

Der gegenwärtige Stand der Forschung auf dem Gebiet der Erkennung von Objekten durch den Gehörsinn

von

Ivo KOHLER

(Vorstand des Instituts für Psychologie der Universität Innsbruck)

Synopsis: Sonic orientation consists in the ability to detect surfaces which by themselves are completely silent. Since the capacity of hearing was proofed as being relevant the information required has to be taken (or „decoded“) from sound echoes and sound transformations generated by reflection and interference from those surfaces.

It is suggested to differentiate between active and passive sonar the first based upon sound impulses emitted from the subject himself the latter based on the use of ambient noise. The first case happens as the usual one in both nature and technique (see the radar principle).

Problems connected with the described physical situation are discussed in the case of bats, sea lions and dolphins. The main methods of investigation are referred to as well as some most recent results and — the yet remaining ignorances. Following the animal sonar some results on human sonar are presented. The paper concludes demonstrating a new and promising possibility of using passive sonar although combined with some critical comments.

In summary it is intended to give an introduction into most recent problems and solutions in the field of biosonics rather than a complete collection of its results.

Fragestellung

Es handelt sich hier ganz allgemein gesagt: um die Frage der Benützung von Schallwellen als Informationsübermittler über Gegebenheiten in der Umwelt. Dabei interessiert besonders das Entdecken, Unterscheiden und sich Zurechtfinden gegenüber solchen Objekten, die nicht selbst Schall aussenden. Diese Objekte, z. B. die Wände, der Boden, die Decke, aber auch kleinere und sogar kleinste Gegenstände machen sich dadurch bemerkbar, daß sie den schon vorhandenen Schall verändern. Insoferne sie dies je nach ihrer Oberfläche, Größe, Entfernung, Bewegung usw. in gesetzmäßiger Weise tun, drücken sie dem Schall bis zu gewissem Grade ihre eigene Charakteristik auf; sie „kodieren“ ihn. Damit wird Schall zu einer ganz brauchbaren „natürlichen Sprache“ in der auch solche Objekte sich verraten, die selbst völlig schweigsam sind. Das Problem ist zweifellos zuerst einmal dasjenige der Kodierung

(also der Art der Schalltransformationen durch reflektierende Flächen) und hier besonders der hinlänglichen Eindeutigkeit in der Zuordnung zu den entsprechenden Objekten und dann weiters die Frage der Rückinterpretation durch das aufnehmende Subjekt. Die letztere Leistung hängt sicherlich von der Güte des Gehörs ab (es gibt da sehr verschiedene Arten von „Güte“) und selbstverständlich auch vom Auflösungsgrad für Erregungsmuster durch die nachgeschalteten Gehirnzentren. Gegenstände „verschlüsseln“ sich ja schall-echo-mäßig in sehr komplexer Weise und sind daraus wieder zu „entschlüsseln“.

Aktive und passive Schallortung.

Damit ist der Kreis der Problematik in großen Zügen abgesteckt. Wer in diesem Zusammenhang an das Radarprinzip denkt, hat recht, aber auch unrecht. Richtig daran ist, daß es sich in den meisten bisher bekannten Fällen der Lokalisierung von Objekten durch Echos um aktives Schallverhalten der Subjekte handelt. Das heißt, die Individuen senden selbst Schallimpulse aus und orientieren sich an Hand der zurückkommenden Echos. Insofern ist das Grundprinzip, das hier zu beobachten ist, ähnlich dem Radar. Es ist eine Art aktiver Schallortung, wie Radar.

Doch möchte ich zwei kleine Bemerkungen schon hier einfügen: 1. Es gibt auch ein passives Schallverhalten: etwa wenn jemand aus den Abweichungen einer nicht selbst von ihm erzeugten, aber ihm bekannten Schallquelle, auf eine bestimmte räumliche Konfiguration der Umgebung schließt. Ein einfaches Beispiel dieser Art ist der Nachhall von Stimmen in großen Räumen. Ich möchte dies passive Schallortung nennen. Auch hier ist die Frage: wie weit ist es möglich, aus einem gegebenen Schallmischmasch bekannter Geräusche, in dem wir ja dauernd leben, gewisse Invarianten herauszuziehen, die uns über die Konstellation der schweigsamen Objekte um uns herum Auskunft geben, — wohlgermerkt nicht über die Schallquellen selbst; das wäre zu einfach, obwohl es auch an sich schon kompliziert genug ist. Also wenn jemand z. B. aus der Art wie er den Straßenlärm in einem dunklen unbekanntem Zimmer hört, feststellen würde, daß der Raum mittelmäßig groß ist, daß er sechs Ecken hat, daß er möbliert ist, daß ein Bett links an der Wand steht, daß der Papierkorb nicht völlig geleert ist, daß der Luster aus Messingblech besteht und schwankt und daß die Statuette auf der Kommode weiblich ist ... Trotzdem: — theoretisch — gilt, daß Art und Anordnung von Flächen, auf den Schall trifft, diesen Schall durch Absorption, Resonanz und Reflexion in ganz bestimmter Weise ändern. Leider gilt ebenfalls, daß unser natürliches Schallauflösungsvermögen hier bald an die Grenze seiner Leistungsfähigkeit kommt. Man bedenke die Schwierigkeiten einer solchen Aufgabe: zunächst sind schon die Schallquellen selbst äußerst komplex und dazu variabel. Immerhin beherrschen wir hier das Herausfinden von Besonderheiten ganz gut. Wir erkennen z. B. die Stimmen einiger Dutzend Leute auf den ersten Anheb auch wenn sie sich dabei bewegen und so auch viele andere Schallquellen. Nun aber wird diesem variablen Schallgeschehen der „ersten Ordnung“, wenn man so sagen will, ein ebensolches Geschehen „zweiter Ordnung“ daraufgesetzt (superponiert, überlagert), nämlich die Änderungen durch interferierende Echos, je nach Einrichtung des Raumes und unseren eigenen Bewegungen darin. Es bedeutet schon viel, daß wenigstens eines aus dieser zweiten Ordnung, — meist sind es die universellsten Änderungen, wie Nachhall etc. — herausgehört werden kann. Es mag trösten, daß auch die Natur den Weg passiver Echolotung vermeidet und aktive Schallortung bevorzugt. Die hervorragendsten Künstler in dieser Richtung erzeugen jedenfalls ihren „eigenen Lärm“ selbst, wenn sie sich in der Umgebung orientieren wollen. Der bedeutende Vorteil dabei ist, daß damit wenigstens die eine Seite, nämlich der ausgesandte Schall völlig bekannt ist — und er nun in einer optimalen Weise manipuliert werden kann, um die Analyse der Echos und auch der Interferenzen auf die Spitze zu treiben.

Zur Frage der Interferenzen (Überlappungen) zwischen Impuls und Echo.

Dies führt zu einer zweiten Bemerkung: das aktive Schallverhalten bei der animalischen Orientierung (den Menschen, besonders den blinden Menschen miteingeschlossen) bevorzugt in einem solchen Ausmaß Überlappungen zwischen ausgesandtem Impuls und Echo, daß man nicht mehr gut von Radar sprechen kann. Es hat sich dafür der Ausdruck Sonar eingebürgert. Sonar geht also weiter als Radar. Es benützt neben der üblichen Impulstechnik in weitestem Maße die Analyse von Interferenzen. Sei es, indem das ausgesandte Signal so lange andauert, daß es sich schon von vornherein mit den Echos überlappt, oder so rasch aufeinanderfolgt, daß bei nahen Objekten Überlappungen auftreten müssen. Das letztere wird oft bevorzugt. Fledermäuse wie auch andere schallortende Tiere beschleunigen in der Nähe von Hindernissen oder Beute ihre Impulsfolgen bis knapp bevor oder bis zur Überlappung mit dem Echo.

Man könnte über den Vorteil von Sonar gegenüber Radar von einem informationstheoretischen Standpunkt aus — etwa so argumentieren: Radar macht von dem „Angebot“ von Information, das in jedem einzelnen zurückkommenden Echo steckt, oder möglicherweise stecken könnte, nur wenig Gebrauch. Aus dem Zeitintervall zwischen Impuls und Echo wird die Entfernung entnommen, aus der Änderung der Frequenz die relative Geschwindigkeit zwischen Beobachter und Objekt (Dopplereffekt), aus der Intensität kann auf mehr oder weniger schallabsorbierende Zwischenmedien geschlossen werden. Bedenkt man aber, daß jedes einzelne zurückkommende Signal eine Art „Landkarte“ des angepeilten Objekts und seiner Umgebung ist, besonders dann, wenn der ausgehende Impuls möglichst komplex zusammengesetzt war, dann verschwendet man mit der üblichen Radartechnik einen großen Teil der vorhandenen Information. Der Effekt einer solchen Informationsverarbeitung ist etwa ebenso gut oder schlecht wie die Energieumwandlung in der ersten Dampfmaschine. Die Auswertung läßt sich freilich verbessern durch die Steigerung der Häufigkeit der Impulse pro Zeiteinheit. Dennoch bleibt auch dann das einzelne zurückkommende Signal in sich selbst unanalysiert und uninterpretiert. „Animal Sonar“ scheint gerade diesen letzteren Weg bis zu der Grenze der Möglichkeiten zu gehen.

Es waren insbesondere Beobachtungen an Tieren und zwar an solchen, die ausschließlich oder häufig Schall benützen, sowohl für die allgemeine Orientierung, als auch für die Feststellung von Hindernissen und Beute, die zum Anlaß der im folgenden beschriebenen Untersuchungsrichtung geworden sind.

Seit den ersten derartigen Versuchen an Fledermäusen sind es heute daneben besonders Delphine, Seelöwen und mehrere Arten von Walen, die in bezug auf ihre Fähigkeit zur Schallortung genauestens und mit einem großen Aufwand technischer Mittel studiert werden. Da sich diese Tiere leicht an den Menschen gewöhnen, werden die Experimente in Laboratorien ausgeführt.

