

Richtcharakteristik von Mikrofonanordnungen

Bernhard Virnich

Abstract

An ideal measurement microphone has a frequency independent, omni-directional pattern. Condenser microphones with $\frac{1}{2}$ "- or $\frac{1}{4}$ " membrane diameter are common. For acoustic measurements microphone layouts are chosen for specific measurement tasks. Intensity probes work with the propagation time difference between the sensors. The amount of microphones in an array allows calculation of preferred direction. Artificial head systems have a definitive individual directional characteristic due to the design. The various methods are explained. There is a special focus on binaural microphone systems.

Kurzfassung

Ein ideales Messmikrofon hat eine frequenzunabhängige, kugelförmige Richtcharakteristik. Kondensator-Mikrofone mit $\frac{1}{2}$ "- oder $\frac{1}{4}$ " Membrandurchmesser sind üblich. In der akustischen Messtechnik werden für bestimmte Messaufgaben Mikrofonanordnungen bewusst gewählt. Bei der Intensitätssonde wird der Laufzeitunterschied zwischen den Sensoren genutzt. Die vielen Mikrofone eines Arrays bekommen durch Verrechnung der Mikrofonsignale eine Vorzugsrichtung. Kunstkopfsysteme haben eine ausgeprägte Richtcharakteristik aufgrund ihrer Bauform. Die verschiedenen Verfahren werden im Folgenden erklärt. Ein besonderer Schwerpunkt liegt bei den binauralen Systemen.

1. Das Mikrofon

Ein Messmikrofon hat die Aufgabe, Luftschall in ein elektrisches Signal umzusetzen. Dazu wird das Prinzip eines Druckempfängers eingesetzt. Die bewegliche Membran und eine feste Gegenelektrode bilden einen Kondensator. Die Änderung des Membranabstandes durch eine auftreffende Schallwelle führt zu einer Kapazitätsänderung. Um diese auszuwerten, wird die Kapsel mit einer Gleichspannung von 200 Volt aufgeladen. Die Kapazitätsänderung im Rhythmus des Schallsignals wird durch den direkt folgenden Impedanzwandler zu einer Spannung und über einen niederohmigen Ausgang an das Frontend weitergegeben. Bei vorpolarisierten Mikrofonkapseln besteht die Gegenelektrode aus einem Elektret, in das eine Ladung „eingefroren“ ist. Es entfällt dadurch die Polarisationsspannung von 200 Volt. Mit vorpolarisierten Kapseln sind auch Impedanzwandler nach dem IEPE-Prinzip möglich.

Messmikrofone bestehen aus einer Kapsel (=Kapazität) und einem Impedanzwandler, auch Vorverstärker genannt. Mikrofonkapsel und Impedanzwandler bilden eine Einheit. In der Messtechnik trifft man meistens Kapseln mit $\frac{1}{2}$ " oder $\frac{1}{4}$ " Durchmesser

an. Druckempfänger haben eine kugelförmige Richtcharakteristik, solange die Wellenlänge größer ist als der Durchmesser der Mikrofonskapsel. Bild 1 zeigt die Richtcharakteristik in Abhängigkeit von der Frequenz.

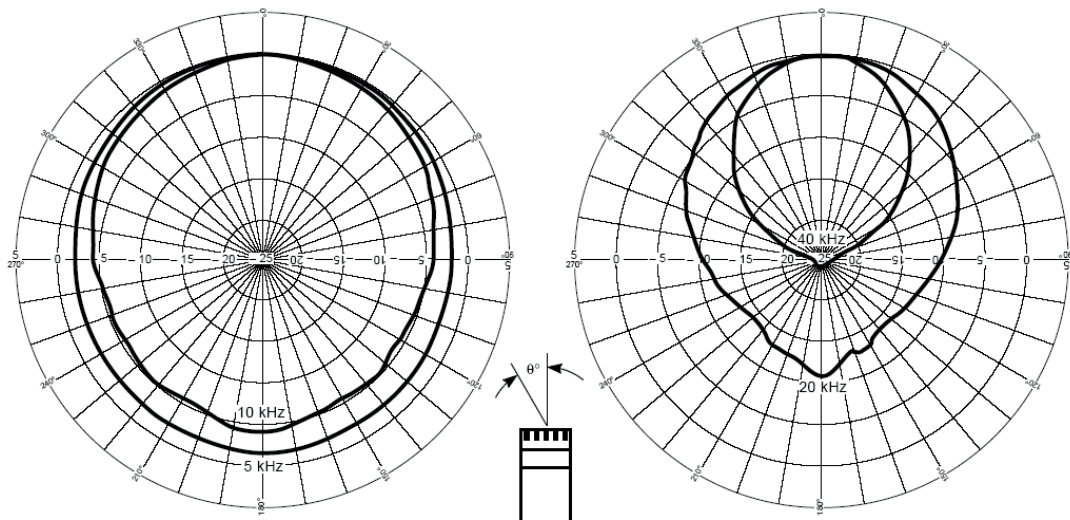


Bild 1: Richtcharakteristik einer 1/2" Kapsel, bezogen auf den Schalleinfall bei 0° [1]

Der Frequenzbereich reicht deutlich über den hörbaren Bereich von 20 bis 20.000 Hertz hinaus. Da die untere Grenzfrequenz bei 3 Hz liegen kann, können niederfrequente Luftdruckschwankungen aus einer Klimaanlage, Luftströmungen oder eine plötzlich geöffnete Türe das Messergebnis verfälschen. Signalkonditionierungen für Mikrofone haben deshalb häufig einen schaltbaren Hochpassfilter bei 22,4 Hertz.

