

**Aus dem Institut für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie  
der Universität Würzburg  
Direktor: Professor Dr. med. Mirko Pham**

**Stellenwert der präoperativen radiologischen Diagnostik  
vor Cochlea-Implantat-Operation**

**Inauguraldissertation  
zur Erlangung der Doktorwürde der  
Medizinischen Fakultät  
der  
Julius-Maximilians-Universität Würzburg**

**vorgelegt von  
Kathrin Ofenhitzer  
aus Neuses am Berg**

**Würzburg, März 2019**

**Referent:** Professor Dr. med. László Solymosi  
**Korreferent:** Professor Dr. med. Dr. h. c. Rudolf Hagen  
**Dekan:** Professor Dr. med. Matthias Frosch

**Tag der mündlichen Prüfung:** 07.10.2019

**Die Promovendin ist Zahnärztin**

**Meiner Familie**

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	1
1.1 Hörstörungen.....	1
1.2 Ätiologie der Schwerhörigkeit.....	3
1.2.1 Schallleitungsschwerhörigkeit .....	3
1.2.2 Sensorineurale Schwerhörigkeit .....	3
1.3 Audiologie.....	9
1.3.1 Subjektive Prüfverfahren .....	9
1.3.1.1 Stimmgabeltests nach Weber und Rinne .....	9
1.3.1.2 Verhaltensaudiometrie .....	10
1.3.2 Objektive Prüfverfahren.....	11
1.4 Methoden zur Hörverbesserung.....	12
1.4.1 Chirurgische Therapie im Mittelohrraum .....	12
1.4.2 Hörgeräte.....	12
1.4.3 Implantierbare Hörgeräte .....	13
1.4.4 Cochlea-Implantat.....	13
1.4.4.1 Aufbau und Funktion .....	14
1.4.4.2 Chirurgisches Vorgehen.....	15
1.5 Präoperative Diagnostik vor CI-Versorgung .....	15
1.5.1 Bildgebende Verfahren .....	16
1.5.1.1 Computertomographie .....	16
1.5.1.2 Strahlenexposition.....	19
1.5.1.3 Magnetresonanztomographie.....	20
1.5.2 Rolle der bildgebenden Verfahren in der präoperativen Diagnostik .....	23
1.6 Ziel der Arbeit.....	25

2. Material und Methoden .....	27
2.1 Patientenkollektiv .....	27
2.2 Untersuchungsgeräte und Aufnahmetypen .....	28
2.2.1 Computertomographie .....	28
2.2.2 Magnetresonanztomographie .....	28
2.3 Auswertung der Schnittbilder und Tonaudiogramme .....	29
2.3.1 Radiologische Auswertung der Schnittbilder .....	29
2.3.2 Tonaudiogramme .....	29
2.4 Statistik .....	30
3. Ergebnisse .....	31
3.1 Patientendaten .....	31
3.2 Art der Hörstörung und Ätiologie .....	32
3.2.1 Ätiologie nach Anamnese und klinischem Untersuchungsbefund .....	33
3.2.2 Ätiologie nach CT- und MRT-Bildgebung .....	35
3.2.2.1 Zusatzbefunde der MRT-Aufnahmen .....	37
3.2.2.2 Zusatzbefunde der CT-Aufnahmen .....	42
3.3 Vergleich der Darstellungsmöglichkeiten von CT und MRT .....	43
3.3.1 Felsenbeinpathologien in den CT- und MRT-Aufnahmen .....	43
3.3.2 Zusammenhang zwischen Meningitis und präoperativer Bildgebung .....	47
3.3.3 Deskriptive Befundvergleiche .....	49
3.4 Tonaudiogramme .....	52
3.5 CI-Operationen .....	54
3.5.1 Intraoperative Auffälligkeiten .....	54
3.5.2 Zusammenhang zwischen präoperativer Bildgebung und Operation .....	55
4. Diskussion .....	61

4.1	Ergebnisanalyse .....	62
4.1.1	Art der Hörstörung und Ätiologie .....	62
4.1.2	Vergleich der Darstellungsmöglichkeiten von CT und MRT .....	68
4.1.2.1	Felsenbeinpathologien in den CT- und MRT-Aufnahmen .....	68
4.1.2.2	Deskriptive Befundvergleiche .....	73
4.1.2.3	Zusammenhang zwischen Meningitis und präoperativer Bildgebung .....	76
4.1.3	CI-Operation: intraoperative Auffälligkeiten und Zusammenhang mit präoperativer Bildgebung .....	76
4.2	Material- und Methodenkritik .....	82
4.2.1	Studiendesign und Patientenkollektiv .....	82
4.2.2	Auswertung der Schnittbilder und Tonaudiogramme .....	83
4.2.3	Statistik .....	84
4.3	Schlussfolgerung und Ausblick .....	85
5.	Zusammenfassung .....	90
6.	Literaturverzeichnis .....	92
7.	Abbildungsverzeichnis .....	101
8.	Tabellenverzeichnis .....	104
9.	Anhang .....	106

## Abkürzungsverzeichnis

BERA	Brainstem electric response audiometry (Hirnstammaudiometrie)
CI	Cochlea-Implantat
CISS	Constructive interference in steady state
CMV	Cytomegalie-Virus
CT	Computertomographie
DNET	Dysembryoplastischer neuroepithelialer Tumor
DWI	Diffusion weighted imaging (Diffusionsgewichtete Sequenz)
GE	Gradientenecho
HNO-Klinik	Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten des Universitätsklinikums Würzburg
HE	Hounsfield-Einheit
HF	Hochfrequenz
HV	Hörverlust
ICRP	International Commission on Radiological Protection (Internationale Strahlenschutzkommission)
IGG	Innerer Gehörgang
IP 1	Inkomplette Partition Typ 1
IP 2	Inkomplette Partition Typ 2
LE	Leukenzephalopathie
LVAS	Large vestibular aqueduct syndrome (Aquaeductus-vestibuli-Syndrom)

MRT	Magnetresonanztomographie
NGHS	Neugeborenen-Hörscreening
N.	Nervus
OAE	Ableitung otoakustischer Emissionen
PDw	Protonendichte-gewichtet
PVL	Periventrikuläre Leukomalazie
SES	Schallempfindungsschwerhörigkeit
SLS	Schallleitungsschwerhörigkeit
TE	Echozeit
TR	Repetitionszeit
T1	Spin-Gitter-Relaxationszeit
T2	Spin-Spin-Relaxationszeit
T1w	T1-gewichtet
T2w	T2-gewichtet
V. a.	Verdacht auf
ZNS	Zentrales Nervensystem
Z. n.	Zustand nach



## 1. Einleitung

### 1.1 Hörstörungen

Das Gehör nimmt in der menschlichen Kommunikation und Entwicklung eine zentrale Stellung ein.<sup>1</sup> Gerade im Kindesalter spielt ein intaktes Gehör eine tragende Rolle für die Sprach- und Persönlichkeitsentwicklung eines Individuums. Laut statistischem Bundesamt liegt bei Kindern die häufigste sensorische Schädigung in einer dauerhaften Hörstörung.<sup>2</sup>

Je nach Stärke des Hörverlustes (HV) lässt sich die Schwerhörigkeit in verschiedene Grade einteilen, deren Grenzwerte in der Literatur zum Teil differieren. Zur Orientierung kann zwischen normalem Gehör (0–19 dB HV), geringgradiger Schwerhörigkeit (20–40 dB HV), mittelgradiger Schwerhörigkeit (40–60 dB HV), hochgradiger Schwerhörigkeit (60–90 dB HV) sowie an Taubheit grenzender Schwerhörigkeit (90–110 dB HV) und Taubheit (> 110 dB HV) unterschieden werden.<sup>3</sup>

Laut der Weltgesundheitsorganisation leiden derzeit weltweit rund 432 Millionen Erwachsene und 34 Millionen Kinder an einer das tägliche Leben beeinträchtigenden Hörminderung von mehr als 40 dB (Erwachsene) bzw. 30 dB (Kinder) auf dem besser hörenden Ohr.<sup>4</sup>

In Deutschland waren im Jahr 2006 Schätzungen zufolge 20000 bis 35000 Kinder und Jugendliche von einer Hörstörung mit einem Hörverlust von mindestens 40 dB auf dem besser hörenden Ohr betroffen.<sup>2</sup> In der erwachsenen Bevölkerung lag im Jahr 2015 laut einer Studie die Prävalenz für Schwerhörigkeit im Nordwesten Deutschlands bei etwa 16 %.<sup>5</sup>

Die möglichen Ursachen einer Hörstörung sind vielfältig und können verschiedene Bereiche des Hörorgans betreffen. Durch eine sorgfältige Anamnese, klinische Untersuchungen wie Inspektion und Otoskopie des Ohrs, sowie durch verschiedene Funktionsprüfungen (vgl. 1.3) können erste Hinweise auf die Art einer Hörstörung festgestellt werden.<sup>3</sup> Bei der Art der Hörstörung wird prinzipiell, je nach betroffenem Bereich, zwischen Schallleitungsschwerhörigkeit (SLS) und Schallempfindungsschwerhörigkeit (SES) differenziert. Die Ursache einer SLS liegt im äußeren Ohr oder im Mittelohr und wird auch konduktive Schwerhörigkeit genannt.<sup>6</sup> Eine SES kann durch verschiedenste Läsionen im Bereich der Cochlea, im Bereich des Nervus (N.)

vestibulocochlearis und der zentralen Hörbahn verursacht werden. Je nach anatomischer Lokalisation des Defekts kann zwischen einer Innenohrschwerhörigkeit, auch cochleäre oder sensorische Schwerhörigkeit genannt, und einer retrocochleären Schwerhörigkeit unterschieden werden. Die retrocochleäre Schwerhörigkeit kann wiederum, je nach Lokalisation des Defekts, in eine neurale Schwerhörigkeit (Schädigung im Bereich des Hörnervs) und zentrale Schwerhörigkeit (Schädigung im Bereich des zentralen Nervensystems (ZNS)) untergliedert werden. Da die SES häufig durch eine Kombination von Defekten verschiedener Strukturen im Bereich der Cochlea und weiter zentral bedingt ist, wird sie häufig auch allgemein als sensorineurale Schwerhörigkeit bezeichnet.<sup>3,6</sup>

## 1.2 Ätiologie der Schwerhörigkeit

### 1.2.1 Schallleitungsschwerhörigkeit

Wie bereits beschrieben, entsteht eine SLS durch pathologische Prozesse im Bereich des äußeren Ohrs und des Mittelohrs. Tabelle 1 stellt eine Übersicht einiger Ursachen für SLS dar.

**Tabelle 1.** Ursachen für Schallleitungsschwerhörigkeit<sup>7,8,9,10,11,12,13,14</sup>

	<b>Äußeres Ohr</b>	<b>Mittelohr</b>
<b>Fehlbildungen</b>	Häufig in Zusammenhang mit Fehlbildungen des Mittelohrs und Fehlbildungssyndromen, z. B. Treacher-Collins-Syndrom (vgl. Tabelle 4)	Isoliertes Auftreten oder im Rahmen von Fehlbildungssyndromen (vgl. Tabelle 4), Mittelohrfehlbildung bei Atresia auris congenita
<b>Traumata</b>	Gehörgangs- und Ohrmuschelverletzungen wie Verbrennungen, Verätzungen, Risse, Bisse, Stiche	Begleitverletzungen bei Verletzungen des äußeren Ohrs, direkte und indirekte Trommelfellverletzungen (Innenohrbeteiligung mit SES möglich), Felsenbeinfrakturen (Innenohrbeteiligung mit SES und intrakranielle Komplikationen möglich)
<b>Nicht entzündliche Erkrankungen</b>	Fremdkörper im Gehörgang, Cerumen obturans	Akute und chronische Tubenfunktionsstörungen, Otosklerose (Innenohrbeteiligung mit SES möglich)
<b>Entzündliche Erkrankungen</b>	Otitis externa diffusa, Otitis externa maligna	Akute Otitis media, chronische Otitis media (chronisch mesotympanale Otitis media, chronisch epitympanale Otitis media, Cholesteatom), über Komplikationen jeweils Innenohrbeteiligung mit SES möglich
<b>Tumoren</b>	Plattenepithelkarzinom, malignes Melanom, Basaliom	Plattenepithelkarzinom, Adenokarzinom, Paragangliom (jeweils Innenohrbeteiligung mit SES möglich)

### 1.2.2 Sensorineurale Schwerhörigkeit

Selten kann eine genaue Ursache für die sensorineurale Schwerhörigkeit eines Patienten identifiziert werden. Eine Reihe verschiedenster Faktoren unterschiedlicher Genese wie entzündliche und degenerative Erkrankungen, traumatische und toxische Schädigungen

oder Tumoren sind bekannt. Kann nach umfangreicher Untersuchung keine Ursache gefunden werden, so werden vor allem beim erwachsenen Patienten häufig Ausschlussdiagnosen, wie zum Beispiel Altersschwerhörigkeit oder langsam progrediente Schwerhörigkeit, angenommen.<sup>15</sup> Tabelle 2 zeigt mögliche Ursachen für sensorineurale Schwerhörigkeiten.

