

Mindestlänge von Tönen zur Identifizierung ihrer Tonhöhe

Wettbewerb "Jugend Forscht" 1998

Ole Massow (17 Jahre)
Andreas Henke (16 Jahre)

Arbeitsgemeinschaft "Jugend Forscht"
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg
Leitung: StD Thomas Biedermann



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Biologie des Hörens	3
2.1	Äußeres Ohr	3
2.2	Mittleres Ohr	4
2.3	Inneres Ohr	4
2.4	Reiztransport zum Innenohr	5
2.5	Reizverteilung im Innenohr	5
3	Planung der Versuche und des Versuchsaufbaus:	6
3.1	Grundlagen	6
3.2	Geforderte Leistungen an die Meßelektronik	6
3.3	Bestandteile und Funktionsgruppen der Messtechnik	7
4.0	Durchführung der Versuche:	7
4.1	Vortests und daraus resultierende Erkenntnisse	7
4.2	Tests	8
4.3	Störfaktoren während der Tests	8
4.4	Umfang der Tests	8
5	Auswertung	9
5.1	Erwartete Ergebnisse	9
5.2	Ergebnisse und deren Auswertung	9
6	Fazit	10
7	Danksagung	11
8	Literaturverzeichnis:	11



1 Einleitung

Aufgrund der zunehmenden Lärmbelästigung, der unsere Gesellschaft besonders in diesem Jahrhundert ausgesetzt ist, man denke z.B. nur an die häufige Verwendung von Kopfhörern in Verbindung mit lauter Musik, ist es ein Muß, die immer häufiger auftretenden Gehörschäden immer früher diagnostizieren zu können. Denn so hat man eine bessere Chance, diesen noch erfolgreich entgegenzuwirken. Deswegen hat unsere Arbeit den Schwerpunkt, zusätzlich den schon bekannten und beispielsweise beim Ohrenarzt verwandten Testapparaturen noch eine weitere hinzuzufügen. Diese setzt jedoch nicht auf der altbewährten Basis der Lautstärke- oder reinen Frequenzhörtests auf, sondern befaßt sich mit der qualitativen Unterscheidung von Tönen.

Durch eine vorgegebene Wellenzahl oder ein vorgegebenes Zeitintervall wird die Erkennung erschwert. Weitere Anwendungsbereiche unserer Testapparatur finden sich in verschiedenen Unterrichtseinheiten der Schule (z.B. Physik, Biologie, ...). Damit sind praktische Übungen durch Schüler möglich, die einen selbständigen Wissenserwerb ermöglichen. Einen derartigen Einblick in die Leistungsfähigkeit des eigenen Ohres zu bekommen, bedeutet anschaulich und praxisnah zu lernen.

Folgende Fragen versuchen wir mit unserer Arbeit zu beantworten:

- Spielen unterschiedliche Wellenzahlen / Zeiteinheiten für die Hörfähigkeit eine Rolle?
- Wieviele Wellen / Zeiteinheiten sind mindestens erforderlich, um einen Ton korrekt zu identifizieren?
- Können bestimmte Tonfolgen besonders gut herausgehört werden?
- Spielt bei der Erkennung das Alter eine Rolle?

2 Biologie des Hörens

Das menschliche Ohr trägt gemeinsam mit den anderen Sinneseinrichtungen zur Orientierung des Organismus in der Umwelt bei. Es untergliedert sich in drei Bereiche. Das äußere Ohr dient zusammen mit dem mittleren Ohr dem Reiztransport zum eigentlichen Hörorgan. Das innere Ohr ist Sitz der sensorischen Strukturen. Alle Bestandteile für die Hörfunktion, von einigen Einrichtungen des äußeren Ohres abgesehen, liegen gut geschützt in einem Hohlraumssystem des Schläfenbeines.

2.1 Äußeres Ohr

Ohrmuschel und äußerer Gehörgang bilden das äußere Ohr. Die Ohrmuschel stellt eine Hautfalte aus elastischem Knorpel dar, die die Schallaufnahme begünstigt.

Der äußere Gehörgang reicht bis zum Trommelfell und besitzt eine mittlere Länge von 24 bis 27mm.



