

# Untersuchungen zum Einfluss raumakustischer Parameter auf die Hörwahrnehmung bei Cochlea-Implantat-Trägern

Bernhard Eurich<sup>1</sup>, Michael Oehler<sup>2</sup>, Thomas Klenzner<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hochschule Düsseldorf, Institute for Sound and Vibration Engineering, 40476 Düsseldorf, Deutschland, Email: bernhard.eurich@study.hs-duesseldorf.de

<sup>2</sup> Universität Osnabrück, 49069 Osnabrück, Deutschland, Email: michael.oehler@uni-osnabrueck.de

<sup>3</sup> Hörzentrum Düsseldorf, 40225 Düsseldorf, Deutschland, Email: thomas.klenzner@med.uni-duesseldorf.de

## Einleitung

Die Akustik eines Raumes bildet einen eminent wichtigen und omnipräsenten Einflussfaktor auf die Hörwahrnehmung von Cochlea-Implantat-Trägern [1]. Bei gleichen Raumverhältnissen wird die Kommunikation und das Sprachverständnis durch die Anwesenheit eines diffusen Schallfelds für CI-Träger in höherem Maße erschwert als für Normalhörende [2]. Insbesondere bei Unterrichtssituationen in Klassenräumen stellt dies eine Belastung durch erhöhte Höranstrengung für CI-Patienten dar. Die zwischen Normalhörenden und Hörgeschädigten deutlich variierenden raumakustischen Bedürfnisse werden seit Inkrafttreten der DIN 18041:2016-03 durch die Raumkategorie A4 „Unterricht/Kommunikation inklusiv“ berücksichtigt [3] - aus diesem Grund lohnen Untersuchungen zur CI-Wahrnehmung in entsprechenden raumakustischen Umfeldern. Auch auf die subjektive Beurteilung von Musik wirkt sich die Zunahme von Nachhall negativ aus [9][4]. Hier kommt erschwerend hinzu, dass die Differenzierbarkeit von kleineren Intervallen sowie von Klangfarben beim CI-Hörerlebnis gegenüber Normalhörenden erheblich eingeschränkt ist [6][7][5]. Schwerpunktmäßig bauen die in westlichen Kulturkreisen verwurzelten Musikstilistiken auf Klängen auf, die von der Klassifizierung in Dur und Moll substanzial geprägt sind. Ob, in welchem Ausmaß und inwiefern das entsprechende Differenzierungsvermögen beim CI-Hörerlebnis von den Eigenschaften des jeweiligen Raumes abhängt, ist bisher kaum erforscht. Lediglich für den Parameter Nachhall existieren einzelne Studien (z.B. [9]).

Ziel dieser Untersuchungen ist es, Zusammenhänge zwischen der raumakustischen Situation eines Hörereignisses und dessen Wirkung auf den CI-Träger explorativ zu erforschen, wobei Erkenntnisse hinsichtlich der CI-Hörwahrnehmung in nach DIN 18041:2016-03 gestalteten Räumlichkeiten erlangt werden sollen. Desweiteren soll das Differenzierungsvermögen von Dur- und Moll-dreiklängen in Abhängigkeit verschiedener Raumgrößen und raumakustischen Beschaffenheiten evaluiert werden, um Rückschlüsse auf das CI-Hörerlebnis musikalischer Inhalte unter Raumeinfluss ziehen zu können.

## Methode

Es wurde ein Hörversuch durchgeführt, der sich in zwei Unterkategorien gliedert: Ein Versuch mit sprachbasierten, ein weiterer Versuch mit musikalischen Stimuli. Es

wurde je ein Versuch mit verschiedenen Varianten raumakustischer Bedämpfung eines Klassenraums und verschiedenen Abständen des Hörers zur Quelle (Source-to-Listener-Distance, SLD) nach der MUSHRA-Methode durchgeführt [10]. Hierbei diente ein Testsatz im Grundzustand, der also mit keiner BRIR gefaltet wurde, als Referenz und ein mit einer BRIR gefalteter Testsatz, in dessen Raummodell keinerlei Absorptionsflächen integriert waren, als Anker. Darüber hinaus wurde die Differenzierbarkeit von Dur- und Moll-dreiklängen als Paarvergleich evaluiert.

