

UNTERSUCHUNG AKUSTISCHER SIGNALE ZUR VOGELVERGRÄMUNG.

von KARL J.BEUTER, Frankfurt/Main und RAINER WEISS, Frankfurt/Main.

Zusammenfassung: Die Wirksamkeit akustischer Signale zur Vogelvergrämung wurde untersucht. Dazu wurden physiologische und Verhaltensstudien durchgeführt, um das am meisten erfolgversprechende Verfahren zu ergründen. Ultra-, Infra- und hörbarer Schall in unterschiedlichen Frequenzen und mit einer großen Modulationsvarietät wurden getestet. Es ergab sich, daß Ultra- und Infraschall nicht zu dem gewünschten Vergrämungseffekt führten, während eine Gruppe frequenzmodulierter, hörbarer Signale bei Möwen eine Vergrämungswirkung zeigten. Das Vergrämungssignal kann durch eine elektroakustische Anlage erzeugt werden. Eine solche Anlage wurde entwickelt.

In der nachfolgenden Arbeit werden grundsätzliche Gegebenheiten des Vogelgehörs sowie die Ergebnisse einiger Feldexperimente, bezogen auf Möwen, beschrieben.

Summary: The effectiveness of sound signals for bird scaring have been investigated. Physiological and behavioural data were used to identify the most promising approach. Ultrasound and infrasound do not produce the desired scaring effect, whereas a group of frequency-modulated audible signals have proved effective for bird control. The scaring signal can be generated by an electroacoustic device; such device has been developed.

Fundamental properties of the bird's ear and some results of a field test to scare away gulls are described in the following paper.

1. Einleitung.

Wenn Vögel eine Gefahr für den Luftverkehr oder eine Belastung der Umgebung darstellen, müssen Maßnahmen zur Bestandsminderung ergriffen werden.

Bei allen Verfahren zur Vogelbekämpfung ist eine Reihe von gesetzlichen Vorschriften zu berücksichtigen. Dazu gehören Regelungen, die eine technische Anlage selbst betreffen, z.B. der Immissionsschutz für die Nachbarschaft, speziell aber solche, die auf die Bekämpfungsverfahren anzuwenden sind wie Lärm-

schutz, Bundes- und Landesjagdgesetze, vornehmlich das Bundesnaturschutzgesetz und die Bundesartenschutzverordnung, die in ihrer Neufassung seit dem 01.01. 1987 in Kraft getreten sind, sowie Flugsicherheitsvorschriften und -richtlinien. Es ist daher bei jedem Verfahren zu prüfen, ob seine Anwendung im Sinne der gesetzlichen Vorschriften, Umweltschutz- und auch Arbeitsschutzvorschriften unbedenklich ist.

Die Vogelbekämpfungsmethoden (HILD, 1970) lassen sich in die drei Hauptgruppen Dezimierung, Biotopmanagement und Vergrämung aufteilen. Gebräuchlich ist auch die Gliederung in technische Maßnahmen, Fang, Abschuß und Jagd sowie Biotopbeeinflussung durch Entzug der Ressourcen.

Die bisherigen Vergrämungsmittel (z.B. Einsatz von Fuchshunden, Vogelscheuchen, pyroakustischen Installationen, Silberglaskugeln, Modellflugzeugen Chemikalien) zeigen teilweise gute Wirkung, unterliegen aber auch deutlichen Einschränkungen wegen möglicher Gefahren und hoher Kosten. Die Vergrämung mit Tieren erfordert z.B. ausgebildetes Betreuungspersonal und ist bei Dauereinsatz mit erheblichen Kosten verbunden. Vogelscheuchen zeigen, auch wenn sie mit einem Antrieb bewegt werden, nur mäßige Wirkung und reichen alleine für eine erfolgreiche Vogelvergrämung nicht aus. Der in Vorversuchen auf einem Flugplatz vor vielen Jahren erfolgversprechend eingesetzte Laser birgt Gesundheitsrisiken ebenso wie intensive Mikrowellenbestrahlung. Dabei ist noch nicht nachgewiesen, ob große Vögel überhaupt auf Mikrowellen dauerhaft ansprechen. Die Risiken einer Überdosierung, der Vergiftung des Grundwassers und der Schädigung anderer Tierarten machen die chemische Vergrämung trotz ihrer Wirksamkeit äußerst problematisch.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß es unter den genannten Verfahren noch kein umweltfreundliches Vergrämungsmittel gibt, das ausreichenden Erfolg, also die Fernhaltung der Vögel sichert. Nachdem erwiesen ist, daß auch drastische Maßnahmen keineswegs immer zum Erfolg führen, oder daß bei ihrer Anwendung gefährliche Nebenwirkungen auftreten, ist es sinnvoll, nach neuen wirksamen Vergrämungsmethoden zu suchen. Akustische Verfahren stehen dabei aus verschiedenen Gründen im Vordergrund.

In den folgenden Abschnitten wird exemplarisch die akustische Vergrämung von Lachmöwen behandelt. Diese Vogelart besitzt besondere Bedeutung wegen ihrer Größe, die beim Vogelschlag einen entscheidenden Faktor darstellt, und wegen ihrer während der letzten Jahre im Binnenland scheinbar wachsenden Individuenzahl. Daher kann der Lachmöwenbesatz auf Flugplätzen, aber auch auf

Mülldeponien und an Klärwerken beträchtliche wirtschaftliche Schäden verursachen, denen durch unschädliche Mittel begegnet werden soll. Am Beispiel der Lachmöwen läßt sich auch das Vorgehen für andere Vogelarten ableiten, so daß die gewonnenen Erkenntnisse z.B. auch für Rabenkrähen, Kiebitze, Tauben und möglicherweise auch Greifvögel nutzbar sind.

2. Schallwirkungen auf Mensch und Tier.

2.1. Akustische Kenngrößen.

Die zeitlichen und räumlichen Merkmale einer harmonischen Schallwelle werden durch ihre Frequenz in Hertz (Hz) und ihre Wellenlänge in Metern (m) charakterisiert. Zwischen der Schallausbreitungsgeschwindigkeit c , der Wellenlänge λ und der Frequenz f besteht die einfache Beziehung

$$c = \lambda f$$

Die vom Ohr wahrgenommene Tonhöhe eines Reintones ist allein durch seine Frequenz bestimmt. Auch für den Menschen unhörbare Wellen in der Luft werden in der Physik als Schall bezeichnet. Vom Menschen hörbarer Schall, der sog. Hörschall, liegt im Frequenzbereich von etwa 16 Hz bis 16 kHz, der Schall mit Frequenzen unterhalb von 16 Hz heißt Infraschall und jener mit Frequenzen über 16 kHz heißt Ultraschall.

