufgrund der nur schwach gedämpften Membranresonanz nahe der oberen Grenze des Hörbereichs gestört wird. Ein weiterer vorherrschender Aspekt in diesem Zusammenhang sind die damit verbundenen hohen Verzerrungswerte der MEMS-Mikrofone.

5.4.2 Subjektive Erfassung am Beispiel von Sprache

Die subjektive Erfassung liefert deutlich unterschiedliche Empfindungen der Audioqualität der untersuchten Mikrofone. Besonders die MEMS-Mikrofone zeigen hierbei deutliche Unterschiede.

Betrachtet man die unter Unterunterabschnitt 5.2.2 zusammengestellten Empfindungen des Klangs der einzelnen Mikrofone, findet man bei allen MEMS-Mikrofonen den Ausdruck von besonders hart empfundenen S-Lauten. Des Weiteren finden die Begrifflichkeiten eines hohlen, spitzen sowie dünnen Klangs mit empfundenen hinzugefügten Signalanteilen häufig Ausdruck. Das InvenSense ICS-40618, TDK T4071 als auch das STMicroelectronics MP23AB01DH bilden hierbei eher eine Ausnahme.

Die ECM hingegen werden als runder und ausgeglichener beschrieben, wobei das beyerdynamic H56 auch zu empfundenen harten Mitten neigt. Auffällig ist hierbei die nochmals deutlich besser empfundene Klangstruktur beim sehr empfindlichen Sonion 89PC01, welches diese Empfindlichkeit durch große Membranbewegungen und einen geringen Grenzschalldruck erreicht. Das damit verbundene hohe SNR der gemessenen 70 dB (A, RMS) scheint hierbei Einfluss auf die Feinstruktur des Klangs zu nehmen, die möglicherweise aufgrund der geringen Nutzsignalverdeckungen durch Rauschanteile hörbar bleibt. Auch das beyerdynamic DT291 PV MKII ist besonders hervorzuheben, da es aufgrund der größeren Membranfläche und Gehäuseabmessungen mehr Bass überträgt; auffälligerweise werden bei diesem Mikrofon mit einem Membrandurchmesser von 5,8 mm die S- und besonders SCH-Laute als sehr angenehm und überhaupt nicht hart empfunden. Diese Empfindung tritt jedoch bei allen kleineren Mikrofonen, egal ob ECM oder MEMS deutlich hervor.

Zieht man einen Vergleich der subjektiven Tests zwischen MEMS-Mikrofonen und ECM liefern lediglich das InvenSense ICS-40618 und das TDK T4071 ein vergleichbares Hörerlebnis mit nur gering ausgeprägter Härte der S-Laute und wenig wahrnehmbarer Verzerrungen. Das InvenSense ICS-40618 wird dabei dem TDK T4071 etwas vorgezogen.

5.5 Zusammenhänge

Schließt man an die aus dem Hörtest als klanglich gut empfundenen InvenSense ICS-40618 und TDK T4071 an und vergleicht deren technische Daten, ist das TDK T4071 minimal

empfindlicher, besitzt einen um 1 dB(A,RMS) geringeren SNR und liefert einen Grenschalldruckpegel von 132 dB SPL bei 1 % THD. Das InvenSense ICS-40618 liegt hier mit 120 dB SPL bei 1 % THD deutlich darunter. Besonders hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang die unterschiedlichen Verläufe des THD. Während das InvenSense ICS-40618 einen allmählichen Anstieg der Verzerrungswerte zeigt, ist beim TDK T4071 eine starke Nichtlinearität (*Knick*) an der Stelle des Grenschalldruckpegels gegeben. Die Zusammensetzung des THD ist deutlich unterschiedlich: Während das InvenSense ICS-40618 ein fast 20 dB höheres H2 ausbildet, sind die weiteren Harmonischen deutlich geringer ausgeprägt. Das TDK T4071 zeigt hierbei ein beinahe gleichwertige Ausbildung aller Harmonischen. Die Frequenzgänge der beiden Mikrofone besitzen eine Resonanz bei etwa 22 kHz (ICS-40618) und etwa 28 kHz (TDK T4071), welche sich am oberen menschlichen Hörbereich in einer Empfindlichkeitszunahme von etwa 19 dB (ICS-40618) und 12 dB (TDK T4071) äußern. Bei der Ausprägung von THD als Grundfrequenz oberhalb von 10 kHz liefert das TDK T4071 deutlich bessere Ergebnisse als das InvenSense ICS-40618.

