

Über dieses Dokument

Inhalt

Das vorliegende Dokument ist die zweite von drei Application Notes über räumliches Hören und binaurale Messtechnik. Es beinhaltet Informationen über die Unterschiede zwischen konventionellen Messmikrofonaufnahmen und Kunstkopfaufnahmen und listet einige Vorteile der binauralen Aufnahmetechnik auf. Das letzte Kapitel beschreibt die Entwicklung eines Kunstkopfmesssystems mit vereinfachter äußerer Geometrie.

1. Vergleich Mikrofon- und Kunstkopfaufnahme _____ 2
2. Vorteile der Aufnahme mit einem Kunstkopf _____ 4
3. Entwicklung eines Kunstkopf-Messsystems _____ 5

Zielgruppe

Der nachfolgende Text richtet sich an Akustiker¹, die sich für die gehörrichtige Aufnahme von Schallsignalen interessieren und mehr über binaurale Aufnahmetechnik erfahren wollen.

Fragen?

Sie haben Fragen? Wir freuen uns über Ihre Rückmeldungen!

Fragen zum Inhalt dieses Dokument: Imke.Hauswirth@head-acoustics.com

Technische Fragen zu unseren Produkten: SVP-Support@head-acoustics.com

Binaural aufnehmen mit einem Kunstkopf

Zusammenfassung

Das Ziel der binauralen Aufnahme ist es, eine Geräuschsituation ganzheitlich zu erfassen. Beim Abhören einer binauralen Aufnahme soll der Hörer in die Schallsituation „eintauchen“ können und diese so wahrnehmen, als befände er sich im originalen Schallfeld. Um dies zu erreichen, muss die Aufnahme interaurale Unterschiede und Veränderungen durch die Geometrie des menschlichen Körpers beinhalten (siehe Application Note „[Räumlich hören](#)“).

Bei Aufnahmen mit einem konventionellen Messmikrofon fehlen jedoch all diese Informationen. Das Messmikrofon nimmt alle Geräusche gleich auf – unabhängig aus welcher Richtung sie auf das Mikrofon auftreffen. Das Gehör kann aus diesem Grund beim Abhören einer Mikrofonaufnahme die Schallquellen nicht lokalisieren und nicht selektieren.



Im Gegensatz dazu enthält eine binaurale Aufnahme alle für die binaurale Signalverarbeitung wichtigen Informationen. Eine binaurale Aufnahme kann z. B. mit einem Kunstkopf aufgenommen werden. Ein Kunstkopf-Messsystem besteht aus einem künstlichen Kopf mit je einem Mikrofon im rechten und linken Gehörgang.

¹ Im nachfolgenden Text wird verallgemeinernd das generische Maskulinum verwendet. Dies soll ausschließlich der besseren Lesbarkeit dienen. Selbstverständlich möchten wir gleichermaßen alle Geschlechter ansprechen bzw. einbeziehen.

1. Vergleich Mikrofon- und Kunstkopfaufnahme

Defizite von Mikrofonaufnahmen

Aufnahmen mit einem einzelnen Messmikrofon erlauben grundsätzlich keine Richtungsübermittlung, da der Schalldruck ein richtungsunabhängiger Skalar ist. Somit liefern Messmikrofone aufgrund der fehlenden richtungs- und frequenzabhängigen Codierung durch das Außenohr² keine sinnvoll für das menschliche Ohr auswertbaren Richtungsinformationen. Aufnahmen mit Stereomikrofonen gestatten immerhin die Übertragung von Pegel- und/oder Laufzeitunterschieden, bilden aber die durch die Physiologie des Hörers verursachten Schallfeldänderungen nicht nach. Insbesondere in komplexen Geräuschsituationen mit mehreren Schallquellen aus unterschiedlichen Richtungen erzeugt die konventionelle Messtechnik Aufnahmen, die nicht mehr adäquat vom menschlichen Gehör analysiert werden können (im Vergleich zur originalen Schallsituation). Durch die fehlende räumliche Trennung der Geräuschquellen kann das Gehirn die einzelnen Schallquellen nicht separieren, und es ist schwerer, sich auf einzelne Schallquellen zu konzentrieren. Befindet sich aber ein Kunstkopf in einem Schallfeld, verändert er die Schallwellen wie ein Mensch, bevor sie durch die Mikrofone aufgezeichnet werden. Und die für das binaurale Hören nötigen Informationen werden in die Aufnahme integriert.

