



Seminararbeit

Thema: Lautheitsintegration bei CI-Trägern

Verfasser/in: Christoph Hofstetter

Leitfach: Physik

Seminarkürzel: 2W_Ph

Lehrkraft: Herr Dr. Grillenbeck

Abgabe der schriftlichen Arbeit am: 07.11.2023

Präsentation mit Prüfungsgespräch am:

____.____. 20____

Bewertung	Note	in Worten	Punkte		Punkte
schriftliche Arbeit				x 3	
Abschlusspräsentation				x 1	
Summe					
Gesamtleistung nach § 29 (7) GSO = Summe : 2 (gerundet)					

Unterschrift der Lehrkraft

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	3
1.1 Motivation und Zielsetzung	3
1.2 Experimentsituation und Hypothese	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen	5
2.1 Biologische und audiologicalhe Grundlagen	5
2.1.1 Das Hörsystem – Physiologie des Ohres	5
2.1.2 Das Cochlea-Implantat.....	8
2.2 Lautheit	11
3 Methode	13
4 Ergebnisse.....	16
4.1 Beschreibung der Plots	16
4.1.1 Normalhörende Probanden.....	16
4.1.2 CI-Probanden	19
4.2 Diskussion.....	22
5 Schluss	25
6 Literaturverzeichnis	26
7 Abbildungsverzeichnis	28
8 Selbstständigkeitserklärung	30

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Seit meinem zweiten Lebensjahr spielt das Thema Cochlea-Implantate (CI) in meinem Leben eine große Rolle, da ich selbst CIs trage. Täglich setze ich mich mit dem Thema „Hören“ auseinander, sei es in der Schule, im Alltag beim Musikhören oder beim Kommunizieren. Somit ist Hören für mich oftmals auch eine große Belastung. Aber nicht nur mir geht es so.

Laut Bayerischem Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung ist zum Internationalen Tag der Gehörlosen am 25. September 2011 festgestellt worden, dass zum Jahresende 2009 43.552 Personen (ca. 4 % der Schwerbehinderten Bayerns) wegen Schwerhörigkeit oder Gehörlosigkeit als schwerbehindert gelten.¹ Davon seien 13 % komplett taub, wodurch sich allein in Bayern eine beträchtliche Personenanzahl von 5821 tauben Personen ergibt. Laut Statistik sind 52 % dieser Personen von Geburt an gehörlos und 46 % aufgrund einer Krankheit ertaubt.

Nach einer Berechnung des Deutschen Schwerhörigenbunds e.V. gab es Ende 2018 in ganz Deutschland ca. 4,5 Mio. Schwerhörige im Alter von 14 bis 19 Jahren.² Vor allem für Jugendliche ist Kommunikation ein sehr wichtiger Teil ihres Erwachsenwerdens. Nicht nur für die Kommunikation ist gutes Hören wichtig, sondern auch für Freude, Spaß und Lebensqualität, etwa beim Feiern oder bei Treffen mit Freunden.

Nun haben schwerhörige Jugendliche oftmals große Probleme mit der Kommunikation und dem generellen Sprachgebrauch, was in vielen Fällen dazu führt, dass sie keinen Anschluss zu ihrem sozialen Umfeld finden. Eine mögliche Konsequenz ist, dass diese Jugendlichen im späteren Leben sich schwertun, eine Arbeitsstelle zu finden, die ihren Wünschen und Vorstellungen entspricht.

¹ Bayern in Zahlen 10 (2011), S. 513. Online unter: https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/biz/z1000g_201110.pdf (Abruf: 18.10.2023).

² Deutscher Schwerhörigenbund e.V.: Schwerhörigkeit nach Alter. In: Statistiken. Online unter: <https://www.schwerhoerigen-netz.de/statistiken> (Abruf: 24.09.2023).

Deshalb ist es von enormer Bedeutung, vor allem Kinder mit Cochlea-Implantaten sehr früh zu fördern, sei es durch Logopädie oder durch technische Forschungen, die zur Verbesserung des CIs beitragen können.³

Trotz stetiger Verbesserung der CIs erzielen dessen Träger, verglichen mit Normalhörenden, deutlich schlechtere Ergebnisse in Bezug auf Sprachverstehen und Hörverstehen mit Störgeräuschen. Selbstverständlich kann die Hörwahrnehmung von CI-Trägern nicht mit der von Normalhörenden verglichen werden. Obwohl das CI akustische Signale sehr genau verarbeiten kann, gibt es dennoch einen enormen Unterschied in Bezug auf das Verständnis von Sprache und Lauten zwischen CI-Trägern und Normalhörenden. Deshalb gilt es zu untersuchen, wie das Wahrnehmen von Geräuschen am besten verbessert werden kann, um Jugendlichen, aber auch älteren Personen das Hören so leicht und angenehm zu machen wie es Technik und Forschung zulassen.

1.2 Experimentsituation und Hypothese

An der Technischen Universität (TU) München untersucht Prof. Dr.-Ing. Werner Hemmert am Lehrstuhl für Bioanaloge Informationsbearbeitung die zeitliche Informationsverarbeitung im auditorischen System, um zum Beispiel automatische Spracherkennungssysteme zu verbessern. Prof. Hemmert führt dazu unter anderem Lautheitsintegrationsexperimente durch (siehe Kapitel 3). Im Laufe des Jahres 2023 war ich in München und habe an einem Lautheitsintegrationsexperiment teilgenommen. Die Ergebnisse dieses Experimentes sind die Datengrundlage dieser Arbeit. Zu erwarten ist, dass das menschliche Gehör längere Reize lauter als kürzere Reize wahrnimmt. Um zu testen ob dieses Phänomen, die sogenannte Lautheitsintegration, auch bei CI-Trägern auftritt, habe ich die an der TU erstellten Messreihen verwendet um die Lautheitsintegration bei CI Probanden zu untersuchen.⁴

³ Vgl. Wilson, Blake S. und Dorman, Michael F.: Cochlear implants: Current designs and future possibilities. In: Journal of Rehabilitation Research & Development 45,5 (2008), S. 695–730 doi:10.1682/jrrd.2007.10.0173 (Abruf: 18.10.2023).

⁴ Carlyon, Robert P.; Deeks, John M.; McKay, Colette M.: Effect of Pulse Rate and Polarity on the Sensitivity of Auditory Brainstem and Cochlear Implant Users to Electrical Stimulation. In: Journal of the Association for Research in Otolaryngology 5 (2015), S. 653–668, doi:10.1007/s10162-015-0530-z (Abruf: 20.10.2023).

1.3 Aufbau der Arbeit

Im Folgenden werden in Abschnitt zuerst die Grundlagen erläutert, die für das Verständnis dieser Arbeit essenziell sind. Dazu zählen biologische und audiologische Grundlagen, insbesondere das Hörsystem (die Physiologie) des Ohres. Ebenso wird auf die Grundlagen und die Funktionsweise des Cochlea-Implantats eingegangen. Außerdem soll geklärt werden, was Lautheitsintegration ist und wie sie sich bei Normalhörenden und CI-Trägern verhält.

Anschließend werden Details zum Aufbau des Lautheitsexperimentes und zum Ablauf des Versuches erklärt. Schließlich werden die Ergebnisse des Hörversuchs dargestellt und ausgewertet. Die Arbeit wird zum Schluss mit einer Diskussion und einem anschließenden kurzen Rückblick auf die Hypothese abgeschlossen, wobei ein Vergleich von „normal hörend“ und „hörend mit Cochlea-Implantaten“ hinsichtlich der Lautheitsintegration durchgeführt wird.

2 Grundlagen

2.1 Biologische und audiologische Grundlagen

2.1.1 Das Hörsystem – Physiologie des Ohres

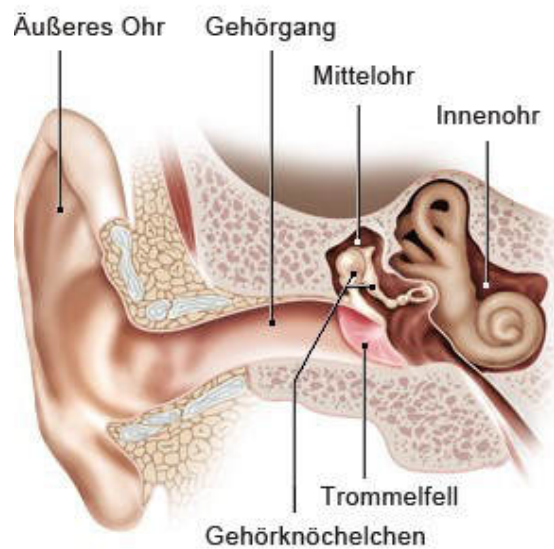


Abb. 1: Aufbau des Hörsystems. (Quelle: Was passiert bei einer Ohrenuntersuchung? In: Gesundheitsinformation.de. Online unter: <https://www.gesundheitsinformation.de/was-passiert-bei-einer-ohrenuntersuchung.html> (Abruf: 17.10.2023).)