## Stimuli

Auf sprachlicher Ebene wurden als Grundlage Testsätze aus dem Oldenburger Satztest (OLSA) [17] verwendet. Kein Proband wurde im Laufe des Hörversuchs mit einem Satz mehr als einmal konfrontiert. Die musikalischen Stimuli wurden mit Samples aus der Vienna Symphonic Library als simultane Klavierakkorde in verschiedenen Lagen erzeugt. Es wurde zwischen enger Lage (Spannweite  $\leq$  große Sexte) und weiter Lage (Spannweite  $\leq$  große Dezime) differenziert. Der entworfene Dreiklangs-Pool enthielt Akkord-Lagen innerhalb eines Ambitus von gut 3 Oktaven ( $c^1 \dots d^3$ ), welche im Hörversuch gleichmäßig verteilt und randomisiert wiedergegeben wurden.

## Testräume

Mithilfe der Software *Google Sketchup* wurden 3D-Modelle von drei unterschiedlichen Testräumen entworfen und durch Auralisation unter verschiedenen raumakustischen Varianten (nur Klassenraum) und unterschiedlichen Abständen zur Quelle (SLD) mittels Raytracing binaurale Impulsantworten (BRIRs) errechnet. Die Testräume waren wie folgt dimensioniert:

**Klassenraum:**  $V = 210m^3$ , verschiedene raumakustische Varianten,  $T_{30,auralisiert} = 0, 3 \dots 1, 3s$

**Kammermusiksaal:** auch zum aktiven Musizieren,  $V = 831m^3, T_{30,auralisiert} = 0, 8s$

**großer Konzertsaal:** nach Weinberg-Geometrie,  $V = 31516m^3, T_{30,auralisiert} = 2, 0s$

Im Klassenraum wurden durch unterschiedlich große äquivalente Absorptionsflächen verschiedene nachfolgend aufgelistete raumakustische Varianten erzeugt. Die Anordnung der absorbierenden Materialien ( $\alpha_p$ -Werte: Eco-

phon Master E [18], Knauf Heradesign superfine [19]) erfolgte nach DIN 18041:2016-03, Abschnitt 5.4.

**Variante 1**  $T_{30, Variante1} < T_{Soll, A4} \rightarrow$  stärker bedämpft als Norm-Empfehlung

**Variante 2**  $T_{30, Variante2} = T_{Soll, A4} \rightarrow$  Norm-Empfehlung für inklusiven Unterricht

**Variante 3**  $T_{Soll, A4} < T_{30, Variante3} < T_{Soll, A3} \rightarrow$  Norm-Empfehlung für Unterricht/Kommunikation, nicht geeignet für inklusive Nutzung

**Variante 4**  $T_{30, Variante4} > T_{Soll, A3} \rightarrow$  als Klassenraum ungeeignet, dennoch alltägliche Hörumgebung bei Kommunikation

Darüber hinaus wurden für die Raumvariante 2 verschiedene Hörerpositionen im Raum simuliert (Tab. 1), um neben der raumakustischen Beschaffenheit des Testraumes auch den Einfluss des Abstandes zur Schallquelle zu untersuchen.

**Tabelle 1:** Abstände zur Schallquelle (SLD) der auralisierten Raummodelle

Raum	SLD [m]			
	vorne	mittige Pos		hinten
Klassenraum	1	3,5	6	8,5
Kammermusiksaal	4	-	-	10
Weinberg-Konzertsaal	5	-	-	15

## Probanden

10 CI-Träger (8w, 2m;  $M = 55,8$ ;  $SD = 15,4$ ) und 18 Normalhörende als Kontrollgruppe (15m, 3w;  $M = 25,2$ ;  $SD = 3,8$ ) nahmen am Hörversuch teil. CI-Träger wurden unter folgenden Kriterien aus der Patientenkartei des Hörzentrums Düsseldorf rekrutiert:

- Mindestalter: 18 Jahre
- Versorgungsdauer:  $\geq 6$  Monate
- Einsilberversandnis:  $\geq 60\%$  (bei 65 dB)

Die Patienten waren mit Cochlea-Implantaten der Typen Cochlear *Nucleus 5* oder *Nucleus 6* bzw. Med-El *Sonnet* ausgestattet.

