

Entwicklung einer CI-Sprachprozessor-Mikrofon-Messbox

Design of a cochlear implant speech processor microphone measuring box

Stefan Zirn¹, Jürgen Roth², Otmar Gerber², Maximilian Meisinger^{1,3}, Thomas Wesarg³

¹ Hochschule Offenburg, Fakultät Elektrotechnik & Informationstechnik

² hörwelt Freiburg GmbH, Kooperationspartner des Universitätsklinikums Freiburg

³ HNO-Klinik, Universitätsklinikum Freiburg, Medizinische Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Zusammenfassung: Die Hersteller von Cochlea-Implantat (CI)-Systemen sehen für klinische Audiologen die Möglichkeit vor, die Mikrofonleistung der meisten aktuellen CI-Sprachprozessoren mittels anschließbarer Monitorkopfhörer zu prüfen. Nähere Angaben dazu, nach welchem Prozedere diese Prüfung stattfinden soll, z. B. welche Stimuli mit welchen Pegeln verwendet werden sollen, sind nach Wissen der Autoren seitens der CI-Hersteller nicht verfügbar. Auf der Basis dieser subjektiven Prüfung entscheidet dann der Audiologe, ob der betreffende Sprachprozessor an den Hersteller eingeschickt wird oder nicht. Wir haben eine Messbox entwickelt, mit der die Mikrofonleistung aller abhörbaren CI-Sprachprozessoren der Hersteller Advanced Bionics, Cochlear und MED-EL objektiv geprüft werden kann. Die Box wurde im 3-D-Druckverfahren hergestellt. Der zu prüfende Sprachprozessor wird in die Messbox eingehängt und über einen verbauten Lautsprecher mit definierten Prüfsignalen (Sinustönen unterschiedlicher Frequenz) beschallt. Das Signal des Mikrofons bzw. der Mikrofone wird über das in der Audio-/Abhörbuchse des Prozessors eingesteckte Kabel der Monitorkopfhörer herausgeführt und mit einer Shifting and Scaling-Schaltung in einen Spannungsbereich transformiert, der für die A/D-Wandlung mit einem Mikrokontroller (ATmega1280 verbaut auf einem Arduino Mega) geeignet ist. Derselbe Mikrokontroller übernimmt über einen eigens gebauten D/A-Wandler die Ausgabe der Prüfsignale über den Lautsprecher. Signalaufnahme und -wiedergabe erfolgt jeweils mit einer Samplingrate von 38,5 kHz. Der frequenzspezifische Effektivwert des abgegriffenen Mikrofonsignals wird mit einem Referenzwert verglichen. Die (frequenzspezifischen) Referenzwerte wurden mit einem neuwertigen Sprachprozessor gleichen Typs ermittelt und im Speicher des Mikrokontrollers abgelegt. Das Ergebnis wird nach Abschluss der Messung grafisch auf einem Touchscreen ausgegeben.

Derzeit läuft eine erste Datenerhebung mit in der Klinik subjektiv auffällig gewordenen CI-Sprachprozessoren, die anschließend in der Messbox untersucht werden. Längerfristiges Ziel ist es, die hit und false alarm Raten der subjektiven Prüfung zu ermitteln.

Stichwörter: Audiologie, Qualitätskontrolle, Mikrokontroller, 3D-Druck, Signaldetektionstheorie

Abstract: Manufacturers of cochlear implant (CI) systems provide clinical audiologists with the ability to test the microphone performance of most current CI speech processors using connectable monitor headphones. Further information on the procedure to be followed for this test, e. g. which stimuli should be used with which levels, is not available from the CI manufacturers to the knowledge of the authors. Based on this subjective examination, the audiologist then decides whether or not to send the relevant speech processor to the manufacturer.