Das menschliche Ohr wird in drei Teile gegliedert: das Außen-, das Mittel- und das Innenohr, wobei alle drei Teile für die Schallaufnahme und vor allem die Schallverarbeitung essenziell sind.⁵

Das Außenohr bestehend aus der Ohrmuschel und dem Gehörgang haben die Aufgaben der Schallaufnahme und der Schallortung. Gelangen Schallwellen aus der Luft über die trichterförmige Ohrmuschel und den Gehörgang (Außenohr) zum Trommelfell bringen die Schallwellen dieses zum Schwingen. Luftschall wird hier also in mechanische Schwingungen umgewandelt.⁴

Die Schwingung des Trommelfells wird im Mittelohr zuerst über die Gehörknöchelchenkette (Hammer, Amboss, Steigbügel) und die Steigbügel Fußplatte ins Innenohr übertragen. Es kommt dabei zu einer Verstärkung des Signals, die der Impedanzanpassung zwischen Luft (im Mittelohr) und Wasser (im Innenohr) dient. Die Steigbügel Fußplatte verschließt das ovale Fenster der Cochlea (Hörschnecke). Im Innenohr, bestehend aus dem Gleichgewichtsorgan und der Cochlea, werden die

⁵ Die folgende Darstellung nach Lippert, Herbert: Anatomie. Text und Atlas. Deutsche und lateinische Namen. 4., überarb. Aufl. München 1983, S.386; Lenarz, Thomas; Boeninghaus, Hans-Georg: Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde. 14., überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg 2012, S. 386.

mechanisch weitergeleiteten Schallwellen schließlich in der Cochlea aufgenommen und weiter verarbeitet.

Das Innenohr ist mit einer besonderen Flüssigkeit gefüllt, die man sich ein wenig wie flüssiges Gelee vorstellen kann. Das Innenohr wird von drei Bogengängen (den Gleichgewichtsorganen) und der Cochlea gebildet.

Die Cochlea, bekannter unter der Bezeichnung Hörschnecke, liegt fest im Felsenbein und vollzieht zweieinhalb Windungen. Noch dazu besteht sie aus drei mit einer Flüssigkeit (Perilymphe bzw. Endolymphe) gefüllten Gänge (Scala tympani, Scala vestibuli und Scala media), die alle unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Diese drei Räume werden durch das sogenannte Corti'sche Organ, die Basilarmembran und die Reissner'sche Membran voneinander getrennt.

Da Flüssigkeiten nicht zusammengepresst werden können (Inkompressibilität), kommt es durch jede Schwingung des Steigbügels zu einer Auslenkung der Basilarmembran. Die wellenförmige Auslenkung wird von der Basilarmembran in Richtung der Schneckenspitze geleitet, bis das Maximum der Auslenkung erreicht ist. Dabei führt eine hohe Anregungsfrequenz zu einem Maximum an der Schneckenbasis (weiter außen in der Cochlea), eine eher niedrige Anregungsfrequenz zu einem Maximum im Bereich der Schneckenspitze.⁶ Diese Verteilung von verschiedenen Frequenzhöhen entlang der Cochlea wird als Tonotopie bezeichnet und ermöglicht uns, unter anderem, ein Hören von verschiedenen Tonhöhen.⁷

Abb. 2 zeigt, dass sich das Corti'sche Organ mit den Haarsinneszellen auf der Basilarmembran befindet. Die inneren Haarsinneszellen im Corti'schen Organ wandeln akustische Informationen (codiert durch mechanische Schwingungen der Basilarmembran) in elektrische Ströme zur weiteren Verarbeitung im Gehirn um.

⁶ Lenarz und Boenninghaus 2012, S. 11-21.

⁷ Vgl. Recio-Spinoso, Alberto; Dong, Wei; Oghalai, John S.: On the Tonotopy of the Low-Frequency Region of the Cochlea. In: Journal of Neuroscience 28 (2023), S. 5172–5179, doi:10.1523/JNEUROSCI.0249-23.2023 (Abruf: 13.09.2023).

Durch Auslenkung der Basilarmembran durch einen Laut oder ein Geräusch werden die Stereozilien, winzige haarähnliche Vorsprünge auf der Oberfläche von sensorischen Zellen (auch Haarzellen genannt), in Bewegung gebracht. Durch diese Bewegung der Stereozilien wird ein Rezeptorpotenzial ausgelöst.⁸

Die äußeren Haarsinneszellen dienen bei der mechanischen Übermittlung vermutlich als aktive Schwingungsverstärker, in dem die äußeren Haarsinneszellen bei einer Änderung des Rezeptorpotenzials ihre Lage verändern. Die Änderung des Rezeptorpotenzials der inneren Haarsinneszellen führt zur Freisetzung von Aktionspotenzialen, die über die Hörbahn zum auditiven Kortex weitergeleitet werden. Die Informationen der Aktionspotenziale werden auf der Hörbahn sowie im auditorischen Kortex verarbeitet. Dort werden Aufgaben der Kodierung, Dekodierung und Verarbeitung von akustischen Informationen übernommen.

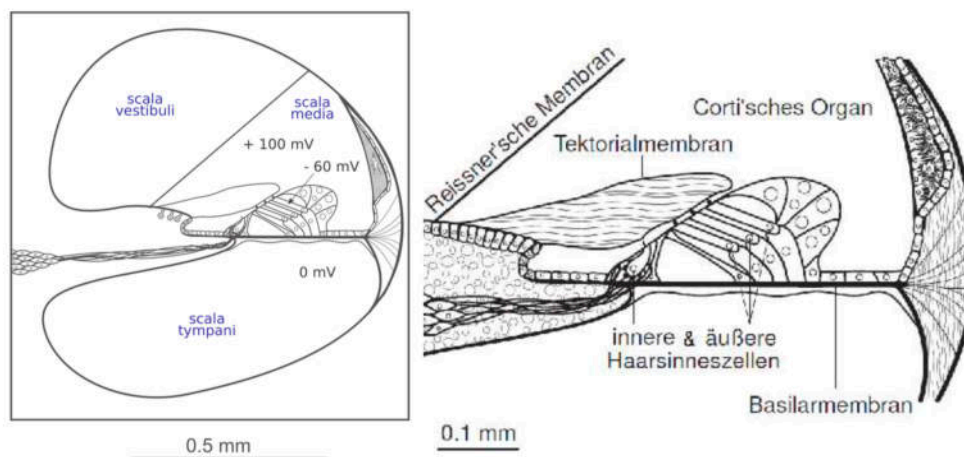


Abb. 2: Aufbau der Cochlea. Links: Schnitt durch die Elektrolyträume der Cochlea: Scala tympani, Scala vestibuli und Scala media. Rechts: Vergrößerung des Corti'schen Organs. (Quelle: Werner Hemmert, TU München.)

2.1.2 Das Cochlea-Implantat

Mithilfe von Cochlea-Implantaten kann bei Verlust der inneren Haarsinneszellen die damit einhergehende Gehörlosigkeit in den meisten Fällen umgangen werden. Das Implantat imitiert die Funktion von Außen-, Mittel- und Innenohr und reizt den

⁸ Kachar, Bechara: High-Fidelity Stereocilia. In: Intramural Research Program, 24.05.2023. Online unter <https://irp.nih.gov/our-research/research-in-action/high-fidelity-stereocilia> (Abruf: 08.09.2023).

Hörnerv durch elektrische Stimulation. Dadurch kann erreicht werden, dass Aktionspotenziale induziert werden, die wie beim physiologischen Hörvorgang auch zum auditiven Kortex weitergeleitet werden.

Das CI besteht aus einem externen (sichtbaren) und einem internen (implantierten) Teil. In Abb. 4 werden der Aufbau, die Komponenten und die Übertragungswege von CIs dargestellt und benannt.

