

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

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

In der Literatur finden sich Hinweise, dass Nutzer von Cochlea-Implantaten (CIs) bei der Beurteilung der Tonhöhe mehrere Kriterien verwenden [1]. Um diesen Sachverhalt genauer zu adressieren, führten in dieser Studie neun CI-Nutzer zunächst mit vorherigem Lautheitsabgleich ein Tonhöhen-Ranking im Paarvergleich durch (Quantifizierung der Elektroden-Unterscheidbarkeit mittels kumulativem  $d'$ -Wert). Basierend auf den Ergebnissen wurden individuell zwei schwer diskriminierbare Elektroden ausgewählt ( $d' < 0.75$ ), um zur Unterscheidung verwendete Kriterien abzufragen. Außerdem wurden auf dieser Basis mit einem Fragebogen unter anderem mit Hilfe eines semantischen Differentials Kriterien erhoben, die CI-Nutzer zur Beurteilung der Ortstonhöhe benutzen.

## Grundlagen der Ortstonhöhe

Generell wird bei CI-Nutzern eine Zuordnung der Elektroden zur Tonhöhe angenommen. In der Regel folgt diese Zuordnung einer mehr oder weniger tonotopischen Anordnung [2, 3, 5, 6]. Vereinzelt gibt es darüber hinaus in der Literatur Hinweise dafür, dass für verschiedenen Elektrodenpositionen nicht nur verschiedene Tonhöhen auftreten, sondern dass evtl. mehrere Eigenschaften der Hörwahrnehmung durch die Elektrodenposition beeinflusst werden [1, 2, 4, 7]. Insbesondere existieren Hinweise dafür, dass sich Tonhöhe und Klangfarbe mit der Elektrodenposition ändern können [1], bzw. dass sich im Allgemeinen eine Stimulationsänderung auf mehrere Eigenschaften der Hörwahrnehmung auswirkt [2, 4]. Dies führt auch dazu, dass die reine Elektrodendiskriminierungsaufgabe bei gleichen Stimuli nicht zwingend die gleichen Ergebnisse liefert, wie die Tonhöhendiskriminierungsaufgabe [8].

## 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 einer Stimulationsrate von 1250 pps als biphasische Pulse mit 40  $\mu$ s Phasenbreite ohne Gap am Computer generiert.

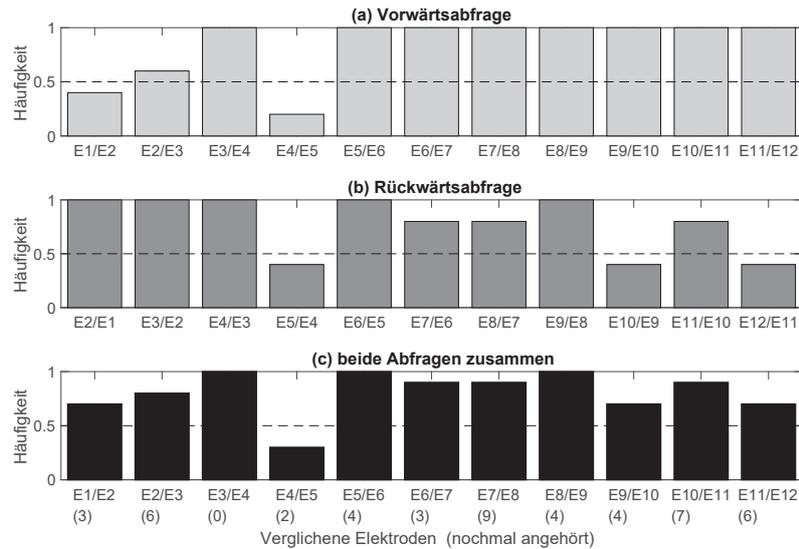
## Methode und Vorgehen

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 aller zwölf verfügbaren Elektroden in einem Einregelverfahren vorgenommen (Abgleich des an zweiter Stelle präsentierten Stimulus auf den ersten). Für den Hauptversuch kam ein Paarvergleich (two-interval, two-alternative, forced choice) von je zwei Elektroden hinsichtlich der Tonhöhe zum Einsatz. Hierbei wurde jede der 12 Elektroden soweit möglich mit ihren drei nächsten basalen Nachbar Elektroden verglichen, wobei der Vergleich in zufälliger Reihenfolge pro Elektrodenpaar fünfmal mit jeder der beiden möglichen Präsentationsreihenfolgen (vorwärts, d. h. von apikal nach basal, und rückwärts) durchgeführt wurde. Für die Vergleiche konnten die Probanden die Schalle beliebig oft wiederholen und sollten mittels einer Computertastatur das Intervall auswählen, in dem die höhere Tonhöhe auftrat. Die Anzahl der Wiederholungen wird im Folgenden als nochmal-gehört Wert (ngW) bezeichnet.