Der Vergleich dieser Kenndaten lässt die Frage aufkommen, warum das InvenSense ICS-40618 das subjektiv beste Mikrofon darstellt, obwohl es in allen Kenndaten schlechter als z.B. das TDK T4071 abschneidet. Dies lässt sich in dieser Arbeit nicht weiterführend erörtern und sollte näher untersucht werden.

6 Fazit und Ausblick

In dieser Bachelorarbeit wurde die MEMS-Mikrofontechnologie und deren Herstellungsverfahren im Vergleich zu bisherigen Mikrofontechniken, im Besonderen die elektrostatische NF-Wandlung als Druckempfänger, beschrieben. Des Weiteren wurde ein umfangreicher messtechnischer und subjektiver Vergleich zwischen verschiedenen kommerziell erhältlichen MEMS-Mikrofonen in unterschiedlicher Bauart mit hochwertigen Elektretmikrofonen aus dem Hause beyerdynamic sowie Sonion durchgeführt.

Es hat sich gezeigt, dass MEMS-Mikrofone im Jahr 2017 aufgrund ihrer geringeren Membranfläche trotz empfindlichkeitssteigerender Technologien in Form von federnden Membranaufhängungen fundamentale Probleme beim Abbilden eines für professionelle Zwecke breiten Übertragungsbereichs besitzen. Eine elektronische Korrektur des Frequenzgangs zur Ausweitung des Übertragungsbereichs ist hierbei nicht möglich. Als Hauptgrund hierfür sind die starken Verzerrungsanteile durch Grundschnwingungen über $f = 3$ kHz zu sehen, welche sich bereits ab Schalldruckpegeln von $L_p = 100$ dB stark bemerkbar machen. Diese Verzerrungen haben ihre Ursache im starken Anstieg der Empfindlichkeit in eben diesem Bereich, welche durch eine schwach gedämpfte Resonanz begründet ist.

Aufgrund der stark ausgeprägten Resonanzen im bzw. nahe des oberen Ende des menschlichen Hörbereichs kommt es bei den getesteten MEMS-Mikrofonen zu einem deutlichen empfundenen *Klingeln* der S-Laute bei Besprechung der Mikrofone an der typischen Position eines Nackenbügelmikrofons. Dies lässt sich wiederum durch die stark ausgeprägte Resonanz begründen, in deren Fall das schwingungsfähige System des Mikrofons starke Nachschwinger und eine daraus resultierende geringe Impulsfestigkeit aufweist. Eine deutliche Ausprägung von hochfrequenten Signalanteilen in S-Lauten führen zu einer deutlichen Impulsunfestigkeit der Letzteren. Neben dieser unangenehmen Empfindung von S-Lauten, haben die bereits ab $L_p = 100$ dB einsetzenden deutlich wahrnehmbaren nichtlinearen Verzerrungen für Grundschnwingungen über $f = 3$ kHz den Hauptanteil für die schlechtere Beurteilung der Audioqualität im Vergleich zu den getesteten Elektretmikrofonen.

Wie aus den Untersuchungen dieser Arbeit hervorgeht, hat die MEMS-Mikrofontechnologie im Jahr 2017 noch fundamentale Schwächen, die den Einsatz in professionellen Audioprodukten mit dem Anspruch an eine hohe Bandbreite der Signalwandlung noch nicht erlaubt.

Diese Arbeit stellt in erster Linie eine anwendungsbezogene Prüfung von MEMS-Mikrofonen im Jahr 2017 für professionelle Audioanwendungen dar. Eine einleitende Darstellung der zugrundeliegenden Technologie und ihrer Herstellungsverfahren soll die Untersuchungen unterstützen. Während des Verfassens dieser Arbeit zeigten sich Phänomene mit vielschichtigen Abhängigkeiten, die aufgrund der fehlenden genaueren Verständnisse des Verfassers im Bereich der Siliziumtechnologie nicht näher betrachtet werden konnten.

