

Aus der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkranke  
der Universität Würzburg  
Direktor: Professor Dr. med. J. Helms

**Richtungshören bei Kindern mit  
bilateralen Cochlea-Implantaten im Vergleich  
zu Kindern mit unilateralem Cochlea-Implantat**

Inaugural – Dissertation  
zur Erlangung der Doktorwürde der  
Medizinischen Fakultät  
der

Bayerischen Julius-Maximilians-Universität zu Würzburg

vorgelegt von

Karola Edelmann  
aus Laupheim

Würzburg, Februar 2005

Referent: Prof. Dr. med. J. Helms

Korreferent: Priv.-Doz. Dr. med. J. Pahnke

Dekan: Prof. Dr. med. G. Ertl

Tag der mündlichen Prüfung:

Die Promovendin ist Ärztin

Meinem Mann und meinen Eltern  
in Dankbarkeit gewidmet



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Cochlea-Implantat (CI).....	3
1.1.1	Geschichtlicher Hintergrund.....	3
1.1.2	Technische Grundlagen der Cochlea-Implantate.....	4
1.2	Reifung und Deprivation der Hörbahn.....	7
1.3	Grundlagen des Richtungshörens.....	9
1.3.1	Interaurale Zeitdifferenzen.....	9
1.3.2	Interaurale Pegeldifferenzen.....	10
1.3.3	Duplex-Theorie.....	11
1.3.4	Funktion der Ohrmuschel.....	11
1.3.5	Monaurales Richtungshören.....	13
1.3.6	Räumliches Hören in geschlossenen Räumen.....	14
1.4	Methoden zur Prüfung des Richtungshörens.....	15
2	Problemstellung.....	18
3	Material und Methoden.....	19
3.1	Probanden.....	19
3.2	Durchgeführte Diagnostik und Hörprüfungen vor der Implantation.....	21
3.3	Rehabilitationsmaßnahmen.....	22
3.4	Studiendesign.....	23
3.5	Gründe für fehlende und unterschiedlich häufig durchgeführte Tests.....	23
3.6	Statistische Behandlung der Messergebnisse.....	24
3.7	Zeitliche Entwicklung des Richtungshörens der Kinder.....	26
3.8	Vergleich der Kinder.....	27
3.9	Repräsentative Daten und Kinder.....	28
4	Untersuchungen in der Alltagssituation.....	30
4.1	Versuchsaufbau und Umsetzung.....	30
4.1.1	Testbogen.....	30
4.1.2	Räume und Platzierung der Probanden.....	31
4.1.3	Stimulus-Parameter.....	32
4.1.4	Pilotphase.....	32

4.1.5	Versuchsdurchführung.....	33
4.2	Ergebnisse.....	34
4.2.1	Ergebnisse der Kontrollgruppe.....	34
4.2.2	Ergebnisse der einseitig implantierten Kinder.....	34
4.2.3	Ergebnisse der bilateral implantierten Kinder, nur ein CI aktiviert.....	36
4.2.4	Ergebnisse der bilateral implantierten Kinder, beide CIs aktiviert.....	38
5	Untersuchungen in der Laborsituation.....	41
5.1	Versuchsaufbau und Umsetzung.....	41
5.1.1	Messraum und Positionierung der Probanden.....	41
5.1.2	Stimulus-Parameter.....	42
5.1.3	Versuchsdurchführung.....	42
5.2	Ergebnisse.....	43
5.2.1	Ergebnisse der Kontrollgruppe.....	43
5.2.2	Ergebnisse der einseitig implantierten Kinder.....	44
5.2.3	Ergebnisse der bilateral implantierten Kinder, nur ein CI aktiviert.....	45
5.2.4	Ergebnisse der bilateral implantierten Kinder, beide CIs aktiviert.....	47
6	Diskussion.....	54
6.1	Entwicklung des Richtungshörens.....	56
6.2	Implantationsalter.....	59
6.3	Vergleich mit anderen Arbeiten.....	61
6.4	Vergleich der Ergebnisse in der Alltags- und Laborsituation.....	61
6.5	Kinder mit einem CI und einem Hörgerät.....	63
7	Zusammenfassung.....	65
8	Tabellarischer Anhang.....	67
9	Literaturverzeichnis.....	71

## 1 Einleitung

Eine hochgradige Hörstörung im Kindesalter wirkt sich ohne rechtzeitige Intervention nicht nur negativ auf die Hör- und Sprachentwicklung der betroffenen Kinder, sondern auch auf deren Persönlichkeitsentwicklung aus. Ein mangelhaftes Hörvermögen erschwert oder verhindert, dass die betroffenen Kinder sprechen lernen und Sprache erwerben können. Darüber hinaus ist ein ausreichendes Hörvermögen auch Voraussetzung für eine normale geistige und seelische Entwicklung eines Kindes (Beckmann 1973).

Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass man sich seit langem intensiv darum bemüht, Hörstörungen zu behandeln, und in Fällen, in denen dies unmöglich ist, wenigstens die Auswirkungen für die Kinder gering zu halten. Bereits vor ca. 200 Jahren versuchte man mit der Einführung der Taubstummschulen, taube Menschen in die Gesellschaft zu integrieren. Doch erst die Cochlea-Implantate (CI), die in den letzten zwei Jahrzehnten technisch entscheidend verbessert werden konnten, erlauben heute in vielen Fällen ein so ausgezeichnetes Hören, dass für ertaubte Kinder bei rechtzeitiger Diagnose und konsequenter Förderung gleichsam ein neues Zeitalter angebrochen ist.

Das CI ist die erste, gut funktionierende Prothese für ein peripheres Sinnesorgan. Große Bedeutung hat diese Hörhilfe für die Versorgung von Kleinkindern. Diese können mit Hilfe des CIs ähnlich wie normal hörende Kinder, auch wenn Einschränkungen im Vergleich mit einem gesunden Gehör bestehen bleiben, hören und damit verbunden auch Sprache entwickeln. Eine wachsende Zahl der mit einem CI versorgten Kinder besucht heute nach guter hör- und sprachpädagogischer Betreuung eine Regelschule (Mrowinski et al. 2002).

Bisher wurden Kinder und auch Erwachsene bei beidseitiger Taubheit oder gravierender Schwerhörigkeit standardmäßig unilateral implantiert. Viele Patienten sind auch mit dieser einseitigen Versorgung überaus zufrieden und kommen im Alltag damit gut zurecht.

Mit der unilateralen Versorgung verzichtet man auf die Möglichkeit, ein naturgegebenes, beidohriges Hören wiederherzustellen und die daraus resultierenden Vorteile zu nutzen. Im Besonderen wird durch die einseitige Versorgung räumliches Hören erschwert oder gar unmöglich. Uneingeschränkt ist räumliches Hören nämlich nur dann zu erreichen, wenn die Signale von beiden Ohren untereinander verrechnet werden

können. Im Alltag wird den Normalhörenden diese besondere Leistung unseres Gehörs nicht bewusst: Es erscheint selbstverständlich, Schallquellen im Raum lokalisieren zu können. Dabei kann man hörend, anders als sehend, auch Objekte erkennen und lokalisieren, die sich außerhalb unseres Gesichtskreises befinden. Auch dann, wenn wir schlafen, können beunruhigende Geräusche in unser Bewusstsein gelangen und uns wecken. Das Gehör vermag damit in effizienter Weise vor Gefahren zu warnen. Richtungshören vermittelt also nicht nur Orientierung, sondern dient darüber hinaus unserer Sicherheit. Die Fähigkeit, auf Geräusche und Laute instinktiv richtig zu reagieren, erleichterte nicht nur in der Urzeit das Überleben, auch in einer zivilisierten Welt schützt dieses angeborene Verhalten vor Unglücksfällen. Besonders Kinder mit einer gestörten räumlichen Wahrnehmung dürften im Straßenverkehr besonders gefährdet sein.

Ein weiterer Vorteil des beidohrigen Hörens, der über diese schützende Funktion hinausgeht, besteht darin, dass Sprache unter Störschalleinfluss leichter und besser verstanden werden kann. Ein leicht ersichtlicher Vorteil der bilateralen Versorgung besteht darin, dass bei einem seitlichen Sprecher diesem immer ein CI zugewandt ist. Außerdem kann man beim binauralen Hören, falls Signal- und Störquellen räumlich getrennt sind, diese als räumlich getrennte Objekte wahrnehmen, womit ebenfalls Sprache im Störschall leichter verstanden werden kann. Ein verbessertes Sprachverständnis ist für CI-Nutzer deshalb von besonderer Bedeutung, weil sie nach wie vor hörbehindert sind und die Unterschiede zu den Normalhörenden vor allem in lauter Umgebung deutlich werden.

Seit 1996 werden in Würzburg Patienten bilateral mit Cochlea-Implantaten versorgt. Weltweit konnten damit erstmalig die genannten Vorteile des binauralen Hörens auch von CI-Trägern genutzt werden. 1998 wurden Kinder zum ersten Mal bilateral implantiert. Auch für diese Gruppe eröffnete sich damit die Möglichkeit für ein verbessertes, natürliches Hören. Eingebettet in die daraus resultierenden Fragestellungen wird in der vorgelegten Arbeit das Richtungshören und dessen zeitliche Entwicklung von taub geborenen und bilateral implantierten Kindern untersucht.



## **1.1 Cochlea-Implantat (CI)**

### **1.1.1 Geschichtlicher Hintergrund**

Die heutige Generation der Cochlea-Implantate erwuchs aus intensiver Forschung und Entwicklung in den letzten drei Jahrzehnten. Jedoch reichen Versuche, das Hörsystem elektrisch zu reizen und dadurch Hören zu ermöglichen, viel weiter in die Vergangenheit zurück.

Um 1800, leitete Alessandro Volta in einem Selbstversuch über je eine Elektrode in beiden Ohren Gleichstrom durch seinen Kopf. Er beschrieb, zunächst beim Schließen des Stromkreises einen Schlag empfunden und während des Stromflusses ein brodelndes Geräusch wahrgenommen zu haben. Da er um seine Gesundheit fürchtete, hat er den Versuch nicht wiederholt (Volta 1800).

Erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts beschäftigten sich viele namhafte Otologen wie Politzer, Ritter und Gradenigo wieder mit den durch elektrische Ströme auslösbaren Wahrnehmungen (zit. nach Gibson 1987). Sie fanden, dass Wechselströme, welche über Elektroden im äußeren Gehörgang appliziert wurden, bei den Probanden Geräuschwahrnehmungen hervorriefen. Die Wahrnehmungen beruhten aber nicht, wie bei der Stimulation mit einem CI, auf einer direkten Stimulation des Hörnervs, sondern auf einem elektroakustischen Effekt. Die von der Elektrode ausgehenden elektrischen Felder erregten die anliegende Haut und erzeugten mechanische Schwingungen. Diese Schwingungen wurden als Schallwellen über Gehörgang, Trommelfell und die Mittelohrknöchelchen zum Innenohr übertragen. Normalhörende vermochten auf diese Weise Geräusche zu hören.

1934 publizierten Andreff, Gersuni und Volkhov über die „Elektrische Stimulation des Hörorgans“ (zit. nach Gibson 1987). Sie platzierten eine Elektrode nahe dem runden Fenster, und es gelang ihnen, bei den untersuchten Personen unterschiedliche Höreindrücke hervorzurufen. Später beschrieben Jones, Stevens und Lurie (1940) ähnliche Ergebnisse, indem sie in Salzlösung getränkte, baumwollummantelte Elektroden am runden Fenster platzierten und hierüber stimulierten. Die Probanden berichteten, sie hätten etwas Ähnliches wie das Zirpen einer Grille gehört.

Mit dem Bericht von Djourno und Eyries (1957) über eine direkte elektrische Reizung des Hörnervs begann eine neue Ära. Bei einem beidseits ertaubten Patienten wurde eine

Elektrode direkt am freigelegten Hörnerven platziert. Die neutrale Elektrode wurde in den Musculus temporalis gelegt. Beide Elektroden wurden von einer unter der Haut liegenden Empfängerspule gespeist, welche ihrerseits von einer Senderspule auf der Kopfhaut induktiv erregt wurde. Der Patient konnte damit Sprache als solche und Sprachrhythmen erkennen. Aber auch nach langem Training wurde keine Sprachdiskrimination erreicht. Einen Vorteil allerdings hatte das Hören mit dem CI. Das Implantat war in der Lage, den Sprachrhythmus zu übertragen und auf diese Weise den Patienten beim Lippenablesen zu unterstützen. Nach Zöllner und Keidel (1963) funktionierte das Implantat von Djournos Patienten noch nach fünf Jahren.

Dieser außergewöhnliche Bericht regte zu weiterer Forschung an. Zu den Pionieren dieser Frühzeit zählen Blair Simmons und William House. 1971 implantierte House bei einem Patienten erstmals eine Elektrode in die Scala tympani. 1976 berichtete er über insgesamt 16 Patienten, bei denen er teils mehrkanalige Elektrodenfächer, teils Einkanalelektroden in die Scala tympani eingeführt hatte. Energie und Signalübertragung erfolgten bei den meisten Patienten über einen in die Haut eingenähten Stecker. House blieb auch die frühe, breite klinische Anwendung des CIs an Hunderten von Patienten vorbehalten. Er setzte auf eine damals realisierbare Version eines einkanaligen Implantats und hatte damit Erfolg (Lehnhardt 1998). Heute werden in der Regel mehrkanalige Cochlea-Implantate verwendet.

Vor 1980 wurde Kindern aus Angst, eventuell noch vorhandene Hörreste durch ein intracochleäres Vorgehen zu zerstören, kein Cochlea-Implantat eingesetzt. Auch hier spielte das House Ear Institute den Vorreiter, indem es 1980 das Kinderprogramm startete. Bis 1983 wurden 63 Kinder implantiert. Insgesamt hatten bis 1989 224 Kinder im Alter zwischen zwei und 17 Jahren in weltweit 43 CI-Zentren ein CI erhalten (Diller 1997).

An der Universitätsklinik Würzburg werden Kinder seit 1992 mit Cochlea-Implantaten versorgt, seit 1998 auch bilateral.

### **1.1.2 Technische Grundlagen der Cochlea-Implantate**

Mit Hilfe des CIs versucht man, einen Defekt in der Signalverarbeitungskette, welcher durch den Ausfall der cochleären Haarzellen entstanden ist, mit Mitteln der Technik zu beheben. Das CI simuliert jene Teile der Signalverarbeitung des Ohres, die beim

Gesunden im Wesentlichen von der Basilarmembran und den Haarzellen wahrgenommen werden. In der intakten Cochlea depolarisiert ein von den Haarzellen ausgeschütteter Transmitter die Hörnervenfasern und löst dadurch ein so genanntes Aktionspotenzial aus. Dieses wird fortgeleitet und führt im auditorischen Cortex zu einer entsprechenden Hörwahrnehmung. Das CI erregt den Hörnerv ohne den Umweg über chemische Botenstoffe direkt elektrisch. Wie die natürlich ausgelösten Aktionspotenziale werden auch die elektrisch ausgelösten über die einzelnen Stufen der Hörbahn zum auditorischen Cortex weitergeleitet, um schließlich als Höreindruck ins Bewusstsein zu gelangen.

Auf dem Markt existieren mehrere Firmen mit jeweils spezifischen Cochlea-Implantaten, welche sich jedoch im Aufbau weitgehend gleichen. Am Anfang der Signalverarbeitungskette steht wie bei den Hörgeräten ein Mikrofon (Abb. 1). Dieses nimmt den Schall auf und wandelt ihn in elektrische Signale um. In den modernen Systemen erfolgt die weitere Verarbeitung digital in einem so genannten Sprachprozessor. Dieser verarbeitet die Signale und bereitet sie so auf, dass der Hörnerv auf eine möglichst naturnahe und adäquate Weise gereizt wird. Heutige Systeme übertragen die vom Sprachprozessor gelieferten Informationen kontaktlos durch die Haut an eine Empfangsspule. Dazu wird eine Sendespule äußerlich hinter dem Ohr getragen. Sie bildet das Gegenstück zur Empfangsspule. Von Ausnahmen abgesehen wird sie durch Magnetkraft gehalten. Die Empfangsspule wird zusammen mit der Implantatelektronik im Knochen des Mastoids verankert. Der aus dem Empfänger austretende Elektrodenträger wird normalerweise durch Mastoid und Mittelohr verlaufend über eine Cochleostomie in die Scala tympani der Cochlea eingeführt. Die über die Elektroden applizierten elektrischen Ströme reizen schließlich die verbliebenen Fasern des Hörnervs.

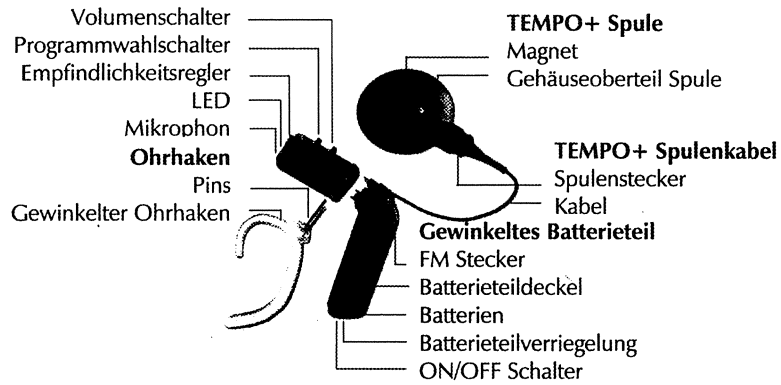


Abb. 1: Aufbau des HdO-Sprachprozessors TEMPO+ mit gewinkeltem Batterieteil, Spulenkabel und Spule (MED-EL 2004)

Bei einem nicht geschädigten Innenohr reizen 15.000 bis 20.000 Sinneszellen zeit- und frequenzspezifisch den Hörnerv in der Cochlea (Lindenberger et al. 2001). Sie kodieren die Information im einfallenden Schallreiz auf unterschiedliche Weise. Zum einen führt die Basilarmembran eine Frequenz-Ortstransformation durch, wodurch bestimmte Einzelfasern lagegemäß bestimmten Frequenzen zugeordnet werden. Zum anderen wird die Frequenzinformation im Schallsignal auch durch die zeitliche Abfolge der Aktionspotenziale verschlüsselt (Klinke 1996). CIs versuchen, die Ortskodierung in der Cochlea dadurch nachzubilden, dass sie die Nervenfasern an verschiedenen Orten der Cochlea über mehrere Elektroden reizen. Deren örtliche Verteilung und Zuordnung zu bestimmten Frequenzbändern sollte möglichst den Verhältnissen in der intakten Cochlea entsprechen. Die verschiedenen CI-Systeme verwenden dazu zwischen acht und 24 Elektroden.

Damit das mit dem CI angestrebte Ziel erreicht werden kann, wohlklingende Sprache und Musik zu übertragen, muss auch die Zeitstruktur der Signale möglichst exakt übertragen werden. Wie gut dies gelingt, hängt von der benutzten Stimulationsrate ab. Die maximal möglichen Stimulationsraten liegen beispielsweise beim Spectra 22 bei 3000 Pulsen/s und beim Combi 40+ bei 18180 Pulsen/s (Diller 1997).

## 1.2 Reifung und Deprivation der Hörbahn

Alle Maßnahmen, die Hör- und Sprachfähigkeit tauber oder hörbehinderter Kinder zu verbessern, müssen sich an den Möglichkeiten menschlicher Hörentwicklung orientieren. Daher gehört unser Wissen darüber, wie sich die Hörfähigkeit entwickelt und wie sich diese Entwicklung beeinflussen lässt, zu den Grundlagen einer Entscheidung für oder gegen die Implantation einer Innenohrprothese bei Kindern.

Obwohl gesunde Kinder, wenn sie zur Welt kommen, bereits hören, so ist deren Hörsystem keineswegs ausgereift. Die weitere Entwicklung in den ersten Lebensjahren ist unabdingbar für das Erlernen der Sprache und zeigt sich anatomisch darin, dass sich Markscheiden um Axone bilden, und parallel dazu in den auditorischen Kerngebieten zwischen den einzelnen Neuronen synaptische Verbindungen entstehen oder bereits bestehende durch den akustischen Reiz stabilisiert werden (Klinke et al. 2001, Klinke 1997, Schlote 1990). Bezüglich der räumlichen Orientierung schreiten die Prozesse von peripher nach zentral fort (Strutze 1994). Die Zusammenschaltung der Nervenfortsätze ist zunächst nicht fest, sondern sehr variabel und dynamisch. Erst mit zunehmendem Alter verfestigen sich die Verbindungen. Bisher war es nicht möglich, den Zeitpunkt, an dem die Verbindungen weitgehend fest sind, zu bestimmen. Man weiß jedoch, dass selbst bei einem Sechsjährigen die Hörzentren noch nicht vollständig ausgereift sind.

Der Reifungsprozess findet jedoch nur dann statt, wenn die Hörzentren ausreichend auditorisch stimuliert werden. Unterbleibt diese Stimulation oder fällt sie zu gering aus, so kommt es zu einer Fehlentwicklung, weil die Neuronen nicht, wie dies normalerweise der Fall ist, durch synaptische Verbindungen vernetzt werden. Solchermaßen entstandene akustische Deprivationen sind während der ersten Lebensjahre noch teilweise reversibel. Voraussetzung hierfür ist, dass die entsprechenden Hirnareale, obwohl verzögert, in ausreichendem Maße auditorisch stimuliert werden. Dies kann sowohl durch eine natürliche akustische Reizung, als auch durch eine künstliche, elektrische Stimulation des Hörnerven geschehen. Die Plastizität des frühkindlichen Gehirns, welche sich in der Fähigkeit zeigt, auf funktionelle Veränderungen zu reagieren und sich den durch die Art des Reizes aufgezwungenen Erregungsmustern anzupassen, reicht aus, auch bei einer etwas verspätet angebotenen, künstlichen Informationsvermittlung durch ein Cochlea-Implantat ein für den Spracherwerb ausreichendes Hörvermögen zu erreichen (Schlote 1990).

Generell kann gesagt werden, dass bei Vorliegen einer prä- oder perilingualen Taubheit mit zunehmendem Lebensalter die Ergebnisse nach einer Cochlea-Implantat-Versorgung ungünstiger werden. Nach Lenarz (1998) besitzt ein Kind bei kongenitaler Taubheit, das bis zum Ende des dritten Lebensjahres implantiert wurde, bessere Chancen für einen nahezu normalen Spracherwerb im Vergleich zu Kindern, die zum Zeitpunkt des Schuleintritts implantiert wurden. Hier ist der Spracherwerb bereits unvollständig. Jenseits dieses Zeitpunktes wird eine normale Sprachentwicklung nur noch in Ausnahmefällen erreicht. Die angegebenen Zeitpunkte sind im Einzelfall zu modifizieren, da Faktoren, wie etwa vorhandene Hörreste, adäquate Hörgeräteversorgung, lautsprachlich orientierte Früherziehung und hörgerichtete Spracherziehung ebenfalls eine Rolle spielen.

Anders zu sehen sind jene Fälle, in denen das Hörsystem als solches in früher Kindheit gebahnt, das Sprachsystem in der zwischenmenschlichen Kommunikation etabliert wurde und man erst danach, noch als Kind oder auch als Erwachsener, ertaubt (Lenarz 1998).

