

Technisches Hintergrundwissen

CI-Versorgung: Hilfestellung für eine schwierige Entscheidung

Die Versorgung mit einem Cochlea-Implantat (CI) ist für sich genommen schon eine sehr bedeutsame Entscheidung. Ist sie getroffen, steht die Wahl des passenden CI-Systems an. Der nachfolgende Überblick soll Ihnen nützliches Hintergrundwissen vermitteln, damit Sie Ihre Kunden umfassend und kompetent beraten können.

Grundsätzlich gibt es nicht *das* beste Cochlea-Implantat(CI)-System, sondern die Wahl hängt – neben anatomischen Eigenschaften der Hörschnecke – auch immer von individuellen Prioritäten ab, vor allem im Hinblick auf den Audioprozessor. Daneben maßgeblich sind das Implantat und der Elektrodenträger.

Grundlegend ist die Cochlea schneckenförmig aufgebaut. Darin befinden sich die Haarzellen, wobei jeder Ort einer bestimmten Tonhöhe entspricht – am Eingang der Cochlea (basal) befinden sich die hohen Töne, an der Spitze (apikal) die tiefen Töne. Da die Länge der Hörschnecke von Mensch zu Mensch sehr verschieden ist – zwischen etwa 28 und 46 Millimeter –, bieten alle Hersteller unterschiedlich lange Elektrodenträger an. Durch heutige mehrkanalige Elektroden-systeme mit bis zu 24 Elektroden ist es möglich, relativ gezielt schmale Bereiche der Cochlea anzuregen und damit Hörindrücke unterschiedlicher Tonhöhen auszulösen. Das Gehirn kann sich jedoch auch daran gewöhnen, wenn nicht die gesamte Hörschnecke elektrisch ange-regt wird. Das kann anfänglich nach der Implantation zu einer insgesamt recht hochtonigen Wahrnehmung führen, die sich meist nach einiger Zeit aber „normalisiert“ (Hessel 2012). Das Gehirn passt sich also an.

Einfluss von Insertionstiefe und Elektrodenlage

Dennoch betonen einige Hersteller die Bedeutung einer möglichst vollständigen Abdeckung der Cochlea für den Hör-



Fotos: Ridofranz/istock.com, Advanced Bionics, Oticon Medical, Cochlear, MED-EL

erfolg, für weniger Höranstrengung und einen natürlicheren Klang. Deswegen hat jeder Hersteller unterschiedlich lange Elektrodenträger entwickelt. Büchner et al. (2017) wiesen zudem nach, dass Patienten mit längeren Elektroden solche mit kürzeren beim Sprachverstehen in Ruhe und im Störlärm übertrafen und auch schneller ein gutes Sprachverstehen erreichten.

Eine möglichst vollständige Abdeckung der Cochlea setzt voraus, die Elektrode möglichst tief in die Hörschnecke einzuführen. Das kann wiederum das Risiko für Verletzungen der Cochlea erhöhen und somit das Resthörvermögen verringern. Verletzungen und Traumata können aber auch andere Ursachen haben und bei allen Formen von Elektrodenträgern auftreten, etwa bei zu viel Kräfteinsatz bei

der Insertion (Roland und Wright 2006). Elektrodenträger mit kleinerem Durchmesser sollen hingegen das Verletzungsrisiko mindern (Hessel 2012). Die Elektrodenträger und OP-Techniken werden jedoch stetig verbessert, sodass, gemeinsam mit modernsten bildgebenden Verfahren während der Operation, das Risiko für Verletzungen stetig minimiert wird. Das Ergebnis (tatsächlich erreichte Insertionstiefe, Traumatisierungsgrad) ist daneben aber auch abhängig von der Erfahrung des Chirurgen (Hessel 2012).