2.2 Mittleres Ohr

Das mittlere Ohr ist ein luftgefüllter und mit Schleimhaut ausgekleideter Hohlraum (Paukenhöhle). Vom äußeren Gehörgang getrennt wird die Paukenhöhle durch das schräg angebrachte Trommelfell, welches nur ca. 0,1 mm dünn, aber dafür sehr fest und kaum dehnbar ist. Durch die Verbindung mit den Gehörknöchelchen (Hammer, Amboß, Steigbügel) wird das Trommelfell in die Paukenhöhle hineingezogen und erhält so die Form eines flachen Trichters.

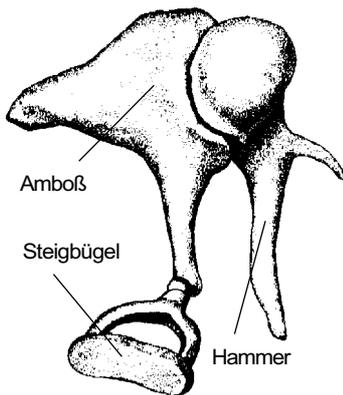


Abb. 2: Gehörknöchelchen

Der Hammer ist fest mit dem Trommelfell verbunden und überträgt dessen Schwingungen auf Amboß und Steigbügel. Der Steigbügel ist mit seiner Fußplatte beweglich in das ovale Fenster des Innenohres eingefügt. Da diese Gehörknöchelchenkette relativ gut ausgewuchtet ist, verbraucht sie beim Schwingen selbst kaum Energie. Auf diese Weise ist eine verlustarme Übertragung der Schallenergie gewährleistet. Der Druck in der Paukenhöhle wird über die Ohrtrumpete ständig dem der Atmosphäre angeglichen.

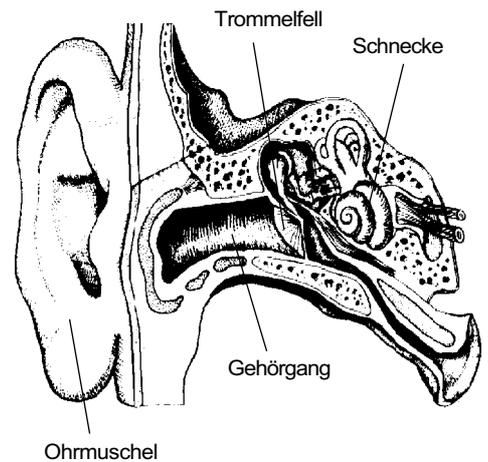


Abb. 1: Gesamtansicht des Hörorganes

2.3 Inneres Ohr

Die Verbindung zum Innenohr wird über das ovale Fenster hergestellt. Hier befindet sich u.a. das Lagessinnesorgan (Labyrinth bzw. Bogengänge). Von Bedeutung für das Hören sind in diesem Bereich des Ohres nur die knöcherne und häutige Schnecke. Die gesamte Schnecke ist ca. 3 cm lang und windet sich ungefähr 2½ mal um eine in der Mitte gelegene Achse. Weitere Einzelheiten über den Aufbau der Schnecke sind in Abb.4 und 5 ersichtlich.

Die Pauken- und die darunter gelegene Vorhoftreppe sind über eine Öffnung, genannt Schneckenloch, miteinander in Verbindung. Als Trennmembran zwischen diesen beiden Treppen fungiert die sog. Basilmembran.

An der Schneckenbasis grenzt die Paukentreppe an das mit einer Membran verschlossene runde Fenster, auf dessen anderer Seite wieder die Paukenhöhle liegt.