Manrique et al. (1999) verglichen die Leistung von 98 prälingual ertaubten Kindern und Jugendlichen, die ein CI bekommen hatten, mit einer Kontrollgruppe von 58 postlingual ertaubten. Früh, vor dem sechsten Lebensjahr implantierte, prälingual ertaubte Kinder erzielten ein vollständiges, offenes Sprachverständnis mit sogar besseren Leistungen als die postlingual ertaubten Kinder. Daraus schlossen sie, dass der Verlust der Plastizität des frühkindlichen Gehirns auch durch den Einsatz eines Cochlea-Implantats nicht ausgeglichen werden kann, wenn die dadurch bewirkte Stimulation erst spät beginnt.

Den Einfluss des Implantationsalters auf die Hör- und Sprachleistung untersuchten auch Meyer et al. (1995) bei 138 kongenital ertaubten Kindern. Sie teilten die Kinder nach ihrem Implantationsalter in drei Gruppen ein: 2 bis 3 Jahre, 4 bis 6 Jahre und 7 bis 13 Jahre. Zum Testzeitpunkt trugen die Kinder ihr CI im Durchschnitt 15 Monate. In allen Tests schnitten die jüngsten Kinder verglichen mit den älteren im Durchschnitt besser oder doch zumindest gleich gut ab. Die Arbeitsgruppe schloss daraus, dass taub geborene Kinder so früh wie möglich implantiert werden sollten.

### **1.3 Grundlagen des Richtungshörens**

Die physiologischen und psychoakustischen Mechanismen des Richtungshörens sind komplex, so dass vereinfachend im Folgenden nur einige wesentliche Punkte herausgegriffen werden. Für Schallereignisse in der Horizontalebene extrahiert das Gehör die richtungstragenden Informationen im Wesentlichen aus den Unterschieden der beiden Ohrsignale. Die beiden wichtigsten Schlüsselinformationen für das Richtungshören sind die interaurale Zeitdifferenz und die interaurale Pegeldifferenz zwischen den akustischen Signalen an beiden Ohren. Die Unterschiede zwischen den Signalen an beiden Ohren wertet das Hörsystem aus und lässt daraus eine Wahrnehmung über den Ort der Schallquelle entstehen.

Dieser Mechanismus greift nicht, wenn die Schallquellen in der Medianebene angeordnet sind. In diesem Fall erreichen beide Ohren die gleichen Signale, und es entstehen keine interauralen Unterschiede zwischen den Ohrsignalen. Aber der Kopf, Rumpf und vor allem die Ohrmuscheln erzeugen spektrale Verzerrungen, welche sich ebenfalls mit der Einfallrichtung verändern. Sie können durch das Gehör ausgewertet werden und führen gleichfalls zu einer Richtungs- und Ortsempfindung.

#### **1.3.1 Interaurale Zeitdifferenzen**

Eine von rechts einfallende Schallwelle trifft zuerst auf das der Schallquelle zugewandte rechte Ohr und erreicht erst kurze Zeit später das weiter entfernt liegende linke Ohr. Die beiden Ohrsignale unterscheiden sich also durch eine interaurale Zeitdifferenz (englisch: ITD: interaural time difference). Das Ausmaß der Zeitdifferenz verändert sich mit dem Einfallswinkel. Für Schallquellen in der Medianebene legt der Schall einen gleich langen Weg zu beiden Ohren zurück, und der Laufzeitunterschied verschwindet. Andererseits wird die interaurale Zeitdifferenz maximal, wenn der Schall von rechts oder links, also unter einem Azimut von  $90^\circ$  oder  $270^\circ$  einfällt (Humes 1994). Die beiden Schallwege sind schematisch in Abb. 2 dargestellt.

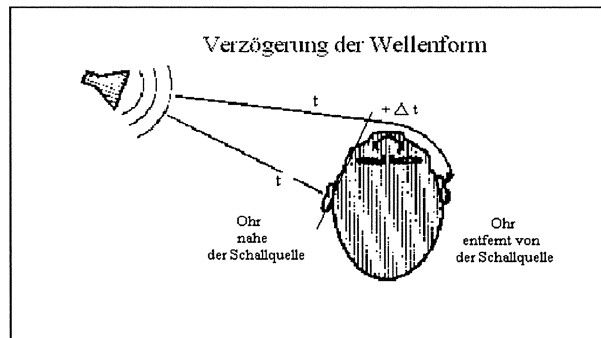


Abb. 2: Stark schematisierte Darstellung für das Zustandekommen interauraler Zeitdifferenzen (Häusler et al. 1983)

### 1.3.2 Interaurale Pegeldifferenzen

Simultan zu der interauralen Zeitdifferenz entsteht bei seitlichem Schalleinfall zwischen den beiden Ohrsignalen auch eine interaurale Pegeldifferenz (englisch: ILD: interaural level difference). Diese entsteht, weil Kopf und Körper für die Schallausbreitung ein Hindernis darstellen. Auf der Seite, welche dem Schall zugewandt ist, wird der Schall reflektiert, und der Schalldruck erhöht sich. Das abgewandte Ohr wird vom Schall durch Beugung erreicht, es liegt im Schallschatten, und der Schalldruck ist reduziert. Zwischen beiden Ohren entsteht eine interaurale Pegeldifferenz. Die Größe dieser Differenz variiert mit der Wellenlänge des Schalls. Wellen, deren Wellenlänge in Bezug zum Durchmesser des Kopfes groß sind, umlaufen den Kopf mit nur geringer Abschwächung. Dagegen werden Wellen kurzer Wellenlänge merklich abgeschwächt (Abb. 3). Für das Richtungshören wird die Größe des durch den Kopf hervorgerufenen Schallschattens ab Frequenzen über 500 Hz relevant (Shaw 1974). Bei dieser Frequenz beträgt die maximale interaurale Pegeldifferenz etwa 4 dB. Bei 6000 Hz beträgt die Abschattung bei seitlichem Einfall 20 dB. Das heißt, die Lautstärke eines 6000 Hz Tones wird am nahe gelegenen Ohr 20 dB lauter gemessen als am entfernten. So wie die interaurale Zeitdifferenz verschwindet auch die interaurale Pegeldifferenz, wenn sich die Schallquelle in der Medianebene befindet.



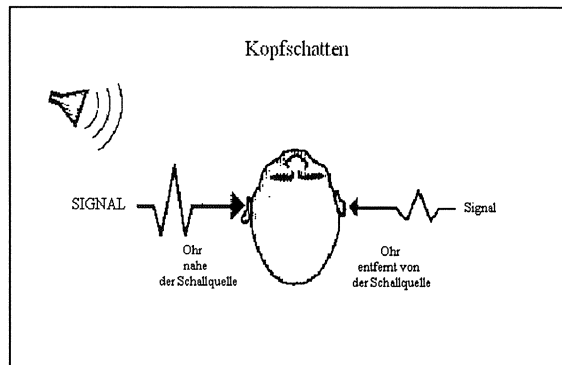


Abb. 3: Stark schematisierte Darstellung für das Zustandekommen interauraler Pegeldifferenz (Häusler et al. 1983)

### 1.3.3 Duplex-Theorie

1907 zeigte Strutt, der spätere Lord Rayleigh, für eine starre Kugel, dass bei tiefen Frequenzen nur die Zeitdifferenzen und bei hohen nur die Pegeldifferenzen für das Richtungshören Bedeutung haben können (Strutt 1907). Er begründete damit die so genannte Duplex-Theorie. Es hat sich im Laufe der Zeit gezeigt, dass für unser Gehör tatsächlich die von der Duplex-Theorie beschriebenen physikalischen Gegebenheiten die wichtigsten Informationsquellen für das Richtungshören in der Horizontalebene darstellen.

Nicht erklärbar ist auf Grund der Duplex-Theorie das Richtungshören für Schalleignisse, die sich in der Medianebene befinden. Alle Punkte in der Medianebene sind im Idealfall von beiden Ohren gleich weit entfernt, so dass weder Zeit- noch Pegeldifferenzen auftreten.

### 1.3.4 Funktion der Ohrmuschel

Frühe Experimente zur Funktion der Ohrmuschel und ihrer Bedeutung für das Richtungshören wurden bereits von Bloch (1893) durchgeführt. Es folgten Untersuchungen zum gleichen Thema von Perekalin (1930), Lehnhardt (1960), Roeffler und Butler (1968). Indem die Ohrmuschel die ankommenden Schallsignale in Abhängigkeit

von der Schallquellenrichtung und -entfernung unterschiedlich linear verzerrt, nimmt sie eine Umcodierung räumlicher Schallfeldmerkmale in zeitliche vor (Blauert 1974). Die aus verschiedenen Raumrichtungen auf die Ohrmuscheln, den Kopf und die Schultern des Zuhörers auftreffenden Schallwellen werden gestreut und zurückgeworfen. Die einzelnen Anteile erreichen das Trommelfell verzögert. Durch die Interferenz aller Teilwellen unterscheiden sich die am Trommelfell gemessenen Spektralanteile zum Teil erheblich von denen der Schallquelle (Blauert 1983, Paulus 2003). Für Schallquellen in der Medianebene, bei denen interaurale Ohrsignalunterschiede als auswertbare Merkmale nicht zur Verfügung stehen, ermöglichen diese Verzerrungen die Lokalisation der Schallquelle (Abb. 4).

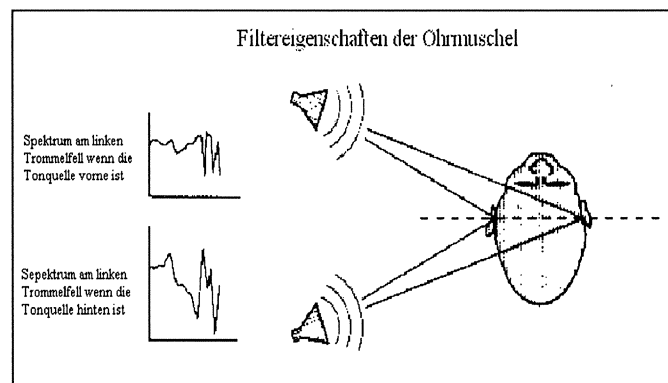


Abb. 4: Die Ohrmuschelfunktion (Häusler et al. 1983)

Batteau (1967) konnte nachweisen, dass der einfallende Schall durch die Ohrmuschel in der Weise spektral verzerrt wird, dass jede Richtung eine ihr eigene Charakteristik besitzt. Er versuchte, die Ohrmuschel mit Hilfe der akustisch wirksamen physikalischen Phänomene, nämlich der Schallreflexion, Dämpfung, Streuung, Beugung, Interferenz und Resonanz mathematisch zu erklären und zu berechnen. Dies gelang jedoch nach Blauert (1974) wegen der unregelmäßigen Oberflächenstruktur der Ohrmuschel nur unvollkommen.

### 1.3.5 Monaurales Richtungshören

Es ist nachgewiesen worden, dass das zentral-auditive Erkennungssystem in der Lage ist, die spektralen Modifikationen auch monaural, d. h. nur mit Hilfe eines einzelnen Ohres, für das räumliche Hören zu nutzen (Wightman et al. 1997). Dies erfordert jedoch theoretisch das Vorhandensein einer zentral-auditiven Mustererkennung bezüglich eigener Übertragungsfunktionen. Es wird vermutet, dass die monauralen Außenohr-Übertragungsfunktionen aller Raumrichtungen für ein charakteristisches Schallereignis (z. B. die Stimme einer bekannten Person oder das Motorengeräusch eines Autos) in gewisser Weise als Muster im ZNS (Zentralnervensystem) gespeichert sind. Das ZNS versucht, für einen einfallenden Schall dasjenige Muster zu finden, das dem Stimulus am besten entspricht (Wightman et al. 1997). In diesem Zusammenhang muss man allerdings beachten, dass bei einem nur monaural wahrgenommenen Frequenzspektrum, anders als beim interauralen Vergleich, zusätzlich auch der jeweilige Frequenzverlauf der Schallquelle selbst im Voraus bekannt sein muss (Blauert 1983).

Menschen, die nur auf einem Ohr hören, können also durchaus ein gewisses Richtungshören entwickeln. Dies zeigt die Studie von Slattery et al. (1993). Die Autoren verglichen das Richtungshören von fünf Probanden, die auf einem Ohr taub geboren worden waren, aber auf dem anderen normal hörten, mit sieben normal hörenden Kontrollpersonen, die sich während der Tests ein Ohr verschlossen hatten. Alle Normalhörenden und zwei der monaural tauben Probanden hatten Schwierigkeiten, die Schallquelle seitenrichtig zuzuordnen. Sie hörten die Stimuli auf der Seite mit dem nicht verschlossenen, bzw. hörenden Ohr. Dieses Ergebnis erwartet man, falls die Probanden ihr Urteil auf Intensitätsunterschiede (ILDs) stützen. Drei der monaural Tauben hingegen konnten diesen Seitenfehler vermeiden, wobei ein Proband Azimut und Elevation der Schallquellen ähnlich exakt angab wie die binaural getesteten Normalhörenden.

Patienten mit nur einem Cochlea-Implantat sind monaurale Hörer. Zwar verändern Ohrmuschel, Kopf und Oberkörper den einfallenden Schall in gleicher Weise wie bei den Normalhörenden, aber üblicherweise sind die Mikrofone bei den CI-Trägern nicht so platziert, dass sie die gleichen, den Normalhörenden zur Verfügung stehenden Signale aufnehmen würden. Die Gruppe um Luntz ging der Frage nach, ob sich die Fähigkeit zum Richtungshören auch bei einseitig implantierten Patienten durch Training

verbessern ließe (Luntz et al. 2002). Ihr Versuchsaufbau bestand aus fünf Lautsprechern, die sie halbkreisförmig vor den Probanden angeordnet hatten. Pro Lautsprecher wurden zehn Stimuli angeboten. Untersucht wurden vier monaural implantierte Patienten: drei postlingual ertaubte Erwachsene und ein prälingual ertaubtes Kind von sieben Jahren. Die Erwachsenen zeigten nach durchschnittlich 6,5 Trainingseinheiten eine signifikante Verbesserung des Richtungshörens. Die Zahl der richtigen Antworten stieg, aufgeschlüsselt nach Proband, von 28 %, 32 % und 38 % auf 72 %, 82 % und 90 % im Abschlusstest. Das Kind dagegen verbesserte sich durch das Training nur unwesentlich. Luntz et al. sehen eine mögliche Erklärung für das Verhalten des Kindes in einer Deprivation bestimmter, für das Richtungshören wichtiger ZNS-Regionen. Untersuchungen, die sich auf einen größeren Zeitraum und eine größere Anzahl stützen, liegen nicht vor.

#### **1.3.6 Räumliches Hören in geschlossenen Räumen**

Im Allgemeinen werden Schallwellen, wenn sie auf einen Gegenstand auftreffen, an dessen Oberfläche reflektiert, wobei ein Teil der Energie in den Raum zurückgestrahlt wird. Obwohl die freie und ungestörte Ausbreitung einer Schallwelle ein beliebtes theoretisches Modell ist, wird man diesem Phänomen im Alltag nur sehr selten begegnen. Besonders in Räumen wird der Schall an den Wänden nicht nur einmal, sondern immer wieder reflektiert, so dass multiple Signale aus verschiedenen Richtungen das Ohr des Hörers erreichen. Trotzdem können auch in Räumen Schallquellen ohne Schwierigkeiten lokalisiert werden. Möglich wird dies durch die gesonderte Wahrnehmung des Primärschalls und die Unterdrückung der reflektierten Anteile. Dieses Phänomen wurde mit verschiedenen Namen belegt: Präzedenz-Effekt (englisch: precedence effect), Gesetz der ersten Wellenfront oder Haas-Effekt. Der Präzedenz-Effekt trägt wesentlich dazu bei, wie die Akustik eines Raumes erlebt wird. Vorteilhafterweise wird der Präzedenz-Effekt im Labor untersucht, weil sich dadurch die Bedingungen besser kontrollieren lassen. Die Testsignale werden entweder über Kopfhörer oder über zwei Lautsprecher in der bekannten Stereoanordnung dargeboten. Verzögert man eines der Signale der beiden Lautsprecher bis zu einer Verzögerungszeit von 1 ms, so verändert das Hörereignis seine Richtung. Es wandert auf denjenigen Lautsprecher zu, der das Signal früher abstrahlt. Weisen die abgestrahlten Signale am

Ort des Hörers eine Zeitdifferenz größer als etwa 1 ms auf, so ist für den Hörereignisort allein diejenige Schallquelle bestimmend, welche die Signale früher abstrahlt. In diesem Zeitbereich wird der Präzedenz-Effekt wirksam. Für die Lokalisation wichtig ist der Primärschall. Das sind diejenigen Signalanteile, die jeweils zuerst am Trommelfell eintreffen. Die später eintreffenden, reflektierten Wellen werden bei der Auswertung unterdrückt. Überschreitet die Zeitdifferenz der an den Ohren eintreffenden Signale eine obere Schwelle, so treten zwei Hörereignisse nacheinander auf. Das zweite Hörereignis wird als Echo des ersten empfunden und auch so bezeichnet (Blauert 1974). Die Schwelle, ab der Echos wahrgenommen werden, hängt vom Primärschallpegel und der Verzögerungszeit der Signale, von der Art der dargebotenen Signale und der Schalleinfallrichtung ab. Sie variiert daher je nach verwendetem Test von Autor zu Autor zwischen 2 und 100 ms (Klemm 1920, Rosenzweig und Rosenblith 1950, Cherry und Taylor 1954, Schubert und Wernick 1969).

#### **1.4 Methoden zur Prüfung des Richtungshörens**

Zur Prüfung des Richtungshörens gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Methoden: Untersuchungen, bei denen die Signale über Kopfhörer angeboten werden, und solche mit Darbietung der Signale über Lautsprecher. Vor allem bei Lautsprecherdarbietung variieren Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung von Autor zu Autor stark, so dass sich dementsprechend auch die Ergebnisse unterscheiden. Einige typische Versuchsanordnungen zur Prüfung des Richtungshörens werden nachfolgend aufgeführt:

Platte et al. (1978) führten Richtungshörtests bei Normalhörenden durch. Sie benutzten einen horizontal aufgehängten Stahlring mit 3,5 m Durchmesser, an dem zwölf Lautsprecher im Winkelabstand von je 30° befestigt waren. Die gleiche Anzahl von zwölf Lautsprechern im Abstand von 30° benutzten auch Pröschel und Döring (1990). Dermody (1975) untersuchte das Richtungshören schwerhöriger Erwachsener, die binaural mit Hörgeräten versorgt worden waren. Er testete mit zwölf halbkreisförmig in der Horizontalebene angeordneten Lautsprechern. Gantz et al. (2002) studierten das Richtungshören von binaural versorgten CI-Patienten. Sie verwendeten nur zwei Lautsprecher, die unter einem Winkel von jeweils 45° rechts und links vor dem zu untersuchenden Probanden positioniert waren. Diese vier Beispiele zeigen, dass die Ergebnisse solcher Studien, obwohl alle in reflexionsarmen Räumen durchgeführt

wurden, nur schwer miteinander verglichen werden können. Fitzgerald (2002), selbst bilateraler CI-Träger, hat vier verschiedene Zentren aufgesucht und nach der jeweiligen dort üblichen Methode Richtungshörttests durchgeführt. Proband war er in allen Untersuchungen selbst. Die Ergebnisse unterschieden sich je nach angewandter Methode. Fitzgerald plädiert deshalb dafür, die Testmethoden zu standardisieren, um in Zukunft die Ergebnisse unterschiedlicher Zentren besser vergleichen zu können.

Untersuchungen mit Hilfe von Kopfhörern erlauben auf einfache Weise, die interauralen Pegel- und Zeitdifferenzen unabhängig voneinander zu variieren. Anders als bei Schalldarbietungen in reflexionsarmen Räumen wird das Hörereignis aber im Kopf lokalisiert. Bei gleichzeitiger und gleich starker akustischer Erregung auf beiden Seiten wird das Hörereignis in der Mitte des Kopfes wahrgenommen. Bei Signalen mit interauralen Zeit- oder Intensitätsdifferenzen wandert der wahrgenommene Ort zu derjenigen Kopfseite, auf der das Signal früher oder lauter angeboten wird. Als Nachteil der Methode wird vermerkt, dass die Untersuchungen nicht unter den natürlichen Bedingungen des Richtungshörens stattfinden (Baschek 1978).

In Studien von van Hoesel et al. (1997), Wilson (2002), Laback et al. (2002) und Schön et al. (2002) wurde das Wahrnehmungsvermögen für ITDs und/oder ILDs von binaural implantierten Patienten mit Hilfe von Kopfhörern oder durch direkte Elektrostimulation untersucht. In allen Studien wurde eine mehr oder weniger ausgeprägte Sensibilität für die richtungsbestimmenden Unterschiede festgestellt.

Um Richtungshören bei Kindern zu testen, werden die gleichen Methoden, jedoch in vereinfachter Form angewendet. Abhängig von Alter und Grad der Schwerhörigkeit muss eine geeignete Versuchsanordnung erstellt werden. Litovsky (1997) beispielsweise untersuchte den minimalen Hörwinkel (englisch: MAA: minimum audible angle) in der Horizontalebene bei normal hörenden Kleinkindern im Alter von 18 Monaten und bei Fünfjährigen. Sie benutzte drei auf einem Bogen angeordnete verschiebbare Lautsprecher: Einen in der Medianebene und jeweils einen rechts und links davon. Die Lautsprecher waren für die Kinder nicht sichtbar: Sie wurden durch einen dunklen Vorhang verdeckt. Pro Versuchsdurchgang wurden den Kindern 15 breitbandige Stimuli von 2 s Länge vorgespielt. Die Kinder sollten mit der Hand anzeigen, wenn der

Ton aus der Mitte nach links oder rechts auswanderte. In der gleichen Anordnung wurden auch 18 Monate alte Kleinkinder untersucht. Sie wurden mit einer Videokamera gefilmt, und speziell trainierte Beobachter werteten ihre Kopfbewegungen aus.

Senn et al. (2002) versuchten ebenfalls, den minimalen Hörwinkel in der Horizontalebene bei bilateral implantierten CI-Patienten zu messen. Untersucht wurden zwei Erwachsene an acht symmetrisch liegenden Referenzpunkten (Azimut: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°), zwei Jugendliche an vier Referenzpunkten (Azimut: 0°, 90°, 180°, 270°) und sieben Kinder an einem einzigen Referenzpunkt, nämlich bei 0°. Der Test eignete sich gut für die Erwachsenen und Jugendlichen: Sie zeigten in der Horizontalebene für Signale von vorne oder hinten minimale Hörwinkel in der Größe von 4° bis 8°. Für seitlich einfallende Stimuli wuchsen die minimalen Hörwinkel auf Werte zwischen 20° bis 45°. Den Kindern fiel diese Untersuchung trotz vereinfachter Testbedingungen sehr schwer. Von den sieben Kindern, die im Alter vergleichbar mit den Kindern unserer Studie waren, konnte nur bei drei Kindern der MAA gemessen werden. Bei ihnen lagen die Werte zwischen 20° und 40°.