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 seine Einschätzung möglichst präzise mittels eines Kreuzes einzeichnen sollte. Das semantische Differential wurde mit zwei möglichst nahe beieinanderliegenden Elektroden durchgeführt, die sich je nach Proband in der Mitte des Elektrodenträgers oder apikal befanden.

## Ergebnisse zur Ortstonhöhe

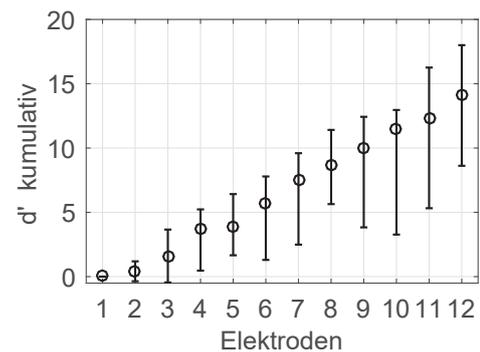
Abbildung 1 zeigt beispielhaft ein individuelles Ergebnis des Paarvergleichs von Elektroden hinsichtlich der Tonhöhe. Die Balkendiagramme mit den jeweils darunter angegebenen Elektrodennummern (z. B. E1) zeigen die Häufigkeit, mit der im jeweiligen Vergleich die basaler liegende Elektrode höher bewertet wurde, dass also die Erwartungshaltung aufgrund der Tonotopie erfüllt wurde. Die Ergebnisse der Vorwärts- und Rückwärtsabfrage (oberes und mittleres Teilbild) unterscheiden sich bezüglich der Tonhöhen einschätzung teilweise deutlich. So wurde z. B.



**Abbildung 1:** Beispiel eines individuellen Ergebnisses des Paarvergleichs von Cochlea-Implantat-Elektroden (Elektrodennummer jeweils unterhalb der Balken) hinsichtlich der Tonhöhe. Dargestellt ist die Häufigkeit, mit der die zu Stimulation der basaler liegenden Elektrode korrespondierende Tonhöhe höher bewertet wurde. Die beiden oberen Teilbilder zeigen die Daten für je eine Präsentationsreihenfolge (vorwärts, d. h. von apikal nach basal, und rückwärts), das untere Teilbild das gemittelte Gesamtergebnis, wobei als Zahl in Klammern unterhalb der Elektrodennummer die vom Probanden angeforderte Anzahl von Wiederholungen der entsprechenden Stimuluspräsentationen angegeben ist.

bei Stimulation von E2 die Tonhöhe im Vorwärtsvergleich bei drei Abfragen höher als die zu E1 korrespondierende bewertet, rückwärts aber fünfmal niedriger. Auch die E10 entsprechende Tonhöhe wurde vorwärts fünfmal höher als die E9 entsprechende eingeschätzt, rückwärts aber zwei- von dreimal niedriger. Insgesamt (unteres Teilbild) ergibt sich daraus, dass die Tonhöhe von E2 siebenmal höher als die von E1 (durchschnittlich dreimal zusätzlich angehört; siehe ngW unterhalb der Elektrodenbezeichnung in Klammern) und die von E10 siebenmal höher als die von E9 eingeschätzt wurde (durchschnittlich viermal zusätzlich angehört). Im vorliegenden Fall ist daher die Kenntnis der Ergebnisse beider Vergleichsreihenfolgen zur Abschätzung eines Gesamtergebnisses zumindest bei gewissen Vergleichspaaren erforderlich. Die ngWs variieren deutlich und scheinen basierend auf während der Durchführung der Versuche angestellten Beobachtung und Interviews mit der Schwierigkeit der konkreten Aufgabe zu korrespondieren. Dies spiegelt sich darin wider, dass Elektroden, für die im Vergleich zwischen Vorwärts- und Rückwärtsabfrage uneinheitliche Ergebnisse auftreten, immer einen erhöhten ngW zeigen. Allerdings können auch Vergleichspaare, die zuverlässig und einheitlich eingestellt werden, hier z. B. E7/E8, einen hohen ngW benötigen. In diesen Fällen scheinen, auch basierend auf den Interviews, Unterschiede zwar vorhanden und eindeutig, aber schwer detektierbar zu sein.