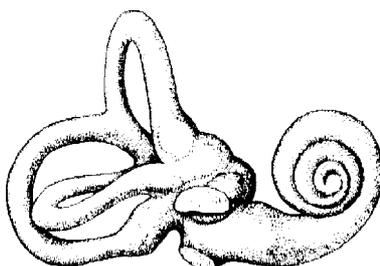


Abb. 4: Hohlräume des Innenohres

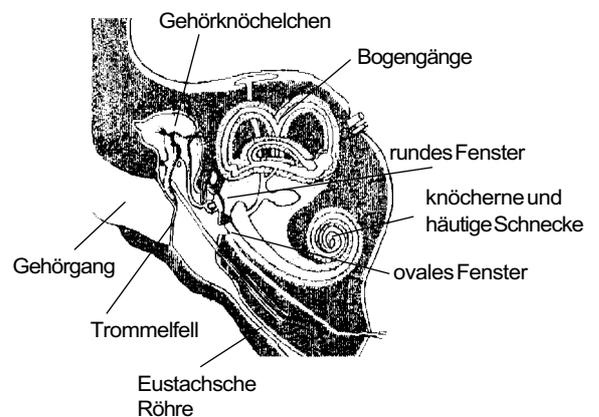


Abb. 3: Innenohr

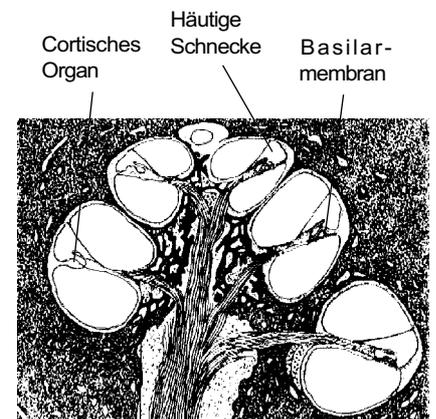


Abb. 5: Querschnitt durch die Schnecke



Der von der häutigen Schnecke umschlossene Raum heißt mittlere Treppe und ist mit einer Endolymphe gefüllt.

Auf der zum Endolymphraum hingewendeten Fläche sitzt wallartig das Cortische Organ auf. Seine Sinneszellen (Haarzellen) sind auf und zwischen Stützzellen angeordnet. Die oberen Enden der Haarzellen ruhen in den Zwischenräumen einer siebartigen Platte, die das Cortische Organ von oben abdeckt.

2.4 Reiztransport zum Innenohr

Der Schall als Reiz des Hörorgans gehört zu den mechanischen Schwingungen, die sich in leitenden Medien als elastische Wellen ausbreiten. Hörempfindungen entstehen im Frequenzbereich von 20 bis 20000 Hz. Unter 20 Hz spricht man von Infraschall, oberhalb von 20000 Hz von Ultraschall. Die Schallenergie muß bis ins Innenohr gelangen, damit in den Haarzellen die Reiztransformation stattfinden kann. Der unmittelbare Reiz ist die Schwingung der Perilymphe in den Innenohrtreppen und die dadurch bedingte Auslenkung der Basilarmembran. Daher müssen die mechanischen Schwingungen von einem leicht komprimierbaren Medium geringer Dichte (Luft) auf ein sehr schwer komprimierbares Medium hoher Dichte (Perilymphe) übertragen werden.

Bei einer direkten Übertragung des Schalls von der akustisch "weichen" Luft auf die akustisch "harte" Perilymphe würden der reflektierte Anteil der Schallenergie etwa 97% betragen. Das dazwischengeschaltete Mittelohr verhält sich wie ein Druckverstärker, der den Anteil der durchgehenden Schallenergie ganz wesentlich erhöht.

Der Transport der Schallwellen erfolgt vom Trommelfell über die Gehörknöchelchen bis zum ovalen Fenster, welches die dahinterliegende Perilymphe in Bewegung setzt.

Bei der Übertragung entstehen Eigenfrequenzen zwischen 800 und 1500 Hz. Da das Schwingungssystem aber nahezu kritisch gedämpft ist, treten keine nennenswerten Nachschwingungen auf. Unter diesen Bedingungen ist ein Informationsfluß von großer zeitlicher Dichte möglich.

Die Mittelohrmuskeln können die Übertragungseigenschaften des Trommelfell-Gehörknöchelchen-Systems reversibel beeinflussen. Vor allem bei Schallreizen hoher Intensität kontrahieren sich die an den Gehörknöchelchen ansitzenden Muskeln reflektorisch und so läßt sich ihnen eine Schutzfunktion zuordnen.

2.5 Reizverteilung im Innenohr

Als wichtigste Funktion des inneren Ohres muß die Reiz-Erregungstransformation in den Haarzellen des Cortischen Organs angesehen werden. Es erfolgt eine frequenzabhängige Reizverteilung (Frequenzdispersion) längs der Basilarmembran nach dem Wanderwellenprinzip. Ursache dieser Wellen sind die Kippbewegungen der Steigbügelfußplatte. Dadurch werden längsgerichtete Strömungsbewegungen in der Perilymphe der Vorhoftrappe veranlaßt. Die Ankopplung an die Paukentreppe erfolgt durch die Basilarmembran bzw. das Cortische Organ. Die verdrängte Perilymphe der Paukentreppe weicht dann in Richtung des runden Fensters aus.