## 2 Problemstellung

Seit 1996 werden in Würzburg Erwachsene bilateral implantiert. Untersuchungen an den ersten elf bilateral implantierten Erwachsenen zum Sprachverständnis mit und ohne Störlärm zeigten eine Verbesserung nach bilateraler Cochlea-Implantation (Müller et al. 1998). Auf Grund dieser positiven Ergebnisse wurden 1998 erstmals auch taub geborene Kinder bilateral mit CIs versorgt.

In dieser Arbeit wird die Entwicklung des Richtungshörens bei implantierten Kindern untersucht. In die Studie wurden sowohl normal hörende Kinder, als auch solche mit einseitiger und zweiseitiger CI-Versorgung eingeschlossen. Die Untersuchungen fanden an drei verschiedenen Einrichtungen statt. Die Normalhörenden wurden in ihrem angestammten Kindergarten untersucht, die CI-Kinder am CIC Süd in Würzburg (alltagsorientiert) und an der Würzburger HNO-Klinik (Laboruntersuchung). Im Einzelnen sollten folgende Fragen untersucht werden:

- a) Können prälingual ertaubte Kinder nach bilateraler CI-Versorgung richtungshören?
- b) Zeigt sich, falls die Kinder richtungshören können, diese Fähigkeit sofort, oder entwickelt sie sich erst allmählich im Laufe der Zeit?
- c) Wie konsistent und präzise können unterschiedlichen Schallquellenrichtungen angegeben werden?
- d) Zeigt sich das Richtungshören in der alltagsorientierten Situation in vergleichbarer Weise wie in einer Laborsituation?

Daraus leiten sich die folgenden Arbeitshypothesen ab:

- a) Bilateral versorgte Kinder können richtungshören, monaural versorgte Kinder dagegen nicht oder jedenfalls viel schlechter.
- b) Im Vergleich der Ergebnisse von Laborsituation und alltagsorientierter Situation fallen die im Labor erzielten Ergebnisse besser aus, da weniger Störeinflüsse vorhanden sind.
- c) Für den Fall, dass bilateral versorgte Kinder die Fähigkeit zum Richtungshören erwerben sollten, wird angenommen, dass auch das Richtungshören einem Lernprozess unterliegt, die Kinder also mit zunehmender Tragezeit der Implantate präziser urteilen.



### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Probanden

An der Studie nahmen 46 Kinder, deren Eltern der Untersuchung zugestimmt hatten, teil. Die Kinder hatten unterschiedliche individuelle Voraussetzungen. Entsprechend der jeweiligen Vorgeschichte wurden drei Gruppen gebildet, eine Kontrollgruppe und zwei Experimentalgruppen.

Die Kontrollgruppe bestand aus Normalhörenden: Sie umfasste 21 Kinder, alle waren mit Deutsch als Muttersprache aufgewachsen. Anamnestisch bestand bei keinem der Kinder der Verdacht auf eine Hörbehinderung. Das Durchschnittsalter der Kinder betrug 3;10 (Jahre; Monate) Jahre. Das jüngste Kind war zum Zeitpunkt der Untersuchung 2;7 Jahre, das älteste Kind 8;11 Jahre alt. Mit 13 Mädchen und acht Jungen war die Zahl der Mädchen fast doppelt so groß wie die der Jungen. Zum Untersuchungszeitpunkt waren alle Kinder gesund.

Die Experimentalgruppen setzten sich aus Kindern, die mit Cochlea-Implantaten versorgt worden waren, zusammen. Die eine Gruppe bestand aus zehn unilateral implantierten Kindern, die andere aus 15 bilateral implantierten Kindern. Bei 22 der 25 Kinder bestand seit frühester Kindheit, bzw. seit Geburt eine hochgradige Schwerhörigkeit beidseits. Nur die drei Kinder K7, K20 und K22 wurden bei Geburt als normal hörend eingestuft, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich ihr Hörsystem zunächst normal entwickelte. Bei Kind K7 erstreckte sich die Spanne hierfür über 3;4 Jahre, bei Kind K22 über ein Jahr. Bei Kind K20 verschlechterte sich beginnend mit 2;6 Jahren die Sprach- und Hörfähigkeit und endete in einer an Taubheit grenzenden Schwerhörigkeit, deren Ursache nicht gefunden wurde.

Alle Kinder trugen vor ihrer Implantation Hörgeräte. Der maximal erreichte Wortschatz beschränkte sich auf einen kleinen Kinderwortschatz, meist Einwortsätze. Nur drei Kinder benutzten Mehrwortverbindungen (Tab. 2 und 4 im Anhang). Die Kinder kommunizierten, bevor sie ein CI bekamen, hauptsächlich durch Gebärdensprache, Körpersprache und Mundablesen.

Eine Ursache für die Schwerhörigkeit konnte nur bei fünf Kindern gefunden werden. Kind K7 erkrankte mit 3;4 Jahren und Kind K25 mit 5 Monaten an einer Meningitis. Bei Kind K22 führte eine hoch fieberhafte Infektion im ersten Lebensjahr zu einer

hochgradigen Schwerhörigkeit beidseits. Für die zwei Kinder K13 und K14 kann eine Virusinfektion ihrer Mütter während der Schwangerschaft als Ursache betrachtet werden.

20 der 25 Probanden litten neben ihrer Schwerhörigkeit noch an verschiedenen Teilleistungsstörungen, die oft in ursächlichem Zusammenhang mit der stark verzögerten Sprachentwicklung gebracht wurden: Dysgrammatismus, multiple Dyslalie, Dyspraxie, Dysrhythmie, Gedächtnisschwäche, Aufmerksamkeits- und Handlungssteuerungsstörungen sowie eine Anpassungsproblematik (Einzelheiten in Tab. 2 und 4 im Anhang). Die Angaben zu den Teilleistungsstörungen und der Sprachentwicklung vor der Cochlea-Implantation wurden den Zwischen- und Abschlussberichten des Rehabilitationszentrums CIC Süd entnommen.

Das Durchschnittsalter der unilateral versorgten Kinder betrug zur Zeit der Implantation 5;1 Jahre. Das Jüngste war 1;9 Jahre und das Älteste 7;10 Jahre alt (Tab. 3 im Anhang). Aus dieser Gruppe benutzten zwei Kinder ein Hörgerät am nicht implantierten Ohr. Kind K21 trug zur Zeit der Untersuchungen das Hörgerät Super Front PP-C-4 und Kind K24 ein PHONAK PZ A4.

Von den bilateral implantierten Kindern war das jüngste bei der Implantation des ersten CIs 2;0 und das älteste 6;11 Jahre alt. Das Durchschnittsalter lag bei 3;9 Jahren. Bei der Zweitimplantation war das jüngste Kind 3;8 Jahre alt, das älteste 8;0 Jahre, das durchschnittliche Alter betrug 5;8 Jahre (Tab. 1 im Anhang).

Das Kind K22 trug zum Zeitpunkt der ersten Messungen ein CI und wurde in der Zeit zwischen erster und zweiter Untersuchung bilateral implantiert. Danach wurde es der Gruppe der bilateral Implantierten zugerechnet. Dementsprechend wird es zusammen mit den anderen, bilateral implantierten Kindern in den beiden Tabellen 1 und 2 aufgeführt.

Alle Kinder trugen entweder das MED-EL COMBI-40 oder das MED-EL COMBI 40+ Implantat (MED-EL 1999). Sie hatten mindestens zwei Monate Erfahrung mit ihrem CI zum Zeitpunkt der ersten Messung. Alle benutzten die schnelle CIS-Strategie mit 1500 Pulsen/s/Kanal bei Benutzung aller Kanäle (MED-EL CIS oder CIS+ Strategie).

Die Kinder der Kontrollgruppe besuchten einen Regelkindergarten in Lengfeld bei Würzburg. Mit dem Einverständnis der Eltern wurden zunächst die Richtungshörtests in der dortigen Einrichtung und anschließend in der Klinik durchgeführt.

Die Mehrzahl der Kinder, die in der HNO-Klinik Würzburg mit einem CI versorgt wurden, wurden pädagogisch und technisch im Cochlea Implantat Centrum Süd (CIC Süd) Würzburg weiter betreut. Der regelmäßige und oft über mehrere Jahre bestehende Kontakt der Familien zum Implantat-Team in Würzburg erleichterte es, die Eltern zu motivieren, ihre Kinder an der Untersuchung teilnehmen zu lassen. Alle Kinder, die zu Beginn der Studie im Mai 1999 ihre Rehabilitation am CIC Süd Würzburg durchgeführt hatten, konnten für die Studie gewonnen werden. Jedoch mussten zwei einseitig implantierte Kinder nach den Vorversuchen aus der Studie ausgeschlossen werden, da sie auf Grund anderer, erst im Verlauf diagnostizierter Behinderungen nicht in der Lage waren, die Tests zu bewältigen

Außerdem nahmen zwei Kinder (Kind K8 und K11), die in Würzburg implantiert, aber im CIC Rhein-Main in Friedberg nachbetreut wurden, an der Studie teil. Ein Kind (Kind K8) machte die Tests nur in der Würzburger Klinik mit, das andere Kind K11 kam auch in das CIC Süd für die Tests.

### **3.2 Durchgeführte Diagnostik und Hörprüfungen vor der Implantation**

Alle CI-Kinder, die an der Studie teilnahmen, erhielten ihr CI an der Universitätsklinik Würzburg. Da der Erfolg einer CI-Versorgung letztendlich von einer richtigen Indikationsstellung abhängt, durchlaufen die Kinder mehrere Untersuchungen, bevor sie implantiert werden. Im Einzelnen wurden folgenden Faktoren und Umstände bewertet:

1. Lebensalter, Ertaubungsalter und -dauer
2. Ausmaß des Hörverlustes
3. Nachweis einer sensorischen Taubheit bei funktionsfähigem Hörnerv und zentralem Hörsystem
4. Anatomie des Innenohres
5. Vorliegen von Zusatzbehinderungen

Bei allen Kindern wurde präoperativ die Anamnese erhoben und die folgende Diagnostik durchgeführt:

1. klinische Untersuchung
2. audiologische Untersuchung mit und ohne Hörgeräte, evtl. Anpassung neuer Hörgeräte

3. elektrophysiologische Evaluation ABR, evtl. E-ABR
4. Promontorialtest
5. phoniatische / logopädische Untersuchung
6. psychosoziale und evtl. neuropädiatrische Evaluation
7. CT, evtl. MR

Nach Abschluss der Voruntersuchungen wurden die Eltern nochmals ausführlich beraten, so dass sie sich gut informiert für oder gegen die Cochlea-Implantat-Versorgung entscheiden konnten.

### **3.3 Rehabilitationsmaßnahmen**

Bis auf zwei nahmen alle CI-Kinder der Stichprobe an den Rehabilitationsmaßnahmen am CIC Süd teil. Die Rehabilitation beginnt nach der Erstanpassung des Sprachprozessors, die in der Regel sechs Wochen nach der durchgeführten OP stattfindet. In Begleitung mindestens eines Elternteils kommen die Kinder zunächst einmal wöchentlich zur Rehabilitation. Später, im zweiten oder dritten Jahr nach Implantation kommen, sie in vierzehntägigem oder dreiwöchigem Abstand in die Einrichtung. Abhängig von der individuellen Entwicklung des Kindes können sich die Rehabilitationsmaßnahmen über einen Zeitraum von zwei bis zu fünf Jahren erstrecken.

Die fachpädagogisch-therapeutische Arbeit am CIC Süd ist auf die individuellen Bedingungen der Kinder abgestimmt. Neben der umfassenden Hör-Spracherziehung werden grundlegende sensorische, motorische, kognitive sowie emotionale Basisfunktionen geschult und gefördert. Entsprechend weit gefächert ist das Ausbildungsspektrum der betreuenden Therapeutinnen: Sie kommen aus den Bereichen der Ergotherapie, Hör- und Sprachheilpädagogik, Heilpädagogik, Rhythmik und Psychologie. In allen Bereichen wird mit den Kindern intensiv einzel- und gruppentherapeutisch gearbeitet. Regelmäßige Anpassungen des Sprachprozessors, Untersuchungen zur Beurteilung des Verlaufs und eine jährliche psychologische Diagnostik runden das Therapieprogramm ab.

### **3.4 Studiendesign**

Die prospektive Studie umschloss einen Zeitraum von Mai 1999 bis Juli 2000.

Die Kinder der Kontrollgruppe wurden während dieser Zeit unter der alltagsnahen Bedingung im Kindergarten in Lengfeld und unter der Laborsituation in der Klinik untersucht. Jedes Kind wurde in den beiden Einrichtungen jeweils nur zu einem Zeitpunkt getestet.

Die Kinder der Experimentalgruppen wurden während des gleichen Zeitraums mehrmals untersucht. Die Tests in der alltagsnahen Situation wurden am CIC Süd und die in der Laborsituation in der Camera silenta der HNO-Klinik Würzburg durchgeführt.

Die Untersuchungen im CIC Süd wurden in den Ablauf eines Rehabilitationstages integriert. Kind K11, welches die Friedberger Einrichtung besuchte, wurde zweimal in das CIC Süd eingeladen, um die Tests absolvieren zu können.

Für die Untersuchungen in der HNO-Klinik Würzburg wurden die Termine individuell mit den Familien vereinbart.

Schwerpunktmäßig wurden die Untersuchungen von Mitte Juni bis Dezember 1999 und in der Zeit von April bis Juli 2000 durchgeführt. Da Daten mit jeder Wiederholung der Messung an Aussagekraft gewinnen, wurden die Tests, so weit dies möglich war, auch öfter als zweimal wiederholt. Je nachdem, wie oft die Kinder im fraglichen Zeitraum an einer Rehabilitationsmaßnahme teilnahmen oder die Eltern bereit waren, die Klinik aufzusuchen, liegen mehr oder weniger Messdaten vor. Die etwa einjährige Lücke zwischen der ersten und der letzten Untersuchung wurde als ausreichend groß angesehen, um eine eventuell stattfindende Entwicklung des Richtungshörens untersuchen zu können.

### **3.5 Gründe für fehlende und unterschiedlich häufig durchgeführte Tests**

Sowohl am CIC Süd als auch in der Klinik konnte das beabsichtigte Versuchsdesign nicht strikt realisiert werden. Aus den unterschiedlichsten Gründen fielen Untersuchungen aus oder konnten nicht durchgeführt werden. Unter anderem sind hierfür zu nennen:

- Die Kinder hatten ihre Rehabilitation zum Messzeitpunkt im Jahr 1999 noch nicht angetreten, da sie erst kurz zuvor implantiert worden waren (Kinder K21, K20, K23).
- Das Kind hatte seine Rehabilitation vor dem Messzeitpunkt im Jahr 2000 beendet (Kind K25).
- Die Kinder waren nicht kooperativ (Kinder K5, K12, K23).
- Die Eltern waren nicht kooperativ (Kind K16).
- Das Kind wurde nicht im CIC Süd rehabilitiert, und die Eltern wollten nicht eigens wegen des Tests ins CIC Süd kommen (Kind K8).

### 3.6 Statistische Behandlung der Messergebnisse

Aufgrund der Erfahrungen mit erwachsenen CI-Nutzern musste man auch bei den Kindern davon ausgehen, dass sich einige mit der gestellten Aufgabe leichter, andere dagegen schwerer zurecht kommen würden. Es war abzusehen, dass die Kinder wie die Erwachsenen uneinheitlich urteilen und mehr oder weniger oft den richtigen oder falschen Lautsprecher benennen würden. Wie soll man in einer solchen Situation entscheiden, ob einem Kind die Fähigkeit zum Richtungshören zuzusprechen ist oder nicht? Gemeinhin geht man derartige Fragestellungen mit statistischen Methoden an. Man bildet zwei Hypothesen, eine Nullhypothese und eine Alternativhypothese. Als Nullhypothese formuliert man die Negation dessen, was gezeigt werden soll. Im vorliegenden Fall lautet sie daher: Das Kind verfügt über kein Richtungshören. Alternativ dazu ergibt sich: Das Kind kann richtungshören.

Für die mathematische Einkleidung dieser Hypothesen scheint es hilfreich, sich mögliche Verhaltensweisen der Kinder vorzustellen. Offensichtlich wird man die Nullhypothese für richtig halten, falls ein Kind in seinem Urteil immer den gleichen Lautsprecher benennt, unabhängig davon, über welchen Lautsprecher der Stimulus abgespielt wurde. Man wird die Nullhypothese auch dann noch für richtig halten, wenn dieses Verhalten, immer den gleichen Lautsprecher anzugeben, weiterhin der Tendenz nach vorhanden ist, aber die Urteile von zufälligen Fluktuationen überlagert werden. Dies kann so weit gehen, dass im Grenzfall die Urteile einen völlig zufälligen Charakter annehmen. In diesem Fall würde man den Kindern unterstellen, dass sie sich der gestellten Aufgabe einfach dadurch entledigen, dass sie raten. Einige Kinder zogen sich

auch damit aus der Affäre, dass sie reihum einfach immer den nächsten Lautsprecher benannten. Alle diese Verhaltensformen sprechen gegen die Fähigkeit zum Richtungshören. Ihnen gemeinsam ist, dass der Erwartungswert für alle Urteile den gleichen Wert annimmt. In all diesen Fällen korreliert das abgegebene Urteil nicht mit dem Stimulus. Als Gegensatz wären Kinder zu denken, die stets den richtigen Lautsprecher benennen, und denen man daher Richtungshören zubilligen wird. Stimulus und Urteil korrelieren in diesem Fall maximal miteinander. Zwischen diesen beiden Extremen können sich fein abgestuft alle möglichen Zwischenformen einstellen, und entsprechend kann die Korrelation zwischen Stimulus und Urteil beliebige Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Das statistische Problem reduziert sich damit auf die einfach zu beantwortende Frage: Wann liegt eine signifikante Korrelation, oder - was auf dasselbe hinausläuft - wann liegt eine signifikante Regression zwischen Stimulus und Urteil vor? Letztere wurde aus den Daten der Kinder berechnet. Das Signifikanzniveau wurde durchgängig zu 5 % festgelegt.

Falls die Alternativhypothese akzeptiert werden kann, einem Kind also Richtungshören zugeschrieben wird, so stellt sich als nächstes die Frage, wie gut die angegebene Richtung mit der objektiv vorgegebenen übereinstimmt. Hierbei kann zwischen zwei möglichen Abweichungen unterschieden werden. Nämlich a) wie sehr weichen die Urteile im Mittel vom wahren Ort der Schallquelle ab und b) wie sehr streuen die Urteile um dieses Mittel. Im Kern geht es bei a) um die Frage nach dem funktionalen Zusammenhang zwischen dem Urteil der Kinder und der Schallereignisrichtung in Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel. Für die Anpassung des zu erwartenden sigmoidförmigen Verlaufs reichen drei Stützstellen nicht aus. Andererseits schien es unter den gegebenen Umständen – es lagen weltweit keine Untersuchungen mit bilateral implantierten Kindern vor, so dass nicht vorhersehbar war, welche Ergebnisse erreichbar sein würden – angebracht, diese Fragestellung zunächst zurückzustellen und die Kinder nicht wie die Erwachsenen mit einem Test mit sieben Lautsprechern zu belasten. Die Entscheidung für drei Lautsprecher schien ein gangbarer Kompromiss zu sein.

Anders als bei der Frage nach dem Zusammenhang zwischen Reiz und Urteil bereitete die Auswertung der Daten bezüglich der Streuung keine vergleichbaren Schwierigkeiten. Hier kann über die drei Lautsprecherrichtungen gemittelt werden. Als Maß für

die Streuung bieten sich mehrere Alternativen an. Das im Folgenden verwendete Maß erfasst sowohl die Abweichung der Mittelwerte vom wahren Ort der Lautsprecher, als auch die Fluktuationen im Urteilsverhalten. Benutzt werden die quadratisch gemittelten Differenzen zwischen dem Urteil und dem Ort der Schallquelle. Auf die so berechnete mittlere Abweichung der Urteile wird mit dem Ausdruck „Unsicherheit des Urteils“ Bezug genommen. Sie nimmt den Wert von  $0^\circ$  an, wenn ohne Ausnahme stets der richtige Lautsprecher benannt wird, und erreicht für den Fall, dass alle Lautsprecher unabhängig vom Stimulus mit der gleichen Wahrscheinlichkeit angegeben werden, einen Wert von  $104^\circ$ .

### **3.7 Zeitliche Entwicklung des Richtungshörens der Kinder**

Im Folgenden wird vorausgesetzt, dass sich bei den bilateral implantierten Kindern die Entwicklung des Richtungshörens darin zeigt, dass sie die abgefragte Leistung zunächst nicht, sondern erst zu einem späteren Zeitpunkt erbringen können. Im Verlauf der Zeit wächst daher die Zahl der Kinder, die den Test mit positivem Ergebnis ablegen. Der Zusammenhang, wie sich die Zahl der „richtungshörenden“ Kinder mit der Zeit verändert, wird für die einzelnen Gruppen getrennt ermittelt. Die grafische Darstellung dieses Zusammenhangs zeigt, in welchem Maße eine Entwicklung stattgefunden hat. Es ist zu beachten, dass sich die Zahl der „richtungshörenden Kinder“ nicht ändert, wenn ein Kind in einem späteren Test das gleiche Ergebnis liefert wie in einem früheren. Das gilt sowohl für positive, wie für negative Ergebnisse. Nur Änderungen im Verhalten erhöhen oder senken die Zahl der als richtungshörend eingestuft Kinder. Da es sich um kumulativ gebrauchte Zahlen handelt, ist nicht erkennbar, wem die einzelnen Messpunkte zuzuordnen sind.

Im Alltag werden Leistungen beurteilt und Zeugnisse darüber erstellt, wogegen es ungebräuchlich ist, für diesen Zweck Korrelationen zu berechnen und anzugeben. Daher lag es nahe, ein Kriterium zu suchen, mit dessen Hilfe die „Leistung“ der Kinder beurteilt werden kann. Auch hierfür eignet sich das im vorangegangenen Abschnitt als „Unsicherheit des Urteils“ eingeführte Maß. Einem Kind könnte auf Grund dieses Kriteriums Richtungshören zugesprochen werden, wenn die Unsicherheit des Urteils im Laufe der Zeit unter einen fest vorgegebenen Wert sinkt. Da die Kinder nicht in einem sehr engen Zeitraster untersucht werden konnten, wurden die Messwerte der Kinder



linear inter- bzw. extrapoliert, wozu für jedes Kind, falls genügend Messwerte vorlagen, eine Regressionsgerade gerechnet wurde. Damit konnte der Zeitpunkt, zu dem der vorgegebene Fixwert unterschritten wurde, berechnet werden. Für Kinder mit nur einer Messung konnte keine Regressionsgerade ermittelt werden. Für diese Kinder wurde als bester zur Verfügung stehender Schätzwert die mittlere Steigung in der Stichprobe genommen.