We have developed a measuring box to objectively test the microphone performance of all CI speech processors from the manufacturers Advanced Bionics, Cochlear and MED-EL. The box was produced in a 3D printing process. The speech processor to be tested is hooked into the measuring box and sounded by a built-in loudspeaker with defined test signals (sinus tones of different frequencies). The signal from the microphone(s) is tapped at the cable of the monitor headphones plugged into the audio/audio jack of the processor and is transformed into a voltage range suitable for AD conversion with a microcontroller (ATmega1280 built into an Arduino Mega) by means of a shifting and scaling circuit. The same microcontroller uses a custom made DA converter to output the test signals via the loudspeaker. Signal recording and playback is done at a sampling rate of 38.5 kHz. The frequency-specific RMS value of the tapped microphone signal is compared with a reference value. The (frequency-specific) reference values were determined with a new speech processor of the same type and stored in the memory of the microcontroller. The result is displayed graphically on a touchscreen after the measurement is completed.

A first data collection is currently underway with CI speech processors that have become subjectively noticeable in the clinic and are then examined in the measurement box. The long-term goal is to determine the hit and false alarm rates of subjective testing.

Keywords: audiology, quality control, microcontroller, 3D printing, signal detection theory

Korrespondenzadresse:

Professor Dr. Stefan Zirn
Fakultät Elektrotechnik & Informationstechnik
Badstraße 24
77652 Offenburg
Tel. +49 781 / 205 - 4628
Fax +49 781 / 205 - 45 4628
stefan.zirn@hs-offenburg.de

Einleitung

Die Schallaufnahme bei aktuellen Sprachprozessoren von Cochlea-Implantat(CI)-Systemen geschieht über ein oder zwei Mikrofone, die Umwelteinflüssen wie Luftfeuchtigkeit, Schweiß und Staub direkt ausgesetzt sind. Eine starke Schweißentwicklung kann beispielsweise zu einer Salzkruste auf den Mikrofonmembranen bzw. in der darüber liegenden Öffnung führen, welche die normale Funktion der Mikrofone einschränkt.

Die CI-Hersteller sehen eine Möglichkeit zur Prüfung der Mikrofonleistung der meisten aktuellen CI-Sprachprozessoren durch den Audiologen bzw. den CI-Servicepartner vor. Dazu können Monitorkopfhörer an den Prozessor angeschlossen werden, mit denen ein Abhören der Mikrofone inklusive eines Teiles der Signalvorverarbeitung möglich ist. Dabei handelt es sich um eine subjektive Überprüfungsmethode, die durch mehrere Parameter bestimmt wird: I) akustische Parameter wie die verwendeten Schallstimuli, Pegel, Signal-Rausch-Verhältnis, II) technische Parameter wie die eingestellte Mikrofonempfindlichkeit und Programmierung/Signalvorverarbeitung des Sprachprozessors sowie III) das subjektive Entscheidungskriterium des Audiologen. Eine präzise Handlungsanweisung zur Durchführung der Prüfung gibt es seitens der Hersteller nicht. Zur Erleichterung der Einschätzung der Mikrofonleistung eines zu prüfenden Sprachprozessors durch den Audiologen wäre es beispielsweise sinnvoll, auch ein neuwertiges, baugleiches Gerät bei gleicher Programmierung/Einstellung als Referenz zu Vergleichszwecken zeitnah abzuhören.

Um eine objektive Prüfung von CI-Sprachprozessor-Mikrofonen zu ermöglichen, haben wir eine Messbox entwickelt. Längerfristiges Ziel

ist es, die hit und false alarm Raten der subjektiven Prüfung zu ermitteln. (siehe Tabelle 1).

Material und Methodik

Die Messbox besteht aus einem Kunststoffgehäuse mit aufklappbarem Deckel. Im Deckel ist ein Touchscreen verbaut, der den Nutzer durch die Messung führt und zum Schluss die Ergebnisse darstellt. Unter dem Deckel befindet sich der rechteckige Messraum, in den der CI-Sprachprozessor an einer definierten Stelle eingespannt wird. An der Unterseite des Messraumes ist ein Lautsprecher verbaut, über den Prüfsignale präsentiert werden. Auf der Grundplatte unterhalb des Lautsprechers befindet sich die Elektronik, die zum Betrieb der Messbox erforderlich ist. Die Komponenten werden im Folgenden einzeln detailliert beschrieben.

