

HNO 2017 · 65:237–242  
 DOI 10.1007/s00106-016-0232-9  
 Online publiziert: 26. September 2016  
 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

#### Redaktion

Prof. Dr. W. Baumgartner, Wien  
 Prof. Dr. P. K. Plinkert, Heidelberg  
 Prof. Dr. M. Ptok, Hannover  
 Prof. Dr. C. Sittel, Stuttgart  
 Prof. Dr. N. Stasche, Kaiserslautern  
 Prof. Dr. B. Wollenberg, Lübeck



CrossMark

T. Rader<sup>1</sup> · H. Fastl<sup>2</sup> · U. Baumann<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Klinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde/Abteilung Audiologische Akustik, Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Mainz, Deutschland

<sup>2</sup>AG Technische Akustik, MMK, Technische Universität München, München, Deutschland

<sup>3</sup>Audiologische Akustik, Klinik für HNO-Heilkunde, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Frankfurt am Main, Deutschland

# Simulation von Sprachverstehen mit Cochleaimplantat

## Einfluss von Frequenz und Pegel der Grundfrequenzkomponente bei elektrisch-akustischer Stimulation

Die elektrisch-akustische Stimulation (EAS) mit Hörerhalt ist die Therapie der Wahl für Patienten mit hochgradigem Hochton-Steilabfall [2, 12, 15]. Simulationen der mit Cochleaimplantaten (CI) vermittelten Hörempfindung an Normalhörenden können einen hohen Erkenntnisgewinn bei kontrollierter Modifikation der Reizstrategie ermöglichen. Verschiedene Studien konnten beispielsweise zeigen, dass im Vergleich zu konventionellen CI-Systemen das durch das residuale Tieftonhörvermögen bei EAS-Nutzern verbesserte Sprachverstehen vom Verlauf der Sprachgrundfrequenz [5] oder von der Breite des akustischen Übertragungsbereichs abhängt [13]. Allerdings ist bisher unklar, ob die Übertragung der Feinstruktur der akustischen Sprachgrundfrequenzkomponenteninformation die beobachteten Verbesserungen hervorruft. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, den Einfluss der Frequenz- und der Pegelfeinstruktur des Sprach-Grundfrequenzkomponentenverlaufs auf die Sprachverständlichkeitsschwelle (SVS) zu untersuchen.

### Material und Methoden

#### Probanden

Die Untersuchungsstichprobe bestand aus je 12 normalhörenden Probanden

im Alter von 22–26 Jahren (Durchschnittsalter Median: 24 Jahre), die in 2 Gruppen an den Experimenten teilnahmen. Normalgehör wurde angenommen, wenn die Abweichung im Ergebnis der Békésy-Audiometrie im Vergleich zur Standardhörschwelle [8, 19] nicht mehr als 20 dB im Frequenzbereich von 0–24 Bark (39,5–21.087 Hz) betrug.

#### Sprachtest

Die individuellen SVS im Störgeräusch wurden mit dem Oldenburger Satztest, OLSA [16], in verschiedenen Störgeräuschszenarien ermittelt. Die SVS bezeichnet dabei den Signal-Rausch-Abstand zwischen Sprache und Störgeräusch in dB, bei dem 50 % der präsentierten Wörter richtig verstanden werden. Das Sprachsignal wurde bei festem Pegel präsentiert, der Pegel des Störgeräuschs wurde adaptiv entsprechend der korrekt verstandenen Wörter automatisiert eingeregelt. Es kamen Testlisten mit je 20 Sätzen im offenen Antwortmodus zum Einsatz. Vor jeder neuen Testbedingung wurde eine Testliste mit ebenfalls 20 Sätzen zur Minimierung des Lerneffektes dargeboten. Der Ablauf der Messungen erfolgte in randomisierter Reihenfolge.