- Mikrofon: Nimmt ankommende Geräusche bzw. Schall auf.
- Sprachprozessor mit Batterie: Wandelt die akustischen Geräusche (abhängig von der Lautstärke und der Frequenz) in geeignete Stimuli um, die an die Übertragungsspule geleitet werden.
- Transkutane Verbindung (externe Übertragungsspule und implantierte Empfangsspule): Ermöglicht die Übertragung von Stimuli und Energie per Hochfrequenzsignal zum Implantat (Simulator).
- Empfänger/Stimulator: Dekodiert das empfangene Signal und generiert die elektrischen Stimuli.
- Kabel zwischen Empfänger und Elektroden: Leitet die elektrischen Stimuli zu den Elektroden in der Cochlea.
- Elektroden-Array: Wird in der Scala tympani implantiert und enthält aneinander gereihete Kontakte aus Iridium und Platin. Meist sind es zwischen 12 und 22 Elektroden, die implantiert werden.⁹

⁹ Deutscher Schwerhörigenbund o.J., S. 13; vgl. auch [Anonym:] Hören mit Licht: Cochlea Implantat völlig neugedacht. In: MeinHoergeraet.de, 13.09.2022. Online unter: <https://www.meinhoergeraet.de/de/news/hoeren-mit-licht-cochlea-implantat-voellig-neuge-dacht/4575> (Abruf: 18.10.2023).

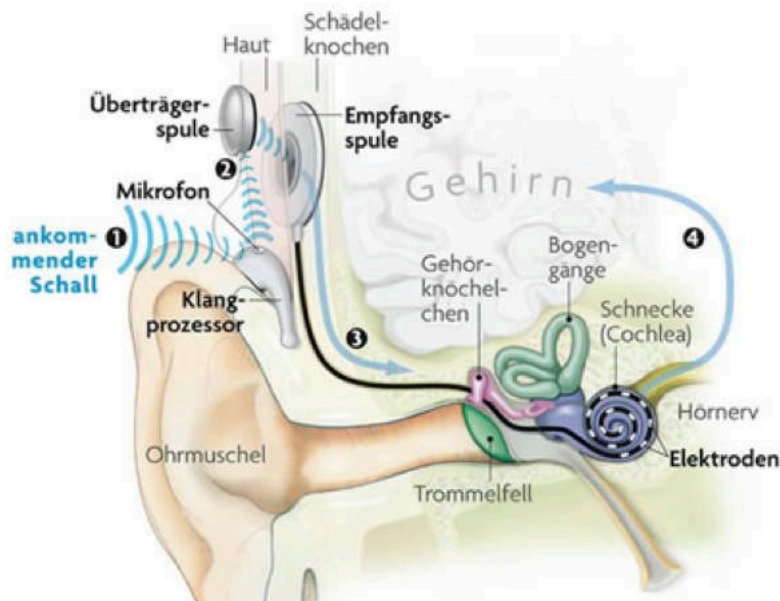


Abb. 3: Aufbau eines Cochlea-Implantates. Darstellung der Übertragungswege vom Schall bis zum Gehirn. (Quelle: [Anonym:] Eine bionische Hörprothese: das Cochlea-Implantat. In: BIOKON – Das Bionik-Kompetenznetz, 31.07.2014. Online unter: <https://www.biokon.de/eine-bionische-hoerprothese-das-cochlea-implantat/> (Abruf: 18.10.2023).)

Nachdem akustische Signale mithilfe des Mikrofons aufgenommen wurden, werden im Sprachprozessor mithilfe von Kodierungsstrategien die akustischen Signale in elektrische Signale umgewandelt. Dabei wird als Erstes der Hauptsprachbereich zwischen 100 Hz und 8000 Hz herausgefiltert und um knapp 6 dB verstärkt.

Das gesamte Spektrum des Signals wird danach mithilfe einer Filterbank in einzelne Frequenzbänder aufgeteilt. Es gibt so viele Frequenzbänder wie es Elektroden gibt. Dann wird das Signal noch in weiteren Arbeitsschritten bearbeitet, damit es danach entsprechend per Hochfrequenzimpulse an den implantierten Empfänger weitergegeben werden kann. Dort wird das bearbeitete Signal in elektrische Impulse umgewandelt und entsprechend der Tonotopie an das Elektroden-Array in der Cochlea weitergeleitet. An welcher Elektrode das Elektronen-Array mit welcher Frequenz angeregt wird, hängt tatsächlich vom Stimulus und von der Lage des Elektronen-Arrays ab, denn die exakte Lage des Arrays variiert interindividuell.¹⁰

¹⁰ Landsberger, David M.; Svrakic, Maja; Roland, J. Thomas Jr.; Svirsky, Mario: The Relationship Between Insertion Angles, Default Frequency Allocations, and Spiral Ganglion Place Pitch in Cochlear Implants. In: *Ear and Hearing* 5 (2015), S. e207–e213, doi:10.1097/AUD.000000000000163 (Abruf: 18.10.2023).

Außerdem wird dem Elektroden-Array ein elektrisches Feld induziert, um die umgebenden Nervenfasern zu erregen, damit der elektrische Stimulus zum Gehirn weitergeleitet werden kann.

Üblicherweise werden die Elektroden mit biphasischen Pulsen stimuliert (d. h., die Flussrichtung des elektrischen Impulses wechselt), welche trotzdem gut eingestellt sein müssen, damit es nicht zu Muskelzuckungen im Bereich des Gesichts kommt.¹¹ Denn je höher die Phasenlänge oder die Stromstärke des Pulses ist, desto weiter reicht das elektrische Feld der Elektroden. Somit können auch andere Nervenfasern im Bereich des Gesichts erregt werden. In Abb. 3 kann man den natürlichen Hörvorgang mit einem Hörvorgang mit Cochlea-Implantat vergleichen und sehen, welcher Teil des natürlichen Hörens vom Cochlea-Implantat übernommen wird.

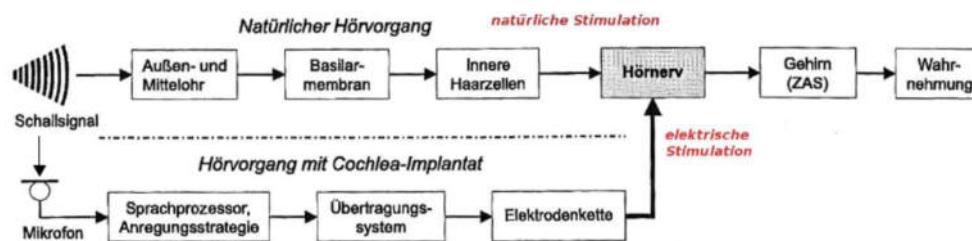


Abb. 4: Übertragungswege bei natürlicher und elektrischer Stimulation des Hörnervs. (Quelle: Hamacher, Volkmar Signalverarbeitungsmodelle des elektrisch stimulierten Gehörs Mainz, 2004.)

2.2 Lautheit

Lautheit ist einer der klassischen psychoakustischen Parameter neben Schärfe, Rauigkeit, Tonalität und Schwankungsstärke. Lautheit spiegelt die subjektiv empfundene Lautstärke von Schallen wieder. Lautheit wird in der Einheit Dezibel (dB SPL), welches ein weltweiter Ausdruck für die Lautstärke von Tönen und Geräuschen ist und durch spezielle Dezibelmesser oder auch mit einfachen Apps auf dem Smartphone berechnet werden kann, gemessen. Damit man die menschliche Wahrnehmung von Lautheit darstellen kann, wurden Lautheitsskalen entwickelt, die zeigen, wie sich die Lautheit bei verschiedenen Voraussetzungen verhält.

¹¹ Wilson, Blake S. und Dorman, Michael F.: Cochlear implants: Current designs and future possibilities. In: Journal of Rehabilitation Research & Development 45,5 (2008), S. 695–730. doi:10.1682/jrrd.2007.10.0173 (Abruf: 18.10.2023)

Bei Normalhörenden wird die Lautheit von der Frequenz des Schalles, der spektralen Verteilung sowie der zeitlichen Dauer eines Schallsignals beeinflusst. Flacht eine Lautheitsintegrationskurve (LI-Kurve) ab, welche die wahrgenommene Lautstärke in Abhängigkeit der Länge des Signals darstellt, kann darauf erschlossen werden, dass ab einer bestimmten Stimulationsdauer eine verlängerte Stimulationsdauer keine Änderung in der Lautheit bewirkt, was allerdings vor dieser Abflachung noch der Fall ist.

Bei Menschen mit Cochlea-Implantat ist die Lautheitsintegration, welche beschreibt, wie das Gehirn Schallreize aus verschiedenen Quellen oder Zeitpunkten zusammenführt, um die wahrgenommene Lautstärke zu bestimmen, ein wenig anders. Dieses Konzept ist wichtig für die Gestaltung von Audiogeräten und den Schutz vor Lärmschäden.¹² Denn neben dem zeitlichen Integrationseffekt wird die Lautheit auch durch die Stimulationsstärke bestimmt, wobei es sich um die Amplitude der Stimulationsimpulse handelt.