**Tabelle 2.** Ursachen für sensorineurale Schwerhörigkeit<sup>15,16,17</sup>

<b>Ursachen</b>	<b>Beispiele</b>
<b>Lärmbelastung</b>	Knalltrauma, Explosionstrauma, chronisches Lärmtrauma
<b>Traumata</b>	Felsenbeinfraktur, Commotio/Contusio labyrinthi
<b>Entzündungen und Infektionen</b>	Meningitis, Labyrinthitis (tympangogene, meningeale, hämatogene Form), Grippeotitis, Mumps, Masern, Cytomegalie, Borreliose, Zoster oticus
<b>Ototoxische Medikamente</b>	Einnahme von Aminoglykosid-Antibiotika (z. B. Streptomycin, Gentamycin), Zytostatika (z. B. Cisplatin), Chinine, Schleifendiuretika
<b>Toxische Stoffe</b>	Einnahme von Lösungsmitteln, Blei, Quecksilber, Alkohol, Heroin
<b>Idiopathisch</b>	Akute, idiopathische Innenohrschwerhörigkeit (idiopathischer Hörsturz), Altersschwerhörigkeit (Presbyakusis), progrediente sensorineurale Schwerhörigkeit (langsam/rasch progredient)
<b>Sonstiges</b>	Immunassoziierte Schwerhörigkeit, auditorische Neuropathie, neurologische Erkrankungen, vaskuläre und hämatologische Erkrankungen, Strahlenschäden, Morbus Menière, Kapselotoklerose, symptomatischer Hörsturz
<b>Tumoren</b>	Vestibularisschwannom (gebräuchliche Bezeichnung: Akustikusneurinom), Neurofibromatose Typ 2, intralabyrinthäre Schwannome

Neben diesen Ursachen sind besonders bei Kindern verschiedene genetisch determinierte und frühkindlich erworbene Ursachen bekannt. Eine genetisch bedingte (hereditäre) Hörstörung kann autosomal-rezessiv, autosomal-dominant, X-chromosomal oder mitochondrial vererbt werden. Je nach Erbgang setzt die Schwerhörigkeit bzw. Taubheit zu verschiedenen Zeitpunkten der Entwicklung ein. So besteht eine rezessiv vererbte Hörstörung meist schon bei der Geburt, während sich autosomal-dominant vererbte Hörstörungen erst nach der Geburt, manchmal erst im Erwachsenenalter, klinisch äußern. Bei der genetisch bedingten Hörstörung wird die nicht-syndromale von der syndromalen Form unterschieden. Die häufiger auftretende nicht-syndromale Form äußert sich klinisch nur in einer Störung des Gehörs, die syndromale Form ist mit anderen Symptomen

vergesellschaftet und wird im späteren Abschnitt dieses Kapitels genauer beschrieben. Ein erforschter Gendefekt, der bei Kindern in etwa 50 % der Fälle für nicht-syndromale Formen der genetisch determinierten Schwerhörigkeit verantwortlich ist, besteht in einer Mutation im GJB2-Gen, welches das Protein Connexin-26 codiert. Connexin-26 ist für die Bildung von Gap Junctions im Corti-Organ verantwortlich.<sup>15,18</sup> Bei den Gap Junctions handelt es sich um spezielle Proteine, die eine Kommunikation zwischen Zellen ermöglichen.<sup>19</sup>

Eine Reihe von Fehlbildungen des Innenohrs, die ursächlich für genetisch determinierte Hörstörungen sein können, sind bekannt. Diese Fehlbildungen können verschiedene Bereiche des Innenohrs, das aus Cochlea, Vestibulum, Bogengängen sowie Aquaeductus vestibuli und Aquaeductus cochleae besteht, betreffen.<sup>20,21</sup>

Zu den Fehlbildungen des Innenohrs existieren in der Literatur multiple Klassifikationen. So werden zum Beispiel nach der Klassifikation von Sennaroglu et al. (2002) fünf Hauptgruppen unterschieden. Diese sind cochleäre und vestibuläre Malformationen (Michel-Deformität, cochleäre Aplasie, Common cavity-Deformität, cochleäre Hypoplasie, inkomplette Partition Typ 1 (IP 1), inkomplette Partition Typ 2 (IP 2), Vestibulumaplasie, Vestibulumhypoplasie und Vestibulumdilatation), Malformationen von Bogengang (fehlend/hypoplastisch/erweitert) und innerem Gehörgang (IGG) (fehlend/eng/erweitert) sowie Malformationen des Aquaeductus vestibuli und des Aquaeductus cochleae.<sup>22</sup>

Für die Klinik eignet sich die Einteilung von Giesemann et al. (2013), bei der primär nach dem Vorhandensein der Cochlea und der Art der cochleären Fehlbildung ausgegangen wird.<sup>21</sup> Tabelle 3 fasst die Klassifikation der Innenohrfehlbildungen nach Giesemann et al. (2013) zusammen.

**Tabelle 3.** Klassifikation der Innenohrfehlbildungen, modifiziert nach Gieseemann et al. (2013)<sup>21</sup>

Zustand der Cochlea	Merkmale	Name der Fehlbildung
Komplett fehlende Cochlea	Fehlen von Bogengängen, Vestibulum, IGG	Labyrinthäre Aplasie
	Bogengänge und Vestibulum vorhanden und meist dysplastisch, Fehlen des IGG	Otozysten-Deformität
	Bogengänge, Vestibulum, IGG vorhanden	Cochleäre Aplasie
Dysplastisch vorhandene Cochlea	Hypoplastische Cochlea	Cochleäre Hypoplasie (Ausprägung mild bis schwer)
	Hypoplastische Cochlea, Fehlen der Bogengänge	Bogengangaplasie
	Zystisch erweiterte mittlere und apikale Windung der Cochlea, dysplastisches Vestibulum, erweiterter Aquaeductus vestibuli	IP 2 (klassisch: Mondini-Deformität)
	Vollständig fehlende Partitionierung der Cochlea	IP 1
	Nichtanlage Modiolus	Fehlender Modiolus
	Dysplastische Cochlea mit zum IGG hin offener basaler Windung und vestibulärer Dysplasie	X-linked Deafness
	Enge oder mit Knochen durchbaute cochleäre Apertur	Isolierte Hypo- oder Aplasie des N. cochlearis
Normal vorhandene Cochlea	Dysplastische Bogengänge	Isolierte Bogengangdysplasie
	Bogengänge und Vestibulum normal; Atresie, Verdoppelung oder Verschmälerung des IGG (Durchmesser < 2 mm)	Malformation des IGG
	Bogengänge und Vestibulum normal, erweiterter Aquaeductus vestibuli	Aquaeductus-vestibuli-Syndrom (large vestibular aqueduct syndrome, LVAS)

Die beiden nachfolgenden Abbildungen 1 und 2 zeigen als Beispiel für eine der oben vorgestellten Innenohrfehlbildungen Ausschnitte einer CT-Untersuchung des Felsenbeins, in denen eine beidseitige IP 2 zu sehen ist. Ebenso ist der erweiterte Aquaeductus vestibuli, der als Teil dieser Fehlbildung gilt, zu sehen.



**Abbildung 1.** Ausschnitt einer axialen CT-Untersuchung des Felsenbeins mit incompletter Partition Typ 2 rechts. Die inkomplette Partitionierung des apikalen Cochleaabschnittes ist erkennbar (Pfeil).



**Abbildung 2.** Ausschnitt der CT-Untersuchung desselben Falles, in der die inkomplette Partition Typ 2 links mit erweitertem Aquaeductus vestibuli zu sehen ist.

Im Vergleich zur nicht-syndromalen Form der genetisch determinierten Schwerhörigkeit wird die syndromale Form seltener beobachtet. Neben den wie bei der nicht-syndromalen Form vorkommenden Fehlbildungen von Cochlea und Vestibularorgan liegen zusätzliche Pathologien in anderen Organsystemen vor. Im Rahmen von Syndromen manifestieren sich neben der Schwerhörigkeit also weitere Krankheitssymptome.<sup>16,18,20</sup>

Tabelle 4 zeigt einige Beispiele aus mehr als 400 bekannten Syndromen mit Beteiligung des Gehörs.<sup>18</sup>

**Tabelle 4.** Syndrome mit Hörstörungen<sup>16,18</sup>

<b>Syndrom</b>	<b>Typische Merkmale</b>	<b>Art der Hörstörung</b>
Treacher-Collins-Syndrom	Fehlbildungen des äußeren und Mittelohrs, Ober- und Unterkieferhypoplasie, Gaumenspalte	SLS
Apert-Syndrom	Kraniosynostosen, kraniofaziale Fehlbildungen	SLS
Osteogenesis imperfecta	Knochenbildungsstörungen	kombiniert (SLS + SES)
Branchio-oto-renales Syndrom	Fehlbildungen des äußeren, Mittel- und Innenohrs, Nierenfehlbildungen, Vorhandensein von Halsfisteln oder -zysten	SLS, SES oder kombiniert
Usher-Syndrom	Retinadegeneration, Störungen des N. vestibularis	SES
Klein-Waardenburg-Syndrom	Albinismus der Haare, Iris und Haut, Telekanthus	SES
Cogan-Syndrom	Progrediente Schwerhörigkeit, Schwindel, Keratitis	SES
Pendred-Syndrom	Fehlbildung des Innenohrs, Schilddrüsendysfunktion, evtl. Struma	SES
CHARGE-Syndrom	Kolobom, Herzfehler, Atresie der Choanen, Wachstumsretardierung, Fehlbildungen der Geschlechtsorgane, Fehlbildungen des äußeren Ohrs	SES
Jervell-Lange-Nielsen-Syndrom	Herzrhythmusstörungen, progrediente Schwerhörigkeit	SES
Ulrich-Turner-Syndrom, Trisomie 21	Chromosomenanomalien	SLS, SES, oder kombiniert

Wie bereits erwähnt können sensorineurale Schwerhörigkeiten außerdem prä-, peri-, oder postnatal erworben werden. Zu den pränatalen Ursachen zählen unter anderem Infektionserkrankungen der Mutter während der Schwangerschaft, wie beispielsweise Toxoplasmose, konnatale Lues oder Röteln, sowie die Einnahme toxischer Substanzen wie Medikamente, Nikotin oder Alkohol. Perinatal erworbene Schwerhörigkeit kann durch Geburtstraumen wie intracochleäre oder intrazerebrale Blutungen, Frühgeburt, Asphyxie, Kernikterus oder intrauterine Infektionen (Cytomegalie-Virus (CMV), Herpes-simplex-Virus) ausgelöst werden. Postnatal können frühkindliche Hörstörungen durch gleiche Faktoren wie beim Erwachsenen erworben werden (vgl. Tabelle 2).<sup>16,17,18</sup>



Der stete Fortschritt der Forschung und spezielle Früherkennungsuntersuchungen, wie das Neugeborenen-Hörscreening (NGHS), erlauben heute bei Neugeborenen, Säuglingen und Kleinkindern eine frühzeitige Erkennung von Hörstörungen.<sup>23</sup> Dies ermöglicht die frühzeitige Einleitung entsprechender Therapien, was für die Hör-, Sprach- und Persönlichkeitsentwicklung der Kinder von großer Bedeutung ist.

### 1.3 Audiologie

Die Audiologie umfasst Untersuchungen zur Beurteilung der Gehörfunktion. Eine Reihe verschiedener Untersuchungsmethoden und Tests stehen zur Verfügung um Art, Umfang, Sitz und mögliche Ursache einer Hörstörung bestimmen zu können. Dabei werden subjektive und objektive Prüfverfahren unterschieden. Im Gegensatz zu den objektiven Verfahren setzen subjektive Verfahren die aktive Mitarbeit des Patienten voraus.<sup>3,6</sup> Zur besseren Übersicht werden in den folgenden Abschnitten lediglich einige bekannte Beispiele von Gehörprüfungen, die zu einer ersten Diagnostik verhelfen, ausführlicher beschrieben.

#### 1.3.1 Subjektive Prüfverfahren

##### 1.3.1.1 Stimmgabeltests nach Weber und Rinne

Die Stimmgabeltests nach Weber und Rinne dienen der schnellen Differenzierung zwischen SLS und SES. Dazu wird eine Stimmgabel mit einer Schwingung zwischen 250 und 800 Hz verwendet. Beim Weber-Test wird der Fuß der angeschlagenen Stimmgabel im Stirn- oder Scheitelbereich auf den Schädelknochen gesetzt. Dadurch werden die Vibrationen der Stimmgabel auf den Knochen übertragen. Diese Untersuchung der Knochenleitung ermöglicht die grobe Beurteilung der Funktion der Cochlea und somit des Innenohrs. Bei symmetrischem Gehör (normalhörender oder symmetrisch schwerhöriger Patient) wird der Ton beidseits oder in der Kopfmittle gleichmäßig gehört. Der Weber-Test ist nicht lateralisiert. Wird der Ton der aufgesetzten Stimmgabel nur auf einer Seite gehört, spricht man von einer Lateralisation. Bei einem einseitig schallempfindungsschwerhörigen Patienten wird der Ton auf dem gesunden Ohr lauter wahrgenommen. Liegt hingegen eine einseitige SLS vor, wird der Ton der Stimmgabel auf der Seite der Schwerhörigkeit lauter empfunden, also in das betroffene Ohr lateralisiert. Der Ton wird bei einem schalleitungsschwerhörigen Patienten im

erkrankten Ohr lauter empfunden, da die über den Knochen zugeführte Vibrationsenergie durch Störungen im Mittelohr oder Gehörgang schlechter aus der Cochlea abfließen kann und somit mehr Vibrationsenergie in der normal funktionierenden Cochlea verbleibt.<sup>3,24,25</sup>

Im Unterschied zum beschriebenen Weber-Test, bei dem rechtes und linkes Ohr vergleichend untersucht werden, dient der Stimmgabeltest nach Rinne zur Untersuchung des Hörvermögens über die Luft- und Knochenleitung des gleichen Ohrs. Die angeschlagene Stimmgabel wird zunächst zur Untersuchung der Knochenleitung auf das Mastoid gesetzt. Sobald der Patient den Ton der Stimmgabel über die Knochenleitung nicht mehr wahrnimmt, wird die Stimmgabel zur Untersuchung der Luftleitung ohne erneutes Anschlagen vor die Ohrmuschel gehalten. Anschließend muss der Patient angeben, wo er den erzeugten Ton länger und wo er ihn lauter gehört hat. Bei intakter Schallleitung hört der Patient die Stimmgabel vor dem Ohr länger und lauter als auf dem Mastoid, da der Schall über die Gehörknöchelchenkette und das Trommelfell ins Innenohr verstärkt wird. Die Luftleitung ist also sensibler als die Knochenleitung, der Rinne-Test fällt somit positiv aus. Der schallleitungsschwerhörige Patient hört den Ton der Stimmgabel auf dem Mastoid länger und lauter als vor dem Gehörgang, seine Luftleitung ist also weniger sensibel als die Knochenleitung, das Ergebnis des Rinne-Tests fällt negativ aus. Bei vorhandener SES würde der Rinne-Test beidseits positiv ausfallen, da der Patient den Ton der Stimmgabel zwar sowohl über die Luft-, als auch über die Knochenleitung verkürzt wahrnimmt, der Ton über die Luftleitung jedoch trotzdem stärker als über die Knochenleitung gehört wird.<sup>3,24</sup>

#### 1.3.1.2 Verhaltensaudiometrie

Die klinische Audiometrie beschäftigt sich mit der Messung und Überprüfung der Gehörfunktion mittels akustischer Reize.