Rätselhafte Beobachtungen

Die Gründe für die Aktualität dieser Untersuchungen liegen zu einem großen Teil darin, daß hier Phänomene vorkommen, die über derzeit bekannte technische Möglichkeiten weit hinausgehen und gelegentlich sogar unmöglich zu sein scheinen.

Ich darf nur kurz anführen: eine Fledermaus, die im völlig Dunkeln fliegende Insekten jagt, bringt dies fertig, obwohl in der Nähe vielleicht zehn andere Fledermäuse ebenfalls jagen, und alle ungefähr die gleichen und zwar sehr lauten Impulse im selben Ultraschallbereich aussenden; dabei ortet sie rechtzeitig (bei Fluggeschwindigkeiten zwischen 3 bis 5 m pro Sekunde) Hindernisse in der Größenordnung von weniger als einem Millimeter Durchmesser (in der Mitte eines Raumes bis unter ein Zehntel Millimeter). Und schließlich kann man einer Fledermaus, wenn sie gezähmt ist, das heißt, wenn sie der Laboratoriumssituation angepaßt ist, eine Handvoll Mehlwürmer in die Luft werfen; sie lernt rasch, einen ganz bestimmten Mehlwurm herauszupicken, obwohl sie innerhalb von einem Dutzend und mehr — gleichzeitig auf sie einstürmenden und sich daher durch Interferenz gegenseitig überlappenden und störenden Echos zu wählen hat. Gänzlich rätselhaft aber wird die Situation, wenn sie dabei sogar noch künstliche Mehlwürmer, also Attrappen von echten unterscheidet, — und also schon auf Entfernung nicht jagt, was sie nicht auch verdauen kann. Dabei steigert sie in der Nähe von Objekten die Aufeinanderfolge ihrer Impulse zu einer solchen Anzahl, daß sich die vielen Echos mit dem eigenen Schrei überlappen. Und schließlich kann man noch „weißes Rauschen“ mit Bändern im Ultraschallbereich dazu liefern, ohne daß die Versuchstiere dadurch wesentlich gestört werden. Auch der künstliche Verschuß eines Ohres verringert diese Leistungen kaum nennenswert.

Ähnlich unglaublich benehmen sich Delphine, die in ihren Versuchstanks Gegenstände bis zur Größe einer Erbse durch Schallotung — im völlig Dunkeln — ausfindig machen können, sogar wenn das Objekt am Boden liegt. Berücksichtigt man die etwa 5fach höhere Schallgeschwindigkeit im Wasser, was noch eher zur Überlappung mit dem Echo führt wie in der Luft und dazu die von allen Seiten besonders in runden Tanks einstürmenden Reflexionen von den Wänden, dann wird die Unterschiedsempfindlichkeit dieser Tiere für kleinste Schallverschiedenheiten einfach enorm. Überdies kann man mit Delphinen auch gut im Hellen arbeiten, da sie sich ohne große Gegenwehr die Augen lichtdicht verdecken lassen und überhaupt leicht zu dressieren sind. Es gibt sehr schöne Dokumentarfilme über diese neuesten Versuche.

Was nun also den Zoologen, den Physiker und auch den Techniker an diesen Resultaten besonders interessiert, ist die Frage, wie solche Leistungen erklärt werden können. Selbstverständlich wird auch ein Blick auf mögliche Anwendungen geworfen, sei es nun für die Verbesserung der Ortungstechnik überhaupt oder für die Konstruktion sogenannter „Mobility Devices“ für die menschlichen Blinden. Daß der natürliche menschliche Hörsinn für so feine Schallaufarbeitungen nicht ausreicht, kann schon jetzt als sicher gelten, obwohl wir andererseits noch nicht wissen, wie weit menschliches Unterscheidungsvermögen für Schallkomplexe und deren Änderungen überhaupt reicht. Die routinemäßigen Audiometer-Untersuchungen reichen dafür bei weitem nicht aus (darauf soll später zurückgekommen werden).

Mikroelektrodenteknik als modernes Hilfsmittel der Forschung

Es sind also in erster Linie praktische Beobachtungen an schallortenden Tieren, also biologisches Radar oder besser Sonar, das die Aufmerksamkeit verschiedener Disziplinen in gleicher Weise erregt. Dabei kommt heute eine äußerst wichtige

neurophysiologische Methodik zur Anwendung, nämlich die Untersuchung der Aktivität einzelner Nervenzellen und dies an verschiedenen Stellen der Sinnesbahn von der Peripherie bis zu den kortikalen Zentren. Mit Hilfe dieser Mikroelektrodenteknik ist vor wenigen Jahren eine Entdeckung gelungen, die für das Verständnis der sensorischen Verarbeitung von Reizen bahnbrechend geworden ist. Es gibt auf verschiedenen sensorischen Ebenen jeweils Zellen, die nicht auf Reize, sondern auf Reizkonfigurationen antworten. So gibt es Detektoren für Ecken, für Rundungen, für bewegte Reize, ja sogar die Richtung der Bewegung wird noch selektiv von besonderen Zellen beantwortet. Selbstverständlich können nicht schon die Rezeptoren am Eingang des Sinnesorganes so etwas leisten. Um „Abstraktionen“ solcher Art zu erklären, können wir uns den Vorgang nicht anders denken, als daß Zusammenfassungen oder Zusammenschaltungen schon sehr früh im sensorischen System erfolgen müssen, die dann nicht mehr das Einzelgeschehen, sondern eine bestimmte Summierung oder einen Durchschnittswert, oft auch eine bestimmte Gruppierung oder Ordnung unter vielen einzelnen nervösen Ereignissen anzeigen und „nach oben weitermelden“.

Ich verweise in diesem Zusammenhang auf die Pionierarbeiten von HUBEL und WIESEL (1958, 1959, 1962), sowie auf das Institut für Klinische Neurophysiologie unter Prof. JUNG in Freiburg i. Br., das diese Technik der „Mikrophysiologie“ als einziges Institut in Deutschland bereits in den frühen fünfziger Jahren zur Erforschung — in diesem Falle der visuellen nervösen Organisation — verwendete (JUNG et. al. 1952, 1959).

Es ist ein äußerst spannender Augenblick für den experimentierenden Physiologen, wenn ihm bei der sehr subtilen Mikroelektrodenteknik ein Resultat dieser Art gelingt. Als Versuchstiere dienen meist Katzen, die selbstverständlich unter Betäubung präpariert werden. An der jeweils zu untersuchenden Stelle wird der Knochen über dem Kortex geöffnet. Durch diese Öffnung wird eine Mikroelektrode, die aus Glas besteht und in einer haardünnen Kapillare endet, eingeführt. Die Elektrode ist mit einer stromleitenden Flüssigkeit gefüllt. Die durch die Spitze aufgenommenen Potentiale bzw. Potentialänderungen die sogenannten „spikes“ werden über einen Verstärker hörbar gemacht und können mitgeschrieben werden. Je nach der Art und Frequenz der Signale läßt sich darauf schließen, ob die Spitze der Elektrode in ein Neuron eingedrungen ist oder nicht. Selbstverständlich muß das Versuchstier bei dieser heiklen Prozedur völlig bewegungslos gehalten werden, was sowohl mechanisch durch Fixation des Kopfes, wie chemisch durch Curare und oft zusätzlich noch operationell durch Abtrennung bestimmter motorischer Bahnen bewerkstelligt wird. Schließlich ist auch für künstliche Beatmung zu sorgen, sowie im visuellen Versuch für Feuchthaltung der Hornhaut des Auges. Dem so vorpräparierten Versuchstier werden nun verschiedene Reize geboten, im visuellen Versuch z. B. beginnend mit hell-dunkel-Reizen bis zu komplizierten Reizmustern.

Es gibt von der Netzhaut bis zu den kortikalen Kernen der Sehbahn eine große Anzahl von Zellen, die je nach Einschalten oder Ausschalten von beliebigen Lichtreizen antworten. Sie benehmen sich also wie gewöhnliche Licht-Dunkel-Anzeiger, seien es nun on-Zellen, die bei Erregung „feuern“ oder off-Zellen, die erst bei Dunkelheit Aktivität zeigen. Es gibt auch on-off-Zellen, die bei beiden Änderungen in gleicher Weise reagieren. Daneben jedoch gibt es anders reagierende Zellen, z. B. solche, die nur auf Bewegung antworten. Man bewegt also z. B. ein helles Gittermuster auf dunklem Grund als Reiz vor den Augen der Katze hin und her. Die meisten Zellen antworten dann, wie oben beschrieben, einfach auf den Helligkeits-

wechsel der Gitterstäbe, doch gibt es einige, die nicht mit dem Helldunkelwechsel synchron laufen, sondern in konstanter Weise erregt werden und zwar immer dann, wenn das Gitter z. B. nach rechts bewegt wird, während sie bei Linksbewegung schweigen. Die Ergebnisse gehen noch weiter, indem manche Zellen nur dann auf Bewegung ansprechen, wenn das Gitter hell genug ist, andere nur, wenn die Größe und Schnelligkeit der Bewegung einen bestimmten Betrag erreicht, wieder andere antworten nur auf Bewegungen in dazu abweichenden Richtungen usw. (Siehe z. B. BAUMGARTNER 1964). Es ist ein unabsehbares Feld von Entdeckungen, das mit dieser Technik offen steht. Ein wesentliches Prinzip der nervösen Organisation in Sinnesbahnen scheint sich uns damit zu enthüllen.