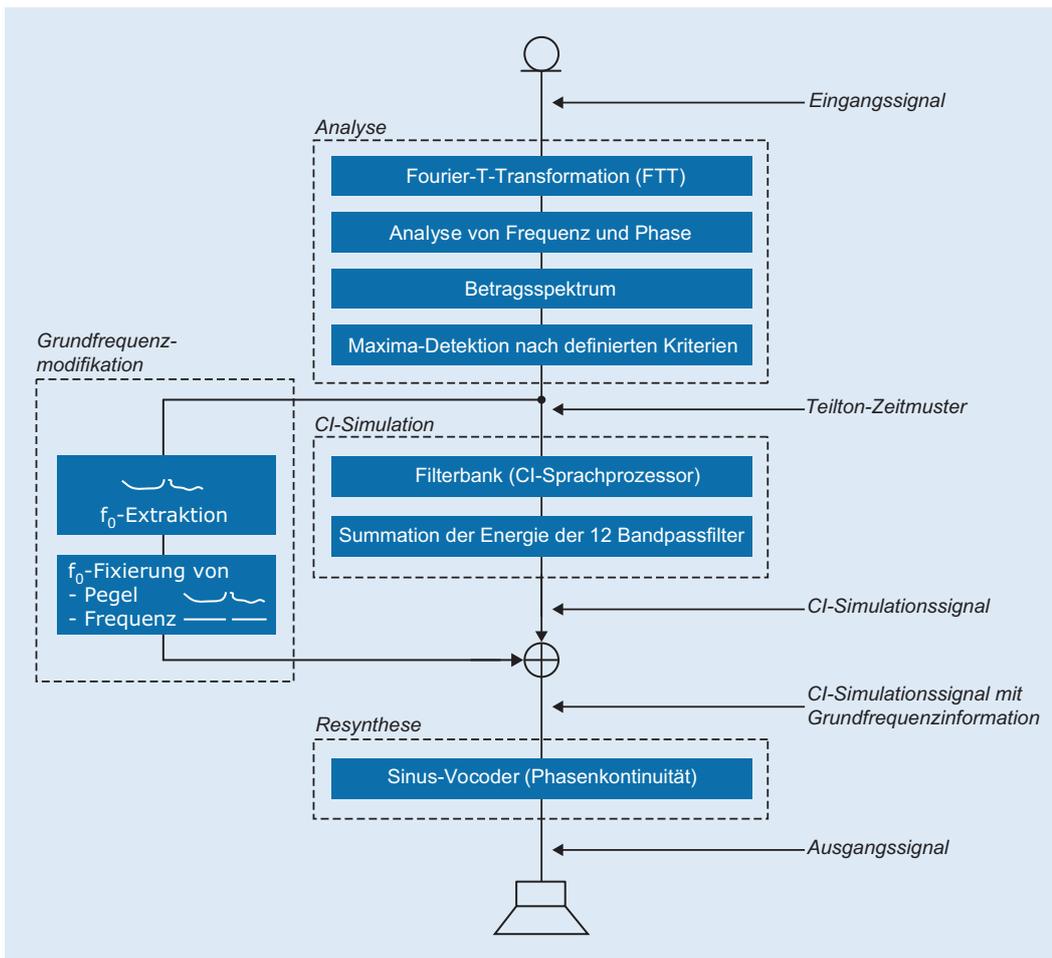
Die Wiedergabe der Schalle erfolgte binaural diotisch über Kopfhörer (HDA 200, Sennheiser) mit einem hoch-

wertigen 24-Bit 8-Kanal AD-DA-Wandler mit integrierten Kopfhörerverstärker (Hammerfall DSP Multiface II, RME). Die Versuche fanden in einer schallsolierten Audiometrikabine statt. Der Darbietungspegel des Sprachsignals betrug 65 dB SPL („sound pressure level“).

#### Störgeräusche

Um den Effekt der Grundfrequenzinformation in unterschiedlichen Hörsituationen zu untersuchen, kamen in der Studie 2 unterschiedliche Störgeräusche zur Anwendung:

- OLSA-Rauschen (Olnoise): Dieses Rauschen wird durch eine Überlagerung von 30 zeitlich verschobenen Sätzen des OLSA generiert [17]. Dadurch zeigt das Frequenzspektrum des OLSA-Rauschens eine starke Ähnlichkeit im Kurzzeitspektrum mit jedem OLSA-Testsatz. Das OLSA-Rauschen zeigt eine obere Grenzfrequenz von 12,6 kHz und fast keine zeitliche Modulation, sodass keine Möglichkeit des zeitlichen „in die Lücken Hörens“ („gap listening“ oder „glimpsing“) besteht. Dieses Störgeräusch entspricht einer kontinuierlichen Störgeräuschsituation mit sehr vielen überlagerten Sprechern.
- Fastl-Rauschen: Um die zeitliche Modulation von Sprache in einem Störgeräusch adäquat abzubilden,



**Abb. 1** ◀ Schematische Darstellung der Signalverarbeitung vom Eingangssignal zum Ausgangssignal für die Erstellung einer CI (Cochleaimplantat)-Simulation mit Hilfe von Teilton-Zeitmustern (TTZM). Die Signalverarbeitung unterteilt sich dabei in die Funktionsblöcke „Analyse“, „CI-Simulation“, „Grundfrequenzmodifikation“ und „Resynthese“. (Adaptiert nach [19])

wurde von Fastl [6] ein Rauschen entwickelt, bei dem die Modulationsfrequenz randomisiert ist. Die randomisierte Modulationsfrequenz zeigt dabei ein Häufigkeitsmaximum bei 4 Hz, was mit der zeitlichen Modulationscharakteristik der deutschen Sprache übereinstimmt. Durch die relativ langsame zeitliche Modulation gibt es im Fastl-Rauschen die Möglichkeit, in die zeitlichen Lücken zu hören („glimpsing“). Dieses Störgeräusch entspricht einer Störgeräuschsituation mit nur einem „störenden“ Sprecher.

