



---

**Machbarkeitsstudie zur Realisierung der  
Phonotaxis am humanoiden Roboter  
mit Hilfe eines binauralen Audiosystems**  
Studienarbeit

**Robert Wolff**

Betreuer: Dr. Manfred Hild

20. August 2008

## **Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Realisierbarkeit der Phonotaxis am humanoiden Roboter. Dazu ist ein binaurales Audiosystem notwendig, welches speziellen Anforderungen genügen muss, um für die Phonotaxis geeignet zu sein. Aus diesem Grund wurde eine Evaluation durchgeführt, um geeignete Miniatur-Mikrofonkapseln für den Einsatz im humanoiden Roboter zu bestimmen. Im Anschluss wurden Experimente mit einem Silikon-Kunstohr und einem Prototyp eines Kunstkopfes durchgeführt. Damit war es möglich, Ansätze für die vertikale Richtungserkennung auf Basis des Frequenzgangs zu untersuchen, welche für die Phonotaxis erforderlich sind. Auch wurden Vergleiche zu frei zugänglichen Referenzmessungen des KEMAR-Kopfes gezogen, die es ermöglichten die eigenen Ergebnisse zu bewerten.

## Danksagung

Vorweg möchte ich allen danken, die mit ihrer Zuarbeit und Unterstützung, die Realisierung dieser Arbeit erleichtert haben. Besonders danke ich Dr. Manfred Hild für die sehr gute Betreuung dieser Arbeit und den regen Wissensaustausch. Er erstellte außerdem den elektronischen Schaltplan für die Verstärkerbox, welche es ermöglichte die verschiedenen Mikrofonkapseln zu untersuchen. Bei den sensiblen Lötarbeiten stand mir Matthias Kubisch mit Rat und Tat zur Seite. Mario Lasseck führte die Vorauswahl der Mikrofonkapseln durch. Thomas Lobig designete den ersten Prototyp des humanoiden Roboterkopfes, auf dessen Grundlage ich einige wichtige Experimente durchführen konnte. Torsten Siedel danke ich für das Fräsen der Verstärkerplatine und die Beratung bei mechanischen Feinarbeiten an der Box. Auch bin ich Bill Gardner und Keith Martin vom MIT zu Dank verpflichtet, welche ihre Referenzmessungen des KEMAR-Kopfes zu Forschungszwecken frei zur Verfügung gestellt haben. Abschließend danke ich allen, die sich die Mühe gemacht haben dieses Dokument kritisch durchzulesen, um mir damit Anregungen für den letzten Feinschliff zu geben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Zielsetzung . . . . .	2
1.3. Gliederung der Arbeit . . . . .	4
<b>2. Durchführung der Messungen</b>	<b>5</b>
2.1. Experimentaldesign . . . . .	5
2.1.1. Gegenstand der Untersuchung . . . . .	5
2.1.2. Messinstrumente . . . . .	6
2.1.3. Messaufbau . . . . .	8
2.1.4. Fehlerbetrachtung . . . . .	9
2.2. Standard-Messverfahren . . . . .	9
2.2.1. Sensitivität . . . . .	9
2.2.2. Signal-Rausch-Verhältnis . . . . .	10
2.2.3. Lineare Verzerrungen . . . . .	11
2.2.4. Nicht-lineare Verzerrungen . . . . .	12
2.3. Anwendungsspezifische Messungen . . . . .	13
2.3.1. Messung spezieller Störsignale . . . . .	13
2.3.2. Varianzen zwischen Kapseln gleichen Typs . . . . .	14
2.3.3. Monaurale Experimente ohne Kunstkopf . . . . .	14
2.3.4. Monaurale Experimente mit Kunstkopf . . . . .	15
<b>3. Auswertung der Messungen</b>	<b>17</b>
3.1. Kapsel-Evaluation . . . . .	17
3.1.1. Sensitivität . . . . .	17
3.1.2. Signal-Rausch-Verhältnis . . . . .	19
3.1.3. Lineare Verzerrungen . . . . .	19
3.1.4. Nicht-lineare Verzerrungen . . . . .	22
3.1.5. Messung spezieller Störsignale . . . . .	22
3.1.6. Varianzen zwischen Kapseln gleichen Typs . . . . .	23
3.1.7. Abschlussbewertung . . . . .	24
3.2. Monaurale Experimente . . . . .	25
3.2.1. Monaurale Experimente ohne Kunstkopf . . . . .	26
3.2.2. Monaurale Experimente mit dem Kunstkopf . . . . .	30
<b>4. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>34</b>
4.1. Zusammenfassung . . . . .	34
4.2. Ausblick . . . . .	35
<b>A. Anhang</b>	<b>37</b>

# 1. Einleitung

Am Lehrstuhl für künstliche Intelligenz der Humboldt Universität zu Berlin wird im Rahmen des EU-geförderten Projektes *Artificial Language Evolution on Autonomous Robots* (ALE-AR) eine neue humanoide Robotergeneration entwickelt. Ziel des 3-jähriges Projektes ist die Erforschung des Kommunikationsverhaltens von autonomen, humanoiden Robotern auf Basis einer künstlich evolvierten Sprache.

## 1.1. Motivation

Im Rahmen dieses Projektes beschäftigt sich meine Arbeit mit der Realisierbarkeit eines binauralen Audiosystems<sup>1</sup> zur akustischen Signalverarbeitung im humanoiden Roboter, insbesondere im Hinblick auf die Phonotaxis.

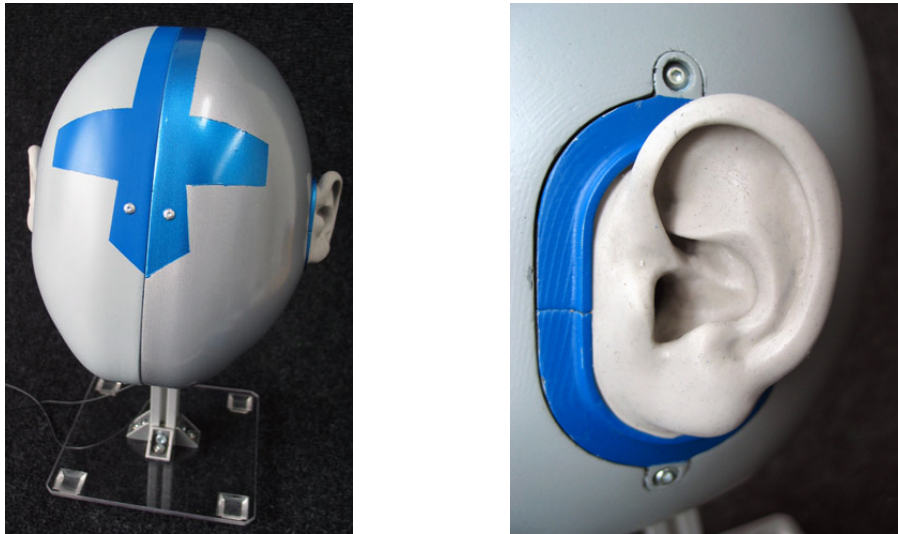
Mit der akustischen Wahrnehmung wird die Sensorik des Roboters um eine Dimension erweitert, die es ihm ermöglicht, Informationen über eine natürliche, auf akustischen Wellen basierten Schnittstelle auszutauschen, wie sie in der Natur weit verbreitet ist. Außerdem ist es mit einem binauralen Sensorsystem möglich, die Richtung zu erkennen, in der sich eine Schallquelle befindet. Dies ist über eine Funkschnittstelle, die in der Regel für die Kommunikation zwischen Robotern genutzt wird, nicht möglich. Auch können auf Basis der akustischen Wahrnehmung ergänzend z.B. zum Kamera-System zusätzliche Informationen über die Umwelt des Roboters gewonnen werden, die es ihm erleichtern sich zu orientieren. Insbesondere wird diese Funktion für die Phonotaxis benötigt, welche in der Natur für viele Lebewesen, z.B. für die Laubheuschrecke, Überlebensgrundlage ist.

Unter dem Begriff Phonotaxis versteht man die durch ein Schallereignis ausgelöste, räumliche Orientierungsreaktion eines Lebewesens zu einer Reizquelle hin. Einerseits beinhaltet dies die Einstellbewegung des Objektes durch Ausrichtung der Körperachse und andererseits die gerichtete Bewegung auf die Schallquelle zu. Den Laubheuschrecken dient diese Fähigkeit zum Auffinden eines paarungsbereiten Fortpflanzungspartners [Jat99]. Im Weiteren wird der Begriff ausschließlich im Zusammenhang mit der Ausrichtung auf eine Schallquelle genutzt. Dabei bezieht er sich nicht nur auf die Körperachse, sondern vielmehr auf den Kopf eines humanoiden Roboters, der sowohl horizontal als auch vertikal ausgerichtet werden kann. Ein solcher Kopf ist in Abbildung 1.1 zu sehen.

Das binaurale Sensorsystem orientiert sich in dieser Machbarkeitsstudie an der äußeren Struktur und Funktionsweise des menschlichen Gehörs. Dazu gehören zwei künstliche Ohren, welche aus einer Ohrmuschel und dem äußeren Gehörgang bestehen. Am Ende des Gehörgangs befindet sich eine Miniatur-Mikrofonkapsel. Diese nimmt das akustische Signal auf, welches in der weiteren Signalverarbeitungskette digitalisiert und analysiert wird. Der wahrnehmbare Frequenzbereich ist ebenfalls am menschlichen Hörbereich orientiert, welcher im Allgemeinen zwischen 16 Hz und 19 kHz liegt [Bla85]. Die künstlichen Ohren sind

---

<sup>1</sup>Ein binaurales System ist ein stereo-akustisches System aus zwei künstlichen, nach menschlichem Vorbild geformten Ohren, welche sich auf einer horizontalen Achse befinden und in entgegengesetzte Richtungen weisen. Am Ende des künstlichen Gehörgangs befindet sich je eine Mikrofonkapsel.



**Abbildung 1.1.** – KUNSTKOPF MIT SILIKONOHREN: erster, am Lehrstuhl entwickelter Prototyp eines humanoiden Roboterkopfes ausgestattet mit zwei Kunstohren aus Silikon (links); Nahaufnahme des rechten Silikonohrs (rechts)

in die Wand eines Gehäuses eingelassen, welches eine vereinfachte Form des menschlichen Schädels modelliert (im Weiteren als Roboterkopf bezeichnet). Angeordnet sind sie auf einer horizontalen Achse mit einem Abstand von 20 cm.

## 1.2. Zielsetzung

Eine wichtige Voraussetzung zur Realisierung eines binauralen Audiosystems ist die Wahl der elektronischen Komponenten der Signalverarbeitungskette. Hierzu gehört insbesondere die Mikrofonkapsel, welche die physikalische Schallwelle in eine elektrische Größe überführt. Qualitative Mängel wirken sich hier ganz besonders auf die korrekte Abbildung aus.

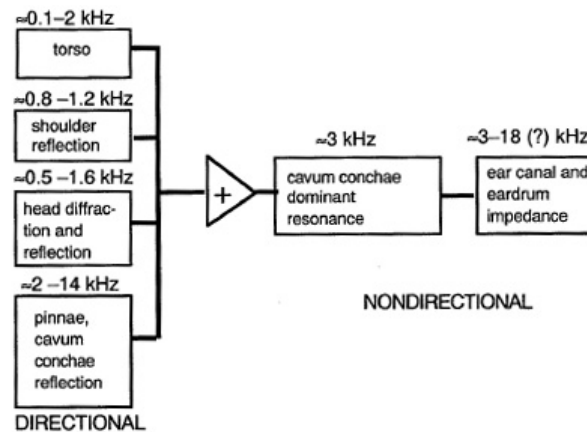
Die Arbeit hat daher zwei Schwerpunkte. Erster zentraler Gegenstand ist die Evaluation einer Auswahl von Miniatur-Mikrofonkapseln, um geeignete Kapseln für die Verwendung im späteren Kunstkopf zu bestimmen. Der zweite Schwerpunkt beschäftigt sich mit der Realisierbarkeit der Richtungserkennung anhand eines binauralen Kunstkopfes, wie er in einer frühen Version des humanoiden Roboters eingesetzt werden kann.

Aus zahlreichen Untersuchungen ist bekannt, dass der Schall, welcher ins menschliche Ohr fällt, einigen Einflüssen unterliegt, welche zu klanglichen Färbungen<sup>2</sup> führen. Ursache sind Reflexionen an Oberflächen verschiedener Körperteile, die u. a. zu Resonanzen bzw. Auslöschungen bestimmter Frequenzbänder führen. Die wichtigsten Größen und die beeinflussten Frequenzbänder, sind in Abbildung 1.2 dargestellt. Die menschliche Ohrmuschel hat dabei den größten richtungsabhängigen Einfluss auf den Schall. Diese Veränderungen am Frequenzgang ermöglichen es dem Menschen, vertikale Richtungsunterschiede wahrnehmen zu

<sup>2</sup>Frequenzfilterung eines Schallsignals, welche die Hervorhebung und Dämpfung einzelner Frequenzen oder ganzer Frequenzbänder beinhaltet.

können. Die horizontale Richtungsbestimmung erfolgt i.A. durch Messung der Laufzeitunterschiede (ITD<sup>3</sup>) und der Pegelunterschiede (ILD<sup>4,5</sup>) zwischen den beiden Ohren. Allerdings ist es so nicht möglich zu unterscheiden, ob sich eine Schallquelle vor oder hinter dem Körper befindet. Zu jeder Position der Schallquelle vor dem Körper gibt es mindestens eine weitere hinter dem Körper mit identischem Schallpegel und gleicher Laufzeit. Man spricht in diesem Fall von der Front-Back-Ambivalenz. Diese Mehrdeutigkeit kann erst durch die Analyse des Frequenzgangs aufgelöst werden, welcher sich durch einen Abschattungseffekt durch die Ohrmuschel unterscheidet.

Im Rahmen der binauralen Signalverarbeitung wird oft der Begriff *head related transfer function* (HRTF) für die Impulsantwort verwendet, welche im Ohr eines Kunstkopfes vom Mikrophon aufgenommen wird. Diese enthält die Filterfunktion des Ohrs und anderer Körperteile (siehe Abbildung 1.2), welche vom jeweiligen Horizontal- und Erhebungswinkel des Schallsignals abhängig ist. Durch die Transformation in den Frequenzbereich kann das genaue Frequenzverhalten analysiert werden und so gegebenenfalls Rückschlüsse auf die vertikale Ausrichtung der Schallquelle zum Kopf getroffen werden.



**Abbildung 1.2.** – HRTF-EINFLÜSSE: richtungsabhängige und -unabhängige Größen, welche die HRTFs nach Gierlich in verschiedenen Frequenzbereichen beeinflussen; Die Bedeutung der richtungsabhängigen Größen für die HRTF nimmt von oben nach unten zu. [Beg94]

Ein wichtiger Aspekt dieser Arbeit war es, experimentelle Messungen zur Richtungserkennung an einem einzelnen Kunstohr bzw. dem Kunstkopf durchzuführen. Im Zentrum der anschließenden Analyse stand dabei die Untersuchung des Frequenzbandes von 2 kHz bis 14 kHz, indem nach Gierlich die wichtigsten richtungsabhängigen Informationen auf Basis der Ohrmuschel zu finden sind. Untersucht wurde insbesondere, ob sich vertikale Richtungsunterschiede mit Hilfe markanter Anhebungen und Absenkungen in einer HRTF eindeutig identifizieren lassen. Dazu wurden sowohl eigene Messreihen erstellt, aber auch Referenz-

<sup>3</sup> *Interaural Time Difference*

<sup>4</sup> *Interaural Level Difference*

<sup>5</sup> Als Pegel wird das logarithmische Maß der Signalamplitude relativ zu einem Bezugswert bezeichnet. Bei elektrischen Pegeln beträgt der Bezugswert 1 V. Bei physikalischen Wellen wird die vom Menschen geringste wahrnehmbare Druckamplitude als Bezugswert benutzt, welcher für eine Frequenz von 1 kHz gemessen bei  $20 \mu Pa$  liegt.

messungen des standardisierten Dummy-Kopfes Knowles Electronic Manikin for Acoustic Research (KEMAR) herangezogen, welche von Bill Gardner und Keith Martin vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) zu Forschungszwecken frei zur Verfügung gestellt wurden. KEMAR ist ein künstlicher, nach menschlichem Vorbild geformter Kopf (Modell DB-4004) auf einem Torso, in dessen Kunstohren (Modell DB-061) sich Mikrofone des Typs Etymotic ER-11 befinden. Damit soll es möglich sein die akustische Wahrnehmung des Menschen realistisch abzubilden. Ziel ist es, im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie zu klären, ob Frequenzunterschiede zur vertikalen Richtungsbestimmung auffindbar sind, sodass die Phonotaxis am vorliegenden Messaufbau realisiert werden kann. Die o.g. Front-Back-Ambivalenz wird dabei nur am Rande betrachtet.

### 1.3. Gliederung der Arbeit

Die Durchführung der Messungen und Experimente wird in Kapitel 2 beschrieben. Im ersten Unterkapitel 2.1 *Experimentaldesign* werden der Messgegenstand (Mikrofonkapseln und Kunstkopf), die Messinstrumente und der Messaufbau beschrieben. Es wird außerdem eine Fehlerbetrachtung durchgeführt. Zur Kapsel-Evaluation wurden einige Standard-Messverfahren (Abschnitt 2.2) angewendet um folgende Charakteristika zu untersuchen:

- Kapsel-Sensitivität
- Signal-Rausch-Verhältnis
- lineare Verzerrungen (Frequenzganganalyse)
- nicht-lineare Verzerrungen (Klirrfaktor und intermodale Störungen).

Die Messresultate der Kapsel-Sensitivität und des Signal-Rausch-Verhältnisses wurden anschließend mit den Herstellerangaben verglichen. Da die Mikrofonkapseln im Rahmen der Robotik eingesetzt werden, ergeben sich spezielle Anforderungen, die durch Standard-Messverfahren nicht abgedeckt werden. Diese wurden teilweise nur exemplarisch an einigen Kapseltypen untersucht:

- Einstrahlung von Störsignalen über die Kapselwand (mithilfe eines Servomotors)
- Varianzen im Frequenz- und Phasenverhalten zwischen Kapseln der gleichen Baureihe
- Monaurale Experimente<sup>6</sup> zum Vergleich richtungsabhängiger Frequenzgänge verschiedener Kapseln

Als letztes Experiment werden HRTFs mit dem eigenen Kunstkopf erstellt und mit denen vom KEMAR-Kopf verglichen. Aussagen über die Realisierbarkeit der Phonotaxis mit diesem Aufbau werden getroffen. Die Messungen werden jeweils in Kapitel 2 *Durchführung der Messungen und Experimente* beschrieben, die zugehörigen Ergebnisse und Analysen befindet sich in Kapitel 3 *Auswertung der Messungen*. Die Schlussfolgerung aus der Mikrofonkapsel-Evaluation befindet sich in Kapitel 3.1.7 *Abschlussbewertung*. Im vierten und letzten Kapitel werden die Ergebnisse noch einmal zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Themen gegeben.