## Durchführung

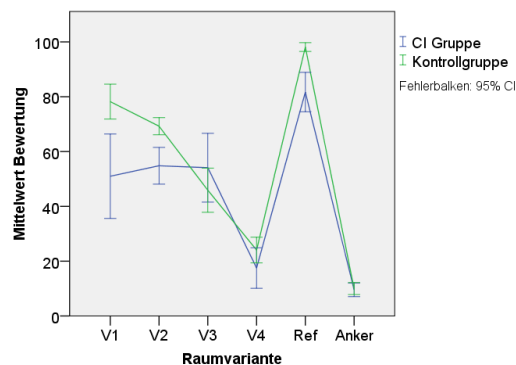
Die Versuche wurden mit der Browser-basierenden Hörversuchsplattform 'webMUSHRA' durchgeführt [11]. Der Hörversuch fand für die CI-Gruppe am Hörzentrum Düsseldorf, für die Kontrollgruppe im Hörversuchslabor des *Institute for Sound and Vibration Engineering* der Hochschule Düsseldorf statt. Das Audiosignal wurde, gesteuert durch die 'webMUSHRA'-Plattform, vom Rechner wiedergegeben, die Digital/Analog-Wandlung erfolgte durch das Audio-Interface RME *Fireface 400*.

Für die CI-Patienten erfolgte die Stimulation des Sprachprozessors unter galvanischer Trennung mittels dessen Aux-Eingangs unilateral („direct-connect assessment technique“, [1][13][14]), Jeder CI-Proband nahm mit der Prozessor-Einstellung am Hörversuch teil, die für seinen Alltag optimiert worden war. Für die Kontrollgruppe erfolgte die Zuspiegelung via Kopfhörer (Stax *SR-Lambda*). Die Dauer des Hörversuchs bewegte sich für die Kontrollgruppe zwischen 15 und 25 Minuten, für die CI-Gruppe zwischen 25 bis 45 Minuten.

## Ergebnisse

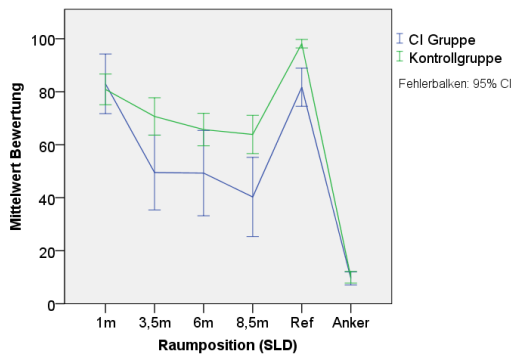
### Sprachbasierte Versuche

Eine ANOVA zeigte sowohl für die Raumvarianten ( $p = .005$ ,  $\eta^2 = .270$ ) als auch für die Abstände zur Quelle ( $p = .002$ ,  $\eta^2 = .317$ ) einen signifikanten Unterschied zwischen der CI-Gruppe und der Kontrollgruppe. Abbil-



