

# Die Funktion der menschlichen Ohrmuschel

Neueren Erkenntnissen nach ist die menschliche Ohrmuschel alles andere als ein einfacher Schalltrichter: Sie verdoppelt eintreffende Signale, ermöglicht dadurch die Ortung von Schallquellen und begründet unsere besondere Fähigkeit zur akustischen Sprachanalyse.

Von Johann Maximilian Burchard, Eckhard Irrgang und Burghard Andresen

**D**ie menschliche Ohrmuschel ist von porzellanartiger Schönheit und unverwechselbarer Gestalt: ein schwungvolles Relief aus Erhebungen und Vertiefungen, Rinnen, Wülsten, Vorsprüngen und Einbuchtungen, die bei jedem Individuum etwas anders ausfallen.

Die Bedeutung dieser Strukturen konnte erst kürzlich enträtselt werden. Sie spielen eine entscheidende Rolle beim Hören: Der Schall wird von der Ohrmuschel wie von einem flachen Trichter eingefangen, aufgeteilt und durch ein System von halboffenen Gängen, die ähnlich Flüstergalerien den Schall um Kurven führen können, auf zwei verschiedenen langen Wegen zum Gehörgang geleitet.

Über die weitere Strecke trifft er eine fünftausendstel Sekunde später ein als über die kürzere, was bei einer Schallgeschwindigkeit von 330 Metern pro Sekunde einem Umweg von rund sechseinhalb Zentimetern entspricht. Dieser schallverdoppelnde Effekt der Ohrmuschel läßt sich direkt registrieren; ein kurzer Klick aus einem Lautsprecher wird von einem winzigen Mikrofon im äußeren Gehörgang als Klick-Klick aufgefangen.

Die Schallverdoppelung dient — ähnlich wie der zeitversetzte Schalleintritt bei beidohrigem Hören — einer gehobenen akustischen Analyse, ohne die der Mensch nicht auskommt. Sein aufrechter Gang (wie schon das „räumliche“ Leben baumbewohnender Vorfahren) erfordert eine dreidimensionale Schallanalyse, also genaue Kenntnisse über Richtung, Ursprungsort und Bewegung von Schallquellen in allen Raumebenen. Seine sprachliche Kom-

munikation stellt noch höhere Ansprüche, müssen doch Ort und Bewegung eines sprechenden Menschen und vor allem die komplizierten Schallsequenzen der Sprache genauestens aufgenommen werden. Auch die akustische Gefahrenanalyse profitiert von der Schallverdoppelung, da sich das erste Analyseergebnis sofort durch das Eintreffen eines zweiten überprüfen läßt, was dann eine genauere Ortung und Wahrnehmung ermöglicht.

Der *Homo sapiens* hat also mit zwei Schallwegen auf jeder Seite quasi vier Ohren. Doch läßt sich weder die Schallverdoppelung noch ihre Vervielfachung subjektiv wahrnehmen. Wir hören nicht doppelt — genau wie wir normalerweise nicht doppelt sehen.

## Der Irrtum Darwins

Dies mag einer der Gründe dafür sein, daß dieses Phänomen so lange unentdeckt blieb. Ein schwerwiegender anderer Grund ist historischer Art. Im Jahre 1871 veröffentlichte Charles Darwin sein revolutionäres zweibändiges Werk „*The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex*“, das noch im selben Jahr in deutscher Fassung unter dem Titel „*Die Abstammung des Menschen und die geschlechtliche Zuchtwahl*“ erschien. Darin fällt er ein vernichtendes Urteil über das äußere Ohr des Menschen: Seine Vertiefungen und Erhebungen seien ohne Sinn.

Darwin stellte fest, daß auch Affen, besonders Menschenaffen, über sehr ähnliche, wenn nicht sogar identische Ohren wie der Mensch verfügen und bedauerte sie, weil auch sie ihre Ohren

wegen der zurückgebildeten Muskulatur kaum mehr als ein wenig bewegen können. Offenbar sah er das tütenförmige bewegliche Ohr der Kaninchen, Kühe und Pferde als idealen Prototyp eines Säugerohrs an. (Immerhin läßt sich mit solchen Peiltrichtern eine Schallquelle einfach orten, indem die Ohrmuscheln in Richtung des größten Schalldrucks gedreht werden.)

Nach genauem Vergleich menschlicher und äffischer Ohren beschrieb Darwin zudem am oberen äußeren Rand der Ohrmuschel, an der sogenannten Helixkrempe, ein gemeinsames Höckerchen, das um so auffälliger hervortritt, je weniger diese eingerollt ist (Bild 1). Der kleine Vorsprung erhielt seinen Namen und ging als Darwinsches Ohrhöckerchen in die Literatur ein. (Entdeckt hat es allerdings ein Bildhauer, der — wie Darwin schreibt — ihn erst darauf aufmerksam gemacht hat.)

Entwicklungsgeschichtlich sieht man in ihm heute die Spitze eines früheren, noch tütenförmigen Säugerohrs, das im Verlauf der Evolution in das flache, runde Ohr der Breitenasen- und Schmalnasenaffen (Neuwelt- und Altweltaffen einschließlich der Menschenaffen und des Menschen) umgewandelt worden ist. Obgleich auch für Darwin selbst feststand, daß das menschliche und das äffische Ohr Endprodukte einer langen Entwicklungsgeschichte sein müssen, glaubte er dennoch nicht an eine Höherentwicklung, sondern sah in ihnen eben Musterbeispiele der Degeneration.

Generationen von Forschern unterwarfen sich seinem Verdikt und glaub-

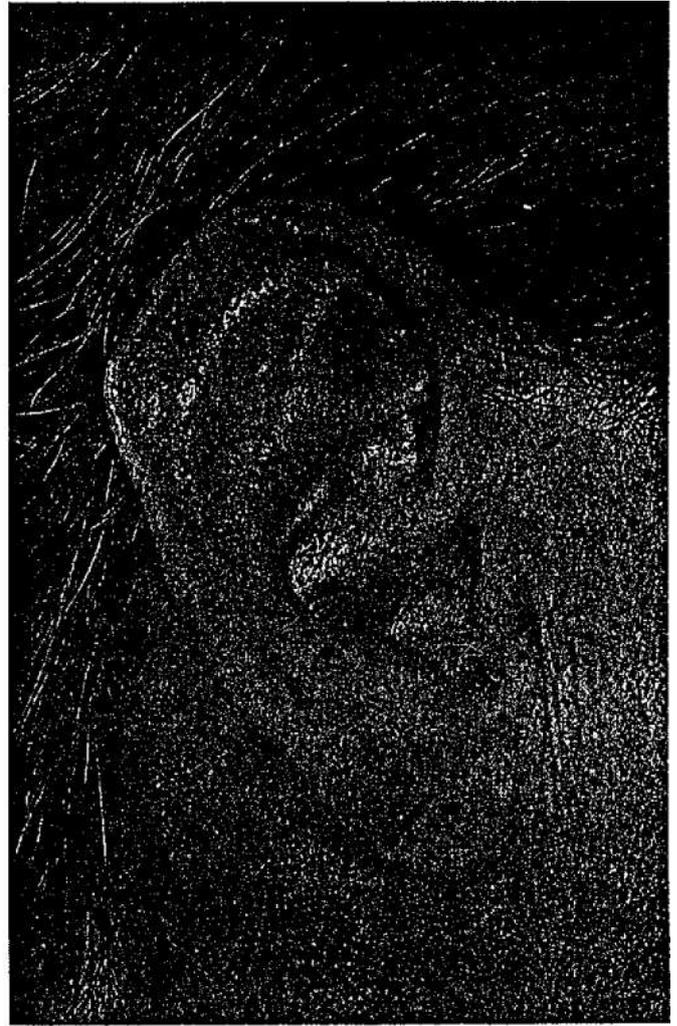


Bild 1: Das so unterschiedlich ausgeprägte Relief der menschlichen Ohrmuschel fungiert als schallverdoppelnde Struktur. Diese Schallverdopplung, die dem Menschen zu quasi vier Ohren verhilft, dient einer gehobenen akustischen Analyse. Die Vertiefungen und Erhebungen sind also weit mehr als nur degenerierte Überreste eines früheren, noch tütenfö-

migen Säugerohres, dessen Spitze beim Ohr des Menschen als sogenanntes Darwinsches Ohrhöckerchen erhalten geblieben ist: Es sitzt schräg oben an der hinteren äußeren Krempe der Ohrmuschel und tritt um so auffälliger hervor, je weniger der Rand dort eingerollt ist. An dem abgebildeten Männerohr (rechts) ist es daher besonders gut zu erkennen.