---

<sup>6</sup>Audiomessungen mit einem Ohr



## 2. Durchführung der Messungen

Dieses Kapitel unterteilt sich in drei Abschnitte: In Abschnitt 2.1 Experimentaldesign wird der Gegenstand der Untersuchungen vorgestellt, kurz auf die verwendeten Messinstrumente eingegangen sowie der allgemeine Messaufbau beschrieben. In der Fehlerbetrachtung wird außerdem auf vermeidbare und unvermeidbare Messfehler eingegangen. Im zweiten Abschnitt werden vier Standard-Messverfahren zur Untersuchung von Mikrofonkapseln vorgestellt, welche als Grundlage der Kapsel-Evaluation dienen. Im letzten Abschnitt werden weiterführende Messungen beschrieben, welche für den späteren Einsatz der Mikrofonkapseln im Bereich der humanoiden Robotik, insbesondere zur Anwendung der Phonotaxis, relevant sind.

### 2.1. Experimentaldesign

#### 2.1.1. Gegenstand der Untersuchung

Untersucht wurden folgende 14 Miniatur-Mikrofonkapseln:

Hersteller	Kapseltyp	Durchmesser [mm]	Richtcharakteristik	Einbautechnik	sonstige Eigenschaften
Panasonic	WM-61A	6	omni	Pads	[1]
Panasonic	WM-64PNT	6	omni	Pins	[1], [2]
Panasonic	WM-64MNT	6	omni	Halter	[1], [2]
Projects Unlimited	POM-2735PR	6	omni	Pins	
Projects Unlimited	POM-2746PR	6	omni	Pins	
Projects Unlimited	POM-2746LR	6	omni	Pads	
Horn Industrial	EM-6022BC	6	omni	Pins	
Horn Industrial	EM-6027	6	omni	Pins	
Horn Industrial	EM-1050	10	omni	Pads	
Horn Industrial	EM-6035B	5,8	omni	Pads	
Projects Unlimited	PUM-3546LR	6	uni	Pads	
Horn Industrial	EM-6050U	5,8	uni	Pads	[3]
Ekulit	EMY-6018RBC	6	omni	Pads	
Ekulit	EMY-62NL101	9,7	omni	Pads	

[1] Vibrationsresistenz; [2] HF-Resistenz; [3] Rausch-Reduzierung

**Tabelle 2.1.** – KAPSELTYPEN: alle Kapseltypen mit ihren physikalischen Parametern

Bei der Auswahl dieser Kondensator-Mikrofonkapseln wurde darauf geachtet, dass ein möglichst breites Spektrum im Hinblick auf Hersteller, Richtcharakteristik<sup>1</sup>, Einbautechnik

<sup>1</sup>allgemein wird zwischen gerichtet (unidirektional) und ungerichteter (omnidirektionaler) Schallaufnahme unterschieden. Unidirektional bedeutet, dass es eine bevorzugte Schallrichtung gibt, in der die Sensitivität maximal ist.

und zusätzlicher Techniken wie Störreduktion abgedeckt wurde. Alle Kapseln stammen aus dem Preissegment im Bereich zwischen 1 und 2 Euro und weisen einen Kapseldurchmesser von 5,8 bis 10 mm auf. Jede Mikrofonkapsel wurde im Vorfeld an ein ca. 30 cm langes isoliertes Kabel gelötet, dessen Ende mit einem zweipoligen Stecker versehen war. Eine ergänzende Tabelle der Hersteller-/Distributorangaben zu Sensitivität, SNR und linearem Frequenzgang befindet sich im Anhang in Tabelle A.1.



**Abbildung 2.2.** – MINIATUR-MIKROFONKAPSELN: WM-64MNT von Panasonic mit 0,6 cm Durchmesser (links), EMY-62NL101 von Ekulit mit 1 cm Durchmesser (rechts).

Experimente im Hinblick auf die Eignung der Mikrofon-Kapseln zur vertikalen Richtungs-erkennung wurden mit dem bereits vorgestellten Prototypen eines humanoiden Roboterkopfes durchgeführt, welcher am Lehrstuhl entwickelt und gebaut wurde. Dieser wurde mit zwei Silikonohren aus dem Bereich der Medizin ausgestattet, deren Form dem durchschnittlichen, menschlichen Ohr entspricht.

### 2.1.2. Messinstrumente

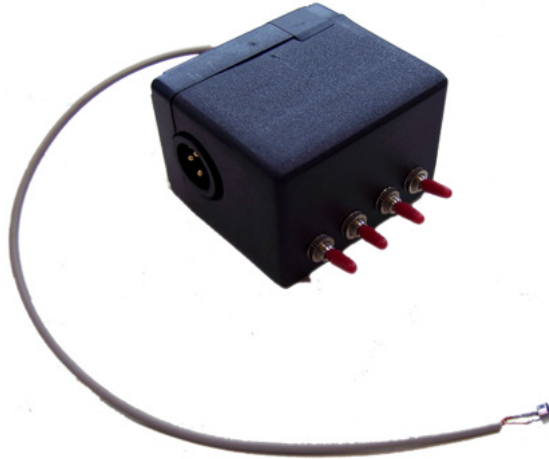
Alle Messungen und Experimente wurden mit folgender Hard- und Softwareunterstützung durchgeführt:

Die Berechnungen wurden auf einem Intel Dual Core PC von Dell durchgeführt. Als externes Audio-Interface diente das EMU 0404USB von Creative Labs, welches mit einem A/D- und D/A-Wandler und integriertem Eingangsverstärker ausgestattet ist. Über ein XLR-Kabel war dieses mit dem Lautsprecher HS50M von Yamaha verbunden. Dieser besitzt einen integrierten Eingangsverstärker und einen separaten Tief- und Hochtoner. Der lineare Frequenzgang liegt zwischen 50 Hz und 20 kHz.

Für die Verbindung der Mikrofonkapseln mit dem Audio-Interface diente eine selbstgebaute Verstärkerbox, an welche nacheinander die Kapseln angeschlossen wurden. Sie verfügt über vier Schalter mit folgenden Funktionen:

- Ein-/Ausschalten der Box, welche durch eine 9V-Block-Batterie versorgt wird.
- Umschalten der Versorgungsspannung der Kapseln zwischen 2 V und 4 V in Abhängigkeit der Vorgabe im Datenblatt der Kapsel.
- Optionales Hinzuschalten einer Pegelverstärkung um 20 dB um das Signal bei der Übertragung zum Audio-Interface störungsresistenter zu machen.

- Eine zusätzliche Funktion der Box besteht darin, mit Hilfe eines intern erzeugten, oszillierenden Testsignal den tatsächlichen, maximalen Spannungspegel der Kapsel zu messen. Durch Normierung mit diesem Pegel, lassen sich die Messungen auch dann noch vergleichen, wenn sich die Grundspannung durch eine abnehmende Batterie-Kapazität verändern sollte. Von dieser Normierung wurde jedoch kein Gebrauch gemacht, da während der Messungen ein konstant er Spannungspegel bestand.



**Abbildung 2.3.** – DIE VERSTÄRKERBOX: mit zuschaltbarem 20 dB-Vorverstärker, variierbarer Kapselspannung und Testsignalgenerator ermöglicht das serielle Vermessen der akustischen Mikrofonkapseleigenschaften

Für Referenzmessungen, wie z. B. zur Bestimmung des inversen Filters zur Kompensation des Frequenzgangs, wurde das hochwertige, omnidirektionale Mikrofon M30 von Earthworks verwendet, welches sich durch einen besonders linearen Frequenzgang von 20 Hz bis 30 kHz auszeichnet. Dieses wurde direkt per XLR-Kabel an das Audio-Interface angeschlossen und mit einer 48V-Phantomspannung versorgt.

Zur Messung des absoluten Schalldruckpegels wurde das SoundLevelMeter 5055 von Peak-Tech verwendet. Dieses wurde direkt am Ort des Messobjekts positioniert. Der A-bewertete Pegel<sup>2</sup> lag während der Messungen zwischen 36 dB/ $\mu Pa$  (Umgebungsgeräuschpegel) und maximal 94 dB/ $\mu Pa$ .

Folgende Programme kamen zur Messung und Analyse zum Einsatz: Für spezielle Messungen wie die Frequenzganganalyse und die Bestimmung der nicht-linearen Verzerrungen wurde das Audio-Analyseprogramm SampleChampion Pro 3.8 von PureBits verwendet. Für einfache Audioaufnahmen und statistische Amplitudenauswertung wurde das Audiotool Cool Edit 2000 von der Syntrium Software Corp eingesetzt. Zur grafischen Darstellung und Analyse von Frequenzgängen wurden die Daten aus beiden Programmen exportiert und mit der Numerik-Software Scilab 4.1 aufbereitet.

Die technischen Komponenten wurden über alle Experimente hinweg mit folgenden Einstellungen betrieben:

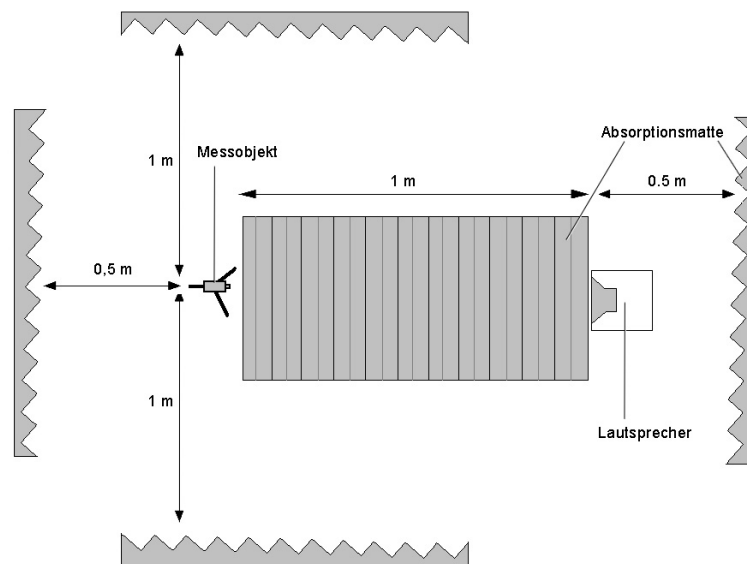
<sup>2</sup>Frequenzabhängige Gewichtung eines berechneten Frequenzspektrums. Die A-Gewichtung entspricht der menschlichen Wahrnehmung des Schalls.

Die Abtastfrequenz betrug im gesamten System 44100 Hz. Die elektronische Verarbeitung und Speicherung wurde mit 16-Bit Integer-Werten durchgeführt, was eine maximale Signaldynamik von 96 dB erlaubt. Damit ließen sich alle benötigte Amplitudenwerte hinreichend genau abbilden.

Die Lautstärke-Regler des Audio-Interfaces und des Lautsprecherverstärkers befanden sich auf maximalem Pegel (0 dB/V), sodass der komplette Amplitudenbereich über die Software geregelt werden konnte. Die separaten Tiefen-, Mitten- und Höhenverstärkerschalter des Lautsprechers befanden sich in den Default-Positionen, sodass es zu keiner Hervorhebung bestimmter Frequenzbänder kam. Der Eingangsverstärker des Audio-Interface wurden auf eine neutrale Position gestellt, sodass das Übersteuern des Audio-Interfaces sowohl beim Anschluss des M30 als auch bei der Verstärkerbox ausgeschlossen werden konnte.

### 2.1.3. Messaufbau

Folgende räumliche Messanordnung wurde verwendet:



**Abbildung 2.4.** – ALLGEMEINE MESSANORDNUNG: Als Messobjekt dient wahlweise eine Mikrofonkapsel (einzeln, im Kunstrohr, oder im Kunstkopf), oder das Messmikrofon M30 (einzeln oder im Kunstrohr).

Der Abstand zwischen Mikrofonkapsel und Lautsprecher betrug 1 m. Beim Kunstkopf-Experiment wurde ein Abstand von 1,4 m gewählt, um die Vergleichbarkeit zu den KEMAR-Daten zu verbessern.

Die Mikrofonkapsel (bzw. der Kunstkopf) befand sich auf einem Stativ in einer Höhe von 1 m, in gleicher horizontaler Ebene mit dem Hochtöner des Lautsprechers. Der Abstand zur Decke betrug ebenfalls 1 m.

Zusätzlich wurden um den gesamten Messaufbau die hochwertigen Absorptionen MaxWall 1141VB von Auralex verwendet. Diese reduzieren die Intensität der Erstreflexionen des Schalls und die Hallwirkung des Raums. Dies ist insbesondere für die Messungen nützlich,

bei denen keine Kompensation mittels inverser Filterung durchgeführt werden konnte. Dazu gehören die Sensitivitäts- und SNR-Bestimmung.

### 2.1.4. Fehlerbetrachtung

Im Rahmen der finanziellen Möglichkeiten wurde relativ hochwertiges Equipment (z. B. Referenzmikrofon M30 von Earthworks, Lautsprecher von Yamaha) verwendet. Außerdem wurde bei den Messungen mit äußerster Sorgfalt vorgegangen. Damit sind gute Rahmenbedingungen gegeben, um für unsere Zwecke aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten.

Alle Mikrofonkapsel-Messungen unterliegen jedoch bestimmten äußeren Einflüssen, die zu einer klanglichen Färbung führen. Dies ist besonders dann ungünstig, wenn Frequenzgangveränderungen untersucht werden sollen, welche nur durch die Mikrofonkapseln verursacht werden.

Äußere Einflussgrößen sind z. B. Übertragungsglieder wie Lautsprecher, Verstärker, Kabel, Anschlüsse, Luft zwischen Lautsprecher und Mikrofonkapsel sowie die Hallwirkung des Messraums. Da der Einfluss stationär ist und auf alle Mikrofonkapseln gleichermaßen wirkt, kann er durch einmalige Erstellung einer inversen Filterfunktion kompensiert werden.

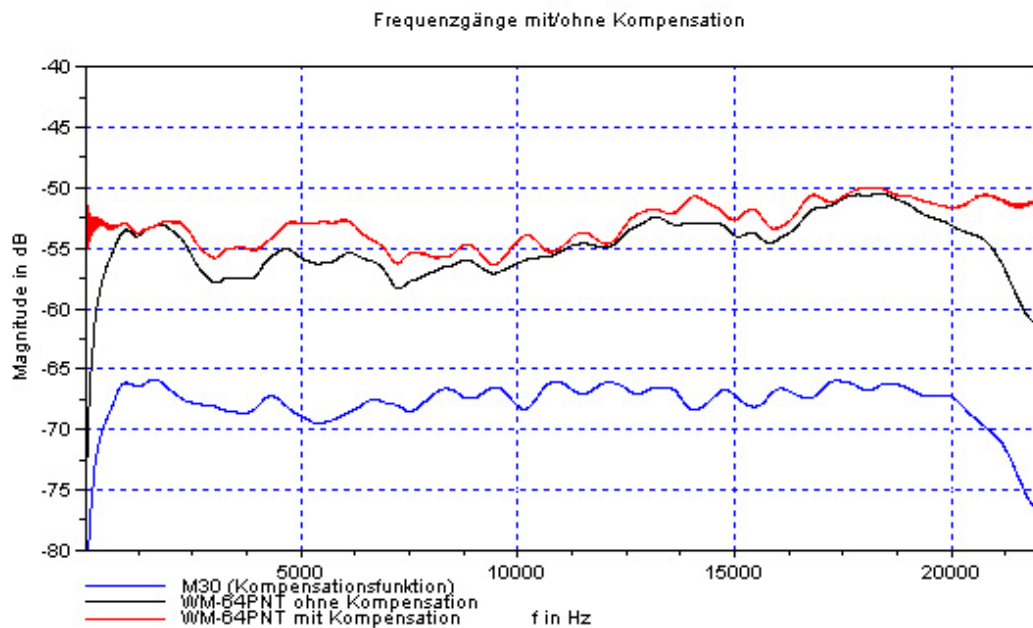
Dazu wurde mit dem Referenzmikrofon M30 eine für den Messaufbau typische Impulsantwort aufgenommen und daraus die Filterwirkung der Komponenten berechnet. Da das M30 einen sehr linearen Frequenzgang hat, kann gewährleistet werden, dass die Abweichungen auf die äußeren Einflussfaktoren zurückzuführen sind. Das zugehörige Spektrum wird nun als Grundlage für die Kompensation mittels inverser Filterung genutzt. Ein Beispiel eines kompensierten (rot) und un kompensierten (schwarz) Frequenzgangs ist in Abbildung 2.5 zu sehen. Die Dämpfung der Frequenzen unter 200 Hz und über 20 kHz wurden sichtbar normalisiert. Die leichte Dämpfung zwischen 2 bis 10 kHz wurde ebenfalls angeglichen. Der Einfluss der Verstärkerbox kann dabei nicht kompensiert werden, da er nicht isoliert gemessen werden kann. Es waren jedoch keine signifikante Unterschiede bei aktiviertem und inaktivem Verstärker festzustellen, abgesehen von der Verstärkung um 20 dB selbst.

Eine Fehlerquelle, die bei einigen Messungen nicht ausgeschlossen werden konnte, ist der Geräuschpegel im Messraum. Aus technischen Gründen steht keine vollständig isolierte Messkammer zur Verfügung. Der minimalste Geräuschpegel im Raum lag bei ca. 36 dB/ $\mu$ Pa. Dies hat bei Experimenten mit hohem Ausgangsamplituden ( $> 80$  dB) keine Konsequenzen, insbesondere dann nicht, wenn über mehrere Messungen gemittelt wird. Bei sensiblen Messungen wie der Bestimmung des Grundrauschpegels der Kapsel kann es jedoch zu einer Überlagerung des Kapselrauschens kommen, was zu Abweichungen vom tatsächlichen Rauschpegel führen kann. Dies muss bei der Bewertung der jeweiligen Messergebnisse berücksichtigt werden.

## 2.2. Standard-Messverfahren

### 2.2.1. Sensitivität

In einer ersten Messreihe wurde die Empfindlichkeit der Kapseln gemessen, um sie mit den Angaben aus den Datenblättern zu vergleichen. Dies diente einerseits zur Validierung der Herstellerangaben. Zum anderen konnten so wichtige Erfahrungen in der Durchführung der sensiblen Audio-Experimente gesammelt werden, welche für weitere Experimente von Nutzen waren.



**Abbildung 2.5.** – LAUTSPRECHERKOMPENSATION: Kompensationsfunktion des M30 (blau), Frequenzgänge der WM-64PNT ohne (schwarz) und mit (rot) Kompensation

Die Empfindlichkeit (Sensitivität) beschreibt die Fähigkeit eines Mikrofons einen physikalischen Druck auf seine Membran (z. B. durch eine akustische Welle) in elektrische Spannung zu überführen. Dabei gibt die Sensitivität an, welchen Spannungspegel ein bestimmter Signal-Pegel erzeugt ([Web03], [Dic97], [Hen93]). Gemessen wird die Sensitivität im freien Feld bzw. im reflexionsfreien Raum mit einem Testton mit einer Frequenz von 1 kHz [Nym]. Je höher die Empfindlichkeit der Kapsel ist, desto geringere Signalamplituden sind ohne Verstärkung wahrnehmbar. Dies ist auch für unsere Anwendung nützlich, da bei einer hohen Sensitivität nur eine geringe zusätzliche Verstärkung nötig ist, welche das Signal-Rausch-Verhältnisses nur geringfügig beeinträchtigt.