**Abbildung 1:** Antwortverhalten beim MUSHRA-Versuch hinsichtlich verschiedener raumak. Varianten des Klassenraums

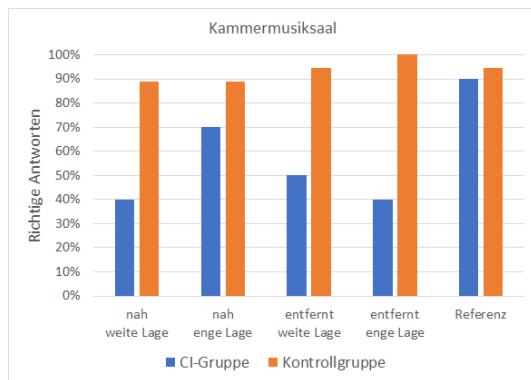
Abbildung 1 zeigt das Antwortverhalten beider Versuchsgruppen bezüglich der raumakustischen Varianten des Klassenraums. Die infolge der ANOVA durchgeführten paarweisen Vergleiche ergeben, dass bei beiden Gruppen Variante 4 ( $T_{30} = 1, 3s$ ) gegenüber den Varianten 1 - 3 signifikant am Schlechtesten bewertet wurde (jeweils  $p = .000$ ). Beide Gruppen bewerteten den Referenz-Stimulus hier signifikant am Besten (jeweils  $p = .000$ ), den Anker-Stimulus bewerteten beide Gruppen signifikant (jeweils  $p = .000$ ) am Schlechtesten. Während sich zwischen den Bewertungen der Raumvarianten für die Kontrollgruppe stets signifikante Unterschiede ergeben, sind für die CI-Gruppe zwischen den stärker bedämpften Raumvarianten keine signifikanten Verhältnisse zu beobachten. Das Antwortverhalten des zweiten MUSHRA-Versuchs über die verschiedenen Abstände zur Quelle (bei Raumvariante 2), siehe Abb. 2, ergibt für die CI-Gruppe, dass der kleinste Abstand zur Quelle mit  $SLD = 1m$  signifikant besser als die übrigen Teststimuli, besser als der nächstgrößere Abstand  $SLD = 3,5m$  ( $p = .000$ ) und nicht signifikant schlechter als der unverhallte Referenzstimulus ( $p = .842$ ) bewertet wurde. Bei der Kontrollgruppe zeigen sich wiederum keine signifikanten Unterschiede zwischen benachbarten Hörerpositionen.



**Abbildung 2:** Antwortverhalten beim MUSHRA-Versuch hinsichtlich verschiedener Abstände zur Quelle bei Variante 2 des Klassenraums

## Musikbasierte Versuche

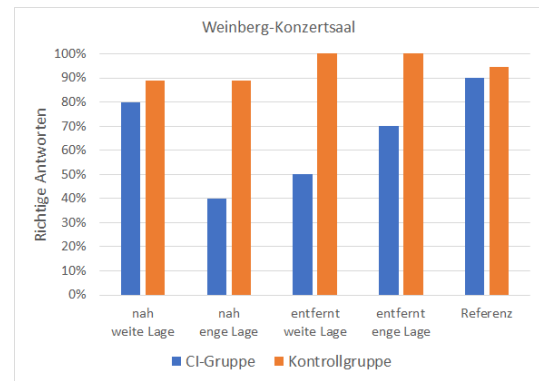
Cochran's Q Test ergibt seitens der Kontrollgruppe in beiden Sälen keinen signifikanten Unterschied zwischen den Abständen zur Quelle ( $p = .467$ ), die CI-Gruppe zeigt tendenziell signifikante Unterschiede ( $p = .053$ ). Wie in den Abbildungen 3 und 4 zu erkennen, fällt das Antwortverhalten der Kontrollgruppe sehr stabil und effizient aus, wohingegen sich bei der CI-Gruppe das Niveau der richtig differenzierten Dur-/Moll-Unterschiede bei den auralisierten Stimuli teils nahe der Ratewahrscheinlichkeit bewegt. Eine Ausnahme bildet hier das erkennbar höhere Niveau beim unverhalten Dreiklangspaar (Referenz).



**Abbildung 3:** Häufigkeit der richtigen Antworten beim Paarvergleich im Kammermusiksaal (nah:  $SLD = 4m$ , fern:  $SLD = 10m$ )

## Diskussion und Fazit

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen legen nahe, dass bezüglich einer Optimierung des Hörerlebnisses für CI-Patienten in Unterrichts-/Vortragssituationen die Nähe zur Schallquelle ein entscheidendes Kriterium darstellt. Das Optimum bildet demzufolge eine beispielsweise mittels FM-Übertragung realisierte direkte Zuspiegelung. Dem Antwortverhalten der CI-Träger dieser Studie zufolge ist eine raumakustische Bedämpfung, die über die Empfehlung nach DIN 18041:2016-03 für die Raumgruppe A4 „Unterricht/Kommunikation inklusiv“ bezüglich der Nachhallzeit hinausgeht, nicht signifikant gewinnbrin-