### **3.8 Vergleich der Kinder**

Falls die Kinder sich zeitlich entwickeln, so muss man, wenn man sie untereinander vergleichen will, diese zeitliche Entwicklung beachten, da sie zu verschiedenen Zeitpunkten über unterschiedliche Fähigkeiten verfügen. Die üblicherweise für Vergleiche benutzten globalen Mittelwerte sind unter den vorliegenden Umständen ungeeignet, weil sie die zeitlichen Veränderungen nicht in adäquater Weise berücksichtigen. Daher wurde auch hier auf die linearen Regressionen bezüglich der Unsicherheit des Urteils, wie sie zur Beurteilung der zeitlichen Entwicklung berechnet wurden, zurückgegriffen. Ein Kompromiss ist hinsichtlich des Zeitpunktes, zu dem die Kinder verglichen werden sollen, zu finden. Die Wahl eines frühen Zeitpunktes, zu dem nur wenige Kinder als richtungshörend eingestuft werden, ist wenig sinnvoll. Umgekehrt darf der Zeitpunkt auch nicht zu spät gewählt werden, da sonst a) für immer mehr Kinder der Zeitpunkt jenseits der letzten Messung liegen würde und dadurch die Werte extrapoliert werden müssten, und b) auch die Annahme eines linearen Zusammenhangs immer mehr an Gültigkeit verliert. Eine lineare Funktion mit negativer Steigung nimmt für große Argumente negative Werte an. Die Unsicherheit des Urteils kann hingegen im Idealfall höchstens null werden. Die benutzte lineare Regression approximiert daher den tatsächlichen Verlauf nur befriedigend für einen beschränkten, frühen Zeitraum. Da die Daten aus einem solchen frühen Zeitraum stammen, erscheint das benutzte Vorgehen dem Problem angemessen. Gleichzeitig enthalten die Daten wegen dieser Beschränkung auf einen frühen Zeitraum nicht genügend Information, um ein nichtlineares Modell sinnvoll anpassen zu können. Aus diesen Überlegungen heraus wurden die Daten für zwei Jahre nach Anpassung des zweiten CIs berechnet.

### 3.9 Repräsentative Daten und Kinder

Stellvertretend für das Verhalten der Kinder einer Gruppe werden im Ergebnisteil Daten von Kindern gezeigt, die als beispielhaft, als repräsentativ angesehen wurden. Für die Darstellung wurden Blasen-Diagramme gewählt, weil sich damit der Zusammenhang zwischen den relevanten Größen des Experiments in einem einzigen Diagramm veranschaulichen lässt. Die Lage der „Blase“ bestimmt sich durch die beiden Winkel für das Schall- und Hörereignis und in der Größe der „Blase“ bildet sich die relative Häufigkeit der Urteile für die jeweilige Kombination aus Stimulus und Urteil ab.

Welche Daten und welche Kinder können als repräsentativ gelten? Sicherlich nicht Kinder, deren Urteile extrem von denen der anderen abweichen. Entfernt man daher aus einer sortierten Liste sukzessiv jene Kinder, die eine Extremstellung einnehmen, so verbleiben bei Abschluss des Verfahrens ein oder zwei Kinder in mittlerer Stellung, die als repräsentativ anzusehen sind. Als statistisches Maß entspricht dies dem Median. Ähnlich wie beim Median wurden die Daten, falls die Anzahl der Kinder in der Stichprobe gerade war, gemittelt. Da sich die Werte in diesem Fall auf ein fiktives Kind beziehen, wird, um nicht permanent unterscheiden zu müssen, ob sich die Daten auf ein oder zwei Kinder beziehen, im folgenden der Begriff des „repräsentativen Kindes“ benutzt.

Als Sortierkriterium diente wiederum die Unsicherheit des Urteils. Da Bindungen auftreten können, wurde als nachgeordnetes Sortierkriterium die F-Statistik, das Verhältnis aus Treatment- und Fehlervarianz, benutzt. Die F-Statistik wurde im Rahmen der Regressionsanalyse berechnet.

Die Daten für die normal hörenden Kinder waren einfach zu ermitteln. Das Verhalten der Kinder kann in diesem Alter als zeitlich stabil angesehen und der Median kann auf direktem Wege ermittelt werden.

Die einseitig implantierten oder einseitig getesteten Kinder zeigen verallgemeinert kein Richtungshören. Dieses Ergebnis lässt zwei Interpretationen zu: a) Die Kinder können tatsächlich nicht richtungshören oder b) die Kinder können richtungshören, aber so schlecht, dass der Test auf Grund der Datenlage dies nicht nachweisen kann. Falls die erste Hypothese zutrifft, so sind die Kinder bezüglich des Richtungshörens als gleich anzusehen, und jedes kann stellvertretend für jedes andere ausgewählt werden. Ein besonderes Auswahlkriterium ist hier nicht erforderlich. Falls die zweite Hypothese

zutritt, dass die Kinder zwar nicht nachweisbar, aber doch unterschiedlich gut richtungshören können, so bieten sich die geschätzten Werte für die Unsicherheit des Urteils als Auswahlkriterium an. Offensichtlich schließt dieser Fall den ersteren, der ohne Auswahlkriterium auskommt, ein, so dass danach verfahren wurde.

Etwas aufwändiger wurden die Daten für die bilateral implantierten Kinder ermittelt. Wenn diese eine mit der Zeit fortschreitende Abnahme in der Unsicherheit des Urteils zeigen, so muss für die Auswahl eines als repräsentativ anzusehenden Kindes ein fester Zeitpunkt festgesetzt werden. Wie beim Vergleich der Kinder kann auch hier auf die berechneten linearen Regressionen zurückgegriffen werden. Als Zeitpunkt wurden wiederum zwei Jahre nach Erstanpassung des zweiten Implantates gewählt. Im weiteren Vorgehen ergibt sich allerdings ein Unterschied zum Vergleich der Kinder untereinander. Hier ist davon auszugehen, dass der Median zu einem Kind gehören wird, das zwei Jahre nach Anpassung des CIs nicht untersucht wurde. Eine Lösung des Problems ergibt sich aus der Ausgangsfrage: Was soll dargestellt werden? Die Urteile eines Kindes, dessen Unsicherheit des Urteils dem gefundenen Median gleicht. Da es aber recht unwahrscheinlich ist, dass ein Messwert mit dem gefundenen Median übereinstimmt, wurden aus allen Messungen der entsprechenden Gruppe diejenigen beiden Kinder ausgewählt, deren Unsicherheit des Urteils dem Median am nächsten kam und deren Urteile gemittelt.

## 4 Untersuchungen in der Alltagssituation

### 4.1 Versuchsaufbau und Umsetzung

#### 4.1.1 Testbogen

Für die Untersuchungen im Kindergarten Lengfeld und im CIC Süd wurden Testbögen erstellt (Abb. 5). Die Bögen dienen der Steuerung und der gleichzeitigen Dokumentation des Untersuchungsablaufs. Der Stimulus wurde jeweils aus drei unterschiedlichen

#### Lokalisationstest mit Hilfe eines Knackfrosches

Name		Vorname	
Geb.-Datum			
Test		Datum	
Testform	9		
Erste CI - OP			
Zweite CI - OP			

Durchgang	Knackposition	Antwort	Ergebnis
1	vorne	rechts <input type="radio"/> links <input type="radio"/> vorne <input type="radio"/>	richtig <input type="radio"/> falsch <input type="radio"/>
2	links	rechts <input type="radio"/> links <input type="radio"/> vorne <input type="radio"/>	richtig <input type="radio"/> falsch <input type="radio"/>
3	vorne	rechts <input type="radio"/> links <input type="radio"/> vorne <input type="radio"/>	richtig <input type="radio"/> falsch <input type="radio"/>
4	rechts	rechts <input type="radio"/> links <input type="radio"/> vorne <input type="radio"/>	richtig <input type="radio"/> falsch <input type="radio"/>
5	links	rechts <input type="radio"/> links <input type="radio"/> vorne <input type="radio"/>	richtig <input type="radio"/> falsch <input type="radio"/>
6	rechts	rechts <input type="radio"/> links <input type="radio"/> vorne <input type="radio"/>	richtig <input type="radio"/> falsch <input type="radio"/>
7	vorne	rechts <input type="radio"/> links <input type="radio"/> vorne <input type="radio"/>	richtig <input type="radio"/> falsch <input type="radio"/>
8	rechts	rechts <input type="radio"/> links <input type="radio"/> vorne <input type="radio"/>	richtig <input type="radio"/> falsch <input type="radio"/>
9	links	rechts <input type="radio"/> links <input type="radio"/> vorne <input type="radio"/>	richtig <input type="radio"/> falsch <input type="radio"/>
10	rechts	rechts <input type="radio"/> links <input type="radio"/> vorne <input type="radio"/>	richtig <input type="radio"/> falsch <input type="radio"/>
11	vorne	rechts <input type="radio"/> links <input type="radio"/> vorne <input type="radio"/>	richtig <input type="radio"/> falsch <input type="radio"/>
12	links	rechts <input type="radio"/> links <input type="radio"/> vorne <input type="radio"/>	richtig <input type="radio"/> falsch <input type="radio"/>

**Achtung:** Die Knackpositionen sind aus der Position des zu testenden Kindes angegeben.

Abb. 5: Testbogen mit Festlegung der Reihenfolge der Stimulusorte und vorgegebenen Alternativen zur Erfassung der Antworten

Richtungen (von rechts, links und von vorne) dargeboten. Für jede Richtung wurde er viermal präsentiert. Die Reihenfolge der daraus resultierenden zwölf Stimulusorte wurde ausgelost und in den zwölf Zeilen des Bogens festgehalten. Insgesamt wurden zehn Bögen mit unterschiedlichen Stimulusserien erstellt. Wegen der zufallsbedingten Reihenfolge innerhalb eines Bogens und des Wechsel der Bögen von Untersuchung zu Untersuchung sollte es den Kindern auch bei Wiederholung der Tests nicht möglich sein, die Abfolge der Stimuli zu erlernen.

#### 4.1.2 Räume und Plazierung der Probanden

Die Kontrollgruppe wurde in einem Spielraum des Kindergartens in Lengfeld getestet, die Experimentalgruppen im Musiktherapieraum des CIC Süd Würzburg. Beide Räume hatten einen Teppichboden und an den Fenstern Vorhänge. Sonst gab es keine schall-

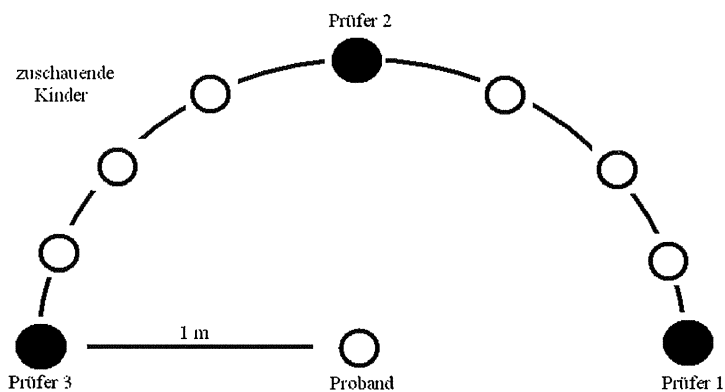


Abb. 6: Positionierung des Probanden in der alltagsnahen Situation

dämpfenden Einrichtungen. Die Prüfer und die zuschauenden Kinder saßen auf Kinderstühlen im Halbkreis um den Probanden herum. Der Abstand zum Probanden betrug ca. einen Meter (Abb. 6).

#### 4.1.3 Stimulus-Parameter

Der Stimulus wurde mit einem so genannten „Knackfrosch“ aus Metall erzeugt. Beim Drücken und Loslassen der Blattfeder erklangen zwei laute, ähnlich klingende hochfrequente Knacklaute. Diese Knacklaute setzten sich aus einem Gemisch hochfrequenter Schwingungen zusammen, die plötzlich einsetzten und mit einer charakteristischen Zeit von 1 bis 2 ms exponentiell abfielen. Entsprechend breit fiel die spektrale Energieverteilung aus, die weit über den hörbaren Bereich hinausreichte.

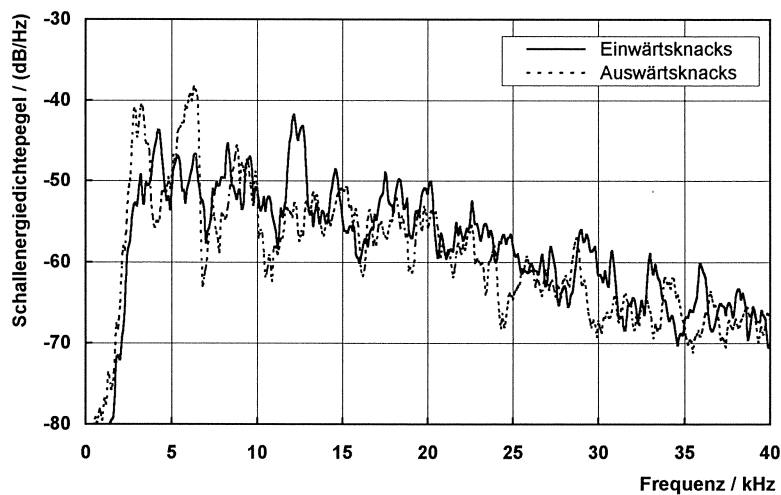


Abb. 7 Energiedichte des Schalldrucks des Knacklautes beim Drücken und Loslassen des Knackfrosches (willkürlicher Bezugsdichtepegel)

#### 4.1.4 Pilotphase

Das Richtungshören der Kinder sollte in einer strukturierten Spielsituation, wie sie beispielsweise in einer Schulklasse oder einer Kindergartengruppe vorzufinden ist, untersucht werden. In einer Pilotphase am CIC Süd wurden verschiedene Versuchsanordnungen ausprobiert. Die Schwierigkeit bestand darin, eine Spielsituation zu schaffen, in der Konzentration und Motivation der Kinder bis zum Ende des Tests anhielten.

Es zeigte sich, dass mehr als zwölf Stimuli pro Testdurchgang nicht möglich waren. Bei einer Gruppengröße von bis zu sieben Kindern war es schwierig, die Aufmerksamkeit der Kinder so lange aufrechtzuerhalten, bis auch das letzte Kind seinen Test beendet hatte.

Für die meisten Kinder waren außerdem einige Trainingsdurchgänge nötig, bis sie mit dem Testablauf vertraut waren.

#### **4.1.5 Versuchsdurchführung**

Die Gruppen bestanden aus drei bis sieben Kindern und drei Prüfern. Der Proband saß in der Mitte eines Halbkreises. (Abb. 6). Da die Versuche in vertrauter Umgebung mit vertrauten Personen stattfanden und der Test den Kindern außerdem bekannt war, konnten die Augen der Probanden mit einer Augenklappe verdeckt werden. Während des Tests sollte der Kopf gerade gehalten werden. Jeder Prüfer hatte einen Knackfrosch, mit dem er in der durch den Testbogen vorgegebenen Reihenfolge die Knacklaute auf Ohrhöhe erzeugte. Nach jedem Knacken fragte der aus Sicht des Probanden rechts sitzende Prüfer, wer geknackt hätte. Daraufhin zeigte das Kind mit dem Finger in die vermutete Richtung der Schallquelle. Positive oder negative Rückmeldungen wurden nicht gegeben, weil sich der Proband vor den anderen in der Gruppe bloßgestellt hätte fühlen können. Es war zu befürchten, dass durch Versagensängste die Motivation hätte schwinden können. Meist wurden in einer Sitzung gleich mehrere Kinder untersucht.

Die bilateral implantierten Kinder wurden zuerst mit beiden Implantaten eingeschaltet getestet. Daran schloss sich ein zweiter Durchgang mit nur einem CI an. Das CI auf der zweitimplantierten Seite wurde ausgeschaltet oder abgenommen, das CI auf der erstimplantierten Seite blieb eingeschaltet. Bei den jüngeren Kindern war es schwierig, deren Mitarbeit für einen zweiten Durchgang zu gewinnen. Aus diesem Grund fehlen bei einigen bilateral implantierten Kindern die Daten des zweiten Durchgangs.

Zwei Kinder benutzen gemeinsam mit dem CI auch ein Hörgerät. Diese beiden Kinder wurden zuerst in der binauralen Kondition mit dem CI auf der einen Seite und dem Hörgerät auf der anderen Seite getestet und im zweiten Durchgang mit dem CI alleine.

## 4.2 Ergebnisse

### 4.2.1 Ergebnisse der Kontrollgruppe

In der Kindergartengruppe wurden 13 Kinder untersucht. Von diesen konnten zwölf als richtungshörend eingestuft werden. Die Wahrscheinlichkeit, eine richtige Nullhypothese fälschlicherweise zu verwerfen, lag für diese Kinder zwischen  $6,1 \cdot 10^{-3}$  und  $1,7 \cdot 10^{-6}$ .

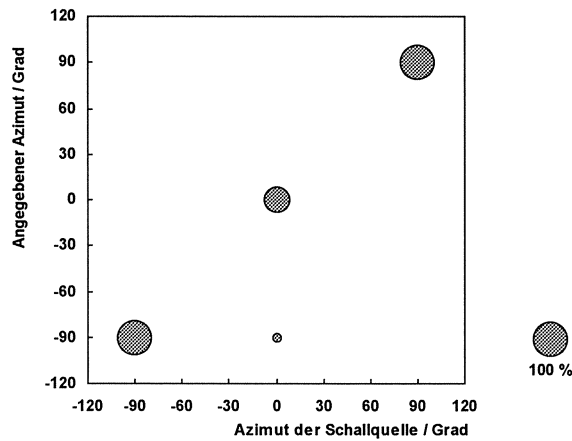


Abb. 8: Richtungshören unter den Bedingungen des Kindergartens; Daten des „repräsentativen Kindes“ aus der Gruppe der Normalhörenden

Erstaunlicherweise konnte bei dem Test im Kindergarten eines der Kinder, obwohl es als normal hörend anzusehen war, das Testkriterium nicht erfüllen. Auch bei den in Abb. 8 gezeigten Daten wurde ein Fehlerurteil gefällt. Die sechs Kinder mit kleineren Rängen vor ihm urteilten fehlerfrei.

### 4.2.2 Ergebnisse der einseitig implantierten Kinder

Es wurden neun einseitig implantierte Kinder untersucht. Keines konnte nach den angegebenen Kriterien reproduzierbar richtungshören. In den in Abb. 9 gezeigten Daten verteilen sich dementsprechend die Urteile auch ziemlich gleichmäßig auf alle Richtungen. Das ausgewählte Kind hat nie den mittleren Lautsprecher angegeben, eine



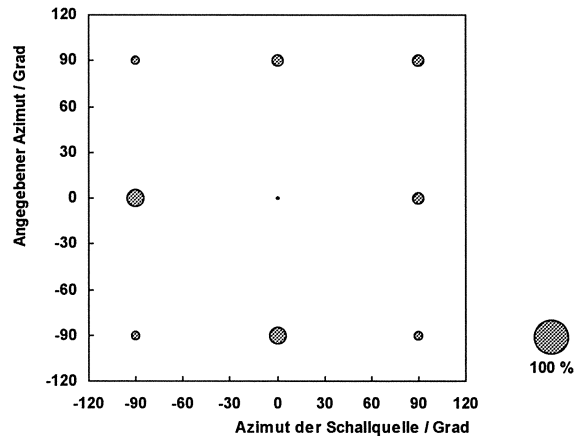


Abb. 9: Daten des „repräsentativen Kindes“ aus der Gruppe der einseitig implantierten Kinder

Eigenheit, die für die Stichprobe nicht typisch ist. Insgesamt wurden zu den unterschiedlichen Terminen 31 Richtungshörttests durchgeführt.

Zwei Kinder trugen zusätzlich zum CI noch ein Hörgerät. Eines, nämlich Kind K24, zeigte signifikantes Richtungshören ( $p = 3,3 \cdot 10^{-2}$ ). Das andere Kind, K21, zeigte kein Richtungshören. Wenn beide Kinder nur das CI benutzten, zeigte keines der Kinder Richtungshören.

In Abb. 10 ist die Anzahl der Kinder als Funktion der Zeit wiedergegeben, deren Testergebnisse zum Zeitpunkt der Messung signifikant ausfielen. Sporadisch wurden einzelne Messergebnisse signifikant, die aber zu einem späteren Zeitpunkt nicht reproduziert werden konnten. Da das Signifikanzniveau auf 5 % festgelegt wurde, ist auf Grund der Konstruktion der Signifikanztests zu erwarten, dass in 5 % der Fälle ein signifikantes Ergebnis resultiert, obwohl die Nullhypothese gilt, also kein Richtungshören vorliegt. Außerdem ist bei der Interpretation des niveauartigen Verlaufs nach vier Jahren zu beachten, dass die Messung nicht an dem richtungshörenden Kind wiederholt wurde, sondern an einem nicht richtungshörenden, so dass der letzte Punkt rechts, dem Verfahren entsprechend, von diesem als nicht richtungshörend beurteilten Kind stammt.

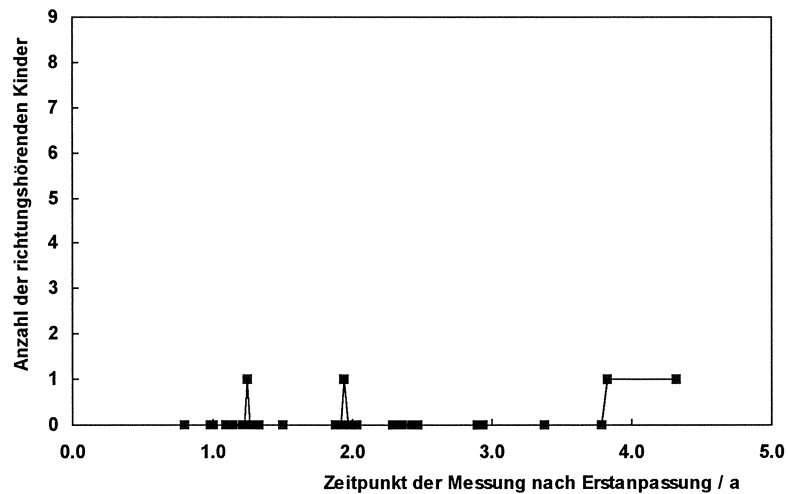


Abb. 10: Anzahl der einseitig implantierten Kinder, die zum Zeitpunkt der Untersuchung Richtungshören zeigten.

#### 4.2.3 Ergebnisse der bilateral implantierten Kinder, nur ein CI aktiviert

Bei elf der insgesamt 14 untersuchten bilateral implantierten Kindern wurde das Richtungshören mit nur einem CI getestet. Keines der Kinder zeigte signifikantes Richtungshören.

Dies zeigt sich deutlich in Abb. 11 und Abb. 12. Bei den in Abb. 11 gezeigten Daten verteilen sich die Urteile wiederum recht regelmäßig auf alle Richtungen. Für Abb. 12 gelten sinngemäß die gleichen Anmerkungen wie für Abb. 10. Nach einem Jahr wird bei einem Kind die Messung signifikant. Die kurzfristig wiederholte Messung ist nicht mehr signifikant, so dass der Graph wieder auf null zurückfällt.