Messmikrofone sind im Aufbau eine feinmechanische Herausforderung.

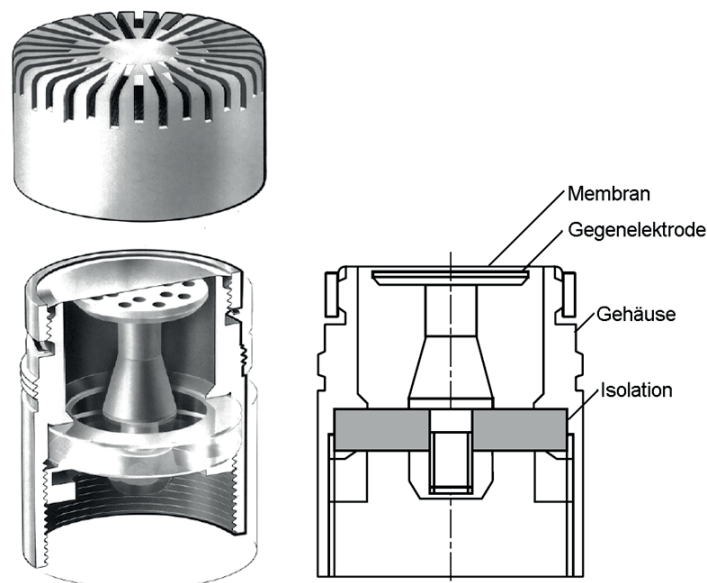


Bild 2: Prinzipdarstellung Kondensator-Mikrofon mit Kapsel [1]

Der Abstand zwischen Membran und Gegenelektrode beträgt im Schnitt nur 20 µm, wobei eine Toleranz von +/- 0.8 µm einzuhalten ist. Die Dicke der Membran variiert in

Abhängigkeit vom Mikrofontyp zwischen 1,5 und 8 μm . Die Toleranz beträgt max. 10% der nominalen Dicke [2].

Für spezielle Aufgabenstellungen gibt es besondere Mikrofonanordnungen, die in den folgenden Kapiteln näher beschrieben werden:

- Intensitätsmessung
- Mikrofonarrays für Schallortung
- Binaurale Mikrofontypen zur Aufzeichnung kopfbezogener Signale für die hörgerechte Wiedergabe

An Messmikrofone werden hohe Anforderungen gestellt:

- Das Mikrofon beeinflusst das Schallfeld nicht.
- Der Frequenzgang ist linear.
- Seine Dynamik ist höher als die des zu erwartenden Signals.
- Umgebungseinflüsse wie Temperatur- oder Luftdruckschwankungen verändern nicht das Ergebnis.
- Die Signalkonditionierung ist einfach aufgebaut.
- Es sind große Leitungslängen möglich.
- Der Sensor ist preiswert und hat eine lange Lebensdauer.

Teilweise schließen sich die Anforderungen einander aus und es ist abzuwägen, was in der jeweiligen Situation wichtiger ist. Mikrofone mit nur $\frac{1}{4}$ " Membrandurchmesser haben Vorteile in der kugelförmigen Richtcharakteristik und sind aufgrund der geringen Abmessungen bei Mikrofon-Arrays sehr beliebt. Sie haben allerdings bauartbedingt ein etwas höheres Eigenrauschen bzw. eine niedrigere Empfindlichkeit als $\frac{1}{2}$ " Mikrofone wegen der kleineren Membranfläche.

2. Richtwirkungen

Durch den mechanischen Aufbau der Mikrofonkapsel lässt sich allein durch die Variation der Schalllaufzeiten eine Richtwirkung erzielen [3]. Bei Kondensator-Mikrofonen, die als Druckempfänger ausgelegt sind (siehe Kapitel 1), ist nur eine Seite der Membran dem Schallfeld ausgesetzt. Die Gegenelektrode ist in einem geschlossenen Gehäuse integriert (lediglich eine kleine Bohrung sorgt dafür, dass statische Luftdruckschwankungen ausgeglichen werden, vergleichbar zur Eustachischen Röhre beim menschlichen Gehör). Hier wird jede Schalldruckschwankung, die auf der Membranoberfläche auftritt, über die Kapazitätsänderung zu einem proportionalen Ausgangssignal führen, gleichgültig, aus welcher Richtung sie kommt. So ergibt sich die Kugelcharakteristik in Bild 1.

