

# Kriterien von Cochlea-Implantat-Nutzern zur Beurteilung der Ratentönhöhe

Sonja Karg<sup>1</sup>, Manuela Huber<sup>1</sup>, Werner Hemmert<sup>1</sup>, Florian Völk<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Bioanaloge Informationsverarbeitung, Technische Universität München, 85748 Garching, Deutschland*

<sup>2</sup>*WindAcoustics UG, 86949 Windach, Deutschland*

*Email: karg@tum.de*

## Einleitung

Durch Variation der Stimulationsrate bei Cochlea-Implantaten (CIs) kann sich die vom Nutzer berichtete Tonhöhe ändern, typischerweise bei Raten unterhalb von 300 pps [1, 2, 3], in manchen Fällen auch bis 900 pps [4, 5, 6]. Zusätzlich kann die Position der Stimulations-elektrode das Tonhöhenurteil beeinflussen [1, 7].

In dieser Studie beurteilten neun CI-Nutzer mittels freier Größenschätzung die Tonhöhe von Impulsfolgen, die sich in Rate (156, 313, 625, 1250 pps) und Elektrodenposition unterschieden (fünf Einzelelektroden, über das gesamte Array verteilt). Außerdem wurde versucht, in einem Fragebogen unter anderem mit Hilfe eines semantischen Differentials Kriterien zu erheben, die CI-Nutzer zur Beurteilung der Ratentönhöhe benutzen.

## Grundlagen der Ratentönhöhe

Beim Hören mit CI lässt sich die Tonhöhenwahrnehmung neben der Elektrodenposition auch über die Stimulationsrate verändern [1]. Dabei steigt im Allgemeinen mit steigender Rate auch die Tonhöhe (ähnlich dem gesunden Hörsystem mit akustischer Stimulation). [2, 4] stellten zur Verdeutlichung des genannten Sachverhalts einen Vergleich zur Tonhöhe von amplitudenmoduliertem weißem Rauschen an, die für Normalhörende bis zu einer Frequenz im Bereich von 300 bis 500 Hz wahrnehmbar ist. Beim CI tritt ab etwa 300 pps Stimulationsrate eine deutliche Änderung der Tonhöhenbeurteilung ein [1, 2], wobei die Beurteilung vermutlich oberhalb nicht notwendigerweise auf der Wahrnehmung von Tonhöhe beruht, was zu einer im Vergleich zu Normalhörenden wesentlich reduzierten Tonhöhenunterschieds- bzw. Diskriminationsschwelle führt [3]. Allerdings wurde auch bei höheren Pulsraten bei Ratenvariation eine Tonhöhenänderung berichtet [4, 5].

Verschiedene Studien weisen darauf hin, dass in Hörversuchen evtl. generell nicht nur die Tonhöhe als Kriterium für die Unterscheidung von Ratenänderungen verwendet wird, sondern möglicherweise auch Rauigkeit oder Schärfe [3], oder eine Art Sauberkeit der Empfindung [8]. [6] zeigte zudem, dass obwohl unter gewissen Stimulationsbedingungen die Unterscheidbarkeit von Ratenvariationen verbessert werden kann, kein Einfluss auf die Tonhöhe zu beobachten ist.

## Probanden und Stimuli

An dieser Studie nahmen neun CI-Nutzer im Alter von 22 bis 55 Jahren (Durchschnitt: 44 Jahre) teil. Alle Probanden waren mit Implantaten der Firma MedEl (Produkte:

Pulsar, Sonata, Concerto) versorgt und hatten mindestens zwei Jahre Hörerfahrung mit ihrem Implantat.

Die Implantate wurden unter Umgehung des im Alltag verwendeten Sprachprozessors direkt mit der Research-Interface-Box RIB II (Institut für Ionenphysik und angewandte Physik der Universität Innsbruck) stimuliert. Die entsprechenden Stimulussequenzen wurden als Pulse mit einer Länge von 300 ms bei verschiedenen Stimulationsraten (156, 313, 625, 1250 pps) als biphasische Pulse mit 40  $\mu$ s Phasenbreite ohne Gap am Computer generiert.