Im Mittel über alle untersuchten Probanden zeigt sich eine im Wesentlichen tonotopische Anordnung der zu Einzelelektrodenstimulation korrespondierenden Tonhöhen. Dies ist in Abbildung 2 anhand der basierend auf den Vergleichsergebnissen individuell nach dem in [10] verwendeten Verfahren berechneten kumulativen  $d'$ -Werte dargestellt. Individuell zeigt sich allerdings bei etwa 85% der

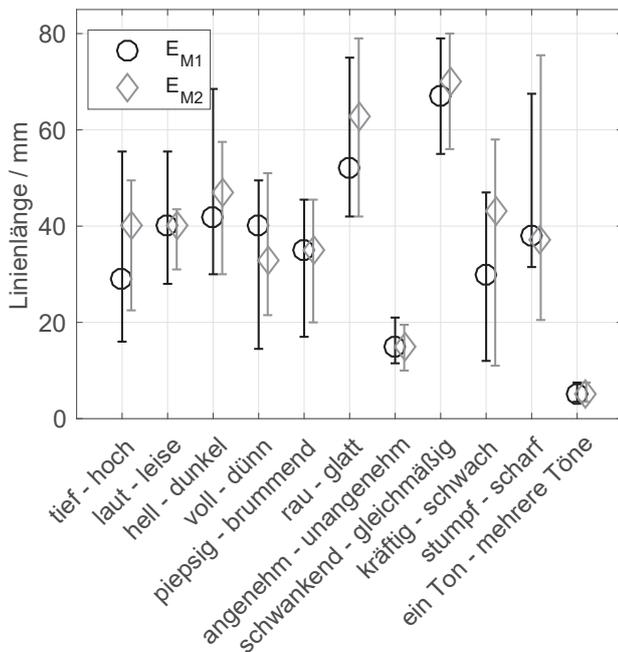


**Abbildung 2:** Mediane und Interquartilbereiche der individuellen Ergebnisse des Paarvergleichs der Tonhöhe. Jede Elektrode wurde zehnmals von neun Probanden soweit möglich mit ihren drei nächsten basalen Nachbarelektroden verglichen.

untersuchten Probanden keine eindeutige tonotopische Anordnung. Die entsprechenden Elektroden- $d'$ -Funktionen weisen flache Bereiche auf, die auf Abschnitte des implantierten Elektrodenarrays hinweisen, in denen die Einzelelektroden-Tonhöhe nicht oder kaum unterscheidbar ist. Bei etwa 70% der Probanden tritt mindestens eine in Bezug auf die Tonotopie invertierte Einzelelektroden-Tonhöhe auf. Dies zeigt sich auch in Abbildung 1: Basierend auf den Daten liegt zwischen E4 und E5 im tonotopischen Sinne wahrscheinlich eine Vertauschung vor.

## Ergebnisse des Fragebogens

Die offene Frage, ob sich die zu den beiden präsentierten Einzelelektroden korrespondierenden Wahrnehmungen unterscheiden, beantworteten die CI-Nutzer, obwohl Elektroden mit geringem Abstand ausgewählt wurden, alle mit „ja“, aber nur in 40% der Fälle wurde dabei



**Abbildung 3:** Mediane und Interquartilbereiche der individuellen Ergebnisse eines semantischen Differentials bezüglich der Höreigniseigenschaften, die durch Einzelelektrodenstimulation mit zwei Cochlea-Implantat-Elektroden ( $E_{M1}$ ,  $E_{M2}$ ) mit geringem Abstand, die je nach Proband in der Mitte des Elektrodenträgers oder apikal ausgewählt wurden, entsteht.

hoch/tief als Unterscheidungskriterium angegeben. Anhand der meisten weiteren angegebenen Kriterien wurde ein semantisches Differential konstruiert, dessen Fragen und gemittelte Antworten für die genannten beiden Elektroden in Abbildung 3 dargestellt sind.

