Messung von Klickgeräuschen an Cochlea-Implantaten

Christian Adams[1], Uwe Baumann[2], Timo Stöver[2], Tobias Weißgerber[2]
[1] *Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau,*
Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM,
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt
E-Mail: christian.adams@sam.tu-darmstadt.de
[2] *Klinik für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde, Universitätsklinikum Frankfurt*
Theodor-Stern-Kai 7, 60590 Frankfurt am Main

Einleitung

Cochlea-Implantate (CI) werden eingesetzt, um Taubheit oder schweren bis hochgradigen Hörverlust zu behandeln. Das CI-System besteht aus dem eigentlichen Implantat sowie einer Sendespule, die außen am Kopf getragen wird und die mit Magneten gehalten wird. Der Magnet ist bei einigen CI-Modellen beweglich gelagert. Bei Magnetresonanztomographie (MRT)-Untersuchungen kann sich der Magnet drehen und am Magnetfeld des MRT-Geräts ausrichten. Dies verhindert schmerzhafte Nebenwirkungen oder eine Dislokation des Magneten während MRT-Untersuchungen. Das vorhandene Lagerspiel des CI-Magneten kann bei ruckartigen Bewegungen wie etwa Kopfschütteln zu Geräuschen führen, die als *Klicken* beschrieben werden können. Diese Klickgeräusche können von Patienten mit einseitiger Taubheit im gesunden Gegenohr als Störgeräusch wahrgenommen werden. Dieser Beitrag beschreibt einen Versuchsaufbau zur Charakterisierung der Klickgeräusche von CI-Magneten. Insbesondere wird darauf eingegangen, wie die Klickgeräusche wiederholgenau erzeugt werden können.

Fallbeschreibung

Mehrere Patienten mit einseitiger Taubheit der Klinik für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde am Universitätsklinikum Frankfurt am Main berichteten nach der CI-Versorgung über das Auftreten von Klickgeräuschen im gesunden Gegenohr. Daher werden Patienten in Beratungsgesprächen zur CI-Versorgung mit Implantaten mit beweglichen Magneten auf das Auftreten dieser Klickgeräusche hingewiesen, wenn im Gegenohr Normalhörigkeit oder geringer Hörverlust festgestellt wurde. Ein 16 Jahre alter männlicher Jugendlicher mit einseitiger Taubheit empfand die Klickgeräusche, die er bereits zeitnah nach der Operation wahrnahm, als starke Beeinträchtigung. Ein Hörerfolg konnte sich trotz Rehabilitation nicht einstellen, so dass das CI auf Wunsch des Patienten nur 23 Monate nach der Operation wieder explantiert wurde [1].

Um das explantierte CI zu untersuchen, wurde es an den Hersteller geschickt, der keine Fehlfunktion feststellen konnte. Zudem wurde das CI (im Folgenden als *CI-Explantat* bezeichnet) sowie ein Muster des CI (im Folgenden als *CI-Dummy* bezeichnet) an die TU Darmstadt übersandt, um akustische Untersuchungen durchzuführen, anhand denen die Klickgeräusche charakterisiert werden können. Im Folgenden wird der Versuchsaufbau beschrieben sowie die Validierung des Aufbaus im Hinblick auf die Wiederholgenauigkeit der Messungen. Eine ausführliche Diskussion des erwähnten Fallbeispiels und der Alltagsrelevanz von Klickgeräuschen bei CI-versorgten Patienten mit einseitiger Taubheit findet sich in [1]. Inzwischen hat der Hersteller des CIs die Konstruktion des beweglichen Magneten überarbeitet, so dass die Klickgeräusche bei ruckartigen Kopfbewegungen nicht mehr auftreten können [1].

