

Kurs 5 – Hören

Arbeitsgruppe D 6 Clara Dees
 Susanne Duncker
 Anja Hartmann
 Kristin Hofmann

Protokoll

Einleitung

Im heutigen Kurs führten wir drei Versuche zum Hören durch. Der erste beschäftigte sich mit der Bestimmung der Hörschwellenkurve der Gruppenmitglieder. Im zweiten Versuch wurde die individuelle Tonhöhen-Unterscheidungsschwelle untersucht. Der dritte Versuch diente der Bestimmung der Schall-Zeitdifferenzschwelle beim Menschen.

Material und Methoden

Im ersten Versuch wurden jedem Gruppenmitglied über einen Kopfhörer die von einem Sinusgenerator und angeschlossenem Verstärker erzeugten Töne in verschiedenen Lautstärken vorgespielt. Mit Hilfe des Oszilloskops wurde die Lautstärkeamplitude in mV gemessen, bei der der jeweilige Ton gerade noch gehört wurde. Die Frequenz der Töne lag zwischen 100 und 16000 Hertz.

Der zweite Versuch wurde am Computer durchgeführt. Über einen Kopfhörer wurden der jeweiligen Person Tonpaare mit unterschiedlicher Frequenzdifferenz (beginnend bei großer Differenz) vorgespielt. Sie sollte dann notieren, ob der erste oder der zweite Ton höher als der andere war. Der Versuch wurde für Frequenzen von 125 Hz bis 9000 Hz durchgeführt.

Ein Stethoskop mit markiertem Gummischlauch diente als Versuchsmaterial im letzten Versuch. Hinter dem Rücken der Versuchsperson wurde auf die Markierungen geklopft und die Person sollte die Richtung (rechts / links / Mitte) angeben, aus der sie das Geräusch hört.

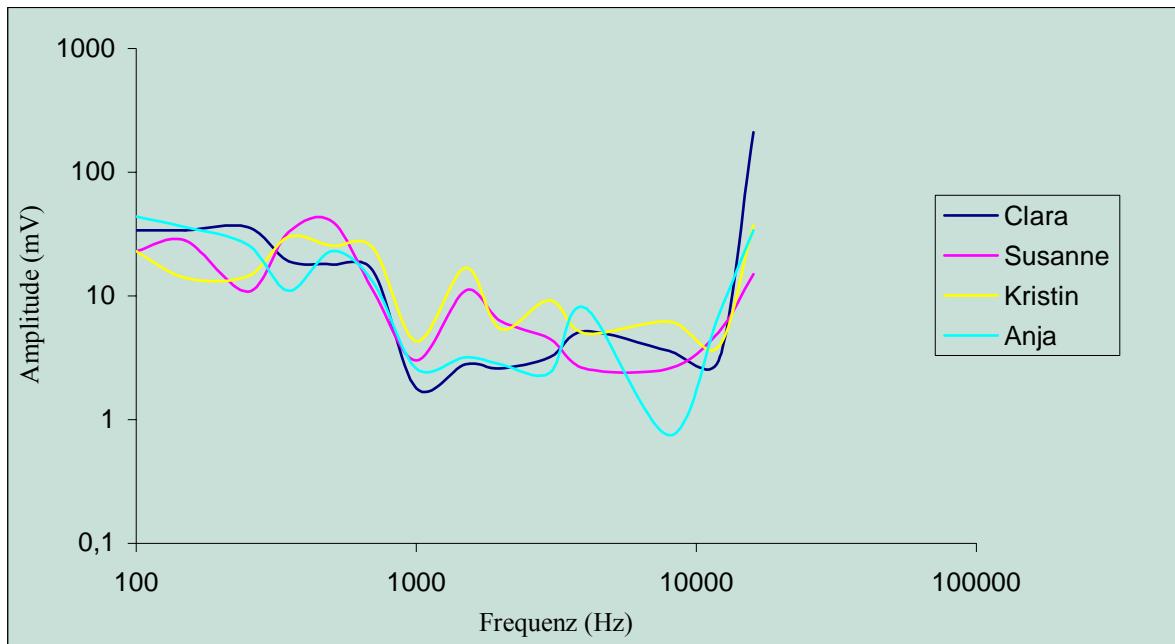
Auswertung Versuch I

Die im Hörschwellenversuch ermittelten Amplitudenwerte für alle Gruppenmitglieder sind in der nachstehenden Tabelle sowie im Anhang (als handschriftliche Aufzeichnung) zu finden.