Neben der Frequenz wird die Lautstärke des Schalls vom Gehör direkt wahrgenommen. Die Lautstärke hängt eng zusammen mit dem physikalisch meßbaren Schalldruck in Pascal (Pa) und dem zugehörigen Schalldruckpegel in $\text{dB re. } 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$.

In der physiologischen Akustik spielen daher die Begriffspaare Frequenz-Tonhöhe und Schalldruckpegel-Empfundene Lautstärke eine zentrale Rolle. Obwohl sie bei der Definition der Begriffe wesentlich sind, besitzen die Reintöne, z.B. ein reiner Pfeifton, in der akustischen Praxis und in der Natur geringere Bedeutung. Dagegen sind Klänge, das sind Gemische von Reintönen, und Geräusche, das sind alle übrigen Schallsignale, in der menschlichen und tierischen Kommunikation wesentlich. Aus physikalischer Sicht können Geräusche als Summe einer Vielzahl von Reintönen mit unterschiedlichen Pegeln und Phasenlagen aufgefaßt werden. Der Anteil einzelner Frequenzbänder in einem Schallsignal, z.B. in einem Knall oder in einer Vogelstimme, wird dabei mittels Fourieranalyse im sog. Amplitudenspektrum quantitativ dargestellt.

2.2. Kommunikationssignale.

Die Kommunikationssignale besitzen zumeist eine komplizierte Frequenz-Zeitstruktur, können in einzelne Laute oder Silben eingeteilt werden und sind artspezifisch. Menschliche Sprache überdeckt den Frequenzbereich zwischen etwa 25 Hz bis 10 kHz, eine Verständigung ist aber noch in einem eingegrenzten Frequenzband zwischen 500 Hz und 2500 Hz ohne weiteres möglich. Die Schalldruckspitzenpegel in 1 m Entfernung liegen bei normaler Sprache um 60 bis 65 dB, beim Schreien etwa um 75 dB. Auch Vogelgezwitscher und andere Kommunikationslaute weisen Pegel um 70 dB auf; in der Natur findet man z.T. sogar deutlich höhere Pegel. So wurden bei Fledermaus-Ortungslauten Schalldruckpegel bis 120 dB in 10 cm Entfernung, das sind 100 dB in 1 m Entfernung, gemessen. Die höchsten Frequenzen von 140 kHz werden bei Fledermäusen und Delphinen beobachtet, aber auch viele Nagetiere erzeugen Laute im Ultraschallbereich, die sich bei Mäusen bis etwa 90 kHz erstrecken (MARKL/EHRET,1973). Die höchsten Frequenzen im Vogelgesang wurden beim "Cowbird" mit 6 bis 11 kHz beobachtet, bei keiner anderen Vogelart wurden von GREENEWALT (1968) höhere Frequenzen gefunden. Das niederfrequente Ende des Vogelgesanges liegt im Bereich um einige Hertz.

2.3. Technische Schallquellen.

Lärmquellen sind aus der täglichen Erfahrung bekannt; etwa ab 75 dB Schalldruckpegel wird durch Lärm die Sprachverständlichkeit erheblich beeinträchtigt. Lärmquellen im Hörbereich sollen an dieser Stelle nicht näher erörtert werden, bekannte Lärmquellen im Ultraschallbereich sind technische Ultraschallreinigungs-, -schweiß- und -bohrgeräte. Sie erzeugen z.T. Luftschallpegel bis 120 dB in 1 m Entfernung. Infrashall wird hauptsächlich bei der Bewegung größerer Luftvolumina erzeugt. Größere Ventilatoren, bewegte Fahrzeuge und Wetterfronten strahlen z.T. hohe Infrashallpegel ab. Typische Infrashallpegel in fahrenden Autos oder Eisenbahnen liegen um 110 dB, das Frequenzspektrum kann sich über mehrere Dekaden erstrecken.

Eine gute Einschätzung der akustischen Schalldruckpegel erhält man aus dem folgenden Beispiel: Der Schalldruck über dem Erdboden nimmt um rund 12.5 Pa pro Höhenmeter ab. Bei einer periodischen Auf-Ab-Bewegung innerhalb eines Meters beträgt daher der effektive Schallwechseldruck 4.4 Pa entsprechend 107 dB. Bei einer Folge von Kniebeugen wird das menschliche Ohr also allein

durch die Luftdruckänderung mit einem Infraschallpegel von 107 dB bei rund 1 Hz belastet. Im Hörfrequenzbereich um 1 kHz wäre dies ein sehr gehörschädlicher Schalldruckpegel.

Technische Schallquellen in Form von Lautsprechern, Pfeifen und Sirenen spielen im täglichen Leben eine wichtige Rolle. Ihre abgestrahlte Schalleistung läßt sich anhand ihres Wirkungsgrades leicht abschätzen. Elektrodynamische Lautsprecher weisen Wirkungsgrade bis etwa 5 % auf, Sirenen und spezielle Pfeifen können bis auf einen Wirkungsgrad von 1 %, mit Anpassung über 30 % kommen. Akustische Leistungen von 5 W, entsprechend einer eingespeisten elektrischen Leistung von über 1000 W, sind mit normalen Lautsprechern kaum mehr zu erreichen. Nimmt man kugelförmige Abstrahlung an, so kommt man damit auf einen Schalldruckpegel von 117 dB in 1 m Abstand. Durch Bündelung mit Trichtern läßt sich dieser Pegel noch etwas steigern. Die kontrollierte Abstrahlung von Schallsignalen im freien Schallfeld mit über 140 dB ist im Hörbereich nur mit äußerst hohem Aufwand oder durch Kanonen und Explosionen zu realisieren.

2.4. Die biologische Wirkung von Schall.

Das adäquate und auch empfindlichste Organ für den Schall ist das Gehör. Am leichtesten und mit dem geringsten Leistungsaufwand ist daher eine biologische Wirkung nur über das Gehör zu erreichen. Die Empfindlichkeit des Gehörs wird durch die Hörschwellenkurve charakterisiert. In ihr ist der niedrigste Schalldruckpegel über der Frequenz aufgetragen, bei dem erstmals eine Tonwahrnehmung auftritt. Generell steigt die Hörschwellenkurve zu höheren und tieferen Frequenzen hin an, dazwischen liegt ein Bereich besten Hörens (Abb.1).

Zweifellos gibt die Hörschwellenkurve die genaueste Auskunft über die Empfindlichkeit des Gehörs. Eine Einteilung nach unterer und oberer Frequenzgrenze des Gehörs ist zwar einfacher, aber dafür relativ willkürlich. Häufig legt man die untere und obere Hörgrenze so fest, daß dort die Empfindlichkeit um 60 dB gegenüber der Frequenz besten Hörens abgefallen ist.