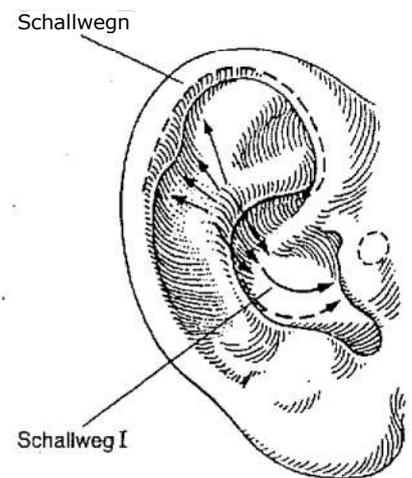
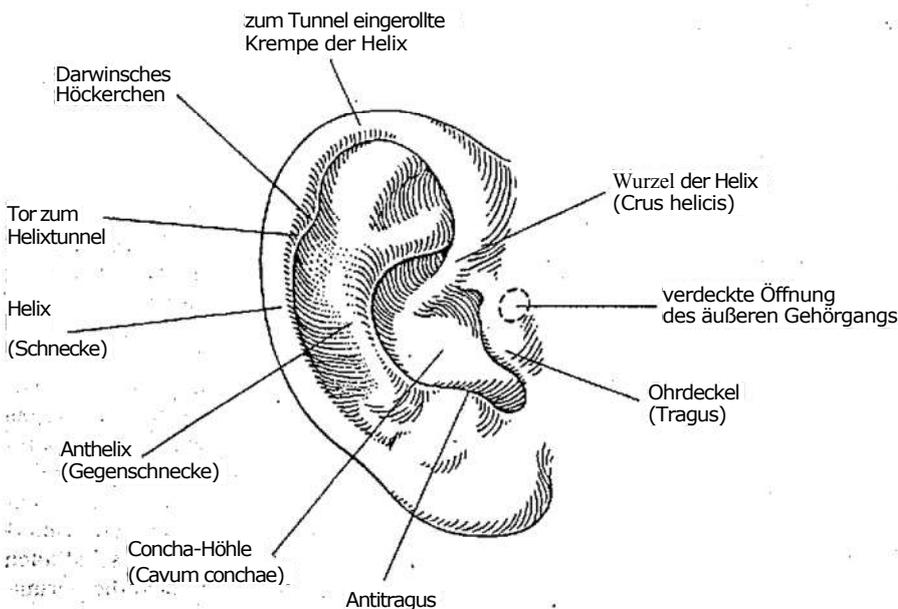


Bild 2: Aufgrund anatomischer Überlegungen wurden von den Autoren zwei Schallwege postuliert: Der eine sollte vom Rand der Anthelix direkt zum äußeren Gehörgang führen (blau), der andere dagegen entlang der ähnlich einer Flüstergalerie geformten Strukturen einen großen S-förmigen Bogen schlagen (rot). Der zweite Weg ist durchschnittlich 6,6

Zentimeter länger als der erste, so daß zwischen den beiden am Gehörgang eintreffenden Schallereignissen — entsprechend der Schallgeschwindigkeit von 330 Metern In der Sekunde — eine Zeitdifferenz von 0,2 Millisekunden liegen müßte. Die idealisierte Ohrmuschel basiert auf einer Zeichnung in Heinz Feneis „Anatomisches Bildwörterbuch“.

ten an eine rückgebildete, funktionell unbedeutende Rolle der menschlichen Ohrmuschel. Noch 1978 behauptete Anton Mayet in seinem Standardwerk „Anatomie des Menschen“: „Den verschiedenen Erhebungen und Vertiefungen der Ohrmuschel und des Ohrknorpels kommt keine größere praktische Bedeutung zu.“ Dies entspricht fast wörtlich der 115 Jahre alten Darwinsehen Degenerationsidee. Unter ihrem Eindruck schrieb Ernst Mach 1875: „Damit wurde mir nun klar, daß möglicherweise die ganze menschliche Ohrmuschel und namentlich die auf den ersten Blick so rätselhaften Windungen derselben funktionslos sein könnten. Die Windungen sind wahrscheinlich die zurückgebliebenen Stützen der ehemaligen größeren Tierohrmuschel und hatten aller Wahrscheinlichkeit nach auch im Tierohr keine akustische Funktion, sondern nur die rein mechanische Aufgabe, das Umknicken der Ohrmuschel zu verhindern.“

Im Verlauf der Jahrzehnte versuchten dennoch einzelne Wissenschaftler, Klarheit über das Faltenlabyrinth der Ohrmuschel zu gewinnen. Schon 1882 entdeckte .I. Kessel in Graz Wahrnehmungsunterschiede, wenn sich eine Stimmgabel am Ohr vorbeibewegte. Am besten hört man in Höhe der Gehörgangsschnecke; beim Verlassen des Ohrandes fällt die wahrgenommene Schallintensität plötzlich ab. Damit war die Fähigkeit zum einohrigen — monauralen — Richtungshören bereits andeutungsweise erfaßt.

Eine klare strukturelle Theorie der Ohrmuschelfunktion kam jedoch nicht zustande. Noch in den letzten Jahrzehnten gab es vergebliche Anläufe, die Funktion zu entschlüsseln. So nahm D. W. Batteau 1967 ein fünffach vergrößertes Ohrmodell zu Hilfe, um daran mit einem Mikrofon Schalldruckveränderungen zu messen. (Schall besteht aus Druckschwankungen, die ins äußere Ohr gelangen und das Trommelfell in Schwingung versetzen; ein Mikrofon setzt solche Druckschwankungen in elektrische Schwingungen um, die sich auf einem Oszillographen zeitgedehnt verfolgen lassen.) Batteau entdeckte zwar neben dem direkt eintreffenden Schall verschiedene verzögerte Schallimpulse; die Künstlichkeit des Modells verhinderte aber eine klarere Aussage.

Edgar A. G. Shaw benutzte 1974 dann ein normal großes, aber stark vereinfachtes Modell der zentralen Anteile der Ohrmuschel und schloß aus seinen Befunden auf eine Transformation des freien Schallfeldes durch das äußere Ohr, die je nach Richtung und Intensität des einfallenden Schalles variieren sollte. Auch einige andere Wissenschaftler

begnügten sich mit solch grob vereinfachten Ohrmodellen.

Erst 1983 maßen die Japaner Yukio Hiranaka und Hiro Yamasaki mit Hilfe eines etwa 0,15 Millisekunden langen nicht-rektangulären Klicks die Schalldruckschwankungen an natürlichen Ohren und setzten dazu ihren Versuchspersonen ein winziges Mikrofon in den Gehörgang ein. Die Schalldruckkurven rahmten sie allerdings mit Hüllkurven ein. Zwar hätten sie in ihrem Kurvenmaterial bereits die Schallverdoppelung erkennen und ausmessen können, bemerkten dies jedoch nicht und analysierten statt dessen die durch die Hüllkurven entstandenen Flächen mathematisch. Richtungsunterschiede ließen sich hierbei erkennen, mehr aber nicht.

In dem Glauben, daß eine so schöne, genetisch vorgeschriebene Struktur wie die Ohrmuschel nicht nutzlos sein könne, und aufgrund vieljähriger anatomischer Studien stellen wir die Hypothese auf, daß jede Ohrmuschel zwei unterschiedlich lange Schallwege enthält, über die ein sehr kurzer Schallimpuls dann am Gehörgang als Doppelimpuls ankommen müßte. Ein solcher Doppelimpuls sollte die Informationsauswertung verbessern, weil alles kurz-nach-einander zweimal zu hören ist (Check und Gegencheck).

#### Die Ohrmuschel — ein Schallverdoppler

Die beiden vermuteten Schallwege lassen sich am besten am Objekt beschreiben, doch ist es zweckmäßig, sich vorher mit einigen anatomischen Details der Ohrmuschel vertraut zu machen (Bild 2 links).