In den vorliegenden Messungen wurde zur besseren Vergleichbarkeit sowohl bei den omnials als auch unidirektionalen Kapseln ein 1 kHz-Sinuston verwendet. Die Messergebnisse wurden auch zur Bestimmung des Signal-Rausch-Verhältnisses herangezogen. Der gewählte Ausgangspegel beträgt ca.  $-18 \text{ dB/V}$ , was einem Schalldruckpegel von ca.  $94 \text{ dB}$  am Ort der Mikrofonkapsel entspricht. Nach der Aufnahme wurde für jede Kapsel die durchschnittliche Amplitude (RMS-Wert) aus einem 500 ms langen Ausschnitt des aufgenommenen Signals berechnet.

### 2.2.2. Signal-Rausch-Verhältnis

Eine weitere Angabe, welche in den Datenblättern angegeben wird, ist das Signal-Rausch-Verhältnis kurz SNR (Signal-to-Noise-Ratio). Auch dieses sollte überprüft werden.

Es handelt sich dabei um ein logarithmisches Maß, welches die Differenz zwischen einem

speziellen Signal- und dem Rauschpegel darstellt ([Web03],[Dic97], [Hen93]). Der SNR gibt so den Dynamikumfang der Mikrofonkapsel an, da keine Amplituden unterhalb des Rauschpegels messbar sind. Er sollte laut Herstellerangaben zwischen 55 und 62 dB liegen. Die Berechnung erfolgt entweder direkt über die Amplituden

$$\text{SNR} = 20 \lg \left( \frac{\text{Amplitude}_{\text{signal}}}{\text{Amplitude}_{\text{noise}}} \right)$$

oder alternativ über die Differenz der zuvor berechneten Pegel:

$$\text{SNR} = \text{Pegel}_{\text{signal}} - \text{Pegel}_{\text{noise}}$$

$$\text{Pegel}_x = 20 \lg \left( \frac{\text{Amplitude}_x}{\text{Amplitude}_{\text{ref}}} \right) \text{ mit } \text{Amplitude}_{\text{ref}} = 1 \text{ V}$$

Hier wurde die zweite Formel benutzt, also der Signal- und Rauschpegel separat bestimmt. Der Signalpegel wird mit einem 1 kHz-Sinus gemessen, welcher am Ort der Mikrofonkapsel einen Schalldruckpegel von 94 dB/ $\mu\text{Pa}$  besitzen muss. Dabei konnte auf die Messergebnisse der Sensitivitätsmessung zurückgegriffen werden.

Der Rauschpegel wird in einer schalldämmten Kammer gemessen, ohne Emission eines Schallsignals. Der gemessene Pegel gibt dann das Grundrauschen der Kapsel an, welches durch die elektrischen Komponenten erzeugt wird. Dieses wird normalerweise zusätzlich A-bewertet, worauf hier jedoch aus technischen Gründen verzichtet werden muss.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Rauschpegel als ungewichteter Durchschnittspegel (RMS) einer einsekündigen geräuschlosen Aufnahme im Messraum bestimmt.

### 2.2.3. Lineare Verzerrungen

Lineare Verzerrungen sind frequenzabhängige Verstärkungen und Dämpfungen eines Schallsignals, die sich aufgrund physikalischer Eigenschaften der Übertragungsglieder, insbesondere der Mikrofonkapsel, ergeben. Die Auswertung linearer Verzerrungen wird anhand einer Frequenzganganalyse durchgeführt. Dazu muss ein Signal mit gleichverteilter Energie über alle Frequenzen als Eingangssignal gewählt werden (z. B. weißes Rauschen oder ein idealer Impuls).

Für jeden Kapsel-Typ sowie für das Referenzmikrofon wurden daher drei Frequenzspektren für unterschiedliche Messkonfigurationen erstellt:

- Messung 1: Direktausrichtung der Kapsel auf den Höhenlautsprecher bei  $-20 \text{ dB}$  Ausgangspegel.
- Messung 2: Wiederholung von Messung 1 mit einem Pegel von  $-34 \text{ dB}$ .
- Messung 3: Wiederholung von Messung 1, wobei die Kapsel in einem Winkel von  $90^\circ$  zum Lautsprecher ausgerichtet war (bei  $-20 \text{ dB}$  Ausgangspegel).

Die Frequenzgänge wurden mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) aus den Impulsantworten der Kapseln berechnet. Die Impulsantwort ist die Korrelationsfunktion zwischen Ausgangssignal und Eingangssignal auf Basis einer sogenannten Maximal-Length-Sequence (MLS).

Dabei handelt es sich um ein binäres Pseudozufallssignal, welches keine Zyklen enthält. Die Energie der Frequenzen ist über die Dauer der Messung gleichmäßig verteilt, was einem

gleichspannungsfreien, weißen Rauschen entspricht. Dies führt zu einer geringen Störanfälligkeit gegenüber sporadisch auftretenden Umgebungsgeräuschen. Durch die Mittelwertbildung über mehrere Messungen kann das SNR zusätzlich verbessert werden. Die Messung wurde jeweils dreimal wiederholt und anschließend der Mittelwert der Impulsantworten gebildet. Nicht-lineare Verzerrungen der Kapsel, welche die Messung der linearen Verzerrung verfälschen, können durch Wahl einer hinreichend langen Sequenz reduziert werden ([GK94], [Hee03]). Die verwendete ML-Sequenz hatte eine Länge von 371 ms und wurde mit einem 16-kBit-Register erzeugt.

Zur endgültigen Bestimmung des Frequenzgangs wurde ein 200 Samples langes, rechtsgewichtetes Blackman-Harris-Fenster verwendet. Dieses begann 5-10 Samples vor dem ersten Impuls. Im Anschluss an die FFT folgte eine inverse Filterung zur Kompensation äußerer Einflüsse, wie bereits unter Abschnitt 2.1.4 *Fehlerbetrachtung* beschrieben.

### 2.2.4. Nicht-lineare Verzerrungen

Nicht-lineare Verzerrungen sind qualitative Veränderungen der Kurvenform eines aufgenommenen Signals. Diese amplitudenabhängigen Verstärkungen und Dämpfungen werden durch das elektronische Übertragungsglied verursacht, insbesondere durch die Mikrofonkapsel [Dic97]. Diese Art der Verzerrung kann nicht kompensiert werden, sodass die bevorzugten Kapseln ein möglichst geringes Maß an Nichtlinearität aufweisen sollten. Dies kann sonst zu Fehlinterpretationen des Spektrums führen, z. B. bei der Richtungsanalyse von Schalleignissen. Die Analyse nicht-linearer Verzerrungen kann mit Hilfe des Klirr- und des Intermodulationsfaktors, aber auch des Differenztonfaktors durchgeführt werden. Im Weiteren werden die ersten beiden Messgrößen verwendet.

Bestimmt wird der Faktor dabei für die Mikrofonkapsel und die Verstärkerbox zusammen, wobei die Kapsel den größten Einfluss hat. Zur Analyse dient das Programm SampleChampion, welches geeignete Ausgangssignale erzeugt und die anschließende Faktorbestimmung automatisch durchführt.

#### Klirrfaktor

Der Klirrfaktor (THD<sup>3</sup>) ist die am häufigsten verwendete Messgröße für nicht-lineare Verzerrungen. Er gibt an, wie hoch der Anteil der Oberschwingungen (Harmonischen), die bei der Verzerrung eines sinusförmigen Signals entstehen, im Vergleich zum Gesamtsignal ist.

Allgemein ist der Klirrfaktor  $k$  als das Verhältnis des Effektivwertes aller Verzerrungsprodukte, also aller Harmonischen, zum Effektivwert des verzerrten Gesamtsignals definiert [Dic97].

In unserem Fall wurde die alternative Form verwendet, bei der der Effektivwert des Verzerrungsproduktes zum Effektivwert der Grundschwingung ins Verhältnis gesetzt wird. Die Formel lautet allgemein:

$$k = \frac{\sqrt{U_{2f}^2 + U_{3f}^2 + U_{4f}^2 + \dots}}{U_f}$$

Für die Bestimmung des Faktors dient ein Messton mit der Frequenz  $f = 1 \text{ kHz}$ , welcher an der Mikrofonkapsel einen Schalldruckpegel von  $94 \text{ dB}/\mu\text{Pa}$  hat.

---

<sup>3</sup>Total Harmonic Distortion



### Intermodulationsfaktor

Im späteren Einsatz der Kapsel wurde statt einer reinen Schwingung ein Gemisch aus verschiedensten Frequenzen übertragen. Dabei können nicht nur Harmonische als nicht-lineare Verzerrungen auftreten, sondern auch eine Vielzahl von Summen- und Differenztönen, die besonders störend für die Analyse sind. Diese sind mit dem Intermodulationsfaktor (IMD<sup>4</sup>) messbar.

Der Intermodulationsfaktor  $m$  ist definiert als das Verhältnis der Summe der Effektivwerte der Spannungen der am Ausgang des Messobjekts neu auftretenden Summen- und Differenztöne zweier Sinus-Messtöne mit der Frequenz  $f_1$  und  $f_2$  zum Effektivwert des höheren Messtons  $f_2$  am Ausgang des Messobjekts. Die Spannungen der Messtöne sollen im Verhältnis 4 : 1 stehen [Dic97]. Die allgemeine Formel lautet:

$$m = \frac{1}{U_{f_2}} \sqrt{(U_{f_2-f_1} + U_{f_2+f_1})^2 + (U_{f_2-2f_1} + U_{f_2+2f_1})^2 + \dots + (U_{f_2-nf_1} + U_{f_2+nf_1})^2}$$

Als Ausgangssignal wurde eine Kombination aus den Messtönen  $f_1 = 1 \text{ kHz}$  und  $f_2 = 8 \text{ kHz}$  verwendet. In der Literatur sind auch andere Kombinationen von Frequenzen vorzufinden z. B.  $f_1 = 500 \text{ Hz}$  und  $f_2 = 4 \text{ kHz}$ .

## 2.3. Anwendungsspezifische Messungen

### 2.3.1. Messung spezieller Störsignale

In der Robotik wird man bei der Schallaufnahme mit dem Problem des Körperschalls konfrontiert. Die ansteuerbaren Gelenke des Roboters werden üblicherweise durch Servo-Motoren angetrieben [HMS07], welche ein relativ breitbandiges Geräusch erzeugen. Dieses kann in Form von Vibrationen nicht nur über die Luft, sondern auch über die starrverbundenen, physikalischen Komponenten des Roboters bis zur Mikrofonkapsel im Ohr übertragen werden. Schall, der sich in einem Festkörper ausbreitet, nennt man Körperschall.

Die Amplitude des Körperschalls, welcher über die Mikrofonkapselwand zur Kapselmembran vordringt, kann das über die Luft übertragene Nutzsignal um ein vielfaches übersteigen. Daher sollten grundsätzlich Vorkehrungen bezüglich der Isolation und Filterung solcher Signale getroffen werden. Die Kapseln unterscheiden sich auch in ihrer Empfindlichkeit bezüglich der Schallaufnahme über die Kapselwand. Dies wurde in der vorliegenden Messung untersucht. Dazu wurde ein handelsüblicher Servo-Motor DYNAMIXEL AX-12 von Robotis siehe Abbildung 2.6 verwendet, welcher in einer aktuellen humanoiden Robotergeneration eingesetzt wird [HMS07].

An diesen Motor wurde die Kapselwand der Mikrofonkapsel gepresst, sodass über die Auflagefläche ein direkter Körperkontakt bestand. Der Motor führte während der Messung eine gleichmäßige rotierende Bewegung aus, wodurch ein relativ breitbandiges Geräusch erzeugt wurde. Der Schall, welcher von der Kapsel gemessen wird, wird sowohl über die Luft als auch über den Körper übertragen. Für einen 200 ms langen Signalausschnitt wurde anschließend der durchschnittliche Signalpegel (RMS) berechnet und die Verstärkung von 20 dB abgezogen. Um anschließend eine Aussage über den Körperschallanteil machen zu können, wurde die Differenz zwischen diesem Pegel zur Sensitivität der Kapsel berechnet. So konnten die Motorgeräuschempfindlichkeiten zwischen den Kapseltypen verglichen werden.

---

<sup>4</sup>Intermodulation Distortion



**Abbildung 2.6.** – DYNAMIXEL AX-12: Elektromotor mit Servoantrieb, welcher u.a. zur Bewegungssteuerung in humanoiden Robotern benutzt wird.

### 2.3.2. Varianzen zwischen Kapseln gleichen Typs

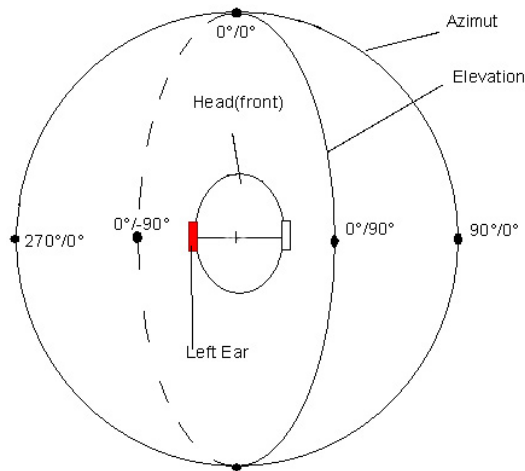
Im Rahmen der Kapseluntersuchung ist es relevant wie sich die Kapseln einer Baureihe untereinander verhalten. Geeignet sind sie nur für den Einsatz in der Stereosignalverarbeitung, wenn sie einen möglichst identischen Frequenz- und Phasengang aufweisen. Auch die Phase ist hier interessant, da sie einen vielversprechende Ansatz insbesondere zur Richtungserkennung bieten kann [Beg94]. Exemplarisch wurden vom Typ WM-64MNT zwei Kapseln und vom Typ WM-64PNT von Panasonic und dem Typ PUM-3546LR von Projects Unlimited je drei Kapseln verglichen. Die Panasonic-Kapseln wurden als Vertreter der omnidirektionalen Kapseln gewählt, weil sie nach bisheriger Einschätzung gut bewertet wurden und damit auch das Potential haben im späteren Roboterkopf eingesetzt zu werden. Die Kapsel PUM-3546LR wurde als Vertreten der unidirektionalen Kapseln zum Vergleich gewählt.

Die Frequenz- und Phasengänge wurden für die Impulsantwort eines direkt gerichteten Signals mit dem Ausgangspegel von  $-20\text{ dB}$  analog zu Messung 1 aus Abschnitte 2.2.3 erzeugt. Anschließend wurden die Differenzen der Spektren zwischen den Kapseln eines Typs berechnet.

### 2.3.3. Monaurale Experimente ohne Kunstkopf

Im ersten Durchgang der Kunstohrmessungen wurde der Einfluss auf den Frequenzgang eines alleinstehenden Silikonohrs mit verschiedenen Messkapseln untersucht. Die Position der Signalquelle (Lautsprecher) wurde dabei in Relation zum Kunstohr variiert. Der Abstand verändert sich dabei nicht, jedoch der Horizontal (Azimuth-) sowie der Erhebungswinkel (Elevation). Die Impulsantworten, aus denen die Frequenzgänge bestimmt wurden, können mit HRTFs verglichen werden. Dabei ist es üblich, dass Azimut und Elevation der Signalquelle in Relation zu einem im Zentrum befindlichen Kopf angegeben werden. Davon wurde hier ebenfalls Gebrauch gemacht. Man stelle sich daher vor, es handele sich um das linke Ohr eines imaginären Kunstkopfes. Das Paar  $0^\circ/0^\circ$  (Azimuth/ Elevation) bedeutet, dass die Quelle den Kopf direkt von vorne in Höhe der Ohren beschallt. Der Abstand zum Kunstohr beträgt 1 m. In horizontaler Richtung wird der Winkel im Uhrzeigersinn (in einigen Quellen auch gegen den Uhrzeigersinn [Beg94] wachsend von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  angegeben. Der Erhebungs-

winkel wird von  $-90^\circ$  bis  $+90^\circ$  angegeben, was an den Grenzen einer Position der Schallquelle senkrecht unter- bzw. überhalb des Kopfes entspricht. Im Rahmen der Messdurchführung



**Abbildung 2.7.** – HRTF-KOORDINATEN: Das Winkelpaar aus Azimuth und Elevation gibt die Position der Schallquelle bezogen auf den Kunstkopf an. So wird das Spektrum der HRTF eindeutig einer räumlichen Orientierung zugeordnet.

wurde nicht die Position der Schallquelle, sondern die Orientierung des Messobjekts geändert, da es mit weniger Aufwand verbunden war. Der akustische Effekt ist jedoch derselbe, da die Wand- und Bodenreflexionen nicht in die Frequenzganganalyse eingehen, wie bereits im Kapitel 2.1.3 beschrieben wurde.

Mit den Kunstohr-Messungen wurden zwei Ziele verfolgt:

- Zum einen sollte gezeigt werden, dass die kostengünstigen Miniatur-Mikrofonkapseln die charakteristischen Frequenzpegelveränderungen genauso gut abbilden wie das M30.
- Zum anderen sollte geprüft werden, ob der Einfluss des Kunstohrs signifikante Veränderungen in den HRTFs bewirkt, die eine Grundlage für die Richtungsanalyse darstellen können.

Dabei kamen die Kapseltypen WM-64MNT und PUM-3546LR (unidirektional) zum Einsatz, welche in das linke Silikonohr eingesetzt wurden. Zum Vergleich wurde auch das Referenzmikrofon M30 verwendet, welches aufgrund seines schmal zulaufenden Mikrofoneingangs (ca. 6 mm Durchmesser) genauso in das Kunstohr integriert werden konnte wie die Mikrofonkapseln. Es wurden fünf verschiedene Anordnungen zwischen Kapsel und Signalquelle gewählt, auf deren Grundlage erste Gemeinsamkeiten und Unterschiede der horizontalen und vertikalen Verschiebung untersucht werden konnten. Die Anordnungen lauten (Azimuth/Elevation):  $0^\circ/0^\circ$ ,  $270^\circ/0^\circ$ ,  $180^\circ/0^\circ$ ,  $270^\circ/-35^\circ$  und  $270^\circ/35^\circ$ .

#### 2.3.4. Monaurale Experimente mit Kunstkopf

Die Untersuchung wurde auf Basis von 20 Messungen mit fünf verschiedenen Erhebungswinkeln von  $-40^\circ$  bis  $+40^\circ$  im  $20^\circ$ -Intervall für je vier Horizontalwinkel ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ )

durchgeführt. Die betrachteten Erhebungswinkel werden in dieser Arbeit auf den Bereich zwischen  $+40^\circ$  und  $-40^\circ$  beschränkt. In einer weiterführenden Untersuchung müssen natürlich auch Quellen außerhalb dieses Bereichs berücksichtigt werden. Dies ist jedoch nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit. Zum Vergleich wurde der externe HRTF-Datensatz eines KEMAR-Kopfes herangezogen. Auf Basis der gegebenen Impulsantworten wurden die entsprechenden Frequenzgänge berechnet und mit denen der eigenen Kunstkopfmessungen verglichen, um gegebenenfalls Aussagen verallgemeinern zu können. Die eigenen Messungen wurden mit dem am Lehrstuhl entwickelten Prototyp eines Roboterkopfes durchgeführt, welcher bereits vorgestellt wurde. Die Mikrofonkapsel WM-64PNT kam dabei zum Einsatz, da mit dieser bereits erfolgreich Messungen mit dem Silikonohr durchgeführt wurden. Für eine optimale Vergleichbarkeit mit den KEMAR-Daten wurde derselbe Abstand von 1,4 m zwischen Schallquelle und Achse der Ohren, identische Ausrichtungen, ein gleichlanges Messsignal (16k-ML-Sequenz) sowie ein identisches Transformationsfenster (200 Samples) verwendet.