In manchen älteren Untersuchungen wurde der Hörbereich ziemlich willkürlich festgelegt. Vor allem waren dort die Reizsituationen nicht immer sauber definiert. So wurden z.T. Ultraschallsignale, musikalische Geräusche und andere Signale angeboten, welche auch Komponenten bei tieferen Frequenzen enthielten. Solche Versuchsanordnungen gestatten es natürlich nicht, obere Hörgrenzen

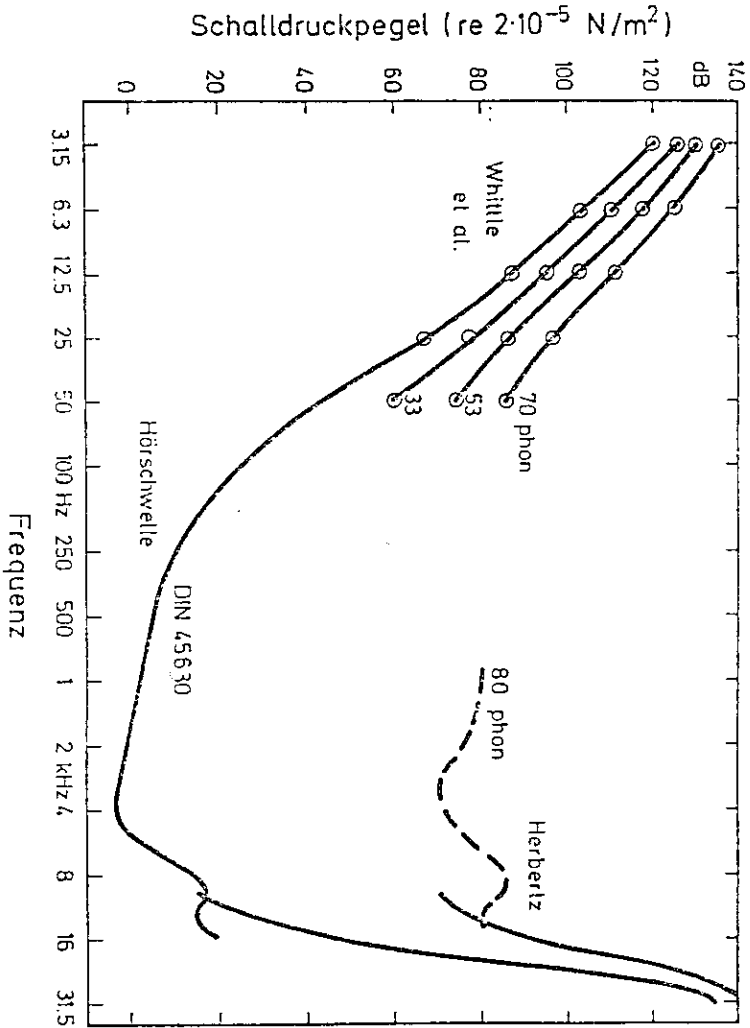


Abb.1: Auf den Infra- und Ultraschallbereich ausgedehnte Hörschwellenkurve gleicher Lautstärke beim Menschen.

herauszufinden. Entsprechendes gilt für die untere Hörgrenze.

Wegen der überaus komplexen und leistungsfähigen Signalverarbeitung im Hörsystem läßt sich aus der Hörschwellenkurve alleine nicht ohne weiteres ableiten, in welchem Frequenzbereich mit überschwelligen Schallsignalen die stärkste Reaktion auszulösen ist. Die gewünschte Reaktion wird man nämlich nur mit verhaltensrelevanten Signalen auslösen. Zusätzlich zur Hörschwellenbestimmung müssen daher in Verhaltensexperimenten adäquate Schallsignalformen ermittelt werden.

Mit immer höheren Schallpegeln erreicht man schließlich Pegel, die eine temporäre Schwellenverschiebung (TTS: Temporal Threshold Shift) erzeugen und damit für einen nachfolgenden Zeitraum die Empfindlichkeit des Gehörs mindern. Auch die TTS ist frequenzabhängig. Anhaltende oder häufige Exposition mit derartig hohen Pegeln kann zu Gehörschäden führen. Es sind daher gesetzliche Grenzen der Belastbarkeit festgelegt, die eine unzulässige Exposition der Menschen im Einflußbereich von Schallquellen ausschließen sollen.

Mit weiterer Steigerung der Schallpegel erzeugt man Schmerzgefühle. Dementsprechend definiert man eine Schmerzschwelle. Sie läßt sich im Vergleich zur Hörschwelle weniger genau bestimmen und ist wesentlich weniger frequenzabhängig. Im Hörbereich des Menschen liegt sie bei etwa 130 dB. Ab diesem Schalldruckpegel sind auch extraaurale Schallwirkungen festzustellen. Sie äußern sich in Schwindelgefühlen, Übelkeit und Erbrechen. Außerdem besteht die Gefahr akuter bleibender Gehörschäden. Infra- und Ultraschall erzeugen bei Dauereinwirkung ab etwa 140 dB ähnliche Wirkungen.

Intensiver Luftultraschall, der mit Sirenen, Pfeifen und anderen Techniken erzeugt wird, erwies sich bei hohen Pegeln als schädlich. Es zeigte sich, daß Ultraschallpegel über 140 dB zu Übelkeit, Schwindel und Benommenheit führten. Man führte hierzu sogar den Begriff der Ultraschallkrankheit ein. Eine solche Sonderbehandlung der Ultraschallwirkungen erwies sich aber bald als nicht gerechtfertigt, weil sich die sog. Ultraschallkrankheit nicht von den Symptomen unterscheidet, die man mit ähnlichen Pegeln auch beim Hörschall sogar bei niedrigeren Pegeln und beim Infraschall feststellt. Im niederfrequenten Bereich werden zum Teil die Körperhöhlräume zum Mitschwingen angeregt. Aber auch hier ist zu beachten, daß die vom Schallfeld übertragenen Leistungen bei Schalldruckpegeln bis etwa 140 dB immer noch relativ klein sind und damit keine besonders heftigen Wirkungen auslösen können. Nur über die für den Schallempfang angepaßten Gehörorgane, welche infolge ihrer besonderen Konstruktion

die Schallenergie mit geringen Verlusten übernehmen, sind deshalb bereits bei Schalldruckpegeln ab etwa 60 dB deutliche Schallwirkungen zu erwarten. Das Ziel von Geräteentwicklungen zur Vogelvergrämung muß es sein, bei möglichst niedrigen Schalldruckpegeln hohe Wirkung zu erzielen.

