

Gehör

Themen, die zur Vorbereitung gehören:

- Physikalische Grundlagen der Akustik: Longitudinalwellen, Frequenz, Wellenlänge, Schallgeschwindigkeit, Dezibel
- allgemein: Gehörorgane der Wirbeltiere und Insekten
- speziell: anatomischer Aufbau des menschlichen Ohres: äußeres Ohr, Mittelohr, Innenohr
- Physiologie des Hörens: Funktion des Mittelohres, Vorgänge im Innenohr, Wanderwellentheorie
- Akustische Raumorientierung, binaurales Hören, Laufzeit-und Pegeldifferenzen

Literatur:

- Schmidt, Lang, Thews; „Physiologie des Menschen“, Springer, 2004
Kapitel 16: „Kommunikation des Menschen“
- Eckert, Randall, Burggren, French: „Tierphysiologie“, Thieme 2000
Kapitel 7: „Wahrnehmung der Umwelt“ (Mechanorezeption)
- Campbell, „Biologie“, Spektrum Verlag, 2003
Kapitel 49: „Sensorik und Motorik“

Allgemeines

Unter Hören verstehen wir die sensorische Verarbeitung von Schallwellen. Während bei allen Vertebraten ein Gehörorgan entwickelt ist, das auf Teile des Labyrinths zurückgeht, treten bei Insekten verschiedenartige Gehörorgane auf. Das Gehör ist auch für den Menschen ein wichtiger Sinn, weil er zusammen mit der Sprache das wichtigste zwischenmenschliche Kommunikationsmittel aufbaut. Schwerhörigkeit oder gar Ertaubung bedeutet eine Erschwerung der zwischenmenschlichen Kommunikation und damit einen massiven Verlust an Lebensqualität. In diesem Kursteil werden Versuche zur Leistungsfähigkeit unseres Hörsystems durchgeführt.

Hören - wie aus kleinen Luftdruckschwankungen Worte oder Musik werden.

Das Ohr (Äußeres Ohr, Mittelohr und Innenohr) ist ein komplexes Organ, mit dem winzige Luftdruckschwankungen (Schallwellen) in zunächst neurochemische und dann elektrische Nervenimpulse umgewandelt werden. Die Verarbeitung dieser Impulse und damit das eigentliche Hören findet im Gehirn statt.

Für viele Lebewesen ist Hören die wichtigste Orientierungsfunktion. Hören gehört auch für den Menschen zu den elementaren und in der Entwicklung lebenswichtigen Sinnesfunktionen. Das Schreien eines Babys ist die wichtigste Signalmeldung, die der Säugling hat, um mitzuteilen, dass er ein Bedürfnis hat. Inzwischen ist allgemein anerkannt, dass Säuglinge bereits im Mutterleib hören, sie bevorzugen nach der Geburt die Stimme ihrer Mutter und auch den Klang der Muttersprache gegenüber den Klängen anderer Sprachen.

Von der Druckschwankung der Luftmoleküle bis zum Hören von Musik oder Sprache ist es ein komplizierter Weg, der bisher noch nicht vollständig erforscht ist. Die Frequenz eines Tones wird in Hertz (Hz) angegeben, gemeint sind damit Schwingungen (Druckschwankungen) der Luft (1 Hz = 1 Schwingung/sec). Reine Töne hören wir allerdings selten. Menschen hören Schwingungen zwischen 20 und 16000 Hz. Je höher die Frequenz um so höher der Ton. Wir hören dabei nicht alle Frequenzen

gleich gut. Die Hörschwellenkurve ist U-förmig. Am geringsten ist die Hörschwelle bei Frequenzen zwischen 2000 und 5000 Hz, dort liegt auch ein großer Teil der Sprachwahrnehmung (350-3000Hz). Wenn wir leise Musik hören, hören wir deshalb die niedrigeren und höheren Töne kaum, diese werden deshalb durch den „Loudnessschalter“ an der Stereoanlage verstärkt, damit wir wirklich das ganze Tonspektrum auch bei leiser Musik hören. Das, was wir als Ton bezeichnen, bezieht sich üblicherweise auf komplexe Töne, die sich aus mehreren Tönen zusammensetzen. Verschiedene Tierarten hören unterschiedliche Frequenzen, von der Hundepfeife wissen alle, dass Hunde höhere Frequenzen hören können als wir Menschen. Tauben oder Elefanten können auch wesentlich tiefere Frequenzen hören. Die Schallgeschwindigkeit in der Luft beträgt 340m/s, in Wasser 1500m/s. Die Lautstärke entspricht der Amplitude der Sinuskurve des Tones und wird in Dezibel (dB) angegeben. Die absoluten Lautstärkenunterschiede, die wir hören können von der Hörschwelle bis zu sehr lauten Geräuschen variiert um den Faktor 1:1.000.000. Dezibel wird deshalb verwendet, um die Skala der Lautstärke übersichtlicher zu machen. Die Hörschwelle wird dabei mit 0 angenommen, ein normales Gespräch liegt etwa bei 60 dB, lauter Straßenlärm bei 80 dB. Die Ortsbestimmung des Schalls erfolgt durch Auswertung des zeitlichen Unterschiedes mit dem die Schallwellen auf das linke und rechte Ohr treffen.