Frequenz	Amplitude (mV)			
	Clara	Susanne	Kristin	Anja
100	34	23	23	44
150	34	28	14	36
250	36	10,8	14,4	26
350	19	33	30	11
500	18	40	25,5	23
700	16	11	24,5	13
1000	1,8	3	4,3	2,6
1500	2,8	11	17	3,2
2000	2,6	6,3	5,4	2,8
3000	3,2	4,5	9,2	2,4
4000	5,2	2,6	5	8
8000	3,6	2,6	6,2	0,75
12000	3	5,1	3,9	7
16000	210	15	37	34

Tab. 1 – Amplituden

Graphisch dargestellt ergibt sich daraus das folgende Diagramm:



Für die Darstellung der Hörschwellenkurve wird jedoch nicht die Amplitude, sondern der Schalldruckpegel (SPL) benötigt. Die Umrechnung erfolgt nach der Formel

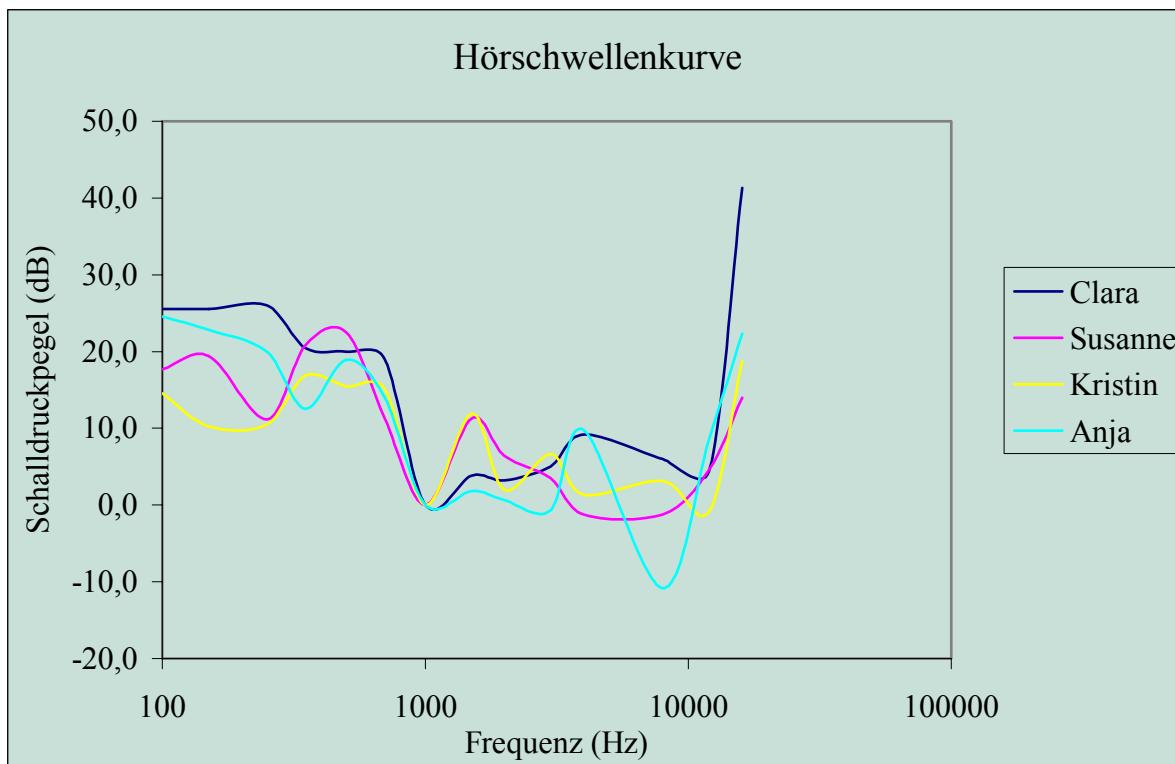
$$SPL = 20 \cdot \log(p/p_0)$$

Bei diesem Versuch ist p der für die jeweilige Frequenz gemessene Amplitudenwert und p_0 der Referenzwert, d.h. der für 1000 Hz ermittelte Amplitudenwert. Nach der Umrechnung ergeben sich folgende Werte:

Frequenz	SPL (dB)			
	Clara	Susanne	Kristin	Anja
100	25,5	17,7	14,6	24,6
150	25,5	19,4	10,3	22,8
250	26,0	11,1	10,5	20,0
350	20,5	20,8	16,9	12,5
500	20,0	22,5	15,5	18,9
700	19,0	11,3	15,1	14,0
1000	0,0	0,0	0,0	0,0
1500	3,8	11,3	11,9	1,8
2000	3,2	6,4	2,0	0,6
3000	5,0	3,5	6,6	-0,7
4000	9,2	-1,2	1,3	9,8
8000	6,0	-1,2	3,2	-10,8
12000	4,4	4,6	-0,8	8,6
16000	41,3	14,0	18,7	22,3

Tab. 2 – SPL-Werte

Trägt man diese Werte graphisch gegeneinander auf, erhält man die Hörschwellenkurven für die einzelnen Gruppenmitglieder. Das entsprechende Diagramm ist auf der nächsten Seite sowie im Anhang auf semilogarithmischem Millimeterpapier zu finden.



Auffällig ist, dass für einige Frequenzen der Schalldruckpegel im negativen Bereich liegt. Wenn die für die Frequenz gemessenen Amplitudenwerte unter dem Wert der Referenzamplitude liegen, so ergeben sich automatisch bei der Umrechnung zu SPL die negativen Werte.

Keine der Hörschwellenkurven der Gruppenmitglieder zeigt den für eine solche Kurve erwarteten Verlauf (Vgl. Abb. 19.2 S.357 in W.A. Müller: Tier- und Humanphysiologie, Springer Verlag). Die Abweichungen beruhen zum einen auf geringfügigen Hörschwächen der jeweiligen Person in bestimmten Frequenzbereichen, zum anderen sind sie durch Fehler bei der Messung entstanden. Die Messfehler können durch störende Geräusche von außen, z.B. Unruhe im Raum, Hintergrundrauschen etc., oder ein kurzzeitiges Nachlassen der Konzentration bei der Versuchsperson verursacht worden sein. Auch der Kopfhörer könnte eine Fehlerquelle sein, da er z.B. manche Töne oder Frequenzen leiser ausgibt als am Verstärker eingestellt. Zusätzlich können noch Ablesefehler am Oszilloskop die Messergebnisse beeinflussen.

Auswertung Versuch 2

Die im Laufe des zweiten Versuch ausgefüllten Tabellen finden sich im Anhang des Protokolls. Die darin ermittelten Werte des noch unterscheidbaren Tonhöhenunterschieds in Prozent werden mit der dazugehörigen Frequenz multipliziert, um denjenigen Frequenzunterschied in Hertz zu erhalten, der gerade noch unterscheidbar ist. Diesen Frequenzunterschied nennt man jnd – just noticeable difference. In Tabelle 3 sind die jnd – Werte für alle Mitglieder der Arbeitsgruppe dargestellt.

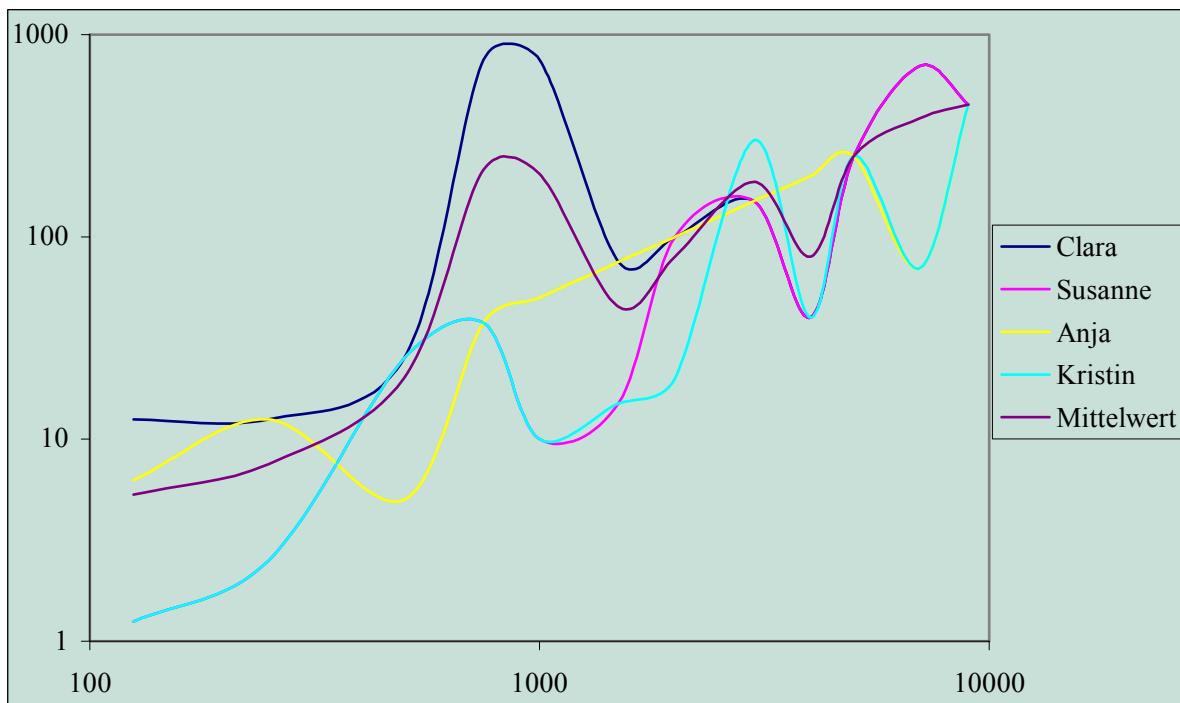
Frequenz (Hz)	Tonhöhen-Unterschied (Hz)				
	Clara	Susanne	Anja	Kristin	Mittelwert
125	12,5	1,25	6,25	1,25	5,3
250	12,5	2,5	12,5	2,5	7,5
500	25	25	5	25	20,0