2.5. Hörschwellen und Hörbereiche von Vögeln und Kleinsäugetern.

Die quantitative Messung der Hörschwellen und Hörbereiche von Vögeln begann bereits vor rund 50 Jahren mit Untersuchungen an Sperlingen (BRAND/KELLOGG, 1939; KNECHT/EDWARDS, 1943). SCHWARTZKOPF (1949) bestimmte im Verhaltensexperiment das erste Audiogramm des Dompfaffen. Die systematische Entwicklung der Konditionierungsmethode führte danach bald zu einer Reihe methodisch sorgfältig ausgeführter Messungen und recht genau reproduzierbaren Ergebnissen.

Die Dressurtechniken und ihre theoretischen Hintergründe sind z.B. bei DOOLING (1969) und GAY (1973) im Detail beschrieben.

Weil sich Versuchsaufbau, Dressurmethode, Meßverfahren und vor allem der Umgebungsgeräuschpegel auf die Antwort des Versuchstieres auswirken, ist die absolute Hörschwelle, die meist bis in den Bereich um 0 dB Schalldruckpegel heruntergeht, nicht immer sicher festzustellen. Den relativen Verlauf der Hörkurve kann man dagegen recht gut absichern.

In der Literatur über Hörschwellenmessungen wurden keine Daten von Möwen und Krähen gefunden. Um Hinweise über deren Hörvermögen zu finden, war es daher notwendig, die vorhandenen Daten über Wirbeltiere und andere Vogelarten vergleichend auszuwerten und so Erwartungswerte für die interessierenden Arten zu erhalten. Grundlagen der Vergleiche sind Verhaltenshörschwellenkurven, neurophysiologische Daten und anatomische Strukturanalysen.

Eine beliebte Faustregel besagt, daß die obere Grenzfrequenz des Hörens mit abnehmender Körpergröße ansteigt. So findet man bei Mäusen (*Mus musculus*) die in Abb.2) dargestellten Hörschwellenkurven und liest daraus als obere Hörgrenze etwa 80 kHz ab. Der grobe Verlauf der Hörschwelle findet sich invertiert auch im gemittelten Spektrum der Kommunikationslaute von jungen Mäusen derselben Art (Abb.3), woraus eine sinnvolle Zuordnung des Hörvermögens zu artspezifischen Lauten abzulesen ist. Wesentlich ausgeprägtere Zuordnungen zwischen filterartigen Strukturen im Hörorgan und artspezifischen Lauten findet man im Ortungssystem der Fledermäuse. Für diese Faustregel gibt es aber zahlreiche Gegenbeispiele.

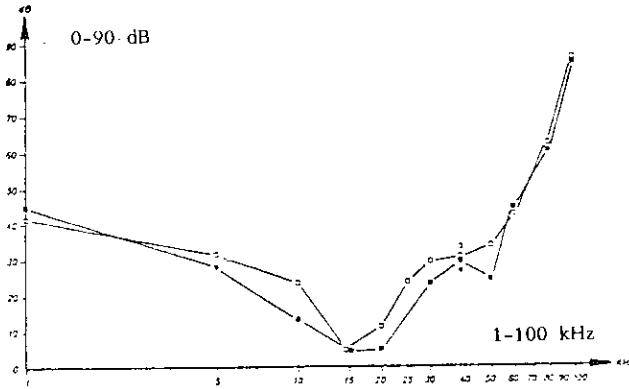


Abb.2 : Hörschwellen der Maus (*Mus musculus*) aus Verhaltensexperimenten mit Straf- und Belohnungsdressur nach MARKL/EHRET (1973).

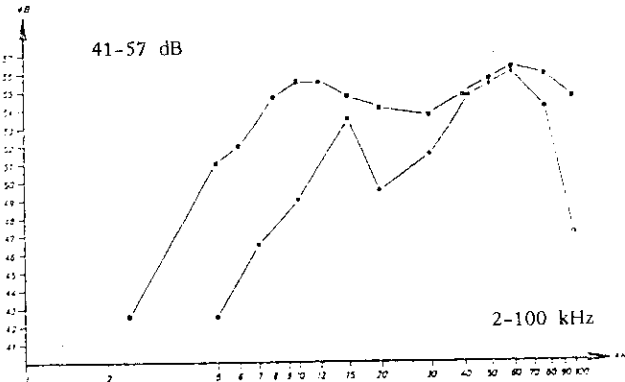


Abb.3 : Intensitätsspektrum der Laute junger Mäuse. Obere Kurve: Schmerzscrei 8 Tage alter Mäuse. Untere Kurve: Laute des Unwohlseins 2 Tage alter Mäuse. (Nach MERKL/EHRET, 1973).

Das ausgezeichnete Hörvermögen kleinerer Säugetiere und insbesondere der Nagetiere findet nämlich keine Entsprechung in der Vogelwelt. Aus den Abb.4 und 5) ist vielmehr zu entnehmen, das bei keinem der untersuchten Vögel die obere Hörgrenze höher als 11 kHz lag. Einige weitere Merkmale der Hörschwellenkurven in den Abb. 4/5) sind hervorzuheben: bei den untersuchten Arten Star, Kanarienvogel, Dompfaff, Taube, Fasan, Red-winged Blackbird, Cowbird, Hausfink und Eule liegen die Frequenzen besten Hörens zwischen 1 und 4 kHz. Bei den höheren Frequenzen des Hörbereiches nimmt die Empfindlichkeit mit rund 25 dB/Oktave, teilweise noch wesentlich stärker ab. Die Steilheit dieses Empfindlichkeitsabfalls nimmt mit steigender Frequenz zu. Bei größeren Vögeln liegen die Frequenzen besten Hörens und die Grenzen des Hörbereichs im allgemeinen niedriger als bei tiefen Frequenzen. Auch der Vergleich mit der Katze und dem Chinchilla in Abb.5) zeigt, daß die obere Hörgrenze der Vögel weit unter der von wesentlich größeren Säugetieren zurückbleibt.

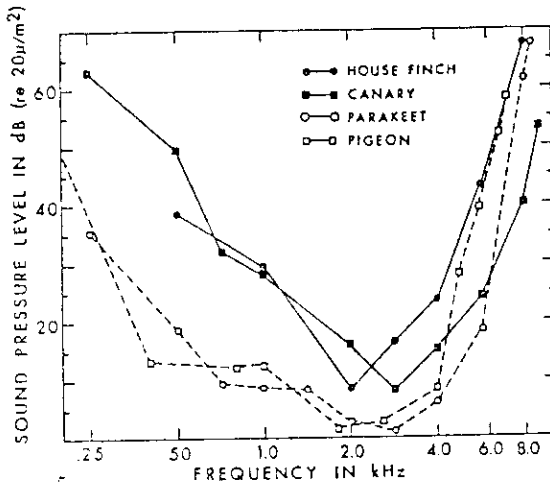


Abb.4: Mittlere Hörschwellenkurven von vier Vogelarten nach DOOLING (1978).