Der Gehörgang schützt das Mittelohr von Verletzungen und Temperaturschwankungen. Im Gehörgang werden durch Resonanz Töne mit einer Frequenz zwischen 2000 und 4000 Hz verstärkt (ein Bereich, der für die Sprachwahrnehmung besonders bedeutsam ist). Im Mittelohr werden die Schwingungen des Trommelfells über die Gehörknöchelchen an das Innenohr übertragen. Bei diesem Vorgang werden die Schallwellen um den Faktor 20-100 verstärkt. Dies ist notwendig, da die zähe Flüssigkeit des Innenohres auch wesentlich schwerer in Schwingung zu versetzen ist als Luft. Ohne den Verstärkereffekt der Gehörknöchelchen würden nur 3% der Schwingungen weitergeleitet. Im Mittelohr befinden sich auch kleine Muskeln, die bei sehr lauten Geräuschen zum Schutz die Bewegungen der Gehörknöchelchen dämpfen. Das Innenohr besteht aus der schneckenförmig gedrehten Cochlea. Dieser spiralförmig gewundene Schlauch mit Durchmesser von 2mm und Länge von 35 mm ist in 3 parallel verlaufende Kammern (Scala vestibuli, Scala tympani und Scala media) unterteilt. Auf der Basalmembran zwischen der Scala tympani und der Scala media sitzt das eigentliche Hörorgan, das Cortische Organ. Dieses enthält die Äußeren (~12000) und Inneren (~3500) Haarzellen die so genannt werden, weil sie an ihren Enden haarförmige Zilien besitzen. Werden diese Sinneshäarchen in Schwingungen versetzt schütten sie einen Neurotransmitter aus, hierdurch werden Nervenimpulse ausgelöst, die zum Hörnerv weitergegeben werden und von dort dann zum Gehirn weitergeleitet werden. Bereits eine Bewegung dieser Sinneshäarchen um 100 Picometer kann einen Nervenimpuls auslösen. 95% der Hörnervenfaser erhalten ihre Impulse von den inneren Haarzellen, jede dieser inneren Haarzellen ist mit 8-30 Nervenfasern verbunden (hierdurch wird die Tonhöhenunterscheidung ermöglicht). Mehrere Äußere Haarzellen konvergieren dagegen auf eine Hörnervenzelle, hierdurch können Schallsignale geringer Intensität wahrgenommen werden.

Entscheidend für den Hörimpuls sind die Schwingungen der Basalmembran. Im Verlauf dieser Basalmembran sind die verschiedenen Haarzellen an bestimmten Orten für bestimmte Frequenzen besonders empfindlich. Je näher am Steigbügel (und damit am Mittelohr), um so höher die Frequenz, auf die die jeweiligen Haarzellen spezialisiert sind. An der Spitze der Schnecke sind die niedrigen Frequenzen lokalisiert. Bei Auftreffen der Schallwellen auf das ovale Fenster über den Steigbügel wird die Basalmembran selbst in eine Schwingung versetzt, die sich in Form einer Wanderwelle auf dieser ausbreiten. Da die Basalmembran zur Spitze hin steifer und schmaler wird, hat diese Wanderwelle je nach Frequenz der Schallwellen an unterschiedlichen Punkten der Basalmembran ihren Gipfel. Der Grad der Auslenkung der Haarzellen hängt von der Amplitude der Schwingungen der Basalmembran ab. Die jeweiligen Haarzellen sind je nach Ort auf der Basalmembran zusätzlich besonders auf bestimmte Frequenzen der Schwingungen eingestellt. Stärkere Schwingungen der Basalmembran an einem bestimmten einer Schallfrequenz zugeordneten Punkt führen zu entsprechend