Bei Normalhörenden spielt dieser Faktor eben keine Rolle. Normalhörende haben dafür eine besondere Sensibilität (reagieren bessere darauf), welche sich im Hauptsprachbereich (500 Hz bis 4 kHz) befindet.¹³

¹² Kluge: Wofür steht Dezibel und wie wird es gemessen? In: okluge.de [11.05.2020]. Online unter: <https://shop.okluge.de/blog/dezibel/> (Abruf: 25.09.2023).

¹³ Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie: [Thema: Lärm] Akustische Grundlagen. Online unter: <https://www.hlnug.de/themen/laerm/akustische-grundlagen> (Abruf: 10.10.2023).

3 Methode

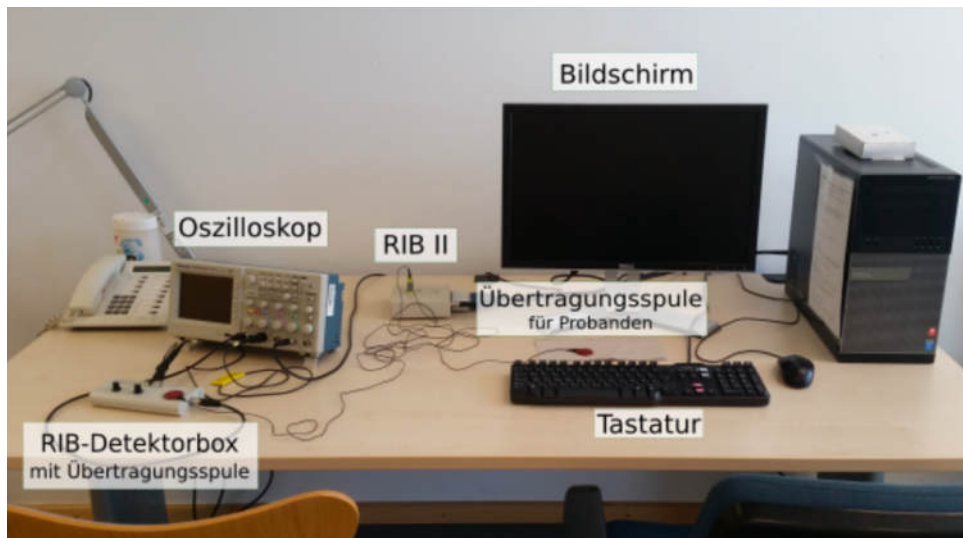


Abb. 5: Messaufbau und Komponenten zur Durchführung des Experimentes (Quelle: TU München)

Zur Messung des psychoakustischen Experiments zur Hörschwellenmessung wurden die Frequenzen 408 Hz, 491 Hz, 3483 Hz und 4090 Hz mit 8 unterschiedlichen Längen (im Bereich von 10 Millisekunden bis 1000 Millisekunden) gewählt, um größere Bereiche von Geräuschen abzudecken und eine genauere Aussage treffen zu können. Außerdem wurden folgende Hardware-Komponenten wie in Abb. 4 zu sehen sind, zur Durchführung des Experimentes genutzt.

Bei diesem Experiment handelt es sich um ein psychoakustisches Experiment. Solche Experimente werden durchgeführt um subjektive Wahrnehmungen (z.B Lautheit) beschreiben und genauer interpretieren zu können. Abhängig von der Art des psychoakustischen Versuchs, aber auch der gewünschten Genauigkeit des Ergebnisses gibt es verschiedene Messmethoden. Eine davon ist die Ermittlung der Hörschwelle, also des minimalen Schalldrucks, den das Ohr je nach Frequenz auflösen kann bzw. des Tons, den eine Person gerade noch wahrnehmen kann. Die Werte der folgenden Messungen wurden anhand einer einmaligen Durchführung des Experimentes gewonnen, wobei der Proband den Stimulus hinsichtlich vorgegebener Merkmale selbst kontrollierte (in unserem Fall: Bestimmung der Hörschwelle durch

eigenständige Regelung der Lautstärke). Bei dieser Art von Ermittlung handelt es sich um die sogenannte Method of Adjustment (Methode der Reizfindung):¹⁴

Die Versuchsperson sitzt in einer schallisolierten Kabine, damit Störgeräusche vermieden werden, und hat eine Tastatur vor sich, um die Hörschwelle einzustellen. Außerhalb der Tonkammer sitzt die untersuchende Person, die dem Probanden die Stimuli in verschiedenen Längen, Lautstärken und Frequenzen in unterschiedlicher Reihenfolge abspielt. Die Reihenfolge wird deshalb variiert, damit der Proband wirklich jedes Mal sich auf seine Hörschwelle konzentrieren muss. Außerdem wird während des Experimentes immer nur ein Ohr beschallt, denn die Ergebnisse zwischen „nur ein Ohr“ und „zwei Ohren“ sind tatsächlich unterschiedlich: Kommt der Ton an beiden Ohren an, ist die Hörschwelle niedriger als wenn derselbe Ton nur an einem Ohr ankommt. Somit werden die Ohren als „unabhängig“ voneinander betrachtet. Gemessen wird also eher an einer Anzahl von Ohren als an einer Anzahl von Versuchspersonen. Vor dem Experiment wird eine Trainingsrunde mit verschiedenen Frequenzen durchgenommen, um den Probanden mit dem Verfahren vertraut zu machen und im eigentlichen Experiment Zeit zu sparen; somit kann während des Experimentes der Anfangswert in der Nähe der eigentlichen Hörschwelle gewählt werden, damit der Proband nicht allzu lange suchen muss.

Jeder Stimulus (jede Kombination aus Frequenz und Dauer) wird viermal gemessen, damit man möglichst zuverlässige Ergebnisse erhält. Die Daten wurden anschließend für jeden Probanden normalisiert, wobei die geringste eingestellte Amplitude als 0 Dezibel angenommen wird. Durch diesen Vorgang wird die individuelle Hörschwelle eines Probanden verwendet um Ergebnisse in vergleichbaren Bereichen zu gewährleisten. Nach dem Test werden die Ergebnisse in MATLAB (einer Plattform für Programmierung und numerische Berechnungen) bearbeitet und in einem Diagramm veranschaulicht (siehe unten, Abb. 6). Dieses Experiment wird auf beiden Seiten des Probanden durchgeführt. Der Vorteil, die komplette

¹⁴ Fastl, Hugo; Zwicker, Eberhard: Psychoacoustics. Facts and models. 2. Aufl. Berlin 1999, S. 9. Siehe auch Kauer, Sebastian: Anmerkungen zur Psychoakustik. In: ders.: Entwicklung einer Multimedia-Lehranwendung zur Psychoakustik: Auditive Wahrnehmung und die Rolle kritischer Bandbreiten. Dokumentation des Stands der Wissenschaft. Implementierung der Lehrinheit. Magisterarbeit TU Berlin 2003. Online unter: <http://www.netaudio.de/psychoakustik/Daten/einfuehrung/psychoakustik.htm> (Abruf: 20.10.2023).

Messreihe auf beiden Ohren durchzuführen, besteht darin, dass ein eins zu eins Vergleich gemacht werden kann. Es sei jedoch angemerkt, dass individuelle Unterschiede im Hörvermögen dazu führen können, dass die LI-Kurve bei jeder Person variiert.¹⁵



Abb. 6: Technik und Hörkammer in der der Proband mit den Kopfhörern sitzt
(Quelle: Christoph Hofstetter)

¹⁵ Gescheider, George A.: Psychophysics. The Fundamentals. 3. Aufl. New York 2013, S.45.

4 Ergebnisse

4.1 Beschreibung der Plots

In den folgenden Abbildungen sind die Lautheitsintegrationskurven verschiedener Frequenzen zu sehen. Es wurden niederfrequente und hochfrequente Signale ausgewählt um ein möglichst großen Frequenzbereich abzudecken, welche CI-Träger wahrnehmen können, abgedeckt sind.