Die Geschwindigkeit der Wanderwelle, die sich zum Schneckenloch hin bewegt, bleibt aber nicht konstant. Das hängt mit der sich ändernden Biegsamkeit der Basilarmembran zusammen, denn sie ist an der Basis schmaler und dicker als am Schneckenloch. Die Energie der in den Perilymphkanal hineinlaufenden Welle



wird durch Reibung allmählich verbraucht. Trotzdem wächst die Amplitude der Trennmembran zunächst an, da der Dämpfung durch schnellere Verminderung der Biegesteifheit begegnet wird. Erst nach Erreichen eines kritischen Punktes werden die Reibungsverluste plötzlich sehr groß und die Amplitude geht schnell auf

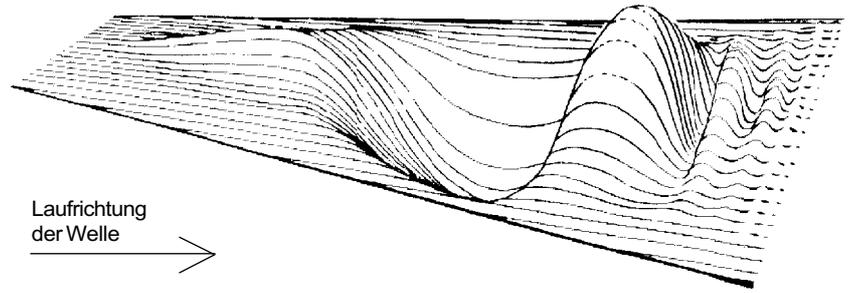


Abb. 6: Räumliche Darstellung der Schwingungsform der Basilarmembran

Null zurück. Dieser Punkt ist erreicht, wenn im Zuge ihrer fortlaufenden Verkürzung die Wellenlänge der Wanderwelle in die Größenordnung der maximalen Dehnfähigkeit der Basilarmembran kommt. Für jede Reizfrequenz wird der kritische Punkt an einem anderen Ort der Basilarmembran erreicht. Hohe Frequenzen erzeugen von vornherein kurze Wellenlängen und erreichen damit sehr schnell diesen kritischen Punkt. Niedrige Frequenzen erzeugen dagegen große Wellenlängen, die hingegen erst nahe dem Schneckenloch die starke Dämpfung erfahren.

An den Orten der maximalen Membranauslenkung findet die Reiz-Erregungstransformation statt. Nach erfolgter Umwandlung werden die Erregungen zur Hörrinde des Gehirns weitergeleitet und dort ausgewertet.

3 Planung der Versuche und des Versuchsaufbaus:

3.1 Grundlagen

Um eine qualitative Unterscheidung der Töne gewährleisten zu können, mußten wir bestimmte Tonfolgen entwickeln, die sich weder stark ähneln, noch stark unterscheiden. Da sich die Töne bei auf-/absteigenden Folgen direkt miteinander vergleichen lassen und somit leichter als alle anderen zu identifizieren sind, werden sie von den Testreihen ausgeschlossen. Die verwendeten vier Reihenfolgen sind hier im einzelnen noch einmal aufgeführt:

- 1.) Hoch —> Tief —> Mittel
- 2.) Tief —> Hoch —> Mittel
- 3.) Mittel —> Hoch —> Tief
- 4.) Mittel —> Tief —> Hoch

3.2 Geforderte Leistungen an die Meßelektronik

Die Aufgabe unserer Schaltung ist es, uns bei Ansteuerung des Zählers mit Wellen nur eine bestimmte voreingestellte Anzahl von Wellen zu liefern. Bei Ansteuerung mit Zeiteinheiten soll die gesamte Länge der ausgegebenen Wellen möglichst genau der von uns voreingestellten Zeit entsprechen. Dabei wollten wir Messungen von 1000 bis hinunter zu einer Wellenlänge bzw. von einer Sekunde bis zu einer Millisekunde im Frequenzbereich von 200 Hertz bis 10 Kilohertz durchführen. Auch musste die Tonausgabe in Nulldurchgängen beginnen und enden, um ein störendes Ein-/Ausschaltknacken zu unterbinden. Um eine Reproduzierbarkeit zu erreichen, mussten bestimmte Festfrequenzen einstellbar sein. Aus dem gleichen



Grund mussten auch die Pausen zwischen den einzelnen Tönen der Folge definierbar sein. Da wir eine leichte Bedienung gewährleisten wollten, wurden die Tonfolgen frei anwählbar organisiert.