Vergleich Mikrofon- und Kunstkopfaufnahme

Abbildung 1 visualisiert den Unterschied zwischen den beiden Aufnahmearten. Im dargestellten Beispiel zeichnen ein Messmikrofon und ein Kunstkopf jeweils zwei gesprochene Zitate auf. Die Zitate werden gleichzeitig von zwei verschiedenen Personen gesprochen. Eine Person steht links neben dem Aufnahmesensor und die andere rechts davon. In der oberen Darstellung wurden die Zitate wie bei einer Mikrofonaufnahme vermischt. In der unteren Darstellung wurden die Zitate wie bei einer Kunstkopfaufnahme richtungsabhängig aufgetrennt, so dass der Betrachter die Möglichkeit hat, sich auf ein Zitat zu konzentrieren und es zu verstehen.

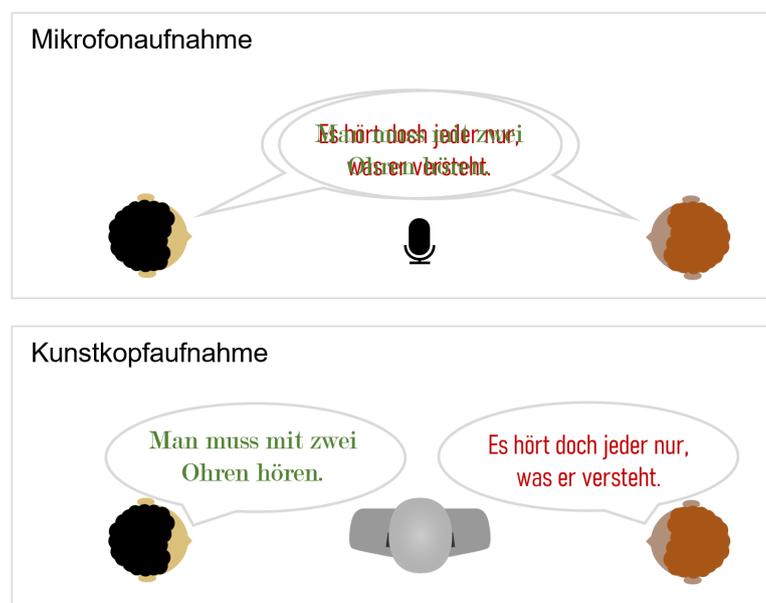


Abbildung 1: Visualisierung einer Messmikrofonaufnahme (oben) und einer binauralen Aufnahme (unten)

² Mit dem Begriff „Außenohr“ ist im Folgenden eine Zusammenfassung von allen akustisch wirksamen Parametern gemeint, bestehend aus Oberkörper, Schulter, Kopf, Ohrmuschel und Ohrkanal.

Abbildung 2 verdeutlicht den Unterschied anhand einer einfachen Pegelanalyse. Für die Aufnahme wurde eine Schallquelle um einen Kunstkopf bzw. ein konventionelles Messmikrofon herumgeführt. Bei der Kunstkopfaufnahme (grüne und rote Kurve) ändert sich der Pegel (höher auf der ohrzugewandten Seite, niedriger auf der ohrabgewandten Seite). Der Pegel der Mikrofonaufnahme (blaue Kurve) bleibt bei der gesamten Messung unverändert.