### Cochleaimplantat-Simulation

Das Material des OLSA wurde mittels Signalverarbeitung modifiziert, um eine CI-Simulation zu erzeugen. Den Ablauf der verwendeten Signalverarbeitung zeigt **Abb. 1**.

Zunächst wurde das in digitaler Form vorliegende Audiosignal mit Hilfe der Teilton-Zeitmuster-Analyse analysiert (TTZM; [1, 7]). Das TTZM dient der gehörgerechten Repräsentation von Audiosignalen. Dabei wird eine Fourier-T-Transformation [14] mit Analysebandbreiten proportional zu den kritischen Bändern des Gehörs durchgeführt. Weiter werden die Information von Frequenz und Phase analysiert und daraus ein Amplitudenspektrum berechnet. Durch eine Maximadetektion wird das TTZM des Eingangssignals generiert. Die grafische Repräsentation des TTZM (Maxigramm) des Satzes „Stefan gewann 12 grüne Blumen“ ist in **Abb. 2a** dargestellt.

Für die Simulation eines CI wird nun das kontinuierliche Frequenzspektrum mit 12 Bandpassfiltern gefiltert, deren Grenzfrequenzen den Analysefiltern eines CI-Audioprozessors entsprechen. Um aus der diskreten TTZM-Darstellung

das Ausgangssignal zu erhalten, wurde das TTZM mit Hilfe eines 12-Band-Sinusvocoders resynthetisiert. Die Vocoder-Frequenzen wurden auf die jeweiligen Kanal-Mittenfrequenzen entsprechend des CI-Audioprozessors festgelegt. Das resultierende Audiosignal simuliert nun CI-verarbeitete Sprache, die nur primär die Amplitudeninformation an 12 Kanälen (entsprechend der Stimulationselektroden) beinhaltet. Feinstruktur-Frequenzinformationen sind in diesem Signal nicht enthalten. Das so bearbeitete Audiosignal entspricht also einer CI-Simulation mit einem „elektrischen“ Übertragungsbereich ab 500 Hz und ist vergleichbar mit einer akustischen Repräsentation der CIS-Signalverarbeitungsstrategie [18] des elektrischen CI-Anteils bei EAS-Sprachprozessoren. Das TTZM-Maxigramm der resultierenden CI-Simulation ist in **Abb. 2b** dargestellt. Weitere Informationen zur Signalverarbeitung der CI-Simulation

HNO 2017 · 65:237–242 DOI 10.1007/s00106-016-0232-9  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

T. Rader · H. Fastl · U. Baumann

### Simulation von Sprachverstehen mit Cochleaimplantat. Einfluss von Frequenz und Pegel der Grundfrequenzkomponente bei elektrisch-akustischer Stimulation

#### Zusammenfassung

**Hintergrund.** Nach hörehaltender Cochleaimplantation mit dem Ziel der kombinierten elektrisch-akustischen Stimulation (EAS) vermittelt das residuale akustische Hörvermögen im tieferen Frequenzbereich Sprachgrundfrequenz-Information. Mit Hilfe von akustischen Simulationen der EAS-Hörempfindung lässt sich der Einfluss von Frequenz- und Pegelfeinstruktur des Sprachsignals systematisch untersuchen. **Ziel der Arbeit.** Ziel ist die Messung der Sprachverständlichkeitsschwelle (SVS) unter verschiedenen Störschallbedingungen bei Variation der Frequenz- und Pegelinformation der Sprach-Grundfrequenzkomponente  $f_0$  mittels akustischer Simulation der EAS-Versorgung. Ermittelt werden soll, inwieweit eine Modifikation der  $f_0$ -Feinstruktur die SVS beeinträchtigt.

**Material und Methoden.** Mithilfe der Teilton-Zeitmuster-Analyse wurde eine akustische EAS-Simulation aus dem Sprachmaterial des Oldenburger Satztests (OLSA) generiert, zusätzlich wurde der  $f_0$ -Verlauf des Sprachmaterials bestimmt. Im Anschluss wurden in den  $f_0$ -Konturverläufen entweder Frequenz oder Pegel fixiert, um jeweils eine der beiden Feinkontur-Informationen des Sprachsignals zu entfernen. Die so bearbeiteten OLSA-Sätze wurden verwendet, um die SVS im Störgeräusch zu bestimmen. Geprüft wurden die Bedingungen „ $f_0$  Frequenzkontur fixiert“ und „ $f_0$  Pegelkontur fixiert“ in 2 verschiedenen Bedingungen („Störschall amplitudenmoduliert“, „Störschall quasi-kontinuierlich“) geprüft. An den Versuchen nahmen 24 Normalhörende teil.