Gehäuseentwicklung

Das Gehäuse wurde im 3-D-Druckverfahren hergestellt (Calvert, 2001). Als Material wurde das kostengünstige Polylactide (PLA) verwendet. PLA bietet eine gute Zugfestigkeit und Oberflächenqualität bei hohen Druckgeschwindigkeiten. PLA ist aus mehreren, aneinander gebundenen Milchsäuremolekülen aufgebaut. Das für die Gehäusesfertigung genutzte PLA wird im Druckprozess auf 210° Celsius erhitzt. Hierbei wird das Material flüssig und kann über eine Düse (Extruder) an der gewünschten Stelle aufgetragen werden. Da der Drucker das Material nicht in die Luft spritzen kann, müssen überhängende Strukturen mit Stützmaterial unterbaut werden. Nach dem Druck kann das Stützmaterial herausgebrochen oder mit einer Wasserlösung aufgelöst werden.

Das Material wird im sogenannten Fused Deposition Modeling-Verfahren gedruckt. Dabei wird Schicht für Schicht eines schmelzbaren Kunststoffes übereinander aufgebracht. Beim Abkühlen erstarrt das Material, und es entsteht ein festes Modell. Der Erstarrungsprozess ist sehr empfindlich. Kühlt das Material nicht gleichmäßig schnell ab, kommt es zum Verzug des Bauteiles. Bei kleinen Teilen lässt sich die Druckgeschwindigkeit reduzieren. Damit verringert sich die Chance auf ein sogenanntes „Warping“, welches mit thermischem Verzug gleichzusetzen ist. Bei großen dünnen Flächen, welche horizontal ge-

Tatsächlich vorliegender Fall	Antwort		
		Abhöreindruck auffällig	Abhöreindruck unauffällig
	Mikrofon(e) defekt	hit (Treffer)	miss (Verpasser)
	Mikrofon(e) nicht defekt	false alarm (falscher Alarm)	correct rejection (korrekte Ablehnung)

Tabelle 1: Mögliche Szenarien bei der subjektiven Kontrolle der Mikrofonleistung von Sprachprozessoren per Monitorkopfhörer

druckt werden, ist die Gefahr bzw. das Risiko eines thermischen Verzuges sehr hoch, da die Fläche unterschiedlich schnell abkühlt.

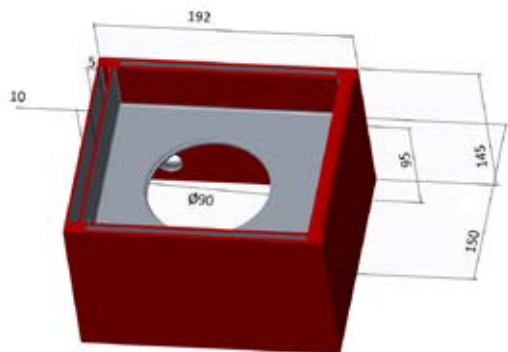


Abbildung 1: CAD-Modell des Mittelteiles der Messbox. Draufsicht von oben seitlich. Alle Maße sind in Millimeter angegeben.

Um eine möglichst gute akustische Schirmung zu erreichen, wurde die Messbox doppelwandig realisiert. Das Gehäuse der aktuellen Version ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: Foto der Messbox mit Touchscreen im Deckel (mittig) und Netzteil (links). Vorne rechts ist das blaue USB-Kabel zum Anschluss der Messbox an den PC erkennbar.