**Abbildung 4:** Häufigkeit der richtigen Antworten beim Paarvergleich im Konzertsaal nach Weinberg-Architektur (nah:  $SLD = 5m$ , fern:  $SLD = 15m$ )

gend. Diese Untersuchungen liefern bezüglich weiterer raumakustischer Größen zwar keine belastbaren Richtwerte, jedoch lassen sich bei genauerer Betrachtung des zeitlichen Schallfeld-Verlaufes einige Phänomene beobachten: So wurde diejenige raumakustische Variante als am Angenehmsten bewertet, bei der einerseits der Abstand zur Quelle nur einen Meter betrug, andererseits die Ausstattung mit hochabsorbierenden Oberflächen sich auf die gesamte Deckenfläche, die Rückwand und die Hälfte der Seitenwandflächen beschränkte (vgl. Variante 1:  $T_{30} = 0,3s$ : hochabsorbierende Verkleidung aller Wandflächen). Die bei Variante 2 entsprechend vorhandenen sehr frühen Reflexionen scheinen sich folglich positiv auf die Bewertung der Angenehmheit der CI-Probanden ausgewirkt zu haben. Im Gegensatz zu Normalhörenden, die nach [3] von Diffusschall innerhalb der ersten 35ms hinsichtlich Verständlichkeit (und Stärkemaß) profitieren, scheinen sich nützliche Erstreflexionen für CI-Träger also im zeitlichen Verlauf des Schallfeldes deutlich früher abzuspielen. Bei Betrachtung des Verlaufs der Schwerpunktzeit (centre time,  $t_S$  [15]), zeigt sich bei der durch die CI-Gruppe als am Angenehmsten bewertete Hörumgebung (Variante 2,  $SLD = 1m$ ) mit  $t_S \approx 22ms$  der im Vergleich niedrigste Wert (vgl:  $t_{S,SLD=3m} \approx 36ms$ ). Die Bevorzugung von Hörumgebungen mit niedriger  $t_S$  überrascht prinzipiell nicht, jedoch ist vor dem Hintergrund bereits aufgezeigter Tendenzen anzunehmen, dass CI-Träger noch deutlich niedrigere Schwerpunktzeiten bevorzugen würden als mit diesem Versuchsdesign feststellbar (Richtwert für NH für Sprache: 60 - 80ms bei 500 - 4000 Hz, Oktaven). Dementsprechend liegt der Speech Transmission Index ( $STI$ ) nur in unmittelbarer Nähe (möglichst innerhalb des Hallradius) der Schallquelle deutlich über dem im Diffusfeld quasi konstanten Wert von 0,75 („ausgezeichnet“). Die gebräuchliche Größe des Deutlichkeitsmaßes für Sprache  $C_{50}$  erweist sich in diesem Zusammenhang als weniger aussagekräftig, da das Zeitintervall von 50ms im Zähler des Verhältnisses im Zusammenhang mit CI-Trägern sich als zu lange andeutet; der Richtwert für NH nach [15] von  $C_{50} = -2dB$  dürfte allerdings als zu niedrig angesehen werden.

Diese Beobachtungen lassen sich bedingt auf das Ant-

wortverhalten bezüglich der Dur- und Molldreiklänge übertragen. Hier besteht die grundsätzliche Problematik, dass das getestete CI-Probandenfeld im Durchschnitt noch recht unerfahren im Umgang mit musikalisch-tonalen Hörerlebnissen war und dementsprechend die Differenzierung der Dreiklänge grundsätzlich Schwierigkeiten bereitete. Die Hintergründe der bereits starken Auswirkungen auf das Differenzierungsvermögen der CI-Gruppe durch das vergleichsweise nachhallarme Schallfeld des Kammermusiksaals mit lediglich  $T_{30} \approx 0,8s$  sind vertiefend zu untersuchen. Demzufolge wäre auch in diversen öffentlichen Einrichtungen wie Konzert- und Opernhäusern die Möglichkeit zur Ankopplung an direkte Zuspiegelung für diejenigen CI-Träger, die im grundsätzlichen Umgang mit tonal geprägten Hörereignissen bereits fortgeschritten sind, ein beträchtlicher Zugewinn an Hörerlebnis.

Für nachfolgende Untersuchungen wäre ein Versuchsdesign denkbar, welches anhand einer aus diesen Erkenntnissen ableitbaren Hypothese belastbare Richtwerte für die erwähnten Größen evaluiert. Für weitere Erkenntnisse bezüglich der Musikwahrnehmung unter Raumakustik-Einfluss wäre ein seitens der CI-Gruppe größeres Probandenfeld mit umfangreicherer Vorerfahrung bezüglich Musikgenuss wünschenswert.