**Ergebnisse.** Die SVS im Störgeräusch ist für die Bedingung „ $f_0$  Frequenzkontur fixiert“ sowohl im kontinuierlichen mit 2,7 dB als auch im modulierten Störgeräusch mit 0,8 dB im Trend günstiger als bei „ $f_0$  Pegelkontur fixiert“ mit 3,7 und 2,9 dB.

**Diskussion.** Bei der Simulation von Sprachverstehen mit Cochleaimplantat (CI) und akustischer Komponente hat die Pegelinformation der Grundfrequenzkomponente stärkeren Einfluss auf das Sprachverstehen als die Frequenzinformation. Die Simulation der Übertragung von CI ermöglicht es zu untersuchen, wie verschiedene Parameter das Sprachverstehen beeinflussen.

#### Schlüsselwörter

Simulation · Sprachverstehen · Störgeräusch · Hörerhalt · Cochleaimplantat

### Simulation of speech perception with cochlear implants. Influence of frequency and level of fundamental frequency components with electronic acoustic stimulation

#### Abstract

**Background.** After implantation of cochlear implants with hearing preservation for combined electronic acoustic stimulation (EAS), the residual acoustic hearing ability relays fundamental speech frequency information in the low frequency range. With the help of acoustic simulation of EAS hearing perception the impact of frequency and level fine structure of speech signals can be systematically examined.

**Objective.** The aim of this study was to measure the speech reception threshold (SRT) under various noise conditions with acoustic EAS simulation by variation of the frequency and level information of the fundamental frequency  $f_0$  of speech. The study was carried out to determine to what extent the SRT is impaired by modification of the  $f_0$  fine structure.

**Material and methods.** Using partial tone time pattern analysis an acoustic EAS

simulation of the speech material from the Oldenburg sentence test (OLSA) was generated. In addition, determination of the  $f_0$  curve of the speech material was conducted. Subsequently, either the parameter frequency or level of  $f_0$  was fixed in order to remove one of the two fine contour information of the speech signal. The processed OLSA sentences were used to determine the SRT in background noise under various test conditions. The conditions “ $f_0$  fixed frequency” and “ $f_0$  fixed level” were tested under two different situations, under “amplitude modulated background noise” and “continuous background noise” conditions. A total of 24 subjects with normal hearing participated in the study.

**Results.** The SRT in background noise for the condition “ $f_0$  fixed frequency” was more favorable in continuous noise with 2.7 dB and in modulated noise with 0.8 dB compared to

the condition “ $f_0$  fixed level” with 3.7 dB and 2.9 dB, respectively.

**Discussion.** In the simulation of speech perception with cochlear implants and acoustic components, the level information of the fundamental frequency had a stronger impact on speech intelligibility than the frequency information. The method of simulation of transmission of cochlear implants allows investigation of how various parameters influence speech intelligibility in subjects with normal hearing.

#### Keywords

Computer simulation · Speech perception · Noise · Hearing preservation · Cochlear implant