Messaufbau

Abbildung 1 zeigt das CI (A) und die Ausrichtung des Magneten in einem äußeren Magnetfeld (B). Um die Klickgeräusche charakterisieren zu können, muss ein Messaufbau entwickelt werden, der das CI so *schüttelt*, dass das Klickgeräusch zuverlässig entsteht. Dabei darf der Messaufbau selbst keine störenden Geräusche erzeugen, die das Klickgeräusch des CI verdecken. Für die Anregung der Klickgeräusche wird ein Shaker

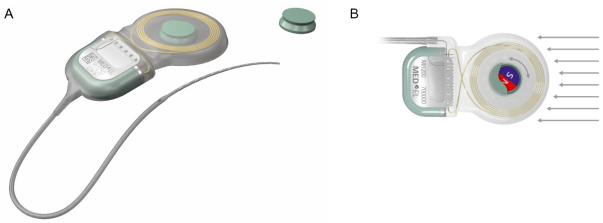

Abbildung 1: CI der Firma MED-EL, Innsbruck, Österreich (A), beim Anlegen eines äußeren Magnetfeldes richtet sich der Magnet aus (B). Abbildung mit freundlicher Genehmigung der Firma MED-EL, entnommen aus [1]

verwendet (LDS V201, Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, Nærum, Dänemark) sowie ein Signalgenerator (9010 Function Generator, Beckman Instruments, Inc., Kalifornien, USA) und ein Verstärker (BAA 60, Tira GmbH, Schalkau). Mit der ausschließlich uniaxialen Bewegung des Shakers kann jedoch kein Klickgeräusch des CI provoziert werden. Daher wird das CI gegenüber der vertikalen Bewegungsachse des Shakers horizontal versetzt. Abbildung 2 zeigt den Messaufbau. Durch den horizontalen Versatz bewegt sich das CI um mehrere Achsen gleichzeitig und das Klickgeräusch kann erzeugt werden. Für eine reproduzierbare Messung ist es wichtig, dass sich das CI möglichst wiederholgenau bewegt. Daher wird im Bereich der Einspannung des CI ein triaxialer Beschleunigungssensor angebracht

(Dytran 3093B1, Dytran Instruments, Inc., Chatsworth, Kalifornien, USA). Damit kann die Bewegung des CI im Raum analysiert werden. Das Klickgeräusch selbst

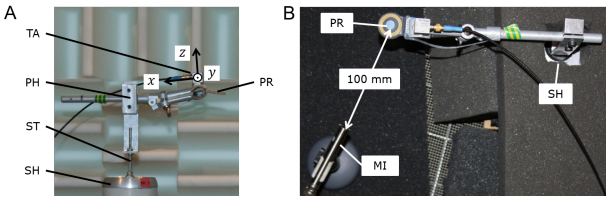

Abbildung 2: Messaufbau zur Erzeugung der Klickgeräusche, TA: triaxialer Beschleunigungssensor (Sensorachsen: x, y, z), PR: CI oder CI-Dummy, PH: Probenhalterung, ST: Gewindestange, SH: Shaker (in B mit Schaumstoff abgedeckt), MI: Mikrofon, entnommen aus [1]

wird mit einem Mikrofon erfasst (GRAS 46AE 1/2CCP Freifeld Standard Mikrofon, GRAS Sound & Vibration A/S, Holte, Dänemark). Die eigentliche Schallleitung der Klickgeräusche im menschlichen Schädel erfolgt höchstwahrscheinlich über Knochenleitung und eher weniger über direkten Luftschall. Dennoch wird hier eine Mikrofonmessung durchgeführt, um das Klickgeräusch zunächst grundsätzlich zu charakterisieren. Eine ausführlichere Diskussion möglicher Schallleitungswege im menschlichen Schädel findet sich in [1].

Für die Messung der Klickgeräusche werden folgende Einstellungen verwendet, die iterativ durch mehrere Versuche im reflexionsarmen Raum an der TU Darmstadt ermittelt werden:

- horizontaler Versatz des CI: 75 mm
- Mikrofonabstand zum CI: 100 mm
- Anregung: Sinussignal mit einer Frequenz von 6 Hz
- Hub des Shakers: ca. 25 mm

Zudem wird eine Abtastrate von 104.200 Samples pro Sekunde verwendet. Die Daten werden mit einem Soundbook MK2 (Sinus Messtechnik, Leipzig, 24 Bit A/D-Wandler) aufgezeichnet.