Die je fünf betrachteten Elektroden wurden individuell so ausgewählt, dass für jeden CI-Nutzer zwei eher apikal (aus dem Bereich E1 bis E3), zwei eher mittig (E5 bis E8) und eine eher basal (E9 bis E12) gelegene Elektroden enthalten waren. Die Elektrode E6 wurde bei allen Probanden als Referenz verwendet.

## Methode und Vorgehen

Vor den Hauptversuchen wurden individuell für alle betrachteten Elektroden mit den jeweiligen Simulationssequenzen die Hörschwellen (THR, für Details vgl. [9]) und maximal akzeptierten Stimulationsamplituden (MAL) mittels eines Einregelverfahrens je dreimal bestimmt. Zusätzlich wurde individuell viermal ein Abgleich der Lautheit der verwendeten Elektroden auf die Referenz bei 1250 pps in einem Einregelverfahren vorgenommen (Abgleich des an zweiter Stelle präsentierten Stimulus auf den ersten).

Für den Hauptversuch wurde eine relative Größenschätzung der Tonhöhe mit den genannten fünf Elektroden und vier Pulsraten durchgeführt. Dies bedeutet, dass die Probanden aufgefordert wurden, der Tonhöhe eine beliebige positive rationale Zahl zuzuordnen, mit der einzigen Maßgabe, dass Verhältnisse korrekt wiedergespiegelt werden sollen, d. h. dass einer doppelt so hohen Tonhöhe auch eine doppelt so große Zahl zugeordnet wird [10].

Zusätzlich wurden von jedem Probanden auf einem aus einem Blatt Papier bestehenden Fragebogen Fragen beantwortet und ein semantisches Differential erhoben. Die für das semantische Differential verwendeten Gegensatzpaare wurden basierend auf elf empirisch erhobenen Tonhöhenunterscheidungskriterien aus dem Sprachgebrauch von CI-Nutzern gebildet. Zwischen jedem der Gegensatzpaare befand sich eine Linie mit einer Länge von 85 mm, auf der der betreffende Proband ein seiner Einschätzung möglichst entsprechendes Kreuz einzeichnen sollte. Das semantische Differential wurde mit einer auf dem Elektrodenträger in

der Mitte oder apikal gelegenen Elektrode jeweils bei den Pulsraten 156, 313 und 625 pps durchgeführt.

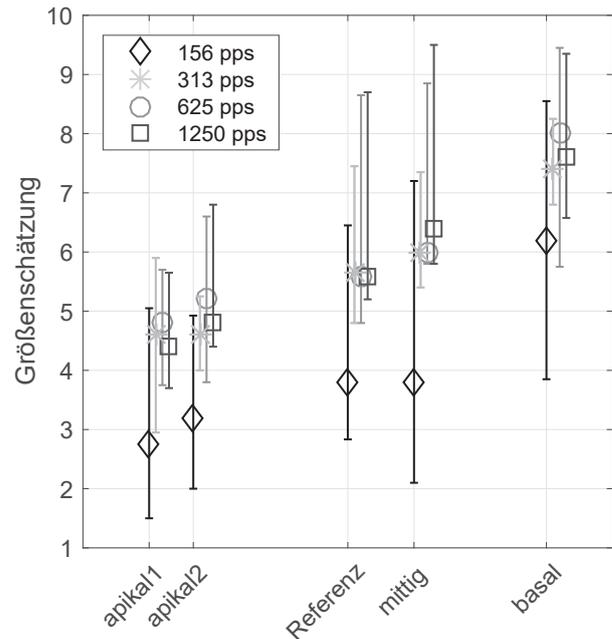
## Ergebnisse zur Ratentönhöhe

Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse für die Gesamtgruppe durch die Mediane und Interquartilbereiche der individuellen Ergebnisse der relativen Größenschätzung der Tonhöhe. Die Ergebnisse sind als Rohdaten, also ohne weitere Verarbeitung mit linearer y-Achsenkalierung direkt dargestellt.