Elektronik

Zur Analyse der vom CI-Sprachprozessor kommenden Signale, zur Ausgabe definierter Prüftöne und zur Darstellung der Messergebnisse auf einem Touchscreen wurde ein Mikrokontroller (μC) vom Typ ATmega2560 der Firma Atmel (Atmel_Datasheet, 2014) verwendet. Dieser μC ist in einem Arduino Mega (Arduino, abgerufen am 01.12.2017) verbaut. Der Arduino Mega ist eine von vielen verfügbaren Arduino-Plattformen, deren Komponenten quelloffen sind. Der Mega wurde aus dem Grund gewählt, weil er eine ausreichend hohe Anzahl an digitalen Ein-/Ausgabe-Pins bereitstellt, um damit sowohl ein 7-Zoll-Touchscreen anzusteuern als auch die Ausgabe definierter Prüftöne und den Abgriff und die Analyse der vom CI-Sprachprozessor kommenden Signale zu realisieren. Der μC bietet mit 128 kByte Flash Memory darüber hinaus genug Speicher für die Programmausführung.

Das Mikrofonsignal des CI-Sprachprozessors wird dem 10 Bit A/D-Wandler des μC über einen analogen Eingangspin zugeführt. Der

Spannungsbereich, der einem solchen analogen Eingangs-Pin zugeordnet werden kann, liegt zwischen 0 und 5 V. Das Spannungssignal, das an den Monitorkopfhörern der CI-Sprachprozessoren anliegt, weist aber in der Regel einen Spannungsbereich von $\pm 2\text{V}$ auf. Daher braucht es eine Shifting- und Scaling-Schaltung (siehe Abbildung 3), die eine Spannungstransformation in den erforderlichen Bereich durchführt.

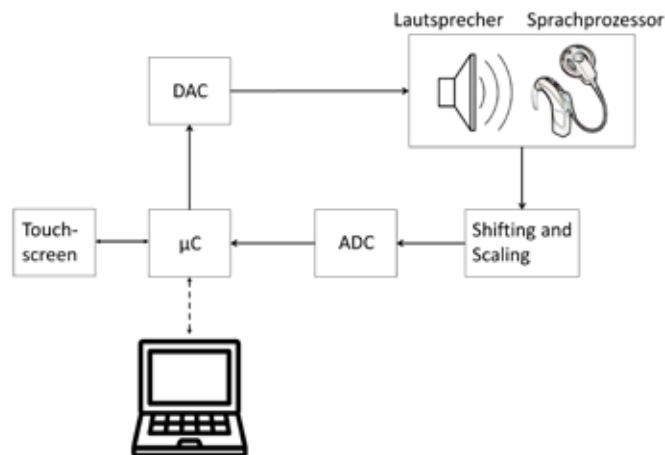


Abbildung 3: Komponenten der Messbox inkl. optionaler Verbindung zu einem Computer. Der Block um Lautsprecher und Sprachprozessor stellt den eigentlichen Messraum dar. DAC steht für Digital-Analog-Converter (Wandler) und ADC für Analog-Digital-Converter.

Weil der ATmega2560 über keinen D/A-Wandler verfügt, wurde zur Ausgabe der Prüfsignale ein D/A-Wandler in Form eines R2R-Netzwerks gebaut (Kennedy, 2000). Der D/A-Wandler wurde an die 8 Pins des Ports K des Mikrokontrollers angeschlossen. Mittels eines Operationsverstärkers im Spannungsfolgermodus und eines nachgeschalteten Potentiometers lässt sich die Lautstärke der Testtöne einstellen. In der aktuellen Version der Messbox konnten die in Tabelle 2 aufgeführten Schalldruckpegel in der Messbox an der Position des Sprachprozessors mit dem Schallpegelmessgerät Nor140 von Norsonic-Tippkemper GmbH im Schmalband-Frequenzanalyse-Modus gemessen werden.

Frequenz [Hz]	Pegel [dB]
250	59
500	66
750	65
1000	67
1500	65
2000	61
3000	66
4000	71
6000	60
8000	50

Tabelle 2: Schalldruckpegel bei verschiedenen Testtonfrequenzen gemessen in der Messbox an der Position des Sprachprozessors.