Die Hörschwelle der Felsentaube (*Columba livia*), größenordnungsmäßig in etwa mit Lachmöwe und Rabenkrähe vergleichbar, wurde in Abb.6) auf der Basis von Messungen mehrerer Autoren für den gesamten Hörbereich zusammengefaßt. Hier ist zu erkennen, daß die Empfindlichkeit des Taubengehörs bei 6

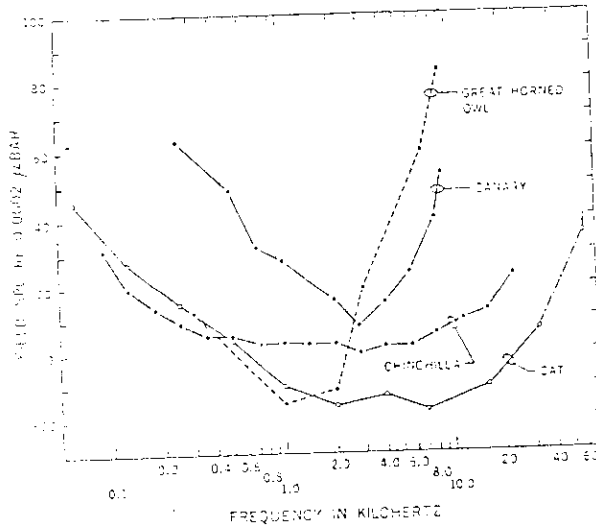


Abb.5: Hörschwellenkurven für zwei nachts jagende Tiere (Katze und Eule) einen Singvogel (Kanarienvogel) und ein nachtaktives Nagetier (Chinchilla) nach DOOLING et al.(1971).

Hz noch etwa der des Menschen bei 30 Hz entspricht. Bei 6 Hz hat die Taube eine um mehr als 50 dB höhere Empfindlichkeit als der Mensch. Damit kann die Taube natürlich vorkommenden Infraschall deutlich überschwellig hören, der für den Menschen noch weit unter der Wahrnehmungsgrenze liegt. Der Bereich besten Hörens liegt bei der Taube ähnlich wie beim Menschen um 2 kHz, ist aber nicht so breitbandig und geht oberhalb von 4 kHz in einen steilen Empfindlichkeitsabfall mit etwa 60 dB/Oktave über.

In den Verhaltensexperimenten erhält man immer die Antwort des Tieres als ganzes, wobei über die physiologische Basis des Verhaltens noch wenig ausgesagt werden kann. Mit neurophysiologischen Methoden gewinnt man dagegen Einblick in die Vorgänge bei der Signalverarbeitung im Nervensystem. Im Gegensatz zu Verhaltensdaten liefert die Neurophysiologie Detailinformationen aus den verschiedenen Ebenen der Hörbahn, die dann in ihrer Gesamtheit Hinweise auf die Reaktion des Gesamtsystems Tier liefern. In der Neurophysiologie gewinnt man Hörschwellendaten aus Aufnahmen von Summenpotentialen (EP's = Evoked Potentials) und aus Einzelableitungen. Meist mißt man dabei die sog. "Tuning Curves", ungefähr vergleichbar mit Schwellenkurven des Ein-

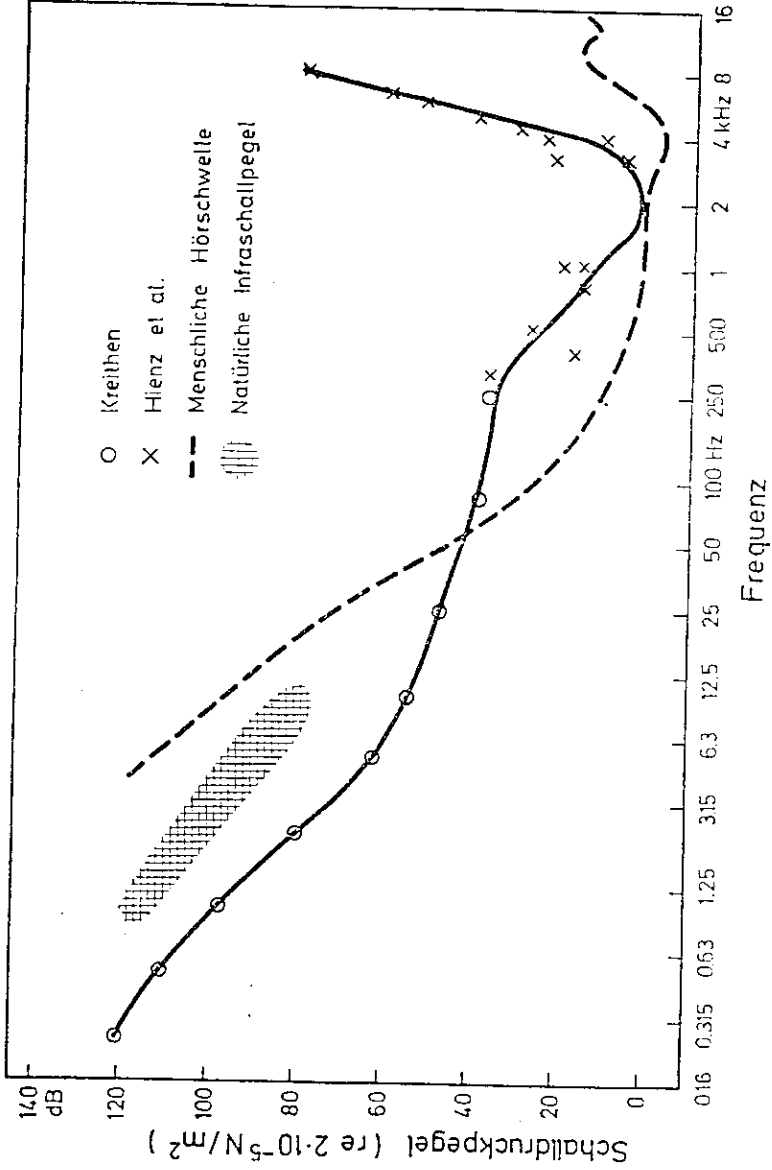


Abb.6 : Hörschwellenkurve der Felsentaube (*Columba livia*) und des Menschen nach KREITHEN (1979) und HINZ et al. (1977).

zelneurons oder Frequenzgangfunktionen von Bandpaßfiltern. Einige charakteristische Daten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Höchste und tiefste Bestfrequenzen (CF) und Gewichte bei verschiedenen Vogelarten; aus Ableitungen von Einzelneuronen (KONISHI, 1970).