Werden die Ergebnisse des semantischen Differentials individuell hinsichtlich der Unterschiede zwischen den Hörwahrnehmungen, die von den beiden Elektroden ausgelöst werden, ausgewertet, zeigt sich, dass vor allem bzgl. der folgenden Gegensatzpaare unterschieden wird (in mit der Relevanz absteigender Reihenfolge): voll/dünn, hell/dunkel und hoch/tief. Zwei weitere Gegensatzpaare ergaben sich bei manchen Probanden als relevant: piepsig/brummend und stumpf/scharf. Ein CI-Nutzer hat im semantischen Differential nur beim Kriterium hell/dunkel nennenswerte Unterschiede zwischen den von den Elektroden ausgelösten Hörwahrnehmungen angegeben.

Im Mittel über die betrachtete Probandengruppe zeigen sich teils andere Zusammenhänge. Abbildung 3 stellt die korrespondierenden Mediane und Interquartilbereiche dar. Zunächst auffällig sind die für die beiden betrachteten Elektroden (grau versus schwarz) weitgehend überlappenden Interquartilbereiche. Diese deuten an, dass innerhalb der Gruppe kein einheitlicher, deutlicher Unterschied zwischen den zu den Elektroden korrespondierenden Hörwahrnehmungen besteht. Betrachtet man die Tendenzen, die sich für die Gruppe in den Unterschieden der Mediane andeuten, sind die größten Unterschiede bei den Gegensatzpaaren kräftig/schwach, rau/glatt, tief/hoch und voll/dünn zu erkennen.

## Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Studie deuten an, dass die Vergleichsreihenfolge (basal/apikal oder apikal/basal) beim Tonhöhen-Ranking im Paarvergleich eine Rolle spielt. Die offene Frage, ob sich die beiden Wahrnehmungen zweier einzeln stimulierter Elektroden mit geringem Abstand unterscheiden, bejahten alle CI-Nutzer. Fünf gaben dabei hoch/tief als Unterscheidungskriterium an. Das erhobene semantische Differential legt nahe, dass sich die Wahrnehmungen insbesondere hinsichtlich dreier Gegensatzpaare unterscheiden. Dies waren voll/dünn, hell/dunkel und hoch/tief. Die Ergebnisse insgesamt lassen vermuten, dass CI-Nutzer keine einheitliche Vorstellung von Tonhöhe haben und mehrere unterschiedliche Kriterien für die Aufgabe *Beurteilung der Tonhöhe* nutzen (vgl. ähnliche Ergebnisse der Partnerstudie zur Ratentonhöhe [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] Collins L., C. Throckmorton: Investigating perceptual features of electrode stimulation via a multidimensional scaling paradigm. *J. Acoust. Soc. Am.* 108, 2353-2365 (2000)
- [2] Shannon R. V.: Multichannel electrical stimulation of the auditory nerve in man. I. Basic psychophysics. *Hear. Res.* 11, 157-189, 1983
- [3] Busby P. A., L. A. Whitford, P. J. Blamey, L. M. Richardson, G. M. Clark: Pitch perception for different modes of stimulation using the Cochlear multiple-electrode prosthesis. *J. Acoust. Soc. Am.* 95, 2658-2669, 1994
- [4] McKay C. M., H. J. McDermott, G. M. Clark: The perceptual dimensions of single-electrode and nonsimultaneous dual-electrode stimuli in cochlear implantees. *J. Acoust. Soc. Am.* 99, 1079-1090, 1999
- [5] Nelson D. A., D. J. van Tasell, A. C. Schroder, S. Soli, S. Levine: Electrode ranking of "place pitch" and speech recognition in electrical hearing. *J. Acoust. Soc. Am.* 98, 1987-1999 (1995)
- [6] Baumann U., A. Nobbe: The cochlear implant electrode-pitch function. *Hear. Res.* 213, 34-42, 2006
- [7] Laneau J., J. Wouters: Multichannel place pitch sensitivity in cochlear implant recipients. *J. Assoc. Res. Otolaryn.* 5, 285-294 (2004)
- [8] Zwolan T. A., L. M. Collins, G. H. Wakefield: Electrode discrimination and speech recognition in postlingually deafened adult cochlear implant subjects. *J. Acoust. Soc. Am.* 102, 3673-3685, 1997
- [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] Townshend B., N. Cotter, D. van Compernelle, R. L. White: Pitch perception by cochlear implant subjects. *J. Acoust. Soc. Am.* 82, 106-115 (1987)
- [11] Karg S., M. Huber, W. Hemmert, F. Völk: Kriterien von Cochlea-Implantat-Nutzern zur Beurteilung der Ratentonhöhe. Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin (2018)