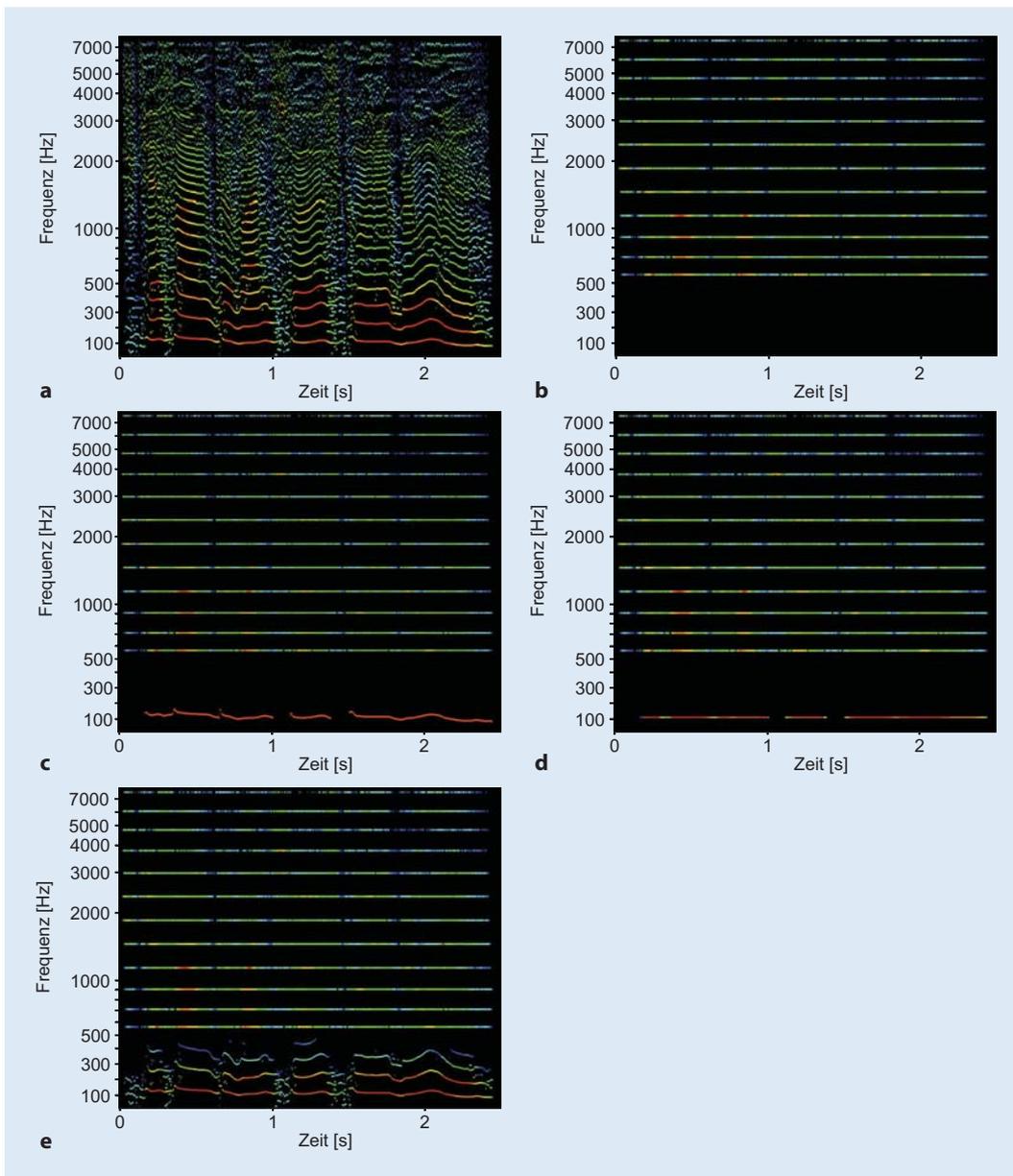
können der Publikation von Rader et al. [13] entnommen werden.

#### Modifikation der Grundfrequenz

Um den Verlauf der Grundfrequenzkontur aus dem TTZM-OLSA-Testsätzen zu

extrahieren, wurde das Teiltonmuster (TTM) bestehend aus Frequenz-Pegel-Paaren für jeden Zeitschritt mit dem von Terhardt [14] beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der virtuellen Tonhöhe analysiert. Der Teilton mit dem stärksten Spektraltonhöhengewicht wurde im

nächsten Verarbeitungsschritt durch das bei Baumann [1] beschriebene Verfahren zur Konturierung des Grundtonverlaufs mit den jeweiligen Nachbarn zu einer als „ $f_0$ -Kontur“ bezeichneten Struktur verbunden. Die in der  $f_0$ -Kontur beinhaltete Grundfrequenzinformation wurde



**Abb. 2** ◀ Grafische Repräsentation der Teilton-Zeitmuster (TTZM, Maxigramm) für die CI(Cochleaimplantat)-Simulation des Satzes „Stefan gewann 12 grüne Blumen“. Farbcodierung von *blau* (niedriger Pegel) nach *rot* (hoher Pegel). **a** Originalsignal, **b** CI-Simulation, **c** CI-Simulation mit modifizierter Grundfrequenzkontur (Pegel fixiert), **d** Frequenzkontur fixiert und **e** EAS<sub>200</sub>-Simulation. (Adaptiert nach [19])

nun nach unterschiedlichen Vorschriften modifiziert:

- **f<sub>0</sub> Pegel fixiert:** Um den Einfluss der Feinstruktur der Tonhöheninformation zu untersuchen, wird die Amplitude der Grundfrequenzkomponente auf einen konstanten Pegel fixiert. Der Pegel der Grundfrequenzkomponente wurde psychoakustisch auf ein ausbalanciertes Klangbild eingepgelt.
- **f<sub>0</sub> Frequenz fixiert:** Um den Einfluss kleiner Änderungen der Amplitude der Grundfrequenzkomponente zu untersuchen, wird die Frequenz der f<sub>0</sub>-Kontur auf 110 Hz festgesetzt,

sodass nur die Feinstruktur der Pegelinformation enthalten ist.

Die entsprechenden Maxigramme der CI-Simulation mit modifizierter Grundfrequenzkomponente sind in **Abb. 2c** für den fixierten Pegel und in **Abb. 2d** für die fixierte Frequenz dargestellt.