Im Wesentlichen ergibt sich trotz relativ großer Streubereiche für die fünf betrachteten Elektroden über das Array verteilt eine tonotopische Anordnung, wie auch in einer detaillierten Studie zur Ortstonhöhe bei CI-Nutzern mit der hier diskutierten Probandengruppe [11] und wie basierend auf der Literatur zu erwarten ist [2]. Diese tonotopische Anordnung wird durch die Rate im Mittel nicht systematisch verändert. Auch in der Literatur wird darauf verwiesen, dass zumindest bei einer Tonhöhenordnungsaufgabe die tonotopische Anordnung ratenunabhängig ist [12]. Auffällig ist, dass die Mediane der Ergebnisse bei den Pulsraten oberhalb von 313 pps alle dicht zusammenfallen, dagegen aber ein größerer Abstand zu den Resultaten für die Pulsrate 156 pps auftritt. Dies stimmt mit der in der Literatur [1, 2] angegebenen oberen Grenze der Ratentönhöhe in guter Näherung überein.

Die individuellen Ergebnisse zeigen ein recht heterogenes Bild: Eine tonotopische Anordnung findet sich für die meisten hier untersuchten CI-Nutzer wieder, häufig auch mit geringen Unterschieden. Für drei der Probanden zeigte sich nahezu keine Tonotopie (d. h. ähnliche Ergebnisse für verschiedene Elektroden), dafür allerdings zumindest teilweise eine relativ hohe Sensitivität für die Ratentönhöhe. Die Pulsrate 156 pps ruft bei über 85% der hier betrachteten CI-Nutzer eine als besonders tiefe Tonhöhe o. ä. beschriebene Wahrnehmung hervor. Allerdings traten auch Fälle auf (ca. 40% der Probanden), in denen die tonotopische Anordnung deutlich durch die Ratentönhöhe beeinflusst werden kann, was bis zum Verlust oder zumindest bis zu einer starken Einschränkung der tonotopischen Anordnung geht. Darüber hinaus ist es in etwa 45% der hier betrachteten Fälle möglich, durch Pulsratenänderung eine größere Änderung der Tonhöhe zu bewirken, als dies durch die Elektrodenposition alleine möglich wäre. Teilweise tritt dieses Verhalten aber nur für einzelne Elektroden auf.

Generell ist bei der Analyse und Interpretation der Daten zu beachten, dass, obwohl Ortstonhöhe und Ratentönhöhe unabhängig eingestellt werden können, die Verwendung einer mehrdimensionalen Bewertungsskala typischerweise doch Unterschiede erkennen lässt [13]. Dies veranschaulicht, dass diese beiden Stimuluseigenschaften in komplexer Weise an der Entstehung von Hörwahrnehmungen beteiligt sind, was sich in einer getrennten Untersuchung nicht vollständig widerspiegelt. Trotzdem scheint eine getrennte Untersuchung der beiden Faktoren aufgrund der Komplexität des Sachverhalts hilfreich.



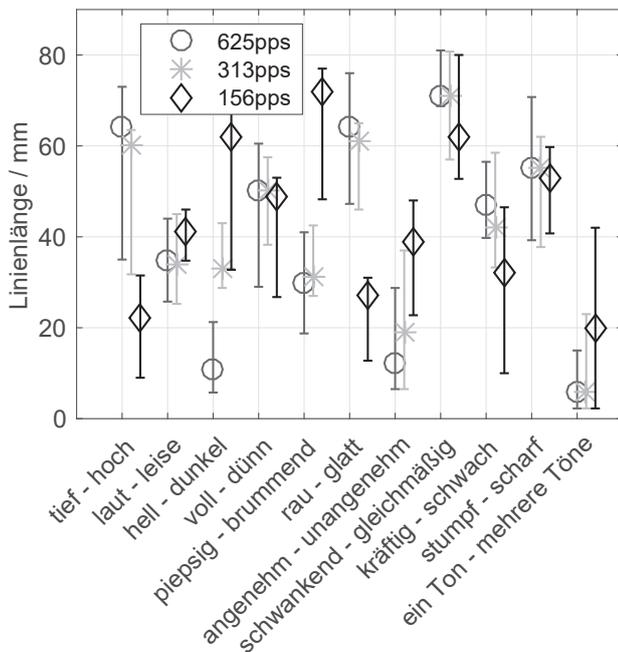
**Abbildung 1:** Mediane und Interquartilbereiche der individuellen Ergebnisse der relativen Größenschätzung der Tonhöhe. Jede Elektrode wurde fünfmal von jedem der neun Probanden beurteilt, die Ergebnisse sind direkt dargestellt.