Zur Bestimmung der Hörschwelle, das heißt der Lautstärke, die ein Patient als gerade eben gehört angibt, gilt das Tonaudiogramm als die am häufigsten durchgeführte Methode. Dazu werden mit Hilfe eines Tonaudiometers der Reihe nach Töne verschiedener Lautstärken und Frequenzen, die von einem Luft- und Knochenschallhörer abgegeben werden, erzeugt. Die abgegebenen Frequenzen reichen je nach Gerät von 125 Hz bis etwa 8 kHz. Durch Erhöhung der Lautstärke in 5–10 dB-Schritten, muss der Patient für jede Frequenz angeben, wann er den Ton hört. Somit können in Abhängigkeit

der abgespielten Frequenz die Hörschwellen für das linke und rechte Ohr jeweils für die Luft- und Knochenleitung bestimmt werden, welche in das Tonaudiogramm eingetragen werden. Dadurch ist eine Unterscheidung zwischen SLS und SES möglich.<sup>3,25,26</sup> Beim gesunden Patienten liegen die Hörschwellen auf gleicher Höhe, etwa im Bereich der Nulllinie. Eine SLS liegt vor, wenn die Luftleitungsschwelle bei höheren Lautstärken als die Knochenleitungsschwelle liegt und die Knochenleitung im Bereich der Norm bleibt. Ist sowohl die Hörschwelle für die Luft-, als auch für die Knochenleitung erhöht und liegen beide Kurven auf ähnlichen Werten, kann eine SES diagnostiziert werden. Häufig sind dabei besonders die hohen Frequenzen betroffen. Bei einer kombinierten Schwerhörigkeit ist sowohl die Hörschwelle der Knochenleitung erhöht und die Hörschwelle der Luftleitung ist im Vergleich zur Knochenleitung noch stärker erhöht.<sup>3</sup> Als eine weitere wichtige subjektive audiometrische Diagnostikmethode gilt die Sprachaudiometrie, womit nicht die Hörschwelle, sondern das Sprachverständnis des Patienten ermittelt wird. Meist wird der „Freiburger Sprachverständlichkeitstest“ durchgeführt.<sup>3</sup> Dabei werden, abhängig von verschiedenen Lautstärken, anhand eines Zahlentests der Hörverlust für Sprache und anhand eines Einsilbentests die Sprachverständlichkeit untersucht. Die Ergebnisse werden in Form von Kurven in ein spezielles Formular eingetragen.<sup>24</sup>

### 1.3.2 Objektive Prüfverfahren

Wie die Beschreibung der verschiedenen Tests zeigt, ist für eine erfolgreiche subjektive Gehörprüfung die aktive Mitarbeit des Patienten Voraussetzung. Für eine exakte Beurteilung der Gehörfunktion sind meist zusätzliche objektive Untersuchungsverfahren notwendig. Insbesondere bei Kindern und wenig kooperativen Patienten werden diese objektiven Untersuchungen bevorzugt. Auch hier stehen zahlreiche verschiedene Untersuchungsmethoden zur Verfügung. Dazu zählen die Tympanometrie, die Impedanzaudiometrie, die Registrierung auditorisch evozierter Potenziale, die Ableitung otoakustischer Emissionen (OAE) und die Hirnstammaudiometrie (brainstem electric response audiometry, BERA). Sowohl die OAE als auch der BERA-Hörtest werden beim NGHS eingesetzt und dienen der Beurteilung der cochleären Funktion bei Säuglingen und Kleinkindern.<sup>3,27</sup>

## 1.4 Methoden zur Hörverbesserung

Nur selten ist eine medizinische Therapie zur Beseitigung der Schwerhörigkeit möglich. Je nach Art und Grad der Hörminderung und abhängig von den individuellen Bedürfnissen der Patienten verhelfen verschiedene operative und apparative Maßnahmen zu einer Verbesserung des Hörvermögens.<sup>3</sup>

### 1.4.1 Chirurgische Therapie im Mittelohrraum

Bestimmte Operationen im Bereich des Mittelohrs können hauptsächlich bei vorliegender SLS zu einer funktionellen Verbesserung der Hörfähigkeit beitragen. So sind zum Beispiel die Parazentese bzw. das Einlegen von Paukenröhrchen bei Tubenbelüftungsstörungen, akuten Mittelohrentzündungen oder Ergüssen im Rahmen von serösen Labyrinthiden indiziert. Des Weiteren kommen Tympanoplastiken (Typ I–V nach Wullstein) zum Verschluss von Trommelfellperforationen, der Behebung von Entzündungsprozessen im Mittelohr oder zur Wiederherstellung bei Defekten der Gehörknöchelchenkette zum Einsatz.<sup>28</sup> Zur Behandlung der Otosklerose, bei der es im Rahmen von pathologischen Knochenumbauprozessen häufig zu einer Fixation des Steigbügels kommt, kann bei noch funktionsfähigem Innenohr durch Stapesplastiken eine Hörverbesserung erzielt werden.<sup>12</sup>

### 1.4.2 Hörgeräte

Zur symptomatischen Therapie der Schwerhörigkeit werden verschiedene Hörgeräte eingesetzt. Die Indikation für ein Hörgerät reicht von geringgradiger bis zu hochgradiger Schwerhörigkeit. Für die Verordnung eines Hörgerätes muss im Tonaudiogramm bei beidseitiger Schwerhörigkeit ein HV von 30 dB in mindestens einer Prüffrequenz von 0,5–3 kHz auf dem besser hörenden Ohr festgestellt werden, oder im Sprachaudiogramm ein Diskriminationsverlust von mindestens 20 % bei einer Lautstärke von 65 dB bestehen. Bei einseitiger Schwerhörigkeit muss im Tonaudiogramm ein HV von mindestens 30 dB bei einer Prüffrequenz von 2 kHz oder bei mindestens zwei Frequenzen im Bereich von 0,5–3 kHz bestehen. Des Weiteren sollte eine wie in 1.4.1 beschriebene operative Maßnahme zur Hörverbesserung nicht möglich oder erfolgversprechend sein. Hörgeräte stimulieren das Gehör durch Verstärkung des Luftschalls. Ziel ist es, damit die Schwerhörigkeit soweit auszugleichen, dass eine ausreichende Verbesserung des

Sprachverstehens erreicht werden kann. Bei den konventionellen Luftleitungsgeräten wird der Schall in den äußeren Gehörgang abgegeben. Sie werden entweder hinter dem Ohr getragen, oder in der Ohrmuschel bzw. im Gehörgang. Daneben gibt es Knochenleitungsgeräte in Form von Bügeln oder Brillen, die das Schallsignal über Knochenleitungshörer direkt auf das Mastoid übertragen. Voraussetzung für jedes Hörgerät ist eine intakte Cochlea, die das Schallsignal an den Hörnerv weitergeben kann. Außerdem müssen die anatomischen Verhältnisse ein Tragen des Hörgerätes ermöglichen und die Compliance des Patienten gegeben sein.<sup>3,16,29</sup>

#### 1.4.3 Implantierbare Hörgeräte

Ist bei SLS, sensorineuraler oder kombinierter Schwerhörigkeit kein ausreichendes Sprachverständnis mit konventionellen Hörgeräten möglich, oder sind hörverbessernde Operationen nicht erfolgversprechend oder werden vom Patienten abgelehnt, können teil- und vollimplantierbare Hörgeräte zur Therapie eingesetzt werden. Bei Gehörgangsverschlüssen oder ungünstigen anatomischen Verhältnissen, die das Tragen eines Hörgerätes im Gehörgang nicht erlauben, sind implantierbare Hörgeräte ebenso indiziert. Bei diesen Hörgeräten wird das aufgenommene Schallsignal über einen an der Gehörknöchelchenkette oder am Innenohr implantierten Wandler in Vibrationen umgewandelt und diese auf das Mittel- oder Innenohr übertragen. Ein Beispiel für ein teilimplantierbares Hörgerät ist das Mittelohr-Implantatsystem „Vibrant Soundbridge“ der Firma MED-EL (Innsbruck, Österreich). Das Schallsignal wird durch ein extern getragenes Mikrofon und einen Prozessor aufgenommen und durch einen an den Gehörknöchelchen angebrachten „Floating Mass Transducer“ auf das Mittelohr übertragen. Daneben gibt es weitere Formen, wie das System „Bone Anchored Hearing Aid“. Dies ist ein Knochenleitungshörgerät, bei dem eine Titanschraube in den Schädelknochen inseriert wird. An einer durch die Haut nach außen ragenden Kopplung der Schraube ist das externe Hörgerät abnehmbar verankert. Der Schall wird über die Schraube direkt auf den Schädelknochen übertragen.<sup>16,29</sup>

#### 1.4.4 Cochlea-Implantat

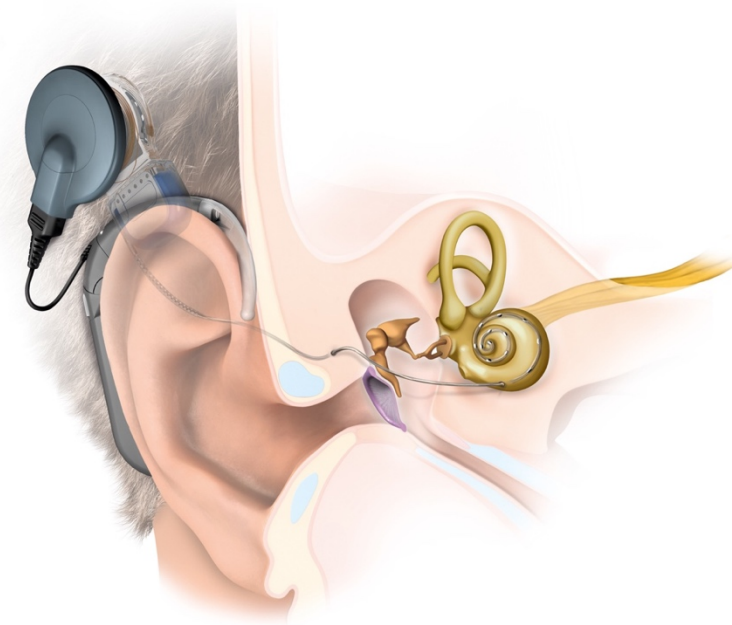
Das Cochlea-Implantat (CI) ist eine elektronische Hörprothese, die bei Ausfall der Innenohrfunktion, also bei nicht funktionsfähigem Corti-Organ, Hörempfindungen auslösen kann. Anatomische Voraussetzung ist ein intakter Hörnerv und eine

funktionierende zentrale Hörbahn. Die Indikation zur CI-Operation besteht in folgenden Situationen:

- prälinguale Gehörlosigkeit (angeborene oder vor Spracherwerb erworbene Taubheit),
- postlinguale Taubheit (ein-, oder beidseitige cochleäre Ertaubung, nach dem Spracherwerb eingetreten),
- nachgewiesenes nicht ausreichendes Sprachverstehen oder unzureichender Spracherwerb trotz optimal angepasster Hörgeräteversorgung bei stark ausgeprägter Schwerhörigkeit.<sup>3,16,29</sup>

#### 1.4.4.1 Aufbau und Funktion

Das CI-System besteht aus zwei Teilen. Eine extern getragene Komponente, die sich aus Mikrofon, Sprachprozessor mit Sprachverarbeitungsstrategien, Sendespule mit äußerem Magnet sowie Batterie oder Akku zur Energieversorgung zusammensetzt. Die zweite, interne Komponente, ist das eigentliche Implantat. Dieses besteht aus einer Empfangsspule, die mit einem Elektroenträger verbunden ist. Akustische Signale werden über das am Ohr getragene Mikrofon aufgenommen und an den Sprachprozessor geleitet. Der Sprachprozessor filtert die für das Sprachverstehen notwendigen Sprachanteile und verarbeitet die akustische Information in eine durch das Programm vorgegebene zügige Abfolge von elektrischen Impulsen. Die Impulse werden über die Sendespule durch die Haut an die in das Schläfenbein implantierte Empfangsspule übertragen. Dort werden die elektrischen Signale entschlüsselt und an die einzelnen Stimulationselektroden auf dem Elektroenträger, der in der Scala tympani der Cochlea platziert wurde, weitergeleitet. Durch Reizung der Ganglienzellen des Hörnervs erhält der Patient schließlich einen Höreindruck.<sup>3,16,29</sup>



**Abbildung 3.** Schema eines CI-Systems der Firma MED-EL (Innsbruck, Österreich)<sup>30</sup>, Nachdruck von Firma MED-EL (Innsbruck, Österreich) genehmigt.