Für den Zweck des vorliegenden Themas ist es wichtig, daß mögliche Angriffspunkte zur Erklärung der nervösen Analyse komplexester Schallmuster und Schallmustersequenzen, wie sie dem Ohr eines bewegten Individuums in einer akustischen Umwelt geboten werden, vielleicht hier zu finden sind. Und in der Tat entsprechen dieser Erwartung neueste Ergebnisse der dargestellten Technik angewandt auf die Hörbahn von Fledermäusen.

Zur Schallorientierung von Fledermäusen

Beginnen wir also bei den Fledermäusen, die auch die ersten waren, die diese Probleme in Bewegung brachten: In einem neu erschienenen Life-Buch über „Tiere und Verhalten“ (1966) ist dieses Thema in folgender Weise kurz und bündig eingeleitet:

„Der Verdacht, den Wissenschaftler lange Zeit bereits hegten, daß Tiere Gebrauch von Reizen machen, die außerhalb der menschlichen Wahrnehmungsgrenze liegen, wurde in aufsehenerregender Weise in den dreißiger Jahren von Donald R. GRIFFIN bestätigt, der damals noch an der Harvard University studierte. Als er die erstaunliche Fähigkeit der Fledermäuse beobachtete, sich in völliger Finsternis zu orientieren, stellte er die Hypothese auf, daß sie dabei möglicherweise mehr ihre Ohren als ihre Augen gebrauchten . . .”

Damals scheint GRIFFIN noch nicht gewußt zu haben, daß schon um 1790 durch JURINE und SALANZANI bekannt war, daß Fledermäuse disorientiert werden, wenn man ihnen die Ohren verschließt, allerdings konnte man seinerzeit mit dieser Beobachtung nicht viel anfangen.

GRIFFIN brachte nun einige Fledermäuse „in sein Labor, das speziell für die Aufnahme von Ultraschall ausgerüstet war, und bekam so als einer der ersten Menschen die hohen Schreie zu hören (besser wäre ‚zu registrieren‘), die diese Tiere beim Flug ausstoßen. Diese Überschallsignale prallen von der Oberfläche von Gegenständen ab und die reflektierten Schallwellen leiten die Fledermaus beim Flug.”

Seit GRIFFIN die Welt der unhörbaren Signale entdeckt hat, . . . wurde nicht nur viel auf dem Gebiete der Echolotung der Fledermäuse gearbeitet, sondern es wurden auch ähnliche Anpassungen bei anderen Tieren erforscht.”

EINE NEBENBEMERKUNG ÜBER STEATORNIS

Überdies gerade von GRIFFIN selbst wurden auch zum erstenmal in Höhlensystemen nistende Vögel daraufhin untersucht, wie sie das Kunststück des kolli-

sionslosen Fliegens im völlig Dunkeln fertigbringen. Es handelt sich dabei um die Art *Steatornis caripensis* HUMBOLDT, von HUMBOLDT um 1800 in venezuelanischen Höhlen entdeckt; im deutschen werden sie Fettschwalben genannt (GRIFFIN 1953). Das überraschende war, daß diese Vögel für ihre Schallimpulse gar nicht Ultraschall verwenden, sondern eine mittlere Frequenz von 7000 Hz bevorzugen; somit einen Bereich, der durchaus im menschlichen Hörvermögen liegt. Allerdings sind die ausgesandten Impulse sehr kurz. Sie liegen um eine Millisekunde und folgen in Gruppen von 2 bis 6 solcher „Klicks“ hintereinander, dann kommt eine Pause bis zu 4 Millisekunden usw.

Wer hier schon glauben möchte, da hätten wir ja die Lösung: man kann sogar schon den hörbaren Schallbereich bis zum Fliegen benützen, man braucht dazu gar nicht Ultraschall, der sollte doch bedenken: Fettschwalben haben einen viel kleineren Körper zu schützen als Menschen, überdies folgt der Körper in der Bewegungsrichtung des Kopfes und nicht senkrecht dazu, wie bei unseren Füßen, die abwechselnd weiter voraus sind als der Kopf. Außerdem ist auch das Gehörvermögen und seine Auflösungsfähigkeit zu beachten (vgl. dazu auch das Standardwerk GRIFFIN 1958, sowie WEBSTER 1966.).

Weitere Daten über Fledermäuse

Im Falle von Fledermäusen wurden inzwischen hervorragende photographische Techniken entwickelt, um das Verhalten beim Ausweichen gegenüber Hindernissen sowie bei der Jagd auf die Beute sichtbar zu machen (F. A. WEBSTER 1963). Dennoch vermitteln solche Aufnahmen oder Filme nur einen kleinen Teil derjenigen Informationen, die wir brauchen würden. Immerhin läßt sich daraus ersehen, aus welcher Entfernung eine Fledermaus fähig ist, ihr Ziel konsequent anzufliegen, bzw. Hindernisse zu „bemerken“. Der gefundene Bereich liegt in der Größenordnung von einigen Dezimetern bis zu Metern. Ebenfalls wird daraus ersichtlich, daß sowohl Bewegungen des Kopfes, der Ohren, wie wechselnde Fokussierung der schallaussendenden Organe (bei manchen Arten ist dies die Nase, bei anderen das geöffnete Maul) eine Rolle spielen. Ebenfalls ist gut zu sehen, wie die Beute (in diesem Falle Mücken, Nachtfalter oder Mehlwürmer) geschlagen wird, auch wenn die ersteren zu entkommen suchen und Spiralen fliegen. Meist geschieht dies nicht direkt mit dem Maul, sondern mit der Schwanzmembrane. Die Beute wird dort eine Zeitlang festgehalten und dann durch eine rasche Hinwendung des Kopfes aufgenommen. Im Falle von Hindernissen, z. B. Durchqueren eines Drahtnetzes, ist das Einziehen der Flügel schon mehrere cm vor dem jeweils gewählten Durchschlupf schön zu beobachten (SCHNITZLER, 1966).

Leider sind alle diese Leistungen bereits der Erfolg einer gelungenen Schallortung. Selbst wenn gleichzeitig ein Tonbandgerät für Ultraschall läuft, nützt dies wenig. Synchroner Markierungen mit Lichtblitzen zeigen höchstens, daß die Anzahl der ausgestoßenen Schreie pro Sekunde mit der Nähe zu den Hindernissen oder der Beute ansteigt und dann einige cm vor dem Objekt plötzlich abbricht, um anschlie-

ßend wieder die normale Rate des allgemeinen „Aufklärungsfluges“ zu erreichen. Die vielfachen Echos und Interferenzen werden vom Registriergerät entweder gar nicht aufgenommen, oder wenn schon, dann von einem anderen Orte aus, als es das fliegende Tier tut. Man sollte die Beobachtungsgeräte am Kopf der fliegenden Fledermaus einrichten können, um über den schallseitigen Aspekt mehr zu erfahren. Die Sache kompliziert sich weiter, da durchaus nicht alle Arten von Fledermäusen ihr Sonar-System in gleicher Weise benützen — ja auch gar nicht besitzen. Genauer untersucht sind überhaupt nur einige wenige Arten und schon hier zeigen sich große Unterschiede.

Ich verweise auf die Untersuchungen des Tübinger Zoologen MÖHRES und seiner Mitarbeiter aus deren Ergebnissen hier eine Tabelle folgen soll:

Überfamilien	Dauer des Impulses	Intensität	Frequenz	Art der Emmission
Emballonuroidea	kurz - mittel	stark	leichte Frequenzmodulation, kaum Obertöne	Maul
Phyllostomatoidea	mittel - kurz	mittel - schwach	geringe Frequenzmodulation	Nase
Rhinolophoidea	kurz - mittel - lang	stark - mittel	konstante Frequenz, keine Obertöne	Maul
Vespertilionoidea	mittel - kurz	stark	starkes Frequenzabsinken	Maul oder seltener Nase

Tabelle 1 (übersetzt aus MÖHRES 1966)

Die unterschiedlichen Aussagen beziehen sich auf Unterschiede zwischen den Arten der jeweiligen Familien. Die Bezeichnungen kurz - mittel beziehen sich auf die Dauer der Impulse von 1 bis 10 Millisekunden; was darüber liegt, wird als lang bezeichnet. Die Intensität gilt als stark, wenn sie mehr als 100 db (aus 5 cm Abstand vom Kopf des Tieres gemessen) beträgt. Die Frequenzen liegen in allen Fällen zwischen 30 und 90 kHz, doch wird in manchen Fällen die Frequenz während des einzelnen Schreies stark verändert, in anderen nicht; auch der Anteil an harmonischen Obertönen, die gelegentlich stärker als der Grundton sind, kennzeichnet manche Arten. Übereinstimmend ist nur, daß die Anzahl der Impulse bei raschem Flug oder der Annäherung an Objekte beschleunigt wird, von z. B. 10 pro Sekunde bis zum zwanzigfachen Betrag und daß wenige Zentimeter vor einem Objekt „Funkstille“ einzutreten pflegt.

Man müßte die speziellen Lebensgewohnheiten der einzelnen Arten viel besser kennen, um über Vor- oder Nachteile solcher Unterschiede überhaupt spekulieren zu können.