## 3. Auswertung der Messungen

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Messungen getrennt analysiert und ausgewertet. Die Auswertung der ersten sechs Messungen findet im Rahmen der Kapsel-Evaluation statt, welche mit einer zusammenfassenden Abschlussbewertung bezüglich der späteren Einsetzbarkeit der verschiedenen Kapseltypen endet.

Getrennt von der Kapsel-Evaluation werden die monauralen Experimente ausgewertet, welche Aussagen über die Realisierbarkeit der Phonotaxis im humanoiden Roboter zulassen.

### 3.1. Kapsel-Evaluation

Die fünfstufige Bewertungssymbolik, welche zur Bewertung der Mikrofonkapseltypen genutzt wurde, lautet wie folgt:

Symbol	Wertigkeit
++	2
+	1
o	0
-	-1
--	-2

Die Anwendung der Symbolik auf die verschiedenen Kategorien wird separat in den entsprechenden Unterkapiteln beschrieben. Die Bewertung „o“ orientierte sich am arithmetischen Mittel der Messungen einer Kategorie. Abstufungen finden meist klassisch statt, z. B. bei Amplitudenhalbierung/-verdopplung ( $\pm 6$  dB).

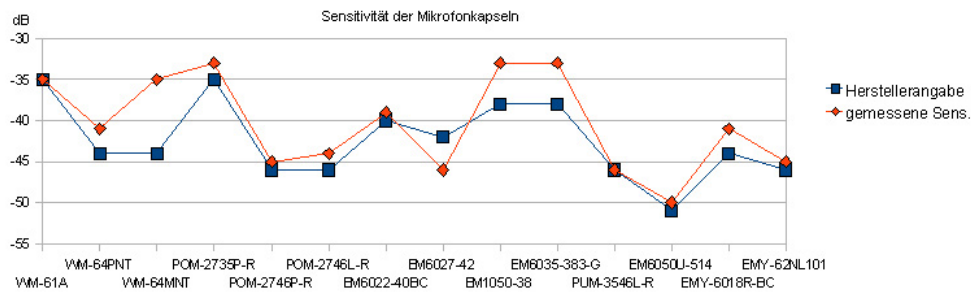
Abschließend wurde ein Gesamtwert für jeden Kapseltyp als Summe der Einzelbewertungen errechnet. So konnte festgelegt werden, welche Kapseltypen im späteren Einsatz bevorzugt werden sollten.

#### 3.1.1. Sensitivität

Laut den Herstellern liegt die Empfindlichkeit aller Kapseln zwischen  $-35$  dB und  $-51$  dB. Die Messungen ergaben nach Abzug der Verstärkung von  $20$  dB einen fast identischen Bereich zwischen  $-33$  dB und  $-50$  dB.

Die Herstellerangaben der einzelnen Kapseln sollten sich, sofern der Messaufbau vergleichbar ist, durch die gemessenen Werte bestätigen lassen. In der Tat zeigt die folgende Grafik, dass die eigenen Messergebnisse bis auf wenige Ausnahmen mit den Angaben aus den Datenblättern korrelierten:

Kleine Abweichungen lassen sich durch kapseltypspezifische Varianzen erklären, welche je nach Kapsel zwischen  $\pm 2$  dB und  $\pm 4$  dB liegen. Außerhalb der Varianzen liegen nur die Messungen von WM-64MNT ( $+9$  dB Abweichung), EM-6035383G ( $+5$  dB) und EM-105038 ( $+5$  dB). Durch die Messung mit einer weiteren Kapsel ließ sich die höhere Sensitivität der



**Abbildung 3.1.** – VERGLEICH DER SENSITIVITÄTEN: Die Herstellerangaben der Sensitivität konnten durch eigene Messungen fast vollständig bestätigt werden.

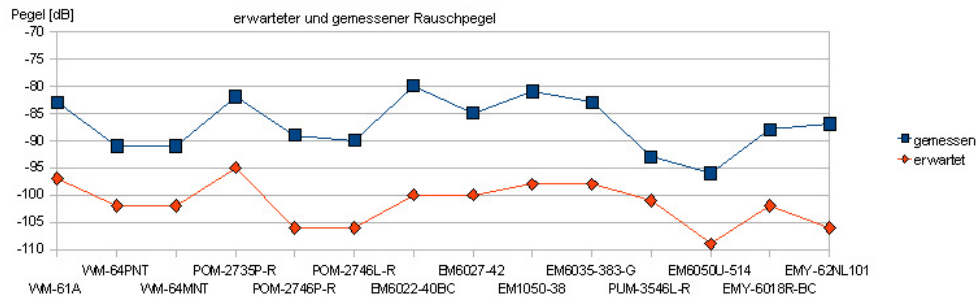
WM-64MNT bestätigen, was entweder bedeutet, dass es sich dabei zufällig um zwei Kapseln handelt, die außerhalb der Norm liegen, oder die Angabe im Datenblatt möglicherweise nicht korrekt ist. Dies konnte nicht eindeutig geklärt werden. Es konnten 75% der Herstellerangaben bestätigt werden. Dies zeigt, dass der gewählte Messaufbau für die Analyse der Kapseln geeignet war und auch für weitere Messungen verwendet werden kann. In der folgenden Tabelle befindet sich eine vollständige Auflistung der Sensitivität laut Hersteller, den offiziellen Varianzen und den eigenen Messergebnissen. Letzteres wird als Grundlage für die Bewertung herangezogen. Beginnend bei  $-33\text{ dB}$  wurde eine Abstufung der Bewertung im  $6\text{ dB}$ -Intervall durchgeführt.  $-6\text{ dB}$  bedeutet die Halbierung der gemessenen Signalamplitude.

Typ	Sensitivität laut DB [dB]	Varianz laut DB [dB]	gemessene Sensitivität [dB]	Bewertung
WM-61A	-35	$\pm 4$	-35	+
WM-64PNT	-44	$\pm 3$	-41	o
WM-64MNT	-44	$\pm 3$	-35	+
POM-2735PR	-35	$\pm 2$	-33	+
POM-2746PR	-46	$\pm 3$	-45	-
POM-2746LR	-46	$\pm 3$	-44	o
EM-6022BC	-40	$\pm 2$	-39	o
EM-6027	-42	$\pm 3$	-46	-
EM-1050	-38	$\pm 2$	-33	+
EM-6035B	-38	$\pm 3$	-33	+
PUM-3546LR	-46	$\pm 3$	-46	-
EM-6050U	-51	$\pm 4$	-50	-
EMY-6018RBC	-44	$\pm 4$	-41	o
EMY-62NL101	-46	N/A	-45	-

**Tabelle 3.2.** – BEWERTUNG DER SENSITIVITÄT: Angaben zur Sensitivität (Spalte 1) und Varianz (Spalte 2) stammen vom Hersteller. Bewertet wurde jedoch auf Basis der eigenen Messergebnisse (Spalte 3).

### 3.1.2. Signal-Rausch-Verhältnis

Während die Signalpegel der Kapseln aufgrund der Sensitivitätsmessung bereits vorlagen, stellte sich die Bestimmung des Rauschpegels der Kapsel unter den gegebenen Umständen als problematisch heraus.



**Abbildung 3.3.** – VERGLEICH DER RAUSCHPEGEL: Die  $20\text{ dB}$  Verstärkung wurde bereits bei den gemessenen Werten abgezogen. Eine Liste aller Werte befindet sich im Anhang A.2.

Zum einen konnte nur der Rauschpegel der gesamten Messkette bestimmt werden und nicht der der Kapsel selbst. Die Erhöhung des Rauschpegels kann  $1 - 2\text{ dB}$  pro zwischengeschaltetem Übertragungsglied betragen. Diese Einfluss betrifft alle Kapseln gleichermaßen, sodass die Kapsel-Messungen untereinander vergleichbar sind. Der gemessene Rauschpegel weicht je nach Typ um  $8$  bis  $20\text{ dB}$  vom erwarteten Rauschpegel ab. Jedoch ist davon auszugehen, dass das elektronische Rauschen der Messkette zusätzlich durch das Umgebungsruschen des nicht-optimalen Messraums überlagert wurde und die Messergebnisse daher nicht mit den Datenblättern vergleichbar sind.

Die Kapsel-Evaluation bezüglich der SNR kann daher nur auf Basis der Angaben im Datenblatt erfolgen. Die Bewertung wurde anhand der Herstellerangaben durchgeführt und beginnend bei  $62\text{ dB}$  mit „+“ in  $3\text{ dB}$ -Schritten abgestuft, wie aus Tabelle 3.4 hervorgeht.

### 3.1.3. Lineare Verzerrungen

Die Darstellung aller Spektren der Mikrofonkapseltypen befinden sich im Anhang A.3.

Die Bewertung der Mikrofonkapseln bezüglich des Frequenzverhaltens wird wie folgt durchgeführt: Bewertet wurde jeweils der Frequenz-Bereich zwischen  $500\text{ Hz}$  und  $14\text{ kHz}$ , da in diesem Bereich später die meisten Informationen u.a. zur vertikalen Richtungserkennung zu erwarten sind [Beg94].

#### Analyse 1:

Durch die Untersuchung des Frequenzgangs der Anordnung mit Direktausrichtung sollten die vom Kapseltyp abhängigen, charakteristischen Hervorhebungen und Absenkungen bestimmter Frequenzbänder erkannt werden. Grundsätzlich fiel auf, dass trotz der Kompensation der Umgebungseinflüsse geringe Frequenzanhebungen und -absenkungen von  $\pm 1\text{ dB}$  sichtbar waren. Diese sind mit Messtoleranzen zu erklären, die bei der Analyse vernachlässigt werden können.

Signifikante Charakteristiken eines Kapseltyps sind die Anhebungen und Absenkungen des Spektrums, welche sich über ein Frequenzband von mehreren Kilohertz erstrecken oder

Typ	SNR laut Datenblatt [dB]	Bewertung
WM-61A	62	+
WM-64PNT	58	o
WM-64MNT	58	o
POM-2735PR	60	+
POM-2746PR	60	+
POM-2746LR	60	+
EM-6022BC	60	+
EM-6027	58	o
EM-1050	60	+
EM-6035B	60	+
PUM-3546LR	55	-
EM-6050U	58	o
EMY-6018RBC	58	o
EMY-62NL101	60	+

**Tabelle 3.4.** – SNR-WERTE: Bewertung der Kapseln auf Grundlage der SNR-Werte der Hersteller

in den ersten 14 kHz eine Pegeldifferenz zwischen Minimum (niedrigster Dip<sup>1</sup>) und Maximum (höchster Peak<sup>2</sup>) von 6 dB überschreiten. In diesem Fall findet eine Abwertung der Kapsel statt, da ein möglichst linearer Frequenzgang angestrebt wird. Bei einem besonders linearen Frequenzgang (z. B. bei der WM-64MNT) findet eine Aufwertung statt. Am Beispiel der Abbildung 3.5 wurde die Bewertung „-“ vergeben, da der relevante Frequenzgang (im Diagramm blau) einen maximalen Peak bei ca. 5 kHz mit  $-46$  dB aufweist und das Minimum (Dip) bei ca. 14 kHz mit  $-56$  dB. Damit wurde die festgelegte Toleranz von 6 dB weit überschritten.

#### Analyse 2:

Durch Vergleich der Messungen ( $-34$  dB) mit der ersten Messung ( $-20$  dB) sollten Rückschlüsse auf die pegelabhängige Frequenzbewertung eines Kapseltyps getroffen werden.

Im Idealfall sind Messung 1 und 2 abgesehen von einem Pegeloffset von ca. 14 dB (aufgrund der unterschiedlichen Testsignalpegel) bei guten Mikrofonkapseln identisch. Die Kapsel bildet in diesem Fall sowohl hohe als auch niedrige Signalamplituden gleich ab, sodass keine pegelabhängige Normierung durchgeführt werden muss. Abweichungen der Pegel von bis zu  $\pm 1$  dB sind tolerabel. Es lagen fast alle Kapseltypen in diesem Toleranzbereich. Nur bei den Kapseltypen POM-2735PR und EMY-62NL war eine Abstufung zu erkennen (siehe Abbildung A.4 Differenz der Frequenzgänge).

#### Analyse 3:

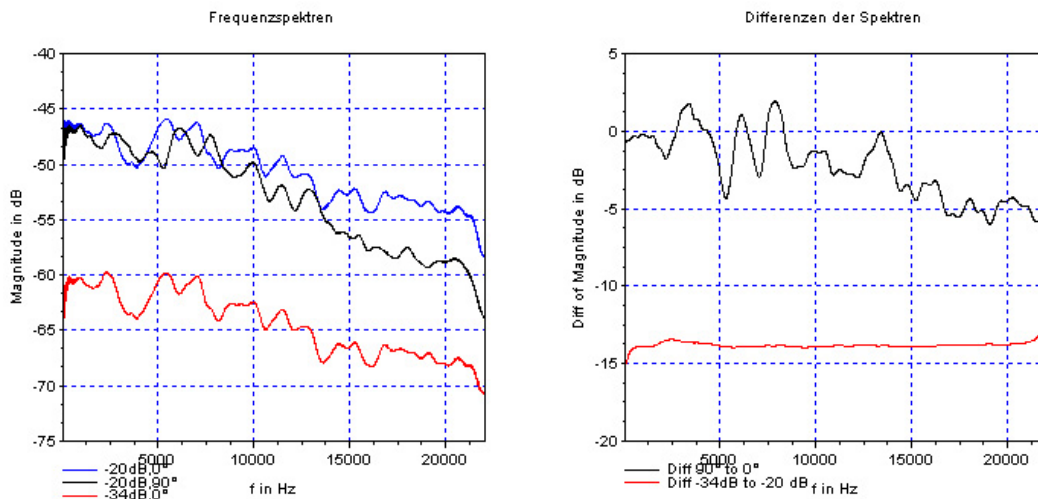
Durch Vergleich der Messung 3 (90° gedrehten Kapsel) zur Messung 1, welche bei gleichem Pegel durchgeführt wurden, sollte die richtungsabhängige Frequenzbewertung analysiert werden.

Bei Messung 3 traf nur noch ein geringer Teil des Schalls direkt in den Kapselzugang, der Großteil hingegen auf die Kapselwand. Zudem wurde die Kapselmembran orthogonal zur

<sup>1</sup>Absenkung in einem Frequenzspektrum

<sup>2</sup>Anhebung in einem Frequenzspektrum





**Abbildung 3.5.** – LINEARE VERZERRUNGEN: Kapsel EM6035-B von Horn Industrial (exemplarisch): Frequenzspektren (links): Messung 1 (blau), Messung 2 (schwarz), Messung 3 (rot) ) und Differenzen (rechts) zwischen Messung 2 und Messung 1 (schwarz) und zwischen Messung 3 und Messung 1 (rot).

normalen Schwingungsrichtung angeregt, was zu einer abnehmenden Sensitivität mit zunehmender Frequenz führt. Alle Mikrofonkapseln sowie das Messmikrofon wiesen daher einen mit steigender Frequenz abnehmenden Pegel auf. Hinzu kommen in der Kapsel auftretende Resonanzen und Auslöschungen, die bei vielen Kapseltypen zu zusätzlichen Schwankungen des Spektrums von  $\pm 2$  dB führen, was eine geringere Linearität des Frequenzgangs zur Folge hat.

Die unidirektionalen Mikrofonkapseln PUM-3546L-R und EM-6050U wiesen eine für ihre Bauart typische Abweichung zu den anderen Kapseln auf. Sie wurden von der Seite weniger leicht angeregt und haben so im Frequenzband unter 10 kHz einen um ca. 5 dB geringeren Pegel. Außerdem werden die ersten 1000 Hz stärker als bei omnidirektionalen Kapseln gedämpft, sodass sie z. B. Bass-Töne schlechter übertragen. Bei der EM-6050U wird dies als Noise-Cancelling im Datenblatt vermerkt. Die Kapsel ist dadurch weniger anfällig für Übersteuerung, da diese häufig durch niedrige Frequenzen verursacht werden. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit der Übersteuerung im realen Einsatz gering, da vermutlich mit Geräuschpegeln gearbeitet wird, die auch für den Menschen als angenehm empfunden werden ( $< 84$  dB/ $\mu$ Pa). Das Übersteuern ist daher nur durch den Körperschall möglich, der die Schallaufnahme um ein Vielfaches übertönen kann.

Die Bewertung für Analyse 3 erfolgt analog zu Analyse 2. Hier sollte die maximale Schwankung der Differenz von  $\pm 1$  dB nicht überschritten werden und ein möglichst gleichmäßiges Abfallen des Pegels mit steigender Frequenz erkennbar sein, siehe Anhang Abbildung A.4 Differenz der Frequenzgänge.

Typ	Messung 1	Messung 2 (Differenz)	Messung 3 (Differenz)	Gesamt- bewertung
WM-61A	o	o	o	o
WM-64PNT	o	o	o	o
WM-64MNT	+	o	+	++
POM-2735PR	o	-	o	-
POM-2746PR	-	o	o	-
POM-2746LR	o	o	o	o
EM-6022BC	o	o	-	-
EM-6027	-	o	-	--
EM-1050	-	o	o	-
EM-6035B	-	o	o	-
PUM-3546LR	o	o	o	o
EM-6050U	o	o	o	o
EMY-6018RBC	-	o	-	--
EMY-62NL101	-	-	-	--

**Tabelle 3.6.** – FREQUENZGANG-BEWERTUNG: Bewertung der Kapseln auf Basis der Frequenzgänge bzw. Unterschiede zwischen den Frequenzgängen.

### 3.1.4. Nicht-lineare Verzerrungen

Zur Messung der nicht-lineare Verzerrungen wurden der Klirrfaktor und der Intermodulationsfaktor herangezogen.

#### Klirrfaktor

Beim Klirrfaktor ergaben sich keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Kapseltypen. Alle errechneten Faktoren liegen in einem Bereich um 1%. Das Minimum aller Messungen besaß die Kapsel EM-105038 mit 0,7%, das Maximum lag bei der Kapsel PUM-3546LR bei 1,5%.

Alle Kapseln wurden mit „o“ bewertet, da keine signifikanten Unterschiede festgestellt wurden.

#### Intermodulationsfaktor

Der Intermodulationsfaktor variiert hingegen zwischen 2,0% und 5,5%.

Ein Faktor unter 2,5% wird hier mit „+“ bewertet. Darüberliegende IMD werden im 1%-Intervall abgestuft. Die Gesamtbewertung der nicht-linearen Verzerrung ist damit nur vom IMD abhängig.