#### 1.4.4.2 Chirurgisches Vorgehen

Die CI-Operation erfolgt über einen retroaurikulären Hautzugang. Nach Bilden eines Mukoperiostlappens und Abschieben des Periosts wird in der Squama temporalis des Schläfenbeins das Implantatbett mit speziellen Bohrungen vorbereitet und ein Knochentunnel für einen Verbindungskanal zum Mastoid gefräst. Nach Abtragung des Mastoids, die Mastoidektomie, wodurch ein Zugang zum Mittel- und Innenohr ermöglicht wird, werden wichtige anatomische Strukturen wie der N. facialis in seinem Kanal, die Chorda tympani und der Sinus sigmoideus dargestellt und der Chorda-Facialis-Winkel eröffnet. Durch Eröffnung der Cochlea, die Cochleostomie, kann der Stimulationselektroden-träger in die Scala tympani der Cochlea inseriert werden. Die Empfängerspule wird in das vorbereitete Implantatbett positioniert und fixiert. Nach Funktionsprüfung des Implantats erfolgt Schicht für Schicht der Wundverschluss.<sup>28</sup>

#### 1.5 Präoperative Diagnostik vor CI-Versorgung

Zur CI-Indikationsstellung wird neben einer ausführlichen Anamnese eine umfangreiche multidisziplinäre präoperative Evaluation empfohlen. Können allgemeine Risikofaktoren für eine Operation in Vollnarkose ausgeschlossen werden, müssen neben dem klinischen

Untersuchungsbefund, abhängig vom Alter des Patienten, durch verschiedene audiologische Verfahren Art und Umfang der Hörstörung sowie die Funktion des Hörorgans genau beurteilt werden. Bei V. a. eine familiär bedingte Schwerhörigkeit erfolgt eine humangenetische Beratung. Daneben ist eine Abklärung des psychologischen und psychosozialen Zustands des Patienten notwendig, um die postoperative Compliance sowie Motivation und Lernbereitschaft sicherzustellen. Bei jungen Patienten werden zusätzlich Untersuchungen zur Beurteilung des allgemeinen Entwicklungszustands und der Sprachentwicklung sowie neurologische und augenärztliche Untersuchungen durchgeführt.<sup>27</sup> Außerdem werden vor dem chirurgischen Eingriff bildgebende Untersuchungsverfahren eingesetzt. Die wichtigsten Verfahren sind dabei die Computertomographie (CT), die konventionelle und gegebenenfalls die funktionelle Magnetresonanztomographie (MRT).<sup>20</sup>

#### 1.5.1 Bildgebende Verfahren

Die CT und die MRT dienen vor der CI-Operation der genauen Beurteilung des auditorischen Systems und seiner angrenzenden Nachbarstrukturen. Die beiden Untersuchungsverfahren ermöglichen unter anderem die Diagnostik angeborener Fehlbildungen im Bereich des Innenohrs. Daneben können Hinweise auf entzündliche Veränderungen, atypische Verläufe neuronaler Strukturen und bedeutsame anatomische Varianten mit Hilfe der CT und der MRT detektiert werden. Die durch diese Untersuchungen identifizierten Informationen können zum einen zur Operationsplanung von Bedeutung sein, zum anderen können sie Hinweise auf mögliche Ursachen für eine nicht abgeklärte Hörstörung liefern.<sup>20</sup>

##### 1.5.1.1 Computertomographie

Die CT ermöglicht die Darstellung des menschlichen Körpers in überlagerungsfreien Querschnittsbildern. Die ersten Versuche zur CT führte der amerikanische Neurologe William Henry Oldendorf durch. Er publizierte im Jahr 1961 die Grundlagen und die Idee der Computertomographie.<sup>31</sup> Einige Jahre später entwickelte der englische Physiker Godfrey Newbold Hounsfield die Ideen zur CT weiter, wofür er im Jahr 1979 zusammen mit Allan McLeod Cormack den Nobelpreis für Medizin erhielt. Bei dieser Auszeichnung wurde W. H. Oldendorf nicht berücksichtigt, was zu kontroversen Diskussionen führte. Dieser erhielt jedoch bereits fünf Jahre zuvor, im Jahr 1974, zusammen mit



G. N. Hounsfield im Würzburger Kopfklinikum die erste Ziedses des Plantes Medaille von der Deutschen Gesellschaft für Neuroradiologie und der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft Würzburg.<sup>32,33</sup>

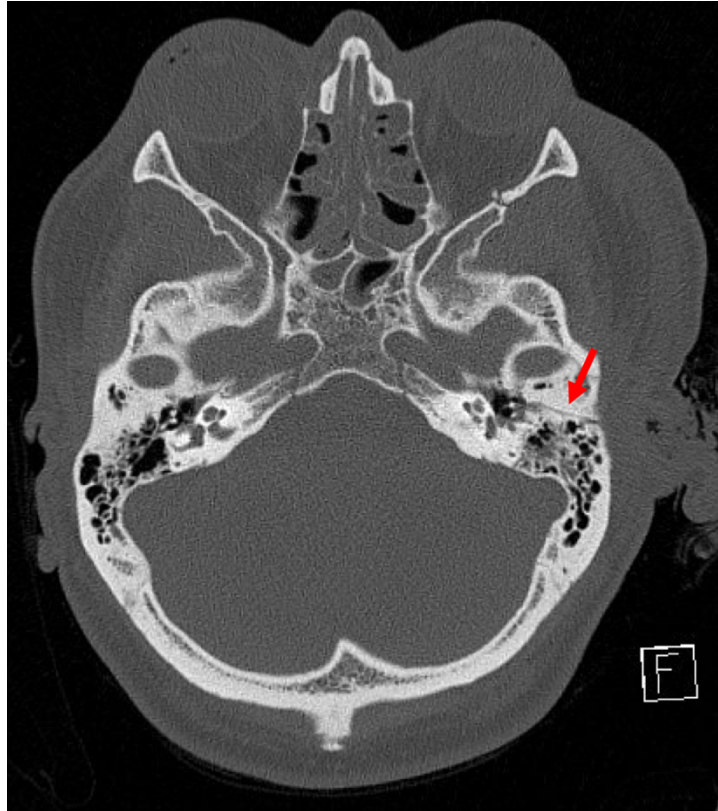
Die Funktionsweise der CT beruht auf dem mathematischen Fundament der „Radon-Transformation“, welche im Jahr 1917 von Johann Radon beschrieben wurde. Als eines der wichtigsten bildgebenden Verfahren in der Medizin hat sich die CT mit dem Ziel Aufnahmezeit, Strahlenbelastung und Kosten zu reduzieren zügig in Form mehrerer Gerätegenerationen entwickelt.<sup>34,35</sup>

Ein Computertomograph besteht aus einer Abtasteinheit, der Gantry (engl.: Gerüst), dem Patientenuntersuchungstisch, der eine exakte Positionierung und Verschiebung des Patienten ermöglicht, sowie einem Steuerpult und einem Computer. In der Gantry sind eine Röntgenröhre und ein Detektorensystem, ein Hochspannungsgenerator, ein Blendensystem und eine Kühlung vereinigt. Heute werden meist Geräte der dritten und vierten Generation verwendet, bei denen die Röntgenröhre fest verbunden mit dem Detektorensystem kreisförmig um den Patienten rotiert. Das Blendensystem blendet einen fächerförmigen Röntgenstrahl aus dem Strahlenkegel aus. Die Breite des Strahls ist auf die entsprechend ausgewählte Scheibe des Körpers, die typischerweise bei einer Dicke von 2–5 mm liegt, eingestellt und erfasst den kompletten Querschnitt des Patienten. Auf ihrem Weg durch den menschlichen Körper wird die Röntgenstrahlung unterschiedlich stark geschwächt. Die Detektoren messen die Intensitätsunterschiede der geschwächten Strahlung und wandeln sie in elektrische Signale um, welche dann durch mathematische Nachbearbeitung, die „Fourier-Transformation“, in Informationen zur Bilderzeugung umgewandelt werden. Je nach Gewebe wird das Ausmaß der Strahlenabsorption bestimmt. Die verschiedenen Dichtewerte der unterschiedlichen Gewebearten werden in der CT-Aufnahme mit verschiedenen Grauwerten dargestellt. Als Maß für die entsprechende Dichte dient die Hounsfield-Einheit (HE). Charakteristische Dichtewerte für die verschiedenen Gewebearten sind auf einer Skala angeordnet. Beispiele aus der Skala sind: Luft: -1000 HE, Fett: -100–0 HE, Wasser: 0 HE, Knochenspongiosa: 300 HE, kompakter Knochen: > 1000 HE.<sup>36,37,38</sup>

Beim CT-Scanner der dritten Generation rotiert die Röntgenröhre und das ihr gegenüberliegende Detektorensystem, welches aus 500-800 einzelnen Röntgendetektoren besteht, gemeinsam um den Patienten. Computertomographen der vierten

Generation besitzen einen stehenden Detektorenkranz, der auf seinem kompletten 360-Grad-Umfang bis zu 5000 Detektoren enthalten kann. Hier rotiert die Röntgenröhre alleine um den Patienten. Diese Systeme haben sich jedoch nicht durchgesetzt. Neben der Einzelschicht-CT-Technik, bei der der Patient zur Durchstrahlung mehrerer Körperscheiben diskontinuierlich zur Rotation der Röntgenröhre auf dem Untersuchungstisch verschoben wird, entwickelte sich nach W. A. Kalender die Spiral-CT-Technik. Dabei wird der Patient kontinuierlich auf dem Tisch vorangeschoben, während die Röntgenröhre eine spiralförmige Bahn um den Patienten beschreibt. Aus den Daten lassen sich in relativ kurzer Zeit verschiedene Schichten in beliebigen Dicken oder dreidimensionale Aufnahmen rekonstruieren. Seit einigen Jahren entwickeln sich Multidetektor-Computertomographen (Mehrzeilen-CT, Multislice-CT), bei welchen mehrere Detektorzeilen, zum Beispiel 2–256 Zeilen, parallel nebeneinander aufgeführt sind. Es wird ein 3D-Datensatz erstellt, woraus dünnere Einzelschichten, dreidimensionale sowie multiplanare Rekonstruktionen erzeugt werden können. Außerdem können in kurzer Scanzeit größere Volumina abgebildet werden, womit zum Beispiel Ganzkörper-CT-Untersuchungen bei Polytraumapatienten realisierbar sind. Daneben sind CT-Geräte auf dem Markt, in denen sich zwei versetzt angeordnete Röntgenröhren in einem System befinden und den Patienten gleichzeitig umkreisen (Dual-Source-CT). Dieses System ermöglicht eine Verbesserung der zeitlichen Auflösung, wodurch scharfe Aufnahmen sich bewegender Strukturen, wie zum Beispiel Bildgebungen des Herzens, angefertigt werden können.<sup>34,37</sup> Im Vergleich zu konventionellen Röntgenaufnahmen hat die CT ein deutlich höheres Weichteilauflösungsvermögen und liefert überlagerungsfreie Darstellungen bei höherem Kontrast. Die räumliche Auflösung ist allerdings geringer als bei den konventionellen Röntgenaufnahmen. Anhand der CT lassen sich knöcherne Strukturen wie Frakturen und Verkalkungen sehr gut beurteilen (vgl. Abbildung 4). Bei Schlaganfallpatienten und bei Patienten mit Schädel-Hirn-Trauma dient die kranielle CT als Methode der Wahl zur Basisdiagnostik. Neben der kurzen Scanzeit, die bei Notfällen wichtige Zeit sparen kann, ermöglicht die CT unter anderem mit speziellen hochauflösenden Verfahren (High-resolution-CT) die Untersuchung feiner Strukturen wie das Felsenbein oder die Lunge, wobei sehr dünne Schichten erzeugt werden. Der entscheidende Nachteil der CT

gegenüber anderen bildgebenden Verfahren ist die nicht unerhebliche Strahlenexposition.<sup>37</sup>



**Abbildung 4.** CT-Aufnahme (axial) eines 34-jährigen CI-Patienten mit einseitiger Taubheit nach Felsenbeinfraktur links. Die in die Paukenhöhle einstrahlende Frakturlinie ist in der CT deutlich zu erkennen (Pfeil).

#### 1.5.1.2 Strahlenexposition

Zur Beschreibung und Abschätzung der Strahlenexposition werden zunächst wichtige Dosisgrößen und ihre Einheiten vorgestellt. Bei der **Energiedosis D** handelt es sich um die in einer bestimmten Masse (Einheit Kilogramm) aufgenommene Energie (Einheit Joule). Die Einheit zur Angabe der Energiedosis ist das Gray (Gy) und 1 Gray entspricht 1 Joule pro Kilogramm ( $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ ). Bei der **Äquivalentdosis H** wird neben der übertragenen Energie zusätzlich die biologische Wirkung der Strahlen berücksichtigt. Dazu ist für jede Strahlenart ein spezieller dimensionsloser Strahlungswichtungsfaktor ( $w_R$ ) festgelegt, der zwischen 1 und 20 variiert und für Röntgen- und Elektronenstrahlung 1 beträgt. Die Äquivalentdosis H ist definiert als die mit dem Strahlungswichtungsfaktor multiplizierte Energiedosis. Ihre Einheit ist das Sievert (Sv), wobei 1 Sievert 1 Joule pro Kilogramm entspricht ( $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ ). Die **Organdosis** ist definiert als das Produkt aus

der im Gewebe oder Organ aufgenommenen Energiedosis und dem Strahlungswichtungsfaktor. Die Organdosis berücksichtigt somit die unterschiedlichen Auswirkungen differenter Strahlenarten auf das Gewebe oder Organ. Sie findet Verwendung im Strahlenschutz und wird in der Einheit Sievert (Sv) angegeben. Die **effektive Dosis E** erlaubt eine Risikoabschätzung für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Strahlenschäden. Sie berücksichtigt neben der biologischen Wirkung der verschiedenen Arten von Strahlen die verschiedenen Sensibilitäten der einzelnen Gewebe bzw. Organe gegenüber der ionisierenden Strahlung. Die effektive Dosis E ergibt sich aus der Summe der einzelnen Organdosen multipliziert mit den jeweiligen Gewebewichtungsfaktoren ( $w_T$ ). Dabei soll der Gewebewichtungsfaktor die relative Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Strahlenschadens abhängig von der jeweiligen Sensibilität des Gewebes bzw. Organs angeben. Die Einheit von E ist ebenfalls das Sievert (Sv). Die Gewebewichtungsfaktoren sind in den Richtlinien der europäischen Atomgemeinschaft festgelegt und in einer Tabelle im Anhang dieser Arbeit aufgeführt.<sup>39,40,41</sup>