vermehrten Bewegungen der Zilien dort, damit zu vermehrter Ausschüttung von Neurotransmittern, und letztlich damit zu mehr Impulsen der zugehörigen Hörnervenzellen. Bei den niedrigen Frequenzen bis 1000 Hz erfolgt die Signalisierung nicht nur über den Ort der überwiegend angesprochenen Hörzellen, sondern auch über eine elektrische Signalisierung der erregten Nervenfasern proportional und zeitlich gebunden an die Phasen der Sinuswellen des Schalls (Phasenkoppelung). Bei sehr lauten Tönen erreichen die Signale der zuständigen Haarzellen und damit auch der Hörnervenzellen ein Maximum, das sie halten, zusätzlich fangen andere Haarzellen an anderen Stellen der Basalmembran an mitzuschwingen, hierdurch ist eine Signalisierung der Lautstärke möglich.

Der Hörnerv zieht zunächst in den Nucleus cochlearis (Hörnervkern im Hirnstamm), von dort ziehen die Fasern zur oberen Olive, von dort zu den Colliculi inferiores, und über das Corpus geniculatum mediale zum medialen Thalamus, von dort in die primäre Hörrinde im Temporallappen. Dabei sind die entsprechenden Kerngebiete der beiden Seiten miteinander verbunden, zusätzlich laufen Rückkoppelungsfasern von der Hörrinde zurück zum Hörnerv und zur Cochlea. Die Hörrinde enthält genauso wie die Sehrinde Nervenzellen, die auf bestimmte komplexe Schallsignale ansprechen, zumindest bei bestimmten Tieren gibt es Neurone, die darauf spezialisiert sind Geräuschquellen von bestimmten Orten zu lokalisieren, aber auch für bestimmte Geräuschqualitäten gibt es spezielle Neurone, die darauf ansprechen. Vermutlich ist diese Spezialisierung teilweise angeboren, zum Teil aber auch erlernt. Umgekehrt werden komplexe Töne im Ohr zunächst in ihre Einzelfrequenzen zerlegt, die so gewonnenen Informationen müssen auf höherer Ebene wieder zusammengesetzt werden um zu einer wirklichen Tonwahrnehmung zu kommen.

Die sekundären Hörzentren sind teilweise seitengetrennt, Sprache wird in der dominanten Hemisphäre (meist links) verarbeitet, Töne und Musik mehr in der nicht dominanten Hemisphäre (Hirnhälfte). Sprache, die auf dem rechten Ohr gehört wird und damit bevorzugt zur linken Hirnhälfte geleitet wird, wird etwas besser verstanden, für Musik gilt entsprechend das umgekehrte. Da aber im Hörsystem auf jeder Ebene Verbindungen zur Gegenseite bestehen, verstehen wir Sprache selbstverständlich auch mit dem linken Ohr und können Musik auch mit dem rechten Ohr genießen.

Jeder Mensch hat eine eigene Sprechweise, eine hellere oder dunklere Stimme, langsam oder schnell, deutlich oder weniger deutlich, mit Verschlucken von vielen Silben oder korrekt ausgesprochen, mit unterschiedlichem Akzent oder Dialekt, dennoch verstehen wir die meisten Menschen, die unsere Sprache sprechen, ohne Probleme. Bei normaler Sprechgeschwindigkeit müssen bereits 12-14 Sprachsignale verarbeitet werden. Auch die 4-fache Geschwindigkeit bereitet uns noch keine Probleme. Wir verstehen Sprache meist auch noch dann, wenn in erheblichem Umfang Hintergrundgeräusche vorhanden sind. Hierfür ist offensichtlich eine komplizierte Verarbeitung in unserem Gehirn erforderlich, die bisher nicht vollständig aufgeklärt ist. Das Erlernen des Sprachverständnisses geht mit dem Sprechenlernen parallel und ist damit verknüpft. Bei der Sprachwahrnehmung ist das Vorwissen und der Kontext sehr bedeutsam. Spracherkennung basiert zu wesentlichen Teilen auf der Hörerfahrung und damit auf internen und externen Erwartungswahrscheinlichkeiten. Stimmerzeugung, -wahrnehmung und -steuerung bilden einen natürlichen, sich gegenseitig beeinflussenden Regelkreis. Ist eine dieser Funktionen gestört, so wirkt sich dies auch auf die beiden anderen aus. Wörter und Sätze werden auch wesentlich besser verstanden, wenn sie von der Semantik und der Syntax her korrekt sind. Ob und wie weit es spezifische Mechanismen der Sprachverarbeitung im Gehirn gibt, ist weiter in vielen Details strittig.