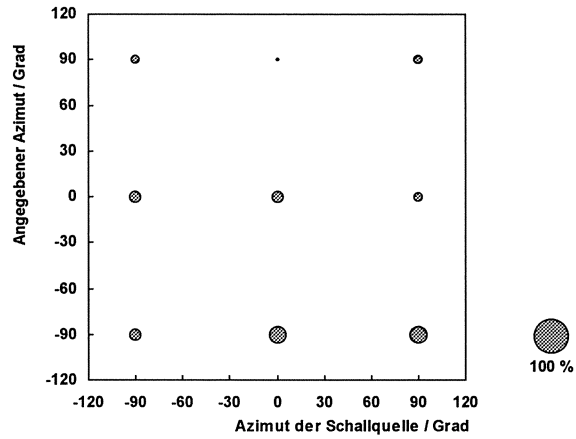


Abb. 11: Daten des „repräsentativen Kindes“ aus der Gruppe der bilateral implantierten Kinder mit nur dem erstimplantierten CI eingeschaltet

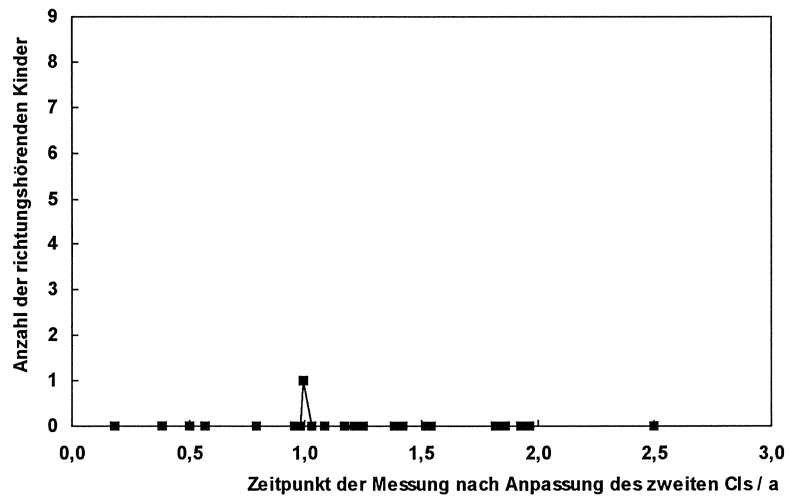


Abb. 12: Zahl der als richtungshörend beurteilten, bilateral implantierten Kinder mit einem CI eingeschaltet zum Zeitpunkt der jeweiligen Messung

#### 4.2.4 Ergebnisse der bilateral implantierten Kinder, beide CIs aktiviert

Von den 14 untersuchten Kindern mit zwei CIs konnten zum Zeitpunkt der letzten Untersuchung nach dem angegebenen Kriterium drei Kinder Richtungshören ( $p = 4,1 \cdot 10^{-2}$  bis  $3,8 \cdot 10^{-4}$ ). Die gezeigten Ergebnisse basieren auf insgesamt 53 Messungen.

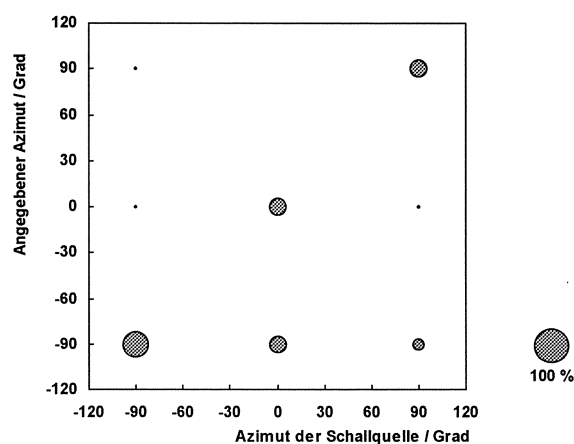


Abb. 13: Daten des „repräsentativen Kindes“ aus der Gruppe der bilateral implantierten Kinder mit zwei eingeschalteten CIs

In den Daten der Abb. 13 deutet sich ein Trend zum Richtungshören an. Die Urteile korrelieren stärker mit dem Ort der Schallquelle, die Diagonale ist deutlich stärker besetzt als dies für die Kinder, die nur mit einem CI gehört haben, der Fall war.

#### Zeitliche Entwicklung des Richtungshörens

In Abb. 14 nimmt die Zahl der richtungshörenden Kinder mit der Zeit leicht zu. Allerdings kann ein einmal gewonnenes Niveau nicht gehalten werden. Der Graph springt beständig auf und ab. Das rührt daher, dass die Kinder im Allgemeinen in einer späteren Sitzung die Ergebnisse nicht reproduzieren konnten. Der Graph pendelt sich bei drei richtungshörenden Kindern ein, obwohl zu einzelnen Messzeitpunkten insgesamt acht Kinder signifikante Ergebnisse abliefern.

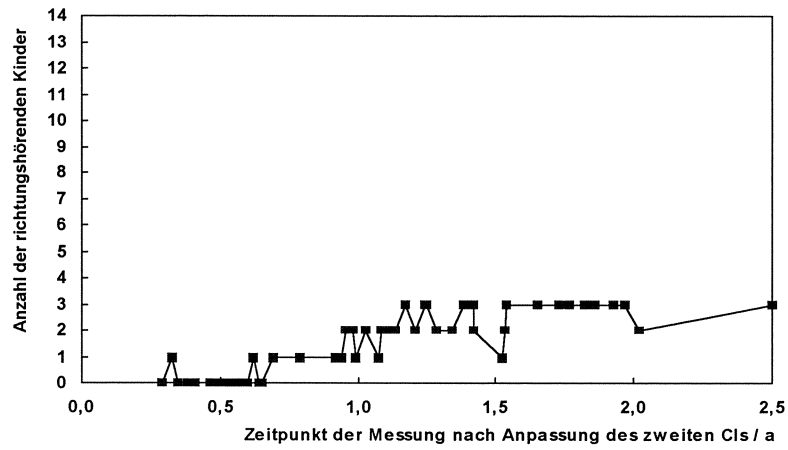


Abb. 14: Zahl der bilateral implantierten Kinder, die zum Zeitpunkt der jeweiligen Messung bei bilateralem Gebrauch der CIs Richtungshören zeigten

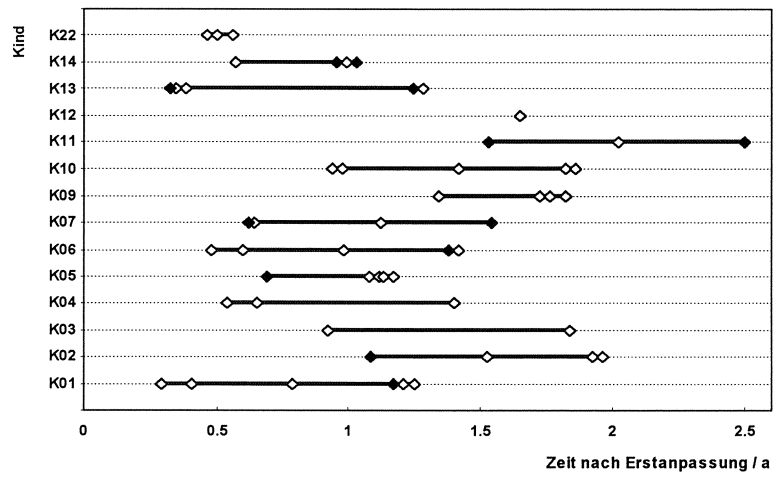


Abb. 15: Testergebnisse für die einzelnen Kinder zu den verschiedenen Untersuchungszeitpunkten: offene Rauten = kein Richtungshören, volle Rauten = Richtungshören

Ersichtlich ist dies aus Abb. 15. Auf der Abszisse ist die Zeit nach Erstanpassung abgetragen. Für jeden Messzeitpunkt und jedes Kind ist angegeben, ob zu diesem Zeitpunkt Richtungshören nachgewiesen werden konnte oder nicht. Bei den Kindern K7, K11 und K14 zeigt die jeweils letzte Messung Richtungshören an.

## 5 Untersuchungen in der Laborsituation

### 5.1 Versuchsaufbau und Umsetzung

#### 5.1.1 Messraum und Positionierung der Probanden

Die Messungen wurden in der Camera silenta der Kopfklinik der Universität Würzburg durchgeführt. Eine Mineralwolldämpfung verhinderte weitgehend störenden Nachhall. Außerdem wurden im Alltag normalerweise vorkommende Störgeräusche von außerhalb so stark gedämpft, dass sie unhörbar waren (Müller 1986). Der Raum misst 5,55 m \* 5,52 m \* 2,26 m.

Das zu untersuchende Kind saß auf einem Stuhl in der Mitte eines Kreises, in dessen vorderer Hälfte sieben Lautsprecher im Abstand von je 30° angebracht waren (Abb. 16). Der Abstand der Lautsprecher zum Zentrum des Kreises betrug 1,8 m. Die Lautsprecher

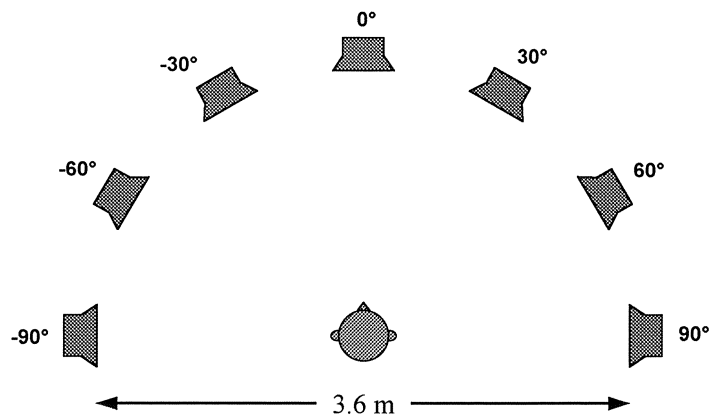


Abb. 16: Anordnung der Lautsprecher und des Probanden in der Camera silenta

befanden sich für Erwachsene auf Ohrhöhe, für die Kinder waren sie etwas über Ohrhöhe positioniert. Beschallt wurde über drei Lautsprecher: den vorderen, den rechten und den linken. Die Kinder wurde darauf hingewiesen, dass nur diese drei Lautsprecher benutzt würden, und sie sollten auch nur einen dieser Lautsprecher als Schallquelle benennen.

### **5.1.2 Stimulus-Parameter**

Als Stimuli wurden CCITT Rauschimpulse verwendet. Die Stimuli waren 500 ms lang und wurden mit 80 dB SPL angeboten. CCITT Rauschen ist ein stationäres Rauschen, das sich ähnlich wie weißes Rauschen anhört, aber im Unterschied zu diesem ein sprachähnliches Frequenzspektrum besitzt.

### **5.1.3 Versuchsdurchführung**

Bei den zum Teil sehr kleinen Kindern war anzunehmen, dass sie sich einem langen und aufwändigen Test verweigern würden. Ein Test mit sieben Lautsprechern, wie er bei den Erwachsenen durchgeführt wurde, erschien zu lang und zu schwierig. Die Zahl der benutzten Lautsprecher wurde daher auf drei in den Positionen rechts, links und vorne verringert.

Während des Tests sollten sich so wenige Personen wie möglich in der Camera silenta aufhalten. Um aber das Kind nicht zu irritieren, begleitete eine Bezugsperson, meist die Mutter, das Kind mit in die Camera silenta. Der Prüfer und die Begleitperson verhielten sich während der Untersuchung ruhig und unauffällig, so dass das Kind nicht abgelenkt oder durch Nebengeräusche gestört wurde.

Im Unterschied zum CIC Süd wurden die Augen nicht abgedeckt. Das zu testende Kind konnte während der ganzen Untersuchung sehen. Vor Beginn der Untersuchung wurden dem Kind die drei Lautsprecher vorgespielt und deren Position benannt. Auf den Lautsprechern befanden sich Kärtchen mit den Nummern von eins bis sieben. Die etwas älteren Kinder konnten die entsprechende Zahl angeben, die kleineren auf einen Lautsprecher zeigen. Die Kinder brauchten zum einen etwas Zeit, um sich an den ungewöhnlichen Ort, die Camera silenta, zu gewöhnen, zum anderen mussten sie den Testablauf kennen lernen, so dass im Allgemeinen ein, in Ausnahmefällen auch zwei Probedurchgänge vorgeschaltet wurden.

Die Lautsprecher steuerte ein Computer an. Die Reihenfolge, in der sie angesprochen wurden, wurde automatisch für jeden Durchgang neu randomisiert. Hierbei konnte es vorkommen, dass ein und derselbe Lautsprecher mehrmals hintereinander ausgewählt wurde. Auf diese Möglichkeit wurden die Kinder bei der Einführung hingewiesen.



Insgesamt wurden über jeden Lautsprecher fünf Stimuli abgespielt. Die Richtungsurteile wurden ebenfalls mit dem Computer erfasst.

Bei bilateral implantierten Kindern folgte, wie im CIC Süd, ein zweiter Durchgang mit nur einem eingeschalteten CI und zwar wie im CIC Süd auf der erstimplantierten Seite. Auch bei den beiden Kindern, die außer dem CI auch ein Hörgerät benutzten, wurde eine zweite Messung ohne Benutzung des Hörgerätes durchgeführt.

Während des Versuchs wurde keine Rückmeldung gegeben, ob die Antworten richtig oder falsch waren. Dadurch sollte vermieden werden, dass die Motivation der Kinder durch Frustrationserlebnisse abnehmen könnte. Korrigierend in den Urteilsprozess einzugreifen, könnte dazu führen, dass die Probanden mit wachsender Versuchsdauer lernen könnten, die monaural wahrnehmbaren Signalunterschiede immer besser zu interpretieren. Solche unerwünschten „Lerneffekte“ würden die Interpretation der Daten erschweren.

## 5.2 Ergebnisse

### 5.2.1 Ergebnisse der Kontrollgruppe

Unter den Versuchsbedingungen in der Camera silenta konnten alle zehn normal hörenden Kinder in hoch signifikanter Weise richtungshören ( $p=7,4 \cdot 10^{-5}$  bis  $8,8 \cdot 10^{-20}$ ).

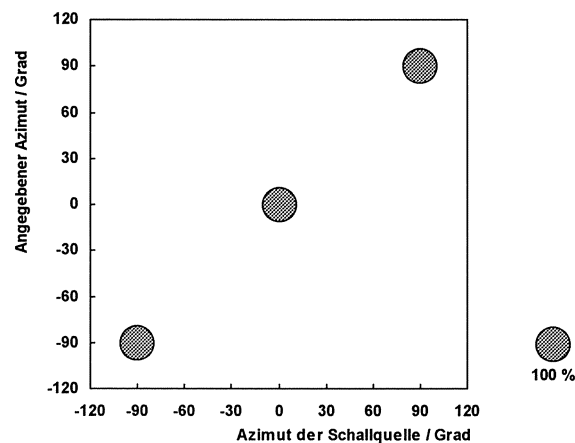


Abb. 17: Daten des „repräsentativen Kindes“ aus der Gruppe der Normalhörenden

Mit einer Ausnahme benannten die normal hörenden Kinder stets den richtigen Lautsprecher. Das eine Kind, welches nicht fehlerfrei urteilte, irrte sich ein einziges Mal und gab an Stelle des mittleren Lautsprechers den rechten an.

Trotz dieses Fehlteils korrelierten die Urteile auch für dieses Kind hoch mit der tatsächlichen Schalleinfallrichtung. Im Unterschied zu den anderen Gruppen wurde jedes normal hörende Kind nur ein einziges Mal getestet.

### 5.2.2 Ergebnisse der einseitig implantierten Kinder

Es wurden zehn einseitig implantierte Kinder untersucht. Insgesamt wurden mit diesen zu unterschiedlichen Zeitpunkten 20 Messungen durchgeführt. Zwei Kinder trugen zusätzlich zum CI noch ein Hörgerät, die übrigen acht benutzten nur das CI. Keines der

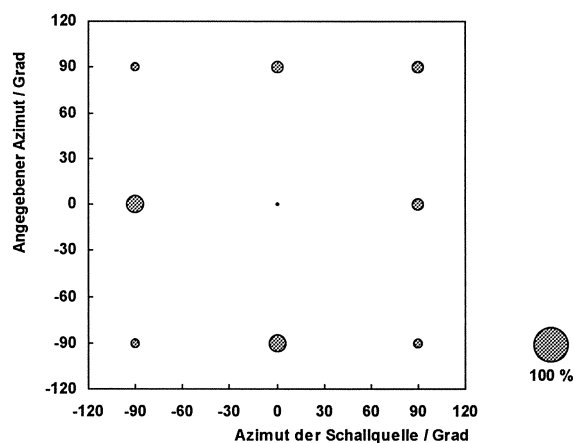


Abb. 18: Daten des „repräsentativen Kindes“ aus der Gruppe der einseitig implantierten

zehn Kinder konnte mit dem CI alleine nach den angegebenen Kriterien richtungshören. Wie in Abb. 18 erkennbar ist, verteilen sich die Urteile für jeden Lautsprecher ziemlich gleichmäßig auf alle Richtungen.

Die beiden Kinder, die ein Hörgerät trugen, wurden auch in der bilateralen Kondition (CI und HG eingeschaltet) getestet. Da die Ergebnisse von zwei Kindern nur wenig über die Verteilung in der Grundgesamtheit aussagen, werden diese „anekdotischen“

Ergebnisse an dieser Stelle eingeschoben. Ein Kind (Kind K24) zeigte signifikantes Richtungshören ( $p = 2,5 \cdot 10^{-2}$ ). Das andere Kind (Kind K21) zeigte kein

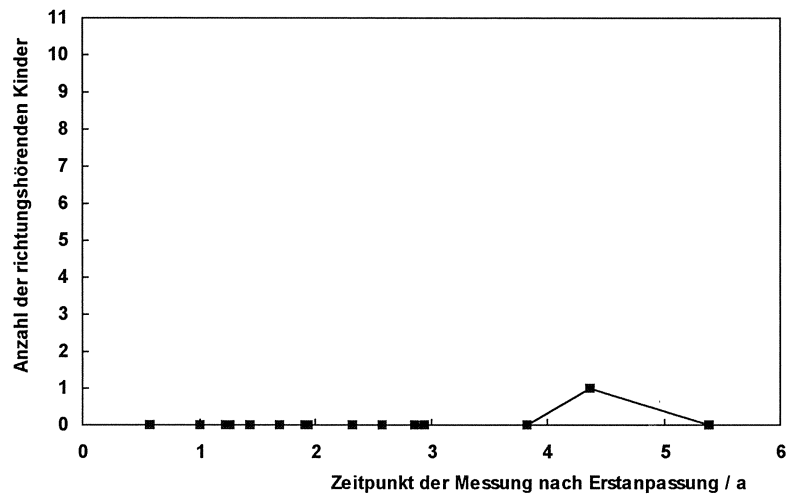


Abb. 19: Anzahl der einseitig implantierten Kinder, die zum jeweiligen Zeitpunkt der Untersuchung Richtungshören zeigten

Richtungshören. Bei Benutzung nur eines CIs zeigte keines dieser Kinder Richtungshören.

Wie aus Abb. 19 zu ersehen ist, wird zwar für ein Kind nach etwas mehr als vier Jahren ein Testergebnis einmalig signifikant. Dieses Ergebnis kann aber ein Jahr später nicht reproduziert werden. Der Graph der richtungshörenden Kinder endet daher bei null.

### 5.2.3 Ergebnisse der bilateral implantierten Kinder, nur ein CI aktiviert

Untersucht wurden zwölf Kinder. Die Urteile des in Abb. 20 gezeigten „repräsentativen Kindes“ verteilen sich nahezu gleichmäßig auf alle Richtungen. Unter der Bedingung des nur einseitigen Hörens verhalten sich diese Kinder wie die einseitig implantierten. Die nach rechts oben ansteigende Diagonale ist in keiner Weise ausgezeichnet. Das Fehlen einer richtigen Antwort für den mittleren Lautsprecher ist für die Stichprobe nicht typisch.

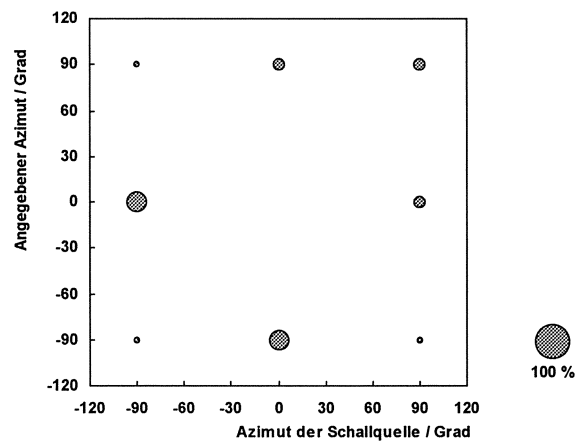


Abb. 20: Daten des „repräsentativen Kindes“ aus der Gruppe der bilateral implantierten Kinder mit nur einem CI auf der erstimplantierten Seite eingeschaltet

Über die Zeit betrachtet (Abb. 21) wurden die Antworten zweier Kinder (Kind K2 und K13) zu einem einzigen Untersuchungszeitpunkt signifikant ( $p=7,7 \cdot 10^{-3}$ ,  $p=2,7 \cdot 10^{-2}$ ). Das eine konnte dieses Ergebnis später nicht reproduzieren, das andere wurde kein zweites Mal getestet. Für die anderen zehn Kinder konnte die Nullhypothese (es ist kein Richtungshören vorhanden) zu keinem Zeitpunkt verworfen werden. Damit die Plateaus in Abb. 21 richtig interpretiert werden, erscheint auch hier der folgende Hinweis hilfreich. Die auf den jeweiligen Anstieg des Graphen folgenden Messpunkte stammen im Allgemeinen nicht vom gleichen Kind. Sie zeigen also nicht an, dass dieses Kind reproduzierbar das Ergebnis „richtungshörend“ liefert. Im Allgemeinen trifft das Gegenteil zu. Die Punkte verharren deshalb auf gleichem Niveau, weil die Urteile der getesteten Kinder zu der Bewertung „nicht richtungshörend“ geführt haben. Dem Verfahren entsprechend ändert sich die Anzahl der richtungshörenden Kinder dadurch nicht. Insgesamt wurden in dieser Gruppe 24 Messungen durchgeführt.

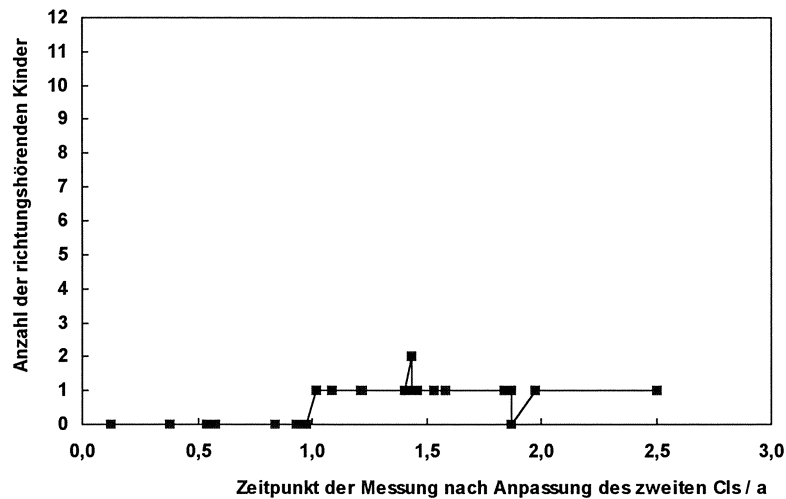


Abb. 21: Anzahl der bilateral implantierten Kinder, die zu einem bestimmten Untersuchungszeitpunkt bei alleiniger Nutzung des CIs auf der erstimplantierten Seite Richtungshören zeigten

#### 5.2.4 Ergebnisse der bilateral implantierten Kinder, beide CIs aktiviert

In dieser Gruppe befanden sich 15 Kinder. Ein Kind verweigerte die Mitarbeit (Kind K12), so dass es nicht getestet werden konnte. Untersucht wurden daher nur 14 Kinder. 13 Kinder erfüllten die Testkriterien für Richtungshören ( $p = 1,4 \cdot 10^{-2}$  bis  $9,6 \cdot 10^{-7}$ ). Ein Kind zeigte kein Richtungshören (Kind K3). Die in Abb. 22 dargestellten Daten zeigen eine Häufung der Urteile in der nach rechts oben verlaufenden Diagonalen. In einigen Fällen irrte das Kind und gab einen falschen Lautsprecher an. Die Falschurteile reichten jedoch nicht aus, um die Korrelation zwischen Urteil und Reiz zu zerstören.