Nach Angaben der europäischen Kommission liegt die typische effektive Dosis einer CT-Untersuchung des Kopfes bei 2,3 mSv. Dieser Wert entspricht etwa der Dosis von 115 konventionellen Röntgenaufnahmen des Thorax.<sup>42</sup> Je nach Gerätetyp und Aufnahmemodus eines CT-Scanners unterscheiden sich die Strahlendosen, die in den verschiedenen Organen ankommen. Lutz et al. (2007) stellten bei Schläfenbein-Aufnahmen durch einen 4-zeiligen Computertomographen eine mittlere Äquivalentdosis von 0,61 (+/-0,08) mSv fest. Bei Aufnahmen durch ein 64-zeiliges Gerät lag die mittlere Äquivalentdosis bei 0,31 (+/-0,12) mSv.<sup>43</sup> Die Augenlinse, die eines der strahlensensibelsten Organe des Körpers ist, ist bei Kopf- bzw. Schläfenbein-CT-Untersuchungen aufgrund ihrer möglichen Lage im Bereich des Primärstrahls (Nutzstrahls) besonders zu berücksichtigen. Nach Schätzungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) liegt die Schwellendosis für die Entstehung einer radiogenen Linsentrübung, eines Strahlenkatarakts, bei einer einmaligen, kurzzeitigen Strahlenexposition von ca. 0,50 Gy.<sup>44</sup>

### 1.5.1.3 Magnetresonanztomographie

Auch die MRT ist ein computergestütztes Untersuchungsverfahren zur Erzeugung von Schnittbildern durch den Körper. Im Jahr 1971 veröffentlichte der amerikanische

Mediziner und Biophysiker Raymond Vahan Damadian seine Idee zur Tumordetektion mittels magnetischer Kernresonanz.<sup>45</sup> 1973 folgte eine Publikation des amerikanischen Chemikers Paul Christian Lauterbur mit der Theorie zur Magnetresonanztomographie als Bildgebungsverfahren.<sup>46</sup> Für seine Entdeckungen erhielt P. C. Lauterbur im Jahr 2003 zusammen mit dem englischen Physiker Peter Mansfield den Nobelpreis. Auch diese Nobelpreisvergabe wurde kontrovers diskutiert, da R. V. Damadian dabei nicht berücksichtigt wurde.<sup>47,48</sup>

Bei der MRT erfolgt die Bilderzeugung nicht durch ionisierende Strahlen, sondern beruht auf dem Prinzip der magnetischen Kernresonanz, daher auch die Bezeichnung „Kernspintomographie“. Die magnetische Kernresonanz betrifft Atomkerne mit ungerader Nukleonenzahl, zum Beispiel Wasserstoffkerne, also einfache Protonen, die einen Kernspin (Eigendrehimpuls) haben und damit ein magnetisches Dipolmoment besitzen. Diese magnetischen Dipole liegen im menschlichen Körper ungeordnet vor, es kommt zu einer Kompensation. Innerhalb eines starken äußeren Magnetfeldes kommt es zu einer parallelen oder antiparallelen Ausrichtung der magnetischen Dipole entlang der Feldlinien, was zu einer von außen messbaren Magnetisierung führt (Längsmagnetisierung). Die Protonen verhalten sich wie magnetische Kreisel und führen eine Präzessionsbewegung um die Längsachse des Magnetfeldes aus. Es werden kurze Pulse von elektromagnetischen Wellen im Frequenzbereich der Radiowellen eingestrahlt, wodurch die Atomkerne kurze Zeit selbst zum Sender von Radiowellen werden. Diese können mit speziellen Verfahren gemessen und durch einen Computer zur Bildrekonstruktion ausgewertet werden.<sup>49,50</sup> Ein Magnetresonanztomograph besteht aus einem Magneten, der ein homogenes, also überall gleichmäßiges Hauptmagnetfeld bildet. Meist handelt es sich dabei um supraleitende Magnete, die nach einmaliger Energiezufuhr an Stromfluss und Feldstärke nicht abnehmen und sehr homogene und starke Magnetfelder erzeugen. Diesem Hauptmagnetfeld werden für die Schichtwahl und zur Ortskodierung in allen drei Raumebenen durch Gradientenspulen kleine Magnetfelder überlagert. Hochfrequenzspulensysteme, die an die Oberfläche des Körpers angebracht werden, dienen zur Signalerzeugung, dem Signalempfang und dessen Weiterleitung an das Computersystem zur Bilderzeugung.<sup>50,51</sup> Durch einen festgelegten Hochfrequenzimpuls (HF-Impuls, Anregungsimpuls) werden die Protonen angeregt (Auslenkung der Längsmagnetisierung), welche dadurch eine zu messende

Quermagnetisierung erzeugen. Parallel wird durch den HF-Impuls die Präzessionsbewegung synchronisiert. Nach dieser Anregung erfolgt die Relaxation der Protonen, also die Rückkehr in ihren Grundzustand. Dabei kehren die durch das äußere Magnetfeld ausgelenkten Protonen unter Energieabgabe zurück in die Längsmagnetisierung (Längsrelaxation). Gleichzeitig erfolgt die Querrelaxation, was der Desynchronisierung der Präzessionsbewegung ohne Abgabe von Energie entspricht.<sup>50,52</sup> Spezielle gewebespezifische Zeitkonstanten (T) beschreiben mathematisch diese Relaxationen:

- Längsrelaxation: T1 (Spin-Gitter-Relaxationszeit), Dauer: 300-2000 ms,
- Querrelaxation: T2 (Spin-Spin-Relaxationszeit), Dauer: 30-150 ms.

Mehrere HF-Impulse in Folge werden als Sequenz bezeichnet. Die zwischen zwei Anregungen liegende Zeit wird als Repetitionszeit (TR) bezeichnet und die Echozeit (TE) ist die zwischen dem Impuls und der Signalaufnahme liegende Zeit. Der Bildkontrast, das heißt die Helligkeitsunterschiede der verschiedenen Gewebearten, wird durch Gewebeparameter (T1, T2, Protonendichte), Sequenzparameter (TR, TE) und Sequenztyp bestimmt:

- T1-gewichtete (T1w) Sequenz:  
kurze TR und TE. Gewebe mit einer kurzen T1 (z. B. Fett, weiße Hirnsubstanz) werden hell (hyperintens) und Gewebe mit einer langen T1 (z. B. Muskel, graue Hirnsubstanz) werden dunkel (hypointens) dargestellt.
- T2-gewichtete (T2w) Sequenz:  
längere TR und TE. Gewebe mit einer langen T2 (z. B. Wasser) werden hell, Gewebe mit einer kurzen T2 (z. B. Muskel) dunkel abgebildet. Flüssigkeitsgefüllte Strukturen wie Ödeme, Zysten oder Liquorräume erscheinen daher hell.
- Protonendichte-gewichtete (PDw) Sequenz:  
lange TR und kurze TE. Die Protonendichte des Gewebes entscheidet die Helligkeit. Hohe Protonendichte (z. B. Wasser, Bindegewebe) führt zu heller, geringe Protonendichte (z. B. Luft, Knochen) führt zu dunkler Darstellung.<sup>50,52</sup>

Je nach Untersuchung werden viele verschiedene Sequenzen eingesetzt. Meist wird als Grundsequenz die Spin-Echo-Sequenz verwendet, welche gute Gewebekontraste erzeugt

und daher vor allem in der Neuroradiologie eingesetzt wird. Neue Entwicklungen, die schnellere Sequenzen enthalten, wie die Turbo-Spin-Echo-Sequenz und die Gradientenecho-Sequenz (GE-Sequenz) ermöglichen eine deutlich kürzere Untersuchungsdauer. Im Gegensatz zur Spin-Echo-Sequenz sind dabei allerdings die Kontraste geringer und die Anfälligkeit für Artefakte ist höher. Spezielle Sonderformen der GE-Sequenz wie die Echo-planar-imaging-Sequenzen, die Untersuchungen unter 100 ms für ein einzelnes Bild ermöglichen, werden in der Diffusionsbildgebung, z. B. zur Schlaganfalldiagnostik, eingesetzt. Die MRT ermöglicht eine sehr gute Differenzierbarkeit von Weichteilstrukturen, da sie das bildgebende Verfahren mit dem höchsten Weichteilkontrast ist. Ihre größte Bedeutung liegt in der Diagnostik von Pathologien im Bereich des ZNS. Weitere Vorteile der MRT sind die nicht invasive Darstellungsmöglichkeit von Gefäßströmen mit und ohne Kontrastmittelgabe, sowie eine gute Beurteilbarkeit von Tumoren und Entzündungen. Sie gilt als Methode der Wahl zur Darstellung von Bändern, Muskeln, Sehnen- und Knorpelstrukturen. Im Gegensatz zur CT wird der Patient keiner ionisierenden Strahlung ausgesetzt. Verkalkungen und Knochen lassen sich durch die MRT jedoch nur eingeschränkt darstellen, da diese signalarm und damit schwierig zu beurteilen sind. Außerdem schränken die deutlich längeren Untersuchungszeiten im Vergleich zur CT den Einsatz der MRT in der Notfalldiagnostik ein. Da die MRT eine hohe Anfälligkeit für Bewegungsartefakte hat, kann die Untersuchung von Kindern oder klaustrophoben Patienten erschwert sein. Durch das starke Magnetfeld werden magnetische Teile mit großer Kraft angezogen und durch Induktion können in elektrischen Implantaten Spannungen erzeugt werden. Daher muss bei Untersuchungen von Patienten mit potentiell beweglichen und magnetischen Metallteilen im Körper, Herzschrittmachern und bestimmten Implantaten sichergestellt werden, dass eine Untersuchung keine gesundheitsschädigenden Folgen für den Patienten hat.<sup>49,50,52</sup>

### 1.5.2 Rolle der bildgebenden Verfahren in der präoperativen Diagnostik

Wie bereits angesprochen, werden vor der operativen CI-Versorgung eines Patienten bildgebende Verfahren zur Untersuchung der knöchernen Strukturen sowie der Weichteile im Operationsgebiet eingesetzt. Die CT ermöglicht, wie unter 1.5.1.1 beschrieben, eine sehr gute Beurteilung der knöchernen Strukturen. Folglich gilt die CT-Untersuchung des Felsenbeins, welches ein Teil des Schläfenbeins ist und das Gehör- und

Gleichgewichtsorgan enthält, auch als Mittel der Wahl zur Untersuchung der feinen knöchernen Innenohrstrukturen.<sup>20,53</sup> So können zur prächirurgischen Diagnostik vor einer CI-Operation der IGG, der Aquaeductus vestibuli und der Aquaeductus cochleae mittels CT beurteilt werden. Außerdem können kalzifizierende Obliterationen des knöchernen Labyrinths detektiert und der Verlauf des N. facialis in seinem kanalikulären Abschnitt sowie auf seiner tympanalen und mastoidalen Strecke dargestellt und überprüft werden. Die MRT hingegen ermöglicht aufgrund des hohen Weichteilkontrastes eine deutlich bessere Darstellung der Weichteilstrukturen im Bereich des Innenohrs als die CT. Anhand bestimmter Sequenzen und Rekonstruktionen können mit Hilfe der MRT die Flüssigkeitssignale der Cochlea, der Bogengänge, des membranösen Labyrinths und des IGG analysiert werden. Der N. vestibulocochlearis, Kleinhirnbrückenwinkel, Pons, und weiter zentral liegende Anteile der Hörbahn können ebenfalls beurteilt werden. Neben den konventionellen MRT-Untersuchungen können außerdem spezielle funktionelle MRT-Aufnahmen erzeugt werden. Mit Hilfe dieser funktionellen Untersuchungen soll unter anderem die Aktivität bestimmter Neurone in bestimmten Hirnarealen gemessen, oder ein eventuell vorhandenes Restgehör nachgewiesen werden. Ziel dieser Methoden ist eine genaue Beurteilung der Funktionsfähigkeit des auditorischen Systems.<sup>20</sup>

Durch ihre Darstellbarkeit der genannten Strukturen eignen sich die CT- und MRT-Untersuchungen sowohl zur CI-Operationsplanung als auch zur Erfassung bestimmter Auffälligkeiten, welche Ursache für die sensorineurale Schwerhörigkeit der Patienten sein können. Zur Darstellbarkeit der verschiedenen Auffälligkeiten finden sich in der Literatur zahlreiche Veröffentlichungen. Nachfolgende Tabelle 5 fasst auf Grundlage der Arbeiten von Biller et al. (2007), Casselman et al. (1997) und Swartz et al. (1996) eine Reihe relevanter Auffälligkeiten und ihre zum Nachweis empfohlenen bevorzugten Untersuchungsmethoden zusammen.