Hören: Physikalische Grundlagen : Schalldruck $L = 20 \cdot \log (P_{\text{eff}} / P_{\text{Bezugsschalldruck}})$, $P_{\text{Bezugsschalldruck}}$ ist immer $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$, $10 \text{ dyn/cm}^2 = 1 \text{ N/m}^2$. Eine Oktave bedeutet Frequenzverdoppelung. Bei einer Frequenz von 1000Hz entspricht die dB-Skala der Phon-Skala (Definition). Sonst stellt die dB Skala den absoluten Schalldruck, die Phon-Skala den empfundenen Schalldruck wieder. Eine Isophone ist eine Kurve gleicher subjektiv empfundener Lautstärke bei verschiedenen Frequenzen. Untere

Hörschwelle: Der Schalldruck bei dem ein Ton einer bestimmten Frequenz gerade noch wahrgenommen werden kann.

Physiologische Daten: Frequenzbereich des Sprechens : 300-5000Hz (15-55 Phon), Schmerzgrenze : 130dB, Frequenzgang des jungen Menschen : 20-16.000Hz (entspricht ca. 10 Oktaven), Frequenzgang des alten Menschen : 20-13000Hz, sensibelste Frequenz : ca. 3.500Hz (= Resonanzfrequenz)

Räumliches Hören (binaurales Hören): Hier macht sich das Gehirn die Zeitverzögerung zunutze mit dem der Schall erst das eine und dann das andere Ohr erreicht (und mit verschiedenem Schalldruck). Zeitunterschiede bis weit unter 1 ms können noch registriert werden.

Sprachverständlichkeit: Das Frequenzband der normalen Sprache liegt zwischen 300Hz-5.000Hz, der Schalldruck zwischen 10 und 50 Phon. Alle Laute haben Obertöne, die z.T. sehr hohe Frequenzen aufweisen (z.B. Zischlaute). Sinkt z.B. bei einer Altersschwerhörigkeit die Hörfähigkeit für höhere Frequenzen, so fehlen diese bei dem Prozess der Spracherkennung und somit treten Spracherkennungsstörungen auf.

Versuche

1. Bestimmung der oberen Hörgrenze

Theoretische Grundlagen: Der Hörbereich junger Menschen liegt laut Literatur zwischen 20 und 16.000 Hz.

Versuchsdurchführung: Bei maximaler (Vorsicht, nicht zu laut stellen!) Schallenergie (rechter Drehknopf, U/V_s) wird die Frequenz kontinuierlich erhöht (Drehknöpfe f/Hz; linker Knopf für kontinuierliche Veränderung, rechter Knopf Frequenzbereiche), bis die Versuchsperson den Ton nicht mehr hören kann (Wert notieren!). Dann wird ausgehend von einer Frequenz oberhalb des hörbaren Bereichs kontinuierlich erniedrigt bis die Tonempfindung wieder einsetzt. Beide Messungen sind je fünfmal für jedes Ohr durchzuführen.

Auswertung: Die Hörgrenze ist für jedes Ohr als Mittelwert der 10 Messungen anzugeben. Die Gesamthörgrenze ergibt sich aus dem Mittelwert der 20 Messungen. Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse.

2. Subjektive Schalldruck-Wahrnehmung

Dargeboten wird ein Tonsignal konstanter Frequenz unterschiedlicher Lautstärke. Als objektives Maß der Lautstärke dient der Schalldruck, der proportional zur Ausgangsspannung U/V_s des Funktionsgenerators ist. Die Lautstärkeempfindung (Lautheit) E_l wird mit einer Rationalskala gemessen, indem die Versuchsperson der Stärke ihrer Empfindung die Maßzahlen 0 bis 10 zuordnet: $E_l = 0$ entspricht dem Schwellenreiz und $E_l = 10$ der größten Lautstärkeempfindung. Der Versuchsleiter gibt Schallreize unterschiedlicher Stärke vor und die Versuchspersonen tragen die ihrer subjektiven Empfindung entsprechenden Maßzahlen in eine Tabelle ein.