Statt der möglichst tiefen Insertion plädieren einige Hersteller für eine möglichst perimodiolare Position des Elektrodenträgers, also eine Lage an der inneren Wand der Hörschnecke. Diese ermögliche eine direktere Ankopplung der Stimulationselektroden an die Nervenzellen,

CI im Überblick

Was ist ein CI: Ein CI ist eine elektronische Innenohrprothese. Der außen getragene digitale Signalprozessor (= Audioprozessor (1)) wandelt Schallwellen in elektrische Impulse um. Diese werden mit einer Sendespule mit Magnet (2), die von einem unter der Haut sitzenden Magneten am Kopf gehalten wird, durch die Haut elektromagnetisch auf das darunter gelegene Implantat (3) übertragen. Das Implantat wiederum besteht, neben dem Magneten, aus einer Empfangsspule mit Decodiereinheit, einem elektrischen Stimulator sowie einem Elektrodenträger (4). Der Stimulator leitet die Signale an den in die Hörschnecke (Cochlea) eingeführten Elektrodenträger weiter. Die darauf befindlichen Elektrodenkontakte stimulieren die Hörnervenfasern elektrisch. Diese transportieren die elektrischen Impulse dann zur weiteren Verarbeitung ans zentrale Hörzentrum im Gehirn. Die Stromversorgung des Implantates erfolgt durch die Kopfhaut mittels elektromagnetischer Induktion, die Signalübertragung mit Hochfrequenzwellen. Der Strombedarf ist unter anderem abhängig vom Abstand der Elektroden zu den Nerven, der Hautdicke über dem Implantat und der Einstellung des CIs.

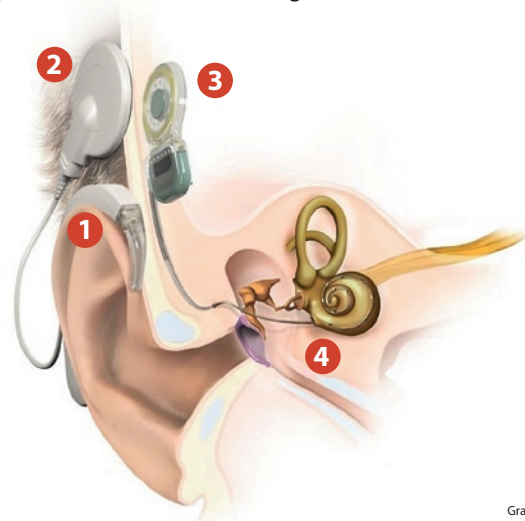
Weg zum CI: 1.) Hals-Nasen-Ohrenarzt stellt mögliche Indikation fest; 2.) Klinik, die CI-Versorgungen durchführt, prüft mit verschiedenen diagnostischen Verfahren die Eignung für ein CI (unter anderem die Funktionstüchtigkeit des Hörnervs); 3.) CI inklusive Rehabilitation werden bei der Krankenkasse beantragt; 4.) nach der Genehmigung erfolgt die ein- oder gegebenenfalls beidseitige Implantation, nach etwa drei bis sechs Wochen die Erstanpassung des Signalprozessors und damit die Rehabilitationsphase.

Indikationen: hochgradiger oder an Taubheit grenzender sensorineuraler Hörverlust (Innenohrschwerhörigkeit) oder

Innenohrtaubheit mit optimaler Hörgeräteversorgung ≤ 60 Prozent Einsilberversuchen bei 65 dB.

Kontraindikationen: nicht funktionstüchtiger Hörnerv, verknöcherte oder fehlende Cochlea, akute Mittelohrinfektion, gehörlos geborene Erwachsene.

Mögliche CI-spezifische OP-Risiken und Hinweise: Risiko für Verlust des Restgehöres, sehr geringes Risiko für zeitweise oder dauerhafte Gleichgewichtsstörungen (Schwindelrisiko nimmt im höheren Alter zu; Elektrodendesign und Insertionstiefe haben keinen Einfluss (Skreinig 2016)), zeitweiser oder dauerhafter Tinnitus, zeitweise oder dauerhafte Schädigung des Gesichts- oder Geschmacksnervs, Wundheilungsstörungen, Materialunverträglichkeit (extrem selten); im Vorfeld Impfung empfohlen gegen Pneumokokken und (falls noch nie erfolgt) Haemophilus influenzae Typ b (Hib) für alle Patienten unabhängig von deren Alter zur Vorbeugung einer Hirnhautentzündung.