Druckgradientenempfänger hingegen sind so aufgebaut, dass der Luftschall über ein akustisches Laufzeitglied auch zur Rückseite der Membran gelangt. Sorgt man nun dafür, dass diese Laufzeit genauso groß ist, wie die Zeit, die der Schall benötigt, um bei Schalleinfall von hinten die Vorderseite der Membran zu erreichen, so ergibt sich für diese Zeitgleichheit bei Schalleinfall von hinten eine Phasengleichheit. Die Mikrofonmembran bleibt in Ruhe. Wandert die Schallquelle von hinten nach vorne, oder

wird das Mikrofon gedreht, so ändern sich die Phasenverhältnisse und man bekommt die sogenannte „Nierencharakteristik“ [3], wie sie in Bild 3 als Polardiagramm dargestellt ist. Durch entsprechende Dimensionierung des Laufzeitgliedes lassen sich auch noch andere Charakteristiken aus der Niere ableiten. Bekannt sind -insbesondere in der Studioteknik - Bezeichnungen wie Hyper- oder Super-Niere oder Keulencharakteristik.

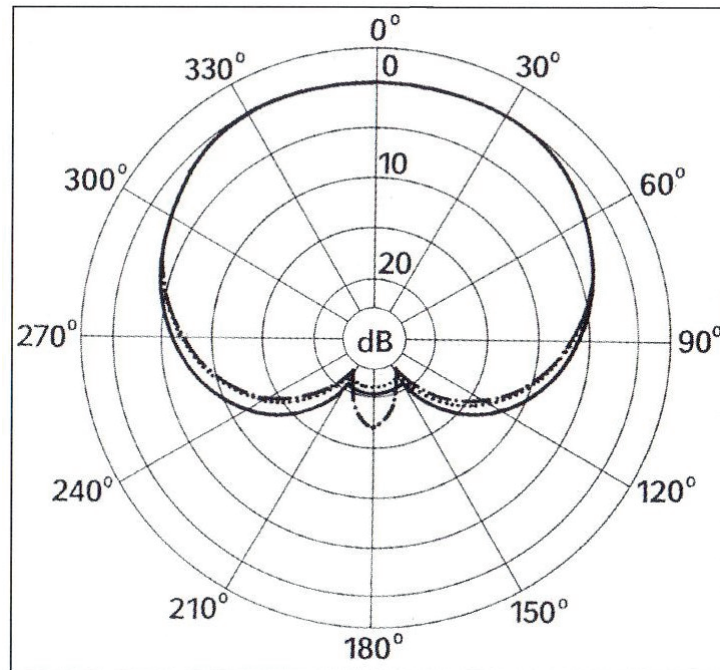


Bild 3: Nierencharakteristik [3]

Eine stark ausgeprägte Richtcharakteristik hat das sogenannte Parabol-Richtmikrofon oder Hohlspiegel-Mikrofon. Es bündelt in einem Parabol- oder Ellipsoid-Spiegel die aus der Vorzugsrichtung einfallenden Schallwellen und leitet diese dann zu einem Mikrofon im Brennpunkt des Spiegels. Positive Erfahrungen damit gibt es in Fahrzeug-Akustik-Windkanälen.

Eine „Achtercharakteristik“ wird mit einer Doppelmembran-Kapsel erreicht. Bei dieser Art von Mikrofon wird der Luftschall, wenn er aus verschiedenen Richtungen auf das Mikrofon trifft, mit unterschiedlicher Polarität an den beiden Membranen aufgenommen. Schall, der auf der 0°-Ebene auf die erste Membran des Mikrofons trifft, steht positiv gerichtet am Ausgang an, während der Schall, der auf der 180°-Ebene auf das Mikrofon trifft (2. Membran), negativ gerichtet ist. Bei Schalleinfall von der Seite bei 90° wird dieser, da er gleiche Amplitude und gleiche Frequenz hat, ausgelöscht. Es entsteht somit keine Ausgangsspannung bei orthogonalem Schalleinfall. [3].

3. Schallintensitätssonde

Zur Bestimmung der Schalleistung in sogenannter störschallerfüllter Umgebung und zur Lokalisation von Schallquellen bei stationären Signalen kann man die Schallintensitätsmessung einsetzen. Zur Bestimmung der Schallintensität sind zwei Metho-

den geläufig: Messungen mit der P-P-Sonde oder einer P-U-Sonde. Im Weiteren ist die P-P-Sonde, die mit zwei Druckempfängern arbeitet, beschrieben.

Schallintensität ist das zeitlich gemittelte Produkt von Druck und Schnelle. Um den Schalldruck zu messen, genügt eigentlich ein einziges Mikrofon. Der mittlere Druck resultiert bei der P-P-Sonde aus dem arithmetischen Mittel der beiden Mikrofon-Schalldrücke:

$$\bar{p}_i(t) = \frac{p_2(t) + p_1(t)}{2} \quad (1)$$

Schwieriger ist es, die Schallschnelle zu bestimmen. Sie lässt sich allerdings über die linearisierte Eulersche Gleichung auf den Druckgradienten (d. h. die Rate, mit der sich der augenblickliche Schalldruck mit der Entfernung ändert) zurückführen. In der Praxis wird der Druckgradient durch zwei dicht nebeneinander montierte Mikrofone bestimmt, die jeweils den Schalldruck messen. Daraus wird die Schallschnelle berechnet [4].