Die Kurven sind als normalisierte Lautstärke (dB) über die Zeitdauer (in Millisekunden) angegeben. Die LI-Kurve kann dabei als Mittelwert mit Standardabweichung betrachtet werden. Die Standardabweichung stellt die Streuung der Werte dar und gibt Auskunft darüber, wie weit die einzelnen Werte voneinander abweichen bzw. wie der Proband bei jedem Messdurchgang die Hörschwelle für einen Stimulus unterschiedlich eingestellt hat. Aus diesen Werten lässt sich letzten Endes eine durchschnittliche LI-Kurve pro Proband bilden. Noch dazu sollte darauf geachtet werden, dass aufgrund meiner eingeschränkten Hörfähigkeit und der Verarbeitung der Signale über meinen Sprachprozessor (denn ein Sprachprozessor von einer anderen Person könnte die Kurve drastisch verändern) die LI-Kurven eine komplexere Struktur aufweisen und von den erwarteten Kurven abweichen können.

4.1.1 Normalhörende Probanden

Im ersten Diagramm (Abb. 6) werden die LI-Kurven zweier verschiedener Frequenzen (408 Hz und 4090 Hz) eines normalhörenden Probanden gezeigt. Wie bereits in der Hypothese erwähnt wurde, ist bei beiden Frequenzen festzustellen, dass ein kurzer akustischer Reiz, also ein Ton von geringer Dauer im Bereich von 10 Millisekunden, eine bedeutend höhere Lautstärke benötigt, um noch hörbar zu sein. Hingegen kann man erkennen, dass bei längerer Dauer des akustischen Reizes, etwa im Bereich von 1000 Millisekunden, die Lautstärke des Tons reduziert werden kann und er dennoch wahrgenommen wird. Es ist bei beiden Frequenzen erkennbar, dass die LI-Kurven mit zunehmender Dauer des Stimulus deutlich flacher verlaufen. Für sehr kurze Tonreize (10 Millisekunden bis 100 Millisekunden) liegt demnach die erforderliche Lautstärke bei der Frequenz 408 Hz zwischen 24 dB und 7 dB. Dagegen lässt sich feststellen, dass die Frequenz von 4090 Hz eine deutlich niedrigere

Lautstärke (zwischen 16 dB und 2 dB) bei denselben kurzen Tonreizen (10 Millisekunden bis 100 Millisekunden) benötigt. Darüber hinaus fällt auf, dass der Proband bei einigen Stimuli entweder eine präzise Bestimmung seiner Hörschwelle erreicht hat (zum Beispiel bei der Frequenz 408 Hz und einer Dauer von 45 Millisekunden oder bei der Frequenz 4090 Hz und einer Dauer von 15 Millisekunden) oder aber die Stimuli nur leicht unterschiedlich wahrgenommen hat, eine nachlassende Konzentration auftrat, was zu unterschiedlichen Einstellungen der Hörschwelle führte. Diese Variation zeigt sich durch die größeren Standardabweichungen (beispielsweise bei der Frequenz 408 Hz und einer Dauer von 20 Millisekunden oder 80 Millisekunden aber auch bei der Frequenz 1090 Hz und einer Dauer von 21 Millisekunden oder 500 Millisekunden).

Der Mittelwert dieser individuellen Werte für jeden Stimulus ergibt schließlich die LI-Kurve für die jeweilige Frequenz. Zum Ende beider Kurven hin ist eine Abflachung festzustellen. Daraus lässt sich schließen, dass ab einem bestimmten Punkt eine Verlängerung der Stimulusdauer im weiteren Verlauf der Kurve nur noch eine geringfügige Reduzierung der Stimulationsstärke benötigt.

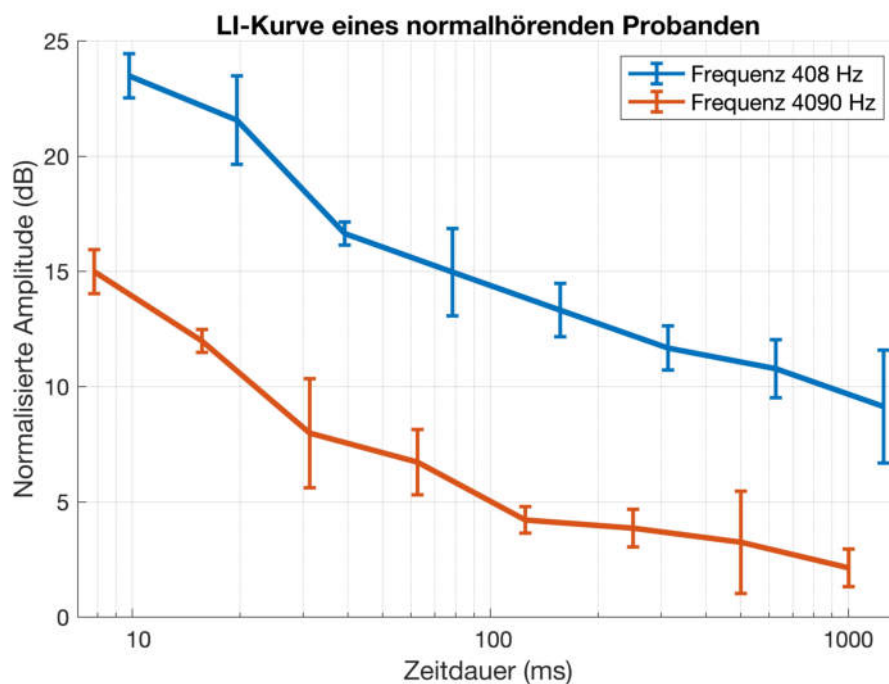


Abb. 7: Versuchsperson PW (normalhörend) – Ergebnis des Lautheitsexperiments. (Quelle: Christoph Hofstetter)

Um eine Vorstellung davon zu bekommen, wie die LI-Kurven bei Normalhörenden im Durchschnitt aussehen, betrachten wir im Folgenden als Diagramm (Abb. 7) den sogenannten „normalhörenden Durchschnitt“. Hier sind die Kurven von nur zwei verschiedene Frequenzen (408 Hz und 4090 Hz) zu sehen. Wie in der Hypothese erwähnt, ist bei beiden Kurven anfänglich ein fast exponentieller Abfall zu beobachten (sieht wie eine Gerade aus), der sich jedoch nach einer bestimmten Zeit (ungefähr nach 500 Millisekunden) abflacht. Dies verdeutlicht, dass ein kurzer akustischer Reiz, also ein Ton von geringer Dauer im Bereich von 10 Millisekunden, eine bedeutend höhere Lautstärke benötigt, um noch hörbar zu sein. Im Gegensatz dazu zeigt sich, dass bei längerer Dauer des akustischen Reizes, etwa im Bereich von 1 Sekunde, die Lautstärke des Stimulus reduziert werden kann, während er dennoch wahrgenommen wird. Für sehr kurze Tonreize (10 Millisekunden bis 100 Millisekunden) liegt demnach die erforderliche Lautstärke bei der Frequenz 408 Hz zwischen 8 dB +/- Standardabweichung und 33 dB +/- Standardabweichung. Dagegen lässt sich feststellen, dass die Frequenz 4090 Hz erneut eine deutlich niedrigere Lautstärke (diesmal zwischen 1,5 dB und 18 dB) bei denselben kurzen Tonreizen (10 Millisekunden bis 100 Millisekunden) benötigt. Die deutlich erhöhten Standardabweichungen bei jedem Stimulus und für jede Frequenz lassen sich auf die Entstehung des Diagramms zurückführen. Denn dazu wurden acht normalhörende Probanden benötigt, die individuell ihre Hörschwelle einstellten. Besonders auffällig ist die Frequenz 4090 Hz, da die Standardabweichungen im Vergleich zur Frequenz 408 Hz nicht konstant und gleich groß sind. Die Standardabweichungen bei der Frequenz 4090 Hz sind deutlich kleiner und nehmen ab, je länger der Stimulus dauert. Generell vermittelt das Diagramm anhand der LI-Kurve ein gutes Bild davon, wie die Lautheitsintensität bei den meisten normalhörenden Personen verläuft.