Versuchsdurchführung: Stellen Sie 1000 Hz ein am Funktionsgenerator ein. Drehen Sie die Lautstärke (Kopfhörer nicht auf dem Kopf!!) auf größte Lautstärke und regulieren Sie am Potentiometer des Kopfhörers die Lautstärke auf ein erträgliches Maß ein. Geben Sie nun der Versuchsperson (Kopfhörer auf Kopf) in unregelmäßiger Reihenfolge jeweils dreimal die 7 möglichen Lautstärken (0-6 auf der Skala) vor und notieren Sie die subjektiv empfundene Lautstärke in einer Tabelle. Beginnen Sie auf jeden Fall mit der größten Lautstärke als Bezugspunkt für die Versuchsperson.

Auswertung: Die in der Tabelle eingetragenen Werte werden gemittelt und auf doppelt-logarithmisches Papier aufgetragen, die subjektiven Werte auf der Ordinate und die gemessenen auf der Abszisse. Durch die aufgetragenen Punkte ist eine Gerade zu legen, deren Steigung den Exponenten (n) der Stevensschen Potenzfunktion ergibt. Da bei Menschen neurophysiologische Reaktionen und Wahrnehmungen schwer erfassbar sind, wird der Zusammenhang beider oft indirekt aus den Zusammenhängen zwischen Reiz und Physiologie und Reiz und Wahrnehmung erschlossen. Dies wird mit einer Potenzfunktion beschrieben, die Steven in seiner ‚Psychophysik‘ vorgeschlagen hat, um die psychophysischen Eingangs-Ausgangs-Beziehungen der Sinnessysteme nachzuprüfen. Er fand, dass die Beziehung zwischen Reizstärke und Empfindungsgröße mathematisch durch eine Potenzfunktion beschrieben werden kann:

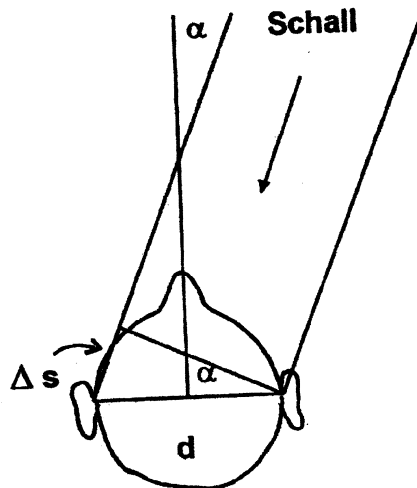
$$\Psi = k \cdot (R - R_0)^n$$

Dabei ist Ψ die Empfindungsstärke, R die Reizstärke, R_0 die Reizstärke an der Absolutschwelle, k eine Konstante und n ein modalitätsspezifischer Exponent, der bei verschiedenen Sinneswahrnehmungen erheblich variieren kann (0,2 – 3,5). Besteht in unserem Versuch ein Zusammenhang zwischen Empfindungsstärke und Reizstärke, so sollte n im Bereich von 0,5 liegen. Allerdings streuen die Zahlenwerte für n interindividuell beträchtlich und sind außerdem noch von den Reizbedingungen abhängig. Zusätzlich einschränkend sei gesagt, dass die Potenzfunktion eine sehr allgemeine mathematische Beschreibungsweise ist: Wächst eine Empfindungsgröße irgendwie proportional der Reizgröße, so lässt sich bei geeigneter Wahl der Exponenten meist eine Beschreibung in Form einer Potenzfunktion finden). Der Exponent ‚n‘ ist mathematisch ein Maß für die Steigung und physiologisch ein Maß für den Bereich relevanter Reizintensitäten. Falls $n \sim 0,5$ gibt es einen Zusammenhang zwischen angebotenem Reiz und wahrgenommenem Signal. Diskutieren Sie ihre Ergebnisse.