Art	Tiefste CF (Hz)	Höchste CF (Hz)	Gewicht (g)
<i>Sturnella neglecta</i>	250	6200	100
<i>Turdus migratorius</i>	282	7676	74
<i>Sturnus vulgaris</i>	251	6251	70
<i>Zonotrichia leucophrys</i>	655 (?)	8851	28
<i>Zonotrichia albicollis</i>	150	9016	28
<i>Passer domesticus</i>	135	6566	25
<i>Serinus canarius</i>	403	6497	20
<i>Junco hyemalis</i>	350	8682	20
<i>Melospiza melodia</i>	447	99382	20
<i>Spizella passerina</i>	501	8514	10

Der dritte Ansatz zur Beurteilung des Hörvermögens beruht auf anatomischen Strukturanalysen und Studien der Innervation des Gehörs. Neben allgemeinen Beschreibungen des Vogelgehörs (SCHWARTZKOPF, 1955; VAN TYNE/BERGER, 1971; GAUDIN, 1968; MARSHAL, 1961) gibt es einige vergleichende Untersuchungen (POPPER/FAY, 1980). Für die Einordnung der Funktion und Struktur des Gehörs sind Arbeiten zur Evolution wesentlich (MASTERTON et al. 1969; MANLEY, 1971). Die Übertragungseigenschaften des Mittelohres bei Reptilien, Vögeln und Säugetieren wurden von SAUNDERS/JOHNSTONE (1972) untersucht. Daten zur Struktur und Innervation des Innenohres von Tauben geben TAKASAKA/SMITH (1971) an.

Strukturell ist das Vogelohr näher mit dem der Reptilien als mit dem der Säugetiere verwandt. Vögel zeigen einen gestreckten Aufbau der Cochlea. Das wichtigste Unterscheidungsmerkmal ist die Columella, der einzige Gehörknochen im Mittelohr der Vögel und Reptilien. Die Columella entspricht dem Steigbügel der Säuger und ist in ähnlicher Weise wie bei diesen an das ovale Fenster, den Eingang zum Innenohr gekoppelt. Das Trommelfell der Vögel ist zeltförmig nach außen gefaltet. Die Columella führt unter einem Winkel von rund 50° an das Trommelfell heran. Aus den Hebelverhältnissen liest man ab, daß

(GAUDIN, 1968) bei Annahme einer Kippbewegung die Auslenkung des Trommelfells etwa um den Faktor fünf bis sechs unternetzt und damit die Kraft entsprechend verstärkt wird. Bei Säugetieren liegt das Hebelverhältnis wesentlich niedriger (etwa 3). Beobachtungen der makroskopischen Auslenkung von GAUDIN (1968) weisen darauf hin, daß die Columella eine Hebelbewegung ausführt. Unter Annahme einer Stempelbewegung wurde von SAUNDERS/JOHNSTONE (1972) mit der Mößbauer-Technik eine Untersetzung der Auslenkung vom Trommelfell zum ovalen Fenster um den Faktor drei gemessen.

Obwohl das Ohr der Vögel und Reptilien im Vergleich zu den Säugetieren als entwicklungsgeschichtlich älter eingestuft wird, kann man von der Funktion und Struktur her die Columella ohne weiteres als gleichwertig zu den drei Gehörknöchelchen der Säugetiere betrachten. Es erscheint aber möglich, daß die Struktur der Columella für die Übertragung höherer Frequenzen weniger geeignet ist. Eine endgültige Aussage, warum die obere Hörgrenze der Vögel wesentlich niedriger als die vergleichbarer Säuger liegt, erscheint nach den bis heute vorliegenden Daten noch nicht möglich (SACHS et al., 1978)

Nach dem vorliegenden Datenmaterial über das Hörvermögen der Vögel erscheint es ausgeschlossen, daß Vögel Schall mit Frequenzen über 12 kHz hören können. Damit ist eine Hörempfindung für die noch höheren Ultraschallfrequenzen erst recht nicht zu erwarten. Auch gibt es keine Hinweise in der wissenschaftlichen Literatur und in Verhaltensbeobachtungen oder in Merkmalen der Vogellaute, die auf eine irgendwie geartete Bedeutung des Ultraschalls für das Vogelgehör schließen lassen.

3. Methoden zur Ermittlung der Wirksamkeit akustischer Signale.

3.1. Experimenteller Ansatz.

Hörbarer Schall, Infraschall und Ultraschall wurden an Lachmöwen im Labor mit neurophysiologischen Methoden und im Freiland mit Verhaltenstests auf ihre Eignung für die Vogelvergrämung untersucht. In der neurophysiologischen Studie wurden evozierte Potentiale im Mittelhirn der Lachmöwe gemessen. Diese außerordentlich sensitive Methode erlaubt es, sowohl die Schwellen des normalen Hörbereichs zu bestimmen als auch den Infra- bzw. Ultraschallbereich abzutasten.