Kurs 5 – Hören

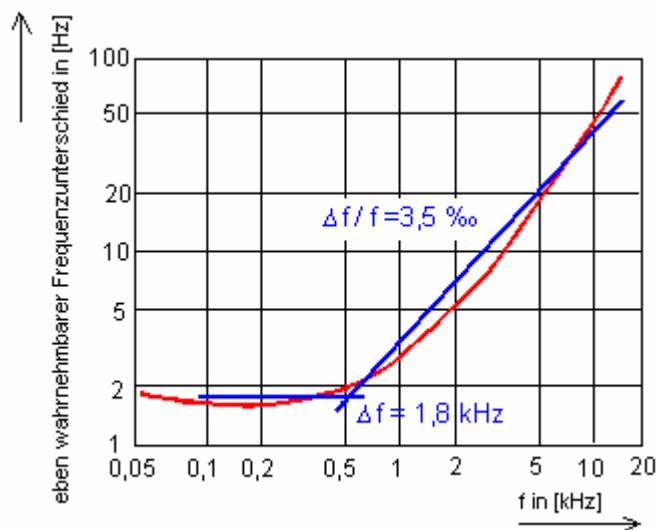
750	750	37,5	37,5	37,5	215,6
1000	750	10	50	10	205,0
1500	75	15	75	15	45,0
2000	100	100	100	20	80,0
3000	150	150	150	300	187,5
4000	40	40	200	40	80,0
5000	250	250	250	250	250,0
7000	700	700	70	70	385,0
9000	450	450	450	450	450,0

Tab. 3 – just noticeable difference

Graphisch dargestellt sieht das dann folgendermaßen aus:



Dies nicht gerade dem erwarteten Bild. Das Versuchsergebnis sollte ungefähr wie die rote Kurve im folgenden Diagramm aussehen:



Quelle: www.dasp.uni-wuppertal.de/ars_auditus/index.html

Dass dem nicht so ist, liegt wohl – neben den üblichen Fehlern durch Ablenkung, Störung von außen, Konzentrationsschwäche etc. – vor allem daran, dass die verwendete Versuchsmethode recht ungenau ist, da die Fähigkeit zur Tonhöhenunterscheidung nur in größeren Frequenzschritten gemessen wird. So kann etwa ein Unterschied bei 5% Frequenzunterschied noch gut wahrgenommen werden, die nächste Messung ist aber erst bei 1%. Besonders bei hohen Frequenzen führen diese großen prozentualen Frequenzunterschiede zu großen jnd-Werten. Würde man in diesem kritischen Bereich in kleineren Schritten messen oder die Tonhöhdifferenz über einen stufenlosen Regler genau auf die Unterscheidungsschwelle einstellen können, sähe das Messergebnis erheblich anders aus: es wäre viel genauer!