3.3 Bestandteile und Funktionsgruppen der Messtechnik

Mit einem Frequenzgenerator geben wir ein Signal in Form einer Sinuskurve vor, dessen Frequenz fest vorgegeben wird. Dieses Signal wird digitalisiert und an den Zähler weitergegeben. Dieser kann mit Zeiteinheiten oder Wellenzahlen angesteuert werden. Da die Länge der Zeiteinheiten nicht immer mit denen der Wellen identisch ist, variieren bei Ansteuerung mit Zeiteinheiten die Anzahl der ausgegebenen Wellen. Dieses wird durch eine Synchronisation auf den Nullpunkt der Sinuswelle hervorgerufen, die nur die Ausgabe ganzer Wellenzüge erlaubt. Dieses ist insofern sinnvoll, um ein störendes bzw. ergebnisverfälschendes Ein-/Ausschaltknacken zu verhindern.

Dies ist auch der Grund, warum eine Synchronisation auf den Nulldurchgang des Eingangssignals unverzichtbar war.

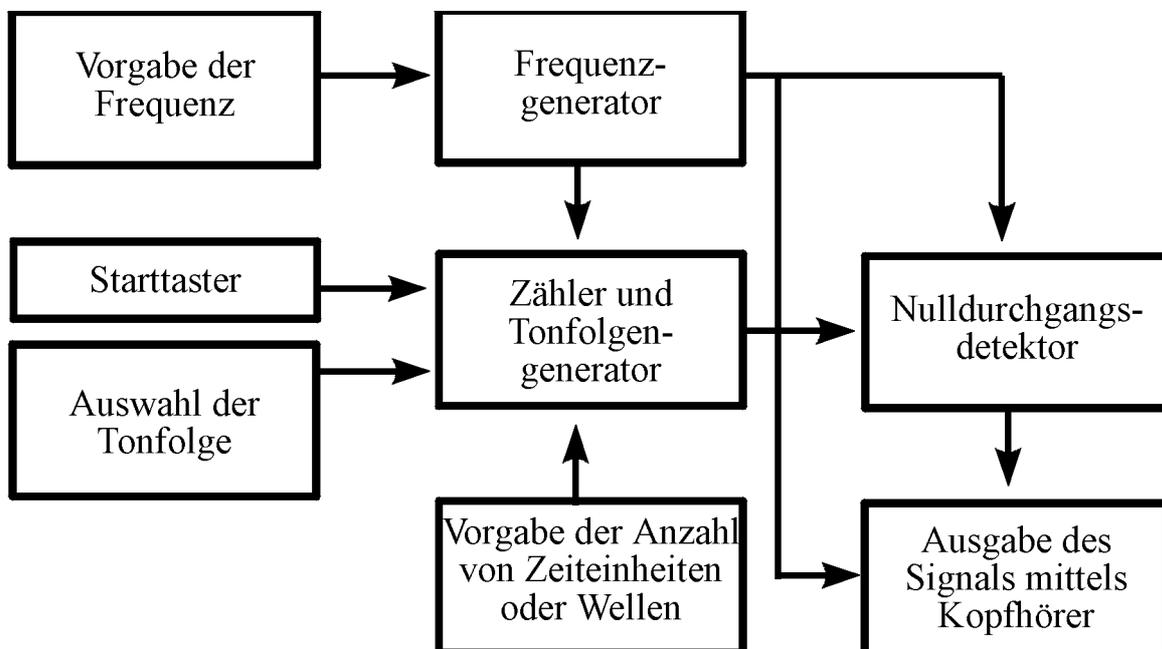


Abb. 7: Funktionsdiagramm der elektronischen Meßschaltung

4 Durchführung der Versuche

4.1 Vortests und daraus resultierende Erkenntnisse

Dadurch, daß wir vor den eigentlichen Testreihen noch solche aufnahmen, die mit den späteren identisch sein sollten, fanden wir heraus, daß alle von uns vorgetesteten Personen noch unter einer Grenze von 50 ms bzw. 50 Wellen fehlerfrei hören konnten. Deshalb konnten wir die Anforderungen an unsere Testgeräte heruntersetzen, was bedeutete, die „richtigen“ Tests erst bei einer Grundeinstellung von 50 beginnen zu lassen.