Literaturverzeichnis

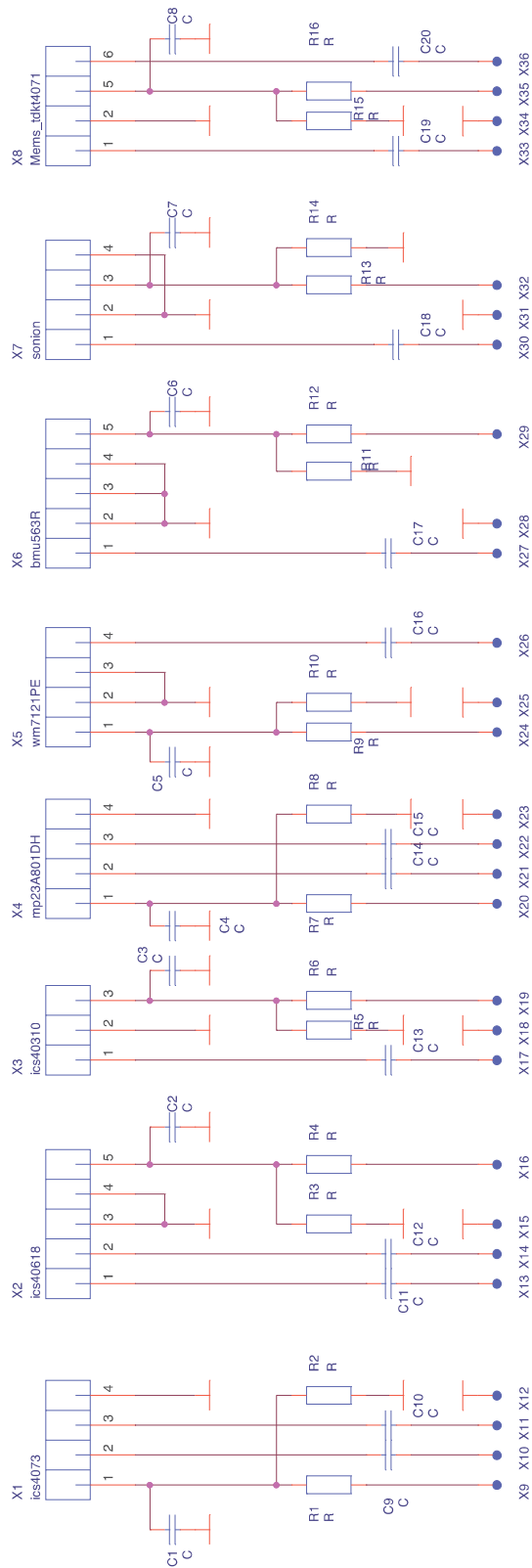
- [Audient Ltd., 2017] Audient Ltd. (2017). iD14: <https://audient.com/products-2/audio-interfaces/id14/tech-specs/>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [Audio Precision, 2017] Audio Precision (2017). APx525: <https://www.ap.com/analyzers-accessories/apx52x/>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [Beis, 2015] Beis, Uwe. (2015). Widerstandsrauschen (= Nyquist-Rauschen, Johnson-Rauschen oder thermisches Rauschen): <http://www.beis.de/Elektronik/Nomograms/R-Noise/ResistorNoise.html>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [beyerdynamic GmbH & Co. KG, 2017] beyerdynamic GmbH & Co. KG (2017). MA-PVA: <http://www.beyerdynamic.de/shop/ma-pva.htm>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [Boré und Peus, 2002] Boré, Gerhart. und Peus, Stephan. (2002). *Mikrophone für Studio- und Heimstudio-Anwendungen: Arbeitsweise und Ausführungsbeispiele*. Georg Neumann GmbH, Berlin, 5. Aufl.
- [Brüel & Kjaer, 2017] Brüel & Kjaer (2017). 2669: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [Büttgenbach, 2016] Büttgenbach, Stephanus. (2016). *Mikrosystemtechnik: Vom Transistor zum Biochip*. Technik im Fokus.
- [Citakovic et al., 2009] Citakovic, J., Hovesten, F., Rocca, G., van Halteren, A., Rombach, P., Stenberg, L., Andreani, P., und Bruun, E. (2009). A compact CMOS MEMS Microphone with 66dB SNR. S. 350–351.
- [Cosmos Indirekt, 2017] Cosmos Indirekt (2017). Schallschatten: <http://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Schallschatten>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [Dickreiter, 2008a] Dickreiter, Michael. (2008a). Akustik. In: ARD.ZDF medienakademie, Hg., *Handbuch der Tonstudioteknik*, Band 1, S. 1–19. K. G. Saur, München.
- [Dickreiter, 2008b] Dickreiter, Michael. (2008b). Schallquellen: Menschliche Stimme. In: ARD.ZDF medienakademie, Hg., *Handbuch der Tonstudioteknik*, Band 1, S. 50–55. K. G. Saur, München.
- [Dickreiter, 2008c] Dickreiter, Michael. (2008c). Schallwandler: Mikrofone. In: ARD.ZDF medienakademie, Hg., *Handbuch der Tonstudioteknik*, Band 1, S. 115–159. K. G. Saur, München.
- [Dickreiter, 2011] Dickreiter, Michael. (2011). *Mikrofonaufnahme: Aufnahmeräume, Instrumente, Mikrofone, Stereo- & Surroundaufnahme; mit 221 Abbildungen und 44 Tabellen*. Hirzel, Stuttgart, 4., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Aufl.
- [Elko und Kieran P. Harney, 2009] Elko, Gary W. und Kieran P. Harney (2009). A history of consumer microphones: The electret condenser microphone meets micro-electromechanical-systems. *Acoustic Today*, 5(2):4–13.
- [Georg Neumann GmbH, 2015] Georg Neumann GmbH (2015). Mikrofondaten verstehen (1): Was ist der Unterschied zwischen Hören und Messen? <http://www.neumann.com/homestudio/de/was-ist-der-unterschied-zwischen-hoeren-und-messen>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [Görne, 2007] Görne, Thomas. (2007). *Mikrofone in Theorie und Praxis: Mit 187 Abbildungen und 23 Tabellen*. Elektor-Verl., Aachen, 8. neue, überarb. u. erw. Aufl. Aufl.