#### Zeitliche Entwicklung des Richtungshörens

Die bisher gezeigten Ergebnisse könnten den Eindruck entstehen lassen, Richtungshören bei Kindern sei eine eher statische Begebenheit - das Gegenteil ist der Fall. Frisch implantierte Kinder zeigten im Allgemeinen zunächst kein Richtungshören. Erst mit der Zeit entwickelte sich die Fähigkeit zum Richtungshören, wie aus Abb. 23 ersichtlich ist. Die Abszisse zeigt die Zeit, die zwischen der Erstanpassung des zweiten CIs und dem Zeitpunkt der Untersuchung vergangen war. Auf der Ordinate ist die Anzahl der Kinder

abgetragen, bei denen zum jeweiligen Zeitpunkt Richtungshören festgestellt werden konnte. Das Kriterium für Richtungshören wurde als erfüllt angesehen, wenn die Urteile

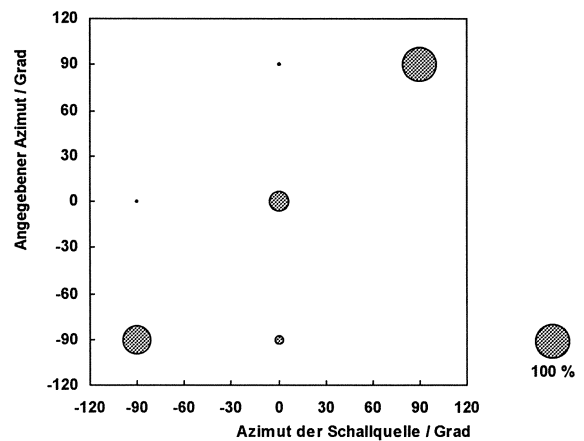


Abb. 22: Daten des „repräsentativen Kindes“ aus der Gruppe der bilateral implantierten Kinder mit beiden CIs eingeschaltet

des Kindes signifikant mit dem tatsächlichen Ort der Schallquelle korrelierten. In Abb. 23 gehört hierzu der Graph mit den ausgefüllten, schwarzen Quadraten. Der Graph mit den offenen Quadraten wird später im Zusammenhang mit der Reproduzierbarkeit der Urteile diskutiert.

Zwei Kinder konnten bereits bei der ersten Untersuchung nach etwa vier Monaten richtungshören. Die Hälfte der Kinder, nämlich sieben, konnten richtungshören nach etwa anderthalb Jahren, und nach etwa zwei Jahren vermochten dies nach dem angewandten Kriterium nahezu alle, nämlich 13 von insgesamt 14 Kindern. Das nicht richtungshörende Kind lässt auch in nächster Zeit kaum eine solche Entwicklung erwarten.

Gegen die Folgerung aus den in Abb. 23 gezeigten Daten könnte eingewendet werden, dass die Kinder nicht beginnend mit der Erstanpassung dichtmaschig untersucht wurden, sondern zu individuell variierenden späteren Zeitpunkten. Falls alle Kinder nach der ersten Anpassung in der Lage gewesen wären, richtig zu urteilen, so hätte sich

ein ähnlich ansteigender Graph ergeben. Dass dieser Einwand nicht zutrifft, macht die Abb. 24 deutlich. Sie zeigt für jedes bilateral implantierte Kind zu allen Messzeitpunkten, ob bei dem jeweiligen Kind Richtungshören nachgewiesen werden konnte

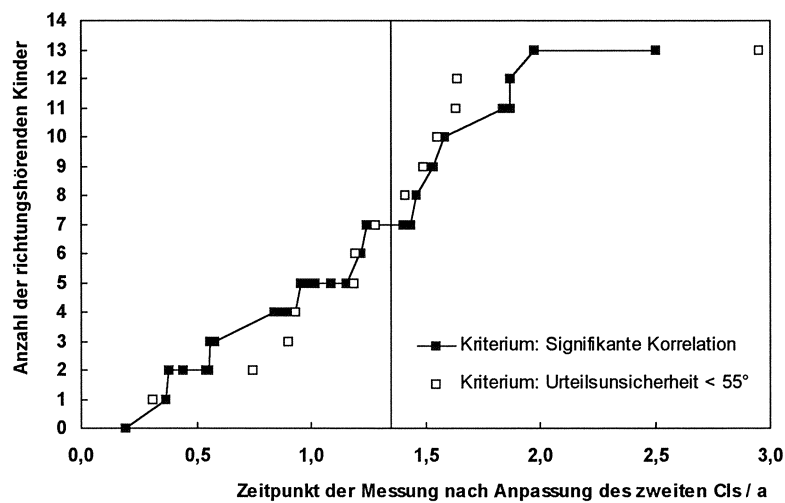


Abb. 23: Die ausgefüllten Quadrate geben die Zahl der bilateral implantierten Kinder wieder, deren Urteile zum Zeitpunkt der Untersuchung signifikant mit der Lautsprecherposition korrelierten.

Die leeren Quadrate geben die Zahl der Kinder wieder, die zum angegebenen Zeitpunkt eine Urteilsunsicherheit von 55° unterschritten.

oder nicht. Bei Kind K11 ist aus Untersuchungen in einem anderen Zusammenhang bekannt, dass nach der Erstanpassung des zweiten CIs die Richtungshörtests zunächst negativ ausfielen und erst nach einiger Zeit ein positives Ergebnis erzielt werden konnte.

Falls es richtig ist, dass taub geborene, bilateral implantierte Kinder erst mit der Zeit Richtungshören entwickeln, wie dies Abb. 23 und Abb. 24 nahe legen, dann liegt die Vermutung nahe, dass sie im Laufe dieser Entwicklung zunehmend sicherer und mit größerer Genauigkeit urteilen können. Ein geeignetes Maß, um diese Hypothese zu

prüfen, geben die berechneten Werte für die Unsicherheit des Urteils ab. Diese sollte um so kleiner werden, je länger die Kinder das CI benutzen.

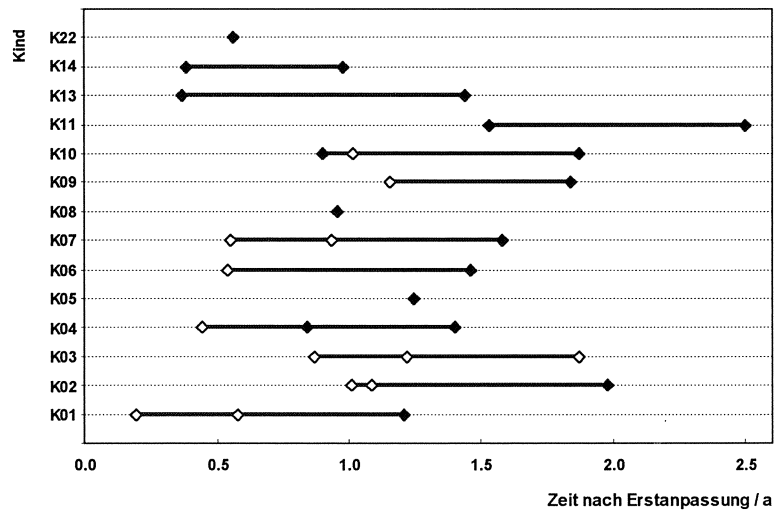


Abb. 24: Testergebnisse für die einzelnen Kinder zu den verschiedenen Untersuchungszeitpunkten: offene Rauten = kein Richtungshören, volle Rauten = Richtungshören

Abb. 25 zeigt, dass ein solcher Zusammenhang tatsächlich vorliegt. Da das Ziel eine Aussage über alle Kinder war, wurde die lineare Regression über alle Werte gerechnet ( $p = 3 \cdot 10^{-4}$ ). Für die Streuung der Punkte in Abb. 25 lassen sich zwei Ursachen anführen: Zum einen urteilen die Kinder im Allgemeinen mit einer gewissen Unsicherheit, und zum anderen unterscheiden sie sich untereinander in der Genauigkeit, mit der sie ihre Urteile abgeben können. Beide Effekte überlagern sich. In größerem Maße trägt zur Streuung der Punkte der Unterschied zwischen den Kindern bei. Die Werte folgen den Regressionsgeraden für einen einzelnen Probanden viel enger, als es nach dem Punkteschwarm in Abb. 25 den Anschein hat.

Die meisten Kinder wurden zu mehreren Zeitpunkten gemessen. Für jedes dieser Kinder wurde die persönliche Lernkurve durch eine Regressionsgerade approximiert. Mit deren Hilfe konnte berechnet werden, wann ein Kind seine Genauigkeit so weit gesteigert oder seine Unsicherheit so weit reduziert hatte, dass diese eine vorgegebene Schwelle



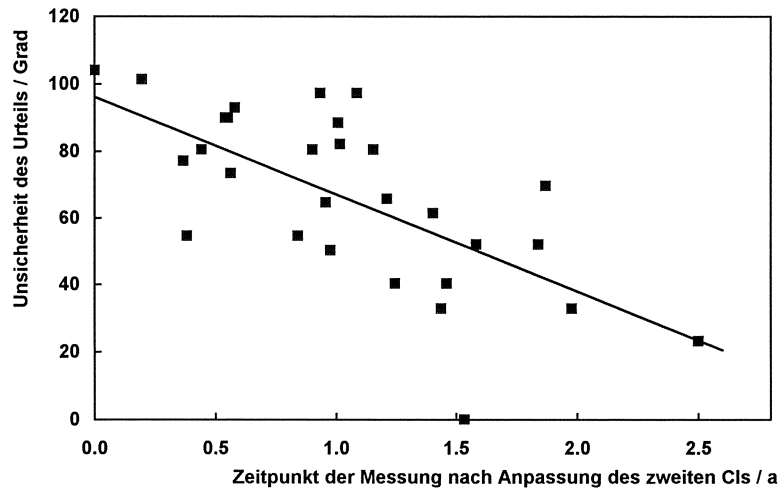


Abb. 25: Unsicherheit, mit der die Richtungsurteile in der Stichprobe abgegeben wurden, als Funktion der nach Implantation des zweiten CIs verstrichenen Zeit

unterschritt. Wegen des Kindes, das als erstes Richtungshören zeigte, wurde die Schwelle bei  $55^\circ$  angesetzt. Wie die offenen Quadrate in Abb. 23 zeigen, erhält man mit diesem Kriterium einen Anstieg der richtungshörenden Kinder als Funktion der Zeit, der mit dem früher gefundenen Verlauf, dem eine signifikante Korrelation zu Grunde lag, beinahe deckungsgleich ist.

Die für jedes Kind gerechneten Regressionsgeraden geben eine weitere nützliche Information. Die Steigung der Regressionsgeraden gibt an, wie schnell ein Kind dazulernte, seine Urteile präziserte. Abb. 26 zeigt für alle Kinder die individuellen Werte für die Abnahme der Unsicherheit pro Jahr. Für drei Kinder (K5, K8 und K22) lag nur eine Messung vor, so dass eine individuelle Schätzung ihrer Lernfortschritte nicht möglich war. Für diese Kinder wurde der beste zur Verfügung stehende Schätzwert, der Mittelwert aus allen Kindern, genommen. Insgesamt gingen in die gezeigten Auswertungen 30 Messungen ein.

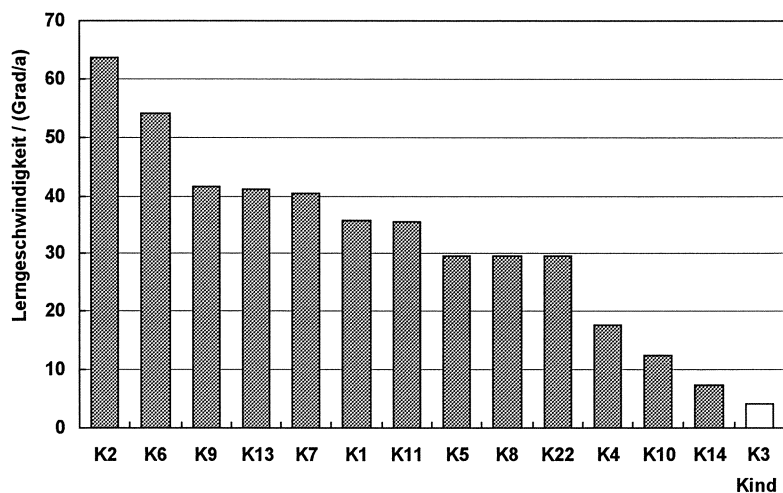


Abb. 26: Anfänglicher, auf das Jahr bezogener Zugewinn an Urteilssicherheit für die einzelnen Kinder

### Sicherheit des Urteils

In den vorhergehenden Abschnitten wurde die These aufgestellt, dass sich die Kinder auch hinsichtlich der Genauigkeit, mit der sie eine Schallquelle lokalisieren können, unterscheiden. Als Maß, wie sicher die Richtung einer Schallquelle angegeben werden konnte, diente die quadratisch gemittelte Differenz zwischen dem Urteil und dem wahren Ort der Schallquelle. Ein unmittelbarer Vergleich auf Grund der Messdaten ist nicht möglich, weil die Kinder hinzulernen und daher die Werte mit der Zeit im Durchschnitt immer kleiner werden. Für jedes Kind wurde daher eine individuelle Regressionsgerade bestimmt. Die in Abb. 27 dargestellten Werte wurden auf diese Weise für einen Zeitpunkt von zwei Jahren berechnet. Zu diesem Zeitpunkt konnten alle Kinder mit Ausnahme von Kind K3 richtungshören. Zu beobachten ist eine große Spannweite von etwa 10° bis 70° bzw. 90°. Auch zu Abb. 27 ist eine einschränkende Bemerkung zu machen. Wie bereits bemerkt, lag bei drei Kindern (K7, K8 und K9) nur eine Messung vor. Die für diese Kinder in Abb. 27 angegebenen Werte wurden daher mit einer mittleren Steigung berechnet, welche aus den Werten aller Kinder geschätzt

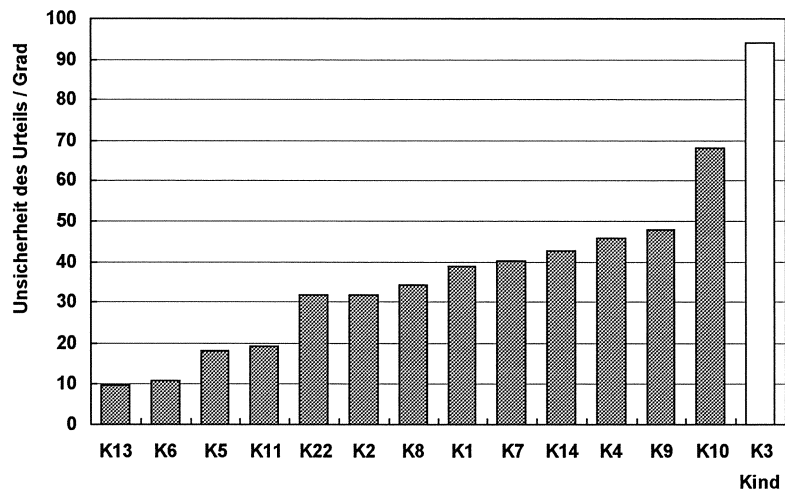


Abb. 27: Quadratisch gemittelte Abweichung der Urteile vom wahren Ort der Schallquelle zwei Jahre nach Anpassung des zweiten CIs.

wurde. Die Daten für diese drei Kinder sind auch hier mit der entsprechenden Zurückhaltung zu interpretieren.

## 6 Diskussion

Cochlea-Implantate wurden, seit sie Anfang der 70er Jahre breite klinische Anwendung fanden, kontinuierlich weiterentwickelt. Moderne CIs öffnen Tauben und Schwerhörigen, und insbesondere taub geborenen Kleinkindern, ein weites Tor in die Welt der Hörenden. Heute sind vielkanalige, intracochleäre Implantate und Hinter-dem-Ohr Sprachprozessoren (HdO) die Regel. Im Unterschied zu Hörgeräten wurden CI - Patienten standardmäßig einseitig versorgt.

Im Juli 1996 erhielt ein erwachsener Würzburger Patient ein zweites CI. Die positiven Erfahrungen dieses Patienten und der in der Folgezeit bilateral implantierten Erwachsenen führten dazu, dass im Januar 1998 erstmalig auch ein Kind beidseits mit CIs versorgt wurde. Der Gewinn für die Hör- und Sprachentwicklung durch das zweite CI war so überzeugend, dass sich viele Eltern, deren Kinder in der üblichen Weise nur einseitig implantiert worden waren, ein Zweitimplantat für ihr Kind wünschten.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die beidseitige CI-Versorgung taub geborenen Kindern darüber hinaus Richtungshören ermöglicht. Das beste Kind erreichte mit einer Unsicherheit des Urteils von  $10^\circ$  ein sehr gutes Ergebnis. Allerdings ist die Spannweite sehr groß: Beim schlechtesten, noch richtungshörend eingestuftem Kind wuchs die Unsicherheit auf ca.  $70^\circ$  an.

Die Studie zeigt auch, dass sich bei den prälingual ertaubten Kindern das Richtungshören mit der Zeit erst entwickelt. Von den 14 in der Laborsituation untersuchten Kindern konnten zum Abschluss der Untersuchungen 13 richtungshören. Dem entspricht eine geschätzte Wahrscheinlichkeit von 93 % mit einem 95 % - Vertrauensbereich von 66 % bis 99 %. Dagegen ließen die einseitig implantierten Kinder keinen Zusammenhang zwischen den Richtungsurteilen und den Lautsprecherpositionen erkennen. Die Ausnahme bildete ein Kind, das zusätzlich zum CI am anderen Ohr ein Hörgerät trug.

Die Ergebnisse bei Kindern ähneln denen von Erwachsenen (Schön 2002). Der Versuchsaufbau der Erwachsenen war jedoch anspruchsvoller. Die Erwachsenen wurden mit sieben Lautsprechern getestet. Ausgehend von den Erfahrungen und Ergebnissen dieser Studie scheint es sinnvoll, eine weitere Studie anzuschließen und die Kinder in der gleichen Weise wie die Erwachsenen, nämlich mit sieben Lautsprechern unter den Konditionen in der Camera silenta, zu testen.

Auch Nopp et al. (2002) fanden bei bilateral implantierten Erwachsenen ähnliche Ergebnisse. Sie untersuchten das Richtungshören mit neun Lautsprechern und variierten den Schalldruckpegel der Stimuli zwischen 60 und 80 dB.

Im Unterschied zur Hörgeräteversorgung, bei welcher die zweiseitige Versorgung seit langer Zeit Standard ist, war es nicht selbstverständlich Erwachsene und Kinder bilateral zu implantieren. Die bilaterale CI-Versorgung wird, obwohl sie mittlerweile wissenschaftlich allgemein akzeptiert ist, von den Krankenkassen nicht als Standardversorgung angesehen. Für die Krankenkassen stehen in Verkennung der Gesamtkosten einer Schwerhörigkeit die von ihnen zu tragenden Kosten im Vordergrund. Schulze-Gattermann et al. (2003) haben eine detaillierte Kosten-Nutzen-Analyse der Cochlea-Implantation bei Kindern erstellt. Sie verglichen Kinder, die mit Hörgeräten versorgt wurden, mit Kindern, die ein CI erhielten. Es zeigte sich, dass die frühe Cochlea-Implantation ein positives Kosten-Nutzen-Verhältnis im Vergleich zur Hörgeräteversorgung aufweist. Ein CI rechnet sich um so besser, je früher ein Kind implantiert wird. Schon aus Gründen der Kostenersparnis ist daher die frühe Implantation prälingual erlaubter Kinder zu empfehlen. In der Altersgruppe unter zwei Jahren ergaben sich Kostenersparnisse in Höhe von 13 Prozent der Gesamtausgaben (alle Kosten bis zum vollendeten 16. Lebensjahr) im Vergleich zu den Kindern mit Hörgeräteversorgung. Zwar stützt sich die Analyse auf die Kosten für Kinder mit nur einem CI, aber sie beinhaltet auch nur die anfallenden Kosten der ersten 16 Lebensjahre. In weiteren Analysen sollten neben der Schul- und Berufsausbildung auch die späteren beruflichen Entwicklungsmöglichkeiten berücksichtigt werden, weil die Konsequenzen für die Sozialsysteme in einer ganz anderen Größenordnung liegen dürften.

Als Argument gegen die bilaterale CI-Versorgung wird eingewendet, dass die Entwicklung der CIs beim heutigen Stand der Technik nicht Halt machen werde und auch in Zukunft mit innovativen Neuerungen zu rechnen sei. Man sollte daher eine Cochlea für diese zukünftigen Entwicklungen bewahren und unangetastet lassen. Schließlich sei auch mit einem CI ein hohes Maß an Sprachverständnis gewährleistet. Dieses Argument kann jedoch nicht überzeugen, da ein CI jederzeit und ohne Schwierigkeiten durch ein leistungsfähigeres ersetzt werden kann. Außerdem ist eine frühe Reizung des Hörnerven anzustreben, da nur auf diese Weise die sonst eintretende Deprivation verhindert werden kann.

Neben den objektiven und messbaren Unterschieden zwischen einer bilateralen und einer unilateralen Cochlea-Implantation sollte auch das Erleben der Betroffenen in die Betrachtungen mit einbezogen werden. Die subjektive Bewertung der Lebensqualität durch CI-Träger, Eltern betroffener Kinder, Phoniater und Therapeuten darf nicht übergangen werden. Aus den Gesprächen mit den Eltern der bilateral implantierten Kinder konnte man heraushören, dass ihre Kinder neue Qualitäten des Hörens entwickelt hätten. Dazu haben Winkler et al. (2002) den Würzburger Fragebogen zur Hörqualität bei CI-Kindern entwickelt. Dieser Fragebogen wurde von 28 Eltern bilateral implantierter Kinder beantwortet. Die Ergebnisse zeigten, dass die Eltern das Hören ihrer Kinder mit zwei CIs besser einschätzten als mit einem. Die Antworten von neun der elf Fragen weisen signifikante Unterschiede auf. Keine signifikanten Unterschiede zeigten sich bezüglich des Interesses am Hörtraining und der Lärmempfindung, d. h. Lärm wird mit zwei CIs ebenso störend empfunden wie mit einem. Die von den Eltern konstatierte Verbesserung des Hörens erstreckt sich – bei qualitativer Interpretation der Daten – auf die Etablierung bzw. Erleichterung des Richtungshörens und das bessere Verstehen bei Lärm durch den Einsatz effektiver Hörstrategien.