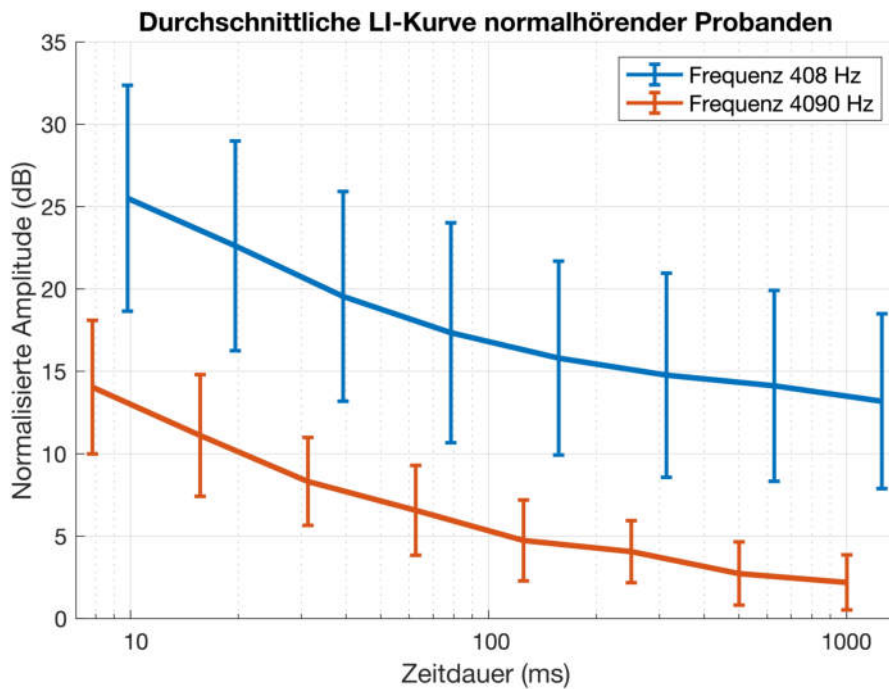


Abb. 8: Normal hearing average – Ergebnis des Lautheitsexperiments (Durchschnitt) (Quelle: Christoph Hofstetter)

4.1.2 CI-Probanden

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse meines eigenen Versuches (gehörlos) präsentiert. Es erfolgt zunächst eine Betrachtung der linken Cochlea-Implantatseite (Abb. 8), die sich leicht von der rechten Seite unterscheidet.

In Abb. 8 werden die LI-Kurven für vier verschiedene Frequenzen (408 Hz, 491 Hz, 3483 Hz und 4090 Hz) dargestellt. Es lässt sich eine signifikante Abweichung von den LI-Kurven eines normalhörenden Individuums feststellen. Die charakteristische exponentielle Abnahme, gefolgt von einer Abflachung der Kurve, die bei Normalhörenden beobachtet wird, ist hier nicht eindeutig erkennbar. Bei jeder Frequenz zeigt die Kurve anfänglich einen leichten Abfall, um dann ab einer Zeitdauer von 100 Millisekunden wieder leicht anzusteigen. Besonders auffällig ist die beträchtliche Amplitude der Unterschiede in der Einstellung der Hörschwelle für einen Stimulus bei der Frequenz 491 Hz und einer Zeitdauer von etwa 130 Millisekunden.

Bei der Frequenz 408 Hz lässt sich feststellen, dass die eingestellte Lautstärke für den Stimulus sowohl bei kurzer als auch bei langer Stimulusdauer nahezu unverändert bleibt. Insgesamt sind die LI-Kurven der Frequenzen 3483 Hz und 4090 Hz im Vergleich zu denen eines Normalhörenden ähnlicher.

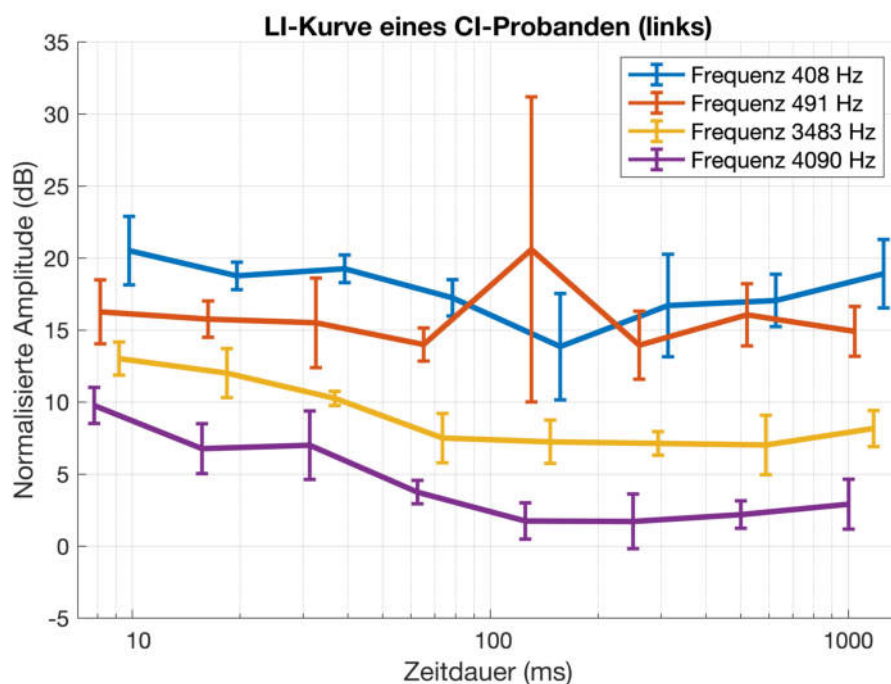


Abb. 9: Versuchsperson CH (CI-Träger) – Ergebnis des Lautheitsexperiments (links). (Quelle: Christoph Hofstetter)

Nun wird die rechte Cochlea-Implantatseite betrachtet (Abb. 9), deren Ergebnisse ebenfalls von den üblicherweise erwarteten abweichen, jedoch stärker der Hypothese entsprechen. Analog zu den vorherigen Darstellungen zeigt Abb. 9 die Kurven für vier verschiedene Frequenzen (408 Hz, 491 Hz, 3483 Hz und 4090 Hz). Generell ist festzustellen, dass alle Kurven deutlich flacher verlaufen und weniger exponentiell abfallen, im Gegensatz zu den erwarteten Ergebnissen bei normalhörenden Personen. Besonders auffällig ist die Kurve der Frequenz 408 Hz, die zahlreiche Sprünge aufweist, was mit der signifikanten Standardabweichung in Verbindung steht. Diese ist bei 20 Millisekunden (Standardabweichung), 300 Millisekunden (Standardabweichung) und 160 Millisekunden (Standardabweichung) auffällig groß. Hieraus lässt sich ableiten, dass für diese spezifischen Stimuli die Hörschwelle unterschiedlich eingestellt wurde.

Bei der LI-Kurve mit der Frequenz 491 Hz und den anderen Kurven in diesem Diagramm fällt auf, dass sie auffallend flach (bedeutet: kurze und lange Töne werden

gleich laut wahrgenommen) sind. Normalerweise sollte eine solche Kurve, ebenso wie die LI-Kurven normalhörender Personen, wesentlich steiler verlaufen. Die Kurve mit der Frequenz 3483 Hz und jene mit der Frequenz 4090 Hz weisen ebenfalls einen flachen Verlauf auf, wie bereits erwähnt. Dennoch ist festzustellen, dass die Standardabweichung bei nahezu allen Stimuli (außer bei 3483 Hz und 300 Millisekunden) dieser beiden Kurven äußerst gering ist. Diese geringe Abweichung unterstreicht die Genauigkeit dieser beiden Kurven.

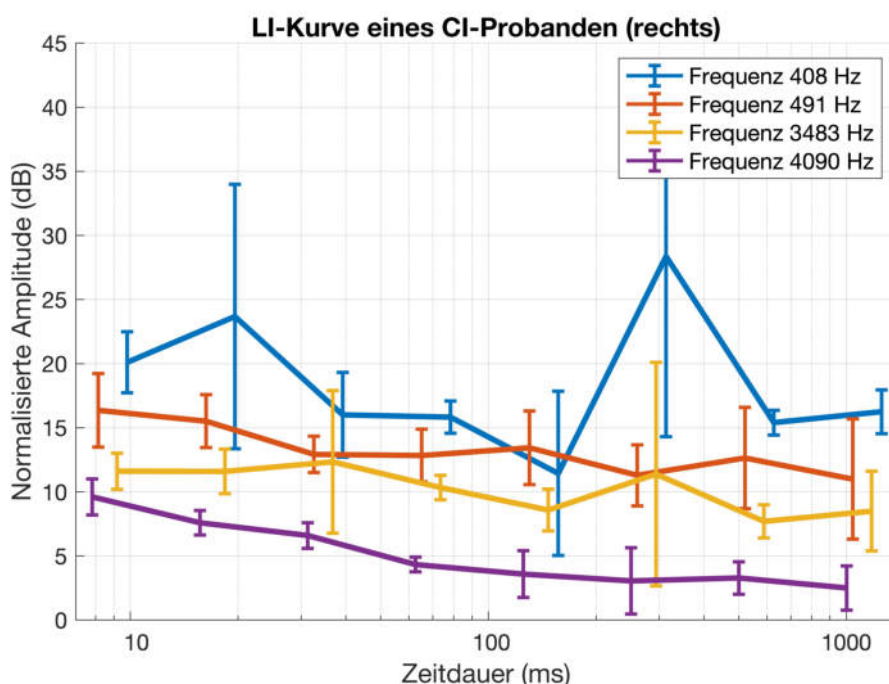


Abb. 10: Versuchsperson CH (CI-Träger) – Ergebnis des Lautheitsexperiments (rechts) (Quelle: Christoph Hofstetter)