- [Görne, 2015] Görne, Thomas. (2015). *Tontechnik: Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis; mit 216 Bildern und 33 Tabellen*. Medien. Hanser, München, 4., aktualisierte Aufl. Aufl.
- [Hirt, 2017] Hirt, Robin. (2017). *Entwicklung einer virtuellen Konferenz unter besonderer Berücksichtigung der Reproduktion von zuvor aufgenommener Sprache*. Bachelorarbeit, Hochschule der Medien Stuttgart.
- [Hopf, 2011] Hopf, Engelbert. (2011). Nach einem Wahnsinnsjahr zurück zur Normalität: <http://www.elektroniknet.de/markt-technik/halbleiter/nach-einem-wahnsinnsjahr-zurueck-zur-normalitaet-31485.html>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [IEC 60268-4, 2014] IEC 60268-4 (2014). Norm für Elektroakustische Geräte – Teil 4: Mikrofone.
- [Lerch et al., 2009] Lerch, Reinhard., Sessler, Gerhard Martin., und Wolf, Dietrich. (2009). *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*. Springer, Berlin u.a.
- [Neumann und Gabriel, 2003] Neumann, JR., J. J. und Gabriel, K. J.. (2003). A fully-integrated CMOS-MEMS audio microphone. In: *Transducers '03*, S. 230–233, Piscataway N.J. IEEE.
- [Petersen, 1982] Petersen, K. E.. (1982). Silicon as a mechanical material. *Proceedings of the IEEE*, 70(5):420–457.
- [Peus, 1976] Peus, Stephan. (1976). Impuls-Verhalten von Mikrofonen.
- [ROHDE & SCHWARZ GmbH & Co. KG, 2017] ROHDE & SCHWARZ GmbH & Co. KG (2017). HM7042-5: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/service_5_de_web_20160802.pdf, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [Schlaak, 2007] Schlaak, Helmut F.. (2007). *Mikrotechnische Fertigungsverfahren*. Vorlesungsskript, Technische Universität Darmstadt.
- [Schnabel, 2017] Schnabel, Patrick. (2017). MEMS - Micro-Electro-Mechanical Systems: <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/bau/1503041.htm>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [Sengpiel,] Sengpiel, Eberhard. Harmonische, Partialtöne, Teiltöne und Obertöne: <http://www.sengpielaudio.com/Harmonische-Partialtoene-Obertoene.pdf>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [Sonion, 2017] Sonion (2017). Sonion History: <http://www.sonion.com/wp/about/history/>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [STMICROELECTRONICS,] STMICROELECTRONICS. AN4426 Application note: Tutorial for MEMS microphones: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [Veit, 2012] Veit, Ivar. (2012). *Technische Akustik: Grundlagen der physikalischen, gehörbezogenen Elektro- und Bauakustik*. Vogel Fachbuch. Vogel, Würzburg, 7. erw. Aufl. Aufl.
- [Vigna, 2015] Vigna, Benedetto. (2015). STMicroelectronics strikes back (in MEMS...). <https://www.i-micronews.com/mems-sensors-news/5573-stmicroelectronics-strikes-back-in-mems.html>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [Wagner, 2016] Wagner, Jens. (2016). *Einführung in die Grundlagen der Fehlerrechnung - Bestimmung von Messunsicherheiten*. Skript, Universität Heidelberg.