## Literatur

- [1] Neuman, Arlene C et al.: Measuring Speech Recognition in Children With Cochlear Implants in a Virtual Classroom. *Journal of Speech Language and Hearing Research* 55 (2012), 1092 - 4388
- [2] Iglehart, F.: Speech Perception in Classroom Acoustics by Children With Cochlear Implants and With Typical Hearing. *American journal of audiology* , 25 (2), 100 - 109
- [3] Ruhe, C.: Optimale Akustik im Klassenzimmer – unerlässlich nicht nur für schwerhörige Kinder. URL: <http://nullbarriere.de/files/pdf/wissenswert/ruhe-akustik-im-klassenzimmer.pdf>
- [4] Certo, M. V., Kohlberg, G. D., Chari, D. A., Mancuso, D. M., Lalwani, A. K.: Reverberation time influences musical enjoyment with cochlear implants. *Otology & neurotology* 36 (2), e46-50.
- [5] Gfeller, K. (2009). Music and Cochlear Implants - not in perfect harmony. *The ASHA Leader* , 14 (8), URL: <http://leader.pubs.asha.org/>
- [6] Limb, C.: Music Perception in Cochlear Implant Users, *Cochlear implants: Principles and practices* (2009), 223-228
- [7] Limb, C. J.; Roy, A. T.: Technological, biological, and acoustical constraints to music perception in cochlear implant users. *Hearing research* 308 (2014b), 13-26
- [8] Roy, A. T.: Assessment of sound quality perception in cochlear implant users during music listening. *Otology & neurotology : official publication of the American Otological Society* 33 (3) (2012), 319-327
- [9] Roy, A. T., Vigeant, M., Munjal, T., Carver, C., Jiradejvong, P., Limb, C. J.: Reverberation negatively impacts musical sound quality for cochlear implant users. *Cochlear Implants International* 16 (sup3) (2015), 105-113
- [10] Liebetrau, J. et al. (Hrsg.): Revision of Rec. ITU-R BS.1534. URL: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=17495>
- [11] Voelker, C., Bisitz, T., Huber, R., Kollmeier, B., Ernst, S. M. A.: Modifications of the MUlti stimulus test with Hidden Reference and Anchor (MUSHRA) for use in audiology. *International Journal of Audiology* (2016), 1-13
- [12] Schoeffler, M., Herre, J., Edler, B., Stöter, F.-R.: Towards the Next Generation of Web-based Experiments: A Case Study Assessing Basic Audio Quality Following the ITU-R Recommendation BS.1534 (MUSHRA), URL: [http://wac.ircam.fr/pdf/wac15\\_submission\\_8.pdf](http://wac.ircam.fr/pdf/wac15_submission_8.pdf)
- [13] Jäncke, L., Lai, W. K., Kegel, A., Eichele, T., Meyer, M., Dillier, N., Sandmann, P.: Elektrophysiologische Korrelate von beeinträchtigter musikalischer Klangwahrnehmung bei Cochlea-Implantat-Trägern. 13. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Audiologie - Proceedings (2010).
- [14] Kokkinakis, K., Loizou, P. C.: The impact of reverberant self-masking and overlap-masking effects on speech intelligibility by cochlear implant listeners (L). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130 (3) (2011), 1099-1102
- [15] Ahnert, W. Tennhardt H.-P.: *Raumakustik*, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2008
- [16] Hoffmeier, J.: *Untersuchungen zum Einfluss von Raumklangfärbungen auf die Deutlichkeit von Sprache*, Diplomarbeit, TU Dresden, 1996
- [17] Wagener, K.; Brand, T.; Kollmeier, B.: *Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache I: Design des Oldenburger Satztests*
- [18] Produktseite Ecophon Master E, URL: <http://www.ecophon.com/de/produkte/Decken-in-Modulbauweise/Master/Master--E/>
- [19] Datenblatt Knauf Heradesign superfine, URL: <https://www.knaufamf.com/wmv/?id=17717>