Datenanalysemethoden

Die Wiederholgenauigkeit der CI-Bewegung wird mithilfe einer Phasenraumdarstellung sowie mithilfe der Rekurrenz ermittelt. Die Phasenraumdarstellung wird durch ein Delay-Embedding der Beschleunigungssignale ermittelt

$$a_n = \left(a_{n-(m-1)\tau}, a_{n-(m-2)\tau}, \ldots, a_n\right), \qquad (1)$$

wobei m die Dimension des Delay-Embedding und τ die Zeitverzögerung (delay) beschreiben [2]. Die Dimension des Delay-Embedding m wird durch die Methode der *False Nearest Neighbours* [3] ermittelt und die Zeitverzögerung τ durch die sogenannte *Mutual Information* [4]. a_n bezeichnet die Summe der Beschleunigungen in die drei Raumrichtungen und der Index n gibt an, dass es sich um ein Zeitsignal mit n Elementen handelt.

Die Rekurrenz (von lat. *recurrere*, d. h. wiederkehren) beschreibt, ob die Trajektorie im Phasenraum zu ähnlichen Orten zurückkehrt. Die Rekurrenzanalyse bietet sich vor allem dann an, wenn der Phasenraum mehr als drei Dimensionen besitzt ($m > 3$) und sich nicht mehr visualisieren lässt. Durch einen Rekurrenzplot kann die Rekurrenz visualisiert werden. Der Phasenraum wird auf eine zweidimensionale Matrixdarstellung projiziert [5, 6]. Auf Abszisse und Ordinate wird je eine Zeitachse aufgetragen. Zeiten, zu denen sich die Phasenraumtrajektorie an ähnlichen Orten befindet, werden mit einer 1 in der Matrix versehen. Sonst hat die Matrix den Eintrag 0. Für den Zeitpunkt i und den Zeitpunkt j lautet die Rekurrenz

$$R_{i,j} = \Theta\left(\varepsilon_i - \|a_i - a_j\|_{\max}\right), \qquad (2)$$

wobei $\|\cdot\|_{\max}$ die Maximumnorm, ε_i einen minimalen Schwellenwert und Θ die Heaviside-Funktion bezeichnen. Periodische Vorgänge zeigen sich im Rekurrenzplot als Diagonalen. Das System kehrt stets zu ähnlich Orten im Phasenraum zurück [5, 6]. Daher kann von einer hohen Wiederholgenauigkeit der Bewegung des CI ausgegangen werden, wenn der Rekurrenzplot der Beschleunigung diagonale Strukturen zeigt.

Um die Daten für das Delay-Embedding und die Rekurrenzanalyse zugänglich zu machen, werden sie mit einem Butterworthfilter (10. Ordnung) mit der Eckfrequenz 50 Hz tiefpassgefiltert. Anschließend werden die Daten auf eine Abtastrate von 1024 Samples pro Sekunde reduziert. Dadurch beschränkt sich die Analyse der Wiederholgenauigkeit zwar auf den Frequenzbereich von 0 bis 50 Hz. Allerdings ist für die Wiederholgenauigkeit und die Periodizität der Bewegung ohnehin nur der Frequenzbereich um die Anregungsfrequenz von 6 Hz relevant. Das Delay-Embedding und die Rekurrenzanalyse werden mithilfe der CRP-Toolbox in Matlab durchgeführt [5, 7].

Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 3 zeigt die *mutual information* der Beschleunigungssignale des CI und des CI-Dummy. Für das Delay-Embedding sollte die *mutual information* minimal sein. Daher wird für das CI und das CI-Dummy ein Delay von 15 Samples für das Delay-Embedding gewählt. Anhand

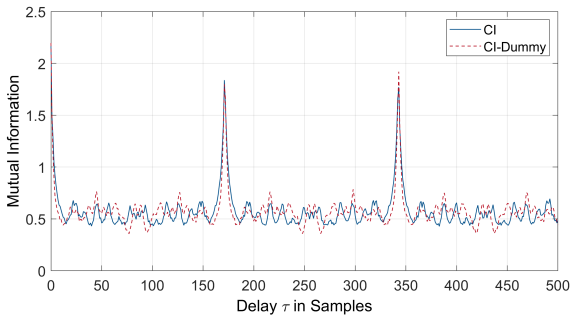

Abbildung 3: Mutual information der Beschleunigungssignale in Abhängigkeit vom Delay

der *False Nearest Neighbours* wird anschließend die Dimension m des Delay-Embedding bestimmt. Abbildung 4

zeigt, dass für das CI und das CI-Dummy die *False Nearest Neighbours* für $m = 3$ gegen null gehen. Daher wird eine Dimension $m = 3$ für das Delay-Embedding verwendet. Abbildung 5 zeigt die Phasenraumdarstellung

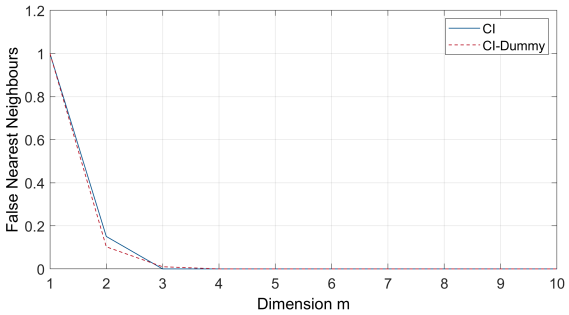

Abbildung 4: False Nearest Neighbours der Beschleunigungssignale in Abhängigkeit von der Dimension m

der Beschleunigungssignale von CI und CI-Dummy. Dabei werden das Beschleunigungssignal a_n sowie die zeitverzögerten Signale gemäß Gleichung (1) aufgetragen. Die einzelnen Bahnen der Trajektorie liegen dicht beieinander, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich das CI oder das CI-Dummy wiederholgenau bewegen. Ob es sich tatsächlich um eine periodische Bewegung handelt, wird anhand der Rekurrenzplots geprüft. Die Rekurrenzplots sind in Abbildung 6 dargestellt. Sowohl das CI als auch das CI-Dummy zeigen diagonale Strukturen in den Rekurrenzplots. Daher ist davon auszugehen, dass sich CI und CI-Dummy periodisch und damit wiederholgenau bewegen. Somit kann trotz des relativ einfachen Messaufbaus in Abbildung 2 ein wiederholgenaues *Schütteln* des CI und des CI-Dummy realisiert werden, mit dem die Klickgeräusche zuverlässig erzeugt werden können. Schließlich zeigen die Abbildungen 7 und 8 die A-bewerteten Schalldruckpegelspektren der Klickgeräusche des CI bzw. des CI-Dummy für jeweils drei Messungen. Die Klickgeräusche können vor allem oberhalb von 1000 Hz mit ausreichendem Signal-Rausch-Abstand identifiziert werden. Zwischen ca. 300 Hz und 1000 Hz weist der Messaufbau Eigengeräusche auf, die die Klickgeräusche verdecken, so dass hier die Klickgeräusche kaum identifiziert werden können.