Die Frequenzen betreffend stellte sich, dass die Abstände der zu unterscheidenden Töne enger zu wählen waren, um in die Grenzbereiche des menschlichen Hörvermögens zu kommen. So wählten wir für die



einzelnen Testreihen Abstände, welche in der Musik als Ganz- und Halbtonschritte bezeichnet werden und nicht solche, wie anfangs angenommen, die im 100 Hertzbereich 200 Hz bzw. im Kilohertzbereich 2000 Hz auseinander zu liegen hatten. Als Schätzwert kann man für einen Ganztonschritt 12% und für einen Halbtonschritt 6% angeben, was eine manuelle Feinjustierung der Festfrequenzen erforderte.

Aus den Vortests ging hervor, dass auf- und absteigende Tonfolgen bessere Erkennungsgraten besaßen. Wir führen diese Tatsache darauf zurück, dass die Töne infolge ihrer direkten Vergleichbarkeit zueinander besser identifiziert werden konnten. Deshalb beschlossen wir diese zwei Folgen nicht mit in unsere Tests aufzunehmen.

Infolge starker Toleranzen zwischen Ergebnissen der einzelnen Testpersonen im Rahmen des „normalen“ Hörvermögens mussten wir feststellen, dass dieses bei der Auswertung eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen wird.

4.2 Tests

Die aufgenommenen Testreihen untergliedern sich in zwei große Gruppen: Vorgabe der Zeit und Vorgabe der Wellenzahl. Diese wurden jeweils bei niedrigen und hohen Frequenzen durchgeführt, zusätzlich wurde auch noch zwischen Halb- und Ganztonschritten unterschieden.

Niedrige Frequenz und Ganztonschritte bei Zeit														
Tonreihenfolge bei:	50	40	30	20	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
H T M														
T H M														1
M H T										1	1			
M T H												1	1	1
T H M														

4.3 Störfaktoren während der Tests

Die Testergebnisse hingen neben der Beeinflussung durch Umgebungsgeräusche auch stark von der jeweiligen Konzentration bzw. der Konzentrationsfähigkeit der Testperson ab. Deshalb achteten wir auf eine möglichst ruhige Testumgebung und verwendeten einen geschlossenen Kopfhörer, wodurch sich dieser Störfaktor vermindern ließ. Der Person wurden vor jeder Testreihe Tonfolgen vorgegeben, um diese zu sensibilisieren und ihr die Töne nahezubringen, womit wir eine anfänglich überdurchschnittlich hohe Fehlerrate zu verhindern versuchten.

4.4 Umfang der Tests

Im Rahmen unserer Jugend-Forscht-Arbeit konnten leider nur wenige Personen getestet werden, wir meinen jedoch, aus den gewonnenen Daten einen Trend und charakteristische Ergebnisse bilden zu können, welche sich bei umfangreicheren Versuchen bewahrheiten würden. Ansonsten wäre jedoch der Arbeitsaufwand so hoch gewesen, dass wir dieses Thema nicht binnen eines Jahres hätten bewältigen können. Daher war uns eine allgemeine Statistik verwehrt.



5 Auswertung

5.1 Erwartete Ergebnisse

Als ideale Ergebnisse hatten wir uns, den Untersuchungen über das menschliche Ohr entsprechend, einen annähernd „logarithmischem“ Anstieg erhofft. Das heißt, daß ab einer bestimmten Signallänge das Erkennungsvermögen des Ohres überfordert ist, und die Töne nicht mehr korrekt identifiziert werden können. Genauso hatten wir die Vorstellung, daß die Tests, welche wir mit Halbtonschritten durchführen würden, eine im Gegensatz zu den Ganztonschritten höhere Fehlerquote aufweisen, da durch die geringen Differenzen zwischen den Tönen diese schwieriger zu identifizieren sein werden. Entsprechend dazu sollte sich auch der Unterschied zwischen den niedrigen und hohen Frequenzen allgemein ausbilden.