Das nächste Diagramm (Abb. 10) präsentiert durchschnittliche LI-Kurven von vier bis sechs Cochlea-Implantat-Probanden. Ähnlich wie in den vorherigen Darstellungen sind hier die Kurven von vier verschiedenen Frequenzen (408 Hz, 491 Hz, 3483 Hz und 4090 Hz) zu erkennen. Ein bemerkenswertes Merkmal ist die Ähnlichkeit der LI-Kurven, die alle zu Beginn (10 Millisekunden) abfallen und ab einer bestimmten Zeit (700 Millisekunden) wieder ansteigen, was allerdings untypisch für dieses Experiment ist. Die deutlich erhöhten Standardabweichungen bei jedem Stimulus und für jede Frequenz lassen sich leicht erklären, da das Diagramm wie gesagt Durchschnittskurven von vier bis sechs Cochlea-Implantat-Teilnehmern zeigt und jeder einzelne Teilnehmer die Stimuli auf unterschiedliche Werte einstellt.

Dennoch fällt auf, dass die Abweichungen der LI-Kurven im Vergleich zu einer LI-Kurve von Normalhörenden signifikant geringer sind. Ein markanter Unterschied zu einem normalhörenden Individuum liegt in den wieder ansteigenden Teilen der LI-Kurven. Hierbei wird deutlich, dass Cochlea-Implantat-Träger im Allgemeinen leisere Stimuli (alle Stimuli unter 5 dB) nicht wahrnehmen können und daher eine höhere Lautstärke einstellen müssen. Es ist jedoch zu beobachten, dass die LI-Kurven der Frequenzen 491 Hz und 4090 Hz am Ende der Zeitdauer (1000 Millisekunden) nicht wie die anderen beiden Kurven weiter ansteigen. Stattdessen zeigen sie eine Abwärtsbewegung (Frequenz 4090 Hz) bzw. eine lineare Verlängerung (Frequenz 491 Hz). Dies könnte darauf hinweisen, dass die meisten Cochlea-Implantat-Träger möglicherweise auf diese beiden Frequenzen empfindlicher reagieren.

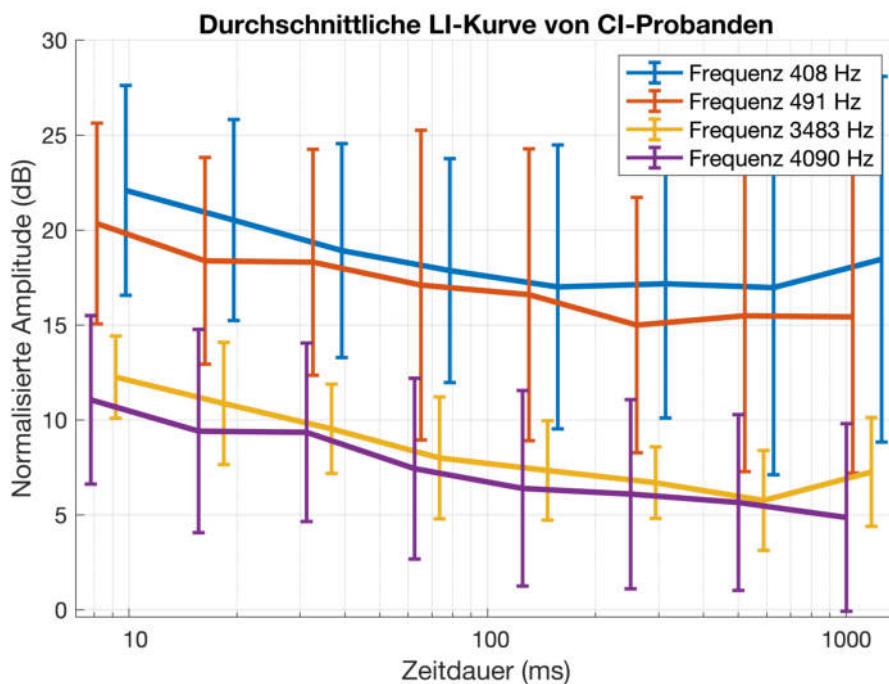


Abb. 11: Versuchspersonen vier bis sechs CI-Träger – Ergebnis des Lautheitsexperiments (Durchschnitt) (Quelle: Christoph Hofstetter)

4.2 Diskussion

Im vorigen Abschnitt wurden die Lautheitskurven von einerseits normal hörenden Probanden und andererseits Probanden mit Cochlea-Implantaten verglichen, wobei bereits auf den ersten Blick deutliche Unterschiede erkennbar sind. Diese Kurven

sollen nun miteinander verglichen werden; dabei soll versucht werden, Rückschlüsse auf die Lautheitsintegration bei CI-Trägern zu ziehen.

Die Ergebnisse der normalhörenden Probanden (Abb. 6 und 7) zeigen, dass bei beiden Frequenzen (408 Hz, 4090 Hz) eine deutliche streng monoton abfallende LI-Kurve zu erkennen ist, d. h.: Bei Normalhörenden findet eindeutig Lautheitsintegration statt, was die Hypothese bestätigt. Bei längerer Dauer des akustischen Reizes, z. B. im Bereich von 1000 Millisekunden, kann die Lautstärke reduziert werden, während der Ton noch wahrgenommen wird. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass für die Wahrnehmung kurzer Töne eine höhere Lautstärke erforderlich ist. Längere Töne hingegen kommen dagegen mit einer geringeren Lautstärke aus, was genau dem Konzept der Lautheitsintegration entspricht.

Interessant ist auch, dass die LI-Kurven mit zunehmender Stimulusdauer flacher werden. Dies deutet darauf hin, dass die wahrgenommene Lautstärke bei längeren Stimulusdauern weniger variiert. Für kurze Tonreize (10 Millisekunden bis 100 Millisekunden) liegt die erforderliche Lautstärke bei der Frequenz 408 Hz zwischen 24 dB und 7 dB, während die Frequenz 4090 Hz eine geringere Lautstärke (16 dB bis 2 dB) erfordert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hohe Frequenzen als lauter wahrgenommen werden als tiefe Frequenzen. Deshalb werden hohe Frequenzen leiser eingestellt.

Die Ergebnisse der CI-Probanden weisen jedoch viele Ausreißer, Unregelmäßigkeiten und Individualitäten auf. Diese können auf verschiedene Faktoren zurückgeführt werden, wie z. B. auf das Implantationsalter, also den Zeitpunkt, zu dem der Proband sein individuelles Cochlea-Implantat implantiert bekommen hat, auf die medizinischen Konditionen, unter denen der Proband sein CI implantiert bekommen hat, auf die Position des Elektroden-Arrays und auch auf die Einstellungen des CI durch den Tontechniker. Jeder dieser Punkte kann also zu einer individuell besseren oder schlechteren LI-Kurve des CI-Probanden führen, die davon geprägt ist, wie „gut“ oder „schlecht“ der CI-Proband letztendlich hört.

Darüber hinaus fällt im Durchschnittsplot der CI-Probanden auf, dass die LI-Kurven nur leicht abfallen und zum Teil am Ende wieder ansteigen. Dies bedeutet, dass die Lautheitsintegration bei den CI-Probanden weniger stark ausgeprägt oder nur teilweise vorhanden ist und von den genannten individuellen Unterschieden geprägt ist. Je steiler die LI-Kurve verläuft, desto stärker ist die Lautheitsintegration.

Sowohl bei Normalhörenden als auch bei den CI-Probanden zeigt der Verlauf der LI-Kurven gegen Ende, dass ab einem bestimmten Punkt eine Verlängerung der Stimulusdauer nur noch eine geringere Abnahme der Stimulusintensität (Lautheit) erfordert. Dies deutet darauf hin, dass es einen Punkt gibt, an dem die Wirkung der Stimulusdauer auf die wahrgenommene Lautstärke abflacht (Lautheitsintegration). Dieses Phänomen bedeutet, dass Töne mit zunehmender Dauer nicht immer leiser eingestellt werden können, da sich schließlich ab etwa 1000 Millisekunden ein konstanter Lautstärkepegel einstellt. Somit gibt es eine sogenannte 500 ms Grenze, bei der die Lautstärke nicht mehr variiert. Sowohl bei Normalhörenden als auch bei CI-Trägern.