Rätselhaft und fast unglaublich muten folgende zum Teil neueste Beobachtungen an. Ich zitiere gleich die rätselhafteste, schon oben kurz erwähnte (aus einem Vortrag von GRIFFIN 1966):

Er führte dort aus, daß es zunächst eine selbstverständliche Annahme schien, daß Schallortung über Lokalisation und ungefähre Größe eines Gegenstandes informiert,

aber nicht, ob er freßbar ist. Es wurde also versucht, Fledermäuse, die auf in die Luft geworfene Mehlwürmer dressiert waren, mit Atrappen abzuspeisen, wie z. B. Glaskugeln, Kreidestücken, Gummibändern, 10-Cent-Stücken usw. Tatsächlich machten die Tiere zuerst Angriffe auf solche Dinge, lernten aber bald, die „Falsifikate“ zu vermeiden. Selbst genau nach der Form der Mehlwürmer aus einem plastischen Stoff geformte Atrappen wurden schließlich zwischen 80 bis 100 Prozent der Fälle vermieden. — Diese Situation ist wahrlich mehr als künstlich, verglichen mit dem freien Leben der Fledermäuse, wo es sicher keine Plastiknachtflatter gibt, — und wurde dennoch gemeistert. Vom Standpunkt der Schallortung aus erscheint diese Situation ebenso schwierig. Trotzdem muß man annehmen, daß Fledermäuse in ihrer natürlichen Umwelt ähnlich gelagerte Unterscheidungen lernen können, z. B. zwischen angenehmen und unangenehmen Insekten, die äußerlich sehr ähnlich sind. Über die unterscheidenden Kriterien wissen wir leider vorläufig noch so gut wie nichts (siehe später: Materialunterscheidungen durch Schall bei Seelöwen und Delphinen).

Um solche Rätsel auch nur um einen Schritt der Auflösung näher zu bringen, müßten wir eine verbesserte Methode der Beobachtung haben, nämlich zugleich den genauen Ort des Tieres kennen und außerdem alle Impulse und die zurückkommen- den Echos am Ort des Tieres laufend verfolgen.

Fledermäuse sind jedoch leider zu klein, um sie mit einer Laterne oder einem Miniatursender auszurüsten und dann durch eine komplizierte Peilanlage ihren genauen Weg aufzuschreiben, wobei man zusätzlich wissen müßte, wohin gerade der Kopf und damit das gebündelte Signal gerichtet ist. Aber auch die Echos samt Interferenzen müßten ebenfalls vom Ort des Tieres aus aufgenommen werden usw.

Es ist daher wichtig, vereinfachte künstliche Modelle zu konstruieren, sei es rechnerisch oder in der Praxis.

Neuester Versuch einer Imitation des „Fledermausprinzips“

Dies ist tatsächlich in einigem Umfang geschehen. Das gemeinsame Prinzip dieser Konstruktionen ähnelt der Radartechnik, nimmt jedoch auch Interferenzen in Kauf. Man baut einen Impulsgeber, in dessen Nähe (schallmäßig abgeschirmt) Mikrophone sich befinden. Durch die nachfolgende Schaltung wird elektronisch der ausgesandte Impuls mit dem empfangenen Impuls verglichen. Die Differenz beider geht als „Information“ weiter und löst Warnung oder Alarm aus.

Ein neuestes Gerät dieser Art, das wie eine Sehbrille getragen wird, stammt von L. KAY (1966). Es benützt Ultraschall, dessen Frequenz regelmäßig zwischen 90 bis 45 kHz auf- und abgeht. Durch die Verwendung zweier getrennter Empfangskanäle hofft der Erfinder auch zusätzlich relative Phasendifferenzen für eine gleichzeitig mehrfache Richtungsbestimmung verschiedener Objekte ausnützen zu können und damit eine Art Simultanraum aufzubauen, wie er im Sehen gegeben ist. Ein Prototyp dieses Gerätes (mit nur einem Empfangskanal) ist bereits mehrfach in praktischer Erprobung. Der Preis dieses ersten Gerätes, das serienmäßig bei Ultraelec-

tronics Ltd. in London hergestellt wird, liegt jedoch bei 2.500 öS. (L. KAY, 1963 und 1966).

Von einem mathematisch-physikalischen Standpunkt aus exerzierten andere Autoren die Möglichkeiten durch, die die Technik kennt, nähern sich jedoch damit ebenfalls nur von Ferne und nur im Prinzip denjenigen Leistungen, die uns die jetzt und später genannten Tiere in wesentlich komplexeren Situationen wie etwas Selbstverständliches vormachen. Ich möchte hier kurzerhand auf D. W. BATTEAU (1966), D. PYE (1963 u. 1966) und J. W. GRIFFITHS (1966) verweisen.

Einige neurophysiologische Daten und Spekulationen.

Hören wir nun, was der Neurophysiologe sagt: hier zitiere ich besonders Alan GRINNELL (1966) und O. W. HENSON (1966), die sich von einem physiologischen Standpunkt aus den hier vorliegenden Rätseln gewidmet haben.

Das erste Problem wird geschaffen durch die rasche Aufeinanderfolge der Schreie oder Klicks in der Nähe von Hindernissen oder der Beute. Auch wenn man annimmt, daß Impuls und Echo gerade noch, aber haarscharf getrennt sind, dann ist dieses Intervall einfach zu kurz, um das vorhergehende Echo auszuwerten. Die durch den eigenen Schrei ja ebenfalls miterregten Rezeptoren befinden sich gleich nachher, wenn auch nur kurz, in der Erholungsphase (der sogenannten Refraktärphase). Man kann nicht gut die Refraktärphase aufgeben, die eine 1000fach gesicherte Tatsache der Physiologie ist.

Aber die Situation wird noch ernster, weil man fordern muß, daß in diesem Zeitintervall, das ohnehin kaum zur Verfügung steht, eine Reihe anderer, ungefähr gleichzeitig eintreffender Echos, die höchstens um Mikrosekunden (Millionstelsekunden) differieren, analysiert werden sollen. Gar nicht zu sprechen von den gegenseitigen Interferenzen dieser Echos. Aus alledem soll dann, vermutlich in „Nanosekunden“ (das ist in Milliardstel von einer Sekunde) ein Fazit gezogen werden, das über Entfernung, Richtung, Größe, Bewegungszustand und möglicherweise noch Art des Objekts Auskunft gibt; z. B. ob es sich um eines unter 15.000 im Winde lispelnden Birkenblättern oder um einen zwischen ihnen umherschwirrenden Nachtfalter (von obendrein freßbarer Sorte), oder nur um ein fallendes Blatt handelt usw.

Die damit befaßten Forscher gaben trotzdem nicht auf. Zunächst wurde festgestellt, daß schon vor dem Einsetzen der einzelnen Schreie der Fledermaus die Kontraktion der Mittelohrmuskeln steigt, jedoch noch während des Schreiens nachläßt. Dasselbe zeigte sich entsprechend i. b. auf die Anhebung der Empfindlichkeit noch während des ausgehenden Schreies in den nächstliegenden sensorischen Zellkernen. Damit wird sozusagen schon während des Impulses „auf Empfang“ geschaltet. Die angewandte Meßtechnik, sogar während des Fluges der Fledermaus ist staunenswert; Die folgende Skizze (Abb. 1) gibt ein Beispiel der dabei verwendeten Anordnung. Das Versuchstier mit einer implantierten Elektrode, die jeweils an verschiedenen Stellen der Hörbahn einoperiert war, ist dressiert, vom Ausgangsort A nach B zu fliegen. In der Nähe von B befindet sich hinter einer Abschirmung, die

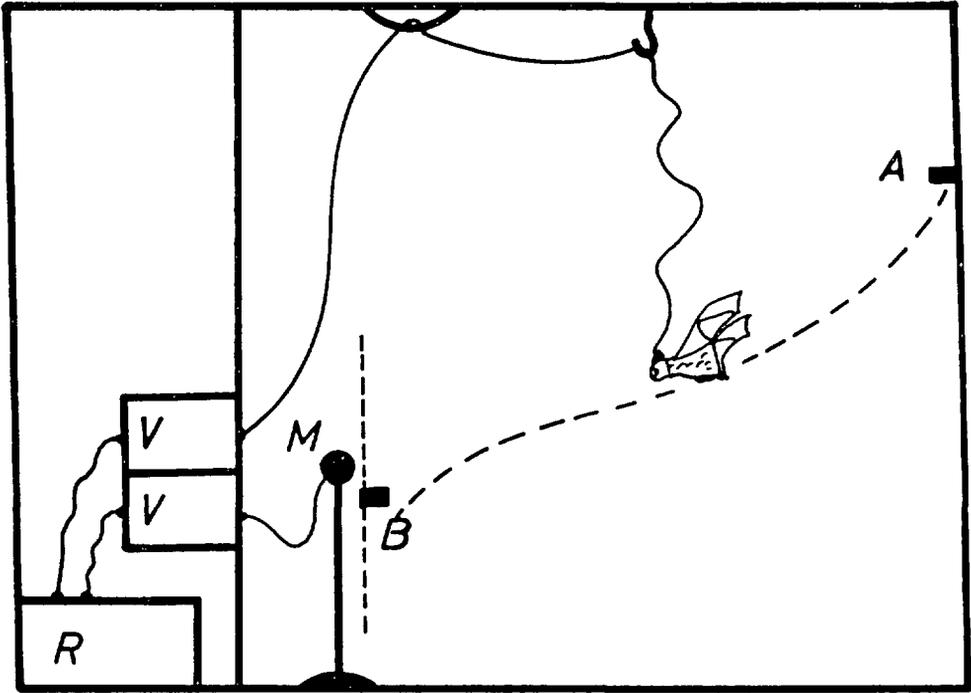


Abb. 1: Nach O. W. HENSON (1966) (Beschreibung im Text).

aber akustisch verbunden ist, das Mikrofon M. Über zwei Verstärker V werden sowohl Schallimpulse wie Nervenpotentiale synchron auf das Registriergerät R geleitet.