$$u_i(t) = -\frac{1}{\rho} \int \frac{p_2(t) - p_1(t)}{d} dt \quad (2)$$

Für die Schallintensität als Produkt von Druck und Schnelle ergibt sich somit:

$$I = p \cdot u = \frac{p_1 + p_2}{2\rho} \int \frac{(p_1 - p_2)}{d} dt \quad (3)$$

Die beiden Mikrofone haben einen festen Abstand zueinander. Der Abstand bestimmt die obere und untere Schranke des Frequenzbereiches, welche mit der Intensitätssonde gemessen werden kann. Da die Phasendifferenz zwischen den beiden Mikrofonen möglichst klein sein muss, um Fehler gering zu halten, werden selektierte Mikrofonpaare für die Intensitätssonde (Bild 4) gewählt. Zwischen den beiden Mikrofonkapseln ist ein Abstandshalter eingesetzt.



Bild 4: 1/2" Intensitätssonde Microtech Gefell

Die Richtcharakteristik der P-P-Intensitätssonde hat in der zweidimensionalen Ebene die Form einer Acht und wird auch als Kosinus-Charakteristik bezeichnet. Trifft der Schall im Winkel von 90° auf die Sonde, so ergibt sich keine Intensitätskomponente in Richtung der Sondenachse: Die Mikrofone werden gleichzeitig von den Schalldruckschwankungen getroffen, Schnelle und damit auch Schallintensität sind Null. Stimmen Schalleinfallrichtung und Sondenachse überein, so wird die volle Intensität gemessen. Für alle anderen Einfallswinkel θ ergibt sich in Richtung der Sondenachse eine reduzierte Schallintensität von $|I| \cos\theta$, daher die Bezeichnung "Kosinus-Charakteristik" [4].

4. Mikrofonarrays (Beamforming)

Eine ausgeprägte Richtcharakteristik lässt sich mit Mikrofonarrays erzielen. Die einzelnen Mikrofonensignale werden dabei miteinander verrechnet. In Literatur und Praxis werden unterschiedliche Begrifflichkeiten genutzt. Bekannt sind neben Beamforming und Mikrofon-Array auch die Begriffe akustische Kamera, Schallortung oder akustisches Array. Die Richtcharakteristik wird erzielt, indem die Signale aller Mikrofone nach dem Durchlaufen von Verzögerungsgliedern aufsummiert werden.

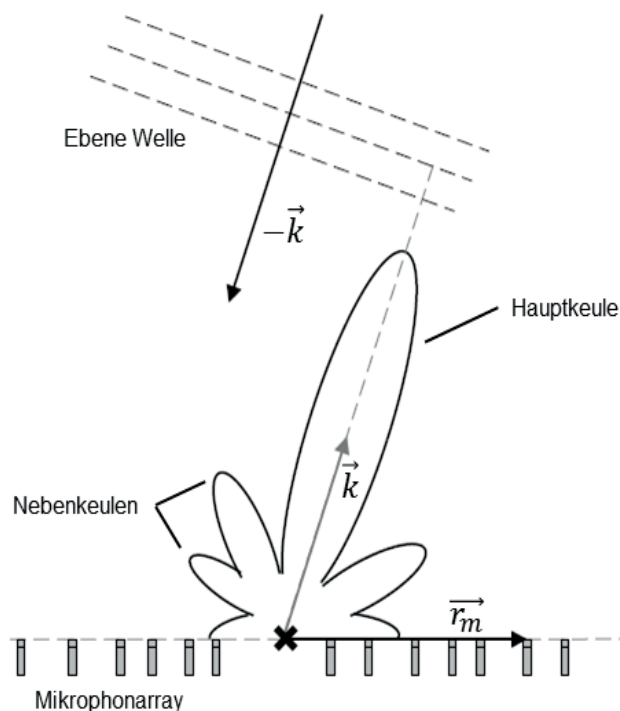


Bild 5: Delay-and-Sum Beamforming

Die in einem Mikrofon-Array eingesetzten Mikrofone besitzen einzeln jeweils eine kugelförmige Richtcharakteristik. Die zur Schallquellenlokalisierung benötigte Richtwirkung wird durch die eingesetzten Algorithmen erzielt. Die Auswertung erfolgt entweder im Zeit- oder im Frequenzbereich.

Auf der Oberfläche des zu untersuchenden Objekts wird ein Gitter von Fokuspunkten definiert. Für jeden Fokuspunkt wird der Beitrag errechnet, indem die Verzögerung so gewählt wird, dass sich die Schallwellen wie eine ebene Welle kohärent aufsummieren. Handelt es sich um eine bewegte Schallquelle, dann wird der Array-Fokus entsprechend mit geschwenkt [5].