Diese Ergebnisse untermauern somit die Hypothese, dass das menschliche Gehör längere Reize mit geringer Lautstärke wahrnehmen kann als kürzere Reize. Noch dazu ist festzustellen, dass Lautheitsintegration bei normalhörenden definitiv vorhanden ist, während sie bei CI-Trägern nur teilweise ausgeprägt, aber dennoch variabel ist.

5 Schluss

In dieser Arbeit wurden die zeitliche Lautheitsintegration bei Normalhörenden und vor allem bei CI-Trägern nach einer akustischen Stimulation (Experiment) untersucht. Die Hörschwellen wurden für verschiedene Frequenzen und Stimulationsdauern gemessen. Jedoch variierten die Messwerte bei den einzelnen Probanden stark (Standardabweichung). Zwischen Normalhörenden und CI-Trägern wurde auch eine große Variabilität beobachtet. Deutlich war auch, dass sowohl CI- als auch Normalhörer im Allgemeinen höhere Hörschwellen für niedrige Frequenzen hatten. Trotz der flachen Kurven bei CI-Probanden, ist Lautheitsintegration bei CI-Nutzern vorhanden, aber deutlich weniger stark ausgeprägt. Die Ergebnisse scheinen also insgesamt der Hypothese (Kapitel 1.2) zu entsprechen, dass das menschliche Gehör längere Reize lauter als kürzere Reize wahrnimmt. Es wären allerdings weitere Untersuchungen erforderlich, um diese Effekte speziell bei CI-Trägern noch genauer zu untersuchen und um mehr Daten der CI-Probanden in den akustischen Stimulationsexperimenten erhalten und analysieren zu können.

6 Literaturverzeichnis

- [Anonym:] Hören mit Licht: Cochlea Implantat völlig neugedacht. In: MeinHoergeraet.de, 13.09.2022. Online unter: <https://www.meinhoergeraet.de/de/news/ hoeren-mit-licht-cochlea-implantat-voellig-neugedacht/4575> (Abruf: 18.10.2023).
- Bayern in Zahlen 10 (2011), hrsg. v. Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung. Online unter: https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/biz/z1000g_201110.pdf (Abruf: 18.10.2023).
- Carlyon, Robert P.; Deeks, John M.; McKay, Colette M.: Effect of Pulse Rate and Polarity on the Sensitivity of Auditory Brainstem and Cochlear Implant Users to Electrical Stimulation. In: Journal of the Association for Research in Oto-laryngology 5 (2015), S. 653–668, doi:10.1007/s10162-015-0530-z (Abruf: 20.10.2023).
- Deutscher Schwerhörigenbund e.V.: Das Cochlea-Implantat. (Ratgeber 8.) [Berlin] o.J. Online unter: <https://www.schwerhoerigen-netz.de/cochlea-implantat/> (Abruf: 18.10.2023).
- Deutscher Schwerhörigenbund e.V.: Schwerhörigkeit nach Alter. In: Statistiken. Online unter: <https://www.schwerhoerigen-netz.de/statistiken> (Abruf: 24.09.2023).
- Fastl, Hugo; Zwicker, Eberhard: Psychoacoustics. Facts and models. 2. Aufl. Berlin 1999.
- Gescheider, George A.: Psychophysics. The Fundamentals. 3. Aufl. New York 2013.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie: [Thema: Lärm] Akustische Grundlagen. Online unter: <https://www.hlnug.de/themen/laerm/akustische-grundlagen> (Abruf: 10.10.2023).
- Himmer, Nina: Hörprobleme: Was kann ein Cochlea-Implantat? In: Apotheken Umschau, 24.02.2022. Online unter: <https://www.apotheken-umschau.de/therapie/therapiearten/hoerprobleme-was-kann-ein-cochlea-implantat-743541.html> (Abruf: 18.10.2023).
- Kachar, Bechara: High-Fidelity Stereocilia. In: Intramural Research Program, 24.05.2023. Online unter <https://irp.nih.gov/our-research/research-in-action/high-fidelity-stereocilia> (Abruf: 08.09.2023).

- Kauer, Sebastian: Anmerkungen zur Psychoakustik. In: ders.: Entwicklung einer Multimedia-Lehranwendung zur Psychoakustik: Auditive Wahrnehmung und die Rolle kritischer Bandbreiten. Dokumentation des Stands der Wissenschaft. Implementierung der Lehreinheit. Magisterarbeit TU Berlin 2003. Online unter: <http://www.netaudio.de/psychoakustik/Daten/einfuehrung/psychoakustik.htm> (Abruf: 20.10.2023).
- Kluge: Wofür steht Dezibel und wie wird es gemessen? In: okluge.de [11.05.2020]. Online unter: <https://shop.okluge.de/blog/dezibel/> (Abruf: 25.09.2023).
- Landsberger, David M.; Svrakic, Maja; Roland, J. Thomas Jr.; Svirsky, Mario: The Relationship Between Insertion Angles, Default Frequency Allocations, and Spiral Ganglion Place Pitch in Cochlear Implants. In: *Ear and Hearing* 5 (2015), S. e207–e213, doi:10.1097/AUD.000000000000163 (Abruf: 18.10.2023).
- Lenarz, Thomas; Boenninghaus, Hans-Georg: Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde. 14., überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg 2012.
- Lippert, Herbert: Anatomie. Text und Atlas. Deutsche und lateinische Namen. 4., überarb. Aufl. München 1983.
- Recio-Spinoso, Alberto; Dong, Wei; Oghalai, John S.: On the Tonotopy of the Low-Frequency Region of the Cochlea. In: *Journal of Neuroscience* 28 (2023), S. 5172–5179, doi:10.1523/JNEUROSCI.0249-23.2023 (Abruf: 13.09.2023).
- Wilson, Blake S. und Dorman, Michael F.: Cochlear implants: Current designs and future possibilities. In: *Journal of Rehabilitation Research & Development* 45,5 (2008), S. 695–730. doi:10.1682/jrrd.2007.10.0173 (Abruf: 18.10.2023).

7 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufbau des Hörsystems. (Quelle: Was passiert bei einer Ohrenuntersuchung? In: Gesundheitsinformation.de. (Abruf: 17.10.2023).)

Abb. 2: Aufbau der Cochlea. Links: Schnitt durch die Elektrolyträume der Cochlea: Scala tympani, Scala vestibuli und Scala media. Rechts: Vergrößerung des Corti'schen Organs. (Quelle: Werner Hemmert, TU München.)

Abb. 3: Aufbau eines Cochlea-Implantates. Darstellung der Übertragungswege vom Schall bis zum Gehirn. (Quelle: [Anonym:] Eine bionische Hörprothese: das Cochlea-Implantat. In: BLOKON – Das Bionik-Kompetenznetz, 31.07.2014 (Abruf: 18.10.2023).)

Abb. 4: Übertragungswege bei natürlicher und elektrischer Stimulation des Hörnervs. (Quelle: Hamacher, Volkmar Signalverarbeitungsmodelle des elektrisch stimulierten Gehörs Mainz, 2004.)

Abb. 5: Messaufbau und Komponenten zur Durchführung des Experimentes (Quelle: TU München)

Abb. 6: Technik und Hörkammer in der der Proband mit den Kopfhörern sitzt (Quelle: Christoph Hofstetter)

Abb. 7: Versuchsperson PW (normalhörend) – Ergebnis des Lautheitsexperiments. (Quelle: Christoph Hofstetter)

Abb. 8: Normal hearing average – Ergebnis des Lautheitsexperiments (Durchschnitt) (Quelle: Christoph Hofstetter)

Abb. 9: Versuchsperson CH (CI-Träger) – Ergebnis des Lautheitsexperiments (links). (Quelle: Christoph Hofstetter)

Abb. 10: Versuchsperson CH (CI-Träger) – Ergebnis des Lautheitsexperiments (rechts) (Quelle: Christoph Hofstetter)

Abb. 11: Versuchspersonen vier bis sechs CI-Träger – Ergebnis des Lautheitsexperiments (Durchschnitt) (Quelle: Christoph Hofstetter)

8 Selbstständigkeitserklärung

Ignaz-Günther-Gymnasium



Seminararbeit

Erklärung der eigenständigen Erstellung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift des Verfassers/der Verfasserin