Weiters fand GRINNEL, daß verschiedene Individuen auch derselben Art ihre eigenen privaten „Dialekte“ in bezug auf das von ihnen emittierte Signal haben, was Dauer, Wiederholungsrate und Frequenzzusammensetzung anbelangt. Wesentliche Anteile dieses Dialekts zeigen sich selbstverständlich auch in allen Echos — und dies scheint das Bezugssystem zu sein, um einerseits andere Echos von den eigenen zu unterscheiden und andererseits gerade aus den Differenzen zwischen eigenem Signal und Echo objektive Information zu gewinnen. Eine Felswand in unseren Bergen z. B. kann gar nicht so kompliziert gebaut sein, daß sie uns im einheimischen Dialekt antwortet, wenn wir sie auf hochdeutsch anrufen. Es kommt meist dasselbe Deutsch zurück, wenn auch ein wenig verändert. Und gerade in dieser letzteren Veränderung scheint die wesentliche Information — jetzt für die Orientierung von Fledermäusen gegenüber ihren Objekten — zu liegen. Andere Schreie und deren Echos mögen eher der Kommunikation dienen, wie überhaupt die Laute schallortender Tiere nicht nur einzig und allein dem Orientierungszweck untergeordnet werden dürfen. Die ganze Angelegenheit wird dadurch selbstverständlich noch komplizierter (MÖHRES 1966^a).

Das bereits bekannte sogenannte Kurzzeitgedächtnis, das unmittelbare Vergleiche schon relativ peripher im Nervensystem ermöglicht, könnte für die Erklärung der eben geschilderten Situation herangezogen werden. Doch wissen wir über die Physiologie solcher Kurzzeitspeicher, außer der Tatsache selbst, noch wenig.

Es wird allerdings noch spekulativer, wie man sich einen solchen Vergleich konkret vorstellen soll: man müßte fordern, daß das ausgehende Signal in Form von bestimmten Sensitivitätsstufen frequenzabhängiger Neuronen eine Zeitlang gespeichert bleibt, die dann reagieren, wenn sie beim zweitenmal (das ist beim Echo) in einer nur wenig davon abweichenden Weise erregt werden. Das Muster aller dieser Differenzen ist erneut zu analysieren auf Grund früherer Gedächtnisogramme, ob es lediglich einer allgemeinen Verzerrung unterworfen wurde oder einer selektiven Verzerrung. Die letzteren sind unter sich in der selben Weise weiterzuanalysieren usw. Es gibt gewisse Anhaltspunkte, die einen solchen Gedankengang auch empirisch unterstützen — oder besser gesagt — bisher nicht zu widerlegen scheinen.

Das wichtigste Resultat aber, das GRINNEL fand, ist die Tatsache, daß es in der aufsteigenden Gehörbahn der Fledermaus immer zahlreicher solche Neuronen gibt, die unter zwei ganz kurz aufeinanderfolgenden Impulsen zunehmend nur mehr auf den zweiten von beiden Impulsen antworten, gleichgültig wie stark der erste war, wobei die Aufeinanderfolge weit unter eine Millisekunde sinken kann. Es gibt also Neuronen, bei denen das Zählen sozusagen erst bei „zwei“ beginnt, dafür aber sehr rasch erfolgt, wenn weiter unten im Nervensystem „eins“ gesagt worden ist.

Statt das Problem der Schallortung zu lösen, stehen wir damit wieder vor neuen Problemen, diesmal physiologischer Art, wie nämlich ein übergeordnetes Zentrum besser reagieren kann als ein untergeordnetes, auf dem es ja aufbaut. — Auch hier wieder können wir nur spekulieren: z. B. daß das Ende der Refraktärphase auf niedrigeren nervösen Ebenen ja selbst statistisch verteilt ist — und also eine Auswahl in Richtung der jeweils raschesten „Erholer“ (man könnte sagen der „Früh-aufsteher“) die nachgeschalteten Zentren, die ebenfalls so auswählen, in Vorteil bringen kann. Wir geraten hier in die Nähe von Phänomenen von der Art des viel diskutierten Recruitments.

Beobachtungen und Daten über die Orientierung durch Schall unter Wasser

Über die Leistungen von im Wasser schallortenden Tieren ist in letzter Zeit besonders über das Verhalten von Delphinen, Walen und Seelöwen gearbeitet worden, meist in Kalifornien (vgl. POULTER 1966^{a, b}). Die heutige Technik mit Unterwassermikrophonen und Unterwassersendern (bei Verwendung mechanisch schwingender Piezoantennen als hochfrequenten Ausstrahlern) hat eine Menge von Daten erbracht, die nicht weniger interessant und oft ebenso rätselhaft sind, wie die Beobachtungen an Fledermäusen. Hier besteht auch die Möglichkeit, von der Gebrauch gemacht wird, Mikrophone und Sender dem Tiere selbst „einzubauen“, um zu registrieren, was unmittelbar am Ort des jeweiligen „Schallotsen“ passiert. Selbst-

verständlich bleiben die Registriergeräte außerhalb des Versuchstanks. Man wendet dabei den Trick, die am Ort des Tieres aufgenommenen Schalldaten mit veränderter Frequenz, auf welche nur die Registriergeräte ansprechen, ebenfalls vom Ort des Tieres aus, wieder zurückzusenden (siehe R. St. MACKAY 1966). Empfindliche Registriergeräte sind vorläufig noch zu groß und umständlich, um sie ebenfalls am Halsband des Tieres ins Wasser mitzuschicken.

Bisher ist aus den Daten folgendes (kurz zusammengefaßt) bekannt: Bei der Anpeilung von Hindernissen oder Beute unter Wasser werden wesentlich höhere Frequenzen des ausgesandten Schalles benützt als in der Luft. Dieselben Tiere können sich jedoch als Lungenatmer auch außerhalb des Wassers aufhalten. Man fand, daß die Lautgebung in der Luft (besonders studiert bei Seelöwen) durchaus im menschlichen Hörbereich liegt und sich wie ein kurzes, hartes Bellen anhört. Unter Wasser scheinen lediglich die höheren Harmonischen bis zu 230 kHz verstärkt angehoben zu werden. Allerdings sind die hier beobachteten Signale äußerst komplexe Schallmischungen. Der Unterwasserschrei eines Seelöwen, wenn man die entsprechende Schallaufnahme „dehnt“ (und damit auch die höheren Frequenzen in den menschlichen Hörbereich bringt), klingt wie das Geräusch einer knarrenden Türe, die man hin und herbewegt.

An besonders interessanten Details können etwa folgende berichtet werden:

Im Falle von Seelöwen, die an steilen Stellen der pazifischen Küste in Kalifornien häufig anzutreffen sind, beobachtete man, daß komplett blinde Tiere im Leben mit ihrer Kommunität kaum auffällig werden. Einige Exemplare dieser Art wurden nach Feststellung ihrer völligen Blindheit sowohl im Freileben, wie in Versuchstanks, beobachtet und im letzteren Falle auf Experimente dressiert. Ein blinder Seelöwe z. B. orientiert sich außerhalb des Wassers über die Beschaffenheit seiner Umgebung einfach durch häufigeres Bellen als die anderen. Er kann sehr sicher einem Felsgrad im Abstand von 1—2 m entlanggehen ohne ihn zu berühren. Auf dieselbe Weise orientiert er sich in Bezug auf die Wasserseite gegenüber der Landseite seines jeweiligen Aufenthaltsortes. Unter Wasser und im Dunkeln benimmt er sich gleich, wie die anderen, intakten Tiere.

Bisher unerklärlich jedoch ist folgendes Ergebnis aus Beobachtungen und Experimenten in Versuchstanks: blinde Seelöwen können mit Sicherheit zwischen Fischfleisch, das sie lieben, und gleich großen, sowie gleich aussehenden Stücken von Pferdefleisch, das sie nicht lieben, unterscheiden. Information durch Geruch kann eindeutig ausgeschlossen werden. Dies letztere wurde durch Aufspannen großflächiger dünner Plasikhäute erreicht, die den Tank in zwei Teile teilten und keine Diffusion durchlassen; außerdem wurden die Lockmittel selbst in dichtschießende Plastikbeutel eingeschlossen. Plastikhäute und -beutel wurden außerdem mit einer dünnen Aluminiumschicht bedampft, um — zwar nicht Schall — jedoch kürzere Schwingungen mit Sicherheit abzuhalten. Trotz aller dieser Vorsichtsmaßnahmen, sind Seelöwen imstande, aus meterweiter Entfernung die beiden Fleischsorten zu unterscheiden. Vernünftigerweise bleibt als „Informationskanal“ nur Schallortung

übrig, wofür Plastikfolien kein Hindernis bilden. (Die Versuchstiere konnten die Folien tatsächlich nicht entdecken und schwammen manchmal mit durchstoßenen Folienstücken merkwürdig „bekleidet“ im Tank umher). — Hier besteht eine interessante Parallele zu der rätselhaften Unterscheidungsfähigkeit der Fledermäuse für echte und unechte Mehlwürmer, wie früher ausgeführt — siehe POULTER 1966^b, SCHUSTERMANN 1966, NORRIS et. al. 1966.

Im Falle von Versuchen an Delphinen überrascht neben der Fähigkeit, kleinste Objekte auszumachen, die Unterscheidungsfähigkeit für verschiedene Materialien, wie z. B. Glas, Metall, Holz, die in genau gleicher Größe und Anordnung dargeboten werden (EVANS et POWELL 1966). Die jeweiligen Versuchspläne basieren auf der Dressurmethode der „bedingten Reflexe“ nach PAWLOW, wobei Delphine besonders dankbare Versuchstiere sind, denn für sie wirkt bereits die Wiederholung eines Versuches als Belohnung, während Unterbrechung „Strafe“ bedeutet. Die Unterwassersignale, bzw. deren Grundfrequenzen liegen auch hier im menschlichen Hörbereich und sind deutlich als eine Art von „Zungenschnalzen“ zu hören. Die Impulsfolge beschleunigt sich, sobald das Tier das Ziel ausgemacht hat und ihm näherkommt. Dieser Moment ist auch äußerlich aus dem Wechsel des Verhaltens sehr deutlich zu sehen (von einem allgemeinen Orientierungsverhalten zum Zielverhalten übergehend). — Alle diese Beobachtungen wurden zugleich tongefilmt z. T. mit Unterwasserkameras. Die Versuchstiere waren selbstverständlich mit Augenabdeckungen versehen, was Delphine leichter als andere Tiere über sich ergehen lassen, so daß schärfere Eingriffe hier vermieden werden konnten.