Es gibt bereits eine Vielzahl an Untersuchungen, die durch objektive Messverfahren die Hör- und Sprachentwicklung bei bilateralen Kindern und Erwachsenen beurteilen. Beispielsweise untersuchte Shehata-Dieler et al. (2002) das Sprachverständnis im Störlärm bei bilateral implantierten Kindern. Die Ergebnisse zeigten, dass die Gruppe der Kinder mit zwei CIs signifikant besser verstanden hat als die Gruppe mit einem CI.

Die vorliegende Arbeit bietet mit ihren Messdaten zum Thema Richtungshören eine weitere Entscheidungshilfe, ob eine uni- oder bilaterale CI-Versorgung tauber Personen angestrebt werden soll.

### **6.1 Entwicklung des Richtungshörens**

In den Studien von Gantz et al. (2002), Van Hoesel et al. (1997), Schön et al. (2002), Laback et al. (2002), Nopp et al. (2002), Seeber et al. (2002) und Lenarz et al. (2002) wurde unter anderem das Richtungshören bei bilateral implantierten Erwachsenen untersucht. Verallgemeinernd kann man erwachsenen CI-Nutzern die Fähigkeit zum Richtungshören zusprechen. Da die untersuchten Personen in der Mehrzahl bis ins Erwachsenenalter normal hörend waren, kann man davon ausgehen, dass sie vor ihrer Ertau-

bung richtungshören konnten. Durch die Benutzung von zwei CIs konnten sie eine vorhandene Fähigkeit wieder reaktivieren.

Eine andere Situation liegt bei prälingual ertaubten Kindern vor. Hier stellt sich die Frage, ob und wenn ja, wie lange es dauert, bis sich Richtungshören entwickelt. Mit Blick auf diese Fragestellung wurden die Kinder der Experimentalgruppen mehreren Messungen im Verlauf eines Jahres unterzogen. Die beiden Messzeiträume, in denen die Tests durchgeführt wurden, erstreckten sich in der Hauptsache von Juni bis Dezember 1999 und von Mai bis Juli 2000. Betrachtet man die Ergebnisse, die in der Laborsituation erzielt wurden, so konnten 13 von 14 untersuchten Kindern am Ende des Untersuchungszeitraums nach dem angewandten Kriterium Richtungshören zugebilligt werden. Das verbliebene Kind (K3) lieferte auch zwei Jahre nach Anpassung des zweiten CIs noch negative Testergebnisse. Der Anamnese des Kindes konnte man entnehmen, dass es bis zur Implantation des ersten CIs mit 3;5 Jahren Hörgeräte trug, aber daraus praktisch keinen Nutzen ziehen konnte: Das Kind hatte keinerlei Lautsprache entwickelt und verständigte sich ausschließlich über Gebärdensprache. In der präoperativen Diagnostik wurden zudem gravierende, sprachentwicklungshemmende Teilleistungsstörungen deutlich. Das Kind zeigte eine schwere sensorische und motorische Dyspraxie insbesondere im Mundbereich, Dysrhythmie und eine Gedächtnisschwäche sowie eine Aufmerksamkeits-, Programm- und Handlungssteuerungsstörung, wie dem Abschlussbericht des CIC Süd entnommen werden konnte. Auf Grund dieser ungünstigen Voraussetzungen schritt die Sprachentwicklung auch mit dem CI nur sehr langsam voran.

Von den 13 Kindern, die auf Grund der Tests am Ende des Untersuchungszeitraums als richtungshörend eingestuft wurden, fielen bei sieben Kindern die Tests zu Beginn der Untersuchung negativ aus. Auch von Kind K11 war aus anderen Untersuchungen bekannt, dass es nach Anpassung des zweiten CIs zunächst nicht fähig war, korrekt zu urteilen. Da zwischen den einzelnen Tests ein zeitlicher Abstand von mehreren Monaten lag, kann ausgeschlossen werden, dass die Kinder aus dem ersten Test so viel Wissen übertragen haben, dass sie die späteren Tests mit einem positiven Ergebnis absolvieren konnten. Daher wird die Alternativhypothese als richtig erkannt: Während des Beobachtungszeitraumes entwickelten die Kinder ihre Fähigkeit zum Richtungshören derart weiter, dass sie die späteren Tests mit positivem Ergebnis bestehen konnten.

Außerdem wurde sichtbar, dass die Kinder mit der Zeit sicherer und mit größerer Genauigkeit urteilen konnten. Die in Abb. 25 gezeigte Unsicherheit des Urteils wurde um so kleiner, je länger die Kinder das CI trugen.

Die Kinder K22, K13 und K14 zeigen in der Laborsituation bereits sehr früh die Fähigkeit zum Richtungshören, nämlich bei den Messungen knapp vor und nach einem halben Jahr. Für diese Kinder lässt sich nicht ausschließen, dass sie bereits Schallquellen lokalisieren konnten, bevor sie die Implantate bekommen hatten. Diese Vermutung wird durch die Anamnesen der Kinder gestützt. Kind K22 erlaubte erst im Alter von ca. einem Jahr nach mehreren Infektionen mit hohem Fieber. Es sprach zu dieser Zeit bereits in Zweiwortverbindungen. Mit 13 Monaten erhielt es Hörgeräte und nahm an Frühfördermaßnahmen teil. Das Hörsystem und der auditorische Kortex konnten bis zum ersten Lebensjahr heranreifen. Gleich nach der Implantation des ersten CIs entwickelte sich die Lautsprache weiter.

Die Mütter von Kind K13 und K14 erkrankten während der Schwangerschaft an einer Röteln- bzw. einer CMV-Infektion. Die Neugeborenen wurden daher auf spezielle Behinderungen untersucht: So konnte bei beiden Kindern die hochgradige Schwerhörigkeit jeweils sehr früh diagnostiziert werden. Kind K13 bekam bereits mit neun Monaten Hörgeräte, Kind K14 mit zwölf Monaten. Laut Anamnese profitierten beide von ihren Hörgeräten. Es ist daher wahrscheinlich, dass auch sie bereits vor der Implantation des zweiten CIs die Fähigkeit zum Richtungshören, vielleicht auch nur partiell, ausgebildet hatten.

Die beiden Kinder K5 und K8 konnten nur einmal getestet werden. Zum Testzeitpunkt trugen sie das zweite CI schon ein Jahr oder länger. Beide konnten zum Messzeitpunkt richtungshören. Sie tragen daher nicht zu der Entscheidung bei, ob die These, dass taub geborene Kinder mit dem CI Richtungshören erst im Lauf der Zeit erwerben, beibehalten werden kann.

Keines der Kinder mit einem CI zeigte richtungshören, weder in der Labor- noch in der alltagsnahen Situation. Die längste Tragezeit betrug vier Jahre (Kinder K15 und K25). Trotzdem kann aus dieser beachtlichen Zeitspanne nicht geschlossen werden, dass prälingual erlaubte Kinder auch mit nur einem CI kein richtungshören entwickeln können. Möglicherweise benötigen sie erheblich mehr Zeit. Um die Frage zu klären, sollten weitere Untersuchungen folgen.



Die Studie von Slattery et al. (1993) zeigt, dass Richtungshören mit einem Ohr durchaus möglich ist. Auch bei einseitig implantierten erwachsenen CI-Trägern konnte die Arbeitsgruppe um Luntz et al. (2002) Richtungshören nachweisen.

## **6.2 Implantationsalter**

Wegen der größeren Plastizität des Gehirns im frühen Kindesalter sollten gehörlose Kinder möglichst frühzeitig implantiert werden. Die unten angeführten Studien weisen eindrucksvoll nach, dass zwischen dem Grad der akustischen Rehabilitation und dem Implantationszeitpunkt eine direkte Abhängigkeit besteht. Die Resultate waren besonders günstig, wenn bereits im zweiten Lebensjahr implantiert werden konnte (Strutz 2000). Schulze-Gattermann (2003) teilte seine Stichprobe der prälingual ertaubten Kinder nach dem Alter bei Implantation in drei Gruppen ein. Die Kinder der ersten Gruppe wurden in einem Alter zwischen 0 und < 2 Jahren implantiert, die der zweiten Gruppe zwischen 2 und < 4 und die der dritten Gruppe zwischen 4 und < 7 Jahren. Die Studie zeigt, dass die frühzeitig implantierten Kinder, die Kinder in Gruppe 1, zu 63 Prozent einen Regelkindergarten und zu 69 Prozent eine Regelschule besuchten. Schlechter schnitten die Kinder der anderen Gruppen ab. In Gruppe 2 konnten nur 24 % und in Gruppe 3 nur 18 % einen Regelkindergarten besuchen. Den Besuch einer Regelschule schafften nur 29 % aus Gruppe 2 und 14 % aus Gruppe 3.

Auch bei perilingualer Taubheit sollte möglichst bald nach Eintritt der Ertaubung die Cochlea-Implantation vorgenommen werden, um die Phase auditorischer Deprivation so kurz und deren Folgen so gering wie möglich zu halten. (Lenarz 1998).

Nopp (2002) testete die Fähigkeit zum Richtungshören bei 20 im Erwachsenenalter bilateral implantierten Personen. Davon konnten 18 mit beiden Implantaten richtungshören. Zwei Teilnehmer, die dazu nicht in der Lage waren, ertaubten vor dem sechsten Lebensjahr, während die anderen erst nach diesem Zeitpunkt ertaubt waren. Nopp schloss daraus, dass Kinder, die vor ihrem sechsten Lebensjahr ertaubt sind und erst im mittleren oder hohen Lebensalter bilateral implantiert werden, für das Richtungshören keinen Nutzen aus der bilateralen Versorgung ziehen können.

Die Daten unserer Studie liefern keine Hinweise, dass die Sicherheit, mit der die Richtung einer Schallquelle angegeben werden konnte, durch das Implantationsalter beeinflusst worden wäre. Damit ist nicht gesagt, dass ein solcher Zusammenhang nicht

vorliegen könnte, sondern nur, dass er nicht beobachtet werden konnte. Ähnlich, wie sich dies bei der Sprachverständlichkeit zeigt, beobachtet man auch beim Richtungshören große Unterschiede zwischen den Kindern (Abb. 27). Möglicherweise wirken sich die unterschiedlichen Krankheitsverläufe, welche die Kinder durchlebt haben, auf das Richtungshören gravierender aus als der Einfluss des Implantationsalters. Tab. 1 zeigt die Daten der 14 bilateral implantierten Kinder in unserer Studie. Aufgeführt wird das Implantationsalter bei Erst- und Zweitimplantation und die

Tab. 1:

Kind	Alter bei 1. Implantation <i>Jahr ; Monat</i>	Alter bei 2. Implantation <i>Jahr ; Monat</i>	Zeitdauer A <i>Jahr ; Monat</i>	Zeitdauer B <i>Jahr ; Monat</i>
9	3;0	3;9	-	1;9
11	2;0	3;10	1;5	1;5
5	2;5	3;10	0;7	1;2
7	3;8	4;8	-	1;5
22	3;5	5;3	-	0;5
2	4;2	6;0	-	1;10
13	5;4	6;1	-	0;3
3	3;5	6;5	-	-
4	4;1	6;6	-	0;9
6	6;0	6;10	-	1;4
10	3;4	7;1	-	0;9
1	5;8	7;4	1;1	1;1
14	6;11	7;4	0;11	0;3
8	4;8	8;0	-	0;10

Zeitdauer A: Dauer bis zum Nachweis des Richtungshörens in der Alltagssituation  
 Zeitdauer B: Dauer bis zum Nachweis des Richtungshörens in der Laborsituation

Zeitspanne bis nach der Zweitimplantation Richtungshören festgestellt wurde. Die Tabelle ist nach dem Alter zum Zeitpunkt der Zweitimplantation sortiert. Bis zu einem Implantationsalter von acht Jahren bei Implantation des zweiten CIs haben 13 der untersuchten Kinder die Fähigkeit zum Richtungshören gezeigt. Wie die Tabelle zeigt, variieren die Tragezeiten unsystematisch mit dem Implantationsalter, so dass ein enger Zusammenhang ausgeschlossen werden kann.

### **6.3 Vergleich mit anderen Arbeiten**

Der Versuch, Daten zum Richtungshören aus unterschiedlichen Zentren miteinander zu vergleichen, stößt auf eine Problematik, auf die Fitzgerald (2002) hingewiesen hat. Es fehlt an einheitlichen, standardisierten Messanordnungen zur Untersuchung des Richtungshörens.

Während bei Erwachsenen eine Vielzahl von Methoden zur Quantifizierung und qualitativen Bewertung des Richtungshörens verwendet werden, findet man in der Literatur nur wenige Untersuchungen mit Kleinkindern und Kindern. Die beiden Studien von Senn et al. (2002) und von Litovsky (1997), bei denen der minimale Hörwinkel bei Kindern gemessen wurde, sind bereits in der Einleitung genannt worden. Senn et al. die mit CI-Kindern arbeiteten, konnten bei vier der sieben Kinder mit ihrer Versuchsanordnung keine positiven Ergebnisse erzielen.

Auch wir stellten während der Pilotphase fest, dass die Kinder, die schlecht oder gar nicht richtungshören konnten, schwer zu motivieren waren. Ein ähnliches Verhalten konnte auch bei Untersuchungen mit Sprachtests beobachtet werden. Kinder, die bei ruhiger Umgebung engagiert mitmachten, kündigten, wenn im Störlärm das Verstehen schwieriger wurde, ihre Mitarbeit sofort auf. Dieses ablehnende Verhalten bei Anforderungen, die nur unzureichend aufgefangen werden konnte, mag teilweise damit zusammenhängen, dass die Kinder spürten, welche großen Erwartungen die Eltern mit dem CI verknüpften. Möglicherweise fürchteten sie, dass schlechte Leistungen mit dem CI die guten Beziehungen zu den Eltern unterlaufen könnten.

Die Anforderungen an den Test waren hoch: Zum einen durfte er nicht viel Zeit in Anspruch nehmen und musste einfach durchführbar sein, auf der anderen Seite sollte er statistisch aussagefähige Ergebnisse liefern. Auf Grund der Erfahrungen aus der Pilotphase wurde jeder Stimulus der alltagsnahen Situation viermal und in der Laborsituation fünfmal wiederholt. Zusammen mit drei Lautsprecherpositionen in der Horizontalebene waren die Kinder damit im Allgemeinen nicht überfordert.

### **6.4 Vergleich der Ergebnisse in der Alltags- und Laborsituation**

Die beiden Untersuchungsmethoden lieferten bei den bilateral implantierten Kindern deutlich unterschiedliche Ergebnisse, wie aus den Abb. 14 und Abb. 23 zu ersehen ist:

Am Ende des Untersuchungszeitraums zeigten drei von 14 Kindern Richtungshören in der alltagsnahen Testsituation und 13 von 14 Kinder in der Laborsituation. Auch für die normal hörenden Kinder fielen die Ergebnisse abhängig von der Untersuchungsmethode unterschiedlich aus: Während neun von zehn Kindern in der Laborsituation den Test fehlerfrei absolvierten, waren es im Kindergarten nur sechs von 13. Nach den zu Grunde liegenden Testkriterien konnte sogar einem als normal hörend eingestuftem Kind kein Richtungshören zugebilligt werden. Es war mit drei Jahren gleichzeitig das jüngste der im Kindergarten getesteten Kindern.

Die Testsituation im CIC Süd und im Kindergarten in Lengfeld ist mit einer ganz normalen Schul- oder Kindergartensituation vergleichbar. So war das Untersuchungsraum nicht reflexionsarm ausgekleidet und, da die Untersuchung in kleinen Gruppen stattfand, auch nicht ruhig. Die Störgeräusche erschwerten das Richtungshören und wegen des anwesenden Publikums fiel es den Probanden nicht leicht, sich auf den Schallreiz zu konzentrieren. Sie standen gegenüber den anderen in der Runde unter der Erwartungshaltung, etwas leisten zu müssen. Dieser Druck ließ sich nicht ganz abbauen, auch wenn darauf geachtet wurde, der Testsituation einen spielerischen Charakter zu geben. Den Kindern war immer bewusst, dass sie geprüft wurden. Hinzu kam, dass immer wenn mehrere hintereinander getestet wurden, einige warten mussten, bis sie an der Reihe waren, untersucht zu werden.

Diese unkontrollierbaren Einflüsse scheinen mit zu den Unterschieden, welche zu den Messungen in der Laborsituation bestehen, beigetragen zu haben. Die Ergebnisse erwiesen sich als weniger reproduzierbar als in der Laborsituation. Im Graphen der Abb. 14 spiegelt sich dies durch eine häufige Auf- und Abbewegung wider. Im gleichen Sinne zu interpretieren ist die Tatsache, dass der Graph nur ein Niveau von drei richtungshörenden Kindern erreicht, obwohl zu den einzelnen Testzeitpunkten insgesamt acht der 14 Kinder als Zeichen für ein vorhandenes Richtungshören eine signifikante Korrelation zeigten. Im Unterschied dazu wächst der Graph in Abb. 23, der die in der Laborsituation gewonnenen Daten wiedergibt, monoton.

Die Messungen in der Laborsituation wurden in einem störgeräuschfreien und reflexionsarmen Raum durchgeführt. Diese Bedingungen entsprechen nicht dem Alltag, wie ihn die Kinder erleben. Die Untersuchungssituation kann als idealisiert gelten. Wenn also die bilateral implantierten Kinder in der Camera silenta die Fähigkeit zum

Richtungshören zeigten, bedeutet dies nicht unbedingt, dass Gleiches für die erschwerten Bedingungen im Alltag auch gilt. Andererseits berichteten fast alle Eltern, dass sie auf Grund des Verhaltens ihrer Kinder überzeugt sind, dass diese auch zu Hause und auf der Straße Schallquellen gut lokalisieren können.

### **6.5 Kinder mit einem CI und einem Hörgerät**

Nur zwei von zehn einseitig implantierten Kindern trugen zur Zeit der Untersuchungen zu ihrem CI auf der nicht implantierten Seite noch ein Hörgerät. Da sie die Hörgeräte weiterhin freiwillig trugen, kann unterstellt werden, dass sie von ihrem Hörgerät profitierten. Die Ergebnisse im Richtungshören fielen jedoch sehr unterschiedlich aus: Während Kind K21 auch nach zwei Jahren kein Richtungshören zeigte, konnte Kind K24 bereits nach drei Monaten in der Alltagssituation und nach 13 Monaten in der Laborsituation richtungshören. Ohne Hörgerät, mit dem CI alleine getestet, zeigte sich jedoch kein Richtungshören. Diese Ergebnisse lassen sich gut in die Untersuchungsergebnisse der Arbeitsgruppe um Tyler einordnen (Tyler et al., 2002). Sie fanden, dass die kombinierte Nutzung von CI und Hörgerät beim Richtungshören und beim Hören unter Störlärm deutliche Vorteile bringen kann, jedoch nicht bei allen Testpersonen. Wenn der Hörnerv auf der einen Seite durch ein CI elektrisch gereizt wird und auf der anderen Seite eine akustische Stimulation durch ein Hörgerät erfolgt, kann die Art der erhaltenen Information und die Art, in welcher sie zur Hörrinde des Gehirns weitergeleitet wird, sich potenziell unterscheiden. Das mag eine größere Herausforderung für das hörverarbeitende System des Gehirns sein als bei binauraler Hörgeräte- oder binauraler CI-Versorgung. Tyler et al. meinen, dass durch eine bessere Koordination der beiden Systeme die Leistungsfähigkeit für das Hören noch gesteigert werden könnte.

Ching et al. (2001) setzen sich ebenfalls mit der Frage auseinander, ob man CI und Hörgerät kombiniert tragen sollte. Sie nennen zwei Gründe, warum Kinder, die auf der nicht implantierten Seite noch über Hörreste verfügen, ein Hörgerät tragen sollten: Eine wahrgenommene Stimulation auf der nicht implantierten Seite, und sei sie noch so klein, würde einer Deprivation der Hörbahn entgegenwirken können; bilaterales Hören würde Vorteile in Bezug auf Sprachverstehen und Lokalisation bieten. Sie belegen diese Aussagen durch Ergebnisse aus verschiedenen Versuchsreihen zum Richtungshören und

Sprachverständnis. An den Untersuchungen nahmen 16 Kinder und Jugendliche, die zwischen sechs und 18 Jahren alt waren, teil. Alle waren mit einem CI auf der einen Seite und einem Hörgerät auf der anderen Seite versorgt. Die Probanden schnitten mindestens in einem der Tests mit Hörgerät und CI besser ab als mit dem CI alleine.

In jenen Fällen, in denen das Hörgerät kaum bzw. keinen Nutzen bringt, ist nicht zu erwarten, dass die kombinierte Anwendung von CI und Hörgerät von Vorteil sein wird. Es hängt sicherlich von den noch vorhandenen Hörresten am nicht implantierten Ohr ab, ob ein Hörgerät getragen werden sollte. Doch selbst bei minimalem Hörrest und einem gewissen Nutzen eines zusätzlich getragenen Hörgerätes ist abzuwägen, ob nicht ein zweites CI für die Entwicklung des Kindes vorteilhafter, und daher dem Hörgerät vorzuziehen wäre.

## 7 Zusammenfassung

Das Cochlea-Implantat eröffnet gehörlos geborenen Kindern deutlich erweiterte und verbesserte Möglichkeiten des Hörens. CIs ermöglichen die Integration in eine akustisch orientierte Umwelt. Standardmäßig werden heutzutage Patienten unilateral mit nur einem CI versorgt. Mit modernen Geräten lässt sich auch damit eine sehr gute Hör- und Sprachentwicklung erreichen.

Binaurale Signalverarbeitungsprozesse ermöglichen räumliches Hören und erleichtern die Kommunikation unter Störschalleinfluss. Folglich geht der unilaterale Gebrauch eines CIs mit Einschränkungen einher: Sprache in lärmerfüllter Umgebung wird weniger gut verstanden, und der Ort von Schallquellen kann nur unsicher, überhaupt nicht oder, was für den Betroffenen fatale Folgen haben kann, falsch wahrgenommen werden.

Um binaurales Hören und die damit verbundenen Vorteile für das Hören und die Entwicklung der Lautsprache auch CI-Trägern zu ermöglichen, werden seit 1996 an der Universität Würzburg Patienten bilateral versorgt. Anfänglich wurden nur Erwachsene bilateral implantiert, mittlerweile erhalten überwiegend Kinder zwei Cochlea-Implantate.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Richtungshörvermögen bei CI-Kindern untersucht. Die Leistungen von bilateral implantierten Kindern wurden mit denen von Normalhörenden und unilateral implantierten Kindern verglichen. Das CI-Kollektiv bestand aus 25 Kindern, von denen 15 bilateral und zehn unilateral implantiert worden waren.