Nehmen wir nun an, wir hätten durch genauere Messungen Kurven ähnlich der am Ende der vorigen Seite erhalten. Was können wir daraus über das Hören von Tonhöhenunterschieden ableiten? Zwei Dinge fallen ins Auge:

1. Bei Frequenzen unter 500 Hz liegt die gerade noch unterscheidbare Frequenzunterschied bei ungefähr 1,8 Hz.
2. Bei Frequenzen ab 500 Hz ist der Frequenzunterschied gerade noch hörbar, wenn er mindestens 0,35 % der Frequenz beträgt (bei 1000 Hz wären das z.B. 3,5 Hz; bei 2000 wären es 7 Hz usw.). Mit steigender Frequenz muss also der Unterschied zwischen den Tönen immer größer werden, damit er noch wahrgenommen werden kann

Der Grund für dafür findet sich in der Cochlea – genauer gesagt im Aufbau der Basilarmembran. Auf der Basilarmembran werden auf 32 mm Frequenzen von etwa 16 Hz bis 16 kHz abgedeckt. Die Zuordnung der Frequenzen zu einem bestimmten Ort auf der Basilarmembran ist ungefähr logarithmisch, d.h. am Anfang decken ca 7mm auf der Membran den Frequenzbereich bis 500 Hz ab, auf die restlichen 25mm verteilen sich die Frequenzen von 500 bis 16000 Hz. Dadurch können im Bereich unter 500 Hz auch sehr kleine Tonhöhenunterschiede noch wahrgenommen werden, bei höheren Frequenzen ist dagegen eine größere Frequenzdifferenz nötig um den Ton noch unterscheiden zu können.

Auswertung Versuch 3

Für den Versuch wurden aus allen ermittelten Angaben der Versuchspersonen (zu finden im Anhang) die Mittelwerte gebildet. Aus Zeitmangel konnte in den kritischen Bereichen jedoch nur 10 statt 20 mal geklopft werden. Die gemittelten Werte sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

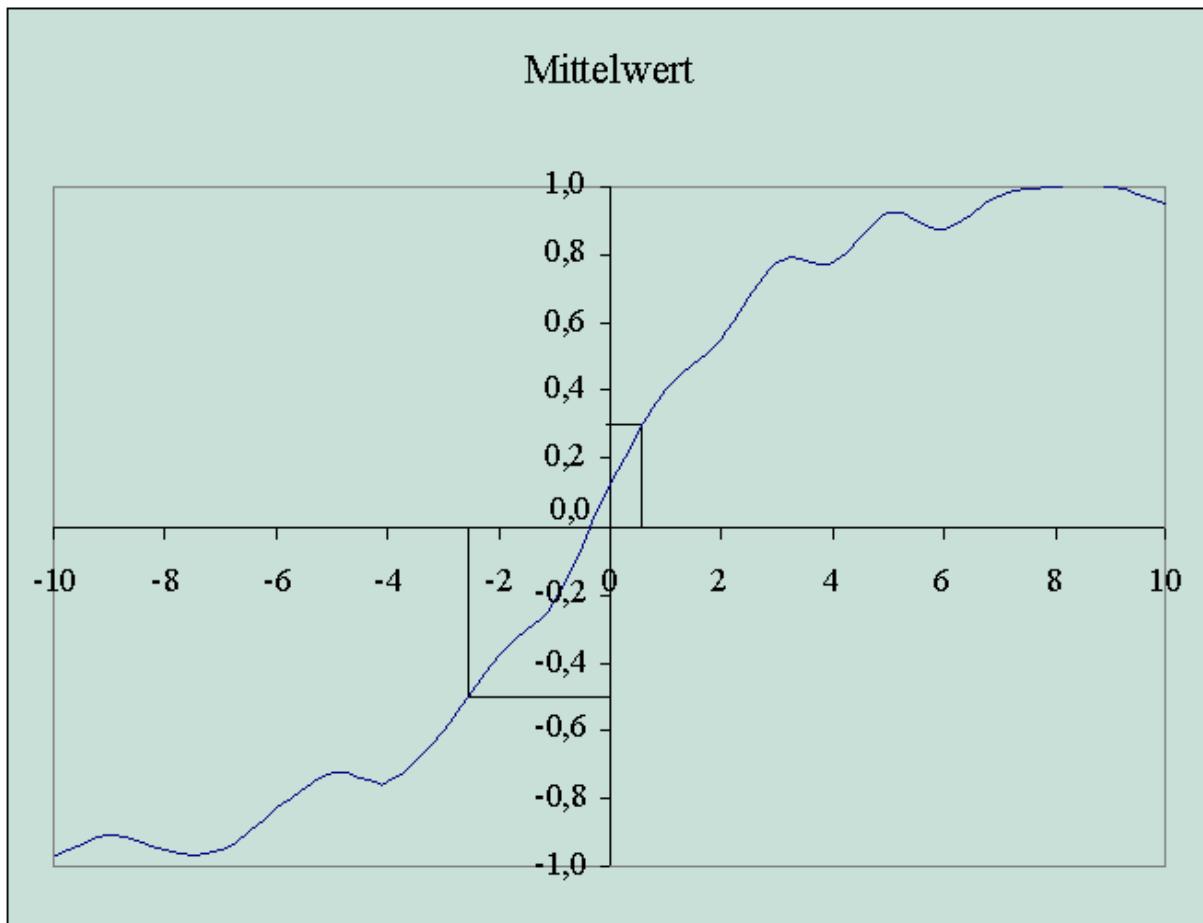
Position (cm)	Mittelwerte				
	Clara	Susanne	Kristin	Anja	Mittelwert
10	1	0,8	1	1	0,95
9	1	1	1	1	1,00
8	1	1	1	1	1,00
7	1	0,9	1	1	0,98
6	1	0,9	0,8	0,8	0,88
5	1	0,8	1	0,9	0,93
4	1	0,9	0,4	0,8	0,78
3	1	0,7	0,7	0,7	0,78
2	0,8	0,5	0,5	0,4	0,55
1	0,5	0,5	0,1	0,5	0,40
0	0,8	-0,1	-0,3	0,1	0,13