Über die Fähigkeit, Materialien gleicher Form und Größe unterscheiden zu können, mag man spekulieren. Es ist nicht ausgeschlossen, daß unterschiedliche Resonanz und Absorptionseigenschaften der Materialien im Spiele sind. Mehr wissen wir nicht darüber. — Überdies ist es auch dem geübten menschlichen Blinden möglich, wie wir selbst schon vor Jahren feststellen konnten, z. B. zwischen Schaufenstern, (geschlossenen) Holztoren und Hauswänden, wenn auch mit einiger Unsicherheit, zu unterscheiden. Der „Klangkörper“ der eigenen Geräusche gegenüber diesen Materialien erscheint als eben merklich verschieden; Glas z. B. macht die Schallsituation mehr „klingelnd“, Wände mehr „hart“, Holz mehr „weich“. Dieselben Befunde wurden neuerdings von Ch. E. RICE (1966) bestätigt.

Eine ganze Reihe weiterer Untersuchungen betrifft verschiedene Arten von Walen, die ebenfalls, wenn nötig, Schallortung mit Erfolg benützen. Detaillierte Ergebnisse, besonders auch neurophysiologischer Art — im Zusammenhang mit der auch hier sehr genau rekonstruierbaren akustischen Situation, liegen erst soeben vor¹. Die Forschungen gehen intensiv weiter.

* Proceedings of the third Annual Conference on Biological Sonar and Diving Mammals, 1966, Stanford Research Institute, Menlo Park, California. Kopien dieser Proceedings sind kostenlos erhältlich und beim Herausgeber Dr. Ch. E. Rice, Adresse wie oben, anzufordern. — Diese Schrift ist soeben erschienen, so daß sie für das vorliegende Referat noch nicht ausgeschöpft werden konnte.

Messung der Leistungsfähigkeit menschlicher Schallortung

Zum Schluß möge noch einiges über die Schallortung des Menschen, besonders des blinden Menschen, berichtet werden.

In diesem Punkte sind unsere eigenen Ergebnisse von vor 10 Jahren (KOHLER 1956, inzwischen auch in engl. Übersetzung 1964 erschienen) bestätigt worden. In bezug auf einige spezielle Fragen, die wir damals im Bereich unserer Möglichkeiten näher untersuchten, beginnt eben jetzt das Interesse auch anderorts wach zu werden.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes (Contract AF 61 (514) — 889, Brüssel 1956) hatten wir die Gelegenheit, mehr als 250 Personen in bezug auf aktive und passive Schallortung zu untersuchen. Der erste Schritt dazu war die Konstruktion einer entsprechenden Meßeinrichtung. Wir wählten den Weg, ein Hindernis von „Standard“-größe (eine reflektierende runde Fläche von 50 cm Durchmesser) der zu testenden Versuchsperson aus verschiedenen Entfernungen vorzuhalten. Diejenige Entfernung, bei welcher das Hindernis eben gerade noch erkannt wurde, setzten wir als Maßgröße für die Leistung der betreffenden Versuchsperson fest. (Selbstverständlich vermieden wir Artefakte aller Art, wie z. B. reflektierende Flächen in der Nähe des Standardhindernisses, Geräusche und Regelmäßigkeiten in der Darbietung, laute Antworten der Versuchsperson, und ebenso mußte für sehende Probanden jeder Lichtschimmer durch eine Spezialbrille ausgeschlossen werden).

Ch. E. RICE begann 1963 ohne Kenntnis unserer Untersuchungen und Ergebnisse seinerseits mit Meßmethoden der menschlichen Fähigkeit zur Schallortung. Er wählte eine konstante Entfernung und variierte die Größe des Hindernisses. Selbstverständlich kann man ebensowohl diesen letzteren Weg für Meßzwecke wählen. In diesem letzteren Fall wäre der kleinste eben noch merkliche Durchmesser eines runden Hindernisses (aus bestimmter Entfernung geboten) die Maßgröße für die betreffende Versuchsperson.

Folgende Beobachtungen aber, über die RICE berichtet, sind interessant: Er fand nämlich, daß Größe des Hindernisses und (entsprechend) größere Entfernung zwar im allgemeinen äquivalent sind, jedoch nicht in allen Fällen. Es gibt Probanden, die diese beiden Situationen unterscheiden können. Dies führte ihn dazu, bei gleicher Entfernung und gleicher Flächengröße der Hindernisse verschiedene Formen i. b. auf Unterscheidbarkeit — und sogar Erkennbarkeit zu prüfen. Von den Formen war es ein kleiner Schritt zu den „Materialien“. In beiden Fällen ist unter subtilen Versuchsbedingungen (in schallisolierten und echofreien Kammern) eine Unterscheidung und Erkennung tatsächlich möglich. Damit tauchen ähnliche Rätsel wie sie früher bei den Leistungen von Tieren besprochen wurden, auch bei Leistungen, menschlicher Schallortung auf. Allerdings werden solche „Spitzenleistungen“ nur von einer kleinen Gruppe von menschlichen Probanden erreicht. Worauf es hier anzukommen scheint, wird gleich später geklärt werden.

Im gegenwärtigen Augenblick versuchen wir — nach Kontaktaufnahme mit Dr. RICE — eine standardisierbare Methode zur Messung menschlicher Schallortung zu finden. Dies letztere

ist deshalb wichtig, um ein verlässliches Maß für die heute vielfach angebotenen technischen „Hindernisdetektoren“ zu haben.

Die Rolle der Unterschiedsempfindlichkeit für die Leistungen der Schallorientierung

Ein weiterer Punkt, der ebenfalls erwähnt werden muß, ist folgender: Dr. RICE schließt aus seinen Beobachtungen ganz richtig, daß für die Feinheit der Entdeckung von Hindernissen nicht sosehr das absolute Gehörvermögen, als vielmehr die Feinheit in bezug auf Schallunterscheidung maßgeblich ist. Er fand nämlich, daß Audiometerprüfungen in einer viel zu geringen Korrelation mit guten Leistungen i. b. auf Schallortung stehen.

Genau dasselbe war unser Resultat. Doch sind wir schon damals einen Schritt darüber hinausgegangen und haben einen möglichst naturgetreuen Schallvariator gebaut und dann gefunden, daß hier die Korrelation zur Messung der Schallortungsfähigkeit bedeutsam höher liegt.

Der einfachste „Schallvariator“ ist eine bewegte Fläche, die irgendwo zwischen Schallquelle und Schallaufnehmer sich befindet. Durch ihre Bewegungen und Drehungen überlagert sie der Schallquelle eine wechselnde Interferenz. Ist die Schallquelle konstant, dann sind die Interferenzen ein „Portrait“ der Hindernisfläche und ihrer Bewegung. Doch zeigt sich bei einer solchen Versuchsanordnung bald, daß der wirksamste Platz des Drehhindernisses entweder in unmittelbarer Nähe der Schallquelle, oder in unmittelbarer Nähe des aufnehmenden Ohres ist. Dazwischen verschwindet die „Modulation“, — zumindest für das menschliche Ohr. Wir wählten also folgenden Fall für die Messung und benützten die eben geschilderte Beobachtung, um die „Schwelle“ zu finden.

Die folgende Abb. 2 gibt eine Skizze der Meßanordnung für die Wahrnehmung von Schallmodulationen. Wir arbeiteten mit einer Drehfläche D von 1 dm^2 Ausdehnung, die sich etwa dreimal pro Sekunde um ihre Achse drehte. Im Abstand von wenigen Zentimetern von der Drehfläche befand sich ein Kleinstlautsprecher LS, der mit weißem Rauschen (in der Stärke von 60 bis 70 Phon) gespeist wurde. Dieser Schallsender LS war nun gegenüber der Drehfläche veränderlich und konnte nach oben von ihr wegbewegt werden. Die ganze Einrichtung war in einer wattierten Schachtel untergebracht und hatte eine Öffnung nach vorne zur Versuchsperson VP. Aufgabe der Versuchsperson war es nun, den Lautsprecher (über einen Elektromotor) gerade soweit nach oben zu verschieben, bis die Schallmodulation nicht mehr hörbar war. Die auf diese Weise ermittelte Schwelle korrelierte nun signifikant höher mit der Leistung derselben Versuchsperson im zuerst beschriebenen Hindernismeßversuch. Die entsprechenden Audiometerwerte zeigten dem gegenüber für sämtliche Frequenzen nur eine geringe positive Korrelation.

Man kann es somit als gesichert ansehen, daß die Fähigkeit zu besonderen Leistungen der Schallortung besonders eng korreliert ist mit der Fähigkeit zu subtilen Schallunterscheidungen.