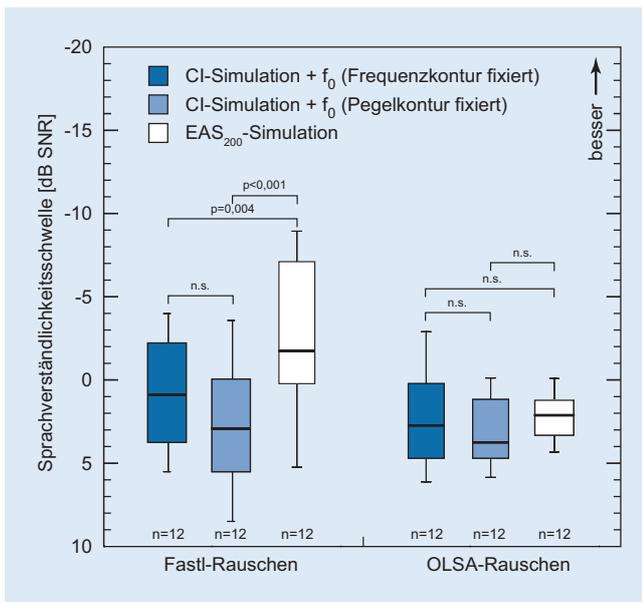
Als Kontrollbedingung wurde zusätzlich das tiefpassgefilterte Originalsignal mit einer Filterfrequenz von 200 Hz nach der Resynthese der CI-Simulation hinzugefügt, um eine Simulation der EAS zu erhalten, welche – im Gegensatz zu f<sub>0</sub> Pegel/Frequenz fixiert – sowohl Frequenz- als auch Pegelinformationen der Grund-

frequenzkomponente enthält (EAS<sub>200</sub>-Simulation, **Abb. 2e**).

## Ergebnisse

Die SVS in Boxplot-Darstellung (Median, Interquartile und Extremwerte) in Abhängigkeit des modifizierten f<sub>0</sub>-Konturverlaufs für die beiden Störgeräuschbedingungen ist dargestellt in **Abb. 3**, zusätzlich das Ergebnis der Kontrollmessung EAS<sub>200</sub>-Simulation für das Fastl-Rauschen.

Die Medianwerte der SVS unterscheiden sich in Abhängigkeit vom f<sub>0</sub>-Konturverlauf in beiden Störgeräuschbedin-



**Abb. 3** ◀ Ergebnisse der Sprachverständlichkeitsschwellen (SVS; Boxplot-Darstellung enthält Median, Interquartile und Extremwerte) für simuliertes Sprachverstehen mit Cochleaimplantat (CI) und modifizierter Grundfrequenz  $f_0$  sowie EAS<sub>200</sub>-Simulation im modulierten OLSA-Rauschen. (Adaptiert nach [19])

ungen. Die Differenzen betragen dabei 2,1 dB im modulierten Fastl-Rauschen (Frequenz fixiert: 0,8 dB; Pegel fixiert: 2,9 dB) und 1,0 dB im kontinuierlichem OLSA-Rauschen (Frequenz fixiert: 2,7 dB; Pegel fixiert: 3,7 dB). Diese Unterschiede sind jedoch statistisch nicht signifikant ( $p > 0,05$ ; Zweistichproben-t-Test für unabhängige Stichproben) und stellen somit nur einen Trend dar. Vergleicht man die Ergebnisse der  $f_0$ -Kontur-Modifikationen mit der Kontrollbedingung (EAS<sub>200</sub>-Simulation: -1,9 dB), zeigt sich ein signifikant besseres Sprachverstehen für letztgenannte Bedingung ( $f_0$ -Kontur Frequenz fixiert:  $p < 0,004$ ;  $f_0$ -Kontur Pegel fixiert:  $p < 0,001$ ). Bei der Kontrollbedingung bleibt die komplette Feinstruktur der Grundtoninformation erhalten, während in den Testbedingungen entweder die Frequenz- oder die Pegelfeinstruktur entfernt wird. Im Fastl-Rauschen zeigen beide Simulationsbedingungen im Vergleich zum OLSA-Rauschen eine günstigere SVS. Die Differenzen betragen dabei -1,9 dB für die Bedingung Frequenz fixiert und -0,8 dB für Pegel fixiert.

## Diskussion

Die Ergebnisse zeigen in beiden Störgeräuschbedingungen im Trend ein günstigeres Sprachverstehen für die  $f_0$ -Kontur-Kondition „Frequenz fixiert“ mit erhaltener Feinstruktur der Amplitudenin-

formation im Vergleich zur Bedingung „Pegel fixiert“ mit erhaltener Feinstruktur des Verlaufs der Grundtoninformation. Dieser Effekt ist für beide Störgeräuschbedingungen etwa gleich stark ausgeprägt. Wie bereits aus anderen Untersuchungen mit CI-Simulationen bekannt [13], können auch in der vorliegenden Untersuchung die Probanden im modulierten Störgeräusch die Feinstrukturinformation besser auswerten.