Die äußere Öffnung des Gehörgangs mündet durch den Ohrdeckel (Tragus) verdeckt in die Concha (lateinisch für Näpfchen, Muschelschale), eine napfartige Höhlung der Ohrmuschel, die von unten vom Antitragus etwas abgedeckt wird. Aus dem hinteren Rand der Concha entwickelt sich die Anthelix (Gegenschnecke), ein aufwärtsstrebender Wulst, der in eine flache Gabel ausläuft. Der Außenrand des Ohrs (die Helix oder Schnecke) ist vom Ohrfläppchen aufwärts zunächst ein flacher Wulst, der kurz unterhalb des bei den meisten Menschen wenigstens tastbaren Darwinsehen Höckerchens eine Krempe bildet, die einen hohlen Gang enthält. Dieser verläuft halbkreisförmig am äußeren Ohrrand nach vorn, strebt dann nach unten und kreuzt den auslaufenden Rand der Anthelix. Der tunnelartige Gang läuft nun von der Wurzel der Helix (*Crus helicis*) geschützt bis in die

Concha, wendet sich aber dann deren Rückwand zu, wo er in einen halboffenen Gang, der aus der Anthelixwange gebildet ist, überleitet. Dieser geht halbkreisförmig unter dem Antitragus und Tragus hindurch zur äußeren Öffnung des Gehörganges.

Wir nahmen nun an, daß der erste Schallweg vom Rand der Anthelix direkt durch die Concha-Höhlung zum äußeren Gehörgang führe (Bild rechts). Der zweite Schallweg sollte, hingegen im Bereich des Darwinsehen Höckerchens beginnen, dann in der hohlen Krempe der Helix im Bogen nach vorn und unten durch die Wurzel der Helix zum Hinterrand der Concha-Höhlung zurücklaufen. Von dort sollte er sich an deren Hinterwandung, also unter der Anthelix entlang, wieder halbkreisförmig nach vorne wenden, am Antitragus nach oben umgelenkt werden und schließlich unter dem Tragus in die Öffnung des Gehörgangs eintreten. Die Länge beider Wege maßen wir an unseren Versuchspersonen — Kollegen und Kolleginnen — mit Hilfe plastikummantelter weicher Drähte. Danach ist der erste Schallweg im Durchschnitt 4 Zentimeter lang, der zweite hingegen 10,6 Zentimeter. Die Wegdifferenz von 6,6 Zentimetern bedeutet, daß zwischen den beiden am Gehörgang eintreffenden Schallereignissen eine Zeitdifferenz von 0,2 Millisekunden, also einer fünf-tausendstel Sekunde, liegen müßte.

Für unsere akustischen Messungen verwendeten wir ein winziges Mikrofon mit einem Durchmesser von 5 Millimetern und einer Höhe von 4,35 Millimetern. Es steckte in einer 8 Millimeter dicken Plastikkapsel und wurde so tief in den äußeren Gehörgang eingebracht, daß es dessen Öffnung nicht überragte. Nur in dieser Position lassen sich Verzerrungen des natürlicher Schallbildes am Gehörgang vermeiden.

Als Schallquelle diente ein elektronisch erzeugtes Rechtecksignal von nur 0,14 Millisekunden Dauer, das akustisch als kurzes knisterndes Knacken über den Lautsprecher kam. Dies war der technisch schwierigste Teil, doch einem von uns (Irrgang) gelang es, den Rechteckklick mit Hilfe eines Kleincomputers auszubilden. Die vom Mikrofon aufgefangenen Signale gingen über Verstärker an einen Oszillographen, von dem wir den als Potentialschwankung dargestellten Schalldruckverlauf abphotographierten. Die Untersuchungen wurden in einem schalltoten Raum ausgeführt, um auch die geringsten Störimpulse fernzuhalten.

Zunächst testeten wir das aus zwei Teilen bestehende elektronische System eingehend. Ein am Stativ befestigtes Mikrofon nahm einen Schalldruckver-

lauf nach Absetzen des Klicks auf, wie er oben in Bild 3a zu sehen ist. Ein identischer Kurvenverlauf ergab sich, wenn das Mikrophon in einen Perückenkopf aus Styropor oder in die ohrartige Struktur eines Modepuppenkopfes eingebettet war (Bild 3b und c). Damit stand fest, daß die Meßqualitäten des Mikrophons konstant sind und durch eine unstrukturierte oder ohrartige Umgebung ohne spezifische anatomische Formen Igel nicht beeinflusst werden.

Mark B. Gardner und Robert S. Gardner hatten 1972 die einzelnen Vertiefungen der Ohrmuschel verschlossen, und zwar die Grube (Fossa) zwischen den beiden sich gabelnden Schenkeln der Anthelix, die Rinne (Scapha) zwischen äußerem Ohrtrand und Anthelix und schließlich die napfartige Concha-Höhlung. Mit zunehmender Verklebung verlor das Ohr graduell seine Lokalisationsfähigkeit. Wir wiederholten diesen Versuch, verklebten aber nur Grube und Rinne: Wurde nun das Mikrophon in den Gehörgang eingesetzt, ergab sich wiederum ein Potential wie beim Mikrophon am Stativ oder an den Puppenköpfen (Bild 3d).

Am unverklebten Ohr registrierte unser im Gehörgang sitzendes Mikrophon hingegen ausnahmslos zwei Wellen entsprechend den beiden von uns postulierten Schallwegen. Der zeitliche Abstand zwischen erster und zweiter Welle betrug tatsächlich im Mittel 0,2

Millisekunden, was einer durchschnittlichen Schallwegdifferenz von 6,5 Zentimetern mit einer Abweichung von 6 Millimetern nach oben oder unten entspricht (Bild 3e). Die kleineren Wellen auf den Reproduktionen der Kurven sind statistisch nicht signifikant und entstehen, weil die zweite Welle mit dem träge abklingenden Potential der ersten Welle interferiert. Damit konnte die Hypothese der Schallverdoppelung auf jedem Ohr als bewiesen gelten. In weiteren Versuchen war jedoch noch eine Reihe offener Fragen zu klären. Horizontale Schall-Lokalisation, auf einem Ohr

Die Schallquelle befindet sich bei dem eben beschriebenen Versuch seitwärts vom Kopf in der verlängerten Achse des Gehörganges. Die Frage war nun, ob sich der Schalldruckverlauf bei horizontalen Ortsveränderungen der Schallquelle so modifiziert, daß sich daraus auf eine Fähigkeit zum horizontalen Richtungshören schließen läßt. Wird der Lautsprecher von seiner seitlichen Position (90-Grad-Position) auf gleicher Höhe nach vorne oder nach hinten um den Kopf herumgeführt, so

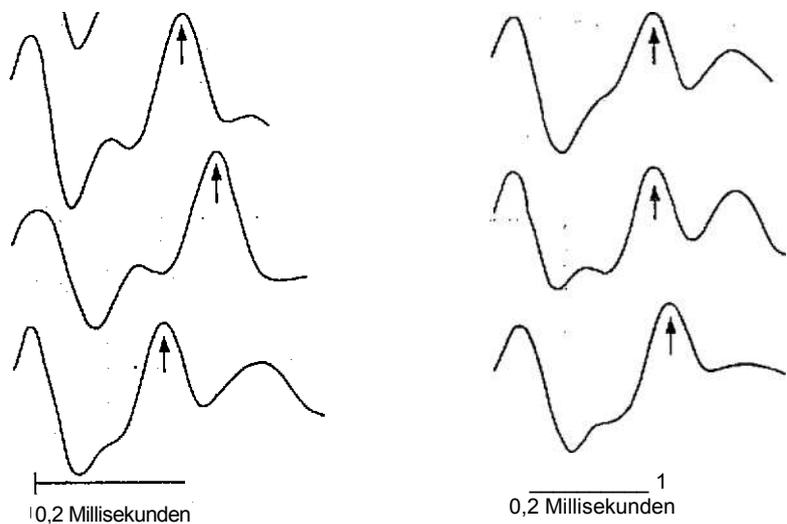
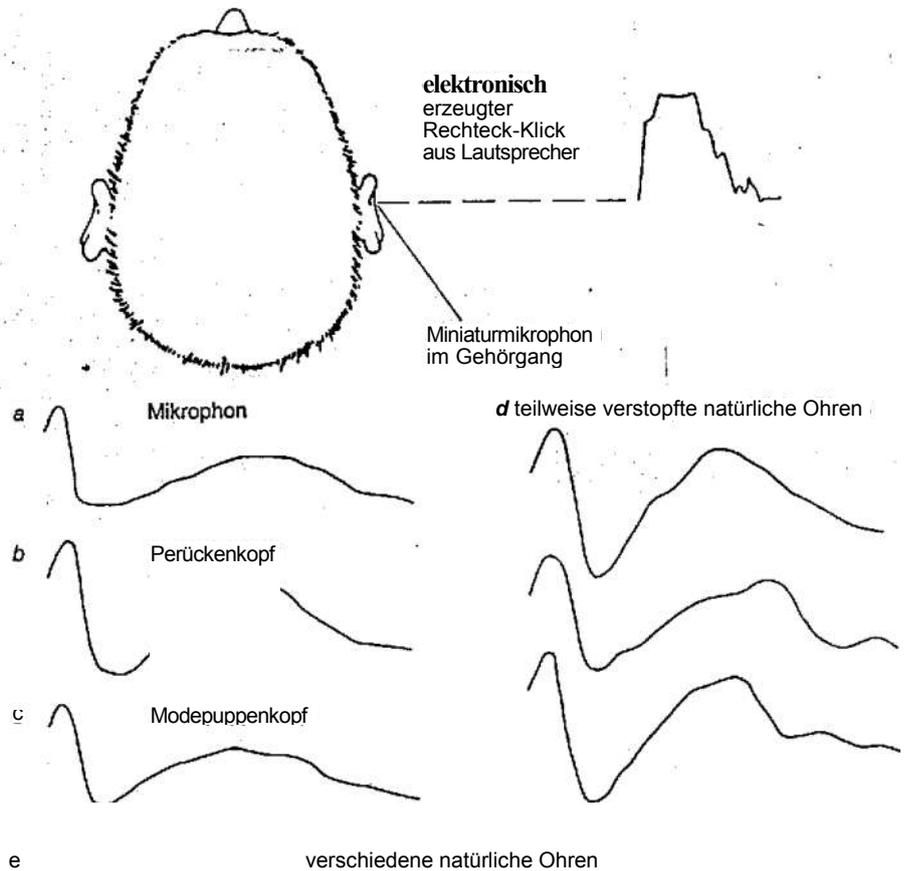