### 3.1.5. Messung spezieller Störsignale

Um den Motorgeräuschpegel zwischen den Kapseln vergleichen zu können, muss die kapseltypspezifische Sensitivität berücksichtigt werden. Daher wurde als Bewertungsgrundlage die Differenz zwischen dem gemessenen Motorgeräuschpegel und dem Pegel der Sensitivitätsmessung bestimmt. Die Differenz gab Auskunft, wie stark eine Kapsel über die Gehäusewand im Vergleich zu den anderen Kapseln beeinflusst werden konnte.

Diese Differenz lag zwischen  $-23$  und  $-9$  dB und variierte demnach stark. Die Abstufung der Bewertung wurde beginnend bei  $-23$  dB (Bewertung „+“) in 6 dB-Schritten durchgeführt.

Typ	Klirrfaktor [%]	Bewertung THD	IMD [%]	Bewertung IMD	Gesamt- bewertung
WM-61A	1,3	o	2,4	+	+
WM-64PNT	1,4	o	2,3	+	+
WM-64MNT	1,4	o	2,4	+	+
POM-2735PR	0,8	o	2,9	o	o
POM-2746PR	0,9	o	2,6	o	o
POM-2746LR	0,9	o	2,0	+	+
EM-6022BC	1,3	o	5,5	-	-
EM-6027	0,8	o	5,3	-	-
EM-1050	0,7	o	2,8	o	o
EM-6035B	1,3	o	2,6	o	o
PUM-3546LR	1,5	o	3,0	o	o
EM-6050U	1,2	o	2,8	o	o
EMY-6018RBC	0,9	o	2,5	+	+
EMY-62NL101	0,8	o	5,3	-	-

**Tabelle 3.7.** – THD- UND IMD-BEWERTUNG: Bewertung des Klirrfaktors und des Intermodulationsfaktor sowie die Gesamtbewertung als Summe der Einzelbewertungen.

Es ist in jedem Falle sinnvoll die Übertragung von Körpersignalen weiter zu minimieren, da z. B. auch eine Einstrahlung von  $-56\text{ dB}$  (EM-6035B) ausreichen würde um ein empfangenes Signal zu stören.

Die Reduzierung der Störwirkung kann z.B durch entkoppeln der Kapsel vom Körper geschehen, was z. B. der Fall ist, wenn die Kapsel ins Silikonohr eingebettet ist. Es ist auch vorstellbar, dass sich im Ohr eine weitere Mikrofonkapsel gleicher Bauart befindet, welche für die Aufnahme der körperinternen Geräusche zuständig ist. So könnte die Filterung des Signals durch eine einfache Differenzberechnung stattfinden.

### 3.1.6. Varianzen zwischen Kapseln gleichen Typs

Die Diagramme in Abbildung 3.9 zeigen die Frequenz- und Phasenunterschiede der Kapseln desselben Typs. Es wurde jeweils die Differenz zur Kapsel mit der Nummer 1 berechnet. Die zugehörigen Frequenzgänge und Phasenverläufe befinden sich im Anhang Abbildung A.5. Vom Typ WM-64MNT lagen nur zwei Kapseln vor, von den anderen beiden jeweils drei. Alle Kapseln eines Typs weisen die im Abschnitt 3.1.3 *lineare Verzerrungen* festgestellten charakteristischen Anhebungen und Absenkungen auf, welche im Anhang Abbildung A.3 einsehbar ist. Aus den Frequenzgangdifferenzen war ersichtlich, dass die maximale Abweichung zwischen den Frequenzgängen verschiedener Kapseln eines Typs im relevanten Bereich bis  $14\text{ kHz } \pm 2\text{ dB}$  kaum überschritten wurde. Dies resultiert aus der Messtoleranz, welche für eine einzelne Kapsel bei  $\pm 1\text{ dB}$  liegt. Die Kapseln konnten damit im Hinblick auf den Frequenzgang als identisch angesehen werden. Eine signifikante Abweichung von  $4\text{ dB}$  ergab sich nur zwischen Kapsel 1 und 2 vom Typ WM-64PNT bei ca.  $12\text{ kHz}$ .

Identisch im Hinblick auf die Phase waren die Kapseln 2 und 3 des Typs WM-64PNT, wohingegen zwischen Kapsel 1 und 2 ein schnell wachsender Phasenunterschied gemessen wurde. Ähnliche Unterschiede ergaben sich auch bei den zwei Kapseln vom Typ WM-64MNT,

Typ	Motorgeräusch- pegel[dB]	Differenz [dB]	Bewertung
WM-61A	-53	-18	+
WM-64PNT	-60	-19	+
WM-64MNT	-50	-15	o
POM-2735PR	-51	-18	+
POM-2746PR	-60	-15	o
POM-2746LR	-58	-14	o
EM-6022BC	-51	-12	o
EM-6027	-55	-9	-
EM-1050	-54	-21	+
EM-6035B	-56	-23	+
PUM-3546LR	-62	-16	o
EM-6050U	-68	-18	+
EMY-6018RBC	-59	-18	+
EMY-62NL101	-58	-13	o

**Tabelle 3.8.** – KÖRPERGERÄUSCH-BEWERTUNG: Bewertung des Körpergeräuschs anhand der Differenz zwischen aufgenommenem Motorsignal und dem Referenzsignal aus der Sensitivitätsmessung (Angabe jeweils nach Abzug der Verstärkung von 20 dB)

jedoch nicht bei den drei Kapseln des Typs PUM-3546LR. Im Rahmen dieser Ausarbeitung wurde nicht weiter untersucht, wovon es abhängt, ob die Phasen verschiedener Kapseln korrelieren oder von einander abweichen.

Aus der exemplarischen Untersuchung kann man allgemein schließen, dass sich die Frequenzgänge im Allgemeinen wenig unterscheiden, es jedoch zu gravierenden Unterschieden in der Phase kommen kann. Sofern diese zur Signalanalyse herangezogen werden soll, ist also darauf zu achten möglichst identische Kapseln zu wählen, oder gegebenenfalls eine Normierung durchzuführen.

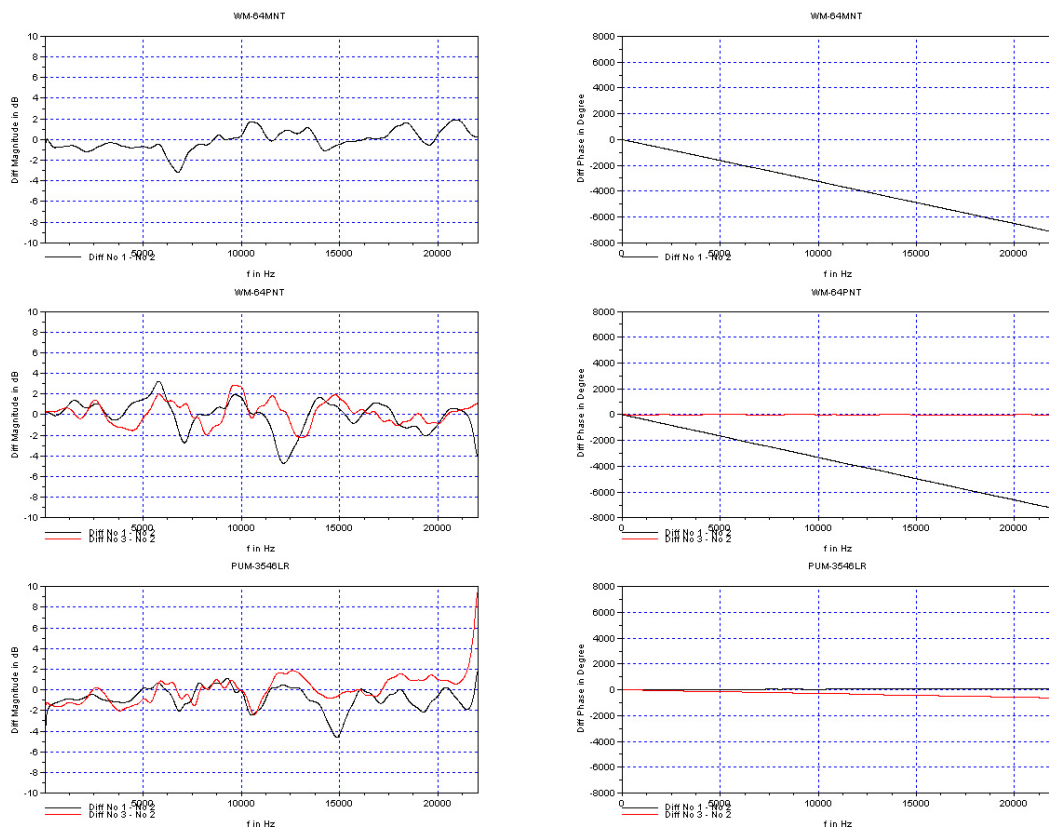
### 3.1.7. Abschlussbewertung

Die Bewertung der 14 Mikrofonkapseln fand in den fünf Kategorien statt: Sensitivität, SNR, lineare Verzerrung, nicht-lineare Verzerrung und Empfindlichkeit gegenüber Körpergeräusche. Daraus wurde eine Gesamtbewertung als Summe der Einzelbewertungen gebildet. Die Bewertungen sind in Tabelle 3.10 zusammengefasst.

So ist ein maximaler bzw. minimaler Gesamtwert von 10 bzw. -10 erreichbar. In dieser Untersuchung weisen die Kapseltypen WM-61A und die WM-64MNT von Panasonic die besten Ergebnisse auf mit einem Gesamtwert von 4. Die WM-61A bekam in vier Kategorien eine positive Bewertung, wohingegen die WM-64MNT, im Hinblick auf lineare und nicht-lineare Verzerrungen hervorragende Ergebnisse aufweist.

Folgende fünf Kapseltypen erhielten die Gesamtbewertung 2: WM-64PNT, POM-2746LR, POM-2735PR, EM-105038 und EM-6035383G, wobei nur die ersten beiden Typen keine negative Einzelbewertung aufweisen.

Die unidirektionalen Kapseln PUM-3546LR (Gesamtbewertung: -2) und EM-6050U (Gesamtbewertung 0) schnitten nur durchschnittlich bis schlecht ab, was u.a. an der verhältnis-



**Abbildung 3.9.** – VERGLEICH DER KAPSELN EINES TYP: Kapseltypen: WM-64MNT (oben), WM-64PNT (mitte), PUM-3546LR (unten); Differenz der Frequenzgänge (links) und Differenz der Phasen (rechts); Graphen: Differenz von Kapsel 1 und 2 (schwarz) bzw. von Kapsel 3 und 2 (rot).

mäßig geringen Sensitivität lag.

Am schlechtesten wurde der Typ EM-602742 bewertet, welcher in vier Kategorien eine negative Bewertung aufweist und damit die Bewertung -5 bekam. Alle anderen sechs Kapseltypen weisen einen Gesamtwert zwischen -3 bis 0 auf.

Die Kapseltypen WM-64MNT und WM-64PNT von Panasonic sollten sich laut Datenblatt identisch verhalten und nur in der Anschlussart (Pads bzw. Pins) unterscheiden. So überraschte es, dass sie in drei von fünf Kategorien unterschiedlich bewertet wurden. Insbesondere die kapseltypspezifischen Frequenzgänge unterschieden sich. Ähnliches galt für die Typen POM-2746LR und POM-2746PR von Projects Unlimited.

## 3.2. Monaurale Experimente

In den folgenden Experimenten wurden Messungen mit dem Silikonohr durchgeführt. Dabei wurde erst das Abbildungsvermögen der Mikrofonkapseln bezüglich signifikanter Frequenzveränderungen, welche durch das Kunstohr verursacht werden, betrachtet. Anschließend

Typ	Sensitivität	SNR	Lineare Verzerrungen	Nicht-lineare Verzerrungen	Kapselwand	Gesamt
WM-61A	+	+	o	+	+	4
WM-64PNT	o	o	o	+	+	2
WM-64MNT	+	o	++	+	o	4
POM-2735PR	+	+	-	o	+	2
POM-2746PR	-	+	-	o	o	-1
POM-2746LR	o	+	o	+	o	2
EM-6022BC	o	+	-	-	o	-1
EM-6027	-	o	--	-	-	-5
EM-1050	+	+	-	o	+	2
EM-6035B	+	+	-	o	+	2
PUM-3546LR	-	-	o	o	o	-2
EM-6050U	-	o	o	o	+	0
EMY-6018RBC	o	o	--	+	+	0
EMY-62NL101	-	+	--	-	o	-3

**Tabelle 3.10.** – GESAMTBEWERTUNG: Überblick der Bewertung der verschiedenen Kapseltypen. Gesamtbewertung als Summe der Einzelwertungen

wurde erste Erkenntnisse zur Richtungserkennung von Schallquellen mit und ohne Kunstkopf gesammelt.

### 3.2.1. Monaurale Experimente ohne Kunstkopf

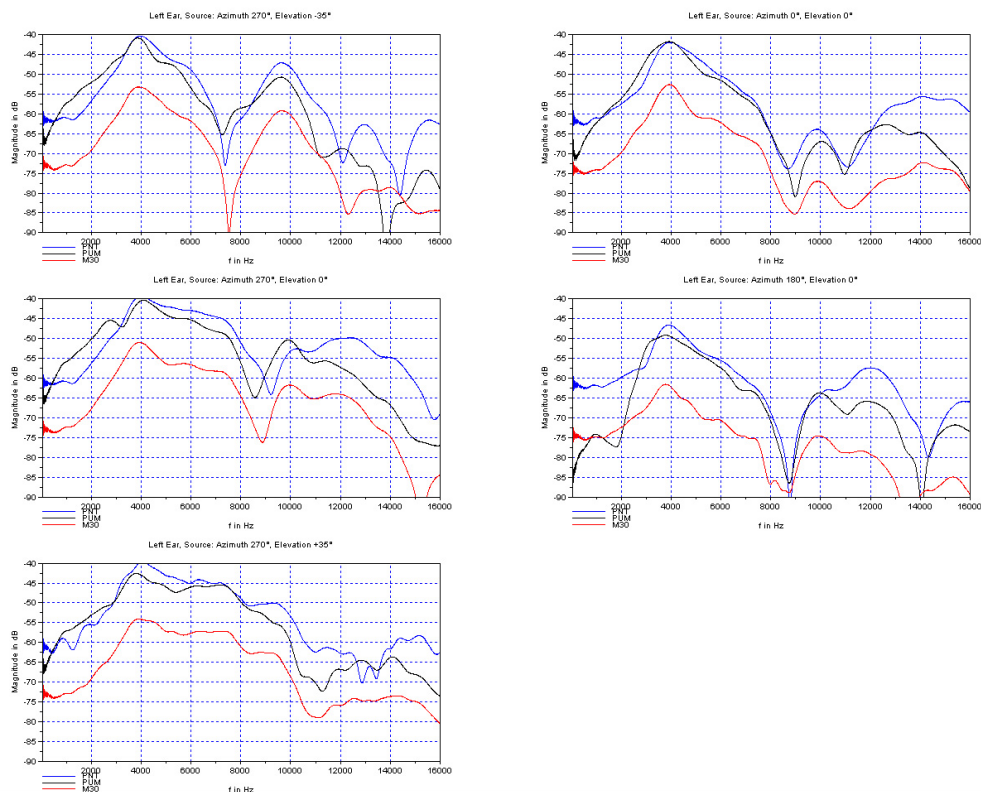
#### Abbildungsvermögen der Miniatur-Mikrofonkapseln

Im Folgenden werden die HRTFs der zwei exemplarischen Mikrofonkapseltypen dem Referenzmikrofon gegenübergestellt. Jedes der Diagramme in Abbildung 3.11 stellt dabei eine andere Lautsprecher-Position dar.

Betrachten wir zuerst den Kapseltyp WM-64PNT (blau). Aus Abbildung 3.11 geht hervor, dass diese die vom M30 (rot) gemessenen Anhebungen und Absenkungen ebenfalls in allen Diagrammen originalgetreu bis 14 kHz abbilden. Dabei ist der Pegel-Offset von ca. 15 dB zu vernachlässigen.

Signifikante Unterschiede ergeben sich erst ab 13 kHz z. B. in den Diagrammen 270°/-35° und 270°/35°, was auf geringfügige Variationen des Messaufbaus zurück geführt werden kann. Ähnlich gut bildet auch die Kapsel PUM-3546LR ab. Allerdings ist hier das Einbrechen des Frequenzgangs in den ersten 2 kHz in Diagramm 180°/0° nicht ganz erklärlich. Dies könnte jedoch mit der Richtcharakteristik der Kapsel zusammenhängen, welche in dieser Konstellation zum Tragen kommt, da die Ohrmuschel den Direktschall zur Kapsel verhindert.

Das sichtbare Auseinanderlaufen der Frequenzgänge von WM-64PNT (blau) und PUM-3546LR (scharz) ab einer Frequenz von ca. 10 kHz, kann mit typspezifischen linearen Verzerrungen erklärt werden, auf welche bereits im Abschnitt 3.1.3 eingegangen wurde. Wie aus den Diagrammen in Abbildung A.5 im Anhang zu entnehmen ist, weist die Kapsel PUM-3546LR ab einer Frequenz von 10 kHz eine Dämpfung um 5 dB auf, wohingegen die WM-64PNT hier eine Verstärkung von +3 dB aufzeigt. Diese linearen Verzerrungen müssen im späteren Einsatz durch eine Frequenzgang-Normierung kompensiert werden um ein vom



**Abbildung 3.11.** – HRTFs VERSCHIEDENER KAPSELTYPEN: Gegenüberstellung der HRTFs von WM-64PNT (blau), PUM-3546LR (schwarz) und M30 (rot). Alle Mikrofonkapseln bilden die charakteristischen Peaks und Dips ab, welche auch mit dem M30 gemessen wurden.

Kapseltyp unabhängigen Frequenzgang zu erhalten.

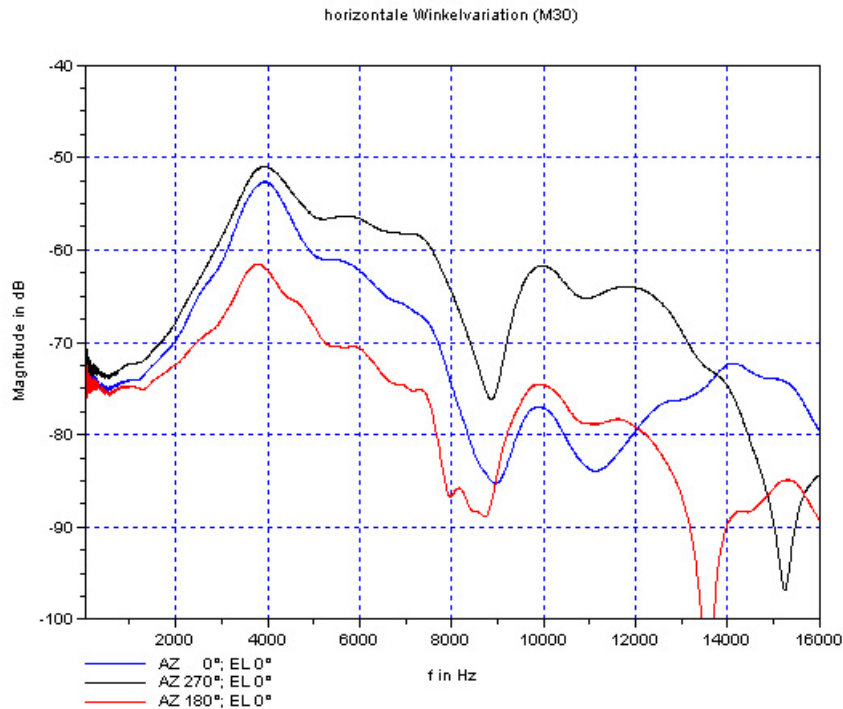
Allgemein kann man also sagen, dass auch die Miniatur-Mikrofonkapseln grundsätzlich die Voraussetzungen erfüllen die charakteristischen Frequenzunterschiede des Kunstohres abzubilden.