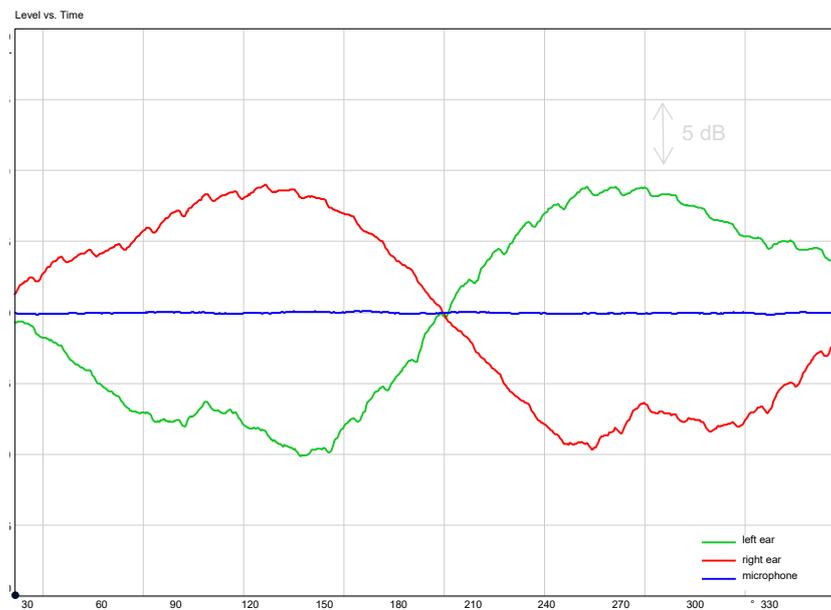


Abbildung 2: Vergleich Kunstkopfaufnahme und Mikrofonaufnahme

Aufzeichnung komplexer Schallsituationen

Besonders komplexe Schallsituationen mit vielen unterschiedlichen Geräuschquellen, können nur mithilfe binauraler Sensoren korrekt aufgezeichnet werden. Die Geräuschanteile des Gesamtgeräusches, die nur ein geringes Leistungsdichtespektrum aufweisen, verändern den Gesamtpegel kaum. Dennoch können gerade diese Geräuschanteile als sehr störend empfunden werden. Eine konventionelle Mikrofonaufnahme kann diese komplexe Schallsituation aber nicht richtig abbilden. In einer solchen Aufnahme ohne Richtungsinformationen kann es passieren, dass die leiseren Geräuschanteile durch lautere maskiert werden. Dann ist der Geräuschanteil, der im Originalschallfeld als störend empfunden wurde, beim Abhören der entsprechenden Aufnahme nicht mehr hörbar.

Eine solche komplexe Schallsituation ist z. B. in einer Fahrzeugkabine vorhanden. Hier tragen neben dem Antriebstrang auch Nebenaggregate zum Gesamtgeräusch bei. Die individuellen Geräusche dieser Nebenaggregate besitzen zum Teil einen sehr geringen Pegel. Dennoch können diese Geräusche aufgrund der enthaltenen Geräuschmuster als störend empfunden werden. Um ein solches Störgeräusch aufzuspüren und analysieren zu können, muss die Aufnahme der Schallsituation das störende Geräuschmuster enthalten.

Beispiel: Geräusch im Fahrzeuginnenraum

Das folgende Beispiel einer Fahrzeuginnenraumaufnahme eines Leerlaufgeräusches (IC engine) mit künstlich eingespieltem Störgeräusch zeigt den Unterschied zwischen Messmikrofon- und Kunstkopfaufnahme. Das Störgeräusch ist nur bei der Wiedergabe der Kunstkopfaufnahme hörbar (mit dem linken Ohr). Beim Abhören der Aufzeichnung des Messmikrofons ist es kaum zu detektieren. Zusätzlich kann beim Abhören der

binauralen Aufnahme die Richtung des Störgeräusches ermittelt werden. Und auch die Erfassung und Untersuchung des Störgeräusches mit messtechnischen Analysen ist nur mit der Kunstkopfaufnahme möglich (siehe Abbildung 3).