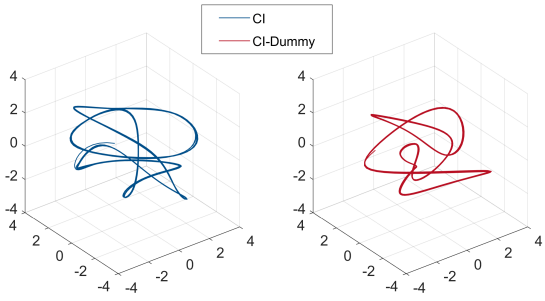

Abbildung 5: Phasenraumdarstellung der Beschleunigungssignale

Fazit

Es zeigt sich, dass das CI und das CI-Dummy um mehrere Achsen wiederholgenau *geschüttelt* werden muss, um die Klickgeräusche zu provozieren. Die Klickgeräusche können in Luftschallmessungen im Frequenzbereich oberhalb von 1000 Hz identifiziert werden. Mithilfe von Beschleunigungssignalen kann die Bewegungstrajektorie im Phasenraum ermittelt werden. Durch ein Delay-Embedding und eine Rekurrenzanalyse kann gezeigt werden, dass sich das CI und das CI-Dummy wiederholgenau und periodisch bewegen. Die A-bewerteten Schalldruckpegelspektren aus mehreren Messungen stimmen ebenfalls gut überein. Daher ist davon auszugehen, dass der Messaufbau die Klickgeräusche wiederholgenau erzeugen kann.

Dennoch soll zukünftig ein verbesserter Messaufbau entwickelt werden. Zum einen unterscheidet sich die Bewegung des CIs im Messaufbau von der tatsächlichen Bewegung des menschlichen Kopfes. Ein verbesserter Versuchsaufbau soll daher verschiedene Kopfbewegungen simulieren können – wie etwa Kopfschütteln –, um die Klickgeräusche in Abhängigkeit von verschiedenen Bewegungen untersuchen zu können. Zum anderen soll die Schallübertragung der Klickgeräusche näher untersucht werden. Dazu ist es notwendig, eine realitätsnähere Befestigung des CIs im Messaufbau umzusetzen. Hierzu könnte z. B. eine Anbindung an ein künstliches Mastoid nach DIN EN 60318-6 [8] geeignet sein.

Literatur

[1] Adams, C., Baumann, U., Stöver, T., Weißgerber, T.: Klickgeräusche durch bewegliche Magnete bei Cochlea Implantaten: Fallbeschreibung und akustische Messungen. GMS Z Audiol (Audiol Acoust), 2021, 3:Doc01

[2] Kantz, H., Schreiber, T.: Nonlinear time series analysis, Cambridge University Press, Cambridge, 2004

[3] Kennel, M.B., Brown, R., Abarbanel, H.D.I.: Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction, Phys. Rev. A, 45, 1992, S. 3403–3411

[4] Roulston, M.S.: Estimating the errors on measured entropy and mutual information, Physica D, 125, 1999, S. 285–294

[5] Marwan, N., Romano, M.C., Thiel, M., Kurths, J.: Recurrence Plots for the Analysis of Complex Systems, Physics Reports, 438(5–6), 2007, S. 237-329

[6] Marwan, N.: Recurrence Plots, `http://www.recurrence-plot.tk/`, 2021

[7] Marwan, N.: TOCSY - Toolboxes for Complex Systems `https://tocsy.pik-potsdam.de/CRPtoolbox/`, 2021

[8] DIN 60318-6: Akustik – Simulatoren des menschlichen Kopfes und Ohres – Teil 6: Mechanischer Kuppler für Messungen an Knochenleitungshörern, Beuth-Verlag GmbH, Berlin, 2009