Das Angebot an Information, wenn man abgekürzt so sagen darf, ist praktisch unendlich. Dies gilt für alle Wesen, die Sinnesorgane dafür haben. Aber wir stehen staunend vor der Tatsache, daß die einen auffallend besser benützen können, was allen angeboten wird — und die anderen nicht — auch bei bestem Willen nicht. So fanden wir seinerzeit, daß etwa 2 Prozent von Menschen — vergleichbar selbstver-

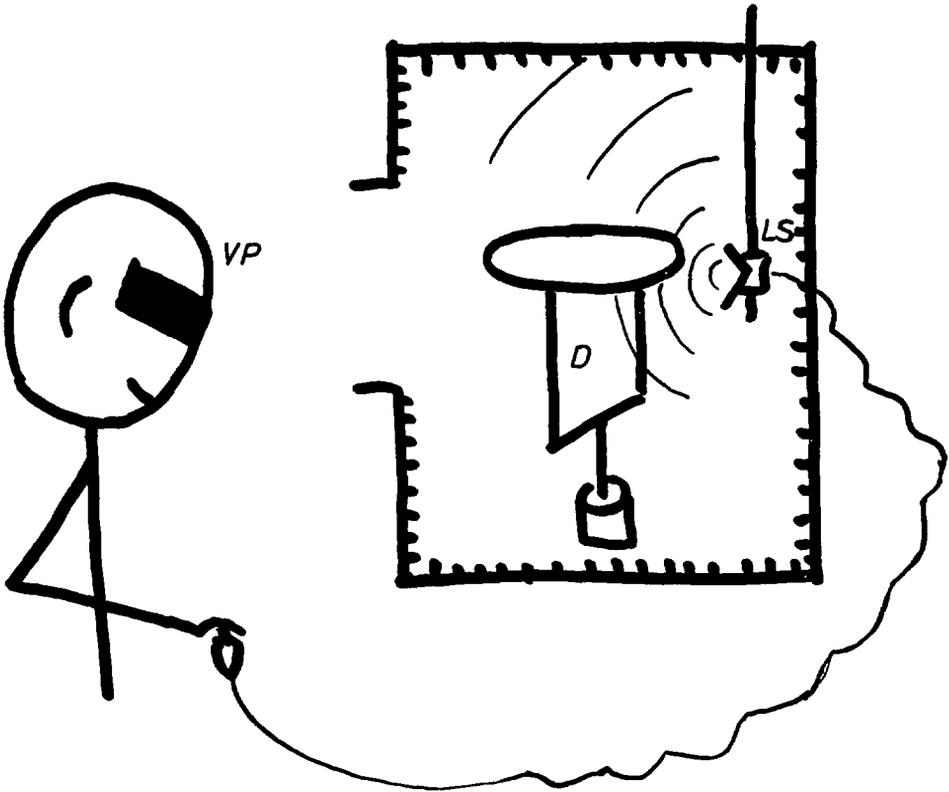


Abb. 2: Schallvariometer (Beschreibung im Text).

ständig mit unserer Stichprobe von 267 Personen — i. b. auf Schallortungsfähigkeit einem Rest von 98% überlegen waren, einfach weil sie offenbar zu komplexeren Analysen von Schallgemischen fähig waren und dies, obwohl das absolute Gehör sicher und vermutlich auch die gewöhnliche Unterschiedsschwelle durchaus im Rahmen des Gewöhnlichen lagen.— Es gibt somit ins Gewicht fallende Unterschiede zwischen Individuen auf höheren Ebenen der Wahrnehmung, auch wenn es sich um Personen gleicher Rasse und oft gleicher Familie handelt. Solche feineren Unterschiede pflegen sich erst innerhalb komplexerer Situationen zu zeigen. Vieles spricht dafür, daß hier Veranlagung wichtiger ist als Übung.

Ein Argument für passive Schallortung

Ich möchte mit einem letzten Hinweis schließen, nämlich über passive Schallortung und der Frage, ob sie nicht doch etwas für sich haben könnte. (Dazu auch einige kleine Demonstrationen, die ich beschreiben werde). J. P. WILSON (1966) führte folgende interessante Überlegungen aus zur Frage, ob vorhandenes Geräusch oder ein selbsterzeugter Schall für die Orientierung günstiger sei; in unseren Termini also passive oder aktive Schallortung. Er führt aus: in der Nähe einer Hindernis-

fläche mischt sich zum vorhandenen Schall ein Anteil von Reflexion von der Hindernisfläche. Beides zusammen ergibt eine Interferenz, wodurch in bezug auf bestimmte Frequenzen Anhebungen, in bezug auf andere Abschwächung erfolgt, je nach der Distanz der Fläche von der Schallquelle. Die Gesamtzusammensetzung des Schalles ist also in dieser Abhängigkeit verschieden. Nehmen wir z. B. ein Breitbandrauschen als Lärm, in dem sehr viele Frequenzen enthalten sind, dann muß sich bei Annäherung der Schallquelle an die Hindernisfläche die scheinbare Tonhöhe des Rauschens verändern. Bei Verringerung des Abstandes nämlich werden jeweils kürzere Wellenlängen durch Resonanz angehoben. Es muß somit eine Art Sirene zu hören sein, die bei Annäherung an Hindernisse höher wird.

Dies ist tatsächlich der Fall, wie man sich leicht überzeugen kann. Es gilt weiters, daß diese Tatsache im Prinzip unabhängig davon gilt, wie weit der Beobachter von der geräuschaussendenden Quelle entfernt ist. Dies wäre ein Argument für passive Schallortung.

Zur Demonstration verwende man einen Rauschgenerator, an dessen Ausgang ein Lautsprecher angeschlossen ist. Diesen Lautsprecher (am besten ohne Lautsprecherbox) nähere man einer reflektierenden Fläche. Je größer diese Fläche ist, desto deutlicher ist eine sirenenhafte Tonhöhenänderung zu hören (unabhängig von der Entfernung des Beobachters). Ebenfalls läßt sich demonstrieren, daß bei solchem Geräusch im Raume auch die Annäherung eines Beobachters (bei verbundenen Augen) an eine beliebige Hindernisfläche dieselbe sirenenartige Empfindung erzeugt, wenn auch schwächer. In allen Fällen steigt die scheinbare Tonhöhe des Rauschens an.

Es wäre tatsächlich zu überlegen, ob nicht menschliche Blinde auf diesen Faktor aufmerksam gemacht und trainiert werden könnten. Die Steilheit der Tonhöhenveränderung ist nämlich allein von der Geschwindigkeit der Annäherung an ein Hindernis abhängig. Der (zu vermeidende) Zeitpunkt des Zusammenstoßes wäre damit auch reizmäßig eindeutig gegeben. — Leider gibt es Schwierigkeiten, die dieser Methode entgegenstehen; das sind z. B. die vielen Situationen, in denen die Geräuschquelle zu nahe ist, bezogen auf die Hindernisse und daher den Sireneneffekt „maskiert“ (verdeckt), oder der Beobachter befindet sich sowohl von der Schallquelle wie vom Hindernis zu weit entfernt, und schließlich sind die Schallquellen selbst variabel und nähern sich nur selten dem Idealfall des „weißen Rauschens“. (Über Mehrdeutigkeiten, die durch den letzteren Umstand entstehen können, wird ganz am Schluß eine Demonstration angeführt.)

Zur Frage akustisch erzeugter Phantomhindernisse

Interessant in diesem Zusammenhang sind folgende Beobachtungen. Einerseits die Tatsache, daß geübte Blinde nicht leicht zu täuschen sind, wenn man beabsichtigt, durch simple Frequenz- oder Intensitätsänderung von Schallquellen bei ihnen „Phantomhindernisse“ zu erzeugen. Dies mag in einem ersten Versuch gelingen, jedoch bei Wiederholung nicht mehr.

Dieser letztere Befund, der aus unseren eigenen Untersuchungen stammt, wird im Sinne der WILSON'schen Überlegungen besser verständlich. Offenbar ist die für Hindernisflächen charakteristische Schalländerung komplexer. Wir fanden seinerzeit, daß folgende Situation — rein akustisch — am ehesten zu Hindernisphantomen führt, und zwar auch bei geübten Blinden: Man muß dafür sorgen, daß derselbe Schall, der vom Blinden ausgeht, ihm selbst aus einer Entfernung zwischen

30 und 80 cm zurückgesandt wird, — selbstverständlich durch einen Schallgeber, der so klein ist, daß er selbst aus dieser Entfernung nicht als Hindernis erkannt werden kann. Plaziert man am Ort des Blinden einen Schallgeber, der Klicks oder Rauschen aussendet und wirft man denselben Schall durch ein synchron verbundenes Miniaturgerät, das leiser geht, zurück, so entstehen unüberwindliche Täuschungen und zwar gerade dann, wenn das Phantomhindernis in ungefährer Gehgeschwindigkeit im unten angegebenen — kritischen Bereich — genähert wird (siehe Abb. 3).



Abb. 3: Erzeugung eines Phantom-Hindernisses (Beschreibung im Text).

Die hier vorliegende Situation ist ebenfalls optimal für den „WILSON-Effekt“, wie man sich leicht überzeugen kann. Zugleich aber entsteht in genau dieser Situation das oft beschriebene Phänomen der „Fernsinnempfindung“, welches von vielen Blinden (und auch Sehenden) in der Nähe von Hindernissen berichtet wird. Die typische Schalländerung scheint sich unmittelbar in eine andere Modalität umzusetzen, die eher an der Gesichtshaut als im Hören empfunden wird (vgl. dazu KOHLER 1966).

Damit scheint — bei Erlaubnis einiger Spekulation — der Kreis zur Neurophysiologie geschlossen: Zumindest das Katzenhirn zeigt nach neuesten Befunden auch solche Ganglinienzellen im Kortex, die nur und ausschließlich nur auf sirenenartige Tonhöhenänderungen von Schallreizen antworten — und nicht auf den Schall selbst, worauf WILSON verweist.

Über das Problem der unterschiedlichen Deutung gleicher Schallveränderungen

Ein letztes ungelöstes Problem, das bei einer noch so eleganten Schallanalyse bleibt, ist die Überwindung von Mehrdeutigkeiten. Insofern Schall auch für kommunikative Zwecke verwendet wird, sind manche Änderungen des Schallgeschehens auch ganz anders zu deuten. Es ist ein bisher nicht einmal angegangenes Problem, wie diese letzte und schwierigste Aufgabe gelöst werden könnte.