Bild 3: Daß die menschliche Ohrmuschel den Schall tatsächlich aufteilt und über zwei um rund 6,5 Zentimeter differierende Schallwege dem Gehörgang zuleitet, läßt sich mit einer geeigneten Versuchsapparatur erkennen. Als Schallsignal dient ein elektronisch erzeugter kurzer Rechteck-Klick von 0,14 Millisekunden Dauer, der aus einem seitlich aufgestellten Lautsprecher kommt. Ein Miniaturmikrophon, das den äußeren Gehörgang nicht überragt, setzt die einlaufenden Schalldruckschwankungen in elektrische Schwingungen um, die sich auf einem Oszillographen zeitgedehnt verfolgen lassen. Das Mikrophon allein nimmt die in a gezeigte Schalldruckkurve auf,

die sich praktisch nicht ändert, wenn es in das glatte Ohr eines Perücken- oder Modepuppenkopfes (b) eingebaut wird. Gleiches gilt für drei natürliche Ohren, die mit Knetmasse „geglättet“ wurden (d); doch lassen sich individuelle Unterschiede erkennen. Am unverklebten Ohr registriert das Mikrophon jedoch bei allen getesteten Personen nach der ersten Welle (dem angeschnittenen Anfangsgipfel) eine zweite (Pfeil), die im Mittel 0,2 Millisekunden nach der ersten erscheint. Die kleineren Gipfel rühren daher, daß die zweite Welle mit dem träge abklingenden Potential der ersten interferiert. Die individuellen Unterschiede der ausgewählten Kurven sind ausgeprägt.

verändert sich tatsächlich der in zwei Wellenberge gegliederte Kurvenverlauf deutlich. Bei der Bewegung nach hinten flachen die Gipfel ab und sind dann, wenn die Schallquelle die 180-Grad-Position am Hinterkopf erreicht hat, fast eingeebnet (Bild 4). Auch wenn die Schallquelle vor dem Gesicht liegt (Null-Grad-Position), 'verläuft die Kurve viel flacher'.

Dies ermöglicht eine horizontale Schall-Lokalisation mit einem Ohr: Je weiter sich die Schallquelle aus dem optimalen Sektor von schräg vorne bis

oder zum Hinterkopf wandert, desto undeutlicher wird das Schallmuster und desto leiser das Ganze. Die Schallwellen gehen nämlich um so mehr am akustischen Fangapparat der Ohrmuschel vorbei, je flacher ihr Einfallswinkel ist. Durch Vergleich mit der Situation bei seitlichem Einfall kann also im Gehirn der Winkel, in dem sich die Schallquelle befindet, gemessen werden.

Bei leiser ankommender Sprache sinkt auch das Sprachverständnis des Angeredeten. Dies gilt besonders für angespanntes Zuhören, bei Aufregung und bei bedrohlichem Inhalt der sprach-

lichen Mitteilung. Um besser hören zu können, drehen viele dann unbewußt ihren Kopf 30 bis 40 Grad nach vorn zum Redner hin, also so, daß der Schall innerhalb des optimalen Sektors empfangen wird. Besonders Gespannte und Verblüffte öffnen den Mund, was die Schallaufnahme weiter verbessert, da der Gehörgang dabei durch eine Bewegung des Unterkiefergelenkköpfchens nach vorne etwas erweitert wird. Auf die Bedeutung der oft zu beobachtenden Schrägstellung des Kopfes dabei werden wir später zurückkommen.

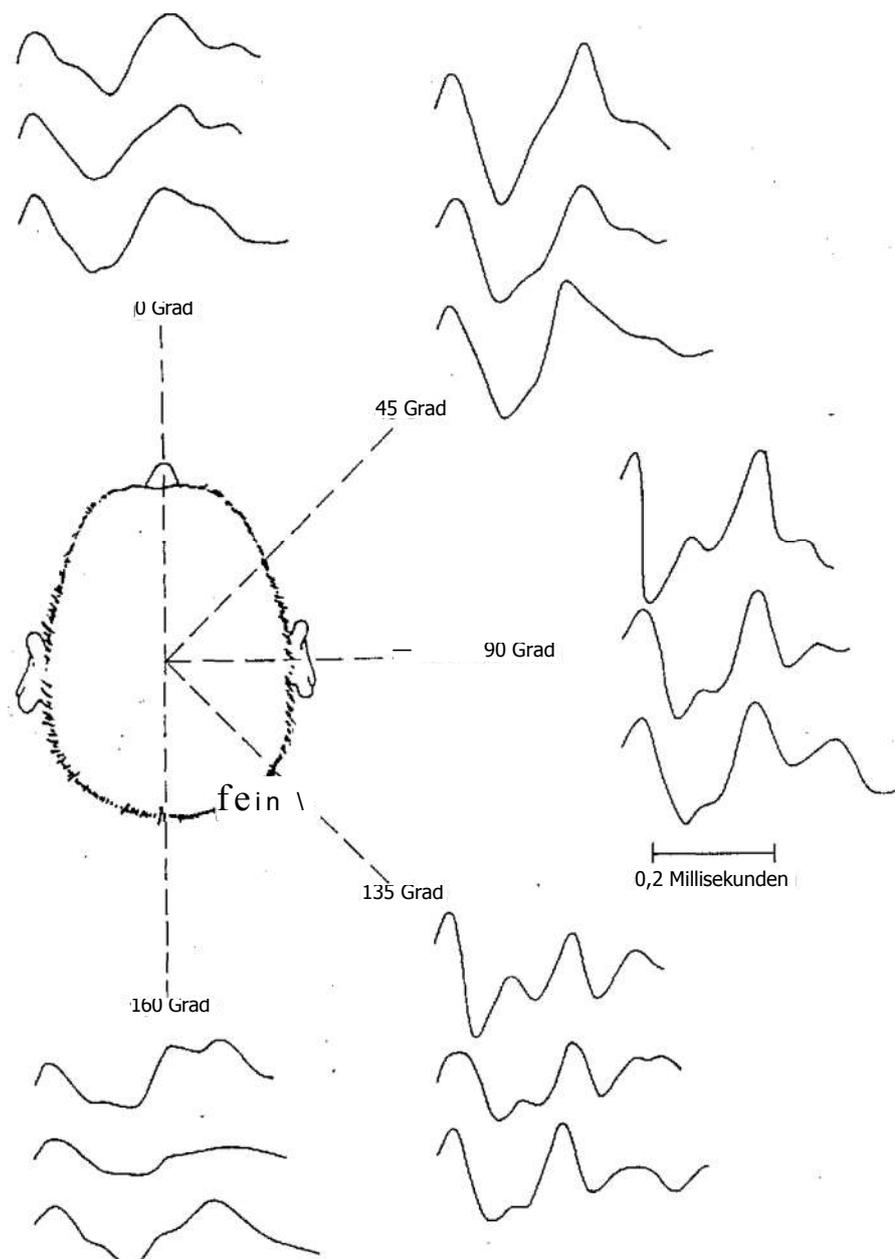
Eine einohrige horizontale Schallquellenlokalisierung ist in der Literatur bisher nicht beschrieben worden. Man glaubte, daß die horizontale Lokalisation ausschließlich über beide Ohren laufe, da diese — durch ihren Sitz zu beiden Seiten des Kopfes — eine breitere Meßbasis bilden, die größere Zeitdifferenzen ergibt. Ein Ohrabstand von 12 bis 15 Zentimetern bedingt bei seitlichem Schalleinfall eine Laufzeitdifferenz von maximal 0,5 Millisekunden, aber selbst bei weiter vor das Gesicht gerückten Schallquellen reicht die Zeitdifferenz noch aus. Nach Angaben von Hans Reiche' und Adolf Bleichert aus dem Jahre 1967 kann man noch eine Schallquelle lokalisieren, die nur um 3 Grad von der Mittellinie des Kopfes abweicht. Das entspricht einer Wegdifferenz des Schalls von nur einem Zentimeter und einem Zeitunterschied von gerade 0,03 Millisekunden. Bei seitlichem Einfall kommt zudem der Schallschatten des Kopfes ins Spiel: Auf dem abgewandten Ohr läuft der Schall wesentlich leiser und verzögert ein, und dies läßt sich gleichfalls zur Verrechnung des Einfallswinkels heranziehen.