### Kunstohr und Richtungsinformationen

Es werden nun die HRTFs des M30 genauer betrachtet, um erste Anzeichen für Charakteristika im Spektrum zu finden, aus denen Richtungsinformationen geschlossen werden können. In Abbildung 3.12 wurden die drei horizontalen Frequenzgänge dargestellt, in Abbildung 3.13 die vertikalen.

### Analyse der horizontalen Frequenzunterschiede

Die Frequenzgänge für  $0^\circ/0^\circ$  (blau),  $270^\circ/0^\circ$  (schwarz) und  $180^\circ/0^\circ$  (rot) weisen bis 10 kHz einen ähnlichen Verlauf auf: Der gleichmäßige Pegelanstieg in den ersten 4 kHz führt zu einem ersten deutlichen Peak (Anhebung). Der anschließende Pegelabfall endet mit einem Dip (Absenkung) bei ca. 9 kHz, gefolgt von einem erneuten allerdings schwächeren Peak bei ca. 10 kHz. Die Frequenzgänge unterscheiden sich hier nur im Pegel. Die Spektren, bei denen



**Abbildung 3.12.** – HRTFs MIT HORIZONTALER POSITIONS-VARIATION: Spektren der HRTFs des M30 im Kunstohr in drei verschiedenen horizontalen Anordnungen der Schallquelle und des Mikrofons.

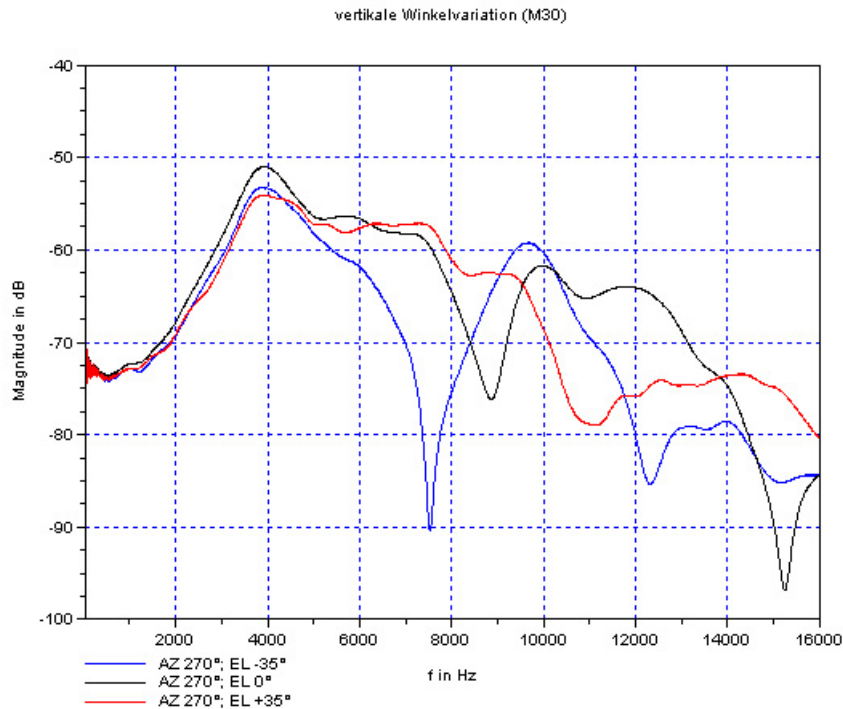
das Signal in flachem Winkel auf das Ohr fällt (schwarz, rot) nimmt der Frequenzpegel ab 4 kHz mit steigender Frequenz schnell ab. Dieses Verhalten korreliert mit den 90°-Messungen der einzelnen Kapseln im Abschnitt 3.1.3. Hinzu kommt hier die dämpfende Wirkung der Ohrmuschel, wenn sie das Schallsignal zum Ohreingang abschattet (rot). Dies führt zu einer deutlichen Dämpfung um weitere 10 dB im Frequenzband von 2 bis 8 kHz. Ab 12 kHz lassen sich weitere deutliche Unterschiede zwischen 0° und 180° Azimuth feststellen. Während das 0°-Spektrum (blau) bei 14 kHz einen erneuten Peak aufweist, fällt das 180°-Spektrum (rot) auf einen deutlichen Dip bei 13,5 kHz. Daran könnte die Front-Back-Ambivalenz aufgelöst werden, wenn sich diese Charakteristik auch bei anderen Erhebungswinkeln nachweisen lässt. Dies wird in einer späteren Messung mit dem Kunstkopf weiterführend betrachtet.

#### Analyse der vertikalen Frequenzunterschiede

In Abbildung 3.13 wurde die Position der Schallquelle in Bezug auf das Kunstohr in vertikale Richtung verändert: 270°/-35° (blau), 270°/0° (schwarz), 270°/+35° (rot).

Der erste auftretende Peak befindet sich wie schon in Abbildung 3.12 bei 4 kHz. Es ist daher anzunehmen, dass dies auf eine Resonanz zurück zu führen ist, welche durch den ca. 1 cm langen Hohlraum (äußerer Gehörgang) im Ohr verursacht wird. Die drei Spektren weisen ab 6 kHz markante Unterschiede im Frequenzverlauf auf. Das erste signifikante Pegelminimum tritt bei den Frequenzen 7,5 kHz (EL -35°), 9 kHz (EL 0°) und 11 kHz (EL +35°) auf. Die





**Abbildung 3.13.** – HRTFs MIT VARIATION DES ERHEBUNGSWINKELS: Spektren der HRTF des M30 im Kunstohr in drei verschiedenen vertikalen Anordnungen der Schallquelle und des Mikrofons.

Position des Dips scheint mit zunehmender Höhe der Signalquelle im Spektrum nach oben zu wandern. Der anschließende Peak ist in den ersten beiden Frequenzgängen noch deutlich bei ca. 10 kHz zu erkennen, gefolgt von einem weiteren Dip bei 12,5 kHz bzw. 15 kHz. Dieses typische Wandern eines Dips ist auch in Aufnahmen von Degault vorzufinden [Beg94].

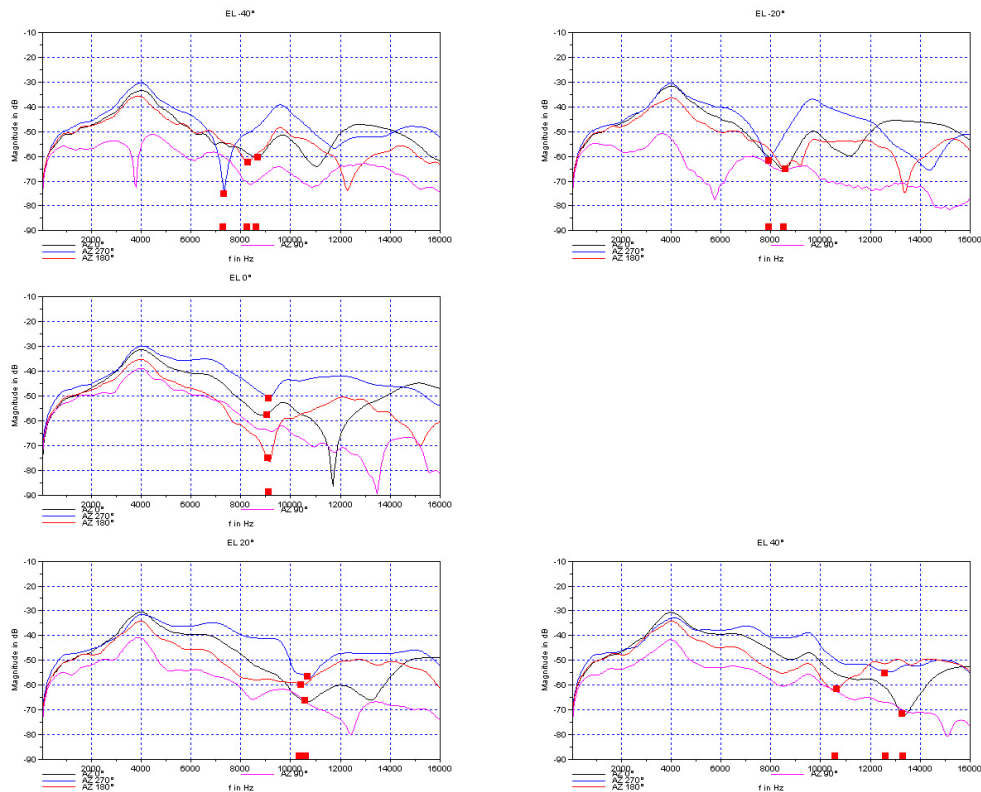
Sollte sich dieser Effekt auch durch weitere Messungen mit dazwischenliegenden Winkeln bei dem vorliegenden Ohr bestätigen lassen, ist somit ein Indikator gegeben, mit dessen Hilfe die Erhebungswinkel möglicherweise bestimmt werden können. Allerdings wurde hier noch nicht berücksichtigt, ob der markante Dip auch bei Variation des Horizontalwinkels an gleicher Stelle messbar ist. Auf diese Fragen wird in den anschließenden Kunstkopf-Messungen eingegangen.

### Fazit

Diese ersten Richtungsanalysen zeigen, dass der Einfluss des Ohrs im Bereich von 4 kHz bis 14 kHz zu deutlichen Pegelunterschieden von bis zu 25 dB führt. Damit hat es einen erheblichen Einfluss auf die Filterung des Schallsignals. Es wurden erste Anzeichen dafür gefunden, dass einige Anhebungen und Absenkungen im Frequenzgang zur Front-Back-Unterscheidung und zur Bestimmung der Erhebungswinkel der Schallquelle genutzt werden können. Diese galt es in weiteren Messungen mit dem Prototyp des Kunstkopf zu vertiefen und zu bestätigen.

### 3.2.2. Monaurale Experimente mit dem Kunstkopf

Die spektrale Analyse mithilfe des Silikonohrs hat gezeigt, dass mindestens ein markanter Dip messbar ist, welcher möglicherweise zur Identifikation der Erhebungswinkel einer Schallquelle genutzt werden kann. Der Fokus der weiteren Experimente lag darin, zu untersuchen, ob sich dieser Dip auch bei Messung mit einem Kunstkopf identifizieren lässt, da dies den realen Bedingungen im späteren Einsatz näher kommt. Abbildung 3.14 stellt die Spektren der HRTFs der eigenen Messungen dar:



**Abbildung 3.14.** – SPEKTREN DER HRTF DER WM-64PNT IM LINKEN OHR EINES KUNSTKOPFES: Diagramme (von links nach rechts, oben nach unten): EL -40°, EL -20°, EL 0°, EL 20°, EL 40°, Graphen je Diagramm: AZ 0° (schwarz), AZ 270° (blau), AZ 180° (schwarz), AZ 90° (violett); die roten Kästchen markieren die Frequenzen der ersten markanten Dips von je drei relevanten Frequenzgängen.

Eine vergleichbare Abbildung auf Basis der KEMAR-HRTFs befindet sich im Anhang in Abbildung A.6. Die fünf Grafiken der Abbildung 3.14 (bzw. Abbildung A.6 im Anhang) zeigen die berechneten Frequenzgänge der jeweiligen Messobjekte. Jedes Diagramm fasst alle Messungen eines Messobjektes für einen bestimmten Erhebungswinkel zusammen. Alle vier Graphen eines Diagramms repräsentieren unterschiedliche Horizontalwinkel. So ist es möglich, Gemeinsamkeiten festzustellen.

Die roten Kästchen markieren im Diagramm die Frequenz des ersten markanten Dips

Elevation[°]	eigene Messungen (WM-64PNT)			KEMAR-Daten		
	Frequenzband der Dips [Hz]	Breite [Hz]	Überschneidung [Hz]	Frequenzband der Dips [Hz]	Breite [Hz]	Überschneidung [Hz]
-40	7200-8600	1400	600 (23%)	6200-7000	800	400 (50%)
-20	7900-8500	600	600 (100%)	6600-7800	1200	400 (30%)
0	9000-9100	100		8200-9200	1000	
20	10300-10700	400	300 (75%)	9400-11200	1800	400 (22%)
40	10400-13400	3000	300 (10%)	10800-11800	1000	400 (40%)

**Tabelle 3.15.** – FREQUENZBAND-ANALYSE: Analyse der Frequenzbänder der markierten Dips aus Abbildung 3.14 und Abbildung A.6 im Anhang nach Erhebungswinkel.

in jedem Graphen. Der Frequenzgang (violett), welcher den Horizontalwinkel  $90^\circ$  repräsentiert, wurde dabei nicht berücksichtigt, da sich das Ohr bezogen auf die Schallquelle auf der abgeschatteten Seite befindet. Da der Schall damit nicht über die Ohrmuschel ins Ohr fiel, sondern den Kunstkopf durchdrang und dabei stark gedämpft wurde, ist dieser Frequenzgang kaum zur genauen Richtungserkennung geeignet. Durch die deutlich schwächere Gesamtamplitude des Signals und dem mit steigender Frequenz schnell abfallenden Pegel ist jedoch identifizierbar, dass es sich um die abgeschattete Seite handelt.

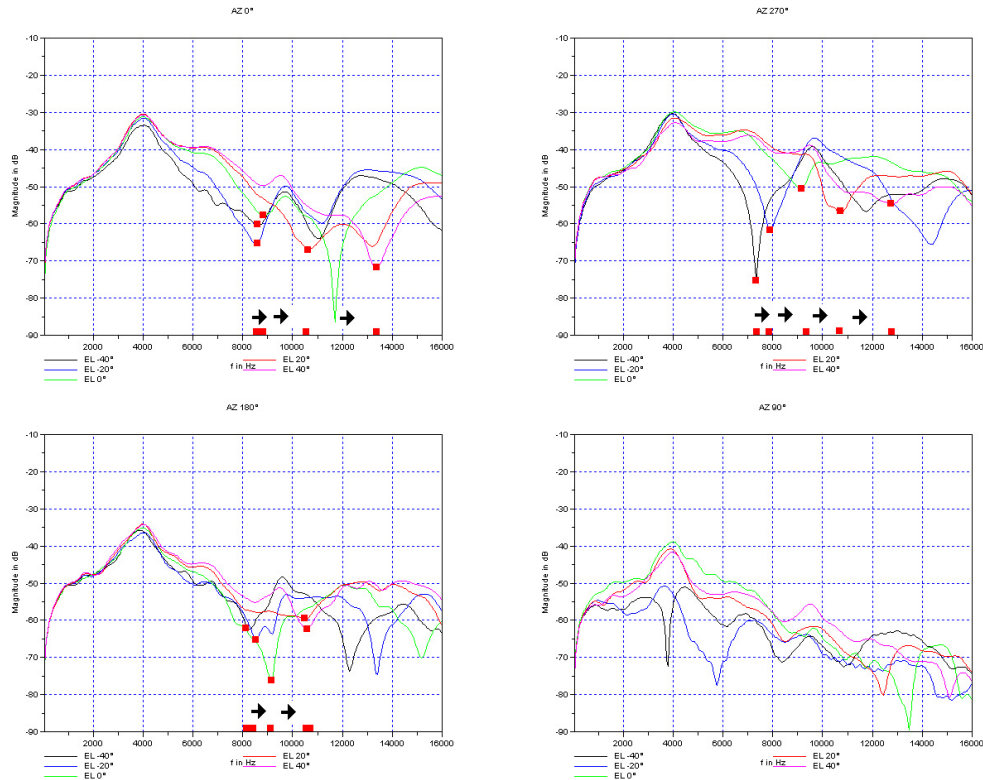
Die Frequenzgänge der WM-64PNT und des KEMAR-Datensatzes unterscheiden sich hier teilweise. Zum einen ist der markante Peak bei der WM-64PNT bei 4 kHz, während er sich bei den KEMAR-Daten bei 2 kHz befindet. Daraus kann geschlossen werden, dass sich die verwendeten Kunstohren in ihrer Form teilweise unterscheiden müssen, z. B. in der Länge des Gehörgangs. Welchen Einfluss hier unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten und Materialien haben kann nicht bestimmt werden.

Die Position der roten Markierungen wurde in der folgenden Tabelle zu Frequenzbändern zusammengefasst. Die Frequenzbänder der Dips befinden sich in der Messung im Frequenzbereich zwischen 7,2 kHz und 13,4 kHz, während sie sich bei den KEMAR-Daten von 6,2 kHz bis 11,8 kHz erstrecken.

Bei den KEMAR-Daten ist die Breite der Frequenzbänder zwischen 800 bis 1800 Hz pro Band deutlich gleichmäßiger als bei den eigenen Messungen. Hier ist die Bandbreite auf Ohrhöhe ( $0^\circ$ ) mit 100 Hz am geringsten und nimmt mit steigender und fallender vertikaler Richtung stark zu bis zu 3000 Hz. Sowohl bei der WM-64PNT als auch bei den KEMAR-Daten kommt es zu Überschneidungen zwischen den Frequenzbändern der benachbarten Erhebungswinkel. Aus der Tabelle geht hervor, dass bei den Experimenten das Frequenzband bei einem Erhebungswinkel von  $-20^\circ$  komplett von dem Band der  $-40^\circ$ -Elevation umschlossen wird. Bei den KEMAR-Daten überschneiden sich die Bänder auch, jedoch nur bis maximal 50%. Die Zuordnung zu Erhebungswinkeln in Abhängigkeit der Dips ist also nicht eindeutig, sodass weitere Merkmale des Frequenzgangs verglichen werden müssen um eine Aussage über diese Richtung der Schallquelle treffen zu können. Es können z. B. die Position weiterer Peaks und Dips bzw. allgemeine Pegelunterschiede über ganze Frequenzbänder hinzugezogen werden.

Ein weiterer Ansatz könnte es sein, die Richtungserkennung in zwei Schritten durchzuführen: Im ersten Schritt wird aufgrund der Pegel- und Laufzeitunterschiede zwischen beiden Ohren eine Aussage über die horizontale Richtung getroffen, inklusive Auflösung der Front-Back-Ambivalenz im Frequenzgang. Im zweiten Schritt kann die Erhebungswinkel mit un-

terschiedlichen Bewertungsmasken abhängig von dem erkannten Horizontalwinkel analysiert werden. Eine Separierung der Frequenzgänge nach horizontalen Richtungen wird in der Abbildung 3.16 dargestellt.