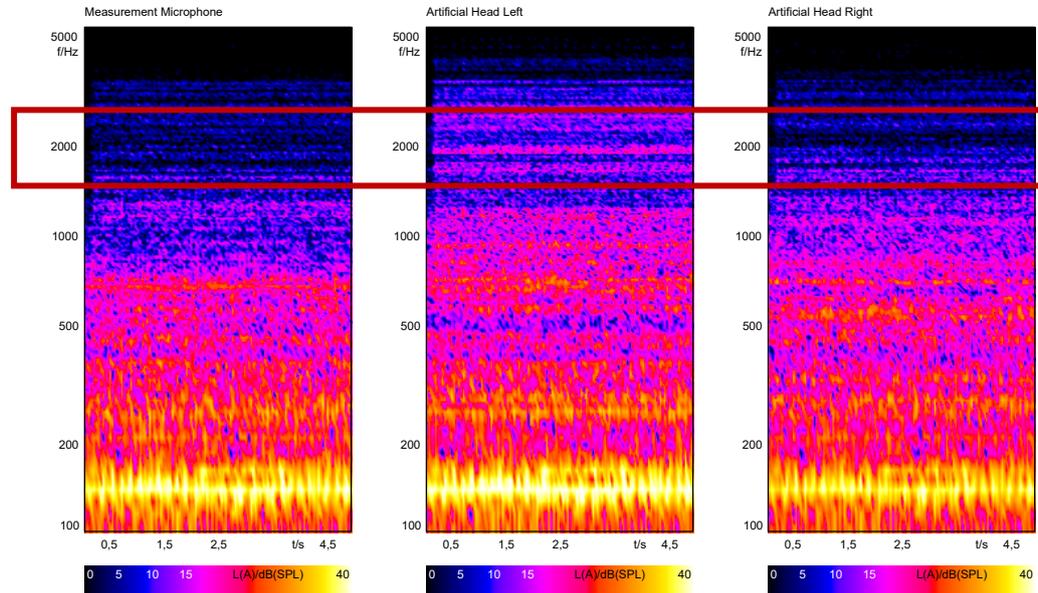


Abbildung 3: Zeitabhängige Frequenzanalyse (FFT) des Leerlaufgeräusches eines Verbrennungsmotors mit Störgeräusch um 2000 Hz; links: Aufnahme mit Messmikrofon, Mitte: linker Kunstkopfkanaal, rechts: rechter Kunstkopfkanaal

2. Vorteile der Aufnahme mit einem Kunstkopf

originalgetreue Reproduktion von Schallereignissen

Das Ziel von Messungen mit einem Kunstkopf ist die Aufnahme, Übertragung und originalgetreue Reproduktion von Schallereignissen an den menschlichen Trommelfellen. Ein Kunstkopf-Messsystem mit einer zum menschlichen Gehör vergleichbaren Übertragungsfunktion verändert im Gegensatz zum Messmikrofon das Schallfeld unterschiedlich, je nachdem in welcher Richtung die Schallquelle liegt. Eine binaurale Aufnahme enthält also z. B. die für die Schallquellenlokalisierung nötigen interauralen Laufzeit- und Pegeldifferenzen.

Gehör als Analysator

Mithilfe von binauralen Aufnahmen und der gehörrichtigen Wiedergabe können Schallereignisse so aufgenommen und wiedergegeben werden, dass der Hörer sie hört, als wäre er selbst im Original-Schallfeld anwesend gewesen. Dies ermöglicht eine valide perzeptive Beurteilung der aufgezeichneten Schallsignale. Das menschliche Gehör mit seiner hohen Frequenz- und Zeitauflösung wird in die Analyse der Geräusche einbezogen. Zusätzlich ist aufgrund der Kompatibilität zur konventionellen Messtechnik³ gleichzeitig eine instrumentelle, analytische Untersuchung der Schallereignisse realisierbar.

Zusammenfassung

Die Verwendung eines Kunstkopf-Messsystems bei der Aufnahme ermöglicht eine vollständige räumliche Abbildung eines Schallfeldes und einen realistischen

³ Die Kompatibilität zur konventionellen Messtechnik wird mithilfe der Aufnahmeentzerrung erreicht, siehe Application Note „[Kunstkopfaufnahmen entzerren](#)“.

Höreindruck, der durch Aufnahmen mit einem konventionellen Messmikrofon nicht erreicht werden kann.

Vorteile der binauralen Messtechnik

- Integration des Hörsinns in die Messkette bzw. in die Analyse
- Nutzung der binauralen Signalverarbeitung des menschlichen Gehörs (z. B. Schallquellenseparierung und Störgeräuschunterdrückung)
- Gehörrichtige, digitale Konservierung von Schalleignissen
- Mehr Beurteiler verglichen zur In-situ-Beurteilung, alle Teilnehmer beurteilen eine identische Geräuschsituation
- Dokumentation interauraler Laufzeit- und Pegeldifferenzen

3. Entwicklung eines Kunstkopf-Messsystems

Einleitung

Jeder Mensch hört mit seinen eigenen Ohren am besten. Die Veränderungen, die durch die eigenen Ohrmuscheln verursacht werden, können im Alltag ohne Probleme in eine entsprechende Information über die Position der Schallquelle übersetzt werden. Beim Abhören einer Kunstkopfaufnahme hört man aber sozusagen mit fremden Ohren, nämlich mit denen des Kunstkopfes. Damit auch hier die Schallquellenlokalisierung gut funktioniert, muss die äußere Form des Kunstkopfes bestimmte Bedingungen erfüllen. Die Veränderungen, die der Kunstkopf den Geräuschen aufprägt, müssen von möglichst vielen Menschen richtig interpretiert werden können. Die Form des Kunstkopfes muss also so gestaltet sein, dass möglichst viele Menschen mit seinen Ohren annähernd so gut hören wie mit den eigenen.