### Vertikale Schall-Lokalisation auf einem Ohr

Wie steht es nun mit der vertikalen Schall-Lokalisation auf einem Ohr? Daß eine solche existiert, hat Robert A. Butler bereits 1969 nachgewiesen. Worauf sie aber basiert, hatte er nicht genau erklären können.

Wir nehmen an, daß die vertikale Lokalisation durch höhenversetzte Eintrittsöffnungen beider Schallwege ermöglicht wird. Wenn nämlich das Tor zum zweiten längeren Weg oberhalb des zum kürzeren Weg führenden Tors liegt, sollte nach Absenken der Schallquelle die zweite Welle noch später als zuvor erscheinen; bei einem Anheben über die Horizontale sollte hingegen eine geringere Verzögerung als zuvor zu beobachten sein.

Unsere akustischen Messungen bestätigten dies. Beim Absenken auf 45



schräg hinten entfernt und zur Nase

**Bild 4:** Die Richtung einer sich horizontal um den Kopf bewegenden Schallquelle läßt sich auch mit nur einem Ohr ausmachen: Je weiter sie sich aus dem optimalen Sektor von schräg vorn bis schräg hinten entfernt, desto stärker flachen die Wellenberge ab, wie diese Kurven

dreier Versuchspersonen zeigen. Die Schallwellen gehen nämlich um so mehr am akustischen Fangapparat der Ohrmuschel vorbei, je flacher sie einfallen — und das gilt aus ohne weiteres verständlichen Gründen natürlich ganz besonders, wenn sie von hinten kommen.

Grad unter die Horizontale verzögerte sich die zweite Welle durchschnittlich um einen Zeitbetrag, der einem 9,1 Millimeter längeren Schallweg als zuvor entspricht. Bei Anheben der Schallquelle um 30 Grad über die Horizontale — bei noch höheren Winkeln stört der abschirmende obere Rand der Ohrmuschel — nahm der Abstand der beiden Wellen ab, und zwar um einen Betrag, der einer Wegverkürzung um durchschnittlich 7,2 Millimeter entspricht (Bild 5). Die Einzelwerte allerdings weichen erheblich voneinander ab, was auf Größen- und Formunterschiede der Ohren unserer Versuchspersonen zurückzuführen ist.

Die einohrige vertikale Schall-Lokalisation beruht also auf der graduellen Variation des Abstandes zwischen erster und zweiter Welle. Gleichzeitig bestätigen die Ergebnisse, daß die Eintrittsöffnungen für den ersten und zweiten Schallweg höhenversetzt sind.

Die Höhendifferenz der Eintrittsöffnungen für den Schall läßt sich bei Absenken der Schallquelle, auf 45 Grad nach Pythagoras berechnen, da ein gleichschenkliges, rechtwinkliges Dreieck vorliegt. Die Höhendifferenz — die Basis dieses Dreiecks — errechnet sich als Wurzel aus dem doppelten Quadrat der Wegverlängerung (Bild 6a). Danach beträgt der vertikale Abstand zwischen beiden Eintrittszonen durchschnittlich 13 Millimeter. Eine solche vertikale Strecke von 13 Millimetern könnte es nur im Bereich der Anthelix geben, deren vorspringende Wulst wie ein Grat den eintreffenden Schall in zwei Portionen teilt...

Die übrigen Flächen des Ohres sind zum Teil deutlich als Prallflächen zu erkennen, die den Schall vom Eintritt in das Ohr abhalten. Dies gilt für das Ohrfläppchen, den dorthin führenden Helixwulst, den Tragus und den Antitragus sowie für die Außenfläche der Helix und zwar vom Bereich der beiden Schenkel der Anthelix bis hin zur Helixwurzel in der Ohrhöhle. Damit kann der Schall nur über die Anthelix geteilt und in die Helixkrempe oder in die Ohrmuschelhöhle geleitet werden: Eine Portion geht über den ersten Schallweg direkt zur äußeren Öffnung des Gehörgangs; die zweite wird nach oben in die Helixkrempe gelenkt und durchläuft dann die verzögernde S-förmige Strecke zum äußeren Gehörgang. Die Anthelix steht überdies bei fast allen Menschen nach außen vor und überträgt in Höhe des Tragus alle anderen Strukturen. Sie scheint mithin der eigentliche Schallfangapparat zu sein.

Die geometrisch ermittelte Höhendifferenz der Schalleintrittsöffnungen von 13 Millimetern muß nicht nur im Be-

reich der Anthelix, sondern zugleich an der kürzesten Verbindung zwischen dem hinteren Rand der und dem Beginn des Helixtunnels gesucht werden. Denn unseren Untersuchungen nach ist der etwas oberhalb des Ohrfläppchens beginnende Teil des Helixrandes noch nicht geeignet, den Schall zu leiten. Es besteht dort nur eine flache Rinne, die Scapha. Kurz vor dem Darwinschen Ohrhöckerchen ist jedoch die Helixkrempe tunnelartig ausgebildet und verläuft dann als Schalltunnel weiter, der einer Flüstergalerie mit seitlich herumgezogenen Rändern entspricht.

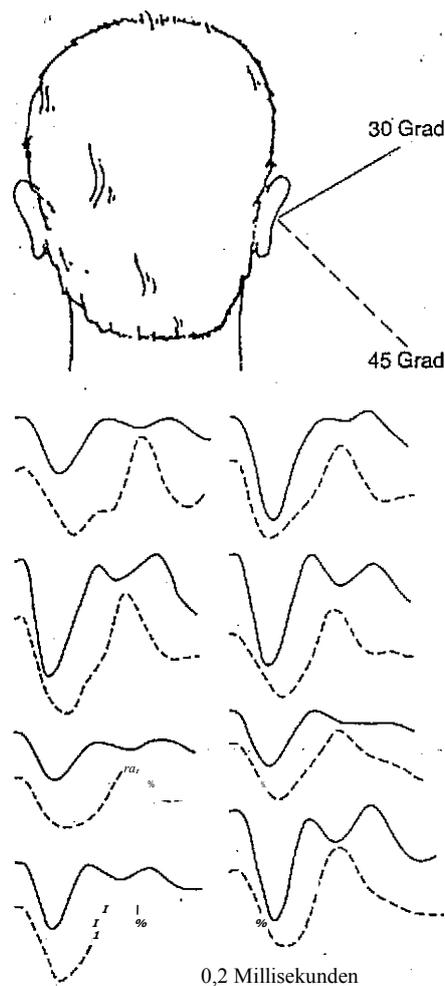


Bild 5: Der Beitrag der Ohrmuschel zur vertikalen Schall-Lokalisation: Beim Absenken einer höher liegenden Schallquelle unter die Horizontale wächst der Abstand der zweiten Welle zur hier wieder nur angeschnittenen ersten Welle, und zwar bei allen acht ausgewählten Versuchspersonen. Dies ist an der jeweils unteren Kurve im Vergleich zur oberen deutlich zu erkennen. Anhand dieser Abstandsveränderungen dürfte also das Gehirn die vertikale Lage sowie vertikale Verschiebungen von Schallquellen messen können. Die akustischen Messungen bestätigten zudem, daß die Eintrittszone für den längeren zweiten **Schallweg über** derjenigen für den kürzeren ersten liegt: Die zweite Welle erscheint bei abgesenkter Schallquelle später, bei angehobener Schallquelle dagegen früher als bei horizontalem **Einfall**.