**Abbildung 3.16.** – SPEKTREN DER HRTFs DER WM-64PNT IM LINKEN OHR EINES KUNSTKOPFES: Diagramme (von links nach rechts, oben nach unten): AZ 0°, AZ 270°, AZ 180°, AZ 90°, Graphen (je Diagramm): EL -40° (schwarz), EL -20° (blau), EL 0° (grün), EL 20° (rot), EL 40° (violett); die roten Kästchen markieren die Frequenz des ersten markanten Dips der Frequenzgänge, der schwarze Pfeil die Verschiebungsrichtung des Dips bei wachsender vertikaler Richtung der Schallquelle.

Abbildung 3.16 zeigt dieselben Spektren der HRTFs wie in Abbildung 3.14, jedoch nach den Horizontalwinkeln gruppiert. In den ersten drei Diagrammen wurde das Wandern des Dips mit einem schwarzen Pfeil symbolisiert. Allerdings liegen die Dips teilweise sehr dicht beieinander. Die Mehrdeutigkeit der Erhebungswinkel nimmt offensichtlich zu, je weiter der Einfallswinkel des Schallsignals vom orthogonalen Einfall (270°-Elevation) ins Ohr abweicht. Für die Analyse der vertikalen Richtung bedeutet dies, dass sie auch unter Berücksichtigung der Horizontalwinkel unter bestimmten Umständen nicht eindeutig mit Hilfe des Dips rekonstruiert werden kann. Bei den KEMAR-Daten sieht dies anders aus. In Abbildung A.7 im Anhang ist zu erkennen, dass sich die Dips fast ausnahmslos eindeutig abgrenzen lassen und damit theoretisch einem Erhebungswinkel zugeordnet werden können. Die teilweise äquidistanten Abstände von ca. 500 Hz zwischen den Dips lassen vermuten, dass hier die

Erhebungswinkel nicht nur im  $20^\circ$ -Intervall unterschieden werden können, sondern eventuell sogar mit einer Auflösung von  $5$  oder  $10^\circ$ .

Der KEMAR-Kopf ist offensichtlich besser zur Richtungsidentifikation der Schallquelle geeignet als der eigene Messaufbau. Der wesentliche Einfluss geht dabei wie bereits beschrieben vom Kunstohr aus. Es ist davon auszugehen, dass das standardisierte Ohr des KEMAR-Kopfes, bezüglich Material- und Oberflächeneigenschaften besser auf tontechnische Ansprüche abgestimmt ist als das Silikonohr, welches mit einer medizinischen Zielsetzung entwickelt wurde. Auch werden sich beide Ohren etwas in ihrer Form unterscheiden, obgleich sie das durchschnittliche menschliche Ohr abbilden sollen.

### **Fazit**

Spezifische Informationen über die Form, Oberflächenbeschaffenheit und das Material des KEMAR-Kunstohrs DB-061 lagen nicht vor. Aufgrund der abweichenden HRTFs ist jedoch davon auszugehen, dass die physikalischen Eigenschaften nicht mit denen des Silikonohrs übereinstimmen. Damit lassen sich möglicherweise bekannte Erkenntnisse des KEMAR-Kopfes nicht einfach auf die des eigenen Kunstkopfes übertragen und müssen individuell bestimmt werden.

Grundsätzlich lassen sich bei beiden Kunstköpfen charakteristische Absenkungen (Dips) im Spektrum feststellen, welche zur Richtungsanalyse genutzt werden können. Das Ansteigen der Frequenz des Dips mit wachsender Frequenz, kann in beiden Messobjekten nachgewiesen werden, auch wenn die Ausprägung dabei stark variiert.

Dieser Dip ist beim KEMAR-Kopf relativ eindeutig einer vertikalen Richtungsinformation zu ordnen, insbesondere dann, wenn der Horizontalwinkel bekannt ist. Beim eigenen Kunstkopf hingegen treten viele Mehrdeutigkeiten auf, weil die Dips unterschiedlicher Erhebungswinkel zu dicht bei einander liegen. Grundsätzlich sind aber beide Köpfe gut geeignet um grob zu unterscheiden, ob eine Signalquelle über, auf oder unter der horizontalen Ebene der Ohren liegt, da hier keine Überlappungen der relevanten Frequenzbänder entstehen (siehe Tabelle 3.15). Da bei der Phonotaxis der Kopf auf die Signalquelle ausgerichtet wird, kann diese Information schon ausreichen, um den Kopf solange in die Richtung der Quelle zu steuern, bis die Signalquelle auf horizontaler Ebene der Ohren wahrgenommen wird.

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

### 4.1. Zusammenfassung

Die Mikrofonkapsel-Evaluation hat gezeigt, dass es sinnvoll war die Angaben der Datenblätter mit eigenen Messungen zu erweitern und zu überprüfen. Dabei konnten durch Standard-Messverfahren und speziell auf die spätere Anwendung zugeschnittene Messungen die Unterschiede der Kapseln bestimmt werden. Unter den zahlreichen Kapseln gab es jedoch keine, welche in allen Kategorien positiv bewertet wurde. Die drei Kapseltypen WM-61A, WM-64MNT und WM-64PNT von Panasonic, sowie die Kapsel POM-2746L-R von Projects Unlimited zählen jedoch zu den Favoriten der Kapsel-Evaluation, da sie in keiner Kategorie eine negative Einzelbewertung aufweisen und in mindestens zwei Kategorien positiv bewertet wurden. Es hängt nun von der bevorzugten Integrationstechnik (Pads, Pins oder Steckverbindung) ab, welche dieser Kapseln zum Einsatz kommt.

Die exemplarische Untersuchung der Frequenz- und Phasengänge verschiedener Kapseln eines Typs zeigte, dass es sinnvoll ist, die Gleichartigkeit der Kapseln zu untersuchen. Es ist dabei problemlos möglich, Kapseln mit ähnlichem Verhalten zu finden. Diese Messung sollte vor Einbau der Kapseln durchgeführt werden um jeweils zwei Kapseln in einem Roboter zu verwenden, die die größtmögliche Ähnlichkeit aufweisen. Dies ist für die korrekte Interpretation der Richtungsinformationen maßgeblich.

Die ebenfalls exemplarisch an den zwei Kapseltypen WM-64PNT und PUM-3546LR durchgeführte Silikonohr-Messung hat zeigt, dass es mit handelsüblichen, kostengünstigen Miniatur-Mikrofonkapseln grundsätzlich möglich ist, die charakteristischen Frequenzveränderungen durch das Silikonohr korrekt abzubilden. Dabei eignet sich die omnidirektionale Kapsel offensichtlich besser als die unidirektionale, da hier die Übereinstimmung mit dem Referenzmikrofon am größten war.

Abschließend wurden gezielt Experimente zur Richtungserkennung eines einzelnen Kunstohrs bzw. Kunstkopfes durchgeführt, sowie zusätzliche externe Vergleichsdaten hinzugezogen. Diese bestätigten, dass einige Frequenzbänder stark mit dem Erhebungswinkel variieren. Eine charakteristische Regelmäßigkeit, welche zur vertikalen Richtungserkennung genutzt werden kann, ist eine Frequenzabsenkung, deren Frequenz mit steigendem Erhebungswinkel der Signalquelle zunimmt. Der Dip befindet sich im Bereich von 8 bis 13,5 kHz bei den eigenen Messungen und zwischen 6 und 12 kHz bei den KEMAR-Daten. Es handelt sich dabei um einen Effekt der hauptsächlich durch die Ohrmuschel verursacht wird. Der Vergleich mit den KEMAR-Daten zeigt, dass die speziellen Erkenntnisse über die Richtungsinformationen, welche auf Grundlage der individuellen HRTFs eines Ohrtyps gesammelt wurden, nicht auf einen anderen Typ übertragen werden können. Diese Erkenntnis deckt sich mit der Erfahrung aus der Natur. Hier treten z. B. beim Menschen ebenfalls verschiedene Ohrformen auf, welche zu Varianzen in der Wahrnehmung der Personen führen [Beg94]. Die Form und Materialeigenschaft entscheiden also darüber, ob gute Voraussetzungen für die Lokalisierbarkeit von Signalquellen gegeben sind oder nicht. Einiges weist zumindest darauf hin, dass das KEMAR-Kunstohr beim statischen Versuchsaufbau besser geeignet ist als das Silikonohr,

welches die Grundlage der eigenen Messungen war. Der charakteristische Dip, welcher als Haupterkennungsmerkmal für die Erhebungswinkel festgestellt wurde, ist bei den KEMAR-HRTFs leichter einer Richtung zuzuordnen als bei den eigenen Kunstkopf-Experimenten. Des Weiteren liegen erste Erkenntnisse vor, dass die Analyse der vertikalen Richtung verbessert werden kann, wenn im Vorfeld der Horizontalwinkel bestimmt wurde. Dies ist mit Laufzeit- und Pegelmessungen zwischen den beiden Ohren eines Kopfes sowie der Auflösung der Front-Back-Ambivalenz auf Basis des Frequenzgangs möglich. Ein anderer Ansatz beschäftigt sich damit Disambiguitäten durch die Kopf-Bewegung zu reduzieren. Dies haben Nolfi und Floreno bereits in der Natur erforscht [NF00].

## 4.2. Ausblick

Die Realisierung einer akustischen Sensorik in Form eines binauralen Systems eröffnet eine neue Dimension der Informationsgewinnung in der humanoiden Robotik. Dieses kann die Autonomie humanoider Roboter erhöhen, indem sie in der Lage sind, mehr Informationen über ihre Umwelt zu sammeln und auszuwerten. Außerdem wird damit eine neue, natürliche Kommunikationsschnittstelle gegeben, über die sich sowohl die Roboter untereinander verständigen können als auch der Mensch mit dem Roboter kommunizieren kann.

Obgleich der KEMAR-Kopf besser für die Richtungserkennung geeignet zu sein scheint, ist die Realisierung der Phonotaxis für den vorliegenden Roboterkopf ein erstes weiterführendes Ziel. Dies beinhaltet sowohl die Entwicklung der entsprechenden Elektronik für die Stereosignalverarbeitung und Ausrichtung des Kopfes in horizontaler und vertikaler Ebene, sowie die algorithmische Implementation der echtzeitfähigen Signalverarbeitung, Richtungserkennung und Steuerung des Kopfes. Erste Ansätze zur Richtungsanalyse wurden bereits im Abschnitt 3.2.2 genannt.

Dazu müssen weitere charakteristische Richtungsinformationen in den HRTFs untersucht werden und daraus Verallgemeinerungen für eine algorithmische Analyse getroffen werden. Insbesondere müssen die noch nicht untersuchten horizontalen/vertikalen Richtungen berücksichtigt werden. Analog zur Frequenzganganalyse können auch die Phasenunterschiede zwischen den beiden Ohren eines Kopfes zur Richtungserkennung betrachtet werden. Es erscheint auch sinnvoll zu untersuchen, wie sich das Signal im Raum verändert, wenn es reflektiert bzw. überlagert wird oder aus einer anderen Entfernung kommt. Dies hat möglicherweise Folgen für die Interpretierbarkeit der HRTFs.

Sehr interessant, aber auch sehr anspruchsvoll, ist die Untersuchung des Einflusses von Geometrie, Material und Oberflächenbeschaffenheit des Kunstohrs auf die Richtungsinformationen in den HRTFs. Damit können Zusammenhänge zwischen den physikalischen Eigenschaften und der erzielten Frequenzänderung erschlossen werden. Auf dieser Basis könnte das Ohr für die Richtungserkennung optimiert werden.

Im späteren realen Einsatz wird es wahrscheinlich vorkommen, dass mehrere Signalquellen gleichzeitig aktiv sind. Das Erkennen einer Schallquelle aus einer Überlagerung vieler Quellen, nennt man Cocktailparty-Effekt. Dazu ist es notwendig sowohl gleichartige als auch verschiedene Schallquellen unterscheiden zu können. Dies ist ein weiterer interessanter Forschungsschwerpunkt.

Angesprochen wurde auch die Problematik der Übertragung von Körperschall. Auch hier sollten weiterführende Untersuchungen zur Reduzierung und Filterung dieser Geräusche betrieben werden.

Grundsätzlich konnte festgestellt werden, dass geeignete Miniatur-Mikrofonkapseln exis-

tieren, mit deren Hilfe signifikante Frequenzunterschiede eines breitbandigen Testsignals messbar sind. Diese Frequenzunterschiede können mit dem Einfallswinkel in Verbindung gebracht werden aus dem das Schallsignal eintrifft. Allerdings treten abhängig von der Wahl der Ohren mehr oder weniger Mehrdeutigkeiten auf, die teilweise keine eindeutige Richtungszuordnung zulassen. Neue Ansätze zur algorithmischen Auswertung und Methoden(schrittweise Auswertung: erst horizontal, dann vertikal) der Aufnahme(bewegter Kopf) könnten jedoch dieses Problem beheben und so mit einem breitbandigen Signal die Phonotaxis erlauben.



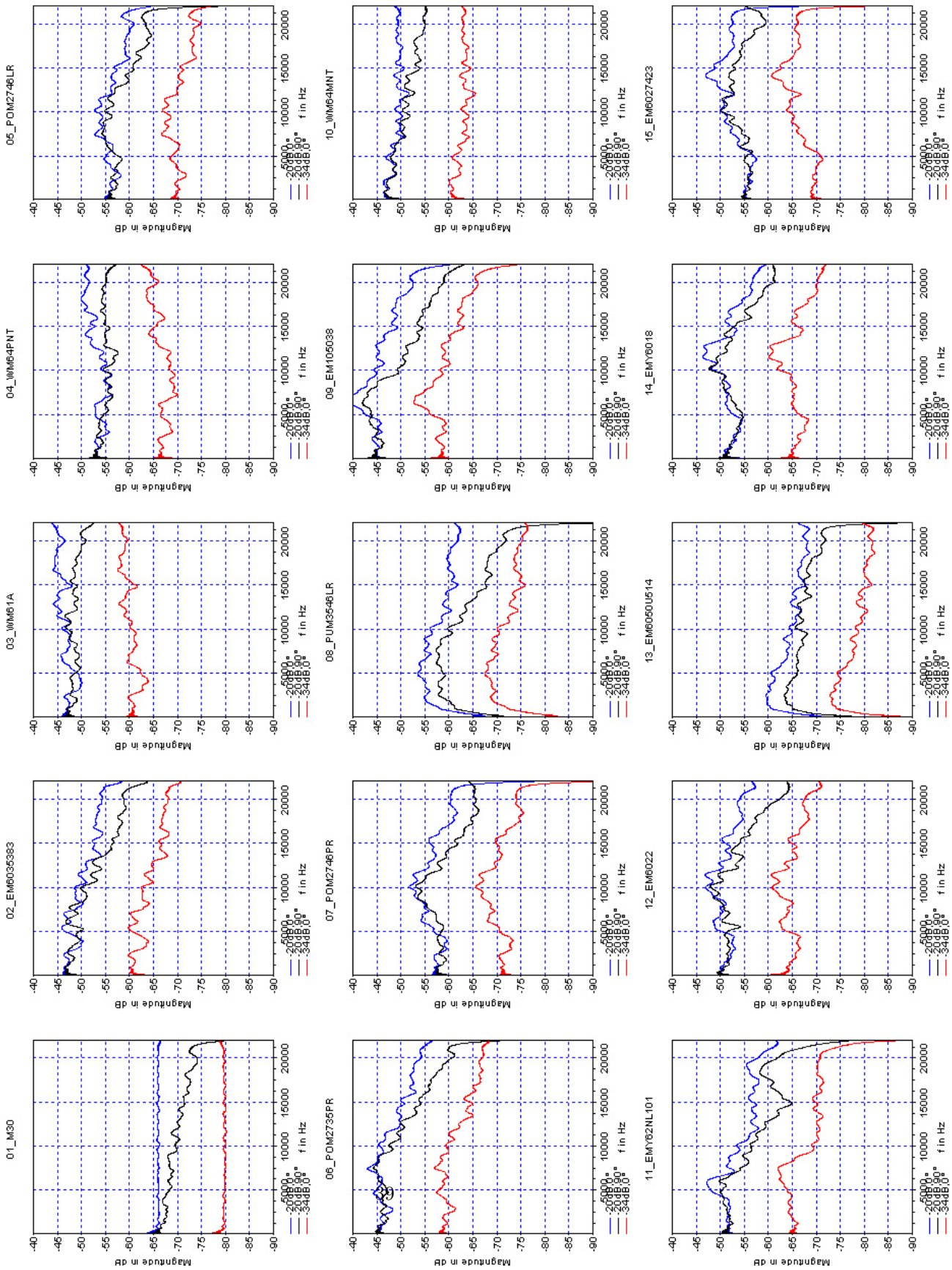
## A. Anhang

Kapseltyp	Spannung [V]	Empfindlichkeit [dB]	Varianz [dB]	SNR [dB]	f_min [Hz]	f_max [Hz]
WM-61A	2,0	-35	$\pm 4$	62	20	20000
WM-64PNT	2,0	-44	$\pm 3$	58	20	16000
WM-64MNT	2,0	-44	$\pm 3$	58	20	16000
POM-2735PR	3,0	-35	$\pm 2$	60	N/A	N/A
POM-2746PR	2,0	-46	$\pm 3$	60	20	20000
POM-2746LR	2,0	-46	$\pm 3$	60	30	15000
EM-6022BC	2,0	-40	$\pm 2$	60	50	14000
EM-6027	4,5	-42	$\pm 3$	58	50	14000
EM-1050	4,5	-38	$\pm 2$	60	40	16000
EM-6035B	4,5	-38	$\pm 3$	60	40	12000
PUM-3546LR	2,0	-46	$\pm 3$	55	N/A	N/A
EM-6050U	2,0	-51	$\pm 4$	58	60	14000
EMY-6018RBC	2,0	-44	$\pm 4$	58	50	20000
EMY-62NL101	4,5	-46	N/A	60	100	10000

**Tabelle A.1.** – KAPSELÜBERSICHT: Tabellarisch zusammengefasste Informationen aus den Datenblättern der Kapseln. Anmerkung: Einigen Angaben zwischen Hersteller (Datenblatt) und Distributor (Internetseite) waren nicht immer konsistent. Dazu gehörten z. B. die empfohlene Spannung und der Bereich des linearen Frequenzgangs. Es wurden daher die aktuelleren Angaben als verbindlich angesehen. Statt der angegebenen Versorgung mit 3 V wurde in der eigenen Messung mit 2 V gearbeitet, statt 4,5 V wurde mit 4 V gearbeitet, was jedoch nur geringfügige Folgen für das Verhalten der Kapseln hat.

Typ	erwarteter Rauschpegel [dB]	gemessener Rauschpegel [dB]	Differenz
WM-61A	-97	-83	34
WM-64PNT	-102	-91	31
WM-64MNT	-102	-91	31
POM-2735PR	-95	-82	33
POM-2746PR	-106	-89	37
POM-2746LR	-106	-90	36
EM-6022BC	-100	-80	40
EM-6027	-100	-85	35
EM-1050	-98	-81	37
EM-6035B	-98	-83	35
PUM-3546LR	-101	-93	28
EM-6050U	-109	-96	33
EMY-6018RBC	-102	-88	34
EMY-62NL101	-106	-87	39

**Tabelle A.2.** – RAUSCHPEGEL: gemessene und erwartete Rauschpegel der Kapeln sowie die Differenz zum Referenzsignal der Sensitivitätsmessung. Die 20 dB Verstärkung wurden abgezogen.