**Tabelle 5.** Pathologien und ihre Darstellungsmöglichkeiten nach Biller et al. (2007), Casselman et al. (1997) und Swartz et al. (1996)<sup>20,54,55</sup>

	<b>Darstellbarkeit mittels CT</b>	<b>Bedingte/nicht mögliche Darstellbarkeit mittels CT</b>
<b>Darstellbarkeit mittels MRT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Cholesteatom</li> <li>· Cholesteringranulom</li> <li>· Fibröse Dysplasie</li> <li>· Obliteration der Cochlea (im Rahmen von Entzündungen und Infektionen)</li> <li>· Labyrinthäre Aplasie</li> <li>· Cochleäre Aplasie</li> <li>· Otozysten-Deformität</li> <li>· IP 2</li> <li>· Malformationen des IGG</li> <li>· LVAS</li> <li>· Atypischer Verlauf des N. facialis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Hypo-, Aplasie des N. vestibulocochlearis</li> <li>· Intralabyrinthäre Tumoren</li> <li>· Läsionen im Bereich des Kleinhirnbrückenwinkels</li> <li>· Läsionen im Bereich der zentralen Anteile der Hörbahn</li> </ul>
<b>Bedingte/nicht mögliche Darstellbarkeit mittels MRT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Otosklerose</li> <li>· Osteogenesis imperfecta</li> <li>· Frakturen</li> <li>· Cochleäre Hypoplasie</li> <li>· Bogengangaplasie</li> <li>· Bogengangdysplasie</li> <li>· Hochstand des Bulbus venae jugularis</li> </ul>	

## 1.6 Ziel der Arbeit

Die Bedeutung der neuroradiologischen Diagnostik vor Cochlea-Implantation mittels moderner CT- und MRT-Untersuchungen war Inhalt mehrerer Studien. Immer häufiger wird die routinemäßige Anwendung beider Untersuchungsverfahren zur präoperativen Diagnostik diskutiert. So stellten zum Beispiel Tamplen et al. (2016) in einer Studie fest, dass eine präoperative Untersuchung mittels Schnittbildgebung nicht bei jedem Patienten notwendig ist. Sie sind der Meinung, dass, falls eine Bildgebung erforderlich ist, wie zum Beispiel bei jungen CI-Kandidaten, eine routinemäßige Untersuchung mittels CT ausreicht.<sup>56</sup> Schwartz et al. (2014) stellten ebenfalls die routinemäßige präoperative bildgebende Untersuchung in Frage. Durch die Ergebnisse ihrer Studie empfehlen sie, wenn notwendig, eine alleinige Untersuchung mittels MRT.<sup>57</sup> Auch Roberts et al. (2014)

folgerten aus ihrer Studie, dass nicht bei jedem Patienten eine routinemäßige präoperative Untersuchung mittels CT oder MRT erforderlich ist.<sup>58</sup>

Auch am Universitätsklinikum Würzburg wurde zur präoperativen Diagnostik vor der CI-Versorgung eines Patienten häufig sowohl eine CT-Aufnahme des Felsenbeins, als auch eine MRT-Aufnahme des Schädels angefertigt. Diese Arbeit beschäftigt sich retrospektiv mit den Fragen, welche Ergebnisse die beiden Schnittbilduntersuchungen lieferten. Die verschiedenen, anhand der CT- und MRT-Aufnahmen detektierten Befunde werden miteinander verglichen und es wird erarbeitet, in wie weit diese Bildgebungen für die CI-Operation von Relevanz waren. Ein weiteres Ziel ist, zu untersuchen, ob und wie häufig die Bildgebungen dazu verhalfen, ätiologische Hinweise auf eine zuvor nicht abgeklärte Ursache einer Hörstörung zu finden. Auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit soll anschließend beurteilt werden, ob die Anwendung beider radiologischer Aufnahmeverfahren in jedem untersuchten Fall von Nutzen war und ob es möglich ist, eine Empfehlung für die zukünftige Wahl der radiologischen Diagnostikmethoden vor CI-Operationen zu geben.

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Patientenkollektiv

Für die retrospektive Studie wurde zunächst nach Patienten recherchiert, die zwischen Januar 2005 und August 2015 an der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten des Universitätsklinikums Würzburg (HNO-Klinik) mit mindestens einem CI versorgt wurden. Zum Erhalt des Datenschutzes wurde die ermittelte Patientenliste aller operierten Personen mit Hilfe von Dr. jur. Karsten Eirich durch das Servicezentrum Medizin-Informatik des Universitätsklinikums pseudonymisiert, indem jedem Patienten eine Fall-ID zugeordnet wurde. Jede Fall-ID bestand aus einem zehnstelligen Zahlencode. Daraufhin wurden die für diese Arbeit relevanten Patientendaten sowohl aus der Datenbank der Abteilung für Neuroradiologie (jetzt Institut für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie) des Universitätsklinikums Würzburg, als auch aus den Patientenakten des Comprehensive-Hearing-Centers der HNO-Klinik gesammelt. Es wurden Anamnesen, Arztbriefe und Untersuchungsbefunde analysiert, um Informationen über Ursache, Schweregrad und Art der Hörminderung der Patienten zu finden. Verschiedene demographische Daten wie Geschlecht, Alter bei Cochlea-Implantation, operierte Seite und Anzahl der Cochlea-Implantate pro Patient wurden erhoben. Im Anschluss wurden alle Operationsberichte der CI-Fälle retrospektiv nach intraoperativen Auffälligkeiten oder Schwierigkeiten während der Cochlea-Implantation untersucht.

Patienten, die vor ihrer Cochlea-Implantation auf der CI-Kopfseite bereits einer anderen Operation im Bereich des äußeren, Mittel- oder Innenohrs unterlagen, oder auf dieser Seite bereits mit einem CI vor dem Jahr 2005 versorgt wurden, wurden aus der Arbeit ausgeschlossen. Dies galt nicht für Patienten, wenn diese zwar ein CI vor dem Jahr 2005 erhalten hatten, das zweite Ohr aber erst nach 2005 operiert wurde. Von diesen Patienten wurde allerdings nur das CI, das zwischen 2005 und 2015 implantiert wurde, in die Auswertung einbezogen. Außerdem wurden alle Patienten ausgeschlossen, von denen nur extern angefertigte Bildgebungen vorhanden waren, also weder eine präoperative CT-Aufnahme des Felsenbeins noch eine MRT-Aufnahme des Schädels am Universitätsklinikum Würzburg erstellt worden war. Patienten mit fehlenden oder unvollständigen Akten wurden für die Auswertungen ebenso nicht berücksichtigt.

## 2.2 Untersuchungsgeräte und Aufnahmetypen

### 2.2.1 Computertomographie

Zur präoperativen Diagnostik wurden in der Abteilung für Neuroradiologie des Universitätsklinikums Würzburg CT-Aufnahmen des Felsenbeins in Spiraltechnik mit multiplanarer Rekonstruktion angefertigt. Bis zum Jahr 2014 diente das 4-zeilige Gerät „SOMATOM Volume Zoom“ (Siemens Healthineers, Erlangen, Deutschland) zur Bilderzeugung, danach erfolgten die Untersuchungen durch den 128-zeiligen Computertomographen „SOMATOM Definition AS+“ (Siemens Healthineers, Erlangen, Deutschland).

### 2.2.2 Magnetresonanztomographie

Die hauseigen angefertigten MRT-Aufnahmen wurden bis zum Jahr 2007 durch den 1,5 T-Magnetresonanztomographen „Symphony Vision“ (Siemens Healthineers, Erlangen, Deutschland) durchgeführt. Danach wurden die Aufnahmen durch den 3 T-Scanner „MAGNETOM TIM Trio“ (Siemens Healthineers, Erlangen, Deutschland) erzeugt. Das üblicherweise verwendete Protokoll beinhaltete folgende Sequenzen:

- transversale T1w,
- transversale T2w/und PDw,
- transversale Flair,
- transversale diffusionsgewichtete Sequenz (DWI),
- transversale 3D-CISS,
- koronare dünn-schichtige T1w (2-3 mm Schichtdicke) vor und nach Kontrastmittelgabe,
- transversale T1w nach Kontrastmittelgabe.

Es wurden Aufnahmen des Schädels mit Felsenbeindarstellung vor und nach Kontrastmittelgabe angefertigt. Als eine besonders wichtige Sequenz im Rahmen der präoperativen Diagnostik gilt die hochaufgelöste 3D-CISS-Sequenz (constructive interference in steady state-Sequenz). Dabei handelt es sich um eine spezielle dreidimensionale, stark T2-gewichtete GE-Sequenz mit einem hohen Flüssigkeits- und Gewebekontrast. Der Flüssigkeitsgehalt des Innenohrs und kleine Strukturen wie beispielsweise Hirnnerven können so detailliert und hoch kontrastiert dargestellt werden.

Des Weiteren erlaubt die CISS-Sequenz die Abklärung einer möglichen Obliteration der Cochlea.<sup>20,59</sup>

## 2.3 Auswertung der Schnittbilder und Tonaudiogramme

### 2.3.1 Radiologische Auswertung der Schnittbilder

Alle vorhandenen, präoperativ angefertigten CT- und MRT-Aufnahmen wurden durch den Neuroradiologen Dr. med. Bálint Alkonyi, PhD, retrospektiv beurteilt. Besonderes Augenmerk wurde auf bestimmte Auffälligkeiten im Bereich des Felsenbeins gelegt. Dazu gehörten Anomalien und Fehlbildungen des Innenohrs, Frakturen, cochleäre Verkalkungen oder Verknöcherungen, Cholesteatome oder eine Otosklerose. Außerdem wurden alle Neben- und Zufallsbefunde protokolliert. Die Auswertung der Schnittbilder erfolgte stets anonymisiert nach den gleichen Kriterien, unabhängig von bereits vorhandenen radiologischen Befunden und ohne Kenntnis anamnestischer Angaben oder anderer Untersuchungsbefunde.

### 2.3.2 Tonaudiogramme

Die Art der Hörminderung der Patienten wurde neben der Analyse der in den Akten dokumentierten Befunde durch das Studium der präoperativ angefertigten Tonaudiogramme der Patienten erfasst. Durch die Hörschwellenbestimmung mittels Tonaudiometrie kann zwischen SLS, SES und kombinierter Schwerhörigkeit differenziert werden (vgl. Abschnitt 1.3.1.2). Außerdem kann mit Hilfe eines Audiogrammes festgestellt werden, ob ein symmetrischer oder asymmetrischer Hörverlust vorliegt. Ähnlich wie in vergleichbaren Studien wurden in dieser Arbeit folgende Kriterien für einen asymmetrischen HV festgelegt: In der Luftleitung müssen mehr als 10 dB Differenz zwischen dem rechten und linken Ohr in drei aufeinanderfolgenden Frequenzen vorliegen. Ein asymmetrischer HV liegt auch dann vor, wenn 15 dB Differenz in zwei aufeinanderfolgenden Frequenzen oder 20 dB Asymmetrie innerhalb einer Frequenz auftreten.<sup>58</sup>

Wie bereits in Abschnitt 1.3 erwähnt, sind die Ergebnisse im Rahmen der Tonaudiometrie durch ihren subjektiven Charakter vor allem bei Kindern nicht immer zuverlässig oder unvollständig. Daher wurden in dieser Arbeit nur die Audiogramme der erwachsenen Patienten berücksichtigt.

## 2.4 Statistik

Die statistische Analyse der erhobenen Daten erfolgte mit Hilfe der Programme Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corporation, Redmond, USA) und IBM SPSS Statistics Version 24 (IBM Corporation, Armonk, USA). Zur deskriptiven Darstellung der demographischen Patientendaten, der verschiedenen Arten ihrer Hörminderungen und deren mögliche Ursachen wurden relative und absolute Häufigkeiten, Standardabweichungen und Mittelwerte berechnet. Des Weiteren wurde das Vorhandensein verschiedener Zusammenhänge mittels  $\chi^2$ -Unabhängigkeitstest (Chi-Quadrat-Test) nach Pearson geprüft, wenn dieser anwendbar war. Waren die Voraussetzungen des Chi-Quadrat-Tests nicht erfüllt, wurde stattdessen der exakte Test nach Fisher eingesetzt. Für die vorliegende Arbeit wurde als Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$  (5 %) gewählt. Die Vergleiche fanden jeweils auf zweiseitigem Signifikanzniveau statt. Mit Hilfe der Tests wurde die Frage nach einem Zusammenhang zwischen einem vorhandenen oder nicht vorhandenen Befund in einem röntgenbasierten Untersuchungsverfahren (CT) mit dem Vorhandensein oder nicht Vorhandensein des gleichen Befundes in dem anderen bildgebenden Untersuchungsverfahren (MRT) statistisch überprüft. Außerdem wurden damit Angaben über bestimmte Vorerkrankungen aus den Anamnesen mit korrelierenden Befunden in den präoperativen CT- und MRT-Scans verglichen. Ferner wurde anhand der Operationsberichte nach Auffälligkeiten oder Schwierigkeiten während der CI-Operation gesucht und mittels statistischer Überprüfung die Frage nach einem möglichen Zusammenhang zwischen diesen Ereignissen und Hinweisen darauf in den dazugehörigen präoperativen radiologischen Schnittbilduntersuchungen untersucht. Die Tabellen und Abbildungen wurden mit den Programmen Microsoft Excel und Powerpoint (Microsoft Corporation, Redmond, USA) erstellt.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Patientendaten

Die Recherche in der Datenbank des Universitätsklinikums Würzburg ergab, dass insgesamt 936 Patienten zwischen Januar 2005 und August 2015 an der Klinik und Poliklinik für Hals- Nasen- und Ohrenkrankheiten mit mindestens einem CI versorgt wurden. Von den 936 CI-Patienten wurden 387 Patienten nicht in die Auswertungen einbezogen, da sie eines oder mehrere der in 2.1 genannten Ausschlusskriterien vorwiesen. Folglich konnten 549 Patienten für die Analysen dieser Arbeit rekrutiert werden. Davon waren 277 (50,5 %) Patienten weiblich und 272 (49,5 %) Patienten männlich. Das Patientenkollektiv bestand aus 165 (30,1 %) operierten Kindern, das heißt Patienten unter 18 Jahre, und 384 (69,9 %) operierten Erwachsenen. Das Durchschnittsalter der Kinder bei der ersten CI-Operation betrug 4,6 Jahre mit einer Standardabweichung von 4,6 Jahren. Bei den Erwachsenen lag das Durchschnittsalter bei 54,6 Jahren mit einer Standardabweichung von 16,8 Jahren. Das mittlere Alter des gesamten Patientenkollektivs lag bei 39,6 Jahren mit einer Standardabweichung von 27,0 Jahren. Der jüngste operierte Patient war 5 Monate und der älteste Patient 89 Jahre alt. 207 (37,7 %) Patienten wurden nur auf der rechten Seite operiert, 186 (33,9 %) Patienten nur auf der linken Seite und 156 (28,4 %) Patienten wurden beidseits mit einem CI versorgt.