Um Aspekte des Hörverhaltens in Alltagssituationen zu berücksichtigen, wurden die Kinder in einer entsprechenden Versuchsanordnung im Rehabilitationszentrum CIC Süd Würzburg getestet. Sie befanden sich während der Untersuchung mit mehreren Personen in einem nicht speziell präparierten Übungsraum. In einer zweiten Testanordnung sollten Fehlermöglichkeiten und Störfaktoren so weit wie möglich minimiert werden. Diese Untersuchungen wurden in der Camera silenta der HNO-Klinik Würzburg durchgeführt. Ein weiterer Unterschied zum CIC Süd bestand darin, dass sich während der Untersuchung außer dem Kind nur noch der Versuchsleiter und eine Bezugsperson, meist die Mutter, im Raum befanden.

Sowohl im CIC Süd, als auch in der Klinik wurde den Kindern mehrmals ein akustischer Stimulus aus drei unterschiedlichen Richtungen (rechts, links und vorne) vorgespielt. Die Aufgabe der Kinder bestand darin, die wahrgenommene Schalleinfallrichtung anzugeben. Die Tests wurden im Verlauf des Untersuchungszeitraumes von einem Jahr mehrmals wiederholt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Fähigkeit zum Richtungshören heranreife, wie das auch bei anderen Fähigkeiten der Fall ist, wenn die Kinder heranwachsen.

In der Referenzgruppe befanden sich 23 normal hörende Kinder. Sie zeigten mit einer Ausnahme Richtungshören in beiden Untersuchungsanordnungen.

Von den zehn Kindern mit einem CI zeigte keines wiederholbar signifikantes Richtungshören, weder in der alltagsorientierten noch in der Laborsituation. Die Tragezeiten der CIs lagen zwischen drei Monaten und vier Jahren.

Bei der Durchführung der Tests am CIC Süd wurden nur drei von insgesamt 14, mit zwei CIs getesteten Kinder als richtungshörend eingestuft. Die Ergebnisse der Camera silenta zeigten ein signifikantes Richtungshören bei 13 der 14 untersuchten bilateral implantierten Kinder. Die deutlich schlechteren Ergebnisse im CIC Süd im Vergleich zu denen in der Camera silenta werden einer erschwerten Untersuchungssituation im CIC Süd zugeschrieben.

Unter den Versuchsbedingungen der Camera silenta nahm im Verlauf des Messzeitraums von einem Jahr die Zahl der Kinder, bei denen Richtungshören im Verlauf der Studie sichtbar wurde, kontinuierlich zu. Obwohl die Kinder prälingual ertaubt waren, erlernten sie nach der Implantation des zweiten CIs mit unterschiedlicher Verzögerung Richtungshören. Parallel dazu urteilten die Kinder mit der Zeit immer sicherer. Sie erreichten im Laufe der Zeit eine zunehmend größerer Perfektion.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die bilaterale CI-Versorgung prä- und perilingual ertaubten Kindern Richtungshören ermöglicht. Bilateral implantierte Kinder haben gegenüber den nur einseitig implantierten in dieser Beziehung einen Vorteil.



## 8 Tabellarischer Anhang

Tab. 1: Daten der bilateral implantierten Kinder

<b>Kind</b>	<b>Alter bei Erstimplantation (Jahr; Monat)</b>	<b>Alter bei Zweitimplantation</b>	<b>Zeitspanne zwischen beiden Implantationen</b>
K1	5;8	7;4	1;8
K2	4;2	6;0	1;10
K3	3;5	6;5	3;0
K4	4;1	6;6	2;5
K5	2;5	3;10	1;5
K6	6;0	6;10	0;10
K7	3;8	4;8	1;0
K8	4;8	8;0	3;4
K9	3;0	3;9	0;9
K10	3;4	7;1	3;9
K11	2;0	3;10	1;10
K12	2;4	3;8	1;4
K13	5;4	6;1	0;9
K14	6;11	7;4	0;5
K22	3;5	5;3	1;10

Tab. 2: Ätiologie, Teilleistungsstörungen und Sprachentwicklung bis zur Cochlea-Implantation der bilateral implantierten Kinder

<b>Kind</b>	<b>Ätiologie</b>	<b>Sprachentwicklung vor Cochlea-Implantation</b>	<b>Teilleistungsstörungen</b>
K1	Unbekannt	bis 50 Wörter	∅
K2	Unbekannt	bis 30 Wörter	Gedächtnis- und Rhythmusstörung
K3	Unbekannt	∅, nur Körpersprache	schwere sensorische und motorische Dyspraxie, Dysrhythmie
K4	Unbekannt	∅, Kommunikation durch Schreien + Körperkontakt	Aufmerksamkeits-, Programm- und Handlungssteuerungsstörung, Dyspraxiesyndrom
K5	Unbekannt	∅, nur Körpersprache	multiple Dyslalie, Dysgrammatismus
K6	Unbekannt	kleiner Wortschatz	partielle Dyslalie, Dysgrammatismus
K7	Meningitis mit 3;4 Jahren	normale Sprachentwicklung	∅
K8	Unbekannt	?	partielle Dyslalie
K9	Unbekannt	wenige Wörter	multiple Dyslalie, Dysgrammatismus
K10	Unbekannt	ca. 5 Wörter	Dyspraxiesyndrom
K11	Unbekannt	∅	∅
K12	Unbekannt	∅	universelle Dyslalie, Agrammatismus, Aufmerksamkeitsstörung
K13	CMV-Infektion in SS	∅	?
K14	Röteln-Infektion in SS	kleiner Wortschatz	?
K22	Fieber mit einem Jahr	2 Wörter und Körpersprache	motorische und sensorische Bewegungsstörung

Tab. 3: Daten der unilateral implantierten Kinder

<b>Kind</b>	<b>Alter bei Implantation</b>
K15	5;8
K16	3;3
K17	7;1
K18	6;6
K19	4;8
K20	3;11
K21	7;10
K23	5;8
K24	4;7
K25	1;9

Tab. 4: Ätiologie, Sprachentwicklung und Teilleistungsstörungen der unilateral implantierten Kinder, festgestellt vor der Cochlea-Implantation

<b>Kind</b>	<b>Ätiologie</b>	<b>Sprachentwicklung vor Cochlea-Implantation</b>	<b>Teilleistungsstörungen</b>
K15	unbekannt	wenige Worte	Dyspraxie, Anpassungsstörung, Handlungssteuerungsprobleme
K16	unbekannt	∅	kurze Konzentrationsspanne
K17	unbekannt	∅	universelle Dyslalie und Dysgrammatismus
K18	unbekannt	kleiner Wortschatz Mundablesen	Schwächen in allen Gedächtnismodalitäten und in der Sprachrhythmik
K19	unbekannt	kleiner Wortschatz Gebärdensprache	multiple Dyslalie, Dysgrammatismus
K20	unbekannt	bis 2,5 Jahre normale Sprachentwicklung	mundmotor. Koordinations- und Visusmotorikstörung
K21	unbekannt	∅	leichter Dysgrammatismus, Mundmotorik und Artikulationsstörung
K23	unbekannt	∅	Dyspraxie, Kurzzeitgedächtnisstörung
K24	unbekannt	∅	Dysgrammatismus, eingeschränktes Wortschatzgedächtnis
K25	Meningitis mit 5 Monaten	∅	kurze Konzentrationsspanne, Dyspraxie, Dysrhythmie

## 9 Literaturverzeichnis

- Baschek V. (1978): Die Untersuchung des Richtungshörens mittels modifiziertem  
Kunstkopf-Übertragungssystem. HNO; 26: 353-359
- Batteau D.W. (1967): The role of the pinna in human localization. Proc. Roy. Soc.  
London; Series B 168: 158-180
- Beckmann G. (1973): Hörstörungen im Kindesalter: Ätiologie und Diagnostik. In:  
Biesolski P., Böhme G., Frank F., Luchsinger R. (Hrsg.): Phoniatrie und  
Päaudiologie. Georg Thieme, Stuttgart; S. 253-276
- Blauert J. (1974): Räumliches Hören. S. Hirzel, Stuttgart; S. 177-188
- Blauert J. (1983): Spatial hearing: The psychophysics of human sound localization.  
Cambridge MA: MIT press
- Bloch E. (1893): Das binaurale Hören. Z. Ohren-Nasen-Kehlkopfheilk.; 24: 25-83
- Cherry E. C., Taylor W. K. (1954): Some further experiments upon recognition of  
speech, with one and with two ears. J. Acoust. Soc. Am.; 26: 554-559
- Ching T., Psarros C., Hill M., Dillon H., Incerti P. (2001): Should children who use  
Cochlear Implants wear hearing aids in the opposite ear?  
Ear and Hearing; 22: 365-380
- Dermody P., Byrne D. (1975): Auditory localisation by hearing-impaired persons using  
binaural In-The-Ear hearing aids. British Journal of Audiology; 9: 93-101
- Diller G. (1997): Hören mit einem Cochlear-Implant. Edition Schindele; S: 9-10
- Djourno A., Eyries C. (1957): Prothèse auditive par excitation électrique à distance du  
nerf sensoriel à l'aide d'un bobinage inclus à demeure. Presse Med; 65: 14-17
- Fitzgerald H., Schön F., Senn P., Nopp P. (2002): A comparison of methods used for  
localisation testing of bilateral CI users in European anechoic chambers.  
Proceedings of the 3rd International Conference on Bilateral Cochlear Implants  
and Binaural Signal Processing; S.41

- Gantz B., Tyler R., Rubinstein J. (2002): Binaural Cochlear Implants placed during the same operation. *Otology and Neurootology*; 23: 169-180
- Gibson W.P.R. (1987): Cochlear implants. In: John B. Booth (Hrsg.): *Scott-Brown's Otology*; 25: 602-617
- Häusler R., Colburn S., Marn E. (1983): Sound localization in subjects with impaired hearing. *Acta Otolaryngol (Stockh.)*; 400: 1-62
- House W.F. (1976): Opposition to the cochlear implant in deaf children. *Otolaryngologic Clinics of North America*; 19: 275-286
- Humes L.E. (1994): Psychoacoustic consideration in clinical audiology. In: Katz J. (Hrsg.): *Handbook of Clinical Audiology*; 5: 56-72
- Jones R., Stevens S., Lurie M. (1940): Three mechanisms of hearing by electrical stimulation. *J. Acoust. Soc. Am.*; 12: 281-290
- Klemm O. (1920): Untersuchungen über die Lokalisation von Schallreizen IV: Über den Einfluß des binauralen Zeitunterschiedes auf die Lokalisation. *Arch. ges. Psychol.*; 40: 117-145
- Klinke R. (1996): Physiologische Grundlagen des Cochlea Implantates. In: Diller G., Gall V., Illberg C., Kiefer J. (Hrsg.): *Neue Entwicklungen in der Diagnostik, Therapie und Technik. 2. Fiedberger Cochlear-Implantat-Symposium*; S. 45-48
- Klinke R. (1997): Hören als zentralnervöser Verarbeitungsprozeß. *Hörpäd*; 51: 355-370
- Klinke R., Kral A., Hartmann R. (2001): Sprachanbahnung über elektronische Ohren – So früh wie möglich. *Dt Ärztebl*; 98: A3049-3052
- Laback B., Pok S., Schmid K., Deutsch W., Baumgartner W. (2002): Binaural processing capabilities of two bilateral cochlear implant users. *Proceedings of the 3rd International Conference on Bilateral Cochlear Implants and Binaural Signal Processing*; S.32

- Lehnhardt E. (1960): Über das Richtungshören des Menschen. Elektroakustische Versuche mit kleinsten Zeitdifferenzen. HNO; 8: 353-357
- Lehnhardt E. (1998): Entwicklung des Cochlea-Implantats und das Cochlea-Implantat-Projekt in Hannover. In: Lenarz T. (Hrsg.): Cochlea-Implantat - Ein praktischer Leitfaden für die Versorgung von Kindern und Erwachsenen. Springer, Berlin, Heidelberg; S. 1-8
- Lenarz T. (1998): Cochlea-Implantate – Physiologische Grundlagen und klinische Anwendung. In: Lenarz T. (Hrsg.): Cochlea-Implantat, ein praktischer Leitfaden für die Versorgung von Kindern und Erwachsenen. Springer, Berlin, Heidelberg; S. 9-51
- Lenarz T., Lesinski-Schiedat A., Zacharias R., Battmer R. (2002): Bilateral cochlear implantation prospective study adult patients. Proceedings of the 3rd International Conference on Bilateral Cochlear Implants and Binaural Signal Processing; S.52
- Lindenberger M., Strutz J. (2001): Innenohr. In: Strutz J., Mann W. (Hrsg.): Praxis der HNO- Heilkunde, Kopf- und Halschirurgie. Georg Thieme, Stuttgart; S. 18-25
- Litovsky R. (1997): Developmental changes in the precedence effect: estimates of minimum audible angle. J. Acoust. Soc. Am.; 3: 1739-1745
- Luntz M., Brodsky A., Hafner H., Shpak T., Feiglin H., Pratt H. (2002): Sound localization in patients with cochlear implant – preliminary results. Int. J. Pediatric Otorhinolaryngology; 64: 1-7
- Manrique M., Cervera-Paz F.J., Huarte A., Perez N., Molina M., Garcia-Tapia R. (1999): Cerebral auditory plasticity and cochlear implants. Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngology; 49 (Suppl 1): 193-197
- MED-EL (1999): Combi 40/40+ System Software Manual. Innsbruck, Austria.
- MED-EL (2004): Info-Heft. Combi 40+

- Meyer V., Bertram B., Lenarz T. (1995): Performance comparisons in congenitally deaf children with different ages of implantation. *Adv Otorhinolaryngol.* Basel; 50: 129-133
- Mrowinski D., Scholz G. (2002): *Audiometrie.* Georg Thieme, Stuttgart; S. 108-118
- Müller B. (1986): Über die Bedeutung der Tonqualität in der Sprachaudiometrie. Dissertation der Universität Würzburg
- Müller J., Schön F., Helms J. (1998): Bilateral Cochlear Implantation – New Aspects for the Future? 4th European Symposium on Paediatric Cochlear Implantation. June 1998, s` Hertogenbosch, The Netherlands
- Müller J., Schön F., Helms J. (2002): Speech understanding in quiet and noise in bilateral users of the Med-El COMBI 40/40+ cochlear implant system. *Ear and Hearing*; 23: 198-206
- Nopp P., Schleich P., D'Haese P. (2002): Binaural effects as obtained from bilaterally implanted adults. *Proceedings of the 3rd International Conference on Bilateral Cochlear Implants and Binaural Signal Processing*; S.37
- Paulus E. (2003): Die richtungsgebenden Merkmale des räumlichen Hörens. *Laryngo-Rhino-Otol*; 82: 240-248
- Perekalin W. E. (1930): Über akustische Orientierung. *Z. Hals-Nasen-Ohren-Heilk.*; 25: 443-461
- Platte H., Döring W., Schlöndorff G. (1978): Richtungshören und Sprachverstehen unter Störschalleinfluss bei Normalhörenden. *Laryng. Rhinol.*; 57: 672-780
- Pröschel U.L.J., Döring W. (1990): Richtungshören in der Horizontalebene bei Störungen der auditiven Selektionsfähigkeit und bei seitengleicher Innenohrschwerhörigkeit, Teil 1. *Audiologische Akustik*; 29: 170-177
- Roeffler S. K., Butler R. A. (1968): Localization of tonal stimuli in the vertical plane. *J. Acoust. Soc. Am.*; 43: 1260-1266



- Rosenzweig M. R., Rosenblith W. A. (1950): Some electrophysiological correlates of the perception of successive clicks. *J. acoust. Soc. Amer.*; 22: 878-880
- Schlote W. (1990): Grundlagen der neurophysiologischen Entwicklung von Kindern im Vorschulalter. In: Kröhnert O. (Hrsg.): Aufgaben und Probleme der Frühförderung gehörloser und schwerhöriger Kinder unter dem Aspekt der Begabungsentfaltung. Hohenems/Vaduz, S.37-60
- Schön F., Müller J., Helms J. (2002): Sound localisation and lateralisation in bilateral implant users. *Proceedings of the 3rd International Conference on Bilateral Cochlear Implants and Binaural Signal Processing*; S.36
- Schubert E. D., Wernick J. (1969): Envelope versus microstructure in the fusion of dichotic signals. *J. acoust. Soc. Amer.*; 45: 1525-1531
- Schulze-Gattermann H., Ilg A., Lesinski-Schiedat A., Schoenermark M., Bertram B., Lenarz T. (2003): Kosten-Nutzen-Analyse der Cochlea-Implantation bei Kindern. *Laryngo-Rhino-Otologie*; 5: 322-329
- Seeber B., Baumann U., Fastl H. (2002): Sound localisation. *Proceedings of the 3rd International Conference on Bilateral Cochlear Implants and Binaural Signal Processing*; S.40
- Senn P., Kompis M., Vischer M., Häusler R. (2002): The minimum audible angle in bilateral CI users. *Proceedings of the 3rd International Conference on Bilateral Cochlear Implants and Binaural Signal Processing*; S.38
- Shaw E.A.G. (1974): The external ear. In: Keidel W.D. and Neff W.D. (Hrsg.): *Handbook of sensory physiology*. Vol. 1. Springer, New York; S 455-490
- Shehata-Dieler W., Schön F., Müller J., Helms J. (2002): Speech perception in noise test (spin) in bilaterally implanted children. *Proceedings of the 3rd International Conference on Bilateral Cochlear Implants and Binaural Signal Processing*; S.47
- Slattery W. H., Middlebrooks J. C. (1993): Monaural sound localization: Acute versus chronic unilateral impairment. *Hearing Research*; 75: 38-46

- Strutt J. W. (1907): On our perception of sound direction. *Philos. Mag.*; 13: 214-232
- Strutz J. (1994): Anatomie und Deprivation der Hörbahn. In: Lenarz T., Lehnhardt E., Bertram B. (eds): *Cochlea Implant bei Kindern*. Georg Thieme, Stuttgart; S. 19-31
- Strutz J. (2000): Päaudiologische Diagnostik. In: Stutz J., Mann W. (Hrsg.): *Praxis der HNO-Heilkunde, Kopf- und Halschirurgie*. Georg Thieme, Stuttgart; S. 46-57
- Tyler R.S., Parkinson A., Wilson B., Witt S., Preece J., Noble W. (2002): Patients utilizing a hearing aid and a cochlear implant: speech perception and localization. *Ear Hear*; 23(2): 98-105
- Van Hoesel R., Clark G. (1997): Psychophysical studies with two binaural cochlear implant subjects. *J. Acoust. Soc. Am.*; 102(1): 495-507
- Volta A. (1800): On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Phil. Trans. B* 90: 403-431
- Wightman F., Kistler D. (1997): Factors affecting the relative salience of sound localization cues. In: Gilkey R., Anderson T. (Hrsg.): *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum; S. 1-23
- Wilson B. (2002): The RTI's perspective on bilateral cochlear implantation. *Proceedings of the 3rd International Conference on Bilateral Cochlear Implants and Binaural Signal Processing*; S.31
- Winkler F., Schön F., Peklo L., Müller J., Feinen C., Helms J. (2002): Würzburger Fragebogen zur Hörqualität bei CI-Kindern. *Laryngorhinootologie*; 81(3):211-216
- Zöllner F., Keidel W.D. (1963): Gehörvermittlung durch elektrische Erregung des Nervus Acusticus. *Archiv für die Ohren-, Nasen- und Kehlkopfheilkunde*; 181: 216-223

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen, die zum Gelingen dieser Doktorarbeit beigetragen haben, herzlich danken.

- ◆ Herrn Prof. Dr. med. Jan Helms, Direktor der Klinik für Hals-, Nasen-, und Ohrenkrankheiten der Universität, bin ich zu besonderem Dank verpflichtet für die Überlassung des Themas. Er gab mir so die Möglichkeit an der HNO-Klinik der Universität Würzburg zu promovieren.
- ◆ Einen ganz besonderen Dank gilt Herrn Dr. Schön, der zum Gelingen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen hat. Er betreute mich bei den Messungen in der Laborsituation, bei der statistischen Auswertung und half mit vielen Anregungen beim Schreiben der Arbeit.
- ◆ Herrn Priv. Doz. Dr. med. Pahnke danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates.
- ◆ Ich danke ganz herzlich Frau Dr. Kühn-Inacker für die tatkräftige Unterstützung bei der Planung und Durchführung aller Messungen am CIC Süd.
- ◆ Sehr dankbar bin ich Herrn Priv. Doz. Dr. med. Müller für seine Hilfe bei der Planung und Durchführung der Studie an der Klinik.
- ◆ Bei Herrn Dipl. Ing. Brill bedanke ich mich ganz herzlich für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit und seine wertvollen Anregungen.
- ◆ Mein Dank gebührt den Therapeutinnen vom CIC Süd und den Kindergärtnerinnen des Kindergarten Lengfeld für ihre große Geduld und Mitarbeit bei den Testdurchgängen mit den Kindern.
- ◆ Ich möchte mich herzlich bei den Kindern und ihren Eltern bedanken, die einiges an ihrer kostbaren Zeit für die Teilnahme an dieser Studie geopfert haben und deren stetige Mitarbeit zu dem guten Gelingen wesentlich beigetragen hat.

Von ganzem Herzen möchte ich meinem Mann danken, der mich unablässig motivierte und so den Fortschritt dieser Arbeit sicherte, und meinen Eltern, für ihre in jeder Hinsicht kompromisslose Unterstützung.



## LEBENS LAUF

Name	Karola Edelmann
Geburtstag	06.08.1973
Geburtsort	in Biberach/Riß
Familienstand	verheiratet
Schulausbildung	Gymnasium in Laupheim, mit Abschluß Abitur, 1984-1993
Auslandsaufenthalt	Mexiko 1993 -1994 Praktikum an der Deutschen Schule in Guadalajara
Studium	Humanmedizin an der Universität Würzburg, seit Mai 1995 <ul style="list-style-type: none"><li>• 1998, März: 1. Staatsexamen</li><li>• 2000, März: 2. Staatsexamen</li><li>• 2001, Oktober: 3. Staatsexamen</li><li>• Praktisches Jahr:<ul style="list-style-type: none"><li>01.09.00 - 31.12.00 Gynäkologie in Lima, 05.02.01 - 27.05.01 Innere Medizin an der Missionsärztlichen Klinik Würzburg, 28.05.01 -31.07.01 Chirurgie an der Missionsärztlichen Klinik Würzburg</li></ul></li></ul>
Famulaturen	1997, Okt.: Innere Medizin an der Universität Würzburg 1998, April: H NO an der Ain Shams University in Kairo 1998, Aug.: Innere Medizin am Kreiskrankenhaus in Laupheim 1998, Okt.: Praxis für Allgemeinmedizin Dr. Stürmer in Würzburg 1999, März: Psychiatrie an der Friedrich-Husemann-Klinik in Buchenbach 1999, Aug.: Gynäkologie an der Missionsärztlichen Klinik in Würzburg
AIP	01.11.01-30.04.03: Chirurgie an der Filderklinik in Filderstadt
Weiterbildung	07.09.03-12.12.03: Diploma in International Health and Tropical Medicine
Assistenzärztin	für Gynäkologie seit 01.07.04 am Klinikum Neukölln, Berlin
Dissertation	Richtungshören bei Kindern mit bilateralen Cochlea-Implantaten im Vergleich zu Kindern mit unilateralem Cochlea-Implantat

*K. Edelmann*