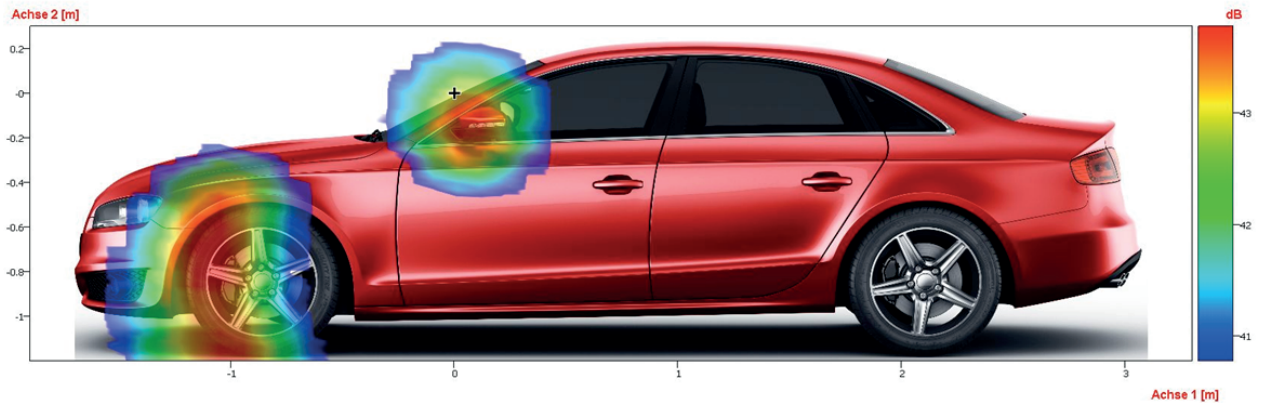


Bild 6: Schallortung im Windkanal, Strömungsgeräusch

Erste Arrays, die in den 1990er Jahren eingesetzt wurden, waren sogenannte Line-Arrays mit wenigen Kanälen. Mit den Jahren sind unterschiedlichste Formen der Mikrofonanordnung dazu gekommen und die Kanalzahl hat sich vervielfacht. Es gibt zum Beispiel ringförmige Arrays, unregelmäßige Anordnungen oder spiralförmige (Bild 7).



Bild 7: Mikrofon-Array mit 5-facher Spirale

Der Frequenzbereich von Beamforming-Arrays wird nach unten durch die Array-Größe begrenzt: je größer das Array, desto niedriger seine untere Grenzfrequenz. Die obere Begrenzung des Frequenzbereichs erfolgt durch das zunehmende Auftreten von Schein-Schallquellen (Alias-Effekt). Diese treten besonders bei regelmäßig angeordneten Mikrofonen auf und können zu Fehlinterpretationen führen. Die Grenzfrequenz, ab der diese Erscheinungen auftreten, ist umso höher, je kleiner der Abstand der Mikrofone zueinander ist [6].

5. Binaurale Mikrofontechnik

Die Bezeichnung „binaural“ wurde früher häufig mit Stereo gleichgesetzt. In der Studiotechnik werden Stereo-Tonaufnahmen über Lautsprecheranlagen beim Abhören gemischt. Die vom Menschen zur Lokalisation verwendeten Eigenschaften wie die Kopf- oder Ohrmuschelformen werden dabei nicht berücksichtigt, da bei der Wiedergabe über Stereo-Lautsprecher im Stereodreieck die Eigenschaften des Gehörs durch den Zuhörer selbst geschieht. Binaurale Aufnahmen sind „Stereo“-Aufnahmen mit besonderer Aufnahmetechnik, die im Allgemeinen nur mit Kopfhörern korrekt wiedergegeben werden [7].

Der Mensch ist in der Lage, seine wahrgenommenen Hörereignisse bestimmten Richtungen zuzuweisen. Der Mensch besitzt Wahrnehmungsmechanismen für die halbe Horizontalebene und die Medianebene. In einem kopfbezogenen Koordinatensystem wird als 0° -Achse die Richtung waagrecht nach vorn definiert [7].

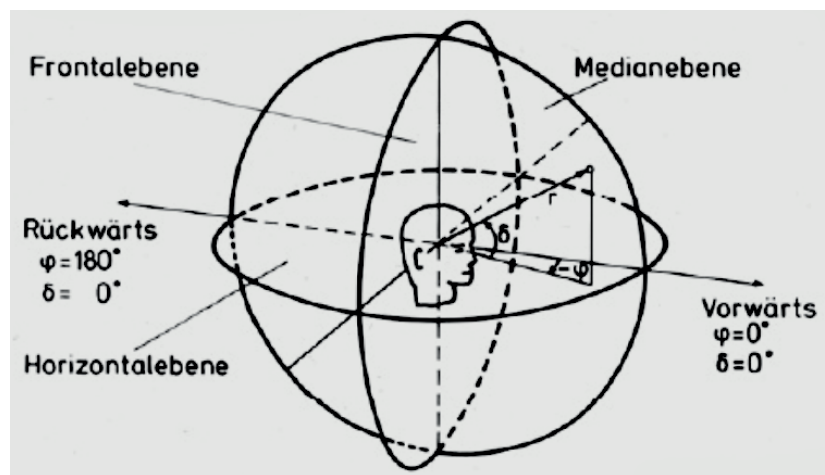


Bild 8: Kopfbezogenes Koordinatensystem [8]

Die Ortung einer Schallquelle erfolgt beim menschlichen Hören über die Pegeldifferenzen und Laufzeitunterschiede des akustischen Signals an den beiden Ohren. Die Laufzeitunterschiede entstehen durch den Abstand der beiden „Sensoren“, den Ohren, der im Mittel 17-22 cm beträgt. Pegeldifferenzen entstehen durch Dämpfung, Beugung und Reflektion an Schulter, Kopf und Ohrmuschel und durch Resonanzen im Außenohr. Die vom Ohr aufgenommenen Reize werden im „binauralen Prozessor“ Gehirn zum räumlichen Hören.