In einer reinen CI-Simulation (mit einem „elektrischen“ Übertragungsbereich ab 500 Hz) zeigt sich eine SVS von 6,2 dB [13], die sich durch die Zugabe von zusätzlicher  $f_0$ -Information auf 0,8 dB bei Frequenz fixiert bzw. 2,9 dB bei Pegel fixiert in dieser Studie deutlich verbessert. Da die Probanden in der EAS<sub>200</sub>-Simulation im modulierten Störgeräusch mit -1,9 dB ein günstigeres Sprachverstehen zeigen als in den  $f_0$ -Pegel-/Frequenz fixiert Bedingungen (2,9/0,8 dB), scheinen sowohl die Frequenz- als auch die Pegelinformation der Grundfrequenzkomponente zu einem verbesserten Sprachverstehen bei der EAS-Simulation beizutragen.

Brown und Bacon [3] untersuchten den Einfluss der zusätzlichen Grundfrequenzinformation auf eine simulierte 4-kanalige Vocoder-CI-Simulation. Die Präsenz einer sowohl in Frequenz als auch im Pegel variierten Grundfrequenzkomponente zusätzlich zur CI-Simulation führt zu einem verbesserten

Sprachverstehen: zwischen 23 und 57 % je nach verwendetem Maskierer. Dieser positive Effekt ist vereinbar mit den Ergebnissen dieser Studie.

Der unterschiedliche Einfluss der Feinstruktur der Amplituden- oder Frequenzinformation auf die SVS konnte nur tendenziell nachgewiesen werden. Entgegen der häufig diskutierten Vermutung, dass die Feinstruktur der Tonhöheninformation einen maßgeblichen Einfluss auf die SVS im Störgeräusch nimmt, stellte sich in den vorliegenden Ergebnissen eine leichte Dominanz der Amplitudenfeinstruktur heraus. Die Beschränkung der Feinstrukturinformation auf eine einzige  $f_0$ -Kontur führt im Vergleich zur Kontrollbedingung zu einer deutlichen Beeinträchtigung der SVS im Störgeräusch. Gleichbedeutend mit dieser starken Einschränkung der Feinstrukturinformation ist eine Verringerung der Bandbreite des noch akustisch nutzbaren Tieftonrestgehörs bei EAS-Patienten. Daher sollte der noch nutzbare akustische Anteil während der Cochleaimplantation und im weiteren postoperativen Verlauf so weit wie möglich geschützt und der damit verfügbare synergetische Gewinn bewahrt bleiben.

Brown und Bacon [4] zeigen, dass die unzureichende Übertragung der Grundfrequenzkomponente bei aktuellen CI-Systemen zu Schwierigkeiten bei dem Sprachverstehen im Störgeräusch führt. Insbesondere ist die Merkmalsextraktion von Sprache im Störgeräusch limitiert, und somit ist die Trennung von Sprecher und Maskierer (Störgeräusch) nur unzureichend möglich. Brown und Bacon stellen die These auf, dass es besser wäre, die Grundfrequenzkomponente akustisch über Restgehör zu übertragen, als in die Entwicklung einer Sprachverarbeitungsstrategie mit optimierter Grundfrequenzübertragung zu investieren. Auch Qin und Oxenham [10] betonen die Bedeutung des Resthörerhalts für eine bessere Verwertung der vorhandenen Sprachinformationen im tiefen Frequenzbereich anhand von EAS-Simulationen.

Bei niedrigem Signal-Rausch-Abstand zeigen Kong und Carlyon [9], dass die Kondition mit fixierter Grundfrequenz bei 150 Hz immer noch einen Beitrag auf das Sprachverstehen bei ei-

ner simulierten EAS-Versorgung hat. Vermutet wird jedoch, dass dieser Effekt durch die Fähigkeit des „Lückenhören“ entsteht, d. h. durch die Fähigkeit, das Sprachsignal in den zeitlichen Lücken des modulierten Störgeräuschs zu verstehen.

Letztlich kann die Ursache des positiven Effektes der Feinstrukturinformation der Grundfrequenzkomponente nicht abschließend in dieser Studie geklärt werden. Zur weiteren Untersuchung geplant sind sowohl Versuche mit versorgten EAS-Nutzern, deren akustisch genutztes Eingangssignal bezüglich der Grundfrequenzinformation gefiltert wird und die vorverarbeitete akustische tieffrequente Signale parallel zur CI-Stimulation zugeführt bekommen, als auch weitere EAS/CI-Simulationen, bei denen die Bedingungen Frequenz fixiert und Pegel fixiert kombiniert werden.