Anforderungen an ein Kunstkopf-Messsystem

Um eine gehörrichtige Aufnahme und Wiedergabe zu gewährleisten, muss ein Kunstkopf-Messsystem folgende Anforderungen erfüllen:

- Die Richtcharakteristik des Kunstkopfes entspricht der mittleren Richtcharakteristik des Menschen.
- Das Eigenrauschen der Mikrofone ist nicht wahrnehmbar, wodurch Hörversuche im Bereich der Hörschwelle möglich sind.
- Die Dynamik erstreckt sich bis zur menschlichen Schmerzschwelle, um eventuelle Pegelspitzen korrekt erfassen zu können.
- Die untere und obere Grenzfrequenz des Systems schließen den hörbaren Frequenzbereich ein.
- Das System ist kalibrierfähig und kompatibel zu konventionellen Schallaufnehmern (für spezielle Beschallungssituationen).

Mittlere Außenohrübertragungsfunktion

Bei der Konstruktion von Kunstköpfen stellt sich zunächst die Frage, anhand welcher Kriterien die eigentliche Kunstkopfgeometrie gestaltet werden soll. Die Außenohrübertragungsfunktionen zwischen einzelnen Versuchspersonen unterscheiden sich zum Teil sehr deutlich. Bei der Entwicklung eines Kunstkopf-Messsystems muss also eine

Kopfgeometrie gefunden werden, die eine gute Abbildungseigenschaft für möglichst viele Versuchspersonen ausweist. Die gemessenen Außenohrübertragungsfunktionen individueller Personen können nicht einfach gemittelt werden, um zu einem mittleren Richtdiagramm für ein Kunstkopfmikrofon zu gelangen. Bei einer solchen einfachen Mittelung besteht die Gefahr, dass signifikante Minima und Maxima herausgemittelt werden. Aus diesem Grund muss ein geeignetes Strukturmittelungsverfahren zur Bestimmung einer mittleren Außenohrübertragungsfunktion verwendet werden.

Erstes Kunstkopf-Messsystem

Das erste Kunstkopf-Messsystem von HEAD acoustics besaß eine Kopf- und Ohrmuschelnachbildung, deren äußere, akustisch wirksame Geometrie nach individuellen Vorlagen geformt wurde (HEAD Measurement System, HMS I, siehe Abbildung 4). Die Abdrücke vom Kopf und der Ohrmuscheln stammten von zwei unterschiedlichen Personen (Kopfabdruck von einer Person, Abdruck der Ohrmuscheln von einer anderen Person). Bei der Auswahl der Person für den Ohrabdruck wurde darauf geachtet, dass die Ohrmuscheln dieser Person eine möglichst gute Übereinstimmung zu der zuvor mit dem Strukturmittelungsverfahren bestimmten, mittleren Übertragungsfunktion besaßen. Da sich die komplexe Struktur des Kopfes und der Ohrmuschel einer genauen Beschreibung entziehen, war dieses Kunstkopf-Messsystem nur ab der Mikrofonmembran kalibrierfähig.



Abbildung 4: HEAD Measurement System, HMS I

Modell für die Außenohrübertragungsfunktion

Die im Rahmen der Dissertation von Prof. Genuit⁴ durchgeführten Untersuchungen zur menschlichen Außenohrübertragungsfunktion zeigten, dass die Richtcharakteristik des Außenohres durch einige wenige Parameter der äußeren Geometrie signifikant definierbar ist. Es konnte ein mathematisches Modell der Außenohrübertragungsfunktion bestimmt werden, das auf einer Reihe von Vereinfachungen der äußeren Geometrie des Außenohres basierte. Hieraus ergab sich der Gedanke, ein Kunstkopf-Messsystem mit einer vereinfachten äußeren Geometrie zu entwickeln (Prototyp siehe Abbildung 5).