Im Vorwort zu seinem Buch „Räumliches Hören“ schreibt Blauert [8]:

„Aufgabe der Nachrichtentechnik ist es, Nachrichten zu erfassen, zu verarbeiten und über räumliche und zeitliche Schranken zu übertragen. Hierzu gehört die Teilaufgabe, einem Menschen eine akustische Wahrnehmung zu vermitteln, die ursprünglich an anderem Ort und/oder zu anderer Zeit und gegebenenfalls durch jemand anderen stattfand. Am Ende der Übertragungskette müssen dazu Signale erzeugt werden, die bei dem angesprochenen Menschen dazu führen, daß dieser das Gewünschte hört. Sofern man dabei anstrebt, dem Zuhörer die Hörillusion zu verschaffen, daß er sich am Aufnahmeort befände und dort unmittelbar am akustischen Geschehen teilhätte, müssen auch die Richtungen und Entfernungen des Gehörten den ursprünglichen

Richtungen und Entfernungen möglichst genau entsprechen. Diese Forderung führt dazu, daß die in der Nachrichtentechnik tätigen Ingenieure sich in steigendem Maße für die räumlichen Merkmale des akustisch Wahrgenommenen und die Signale, bei denen sie auftreten, kurz: für das „Räumliche Hören“ interessieren. Das Interesse am „Räumlichen Hören“ ist interdisziplinär. Wichtige Forschungsbeiträge stammen aus so unterschiedlichen Wissenschaftsgebieten wie Psychologie, Psychophysik, Physiologie, Medizin sowie Ingenieurwissenschaft, Physik und Musikwissenschaft...“

Die von Blauert angesprochene zeitliche und örtliche Trennung des Schallereignisses kann dabei nützlich sein, einen Mangel des sonst so hervorragenden Analysators „menschliches Gehör“ auszugleichen. Das menschliche Gehör ist zwar ein hochsensibles Analysesystem, das geringste Unterschiede im Geräusch sofort erkennt, aber nur, wenn es diese beiden Geräusche in einem unmittelbaren Vergleich angeboten bekommt. Normalerweise vergeht eine gewisse Zeit, bis die zu vergleichenden Geräuschsituationen hergestellt sind, z.B. ein Reifenwechsel oder Umbau am Prüfstand [9]. Binaurale Aufnahmen hingegen können direkt miteinander verglichen werden. Außerdem können mehrere Personen gleichzeitig ein Signal anhören und diskutieren, was in der realen Aufnahmesituation oft nicht möglich ist.

Binaurale Systeme haben eine ausgeprägte Richtcharakteristik. Zur Darstellung in Bild 8 wurde folgender Messaufbau gewählt. Ein Kunstkopfmesssystem HMS III der Firma HEAD acoustics wurde auf einem Drehteller positioniert. In ca. 2 Meter Entfernung stand ein Lautsprecher, über den Rosa Rauschen wiedergegeben wurde. Für eine vollständige Umdrehung benötigte der Drehteller 180 Sekunden. Am Kunstkopf wurde die Einstellung „LIN“ gewählt. Die dargestellte Außenohrübertragungsfunktion hat eine Dynamik von 40 dB (!).