Kurs 5 – Hören

-1	0,3	-0,6	-0,5	-0,1	-0,23
-2	0,3	-0,8	-0,8	-0,2	-0,38
-3	-0,2	-0,9	-0,8	-0,5	-0,60
-4	-0,3	-1	-0,9	-0,8	-0,75
-5	-0,3	-1	-0,8	-0,8	-0,73
-6	-0,3	-1	-1	-1	-0,83
-7	-0,9	-1	-1	-0,9	-0,95
-8	-0,9	-1	-0,9	-1	-0,95
-9	-0,8	-1	-0,8	-1	-0,90
-10	-1	-1	-0,9	-1	-0,98

Tab. 4 – Zeit-Differenzschwelle

Im folgenden werden erst die Ergebnisse für den Mittelwert unserer Arbeitsgruppe, daran schließend für jedes Gruppenmitglied dargestellt und ausgewertet.



Wie erwartet erhalten wir eine sigmoide Kurve, die aber nicht durch den Ursprung des Graphen geht. Der Nullpunkt der Kurve liegt bei etwa $-0,35$ cm. Die 50% - Werte liegen rechts bei $0,58$ cm und links bei $-2,56$ cm. Die beiden 50%-Werte haben also den Abstand $R=3,14$ cm.

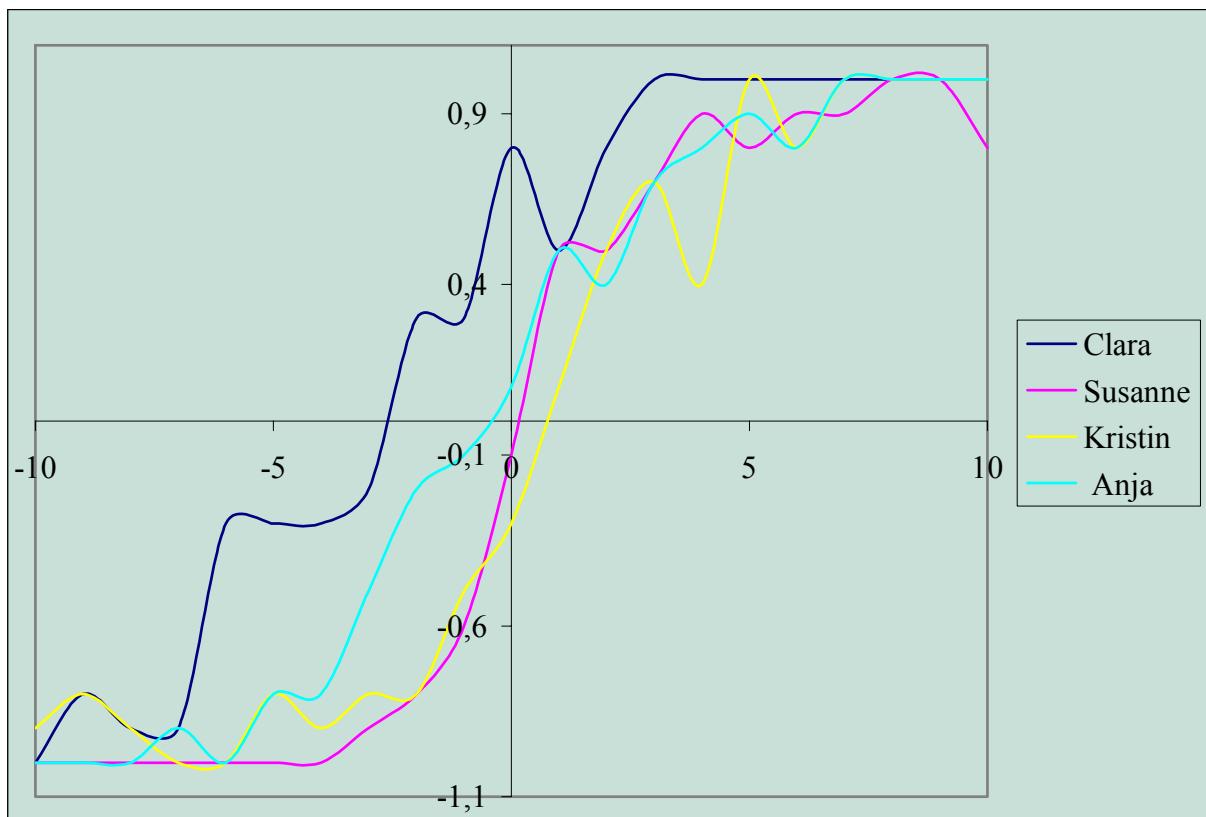
Mit R und der Schallgeschwindigkeit $c = 340$ m/s kann man nun nach der Formel

$$\Delta t = R/c$$

die gerade noch auflösbare Zeitdifferenz berechnen. Sie beträgt $9,2 \cdot 10^{-5}$ Sekunden (Literaturwert: $3,0 \cdot 10^{-5}$ s).

Wie in der Abbildung im Skript (S. 61) verdeutlicht, entspricht diese Zeitdifferenzen einem horizontalen Winkel α . Dieser Winkel berechnet sich aus dem (angenommenen) Ohrabstand ($d = 17 \text{ cm}$) dem Abstand R : $\sin \alpha = R/d = 0,185 \rightarrow \alpha = 10,64^\circ$

Die der Reizzeitdifferenz entsprechende Winkelauflösung des Ohres beträgt also etwa $10,6^\circ$ (Literaturwert: 3° bis 5°).