Grafik: MED-EL

niedrigere Stimulations- und Wahrnehmungsschwellen (geringere erforderliche Stromstärke), eine fokussierte Stimulation, eine größere Dynamik und eine bessere Hörleistung sowie verbesserte Tonhöhenwahrnehmung (Hessel 2017, Hey 2002). Dafür wurden entsprechend vorgeformte beziehungsweise vorgekrümmte (modiolare) Elektroden entwickelt. Diese sollen, da sie an der inneren Wand der Hörschnecke liegen (perimodiolare), mindestens die gleiche Insertionstiefe erreichen wie weniger flexible, gerade Elektrodenträger, die eher an der äußeren Wand der Hörschnecke liegen (lateral), da der Radius dort größer ist als an der Innenseite. Allerdings werden nur wenige

verschiedene, relativ kurze Standardlängen an vorgeformten Elektroden angeboten, sodass die gewünschte perimodiolare Lage nicht gewährleistet werden könne und die tiefe Insertion physisch stark begrenzt sei (Dhanasingh 2018). Sehr flexible, gerade Elektroden können somit vorteilhaft sein, etwa bezüglich der variablen Einführungstiefe und des geringeren Durchmessers, wodurch ein maximaler Restgehörerhalt möglich sei (Hessel 2014). Als wichtige Kriterien für den Restgehörerhalt gelten eine sehr flexible, individuell passende Elektrode sowie eine möglichst schonende, atraumatische Einbringung der Elektrode (Mühler und Ziese 2010, Todt et al. 2017). Auch Lang-

zeitergebnisse bestätigen, dass eine möglichst hohe Bewahrung der Cochleastruktur vorteilhaft ist (Hübel 2019).

Unterschiede gibt es daneben beim tatsächlich nutzbaren Bereich des Elektrodenträgers (Stimulationsbereich) sowie der Anzahl der Elektroden auf dem Elektrodenträger. Stehen mehr Elektroden zur Verfügung, können die Hörnerven zielgenauer angeregt werden, was für die Wahrnehmung von Sprachmelodie und Musik vorteilhaft sei. CI-Experte Dr. Matthias Hey vom Universitätsklinikum Schleswig-Holstein erklärt, dass bereits sechs bis acht Elektroden für das Sprachverstehen in Ruhe ausreichen. Bei mehr Elektroden

können sich hingegen auch mehr Kanalinteraktionen beziehungsweise -überschneidungen und Summationseffekte ergeben (Hessel 2012). Nicht immer können allerdings alle Elektroden genutzt werden, sondern einzelne müssen manchmal abgeschaltet werden, etwa wegen Defekten oder weil beispielsweise auch der Gesichtsnerv mitgereizt wird. Das Abschalten ist aber unproblematisch: Die zu übertragenden Frequenzen werden dann auf die verbleibenden Elektroden neu aufgeteilt; die Tonhöhenwahrnehmung normalisiert sich auch hier meist schnell wieder.

Studien zu Insertionstiefe und Sprachverstehen zeigen häufiger, dass eine tiefere Insertion nicht unbedingt die Hörleistung beziehungsweise das Sprachverstehen verbessert oder weniger tiefe Insertionen sogar bessere Ergebnisse erzielen (Pesch et al. 2007, Hodges et al. 1999). Die Anzahl der Elektroden habe hingegen einen positiven Einfluss auf die Hörleistung (Hodges et al. 1999). Für gutes Sprachverstehen seien „laut Studien mindestens acht Elektroden notwendig, für guten Klang beziehungsweise Musikgenuss etwa 15 Elektroden“, erläutert Christian Thürmer, Produktmanager von Oticon Medical. Die Anzahl der Spektralbänder habe darauf dagegen keinen Einfluss.