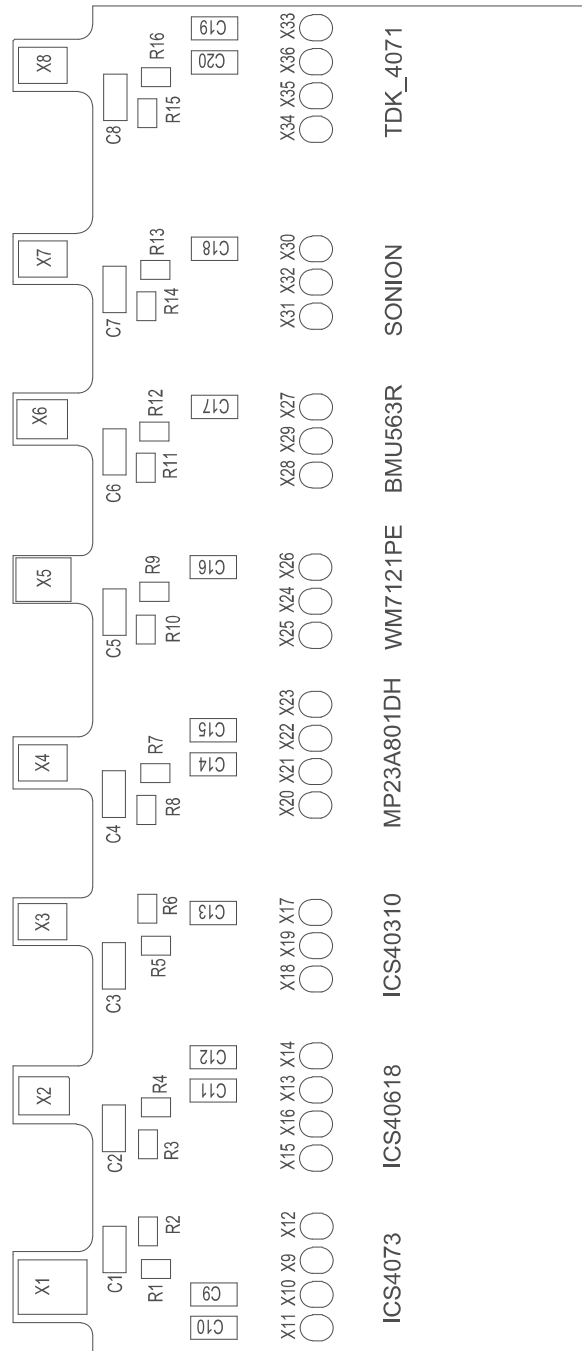
- [Weigold et al., 2006] Weigold, J. W., Brosnihan, T. J., Bergeron, J., und Zhang, X.. (2006). A MEMS condenser microphone for consumer applications. S. 86–89.
- [Weinzierl, 2008] Weinzierl, Stefan., Hg. (2008). *Handbuch der Audiotechnik*. Springer, Berlin and Heidelberg, 1 Aufl.
- [Wikipedia, 2017] Wikipedia (2017). HD-Telefonie: <https://de.wikipedia.org/wiki/HD-Telefonie>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.
- [Wood, 2015] Wood, Laura. (2015). Research and Markets: MEMS Microphone: Shipments are Expected to Grow from 2.4B in 2013 to 6.6B Units in 2019 Pointing to a Market Filled with Opportunities: <http://www.businesswire.com/news/home/20150608006549/en/Research-Markets-MEMS-Microphone-Shipments-Expected-Grow>, Zuletzt geprüft am 30.08.2017.