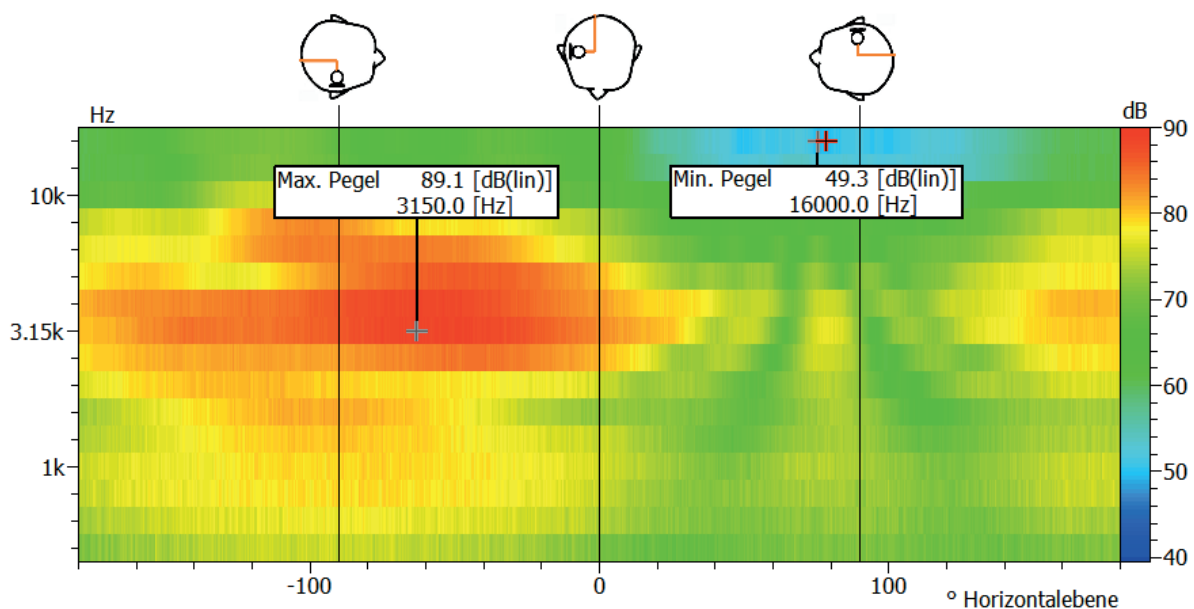


Bild 9: Terzspektrum über 360 ° dargestellt, Farbcampbell

Das Farbcampbell in Bild 9 zeigt sehr deutlich die Veränderung in den einzelnen Terzbändern in Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel. Am empfindlichsten ist die Messanordnung im Bereich um 4 kHz und einem Schalleinfallswinkel um die 60 °. Unterhalb von 500 Hz ist das Übertragungsmaß annähernd linear.

In Bild 10 ist ein Polardiagramm dargestellt. Die 1/12-Oktavkanäle bei den verschiedenen Schnittfrequenzen zeigen deutlich den Einfluss der Außenohrübertragungsfunktion. Zu hohen Frequenzen hin wird die Verdeckung durch den Kopf deutlicher. Die Empfindlichkeit schwankt innerhalb eines 1/12-Oktavbandes stark.

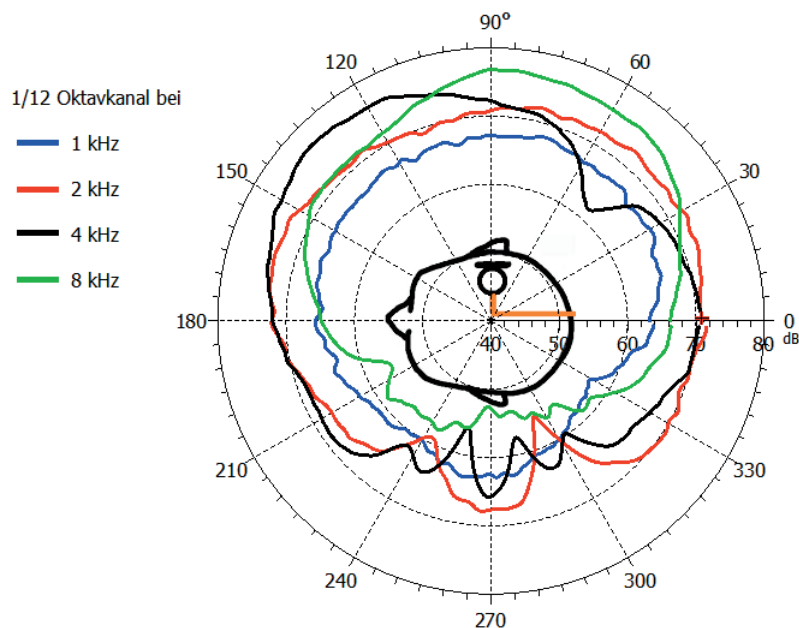


Bild 10: 1/12 Oktavkanal bei verschiedenen Schnittfrequenzen, Polardiagramm

War zu Beginn die binaurale Aufnahmetechnik eher im Bereich der Studioteknik und im Telekommunikationsbereich angesiedelt, fand sie in den 1980er Jahren Einzug in der Fahrzeugmesstechnik. Neben der Nachbildung eines realen Kopfes mit Messmikrofonen im Ohrkanal gibt es auch vereinfachte Formen oder starke Verfremdungen. Die nachfolgende Bildergalerie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.



Bild 11a: Kunstkopfsysteme verschiedener Hersteller:
Kemar 45BB [10] / AKG „Harry“ [11] / Neumann KU 100 [12]