Aufgrund der Ausbildung von stehenden Wellen ab einer Frequenz von ca. 900 Hz, ab der sich der rechteckige Messraum der Messbox wie ein $\lambda/2$ -Resonator verhält, hängt der Schalldruck an dem Mikrofon bzw. den Mikrofonen stark von der Position des Sprachprozessors in der Messbox ab. Daher muss die Position jedes Sprachprozessors bei jeder Messung mit der vorgegebenen (Referenz-) Position übereinstimmen, was durch den Einbau einer Halterung zur Positionierung des Sprachprozessors in der Messbox gelang.

Programmierung

Die Programmierung des ATmega2560 erfolgte in der Arduino Entwicklungsumgebung (Arduino IDE) in der Programmiersprache C. Der Timer des Analog-Digital-Converters (ADC) wurde hierbei durch direkten Registerzugriff so eingestellt, dass alle 26 μs ein Interrupt ausgelöst wird. Innerhalb der entsprechenden Interrupt Service-Routine wird dann quasiparallel zur Soundausgabe jeweils ein Amplitudenwert eines Testtones auf den Digital-Analog-Converter (DAC) geschrieben sowie ein Amplitudenwert des vom CI-Sprachprozessor abgegriffenen Signals über den ADC eingelesen. Die in der Bibliothek `arduino.h` verfügbaren Funktionen wie `AnalogRead` oder `DigitalWrite` haben sich für diesen Zweck als zu langsam herausgestellt. Der direkte Registerzugriff, sowohl zum Einlesen aus dem ADC als auch zum Ausgeben an den DAC, ist dagegen schnell genug, um bis zum nächsten Eintreffen eines Interrupts (nach 26 μs) abgeschlossen zu sein. Die daraus resultierende Samplingrate liegt beim Kehrwert von 26 μs , also bei 38 462,5 Hz. Die obere Grenzfrequenz f_{max} des höchsten CI-Frequenzbandes liegt je nach Hersteller zwischen 8 und 8,5 kHz. Entsprechend des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems sind Abtastraten von $2 \cdot f_{\text{max}} = 17$ kHz und höher für die Signalanalyse geeignet. Mit über 38 kHz ist die vorliegende Samplingrate also ausreichend hoch.

Untersuchungsablauf

Der Nutzer der Messbox wird auf dem Touchscreen durch den Messvorgang geleitet. Nach Start der Messbox erscheinen zwei Auswahlfelder auf dem Touchscreen: „Messung starten“ und „Letzte Messwerte anzeigen“. Mit einem Fingerdruck auf das Feld „Messung starten“ erscheint eine Liste von Sprachprozessortypen. Nun muss ein Sprachprozessor in den Messraum unterhalb des Deckels der Messbox eingespannt, eingeschaltet und mit einem Kabel verbunden werden. Anschließend wird der Sprachprozessortyp auf dem Touchscreen ausgewählt und die Messung beginnt. Zehn Prüfsignale (Sinustöne, im Folgenden Testtöne) mit den Frequenzen 250, 500, 750, 1 000, 1 500, 2 000, 3 000, 4 000, 6 000 und 8 000 Hz mit jeweils einer Dauer von 1 Sekunde werden nun nacheinander wiedergegeben. Für jeden Testton wird nun über 3 200 Samplingwerte des vom Sprachprozessor abgegriffenen Signals nach etwa 0,5 Sekunden Testtondauer der Effektivwert berechnet. Anschließend erfolgt die Berechnung der Abweichung von einem Referenzeffektivwert, der mit einem neuwertigen Sprachprozessor gleichen Typs gemessen und im Speicher des Mikrokontrollers hinterlegt wurde. Die für jede Frequenz ermittelte Abweichung wird dann in dB auf dem Touchscreen ausgegeben. Ein vollständiger Messvorgang dauert ca. 40 Sekunden. Es bleibt die Frage, was eine kritische Abweichung ist. Bisher ist hierfür die Bewertung gemäß Tabelle 3 vorgesehen.