Charakteristisch für Gehörschäden im hohen oder auch schon mittleren Alter ist insbesondere die Schwerhörigkeit bei hohen Frequenzen. Das hängt damit zusammen, daß ein Großteil der Geräusche, mit denen wir uns alltäglich konfrontiert sehen, in Frequenzbereichen über 1000 oder sogar 2000 Hertz liegen. So ist der Teil der Sinneszellen (Haarzellen), der in dem besonders oft angesprochenen Teil der Gehörschnecke liegt, viel größeren Belastungen ausgesetzt, als der für die niedrigeren Frequenzen zuständige Teil. Daraus läßt sich folgern, daß gerade der Abschnitt der Tests, der sich mit relativ hohen Tönen beschäftigt, bei älteren Menschen bezüglich der Fehlerquote besonders stark ausgeprägt sein wird. Allgemein gingen wir davon aus, dass sich der Übergangsbereich zwischen eindeutig fehlerfreiem und fehlerhaftem Hören in Richtung der längeren Signale verschieben würde. Über die Abhängigkeit dieser Veränderung in Bezug auf Wellenanzahl und Zeiteinheiten konnten wir noch keine Aussagen machen.

Zur Wahrnehmung eines Tones ist aus physikalischer Sicht nur eine Halbwelle vonnöten. Daher nahmen wir an, dass das menschliche Gehör eine bestimmte Anzahl von Wellen benötigt, um einen Ton als solchen zu erkennen, und somit die Möglichkeit der Identifizierung nicht von der gesamten zeitlichen Dauer abhängig ist. Dieses kann man daraus schließen, dass innerhalb eines bestimmten Zeitabschnittes mehr Wellen hoher Frequenzen wiedergegeben werden können, wobei schon weniger Wellen niedrigerer Frequenzen diesen Zeitraum ausfüllen. Somit muss auch das Zeitfenster für eine bestimmte Anzahl von Wellen bei niedriger Frequenz größer sein als bei hoher.

Außerdem waren wir der Meinung, daß sich bei keiner der unter 3.1 dargestellten Tonfolgen eine durchschnittlich höhere oder niedrigere Erkennungsrate herausbildet als bei den anderen Folgen.

5.2 Ergebnisse und deren Auswertung

Das tatsächliche Aussehen der Graphen aus den erschlossenen Daten der Testreihen weicht teilweise stark von den von uns prognostizierten ab, da auch jeder Mensch ein individuelles Hörvermögen besitzt. Auch spielen die in 4.3 genannten Störfaktoren hier eine wichtige Rolle.

Durch die Tests bemerkten wir, dass das individuelle Hörvermögen eine grössere Rolle spielt als wir bis dahin angenommen hatten. Um dieses sichtbar zu machen, wählten wir Testpersonen, die sich allein vom Alter her schon stark unterschieden. Da wir beweisen wollten, daß diese Schaltung Verwendung im medizinischen Bereich finden kann, um z.B. Gehörschäden frühzeitig erkennen zu können, testeten wir außerdem eine Person, von der wir wußten, daß ihre Hörfähigkeit beeinträchtigt ist. Es bildete sich ein so deutlicher Unterschied aus, daß wir es zuerst selbst nicht glauben konnten, aber das bewies, wo der



eigentliche Anwendungsbereich dieser Schaltung nur liegen konnte: Es wurde eine deutlich größere Anzahl von Wellenzügen benötigt, um eine Tonfolge noch richtig zu erkennen.

Genauso bewahrheitete sich unsere Hoffnung, die sich auf die Erkennungsrate der verschiedenen Folgen bezog: Wir konnten nicht feststellen, daß eine der von uns ausgewählten Tonfolgen eine signifikant von den übrigen abweichende Erkennungsrate aufwies.

Dass hohe Frequenzen in Abhängigkeit von der Länge des Zeitintervalles besser wahrgenommen werden können als bei Vorgabe einer bestimmten Wellenzahl, was wir schon im davorliegenden Punkt anschaulich durch verschiedene Anzahl von Wellen in einem Zeitfenster zu erklären versuchten, konnten wir eindeutig aus den Graphen herauslesen.