Wir haben die Stelle vor der Tunnelöffnung anatomisch als Isthmus helicus, Helix-Enge, bezeichnet, um hervorzuheben, daß erst darüber der schallleitende Tunnel beginnt.

Eine vertikale Strecke von 13 Millimetern entspricht — wie eine weitere geometrische Berechnung nach Pythagoras ergibt — einem diagonalen Abstand der Schalleintrittsöffnungen von 18 Millimetern zwischen dem inneren Rand der Anthelix und der sich tunnelartig öffnenden Helixkrempe kurz unterhalb des Darwinschen Höckerchens (Bild 6b). Demnach beträgt der Abstand zwischen dem Öffnungsfeld für den ersten Schallweg und dem für den zweiten Schallweg etwa 18 Millimeter, wobei diese Strecke unter 45 Grad diagonal nach hinten über die Anthelix führt.

Diese Meßstrecken variieren zwar individuell erheblich, dennoch ist der experimentelle Befund beim Absenken und Anheben der Schallquelle eindeutig. Bei allen Versuchspersonen ergeben sich gleichsinnige Veränderungen: Hebt man die Schallquelle an, so verkürzt sich der zweite Schallweg; senkt man die Schallquelle, so wird er länger. Nur an drei von zwölf Versuchspersonen konnten wir die Schallwegsverkürzung bei 30 Grad Höhe nicht mehr messen, da die Helixkrempe bei Schalleinfall von oben zunehmend zur Prallfläche wird und nur noch geringen Schalldruck in den Tunnel einläßt. Über 30 Grad verschwindet dann die zweite Welle.

Dies ist ein weiterer Beitrag der Ohrmuschel zur vertikalen Schall-Lokalisation: Hochgelegene Schallquellen liefern eine gut ausgebildete erste Welle, die durch Schalleinfang in der Concha-Höhle auf jeden Fall noch entsteht, jedoch eine stark abgeschwächte zweite Welle. Bei etwas tieferen Positionen ist diese zweite Welle dann ausgeprägt, und ihr Abstand zur ersten wächst mit dem Absenken der Schallquelle.

Damit ist es als gesichert anzusehen, daß die vertikale Lage sowie vertikale Verschiebungen von Schallquellen exakt anhand einer Abstandsveränderung der beiden Klicks — im Alltagsbetrieb anhand der Schallereignisse — im Gehirn gemessen werden können.

### Der Mensch hat vier Ohren

Zu der schon lange erforschten 12 bis 15 Zentimeter breiten Meßbasis zwischen linkem und rechtem Ohr kommt nun durch unsere Ergebnisse eine auf jedem Ohr ausgebildete schräg-vertikale Meßbasis von rund 18 Millimetern

Länge hinzu. Bei angestrengtem oder panikartigem Hören drehen manche Menschen den Kopf leicht seitlich, so daß diese schräge Meßbasis eines Ohres dann vertikal steht. Auf der linken Seite geschieht dies durch Wenden des Kopfes in Richtung der rechten Schulter mit Absenken des Kinns, wobei die 18 Millimeter lange Strecke vertikal gerichtet wird. Diese Bewegung, wird sowohl von erstaunt-Ungläubig-verärgerten Zuhörern ausgeführt, wie von einseitig Schwerhörigen mit der gesunden Seite.

Oft wirkt die eben beschriebene Kopfwendung wie Mißtrauen: „Ich höre dich nicht genau oder will dich nicht genau hören; also glaube ich dir nicht oder will dir nicht glauben.“ Durch die vertikale Stellung der 18 Millimeter-Meßbasis wird der Abstand der Eintrittszonen zugunsten der vertikalen Lokalisation optimiert. Vielleicht sollen beim gestisch-expressivem Verhalten auch angelegentlich Rangunterschiede demonstriert werden: „Wie groß bist du eigentlich? Ich messe gerade aus, in welcher Höhe sich dein sprechender Mund befindet.“

Auf andere Weise erhalten einige Eulenarten ihre vertikalen Meßwerte. Der Rauhußkauz und die Schleiereule haben keine gegliederten Ohrmuscheln, doch sitzen beide Ohröffnungen unterschiedlich hoch am Schädel. Die Tiere benutzen diesen Höhenunterschied von durchschnittlich 6,5 Millimetern als vertikale Meßbasis, das heißt, zusätzlich zu den horizontalen Vergleichsdaten vom linken und vom rechten Ohr werten sie Höhenvergleichsdaten zwischen beiden Ohren aus. Eine raschelnde Maus können sie selbst im Dunkeln orten und fangen, und diese hervorragende akustische Peilfähigkeit bringt man mit dieser Höhendifferenz beider Ohröffnungen in Verbindung.

Beim Menschen ist die gesamte Meßbasis, die durch die S-förmige Krümmung des zweiten Schallwegs ja auf rund 66 Millimeter gedehnt wird, etwa zehnmal so lang. Statt auf Höhenunterschieden zwischen beiden Ohren basiert sie jedoch auf der Struktur der Ohrmuschel, ist also auf jeder Seite vorhanden.

Effektiv ist es so, als ob der Mensch vier Ohren hätte: zwei etwas höher und zwei etwas tiefer am Kopf. Damit ergeben sich für die Auswertung im Gehirn sechs Vergleichswerte: zwei zwischen dem oberen und dem unteren „Ohr“ jeder Seite, zwei zwischen dem oberen und dem unteren „Ohr“ gegenüberliegender Seiten sowie je eine zwischen den beiden unteren und den beiden oberen „Ohren“ (Bild 7 oben).