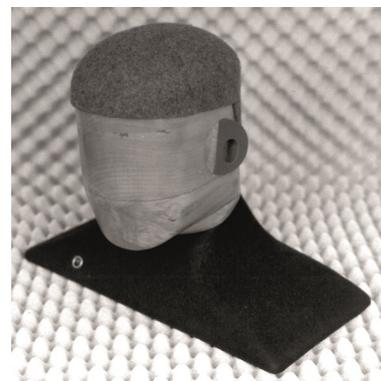


Abbildung 5: Prototyp mit vereinfachter äußerer Geometrie

⁴ Genuit: Ein Modell zur Beschreibung von Außenohrübertragungseigenschaften, Dissertationsschrift, 1984

Kunstkopf mit vereinfachter Geometrie

In der Folge wurde ein kalibrierfähiges Kunstkopf-Messsystem mit mathematisch beschreibbarer Geometrie als Serienprodukt entwickelt (siehe Abbildung 6), das dem bestehenden ANSI-Standard S3.36 für Kunstköpfe entsprach.

Diese Geometrie verändert das Schallfeld so wie eine Person mit durchschnittlicher äußerer Geometrie. Dies ist ein Vorteil, da diese Kunstköpfe nicht mehr nur eine individuelle Person repräsentieren, sondern den Mittelwert aus vielen Personen. HMS II und alle seine Nachfolger bis zum HMS V besitzen daher eine mittlere, repräsentative Außenohrübertragungsfunktion.



Abbildung 6: Erster Serien-Kunstkopf mit mathematisch beschreibbarer Geometrie (HMS II)

Übertragungsfunktion eines Kunstkopfes

Abbildung 7 zeigt die Übertragungsfunktionen des rechten Ohres eines HMS III. Die Messungen wurden mit Pseudozufallsrauschen schrittweise an verschiedenen Positionen der Horizontalebene in einem reflexionsarmen Raum bestimmt (vertikaler Schalleinfallswinkel $\delta = 0^\circ$, horizontaler Schalleinfallswinkel φ von 0° – 360° aufgetragen auf der X-Achse).

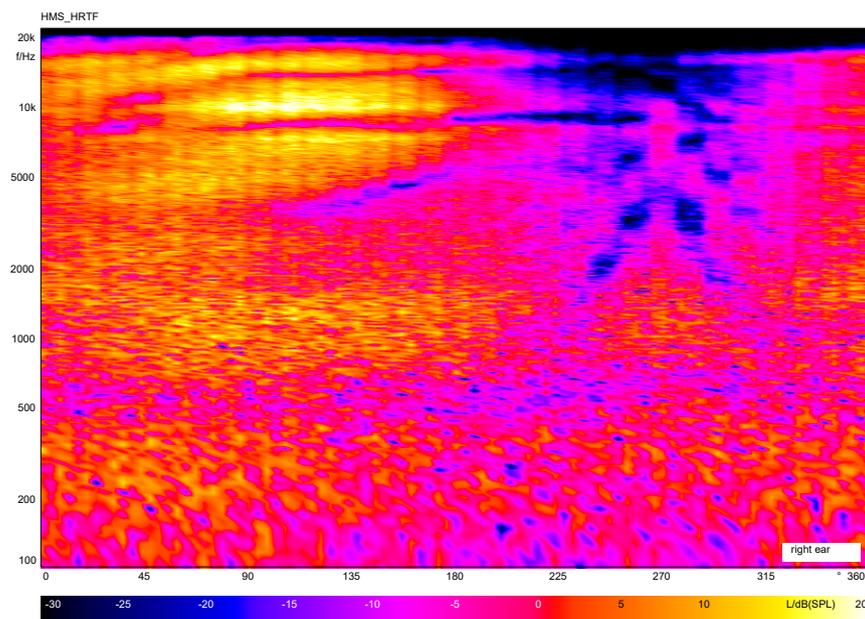


Abbildung 7: Übertragungsfunktionen des rechten Ohres eines HMS III in der Horizontalebene

➔ Weiter zur [dritten Application Note über binaurale Aufnahmetechnik](#)