Bei einer Wertung in Summe von 4 oder größer wird auf dem Touchscreen die Meldung „Abweichung groß“ angezeigt. Bei einer Wertung in Summe kleiner 4 wird „Abweichung klein“ angezeigt.

Abweichung [dB]	Wertung
[0, 1)	0
[1, 2)	1
[2, 4)	2
≥ 4	4

Tabelle 3: Bewertung der Abweichung Messwertes vom Referenzwert

Die eingestellte Signalvorverarbeitung im Sprachprozessor beeinflusst das abgegriffene Signal. Es ist daher erforderlich, dass das zu kontrollierende Gerät genauso wie der Referenzprozessor eingestellt wird, dessen Vergleichswerte im Speicher des Mikrokontrollers vorliegen. Beim Sprachprozessortyp CP810 von Cochlear haben wir die höchste Reproduzierbarkeit der Messwerte beispielsweise im Modus „Everyday“ und unter der erweiterten Einstellung Environment Configuration „None“ mit einer Mikrofonempfindlichkeit von 12 erreicht.

Diskussion

Limitationen

Eine Einschränkung der CI-Sprachprozessor-Messbox in ihrer jetzigen Form besteht darin, dass bei Sprachprozessoren mit zwei Mikrofonen keine mikrofonspezifische Prüfung möglich ist, da lediglich ein Signal vom Prozessor abgegriffen werden kann. In diesem Signal sind die beiden Mikrofonsignale in Abhängigkeit von der eingestellten Signalvorverarbeitung verrechnet. Es kann also nur dieses Gesamtsignal bewertet werden. Darüber hinaus kann mit der jetzigen Messbox auch keine Aussage über die Funktionsfähigkeit des Beamformers getroffen werden, der in einigen Sprachprozessormodellen (beispielsweise im Modus „Zoom“ beim CP810 von Cochlear) implementiert ist (Spriet et al., 2007).

Weiterentwicklung

Geplante Optimierungen an der Hardware sind die Verbesserung der internen Dämmung der Messbox mit einer Verkleidung des Messraumes durch Filz. Weiterhin stellt die Verifikation des entsprechenden Schalldruckes im Messraum durch Platzierung eines Referenzmikrofons eine Optimierungsmöglichkeit dar.

Auch aufseiten der Software sind Optimierungen möglich. Zum einen könnte das Aufnahmezeitfenster vergrößert werden (derzeit 3 200 Samples) um auf typische Fensterlängen, wie etwa 125 ms, zu kommen. Zum anderen könnte statt schmalbandigen Testtönen neben einem Sweep auch ein breitbandiges Schallsignal, etwa weißes Rauschen, als Testsignal ausgegeben werden. Bei letzterem Stimulus kann dann durch Anwendung der Fast-Fourier-Transformation auf das abgegriffene CI-Sprachprozessor-Signal das Amplitudenspektrum berechnet werden. Durch den Vergleich bestimmter Frequenz/Amplituden-Wertepaare mit denen eines neuwertigen Referenzgerätes kann nach voraussichtlich kürzerer Messzeit die gleiche Aussage wie bei sinusförmigen Testsignalen getroffen werden. Dazu muss allerdings erst eine Fast-Fourier-Transformation auf dem Mikrokontroller implementiert werden.

Weiterhin existiert auch eine Idee zum Test der Abstimmung beider Mikrofone von CI-Sprachprozessoren: Eine Messbox bei der der Sprachprozessor auf einem drehbaren Teller gelagert wird, könnte den Beamformer beispielsweise in der Horizontalebene testen. Allerdings ist dies

in der aktuellen Version der Messbox nicht mehr implementierbar und würde den Bau einer vollständig neuen Messbox voraussetzen.