3. Schall-Lokalisation:

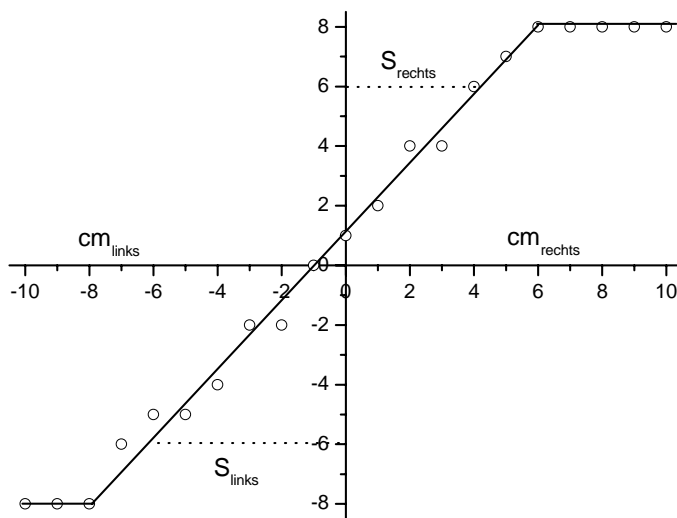
Theoretische Grundlagen: Eine manchmal lebenserhaltende Leistung des Wirbeltierohres ist die Fähigkeit, die Richtung des eintreffenden Schalls zu erfassen. Diese akustische Lokalisation wird mit beiden Ohren durchgeführt (binaural). Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, dass bei seitlich eintreffenden Schallwellen der Weg zu dem schallabgekehrten Ohr stets länger ist als zu dem schallzugekehrten.

Durchführung: Die Versuchsperson führt die beiden Oliven am Ende des Gummischlauchs in die Ohren ein. Der Schlauch ist ausgehend von der geometrischen Mitte nach beiden Seiten hin im Zentimeter-Abstand markiert. Der Schlauch wird hinter dem Rücken der Versuchsperson leicht mit einem Stab beklopft. Nach jedem Klopfen wird die Versuchsperson nach der Richtungsempfindung „links, Mitte, rechts“ gefragt. Die Antwort wird als –1 für links, 0 für Mitte und +1 für rechts in eine Tabelle eingetragen. Diese Tabelle wird nach beiden Seiten hin bis zu einem Abstand von 10 cm zur Mitte durch Klopfen in unregelmäßiger Reihenfolge gefüllt. Für jeden Markierungspunkt müssen 8 Klopfversuche eingetragen sein.



Auswertung: Bestimmen Sie für Ihre Ohren die minimale Wegdifferenz Δs und berechnen Sie daraus die Laufzeitdifferenz Δt und den scheinbaren Hörwinkel α .

In jeder Spalte der Tabelle, d.h. für jeden Markierungspunkt auf dem Schlauch wird die Summe der Eintragungen gebildet. Diese wird im Allgemeinen von -8 (10 cm links) bis $+8$ (10 cm rechts) reichen. In einem Koordinatensystem wird diese Summe gegen die Markierungspunkte aufgetragen:



Die Messpunkte, deren Ordinate zwischen >-8 und $>+8$ ist, werden mit einer Geraden verbunden („best fit“). Der Schnittpunkt der Geraden mit der Abszisse gibt die subjektive Mitte an, die nicht notwendigerweise mit der geometrischen Mitte zusammenfallen muss. Diskutieren Sie warum!

Bestimmen Sie dann mit Hilfe der Geraden die beiden Punkte, die den Ordinatenwerten -6 bzw. $+6$ entsprechen. Sie werden als Grenzwerte (75 %) für richtige Antworten eingesetzt. Ihr Abstand von der geometrischen Mitte des Schlauches ist S_{links} bzw. S_{rechts} .

Für diese beiden Punkte wird die Wegdifferenz Δs zu den Ohren berechnet:
Für Gummi (Schlauch!) gilt:

$$\Delta s_G = 2 \times S_{links} \quad \text{bzw.} \quad \Delta s_G = 2 \times S_{rechts}$$

Die jeweilige Laufzeitdifferenz Δt ist dann:

$$\Delta t = \Delta s_G / v \quad \text{wobei } v_{\text{Gummi}} = 1500 \text{ m/sec (Schallgeschwindigkeit in Gummi)}$$

Die Schallgeschwindigkeit in Luft ist mit 340 m/sec um den Faktor 0,227 kleiner als in Gummi. Um diesen Faktor verringern sich auch die Wegzeitdifferenzen für Luft:

$$\Delta s_L = \Delta s_G \times 0,227$$

Für die Berechnung des scheinbaren Hörwinkels α_{links} bzw. α_{rechts} wird Δs_L benutzt und ein Ohrenabstand d von 20 cm angenommen:

$$\sin \alpha = \Delta s_L / d$$

Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse und mögliche Fehlerquellen im Versuchsaufbau.