## Zusammenfassung

Hörsimulationen der CI-Übertragung sind ein nützliches Werkzeug zur Untersuchung einzelner Parameter der Reizstrategie. Die Varianz der Hörstörung in Bezug auf Therapievarianten wie z. B. EAS mit akustischem Restgehör kann dabei durch die Art der Parametrisierung in der Simulation festgelegt werden. Eine Streuung, die immer bei „echten“ Patienten auftritt, wird somit effektiv minimiert. Der positive Einfluss von akustischer tieffrequenter Information in den Bedingungen Frequenz fixiert, Pegel fixiert und EAS-200-Simulation zeigt die Bedeutung der f<sub>0</sub>-Grundfrequenzinformation für das Sprachverstehen und unterstreicht die Bedeutung des Erhalts von vorhandenem Restgehör bei der Cochlea-implantation.

## Fazit für die Praxis

- Hörsimulationen der CI-Übertragung sind ein nützliches Werkzeug zur Untersuchung einzelner Parameter der Reizstrategie.
- Die Untersuchung mit Simulationen zeigen, dass die Nutzung von tieffrequenter Restgehör bei EAS das Sprachverstehen im Störgeräusch verbessern kann.

- In den Simulationsdaten zeigt der Pegelverlauf der Grundfrequenzkomponente tendenziell einen größeren Einfluss auf das Sprachverstehen im Störgeräusch als deren Frequenzkontur.

## Korrespondenzadresse



### Dr.-Ing. T. Rader

Klinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde/Abteilung Audiologische Akustik, Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz  
Langenbeckstraße 1,  
55131 Mainz, Deutschland  
tobias.rader@unimedizin-mainz.de

## Einhaltung ethischer Richtlinien

**Interessenkonflikt.** T. Rader, H. Fastl und U. Baumann geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Die psychoakustischen Experimente sind im Einklang mit den ethischen Standards der Deklaration von Helsinki 1964 in ihrer gültigen Fassung.

## Literatur

1. Baumann U (1995) Ein Verfahren zur Erkennung und Trennung multipler akustischer Objekte. Dissertation. Technische Universität München, München
2. Baumann U, Helbig S (2009) Hören mit kombinierter elektrischer und akustischer Stimulation. HNO 57:542–550
3. Brown CA, Bacon SP (2009) Low-frequency speech cues and simulated electric-acoustic hearing. J Acoust Soc Am 125(3):1658–1665
4. Brown CA, Bacon SP (2010) Fundamental frequency and speech intelligibility in background noise. Hear Res 266:52–59
5. Brown CA, Helms Tillery K, Apoux F, Doyle NM, Bacon SP (2016) Shifting fundamental frequency in simulated electric-acoustic listening: effects of F<sub>0</sub> variation. Ear Hear 37(1):e18–e25
6. Fastl H (1987) Ein Störgeräusch für die Sprachaudiometrie. Audiol Akust 26:2–13
7. Heinbach W (1988) Aurally adequate signal representation – the Part-Tone-Time-Pattern. Acustica 67(2):113–121
8. International Organization of Standardization (2000) ISO 7029 Acoustics-Statistical distribution of hearing thresholds as a function of age
9. Kong YY, Carlyon RP (2007) Improved speech recognition in noise in simulated binaurally combined acoustic and electric stimulation. J Acoust Soc Am 121:3717–3727
10. Qin MK, Oxenham AJ (2006) Effects of introducing unprocessed low-frequency information on the reception of envelope-vocoder processed speech. J Acoust Soc Am 119:2417–2426
11. Rader T (2012) Speech perception of cochlear implanted patients with combined electric-acoustic stimulation, 1. Aufl. Verlag Dr. Hut, München
12. Rader T, Fastl H, Baumann U (2013) Speech perception with combined electric-acoustic stimulation and bilateral cochlear implants in a multisource noise field. Ear Hear 34:324–332
13. Rader T, Adel Y, Fastl H, Baumann U (2015) Speech perception with combined electric-acoustic stimulation: a simulation and model comparison. Ear Hear 36(6):e314–e325
14. Terhardt E (1985) Fourier transformation of time signals: conceptual revision. Acustica 57(4–5):242–256
15. von Ilberg C, Baumann U, Kiefer J, Tillein J, Adunka OF (2011) Electric-acoustic stimulation of the auditory system: a review of the first decade. Audiol Neurotol 16(Suppl 2):1–30
16. Wagener K, Brand T, Kollmeier B (1999) Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache. Teil III: Evaluation des Oldenburger Satztests. Z Audiol 38:86–95
17. Wagener K, Kühnel V, Kollmeier B (1999) Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache. Teil I: Design des Oldenburger Satztests. Z Audiol 38:4–15
18. Wilson BS, Finley CC, Lawson DT, Wolford RD, Zerby M (1993) Design and evaluation of a continuous interleaved sampling (CIS) processing strategy for multichannel cochlear implants. J Rehabil Res Dev 30:110–116
19. Zwicker E, Heinz W (1955) Zur Häufigkeitsverteilung der menschlichen Hörschwelle. Acustica 5(Suppl 1):75–80