Quellen

Arduino. abgerufen am 01.12.2017. [Online] <https://www.arduino.cc/>
Atmel_Datasheet (2014) Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V, http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf

Calvert P (2001) Inkjet printing for materials and devices. In: Chem Mater 13, S. 3299–3305
Kennedy MP (2000) On the robustness of R-2R ladder DACs. IEEE Transactions on Circuits and Systems In: Fundamental Theory and Applications 47, 109–116
Spriet A, Van Deun L, Eftaxiadis K, Laneau J, Moonen M, van Dijk B, van Wieringen A, Wouters J (2007). Speech understanding in background noise with the two-microphone adaptive beamformer BEAM in the Nucleus Freedom Cochlear Implant System. In: Ear and hearing 28, S. 62–72



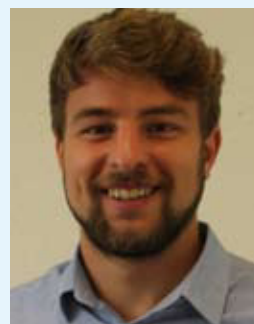
Prof. Dr. Stefan Zirn ist seit September 2015 Professor für Elektrotechnik und Informationstechnik an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien in Offenburg. Dort ist er vorrangig im Studiengang Medizintechnik tätig und bietet Lehrveranstaltungen in den Bereichen Elektrotechnik, Informatik und Audiologie an. Vor der Berufung war er unter anderem als Ingenieur bei der Firma MED-EL und später in der Audiologie des Klinikums Großhadern in München tätig. Im Jahr 2011 schloss er seine Promotion zum Thema „Comodulation Masking Release bei Cochlea-Implantat-Trägern“ an der LMU München ab.

Jürgen Roth ist seit 1993 Mitarbeiter der Sektion Cochlear Implant der HNO-Klinik des Universitätsklinikums Freiburg. Zu seinen Arbeitsschwerpunkten zählen die technische Betreuung und Anpassung von Cochlea- und Hirnstamm-Implantaten. 2005 gründete er die Implant Service Freiburg Ltd. & Co. KG, die heutige hörwelt Freiburg GmbH, und ist deren Geschäftsführer. Er ist dort verantwortlich für die technische Nachsorge und Anpassung von Cochlea-Implantaten.



Otmar Gerber ist seit 1998 Mitarbeiter der Sektion Cochlear Implant der HNO-Klinik des Universitätsklinikums Freiburg. Zu seinen Arbeitsschwerpunkten zählen die technische Betreuung und Anpassung von Cochlea-Implantaten. 2005 gründete er mit Jürgen Roth die Implant Service Freiburg Ltd. & Co. KG, die heutige hörwelt Freiburg GmbH und ist deren Geschäftsführer. Er ist dort verantwortlich für die technische Nachsorge und Anpassung von Cochlea-Implantaten. Mit der Weiterbildung zum Hörakustikermeister im Jahr 2013 wurde sein Arbeitsbereich um die Hörgeräte- sowie bimodale Versorgung erweitert.

Maximilian Meisinger begann im Jahr 2014 mit dem Studium der Medizintechnik an der Hochschule Offenburg und schloss 2017 mit dem Bachelor of Science ab. Im Rahmen seiner Bachelorarbeit wirkte er an der Entwicklung der Sprachprozessor-Mikrofon-Messbox mit. Seit 2017 arbeitet er als Systemingenieur im Bereich Entwicklung bei der Firma Dr. Langer Medical.



Dr. Thomas Wesarg studierte Elektrotechnik, Vertiefungsrichtung Biomedizinische Technik/Biokybernetik, an der TU Ilmenau. 2004 promovierte er zum Dr.-Ingenieur an der Universität Magdeburg. Von 1993 bis 2000 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Leibniz-Institut für Neurobiologie in Magdeburg und von 2000 bis 2004 in der Abteilung für Experimentelle Audiologie der Universität Magdeburg tätig. Anschließend übernahm er die Leitung des Bereiches Technik der Sektion Cochlear Implant und 2005 auch die Leitung des Funktionsbereiches Audiologie der HNO-Klinik des Universitätsklinikums Freiburg.