**Abbildung A.3.** – FREQUENZGÄNGE DER KAPSELTYPEN: Frequenzgänge aller 14 Mikrofonkapseln und des M30 im Überblick (blau: direkt,  $-20\text{ dB}$ , rot: direkt,  $-34\text{ dB}$ , schwarz:  $90^\circ$ -Winkel,  $-20\text{ dB}$ ).

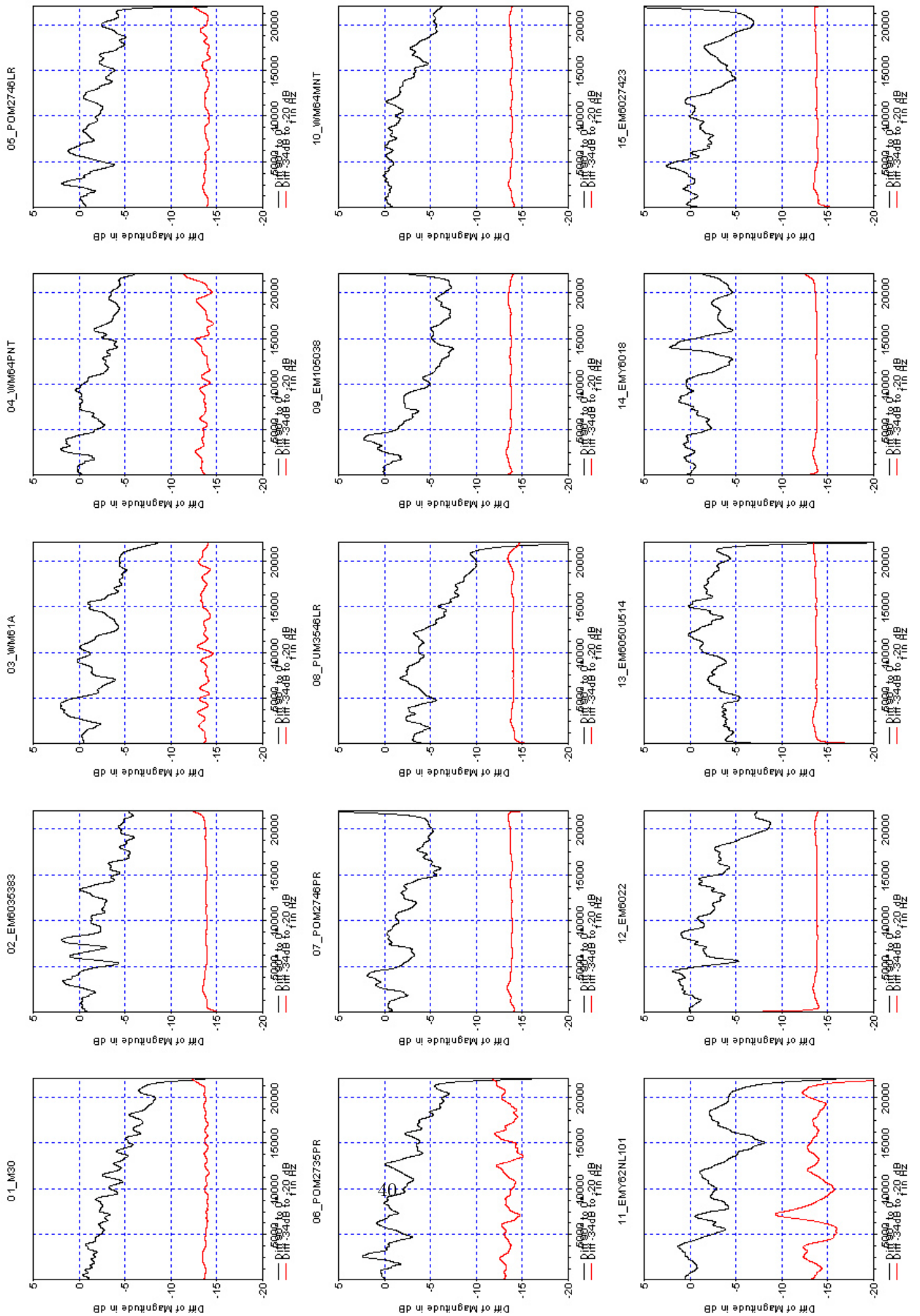
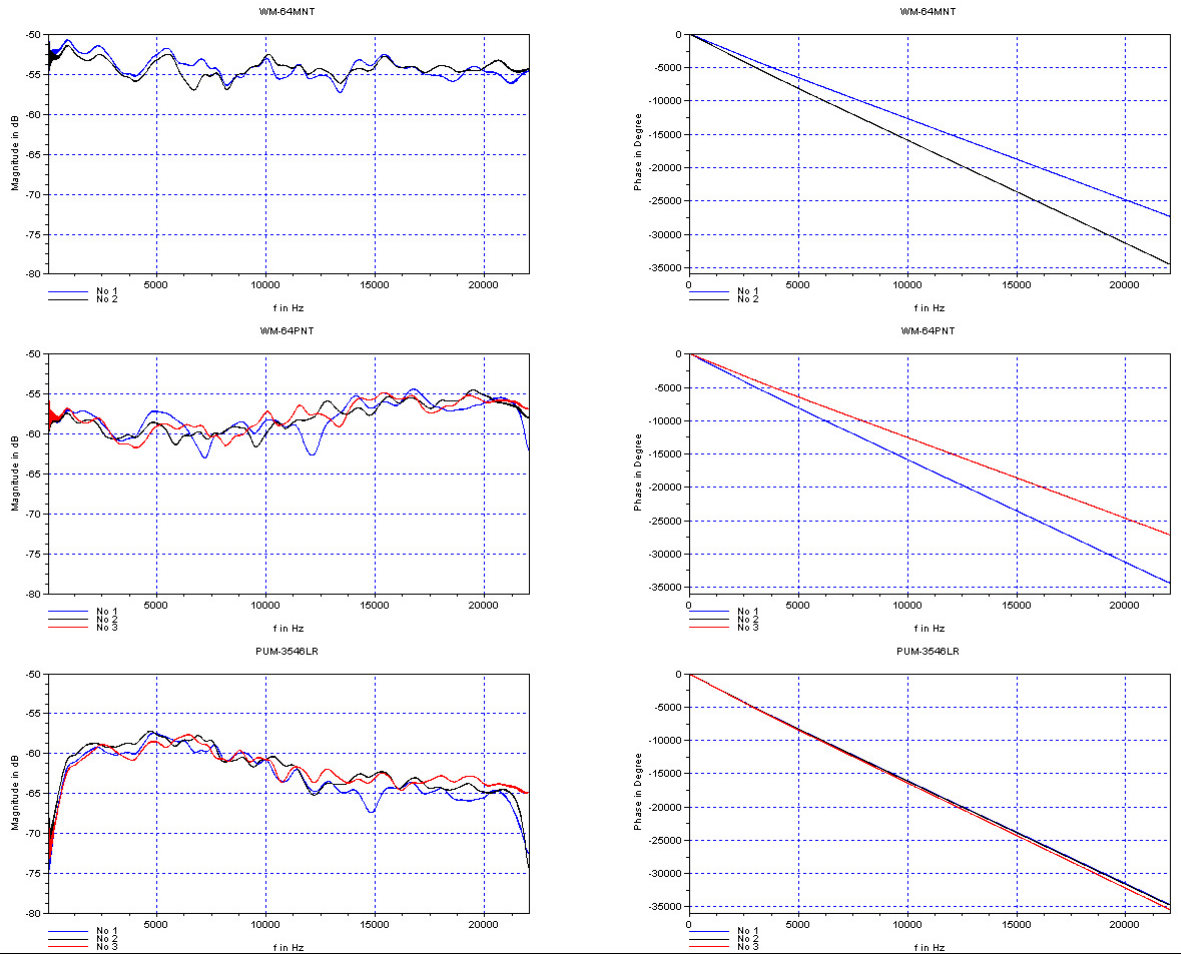
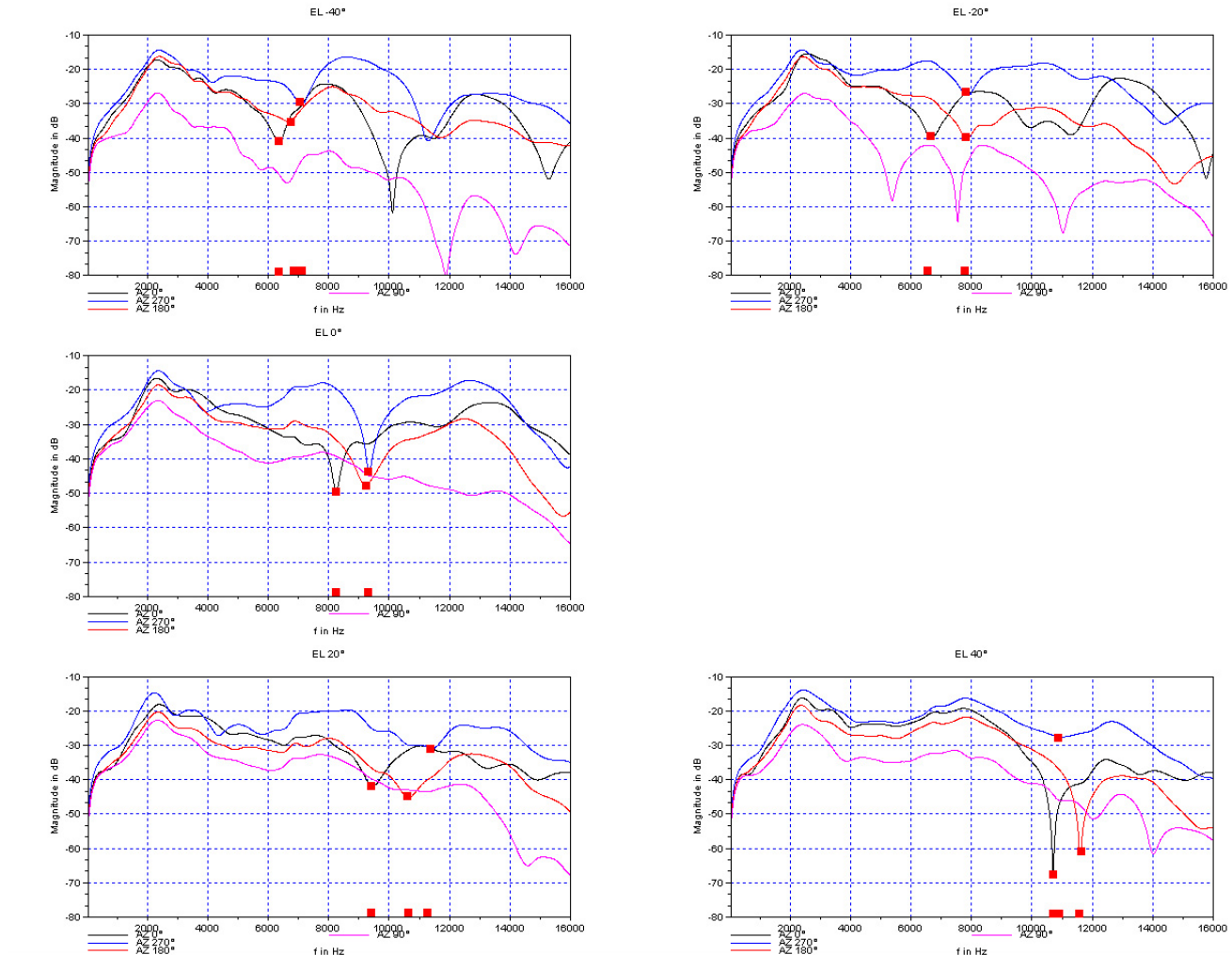


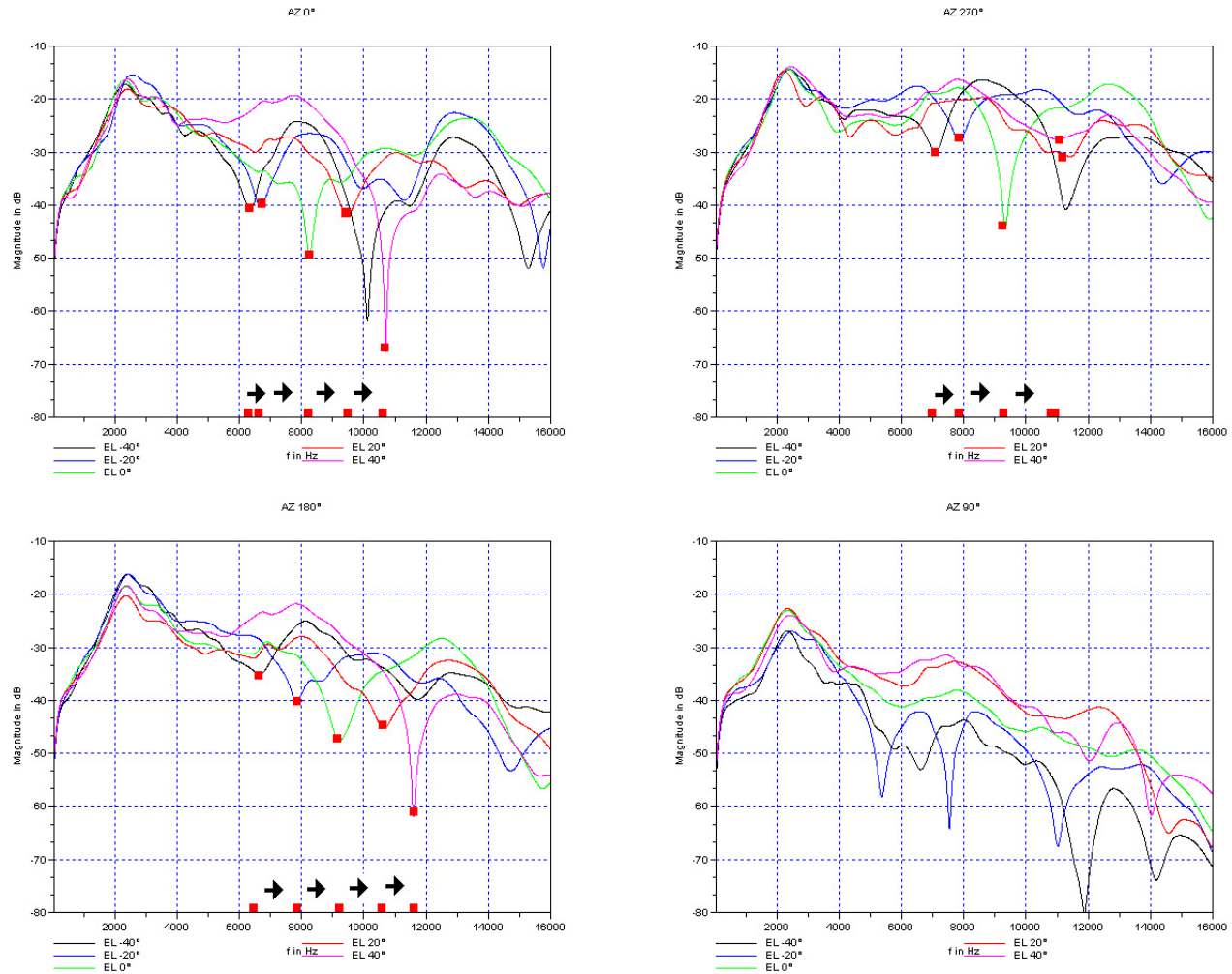
Abbildung A.4. – DIFFERENZ DER FREQUENZGÄNGE DER KAPSELTYPEN: Frequenzgangdifferenzen aller 14 Mikrofonkapseln und des M30 im Überblick Differenz 1 Messung 1 und Messung 2 (schwarz) und Differenz 2 (rot) aus den Messungen 1 und 3



**Abbildung A.5.** – KAPSELTYP INTERNE VARIANZEN: Frequenzgang (links) und Phase (rechts) verschiedener Kapseln des gleichen Typs; WM-64MNT (oben), WM-64PNT (mitte) und PUM-3546LR (unten)



**Abbildung A.6.** – SPEKTREN DER HRTFS IM LINKEN OHR DES KEMAR-KUNSTKOPFES: Diagramme (von links nach rechts, oben nach unten): EL -40°, EL -20°, EL 0°, EL 20°, EL 40°, Graphen je Diagramm: AZ 0° (schwarz), AZ 270° (blau), AZ 180° (schwarz), AZ 90° (violett); die roten Kästchen markieren die Frequenzen der ersten markanten Dips von je drei relevanten Frequenzgängen.



**Abbildung A.7.** – SPEKTREN DER HRTFs IM LINKEN OHR DES KEMAR-KUNSTKOPFES: Diagramme (von links nach rechts, oben nach unten): AZ 0°, AZ 270°, AZ 180°, AZ 90°, Graphen (je Diagramm): EL -40° (schwarz), EL -20° (blau), EL 0° (grün), EL 20° (rot), EL 40° (violett); die roten Kästchen markieren die Frequenzen der ersten markanten Dips der Frequenzgänge, der schwarze Pfeil die Verschiebungsrichtung des Dips bei zunehmender vertikaler Richtung der Schallquelle.

# Literaturverzeichnis

- [Beg94] BEGAULT, Durand R.: *3D-Sound - for virtual reality and multimedia*. AP Professional, 1994
- [Bla85] BLAUERT, Jens: *Räumliches Hören: neue Ergebnisse und Trends seit 1972*. 2. Auflage. Hirzel, 1985
- [Dic97] DICKREITER, Michael: *Handbuch der Tonstudioteknik*. 6. Auflage. K.G.Saur, 1997
- [GK94] GARDNER, Bill ; KEITH, Martin. *HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone*. Cambridge, MA, USA: The MIT Press. <http://sound.media.mit.edu/KEMAR.html>. 1994
- [Hee03] HEE, Jens. *Impulse response measurements using MLS*. <http://jenshee.dk/signalprocessing/mls.pdf>. 2003
- [Hen93] HENLE, Hubert: *Das Tonstudio-Handbuch*. München, BRD : GC Gunther Carstensen Verlag, 1993
- [HMS07] HILD, M. ; MEISSNER, R. ; SPRANGER, M.: Humanoid Team Humboldt, Team Description / Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, LFG Künstliche Intelligenz. Berlin, BRD, 2007. – Forschungsbericht. <http://www.humanoidteamhumboldt.de>
- [Jat99] JATHO, Martin: *Phonotaxis von Laubheuschrecken und Grillen*. 1999. – Frankfurt, BRD: J.W. Goethe Universität, Zoologisches Institut. <http://user.uni-frankfurt.de/~mjatho/phono.html>
- [NF00] NOLFI, Stefano ; FLORENO, Dario: *Evolutionary Robotics: The Biology, Intelligence, and Technology of Self-Organizing Machines*. The MIT Press, 2000
- [Nym] NYMAND, Mikkel. *How to read microphone specifications*. DPA microphones, <http://www.dpamicrophones.com/Images/DM00665.pdf>
- [Web03] WEBERS, Johannes: *Handbuch der Tonstudioteknik*. Poing, BRD : Franzis, 2003