Zur Demonstration eines überraschenden Effektes dieser Art möge man einen gewöhnlichen Plattenspieler mit folgenden zwei Platten nacheinander belegen: die eine Platte soll Musik wiedergeben, die andere Platte ein Sprechstück. Beide Platten werden jedoch asymmetrisch aufgelegt, z. B. um 5 mm von der konzentrischen Einstellung verschoben. Der Effekt dieser Art von Auflage für Musikplatten ist sofort erkenntlich und äußerst störend. Musikalische Klassiker verwandeln sich in das Gejaule nächtlicher Katzen. Sprechstücke hingegen werden kaum verändert. Sie gewinnen sogar durch stärkere „emotionale Betonung“. In letzteren Falle also werden dieselben Frequenzänderungen kuzerhand als kommunikatives Signal gedeutet.

Dieses letztere kleine Experiment ist angetan, die Situation noch weiter zu verwirren. Man kann nichts besseres tun, als hier zu schließen und die völlige Lösung der aufgeworfenen Fragen der weiteren Forschung überlassen.

Quellennachweise

(Viele der hier aufgeführten Arbeiten liegen noch nicht im Druck vor, sondern sind vorläufige Berichte, welche zum Zweck von Tagungen und Konferenzen in vervielfältigter Form den Teilnehmern zur Verfügung standen. Da ich Gelegenheit hatte, einige derartige Tagungen zu besuchen, so 1964 die Mobility Research Conference in Rotterdam, 1966 St. Dunstan's International Conference on Sensory Devices for the Blind in London und im selben Jahre das Symposium sur les modèles bioniques des systèmes sonars animaux in Frascati bei Rom, habe ich versucht, in der gegenwärtigen Arbeit eine Art Zusammenfassung der wichtigsten Bestrebungen auf dem Gebiete der biologischen Schallortung zu geben und verständlich zu machen. Für Leser, die sich weiterinformieren wollen, sind die Adressen der jeweils zitierten Autoren — zur persönlichen Kontaktnahme — beigelegt.)

- BATTEAU, D. W. (1966): Theories of sonar systems and their application to biological organisms, Frascati Symposium (siehe oben); Adresse: Listening, Inc., 24 College Ave., Sommerville, Mass. 02144, USA.
- BAUMGARTNER, G (1964): Visual motion detection in the cat, *Science* 146 (3647): 1070 bis 1071.
- CAHLANDER, D. A. (1966): Theories of sonar systems and their application to biological organisms, Frascati Symposium; Adresse: Data Control Corp., Arden Hills, Minnesota, USA.
- EVANS, W. E. and B. A. POWELL (1966): Discrimination of different metallic plates by an echolocating delphinid, Frascati Symposium; Adresse: Marine Biology Facility, Naval Missile Center, Box 31, Code N 332, Point Mugu, Calif., USA.
- GRIFFIN, D. R. (1953): Acoustic orientation in the oil bird, *Steatornis*, *Proc. National Acad. of Sciences*, Vol. 39/8, 884—893.
- GRIFFIN, D. H. (1958): *Listening in the Dark, The acoustic Orientation of Bats and Men*, Yale University Press.

- GRIFFIN, D. R. (1966): Discriminative echolocation by bats, *Frascati Symposium*; Adresse: The Rockefeller University, New York, N. Y. 10021, USA.
- GRINNEL, A. D. (1966): Mechanisms of overcoming interference in echolocating animals, *Frascati Symposium* (siehe oben); Adresse: Dept. Zoology, UCLA, Los Angeles, Calif. 90024, USA.
- GRIFFITHS, J. W. R. (1966): Theories of sonar systems in relation to biological organisms, *Frascati Symposium*; Adresse: Dept. of Electronic and Electrical Engineering, University of Birmingham, Birmingham, GB.
- HENSON, O. W. (1966): The perception and analysis of biosonar signals by bats, *Frascati Symposium*; Adresse: Yale University, School of Medicine, Dept. of Anatomy, 333 Cedar Street, New Haven, Conn., USA.
- HUBEL, D. H. (1958): Cortical unit responses to visual stimuli in nonanesthetized cats, *Americ. J. Ophthalm.*, Vol. 46, 110–122.
- HUBEL, T. H. and T. N. WIESEL (1959): Receptive fields of single neurones in the cats striate cortex, *J. Physiol.*, Vol. 148, 574.
- HUBEL, T. H. and T. N. WIESEL (1962): Receptive Fields, Binocular Interaction and Functional Architecture in the Cat's Visual Cortex, *J. Physiol.*, Vol. 160, 106–54.
- JUNG, R., R. v. BAUMGARTEN und G. BAUMGARTNER (1952): Mikroableitungen von einzelnen Nervenzellen im optischen Cortex: Die lichtaktivierten B-Neurone, *Arch Psychiat. Nervenkr.*, Bd. 189, 521–39.
- JUNG, R. (1959): Microphysiology of cortical neurons and its significance for psychophysiology, *Anales de la Facultad de Medicina, Montevideo*, 44/3–4, 323–32.
- KAY, L. (1963): Active energy radiating systems: Ultrasonic guidance for the blind, *Proc. Internat. Congr. on Technology and Blindness, The Amer. Found. for the Blind*, 137–56.
- KAY, L. (1966): Enhanced environmental sensing by ultrasonic waves, *Frascati Symposium*; Adresse: Dept. Electrical Engineering, Univ. Canterbury, Christchurch 1, New Zealand.
- KOHLER, I. (1956): Orientierung durch den Gehörsinn, *Die Pyramide*, Jg. 5, Heft 6/7, 81–93.
- KOHLER, I. (1964): Orientation by aural clues, *Res. Bull. Amer. Found. Blind*, 4, 14–53.
- KOHLER, I. (1966): „Facial Vision“ Rehabilitated, *Frascati Symposium*; Adresse: Universität Innsbruck, Innsbruck, Schöpfstraße 41.
- LIFE BOOKS (1966): Tiere und ihr Verhalten, von N. TINBERGEN und der Redaktion von *Life, Time-Life-International*, Netherlands (die im Text zitierte Stelle ebd. S. 22/23).
- MACKAY, R. St. (1966): Experiments to conduct in order to obtain comparative results, *Frascati Symposium*; Adresse: 1624 Walnut Street, Berkeley 9, Calif., USA.
- MÖHRES, F. P. (1966)^a: Ultrasonic Orientation in *Megaderma Lyra* (Megadermatidea), *Frascati Symposium*; Adresse: Zoophysiol. Inst. d. Univ. Tübingen, Tübingen 74, Hölderlinstraße, Deutschland.
- MÖHRES, F. P. (1966)^b: General characters of acoustic orientation signals and performance of sonar in the order of Chiroptera, *Frascati Symposium*; Adresse wie oben.
- MÖHRES, F. P. (1966): Communicative characters of sonar signals in bats, *Frascati Symposium*; Adresse wie oben.
- NORRIS, K. S., W. E. EVANS and R. N. TURNER (1966): Echolocation in an Atlantic bottlenose porpoise during discrimination, *Frascati Symposium*; Adresse: Dept. Zoology, UCLA, Los Angeles 24, Calif. 90024, USA.
- POULTER, TH. C. (1966): Systems of echolocation, *Frascati Symposium*; Adresse: Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif. 94025, USA.
- POULTER, TH. C. (1966)^b: The use of active sonar by the California sea lion (*Zalophus Californianus*), *J. Audit. Research*, Vol. 6, 165–73.
- PYE, J. D. (1963): Active energy radiating systems: The bat and ultrasonic principles I, *Proc. Internat. Congr. on Technol. and Blindness, The Amer. Found. for the Blind*, 35–48.

- PYE, J. D. (1966): Synthesising the waveforms of bats pulses, *Frascati Symposium*; Adresse: Dept. Zoology, Univ. of London Kings College, Strand W. C. 2, GB.
- RICE, Ch. E. and S. H. FEINSTEIN (1965): Sonar System of the Blind: Size Discrimination, *Science*, Vol. 148, No 3673, 1107—8.
- RICE, Ch. E. (1966): The human sonar system, *Frascati Symposium*; Adresse: Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif. 94025, USA.
- SCHNITZLER, H. U. (1966): Obstacle avoidance by flying horseshoe bats, *Frascati Symposium*; Adresse: Zoophysiol. Institut, Univ. Tübingen, Tübingen 74, Hölderlinstraße, Deutschland.
- SCHUSTERMAN, R. J. (1966): Perception and determinants of underwater vocalization in the California sea lion, *Frascati Symposium*; Adresse: Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif. 94025, USA.
- WEBSTER, F. A. (1963): Active energy radiating systems: The bat and ultrasonic principles II; Acoustical control of airborne interceptions by bats, *Proc. Internat. Congr. on Technol. and Blindness*, The Amer. Found. for the Blind, 49—136.
- WEBSTER, F. R. (1966): Some acoustical differences between bats and men, *St. Dunstan's Internat. Conference* (siehe oben); Adresse: Sensory Systems Lab., P. O. Box 5145, Tucson, Arizona, USA.
- WILSON, J. P. (1966): Obstacle Detection using Ambient or Self-generated noise, *Nature*, Vol. 211, No. 5045, p. 218.

PS. Sämtliche Einzelvorträge des Frascati-Symposiums sind soeben unter dem Titel ANIMAL SONAR SYSTEMS in zwei Bänden herausgekommen. Bestellung an den Herausgeber: Dr. BUSNEL, Laboratoire de Physiologie Acoustique, INRA-CNRZ — Jouy-en-Josas-78, France. Der Preis für beide Bände ist 35 FF.

Anschrift des Verfassers: Univ.-Prof. Dr. Ivo KOHLER, Institut für Psychologie
der Universität Innsbruck, A-6020 Innsbruck, Schöpfstraße 41

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte des naturwissenschaftlichen-medizinischen Verein Innsbruck](#)

Jahr/Year: 1967

Band/Volume: [55](#)

Autor(en)/Author(s): Kohler Ivo

Artikel/Article: [Der gegenwärtige Stand der Forschung auf dem Gebiet der Erkennung von Objekten durch den Gehörsinn. 189-210](#)