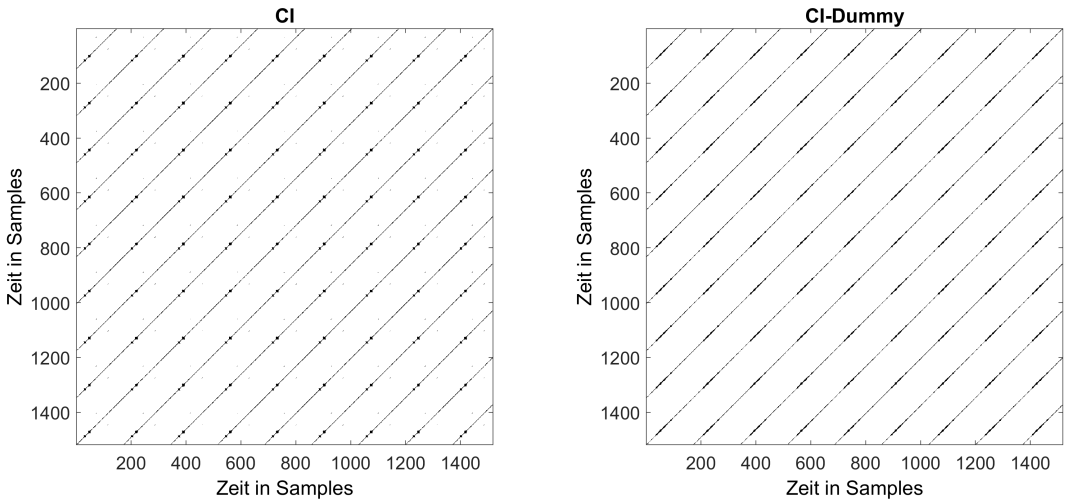

Abbildung 6: Rekurrenzplot der Beschleunigungssignale ($\varepsilon = 0.2$)

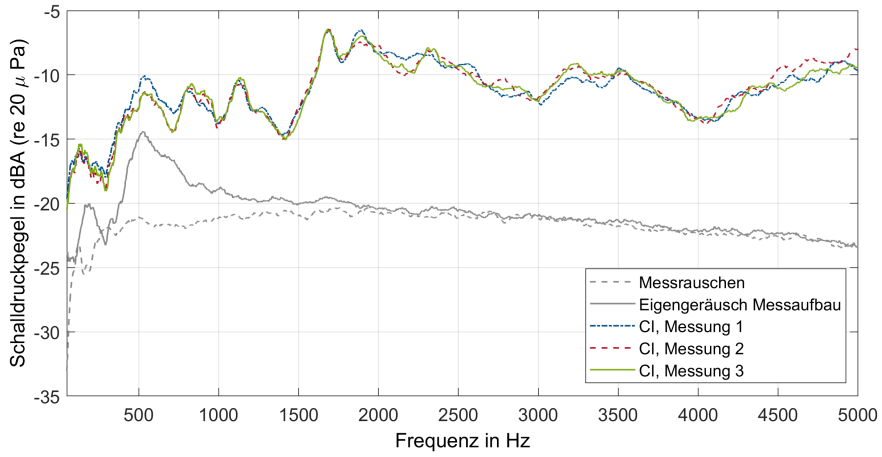

Abbildung 7: A-bewertetes Schalldruckpegelspektrum der Klickgeräusche des CI

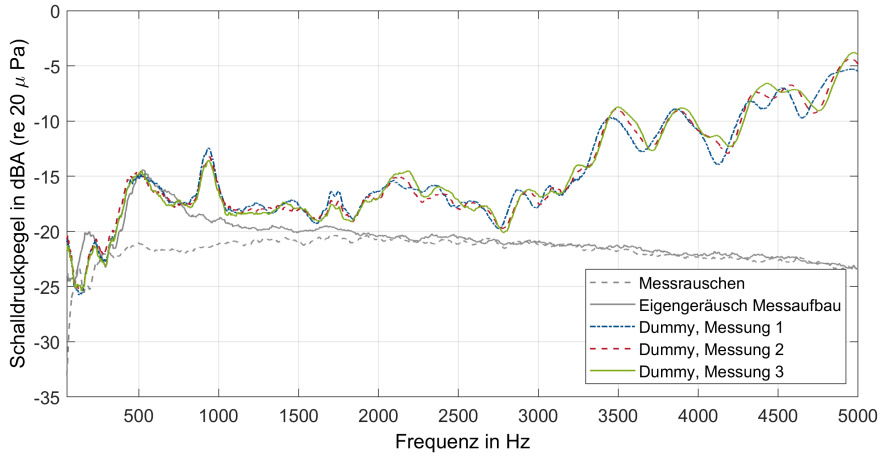

Abbildung 8: A-bewertetes Schalldruckpegelspektrum der Klickgeräusche des CI-Dummy