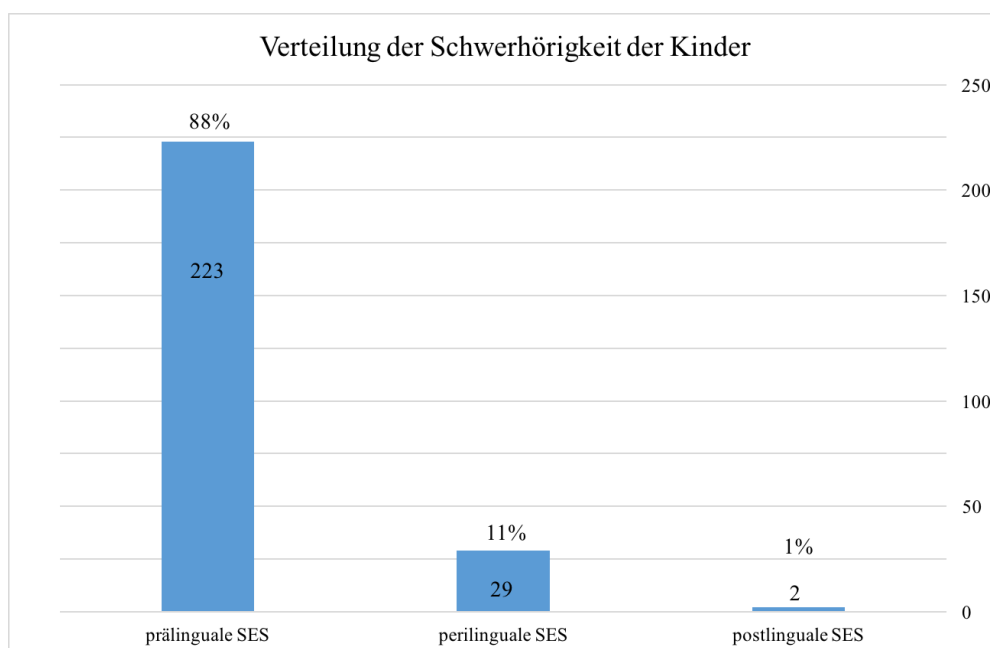
Von den 549 Patienten, die alle Auswahlkriterien dieser Studie erfüllten (vgl. 2.1), lagen 522 präoperative CT-Aufnahmen und 441 präoperative MRT-Aufnahmen zur Befundung vor. Von den 522 CT-Aufnahmen wurden 9 Aufnahmen auswärtig, also nicht in der Abteilung für Neuroradiologie des Universitätsklinikums Würzburg angefertigt. Von den MRT-Untersuchungen waren 61 Aufnahmen extern angefertigt. Von diesen extern angefertigten MRT-Aufnahmen fehlte bei 10 Aufnahmen die 3D-CISS-Sequenz, bzw. eine dazu äquivalente Sequenz. Da diese Sequenz, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, eine besondere Bedeutung zur Beurteilung der Innenohrstrukturen hat, mussten diese 10 Aufnahmen für bestimmte Auswertungen ausgeschlossen werden. Alle anderen Fremdbilder wurden genauso wie die hauseigen angefertigten Bilder betrachtet. Bei allen Patienten lag immer mindestens ein hauseigen erstelltes Bild vor. Bei 414 (75,4 %) der 549 Patienten lagen beide präoperativen Bildgebungen vor. Bei 108 (19,7 %) Patienten

lag nur eine hauseigen angefertigte CT-Aufnahme vor und bei 27 (4,9 %) Patienten lag nur eine hauseigen angefertigte MRT-Aufnahme vor.

### 3.2 Art der Hörstörung und Ätiologie

Zur Erfassung der Art und möglichen Ursachen der Schwerhörigkeit bzw. Ertaubung, welche die CI-Operationen der Patienten indizierten, wurde jede CI-Operation als ein einzelner Fall betrachtet. Das heißt, bei beidseits operierten Patienten wurden die zwei CI-Operationen als zwei getrennte Fälle betrachtet. Dies war notwendig, da bei einem Teil der beidseitig operierten Patienten je Ohr verschiedene Arten der Hörminderung vorlagen und jeweils unterschiedliche Ursachen für die entstandene Hörminderung in Frage kamen. Somit wurden insgesamt 705 einzelne CI-Operationsfälle untersucht, wovon es sich in 254 (36,0 %) Fällen um Kinder und in 451 (64,0 %) Fällen um Erwachsene handelte.

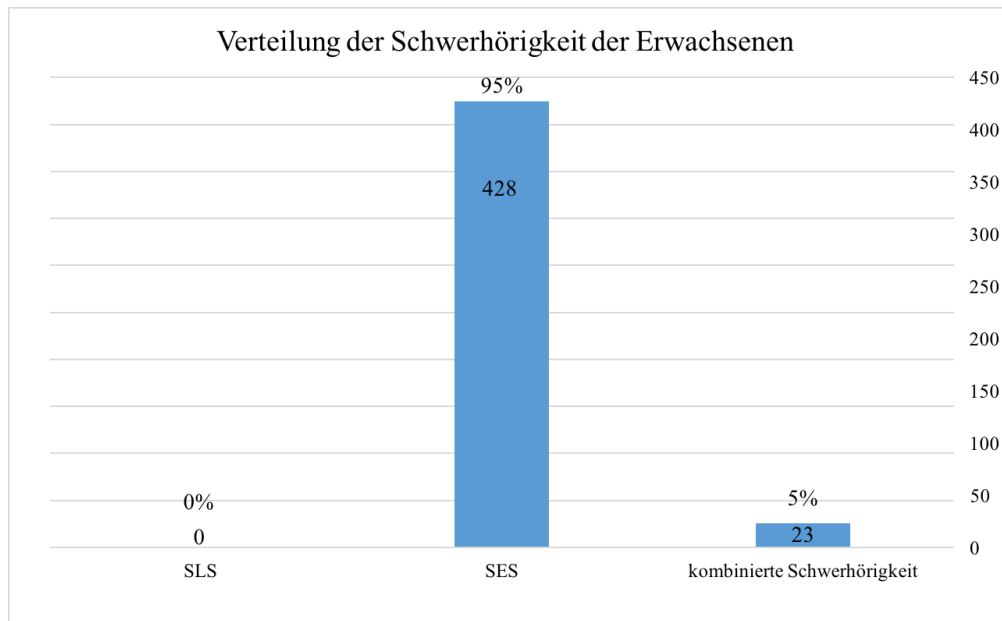
Bei allen 254 Kinder-OP-Fällen wurde eine SES auf dem operierten Ohr diagnostiziert. Je nach Eintrittszeitpunkt der Hörminderung wurde zwischen prä-, peri- und postlingualer Schwerhörigkeit unterschieden. Die nachfolgende Abbildung 5 stellt die Verteilung der prä-, peri- und postlingualen SES der 254 Kinder-OP-Fälle dar.



**Abbildung 5.** Verteilung der Schwerhörigkeit der Kinder-OP-Fälle.



Bei den Erwachsenen-OP-Fällen wurden neben einer SES auch Fälle mit kombinierten Schwerhörigkeiten erfasst. Im Gegensatz zu den Kindern konnte bei der SES jedoch nicht zwischen einer prä-, peri-, und postlingualen Schwerhörigkeit unterschieden werden, da der Zeitpunkt des Eintretens der Schwerhörigkeit bei den erwachsenen Patienten häufig nicht mehr nachvollziehbar war. Abbildung 6 zeigt die Verteilung der Arten der Schwerhörigkeit der 451 Erwachsenen-OP-Fälle.



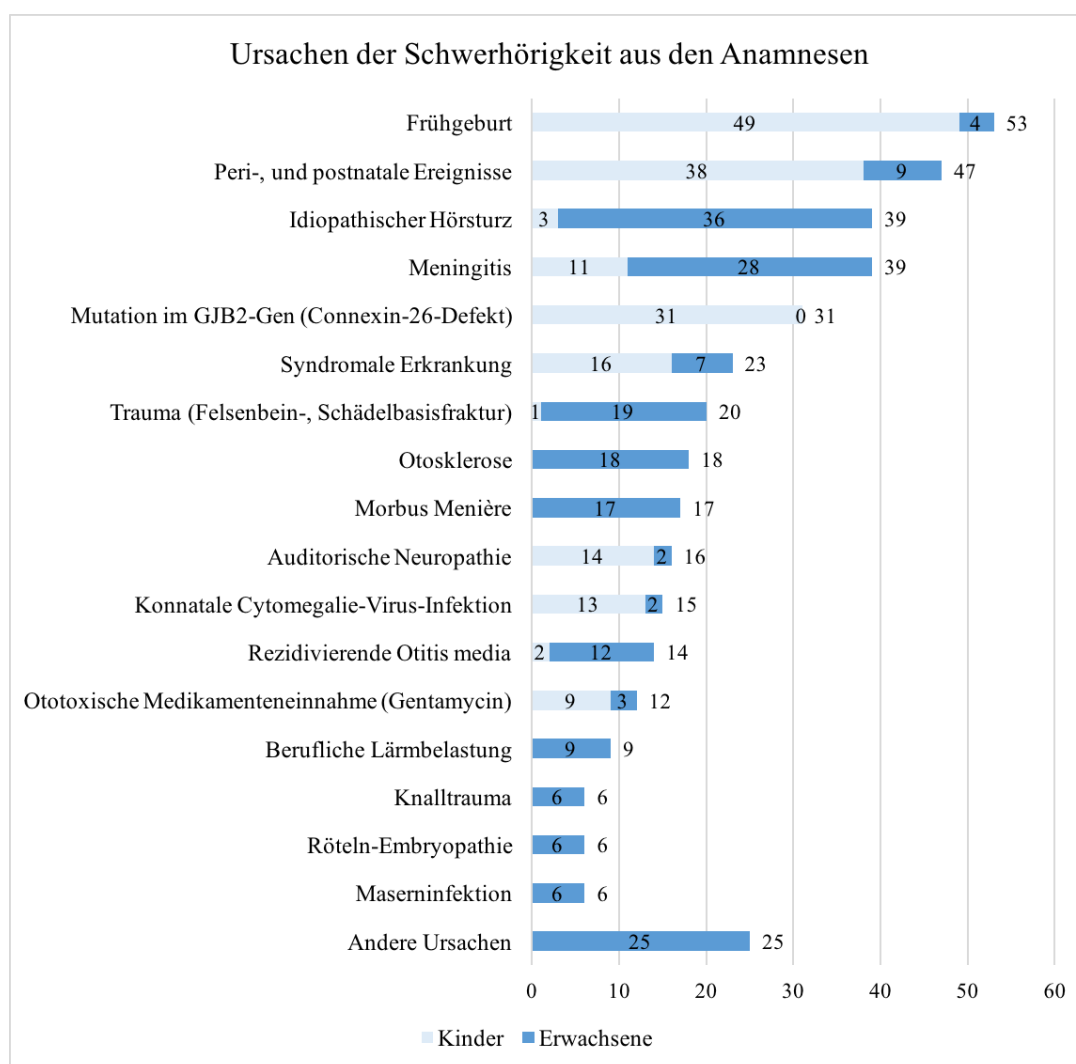
**Abbildung 6.** Verteilung der Schwerhörigkeit der Erwachsenen-OP-Fälle.

Insgesamt konnten in 376 (53,3 %) Fällen aller CI-Operationsfälle ( $n = 705$ ) mögliche Ursachen aus Anamnesen, Untersuchungsbefunden und bzw. oder radiologischen Befunden für die Hörminderung des jeweils operierten Ohrs vermutet werden. In 329 (46,7 %) Fällen lieferten weder die Anamnesen, noch die klinischen oder radiologischen Untersuchungsbefunde Hinweise für eine mögliche Ursache der Hörminderung.

### 3.2.1 Ätiologie nach Anamnese und klinischem Untersuchungsbefund

Die Recherche nach Hinweisen in den Anamnesen, klinischen Untersuchungsbefunden und Arztbriefen der Patienten lieferte in 339 (48,1 %) der 705 CI-Fälle mögliche Ursachen für deren Schwerhörigkeit bzw. Taubheit. Diese erfassten Ursachen sind in der folgenden Abbildung 7 mit ihrer Häufigkeitsverteilung aufgeführt. Als Frühgeburt wurden dabei Geburten gezählt, die vor der 37. Schwangerschaftswoche stattfanden.<sup>60</sup> Zu den peri- und postnatalen Ereignissen wurden Komplikationen während der

Schwangerschaft und Entbindung, wie Geburtstraumen (z. B. intrazerebrale Blutungen), peri- und postnatale Asphyxie oder postpartale Rhesusunverträglichkeiten zugeordnet. Der letzte Punkt in Abbildung 7 („andere Ursachen“) enthält zusammengefasst verschiedene mit Schwerhörigkeit möglicherweise in Verbindung stehende Erkrankungen wie Mumps, Zoster oticus, Labyrinthitis und Borreliose, sowie Verbrennungsunfälle und durchgeführte Bestrahlungen im Ohrbereich. Da in einigen der 339 Fälle, bei denen in den Patientenakten potentielle Ursachen der Schwerhörigkeit zu finden waren, nicht nur eine, sondern mehrere mögliche Auslöser vermutet wurden, übersteigt die Gesamtzahl der ermittelten möglichen Ursachen die Gesamtzahl der CI-Fälle mit potentiell bekannter Ursache.