Sprachverstehen im Fokus

Wie die Elektroden den Hörnerv stimulieren, bestimmt – neben der Lage – die Signalcodierungsstrategie. Da das Sprachverstehen das vorrangige Ziel ist, heißt diese auch Sprachcodierungs- oder Sprachverarbeitungsstrategie. Die Strategie bestimmt also, wie die akustischen Informationen verarbeitet werden. Gemeinsam ist allen, dass jeder Elektrode ein fester Frequenzbereich zugeordnet wird. Der Audioprozessor zerlegt die eingehenden akustischen Signale entsprechend der Codierungsstrategie und leitet daraus die Reizstärke für die einzelnen Elektroden ab. Der Stimulationsort der einzelnen Elektroden beeinflusst dabei die wahrgenommene Tonhöhe und die Reizstärke

die wahrgenommene Lautstärke (Hoth, 2012).

Von der Anzahl der Elektroden lässt sich aber nicht direkt auf die Anzahl der übertragbaren Töne (Frequenzbänder) schließen. So ermöglicht beispielsweise die gleichzeitige Stimulation von zwei Elektroden vielfältige Toneindrücke zwischen den Elektroden. Dazu wird die Stromstärke je Elektrode variiert und somit auch der Toneindruck. Solche virtuellen Stimulationskanäle würden dazu führen, dass Sprache im Störgeräusch viel besser gehört werden könne und würde auch zu erheblichen Verbesserungen in der Musik- und Klangqualität führen, erklärt Christoph Zimmer, Senior Communication Manager von Advanced Bionics.

Da es auch mit vielen Elektroden und schneller Pulsfolge technisch und physiologisch nicht möglich ist, alle Informationen eines Schallsignals per Elektrode zu übertragen, müssen wesentliche Bestandteile ausgewählt und in Impulse übersetzt (codiert) werden. Besonders in anspruchsvollen Hörsituationen, etwa im Störgeräusch oder beim Telefonieren, macht sich das in einer höheren Höranstrengung bemerkbar.

Analysiert werden für die Verarbeitung die physikalischen Eigenschaften des akustischen Signals, also Frequenz (Tonhöhe), Intensität (Lautstärke) und Zeitverlauf (Dauer und Pausen), und damit auch die spezifischen Eigenschaften von Sprache (Stimmgrundfrequenz, Vokale, Konsonanten) (Mühler und Ziese 2010). Alle Sprachcodierungsstrategien haben zum Ziel, die im Schallsignal enthaltenen Frequenzen über räumlich und zeitlich verteilte Reizungen im Innenohr abzubilden. Voraussetzung, damit Sprache verstanden werden kann, sind eine sehr große Zeit- und Frequenzauflösung (Hoth 2012). Im Laufe der Zeit wurden dafür verschiedene Strategien entwickelt, die unterschiedliche Signalmerkmale fokussieren.

Prinzipiell können Sprachcodierungsstrategien danach klassifiziert werden, ob sie

hauptsächlich Wert auf die zeitliche Auflösung (Feinstruktur) oder die spektrale Auflösung (Hüllkurve, wie Formanten¹) legen. Alle aktuellen Codierungsstrategien sind eine Kombination aus beiden Eigenschaften. Im Folgenden werden nun einige gängige Strategien kurz vorgestellt (nach Willinger 2005):