Anhang

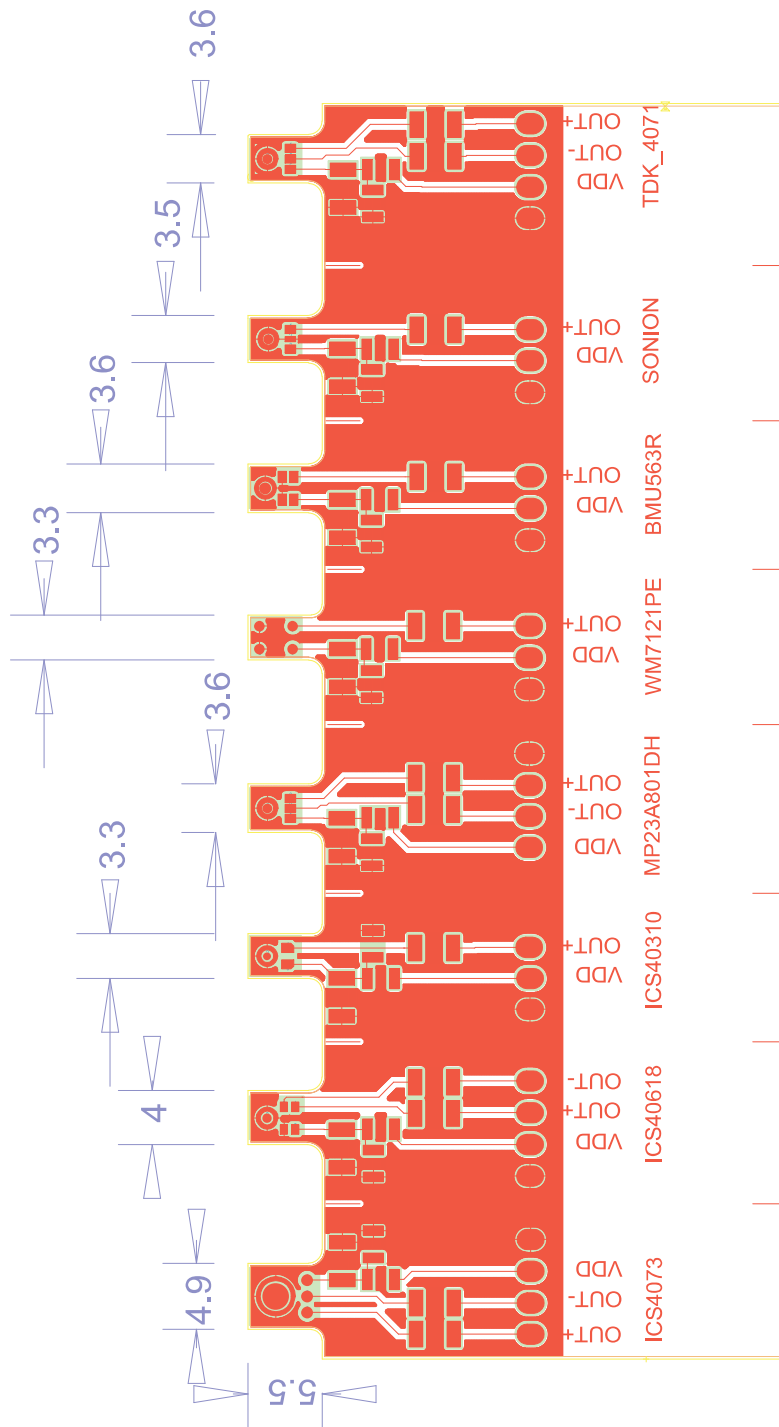
A. Schaltplan: MEMS-Mikrofon-Testplatine



B. Bestückungsplan: MEMS-Mikrofon-Testplatine



C. Abmessungen: MEMS-Mikrofon-Testplatine



F. Subjektiver Vergleich: Sprechertext (vgl. [Hirt, 2017])

Guten Tag zusammen,

wie Sie sehen werden, haben wir heute sehr viel vor.

Wenn wir in diesem Jahr so weiter machen, werden wir große Probleme bekommen.

Es ist immer schön nichts zu tun und stehen zu bleiben, statt mit der Zeit zu gehen.

Schauen Sie, wie lange ich auf und ab laufen kann ohne zu fallen. Und dabei sehe ich gar nicht alt aus.

Jetzt finden Sie wir alle dürfen so viel nehmen wie wir brauchen.

Aber darauf kann man keine Häuser bauen.

Glauben Sie, dass es schon wieder so sein wird?

G. Danksagung

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit möchte ich mich ganz herzlich bei allen beteiligten Personen bedanken.

Im Besonderen bei:

Prof. Oliver Curdt für die Betreuung.

Tobias Gmoser für die Betreuung bei der beyerdynamic GmbH & Co. KG.

Meinen Eltern, engen Freunden sowie Irmhild Näger für die tatkräftige Unterstützung bei der Fertigstellung der Arbeit, besonders in deren Endphase.

Allen Mitarbeitern bei der beyerdynamic GmbH & Co. KG, die mir ein angenehmes und produktives Arbeiten ermöglicht haben.

H. Digitaler Datenträger

Auf dem dieser Arbeit beigelegten Datenträger befinden sich:

- Vorliegende Arbeit als PDF-Version
- Alle im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Messdaten
- Eine Apple Logic-, sowie AAF-Session des Hörvergleichs mit Sprache