Wir erhalten vier verschiedene, sigmoide Kurven. Die Lage der Nulldurchgänge liegen zwischen $-2,7$ (Clara) und $+0,75$ (Kristin). Die $+0,5$ -Werte sind 1 (bei Clara, Susanne und Anja) bzw. 2 bei Kristin. Die $-0,5$ -Werte liegen zwischen -3 (Anja) und $-0,77$ (Susanne). Daraus ergeben sich die Werte für Δt und α . Die kleinste ermittelte Zeitdifferenz liegt bei $5,2 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ (Susanne), die größte bei $11,7 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ (Anja). Entsprechend liegen die Auflösungswinkel bei $6,0^\circ$ bis $13,6^\circ$. Die vollständigen Daten für alle Mitglieder finden sich im Anhang an dieses Protokoll.

Die Diskrepanz zwischen den Literaturwerten und den im Versuch ermittelten Werten lässt sich – von geringen Hörschwächen der Versuchspersonen mal abgesehen – nur durch Mess- und systematische Fehler erklären.

Systematische Fehler sind Fehler in der Versuchsanordnung, zum Beispiel könnten die Markierungen auf dem Gummischlauch nicht genau von der Mitte ausgehen, also etwas nach rechts oder links verschoben sein, oder sich nicht in der Entfernung von der Mitte befinden, in der sie sein sollten (z.B. Markierung bei $6,5 \text{ cm}$ statt 6 cm).

Andere, die Messung beeinflussende, Faktoren sind äußere Geräusche o. Ä., die die Konzentration von Versuchsperson und / oder Protokollant stören, wodurch z.B. Fehler in der Aufzeichnung der Ergebnisse nicht mehr ausgeschlossen werden können.