Die Freilandversuche wurden in einem städtischen Klärwerk mit einem hohen

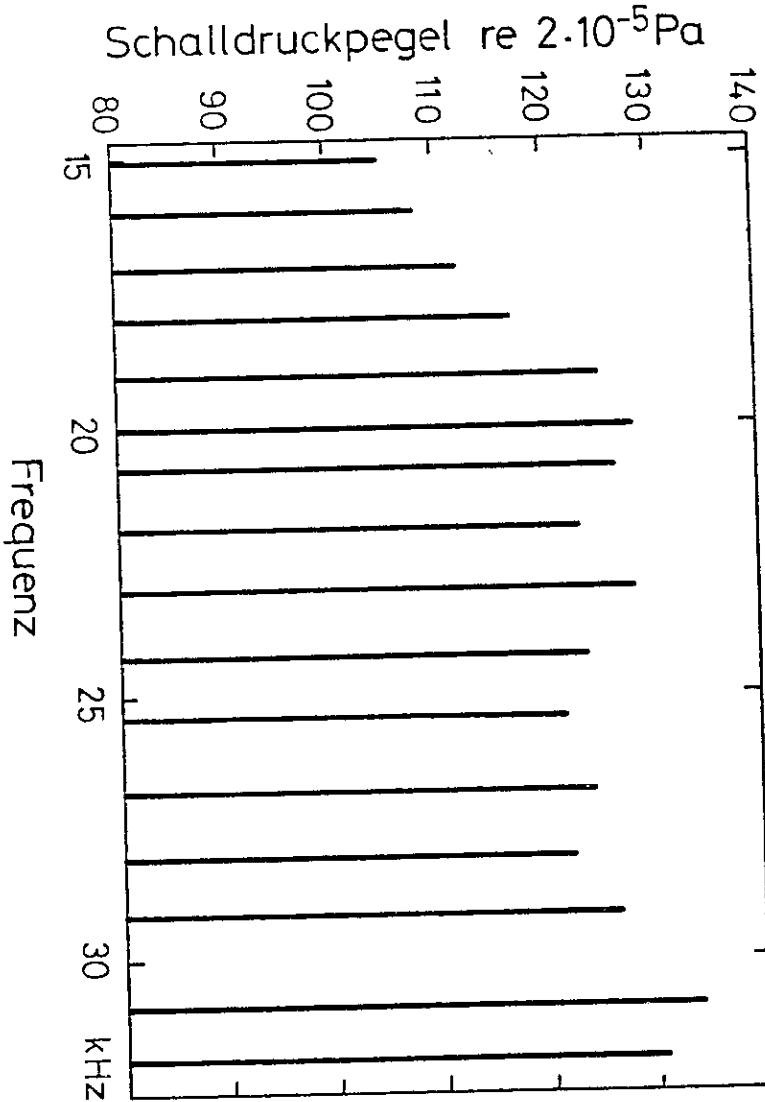


Abb.7 : Frequenzgang des Ultraschallbiegeschwingers, gemessen in 2 m Entfernung bei einer Eingangsspannung von $U = 100$ V an der Piezokeramik. Der Linienabstand ist durch die Biegeschwingerlänge und die Biegewellenlänge bestimmt.

Möwenbestand vorgenommen. Die gute Zugänglichkeit der Anlagen gestattete es, die Schallquellen in geringem Abstand von den Vögeln anzubringen und damit auch sehr hohe Schalldruckpegel auf die Tiere einwirken zu lassen. Die Schallquellen wurden einige Tage vor den Versuchen aufgestellt, so daß sich die Möwen an die Anwesenheit der Geräte gewöhnt hatten. Die Wirksamkeit der Schallsignale wurde nach einer sechsstufigen Skala (Tabelle 2) protokolliert.

Tabelle 2: Definition der Reaktionsstufen.

Reaktionsstufe	Beschreibung
0	Keine Reaktion.
1	Vereinzelte Bewegungen, kein Auffliegen.
2	Möwen fliegen auf, kehren sofort trotz eingeschalteten Signals an den ursprünglichen Standort zurück.
3	Möwen kreisen in der Nähe des ursprünglichen Standorts, geringe Wirkung auf Möwen in der Luft.
4	Möwen kreisen in ca. 50 m, kehren nach Abschalten des Signals relativ schnell zurück (20 s).
5	Möwen fliegen nach Einschalten des Signals in flachem Winkel weg, Rückkehr nach 1-5 Minuten.
6	Möwen fliegen nach Einschalten des Signals in flachem Winkel weg, Entfernung vom ursprünglichen Standort bis über 1 km (außer Sicht); Rückkehrdauer 5 Minuten.

3.2. Schallerzeugung.

Die marktüblichen Ultraschallgeräte liefern Schalldruckpegel, die als unzureichend angesehen werden. Deshalb wurde für die Durchführung von Vergrämungsversuchen ein vom Battelle-Institut entwickelter Piezoschwinger benutzt, der aus einem Stufenrüssel mit einer als Biegeschwinger ausgeführten Abstrahlfläche besteht. Die Anregung erfolgte mit einem frequenzvariablen Sinusgenerator, dessen Ausgangssignal leistungsverstärkt über einen Anpassungstransformator auf die Piezoscheiben übertragen wurde.

Der Stufenrüssel ist auf eine Frequenz von 20 kHz abgestimmt; der Schwinger besteht aus nichtrostendem Stahl. Mit einem Biegestreifen von 20 mm Breite und einer Länge von 775 mm sind Pegel bis zu 135 dB in 1 m Entfernung erreichbar. Durch Variation der Frequenz der Schwingungsanregung ist eine wirkungsvolle Schallabstrahlung im Frequenzbereich von 18 kHz bis 50 kHz möglich (Abb.7).

Mit handelsüblichen Hochleistungs-Tiefton-Lautsprecheranordnungen sind Frequenzübertragungsbereiche von 20 Hz bis 4 kHz abgedeckt. Bei tiefen Frequenzen werden damit nur noch sehr geringe Schalldruckpegel abgestrahlt. Dieser Effekt ist bedingt durch den akustischen Kurzschluß, der auftritt, wenn die Wellenlänge des Luftschalls wesentlich größer ist als die Gehäuseabmessungen. Dieser akustische Kurzschluß wird vermieden, wenn man einen Rohrresonator verwendet. Die Anregung kann auf verschiedene Weise erfolgen. Notwendig ist ein möglichst hoher Hub der Luftsäule im Rohr. Bei Lautsprecheranregung ist der erreichbare Infraschallpegel durch die konstruktiv bedingte Luftspalttiefe von maximal 9 mm (PSL 320/400 Isophon) begrenzt. Der Schalldruckpegel in 10 m Entfernung ist dadurch auf 60 dB bei 10 Hz begrenzt.

Zur Erzielung von höheren Infraschallpegeln wurde ein mechanisches Schwingungssystem entwickelt, dessen Hub um den Faktor 10 höher als bei Lautsprechern liegt. Durch eine Volumentransformation wird damit der Schwingungshub der Luftsäule zusätzlich um den Faktor 4 erhöht.

Die tieffrequenten Töne von 26 Hz (67 dB in 20 m Entfernung) bis 200 Hz (84 dB in 20 m Entfernung) wurden mit einem lautsprecherangeregten Rohrresonator der Länge 2,5 m erzeugt. Abb.8 zeigt den Frequenzgang eines solchen Rohrresonators. Die Grundfrequenz f_0 lag bei 68 Hz, weitere Resonanzen traten bei den ganzzahligen Vielfachen von f_0 auf. Soweit mäßige Schalldruckpegel erforderlich waren, wurde für den Frequenzbereich zwischen 200 Hz und 15 kHz Kompaktlautsprecherboxen verwendet. Für hohe Pegel und damit große Reichweiten wurden Druckkammer-Trichter-Lautsprecher eingesetzt. Die verwendeten Schallwandler und ihre wichtigsten Kennwerte sind in Tabelle 3 zusammengefaßt.

Die Schalldruckpegel aller akustischen Signale nehmen mit der Entfernung von der Quelle ab. Die Pegelminderung kann durch Auswertung von Abb.9 ermittelt werden.

(Fortsetzung in Heft 2/1987, dort auch Literaturverzeichnis).