- **Continuous Interleaved Sampling (CIS):** zeitlicher Verlauf des Sprachsignals (Hüllkurve) wird möglichst umfangreich in Stimulationsimpulse umgewandelt, ohne spezielle Merkmale hervorzuheben oder zu unterdrücken; stimuliert wird in schneller, vorgegebener Reihenfolge immer nur eine einzige Elektrode mit einem kurzen Stromimpuls, also nicht überlappend (interleaved); hohe Stimulationsraten sind vorteilhaft für ein besseres Sprachverständnis; CIS wurde weiterentwickelt in verschiedenen Unterstrategien wie CIS+ oder High-Definition(HD)-CIS
- **SPEAK (= n-of-m):** Betonung spektraler Merkmale; zerlegt das eingehende Signal in eine bestimmte Anzahl von Frequenzbändern, von denen nur die Werte mit den höchsten Amplituden an die Elektroden weitergeleitet werden; geht von der Annahme aus, dass ein Übermaß an Informationen und Redundanzen das Nervensystem überlastet beziehungsweise überstimuliert, weswegen sie rausgeschnitten werden, um die Höranstrengung zu reduzieren, Signalüberschneidungen zu vermeiden und das Verstehen, etwa in schwierigen Hörsituationen, zu verbessern; bewahrt dennoch auch feine akustische Sprachdetails (Hoen et al. 2018); wird kaum noch eingesetzt
- **Advanced Combination Encoders (ACE):** gezielte Auswahl von Frequenzbändern nach größtem Informationsgehalt und entsprechende Stimulation der zugehörigen Elektroden; Weiterentwicklung beziehungsweise Kombination von CIS- und SPEAK-Strategie;

¹ Formante = Bereich im Klangspektrum, in dem sich unabhängig von der Tonhöhe Schallenergie konzentriert; Erhöhung in einem sonst gleichmäßigen oder gleichmäßig abklingenden Spektrum; unter anderem wichtig für die Erkennung von Vokalen und Musikinstrumenten

erlaubt Kombination höherer Reizraten als SPEAK auf gleichzeitig mehr Kanälen (Dillier 2001, Hoth 2012).

Als besonders erfolgreich für ein gutes Sprachverstehen, auch in schwierigen Hörsituationen, haben sich Reizmuster mit einer maximalen Anzahl von Reizelektroden beziehungsweise der differenzierten Abbildung spektraler Feinstrukturen erwiesen, zudem würden höhere Pulsraten oft einen größeren Dynamikbereich ermöglichen (Lenarz 1998). Besonders im Bereich der Spitze der Hörschnecke wurde durch höhere Stimulationsraten die Fähigkeit zur Tonhöhenunterscheidung deutlich verbessert. Das dürfte zur verbesserten Erkennung von Melodien und bei Tonalsprachen wie Chinesisch führen (Simonyan 2012).

Die meisten Signalcodierungsstrategien verwerfen allerdings die zeitliche Feinstruktur, wodurch Informationen zur Tonhöhe und zu interauralen Zeitdifferenzen² nur unzureichend übertragen werden. Hier können zusätzliche Extrapulse mit kurzen Intervallen deren Erkennung verbessern, ohne die Sprachverständlichkeit zu beeinträchtigen (Lindenbeck 2018). Abgebildet wird die Feinstruktur aber zur besseren Übertragung tonaler Sprachelemente, von Musik und zur Schallortung bei der FS(P)-Strategie von MED-EL und der HiReS Optima von Advanced Bionics (siehe Seite 66/67 und Fußnote 8/9 Seite 69).

Ist ja reizend?

Grundsätzlich werden bei den meisten modernen Codierungsstrategien die Elektroden sequenziell stimuliert, also nicht gleichzeitig, sondern schnell hintereinander. So sollen Wechselwirkungen zwischen benachbarten Elektroden vermieden werden (Mühler und Ziese 2010). Daneben ist die parallele, also simultane Anregung mehrerer Elektroden bei den meisten Herstellern möglich. Vorausset-

² Zeitunterschied, den ein Signal benötigt, um bei dem einen und beim anderen Ohr anzukommen; daraus bestimmt das Gehirn die Richtung des Geräusches.