## Ergebnisse des Fragebogens

In [11] wurde die offene Frage, ob sich die zu den beiden präsentierten Einzelelektroden korrespondierenden Wahrnehmungen unterscheiden, von allen CI-Nutzern, obwohl Elektroden mit geringem Abstand ausgewählt wurden, mit „ja“ beantwortet, aber nur in 40% der Fälle wurde dabei hoch/tief als Unterscheidungskriterium angegeben. Anhand der meisten weiteren angegebenen Kriterien wurde ein semantisches Differential konstruiert, dessen Fragen und die entsprechenden Antworten hinsichtlich der Ratentönhöhe bei einer Elektrode (individuell unterschiedlich entweder apikal oder mittig gewählt) in Abbildung 2 dargestellt sind.

Abbildung 2 zeigt Mediane und Interquartilbereiche der individuellen Antworten. Im Mittel zeigt sich vergleichbar zu den Tonhöhen (vgl. Abbildung 1) ein wesentlicher Unterschied zwischen 156 pps und den beiden anderen Stimulationsraten. Diese Tendenz ist insbesondere für die Gegensatzpaare hoch/tief und rau/glatt sichtbar. Zwischen den höheren Raten (313 pps und 625 pps) ist im Wesentlichen nur für das Gegensatzpaar hell/dunkel eine Tendenz erkennbar.

Individuell zeigen sich für die Unterscheidung der Stimulationsraten 156 und 313 pps folgende Gegensatzpaare als relevant (nach absteigender Relevanz sortiert): rau/glatt, hell/dunkel, piepsig/brummend, hoch/tief bzw. (vergleichbar relevant) ein Ton/mehrere Töne. Auch in [8] wurden Wahrnehmungen bei geringer Stimulationsrate oft als unsauber und/oder rau bezeichnet, vor allem bei basalen Elektroden. Zusätzlich ergaben sich in vorliegender Studie für den Vergleich der Stimulationsraten 313 pps und



**Abbildung 2:** Mediane und Interquartilbereiche der individuellen Ergebnisse eines semantischen Differentials bezüglich der Höreigniseigenschaften, die durch Einzelelektrodenstimulation von einer Cochlea-Implantat-Elektrode, die je nach Proband in der Mitte des Elektrodenträgers oder apikal ausgewählt wurde, bei verschiedenen Pulsraten entsteht.

625 pps die Gegensatzpaare hell/dunkel, rau/glatt und hoch/tief als relevant.

Abschließend lässt sich feststellen, dass sich die in diesem Abschnitt als für die Ratentönhöhe relevant identifizierten Gegensatzpaare durchaus von den für die Ortstonhöhe identifizierten [11] unterscheiden. Damit liegt nahe, dass sich auch die entsprechenden zugrundeliegenden Wahrnehmungsdimensionen unterscheiden, was bereits an anderer Stelle vermutet wurde [1, 4, 8].

## Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Studie deuten für die Elektrodenposition auf eine überwiegend tonotopische Anordnung der Tonhöhenurteile hin, aber auf ein uneinheitliches Bild hinsichtlich der Ratenabhängigkeit und Interaktion: etwa 85% der CI-Nutzer schienen in der Lage, Stimuli mit 156 pps und 313 pps zu unterscheiden, etwa 75% der CI-Nutzer auf mindestens einer Elektrode auch bei höheren Raten. Der Zahlenbereich, der zur Beurteilung der Tonhöhe durch Ratenänderungen verwendet wurde, war in etwa 45% der Fälle größer als für Elektrodenänderung über das komplette Array.

Das für die der Stimulationsraten 156 pps, 313 pps und 625 pps auf einer mittleren oder apikalen Elektrode erhobene semantische Differential identifizierte für die Unterscheidung zwischen 156 pps und den höheren Raten folgende Gegensatzpaare als relevant: rau/glatt, hell/dunkel, piepsig/brummend, hoch/tief bzw. ein Ton/mehrere Töne. Zusätzlich ergaben sich für 313 pps verglichen mit 625 pps: hell/dunkel, rau/glatt und hoch/tief.

Insgesamt deuten die Ergebnisse auf verschiedene, teils mehrere Kriterien für die Aufgabe der Tonhöhenbeurteilung hin (vgl. ähnliche Ergebnisse der Partnerstudie zur Ortstonhöhe [11]).

## Danksagung

Die Autoren danken den CI-Nutzern für Ihre Geduld und Ihre Teilnahme an der Studie; außerdem dem Institut für Ionenphysik und angewandte Physik der Universität Innsbruck für die Bereitstellung der Research-Interface-Box RIB II. Die Arbeit wurde von MED-EL Innsbruck unterstützt.

## Literatur

- [1] Shannon R. V.: Multichannel electrical stimulation of the auditory nerve in man. I. Basic psychophysics. *Hear. Res.* 11, 157-189, 1983
- [2] Zeng F. G.: Temporal pitch in electric hearing. *Hear. Res.* 174, 101-106, 2002
- [3] Baumann U., A. Nobbe: Pulse rate discrimination with deeply inserted electrode arrays. *Hear. Res.* 196, 49-57, 2004
- [4] McDermott H. J., C. M. McKay: Musical pitch perception with electrical stimulation of the cochlea. *J. Acoust. Soc. Am.* 101, 1622-1631, 1997
- [5] Kong Y.-Y., R. P. Carlyon: Temporal pitch perception at high rates in cochlear implants. *J. Acoust. Soc. Am.* 127, 3114-3123, 2010
- [6] Venter P. J., J. J. Hanekom: Is there a fundamental 300 Hz limit to pulse rate discrimination in cochlear implants? *J. Assoc. Res. Otolaryn.* 15, 849-866, 2014
- [7] Collins L. M., T. A. Zwolan, G. H. Wakefield: Comparison of electrode discrimination, pitch ranking, and pitch scaling data in postlingually deafened adult cochlear implant subjects. *J. Acoust. Soc. Am.* 101, 440-455, 1997
- [8] Landsberger D. M., K. Vermeire, A. Claes, V. van Rompaey, P. van de Heyning: Qualities of Single Electrode Stimulation as a Function of Rate and Place of Stimulation with a Cochlear Implant. *Ear & Hear.* 37, e149-159 (2016)
- [9] Karg S., C. Lackner, W. Hemmert: Temporal interaction in electrical hearing elucidates auditory nerve dynamics in humans. *Hear. Res.* 299, 10-18 (2013)
- [10] Fastl H., E. Zwicker: Psychoacoustics – Facts and Models. 3. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007
- [11] Huber M., W. Hemmert, F. Völk, S. Karg: Kriterien von Cochlea-Implantat-Nutzern zur Beurteilung der Ortstonhöhe. *Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin (2018)*
- [12] Baumann U., A. Nobbe: Pitch ranking with deeply inserted electrode arrays. *Ear & Hear.* 25, 275-283, 2004
- [13] Rader T., J. Döge, Y. Adel, T. Weissgerber, U. Baumann: Place dependent stimulation rates improve pitch perception in cochlear implantees with single-sided deafness. *Hear. Res.* 339, 94-103, 2016