Im Hirnstamm — einer wichtigen Station der Hörbahn finden sich we-

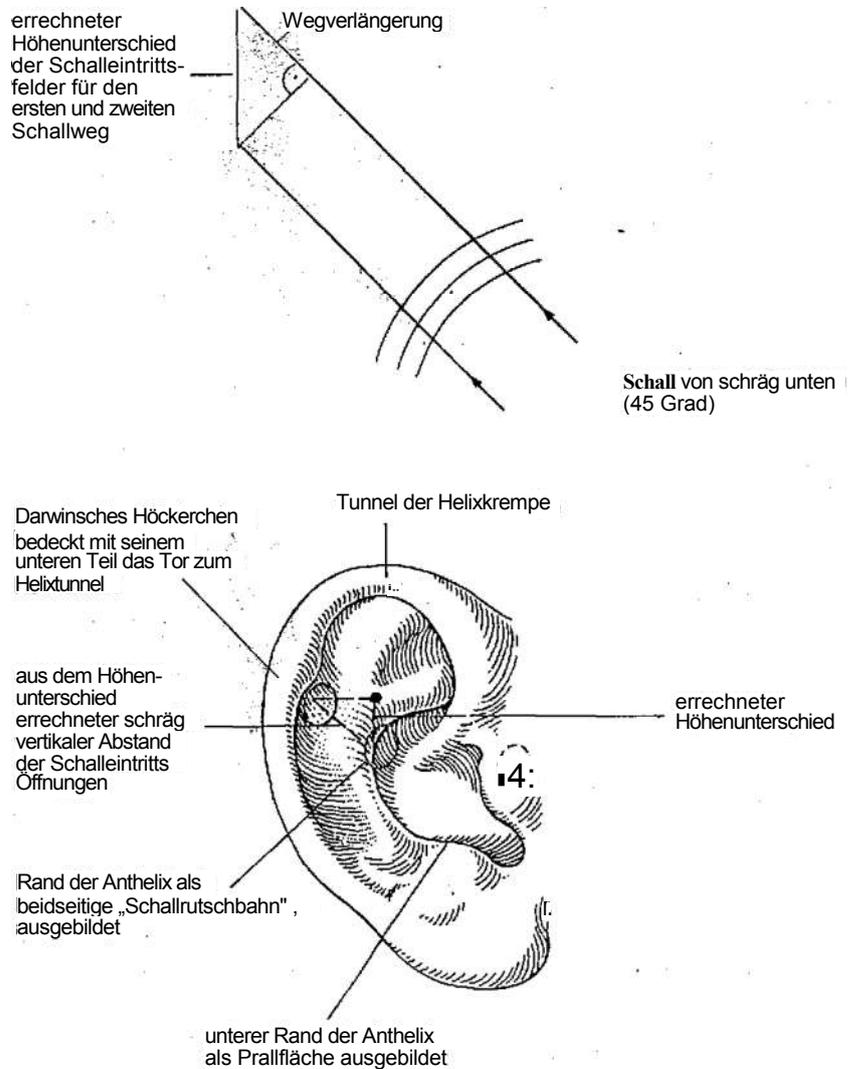


Bild 6: Die Lage der Schallaufnahmefelder für die beiden Schallwege läßt sich anhand anatomischer Überlegungen und der Wegeverlängerung bei schräg von unten einfallendem Schall bestimmen. Bei einer um 45 Grad abgesenkten Schallquelle trifft der Schall am oberen Eintrittsfeld mit einer Zeitverzögerung bin, die einer Wegverlängerung von durchschnittlich 9,1 Millimeter entspricht. Da hier ein - gleichschenkliges rechtwinkliges Dreieck vorliegt, beträgt die Höhendifferenz nach Pythagoras 13 Millimeter (a). Das „Tor“ zur tunnelartig ausgedehnten Helixkrempe, sitzt unterhalb des Darwinschen Höckerchens (b). Hier wird die eigentliche Eintrittsöffnung (rot) für den langen

nigstens sieben Kreuzungen (Bild 7 unten). Wir nehmen an, daß diese Hörbahnkreuzungen und die für eine zentrale sensorische Bahn ungewöhnlich hohe Zahl von Zwischenneuronen mit der Schallverdopplung und deal Auftreten von sechs Vergleichswerten zusammenhängen. Veränderungen der Kopfstellung oder der Position der Schallquelle oder von beidem liefern regelmäßige Abweichungen, die sich im Hirnstamm unterhalb der Bewußtseinschwelle blitzschnell gegenüber den diversen konstanten Abstandswerten der

S-förmigen Schallweg vermutet (Bild 2). Die Öffnung für den kürzeren Weg sollte dort sitzen, wo der Rand der Anthelix gleichsam als beidseitige Rutschbahn ausgebildet ist (blau). An der wulstförmigen Anthelix wird der Schall entweder in die Helixkrempe reflektiert und über den längeren zweiten Weg zum Gehörgang geleitet, oder er gelangt vorn Wulst aus auf kurzem Wege dorthin. Da die kürzeste Verbindung zwischen beiden Eintrittsöffnungen etwa 45 Grad geneigt ist, beträgt der Abstand zwischen der Eintrittsöffnung für den ersten Schallweg (blau) und der für den zweiten Schallweg (rot) etwa 18 Millimeter — so eine weitere Berechnung nach Pythagoras.

flach am menschlichen Kopf anliegenden, wenig beweglichen Ohrmuscheln verrechnen und zu einem räumlich gegliederten Schallbild der Umgebung rekonstruieren lassen.

### Ohrmuschel- und Sprachentwicklung

Durch unsere Untersuchung ist bewiesen, daß der Schall auch von der Krempe der Helix eingefangen wird. Diese ist eine spezifische anatomische

Entwicklungsleistung des Primatenstammes

Beim Menschen ist die für die akustische Wahrnehmungsleistung so wichtige Struktur noch ästhetisch übersteigert. Denn die Helixkrempe setzt sich über den von uns als Isthmus helicis bezeichneten Anfang des schaltleitenden Tunnels hinaus nach unten fort, allerdings nur als flache Rinne ohne „Überdachung“. Aber auch dann, wenn die Krempe bei einer mangelhaft ausgebildeten menschlichen Ohrmuschel zipfelförmig zu einem ausgeprägten Darwinschen Höckerchen ausgezogen ist, bleibt ihr horizontaler oberster Teil eingerollt und damit als schaltleitender Tunnel erhalten (Bild 1).

Die Ohren der Menschenaffen sehen denen der Menschen erstaunlich ähnlich, doch gilt dies auch für die übrigen Schmalnasenaffen sowie die Breitnasenaffen. Das Grundschema der Primaten-Ohrmuschel ist bei den einzelnen Arten insofern erheblich abgewandelt, als schon manche Schmalnasen eine vertikale Einrollung der Helix wie beim Menschen zeigen, während andere Arten nur den oberen, horizontalen Teil der Helix eingerollt haben und dadurch natürlich ein ausgeprägtes Darwinsches Ohrhöckerchen aufweisen. Selbst die Spitzhörchen, die teilweise zu den Halbaffen gezählt werden, besitzen schon eine Ohrmuschel ganz ähnlich der von Affen und Menschen. Nur einige andere Halbaffen haben ein „altmodisches“ tütenförmig gestrecktes Ohr oder eins, das dem von Hunden ähnelt.

Eine primatenspezifische Form des Ohrs gehört demnach zu den besonderen Entwicklungsleistungen unseres Stammes. Da das Primatenohr — im Hinblick auf die Spitzhörchen — stammesgeschichtlich schon sehr alt sein dürfte, muß auch die verfeinerte Form des menschlichen Ohrs, die mit der menschlichen Sprachentwicklung zusammenhängt, eine sehr lange Evolution hinter sich haben.

Schon bei den zu den Breitnasen zählenden Totenkopffaffen hat Detlev Ploog einen bedeutsamen Zusammenhang zwischen deren komplizierter Vokalisation und speziellen verarbeitenden Hirnzentren festgestellt. Die menschliche Sprache ist freilich weit komplizierter, gleiches gilt für ihre akustische Erfassung und zentrale Verarbeitung. Denn zusätzlich zur Sprachanalyse sind wie bei den Affen Ort und Bewegung der Schallquelle zu rekonstruieren. Oft bewegt sich ein Mensch vor seinem Ansprechpartner hin und her und muß schon dadurch immer wieder neu lokalisiert werden. Nur bei exakter Lokalisation kann er aber richtig gehört und verstanden werden, wie Beobachtungen

an Hörbehinderten zeigen. Dank der differenzierten Doppelleistungen auf jedem Ohr — zusammen mit dem beiderseitigen Vergleich — läßt sich normalerweise eine solche Schallquelle auch ohne Blickkontakt ohne weiteres ausmachen.

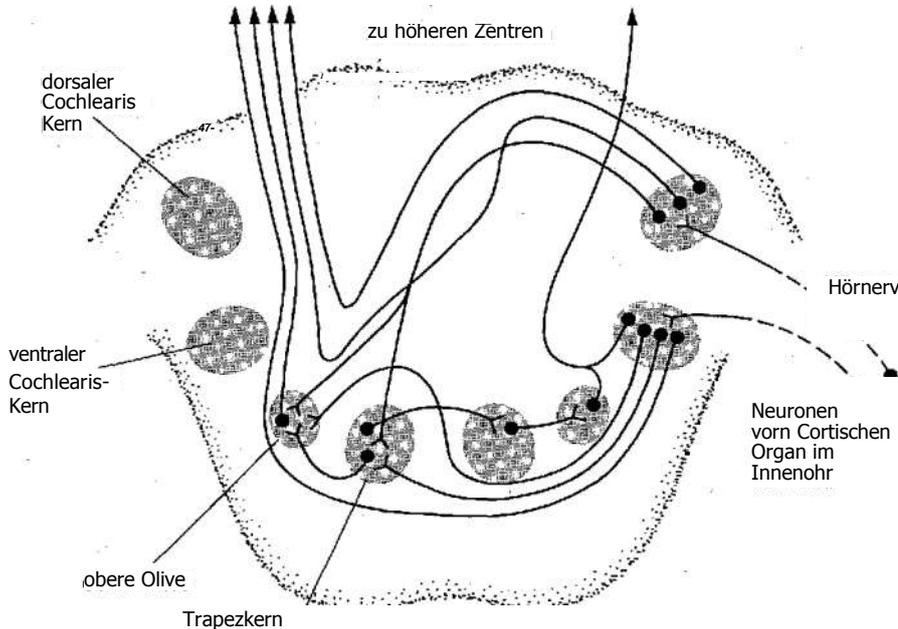
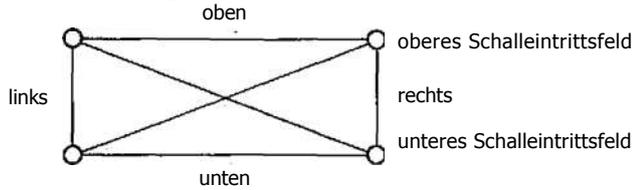
Ein ähnliches Prinzip von Doppelinformationen ist auch beim menschlichen Auge verwirklicht. Aufgrund der primatenspezifischen Frontalstellung kann ein großer Bereich des Gesichtsfeldes 'von beiden Augen gleichzeitig überblickt werden. Da jedes einen etwas anderen Blickwinkel hat, sind die Bilder auf der Netzhaut geringfügig gegeneinander verschoben. Sie werden im Gehirn quasi übereinanderprojiziert und zu einem räumlichen Tiefeneindruck verrechnet.