CI-Geschichte

Die ersten einkanaligen CIs vor rund 40 Jahren hatten noch einen Audioprozessor so groß wie eine Schrankwand. Seitdem wurde nicht nur die Miniaturisierung vorangetrieben, sondern auch die Wiederherstellung des Hörens und damit das Sprachverstehen immer weiter verbessert. Dazu beigetragen haben mit der Entwicklung mikroelektronischer Mehrkanal-CIs die Pioniere um die Professoren Dr. Robin Michelson, Dr. Robert Schindler und Dr. Michael Merzenich (Advanced Bionics), Dr. Claude-Henri Chouard und Team (Neurelec, jetzt Oticon Medical), Dr. Ingeborg und Professor Dr. Erwin Hochmair (MED-EL) und Professor Dr. Graeme Clark (Cochlear) sowie mit der Entwicklung der CIS-Sprachcodierungsstrategie Professor Dr. Blake Wilson (Duke Universität, USA).

Erstmals gelungen war die Implantation eines mehrkanaligen CIs schließlich 1978. Heute tragen weltweit mehr als 500 000 Menschen CIs, davon etwa 55 000 in Deutschland. Jährlich kommen weltweit rund 55 000 Menschen hinzu.

In Deutschland vertreten sind die Hersteller Advanced Bionics, Cochlear, MED-EL und Oticon Medical (in alphabetischer Reihenfolge). Daneben gibt es schon seit 2006 einen weiteren, amerikanisch-chinesischen CI-Hersteller: Nurotron. Dessen Implantat Nurotron Venus wird bisher hauptsächlich in China vertrieben, aber auch in Afrika, Südamerika, weiten Teilen Asiens und seit wenigen Jahren in einigen europäischen Ländern wie Spanien und Polen.

zung für eine parallele Stimulation ist je eine Stromquelle pro Elektrode.

Die meisten Hersteller setzen dabei biphasische, symmetrische Pulse ein, also Stromimpulse, die aus einer positiven und einer gleich starken negativen Ladung bestehen, damit sie sich gegenseitig neutralisieren. So soll vermieden werden, dass Ladung im Gewebe bleibt, die die Nervenzellen schädigen könnte. Es können bei dieser Art der Stimulation allerdings auch Nebenwirkungen durch die doppelte Reizung mit einem positiven und einem negativen Puls auftreten. Das kann etwa eine (Teil-)Anregung des Gesichtsnervs sein, was sich durch ein Zucken um das Auge, der Wange und/oder um den Mund oder durch Schmerzen in diesem Bereich zeigen kann. Dann hilft es oft nur, bestimmte Elektroden auszuschalten, die Lautstärke oder die Pulsraten zu begrenzen.

Eine andere Herangehensweise hat MED-EL entwickelt: die triphasischen Pulse. Hier besteht die Anregung aus drei statt zwei Phasen, die insgesamt ebenfalls ladungsneutral sind. Da jede der drei

einzelnen Amplituden etwas schwächer ausfallen kann, treten die genannten Nebenwirkungen – bei gleichbleibendem Lautheitseindruck – kaum auf (Adel et al. 2018). Allerdings erwiesen sich die triphasischen Pulse als signifikant weniger effizient bei der Stimulation als biphasische Pulse (Karg et al. 2013).

Oticon Medical hat ebenfalls eine Strategie gegen solche Überstimulationen entwickelt: monophasische Pulse mit passiver Entladung. Dafür wurde die Stromquelle jeder Elektrode mit einem Kondensator ausgestattet, der jeden aktiven Puls neutralisiert, erläutert Christian Thürmer von Oticon Medical. Das spare zudem Energie. Auch bei Advanced Bionics und MED-EL ist jede Elektrode mit einem Kondensator ausgestattet, da es ein „wichtiges Sicherheitsmerkmal“ ist, das „verhindert, dass Gleichstrom ins Gewebe geht, der für dieses tödlich ist“, erläutert Patrick Weißer, Leiter Marketing und Senior Operations Manager bei MED-EL.

Übrigens: Trotz unterschiedlicher Stimulations- und Sprachcodierungsstrategien ist das Sprachverstehen bei den vier in