Anschrift der Verfasser:

Dr.Karl Beuter
Dipl.Ing.Rainer Weiss
Battelle Institut e.V.
Am Römerhof 35
6000 Frankfurt/Main 90

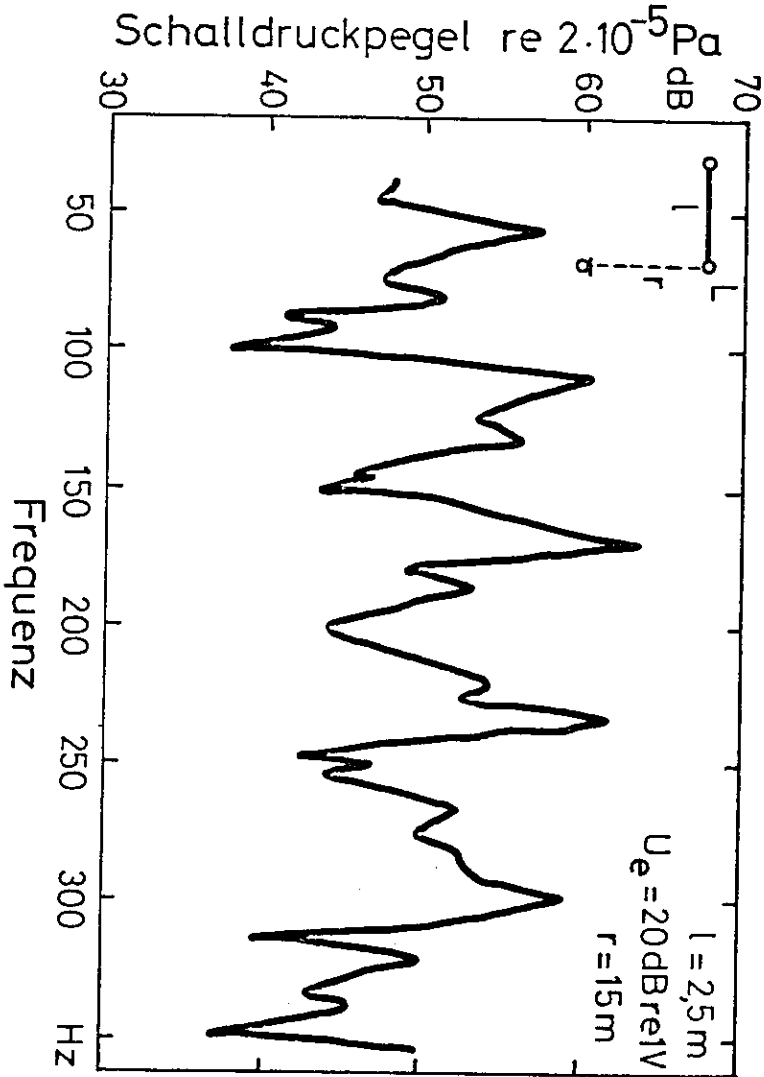


Abb.8 : Frequenzgang eines lautsprechererregten Resonanzrohres der Länge $l = 2,5 \text{ m}$; Pegel in einer Entfernung von $r = 15 \text{ m}$ senkrecht zum Rohr. Bei einer Eingangsspannung von 10 V am Lautsprecher L , Grundfrequenz $f_0 = 35 \text{ Hz}$.

Frequenzbereich (Hz)	Wellenlänge	Wandler	Typ	Schalldruckpegel dBre 2x10 ⁻⁵ Pa 1 m	Reichweite für Absolutpegel 10 m	60 db	Richtcharakteristik
5 - 20	68 - 17 m	mechanisches Schwingsystem mit Resonanzrohr	Eigenbau (120) am Röhrende	75 dB	80 m		Acht bei Grundfrequenz
20 - 200	17 - 1.7 m	Tiefenlaut- sprecher mit Resonanzrohr	PSL 320/ 400 Isophon	80	120 m (100 Hz)		Acht bei Grundfrequenz
200 - 15.000	1.7 - 2.27 cm	Druckkammer- Trichterlaut- sprecher	TC-372/ 100 Toa Electric	120	100	400 m (2kHz)	Keule 180°
18.000 - 50.000	1.89 - 6.8 mm	Piezowandler mit Stufenrüssel und Biege- schwinger	Eigenbau	135 (20 kHz)	110	70 m (20 kHz)	4 Keulen 8°vertikal 40°horizontal

Tabelle 3 : Verwendete Schallwandler und ihre Kennwerte.

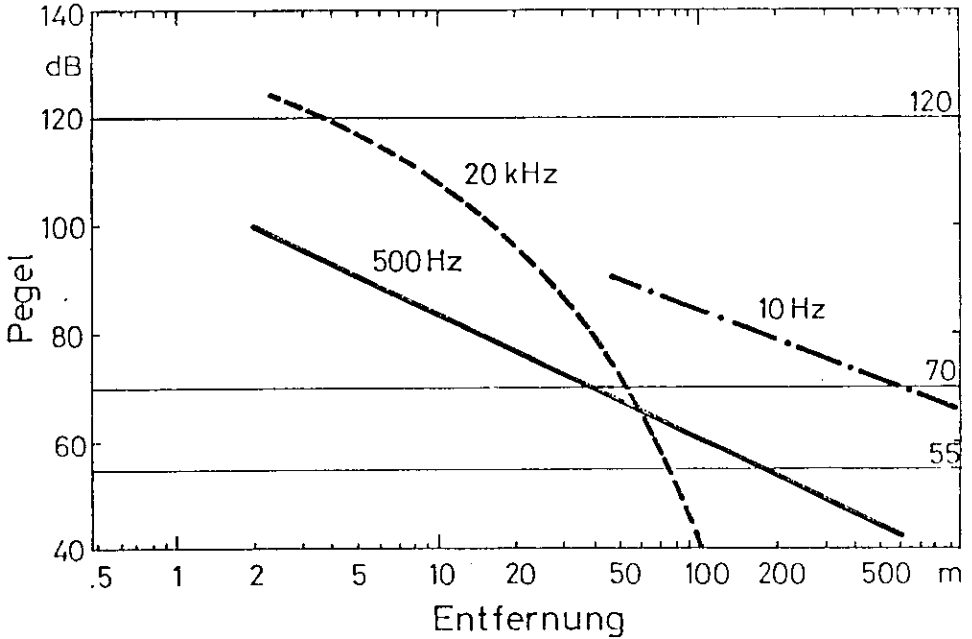


Abb.9: Berechnete Entfernungsabhängigkeit des Schalldruckpegels für verschiedene Frequenzen unter Berücksichtigung der atmosphärischen Abschwächung.

Waagerechte Linien:

120 dB : Grenzwertempfehlung für Infra- und Ultraschall.

70 dB : Grenzwert für vorwiegend Überwachungs- und mechanische Arbeiten.

55 dB : Immissionsrichtwert für Gebiete, in denen vorwiegend Wohnungen untergebracht sind.