Doppelinformationen treten aber auch bei einem Auge auf — bedingt durch die Anordnung und Verschaltung der Sehzellen in der Netzhaut. Sie enthält zwei verschiedene Photorezeptoren: die farbentüchtigen Zapfen, die sich im Zentrum an der Stelle schärfsten Sehens konzentrieren, sowie die für das Hell-Dunkel-Sehen zuständigen Stäbchen, die hauptsächlich die Peripherie besetzen. Das Zentrum nimmt nun gleichzeitig mit dem umgebenden übrigen Netzhautfeld die Objekte auf. Dabei liegt ein Figur-Hintergrund-Verhältnis im Sinne der Gestaltpsychologie vor, die ja am Beispiel des optischen Wahrnehmens entwickelt worden ist. Veränderungen der Figur bedingen solche des Hintergrundes und umgekehrt: Das scharf anvisierte Objekt hebt sich von seinem Hintergrund ab, dieser kann aber wieder selbst scharf anvisiert werden, wodurch er selbst zum Objekt, dieses aber zum „Hintergrund“ wird. Wie das Ohr liefert dann jedes Auge eine Doppelinformation, was wiederum die optische Meßtechnik verbessert.

Der Preis aber für den scharfen Blick nach vorn ist, daß Primaten — wegen ihrer eingeschränkten Rundumsicht — Angriffe von hinten nicht so leicht erkennen können. Ein Ausgleich dafür bietet die gute Geräuschlokalisation, ein anderer die soziale Kommunikation. Spezielle Warnrufe und Signale von Affen — etwa für Luft- oder Bodenfeinde — signalisieren den Gruppenmitgliedern, woher Gefahr droht und wie sie sich zu verhalten haben.

Mithin hätten die Primaten und damit die Menschen nicht nur die besten Augen für das räumliche Sehen, sondern auch — durch die beiderseitige Doppelläufigkeit — besonders kommunikationsgeeignete Ohren entwickelt. Die Entwicklung der menschlichen Sprache, aber auch die der sozialen Kommunikation, des Zusammenlebens in

Verrechnungsmöglichkeiten zwischen den beiden Schalleintrittsöffnungen beider Ohren



**Bild 7:** Infolge des beidseits doppelten Schallwegs hat der Mensch quasi vier Ohren, deren Öffnungen um 13 Millimeter höhenversetzt sind. Damit ergeben sich die sechs als Verbindungslinien dargestellten Verrechnungsmöglichkeiten im Gehirn (oben). Das Auftreten von sechs Vergleichswerten könnte erklären, warum im Hirnstamm, einer wichtigen Station der Hörbahn, so viele Neuronen zur Gegenseite kreuzen (unten). Veränderten der Kopf-

Stellung wie der Position der Schallquelle liefern regelmäßige Abweichungen, die sich hier unterhalb der Bewußtseinschwelle blitzschnell gegenüber den konstanten Abstandswerten der Ohrmuscheln verrechnen und zu einem räumlich gegliederten Schallbild der Umgebung rekonstruieren lassen. Der schematische Querschnitt des Hirnstamms zeigt nur Neuronen einer Seite (nach Anton Mayet „Anatomie des Menschen“).

Gruppen mit sprachlicher Verständigung überhaupt werden durch diese neuen Erkenntnisse besser verständlich, physiologisch untermauert und stammesgeschichtlich erklärt.

### Ein neues Verständnis von Hörschädigungen

Da die akustischen Daten im Hirnstamm kurz nacheinander doppelt einlaufen, läßt sich das jeweils vorherige Rechenergebnis gleich danach durch Auswertung eines zweiten Signals überprüfen. Auf der Basis dieser Doppelinformation wäre ein Rückkoppelungsmodell des Hörens vorstellbar.

Doch wissen wir nicht, ob dieses Modell auch für höhere Hörzentren, vor allem jene der Hirnrinde gilt. Akustisch hervorgerufene — evozierte — potentiale bewirken nämlich einen Erregungsvorgang in den höheren Zentren,

der noch anhält, wenn das zweite Signal schon einläuft. Daher lassen sich dort Ereignisse im Abstand von einer fünftausendstel Sekunde — dem Abstand der verdoppelten Schallimpulse — nicht mehr trennen. Allerdings versteht man die akustische Informationsverarbeitung im Gehirn bisher nicht sonderlich gut.

Immerhin bietet die Frequenz der Schall-Lokalisation von 5000 Hertz im Hirnstamm möglicherweise eine Erklärung für das sogenannte Cocktailparty-Phänomen: Hochtenschwerhörige Personen können menschliche Stimmen nicht mehr lokalisieren, aber auch nicht mehr verstehen, wenn mehrere Personen gleichzeitig sprechen. Diese zentrale Verwirrtheit geht auf den Verlust der Trennschärfe im Bereich um 5000 Hertz zurück, wobei der Hochtenschwerhörige möglicherweise die erste und die zweite Welle nicht mehr einzeln wahrnehmen kann. Die Hochtön-

Schwerhörigkeit beginnt oft schon bei 1000 bis 2000 Hertz und ist bei 5000 Hertz bereits so stark, daß ein 70- bis 80prozentiger Hörverlust und damit ein vollständiger Leistungsverfall resultiert. (Der Hörbereich junger Menschen liegt zwischen etwa 15 und 20000 Hertz, doch sinkt die Obergrenze im Alter auf 12000 bis 5000 Hertz ab.)

Bei lärmgeschädigten Personen fällt die Hörleistung anfangs vorübergehend nur im Bereich der Hochtonregion von 4000 bis 6000 Hertz aus. Bisher wurde angenommen, daß diese punktuelle Schädigung des eigentlichen Hörorgans — des Cortischen Organs in der Schnecke des Innenohrs — auf hydrodynamische Effekte in der wäßrigen Flüssigkeit zurückgeht, mit der die Gänge der Schnecke gefüllt sind. Wir vermuten, daß sie auch von einer Verdoppelung der schalltraumatischen Einflüsse im betroffenen Bereich herrühren können, die durch die Struktur der Ohrmuscheln bedingt ist. Während im gesamten übrigen Bereich des Cortischen Organs die akustische Überenergie des Lärms nur einmal eintritt, verdoppelt sie sich im Bereich von C 5. (C 5 ist das fünfgestrichene c und bezeichnet die erwähnte Hochtonregion, ohne damit schon einen bestimmten Meßwert darstellen zu wollen; 4000 Hertz entspricht genau dem viergestrichenen h.)

Dieser Schluß wird auch durch eine alte Erfahrung nahegelegt, daß der Tonschwellenverlust stets viel höher liegt, als die Frequenz des Lärms im Bereich seiner hauptsächlichlichen Energie. Die Folgen vorübergehender akustischer Schädigungen, die Sekunden bis Minuten und länger andauern können, werden auch als C 5-Senke oder vorübergehender Hochtönverlust (*Transient Tone Shift*, abgekürzt TTS) bei 4000 bis 6000 Hertz bezeichnet. Der traumatische Hörschaden, ob vorübergehend oder dauernd, ist um so umfangreicher, je größer die Lautheit in Dezibel und um so länger die Dauer des Schallereignisses sind.

Für junge Menschen, die sich ahnungslos in Diskotheken oder zuhause einer Überbeschallung aussetzen, müßten diese Befunde eine besondere Warnung sein. Sie werden später zu den jüngsten Schwerhörigen gehören, weil schon mit 40 Jahren die Hörfähigkeit auch altersgemäß nachläßt. Die beginnende Altersschwerhörigkeit überlagert sich dann mit dem alten Schalltrauma des Innenohres. Ein Heer von Hörbehinderten kommt in einer hochtechnisierten Welt auf uns zu, das vielleicht auch technische Hilfe finden wird. Bislang ist jedoch das Problem der Schallslokalisierungshilfe mittels Hörgeräten noch ungenügend gelöst.