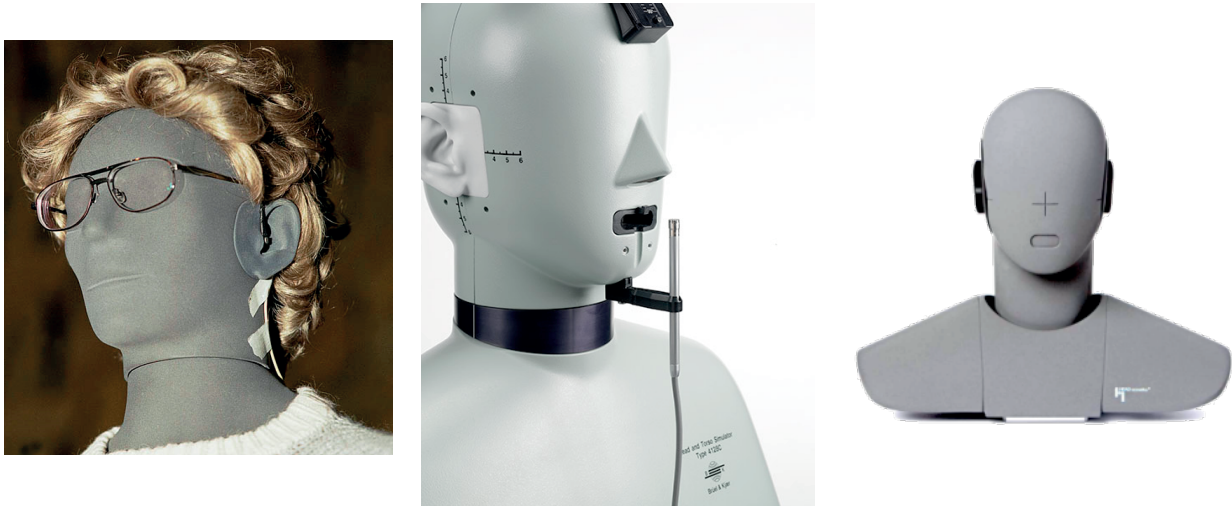


Bild 11b: *Kunstkopfsysteme verschiedener Hersteller:
Cortex MKII [13] / B&K 4128 D [14] / HEAD acoustics HSU III [15]*

Bei dem Weg des Schallsignals vom Sensor „Binaurales Messsystem“ zum Ohr des Empfängers ist darauf zu achten, dass das Signal richtig entzerrt wird. Damit ist sichergestellt, dass am Ohr des Hörers das gleiche Signal wiedergegeben wird, wie vom Sensor aufgenommen. Insbesondere der Einfluss des Außenohrs, der ja bei einem Kunstkopfsystem in der Aufzeichnung bereits das Signal beeinflusst hat, muss bei der Wiedergabe entzerrt werden, damit es nicht zu einer Verdopplung der Effekte beim Abhören kommt.

Schon früh diskutiert wurde die Möglichkeit, binaurale Messungen und ‚normale‘ Messungen (mit einem klassischen Messmikrofon mit Kugelcharakteristik) zu vergleichen. Diese Diskussion wurde Anfangs zwischen den Positionen „Diffusfeld“ und „Freifeld“ ausgetragen. Da diese Art von Feldern nur auf Prüfständen anzutreffen ist, hat sich im Ergebnis in der Praxis die ID-Entzerrung (ID = Independent of Direction) als ein „Kompromiss“ durchgesetzt.

Die ID-Entzerrung bei der Messung entzerrt nur die richtungsneutralen Anteile des Außenohrs. Das sind die Cavum Conchae-Resonanz und der Ohrkanal. Das binaurale System behält allerdings seine ausgeprägte Richtcharakteristik, wie in den Bildern 9 und 10 dargestellt ist.

Bei der Wiedergabe über Kopfhörer ist eine Rück-Entzerrung vorzunehmen, um wieder die Originalsituation anzunähern.

6. Schlussbemerkung

Messmikrofone gehören in der Motor- und Aggregateakustik zu einem unverzichtbaren Werkzeug. Die Palette der Sensoren für Luftschall ist breit und wurde in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben. Ob es nun um die Beseitigung lästiger Störgeräusche geht, oder darum, den Klangcharakter eines Fahrzeugs zu optimieren: erfolgreich ist die Arbeit des Akustikingenieurs dann, wenn er mit den ihm zur Verfügung stehenden Mitteln in der Lage ist, diesen Anforderungen gerecht zu werden.

Literatur

- [1] Brüel & Kjaer, CD-ROM "Transducers & Conditioning Selection Guide 2004", Kapitel "Education Material"
- [2] Virnich; Magdeburger Symposium 2005; Messwertaufnehmer und ihre Funktionsprinzipien
- [3] Apel; Mikrofone aus Gefell, Seite 20 ff
- [4] Sengpiel; <http://www.sengpielaudio.com/Schallintensitaet-BK.pdf>
- [5] Barsikow, Magdeburger Symposium 2003, Schallquellenlokalisierung
- [6] Wikipedia; <https://de.wikipedia.org/wiki/Beamforming>
- [7] Wikipedia; https://de.wikipedia.org/wiki/Binaurale_Tonaufnahme
- [8] Blauert, 1972; Räumliches Hören – Komplettausgabe; Hirzel-Verlag
- [9] Virnich, AUTOMOBIL professional; 2/91; Sonderdruck „Qualität für's Ohr“
- [10] Produktblatt 45 BB KEMAR Head and Torso, G.R.A.S. Sound & Vibration, Holte, Denmark
- [11] <http://www.vintagemicworld.com/afbeeldingen/AKG-D99-Harry.jpg>
- [12] Georg Neumann GmbH, Berlin, Produktinformation KU 100
- [13] <http://www.kar.fi/KARAudio/Products/20cb0303.jpg>
- [14] Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, Naerum, Denmark; Produktblatt HATS Type 4128-D
- [15] HEAD acoustics GmbH, Herzogenrath, Datenblatt HSU III.2