Berechnet man bei Vorgabe der Zeit die dabei erzeugten Wellenzüge, so kommt man bei einem Vergleich des Zeitpunktes, zu dem Hörfehler vermehrt auftreten, mit der entsprechenden Meßreihe bei Vorgabe der Wellenzüge zu folgendem Ergebnis: Bei hohen Frequenzen wird ein Ton wohl innerhalb kurzer Zeit richtig wahrgenommen, aber in diesem Zeitintervall sind auch bereits eine gewisse Anzahl von Wellenzügen übertragen worden. Entsprechende Berechnungen bei den tiefen Frequenzen bestätigen diese Aussage. Z.B. wird ein Ton von 2000 Hz nach 8 ms sicher erkannt, das entspricht 16 Wellenzügen - das stimmt überein mit der Feststellung, dass dieselbe Person diesen Ton bei einer anderen Messung nach ca. 20 Wellenzügen sicher erkannt hat. Bei tiefen Frequenzen (600 Hz) wird der Ton nach ca. 5 ms - entsprechend 3 Wellenzügen - bzw. bei Vorgabe der Wellenzüge nach 3 Perioden sicher erkannt. Offensichtlich spielt also die Zeitdauer eine nur untergeordnete Rolle, während die Anzahl der Schwingungsperioden viel entscheidender ist. Betrachtet man den physikalischen Hörvorgang, wie wir ihn in Abschnitt 2.5 beschrieben haben, ist dieser Zusammenhang auch verständlich. Möglicherweise wird ein Sinnesreiz erst dann an das Gehirn weitergeleitet, wenn die entsprechende Sinneszelle mehrfach gereizt wurde, wobei die Anzahl der Anregungen zusätzlich von der Tonhöhe abhängt.

Aus den Ergebnissen wurde außerdem ersichtlich, dass es keinen definierbaren Umschlagspunkt zwischen einer eindeutigen Erkennung und einer falschen Identifizierung gibt. Es existiert also in jedem Falle ein undefinierbarer Übergangsbereich, welcher vom individuellen Hörvermögen abhängig ist. Dieser Effekt wird durch zunehmendes Alter und der damit verbundenen Beeinträchtigung des Hörvermögens noch verstärkt.

Wir sind in der Theorie davon ausgegangen, dass die qualitative Identifizierbarkeit zum Einen entweder von Zeit oder der Wellenzahl und zum Anderen von der Frequenz abhängig ist. Unsere Messungen haben gezeigt, daß die Wellenzahl die entscheidende Größe darstellt, wobei die Anzahl der vollständig wahrzunehmenden Wellen zusätzlich von der Frequenz abhängt und in weiten Bereichen schwanken kann. Bei niedrigen Frequenzen können einige Testpersonen bereits nach einer einzigen Schwingungsperiode die Tonhöhe sicher identifizieren.

6 *Fazit*

Da unsere Testreihen nicht den erforderlichen Umfang hatten, um ergebnisbestätigende und repräsentative Aussagen machen zu können, sind leider keine Hochrechnungen möglich. Dennoch sehen wir unsere Erwartungen bestätigt und hoffen das dieses Verfahren anerkannt und etabliert wird. Damit ist natürlich Verbunden, dass es auf Interesse von Seiten der Öffentlichkeit und den entsprechenden Einrichtungen stößt.



7 Danksagung

Unser Dank gilt unseren Familien, da sie uns bei der Ausarbeitung der Arbeit hilfreich zur Seite standen, den Taxidienst übernahmen und sich bereitwillig als Testpersonen bereitstellten, wozu sich auch Marc, ebenfalls ein JuFo, bereitfand. Bei der Fehlersuche in der Schaltung war Stephan - ebenfalls JuFo - hilfreich. Während der gesamten Zeit konnten wir die freundliche Unterstützung der Familie Biedermann in Anspruch nehmen, wobei wir sie teilweise arg strapazierten. Dennoch waren sie stets gut aufgelegt und die Tradition der „Reismontage“ erhielt Einzug. Die wichtigste und hilfreichste Person bei unserer Arbeit war Thomas Biedermann, welchem wir ganz besonders danken möchten.

8 Literaturverzeichnis:

Karl Sommer: Der Mensch, Verlag Volk und Wissen VeB, Berlin 1979