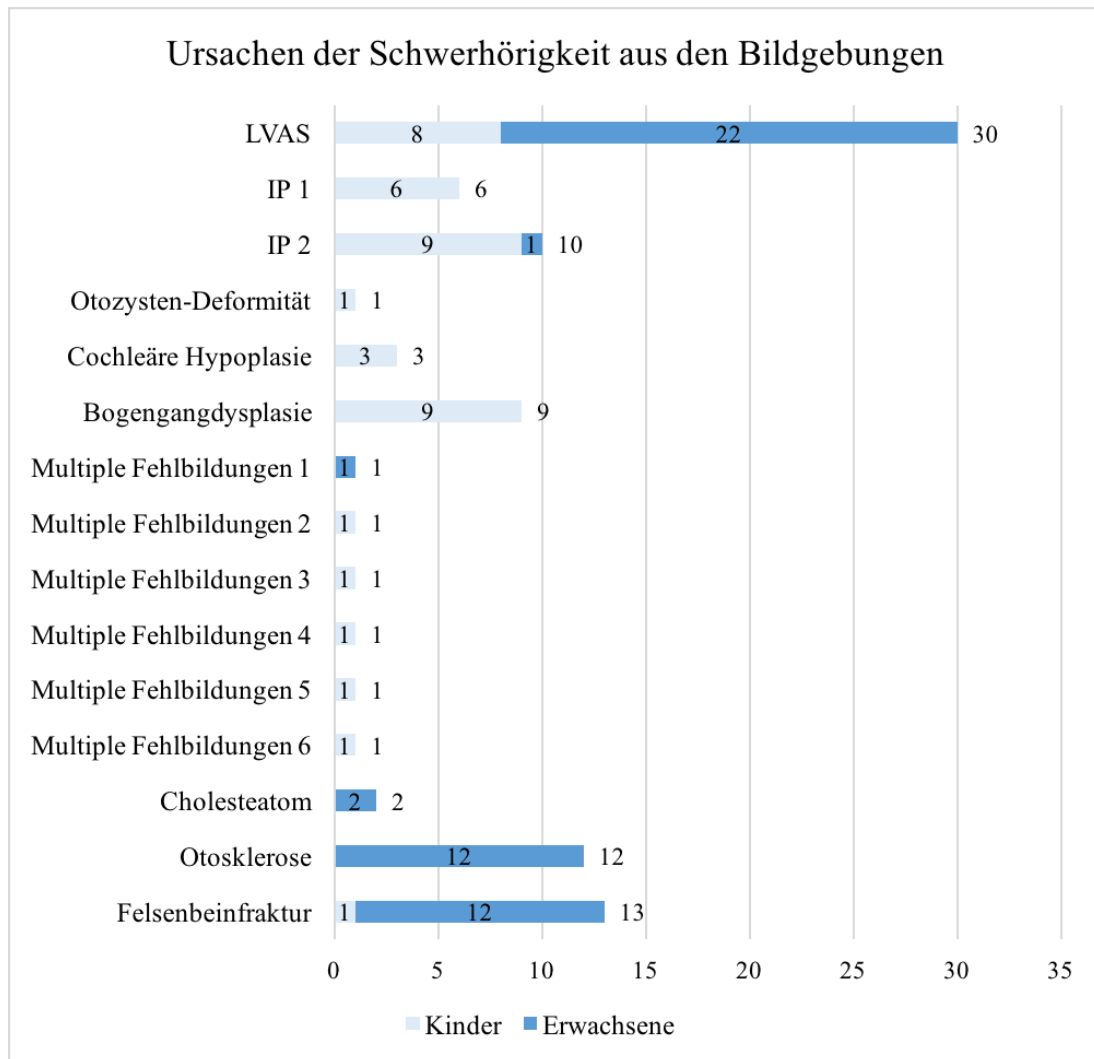


**Abbildung 7.** Ursachen der Schwerhörigkeit aus den Anamnesen. Die Gesamtsumme (= Anzahl der betroffenen Kinder- und Erwachsenen-OP-Fälle) der jeweils festgestellten Ursache ist rechts neben dem jeweiligen Balken aufgeführt.

### 3.2.2 Ätiologie nach CT- und MRT-Bildgebung

Insgesamt lag von den 705 Operationsfällen in 665 (94,3 %) Fällen eine präoperative CT-Aufnahme und in 584 (82,8 %) Fällen eine präoperative MRT-Aufnahme vor. In 10 (1,7 %) der 584 Fälle mit vorhandener MRT-Aufnahme fehlte, wie oben bereits angesprochen, die 3D-CISS-Sequenz. In 544 Fällen lagen beide präoperativen Bildgebungen vor, die 10 MRT-Fälle mit fehlender 3D-CISS-Sequenz einbezogen.

Von allen 705 Fällen lieferten die CT- und MRT-Aufnahmen insgesamt in 92 (13,0 %) Fällen auf die Hörminderung hinweisende pathologische Befunde im Bereich des Felsenbeins. Die anschließende Abbildung 8 stellt die Verteilung der verschiedenen mit Hilfe der CT- und MRT-Aufnahmen detektierten möglichen Ursachen der Schwerhörigkeit dar. Die Punkte „Multiple Fehlbildungen 1–6“ fassen dabei Kombinationen verschiedener Fehlbildungen zusammen (siehe Abbildungsunterschrift).



**Abbildung 8.** Ursachen der Schwerhörigkeit aus CT- und MRT-Untersuchung. Die Gesamtsumme (= Anzahl der betroffenen Kinder- und Erwachsenen-OP-Fälle) ist rechts neben dem jeweiligen Balken aufgeführt. „Multiple Fehlbildungen 1“ entspricht einem LVAS und einer Bogengangdysplasie. „Multiple Fehlbildungen 2“ fasst ein LVAS mit einer Bogengang- und einer Vestibulumsdysplasie zusammen. „Multiple Fehlbildungen 3“ entspricht einer Otozysten-Deformität und einer Malformation des IGG. „Multiple Fehlbildungen 4“ fasst eine cochleäre Hypoplasie, eine Bogengang- und eine Vestibulumsdysplasie zusammen. „Multiple Fehlbildungen 5“ entspricht einer cochleären Dysplasie, einer Vestibulumsdysplasie und einer Bogengangaplasie. „Multiple Fehlbildungen 6“ fasst eine Bogengang- und eine Vestibulumsdysplasie sowie eine Malformation des IGG zusammen.

Außerdem wurde untersucht, wie häufig die mögliche Ursache der Schwerhörigkeit anhand der Anamnese der Patienten, anhand der vorhandenen bildgebenden Untersuchung des Felsenbeins oder anhand einer Kombination aus Anamnese und Bildgebung des Felsenbeins eruiert werden konnte. Dabei zeigte sich, dass von allen 376 Fällen mit bekannter Ätiologie (= 100 %) in 55 (14,6 %) Fällen sowohl durch die Anamnese als auch durch die CT- und MRT-Untersuchungen des Felsenbeins Informationen über die Ursache der Schwerhörigkeit bzw. Ertaubung festgestellt wurden.

In 284 (75,5 %) Fällen waren nur in den Krankenakten Hinweise wie vorangegangene Traumata, angeborene oder erworbene Erkrankungen, toxische Stoffe, prä-, peri- und postnatale Ereignisse zu finden, während die zugehörigen präoperativen CT- und MRT-Bildgebungen auf der entsprechend operierten Kopfseite unauffällig waren. Umgekehrt lagen in 37 (9,8 %) Fällen Läsionen im Bereich des Felsenbeins vor, die durch die CT- und MRT-Aufnahmen diagnostiziert werden konnten, während die entsprechenden Anamnesen und klinischen Befunde jeweils keine Hinweise darauf lieferten. Bei diesen 37 radiologischen Befunden handelte es sich in 36 Fällen um Innenohrfehlbildungen und in 1 Fall um ein Cholesteatom. Tabelle 6 zeigt alle anhand der Bildgebungen festgestellten pathologischen Befunde im Bereich des Felsenbeins bei unauffälliger Anamnese.

**Tabelle 6.** Felsenbeinbefunde bei unauffälliger Anamnese

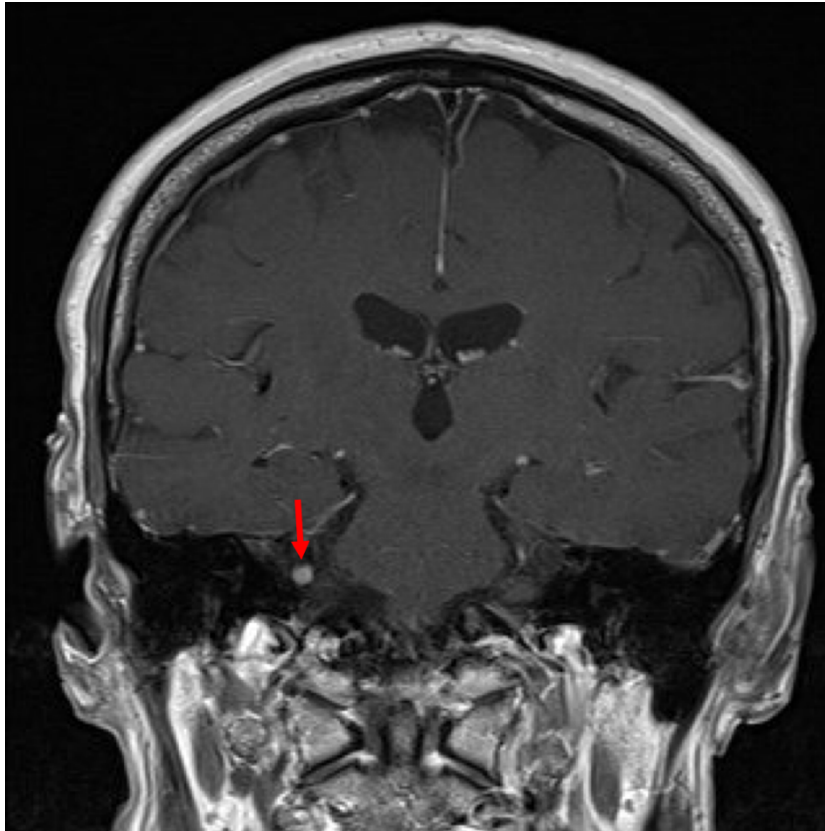
<b>Felsenbeinbefund bei unauffälliger Anamnese</b>	<b>Anzahl Fälle</b>	<b>Kinder</b>	<b>Erwachsene</b>
LVAS	20	6	14
IP 1	3	3	0
IP 2	5	4	1
Otozysten-Deformität	1	1	0
Cochleäre Hypoplasie	1	1	0
Bogengangdysplasie	4	4	0
LVAS + Bogengangdysplasie	1	0	1
LVAS + Bogengangdysplasie + Vestibulumdysplasie	1	1	0
Cholesteatom	1	0	1
<b>Gesamtzahl Fälle</b>	<b>37</b>	<b>20</b>	<b>17</b>

### 3.2.2.1 Zusatzbefunde der MRT-Aufnahmen

Zur Erfassung zusätzlicher Läsionen im Bereich des ZNS, die neben den bereits aufgeführten Felsenbeinbefunden zum Teil auch in Verbindung mit Schwerhörigkeit

stehen können, wurden nochmals die 441 kraniellen MRT-Aufnahmen untersucht. Diese Auswertung fand patientenbezogen statt, da sonst pathologische Auffälligkeiten, wie zum Beispiel Tumoren, bei beidseitig operierten Patienten fälschlicherweise doppelt gezählt worden wären. Die 441 vorhandenen MRT-Aufnahmen teilten sich in 137 (31,1 %) Kinder-Untersuchungen und in 304 (68,9 %) Erwachsenen-Untersuchungen. Insgesamt wurden in 46 (10,4 %) der 441 vorhandenen präoperativen MRT-Aufnahmen wichtige intrazerebrale Läsionen festgestellt. Diese 46 auffälligen MRT-Aufnahmen teilten sich in 26 (56,5 %) Aufnahmen von Kindern und in 20 (43,5 %) Aufnahmen von Erwachsenen. Unter den 137 Kindern mit vorhandener MRT-Untersuchung wurden also bei 26 (19,0 %) Kindern und unter den 304 Erwachsenen mit vorhandener MRT-Untersuchung bei 20 (6,6 %) Erwachsenen Auffälligkeiten im Bereich des ZNS festgestellt. Zu diesen relevanten Zusatzbefunden zählten unter anderem verschiedene, innerhalb des Gehirns diagnostizierte Tumoren, Fehlbildungen, Entwicklungsstörungen, Stoffwechselstörungen sowie infektiöse Veränderungen, die in den Tabellen 7–11, jeweils in Untergruppen sortiert, aufgeführt sind.

Die folgende Abbildung 9 zeigt als Beispiel für einen relevanten Zusatzbefund im intrazerebralen Bereich eine präoperative MRT-Untersuchung eines erwachsenen CI-Patienten mit einem Akustikusneurinom.



**Abbildung 9.** Kontrastmittelgestützte koronare dünnschichtige T1-gewichtete Sequenz (MRT) eines erwachsenen Patienten mit beidseitiger asymmetrischer sensorineuraler Schwerhörigkeit und Akustikusneurinom rechts (Pfeil).

Tabelle 7 zeigt verschiedene Tumoren, die durch die MRT-Untersuchungen detektiert wurden.

**Tabelle 7.** Zusatzbefunde der MRT-Aufnahmen: Tumoren<sup>15</sup>

Läsion	Anzahl MRT-Aufnahmen	Zusammenhang mit Hörminderung möglich?
Akustikusneurinom	6	Ja
Dysembryoplastischer neuroepithelialer Tumor (DNET)	1	Nein
Tectungliom	1	Nein
Meningeom	3	Nein
Hypophysenadenom	2	Nein

Die in den folgenden Tabellen aufgeführte Bezeichnung „Indirekter Zusammenhang“ beschreibt Läsionen, die indirekt mit Hörminderungen in Verbindung stehen können. Das Auftreten einer Hörminderung ist in Verbindung mit diesen Läsionen möglich, jedoch nicht in jedem Fall vorhanden.

Tabelle 8 präsentiert verschiedene Fehlbildungen und Entwicklungsstörungen, die in den MRT-Aufnahmen festgestellt wurden. Im Rahmen frühkindlicher Hirnschädigungen und zerebraler Entwicklungsstörungen sind Hörminderungen möglich.<sup>18,61</sup>

**Tabelle 8.** Zusatzbefunde der MRT-Aufnahmen: Fehlbildungen und Entwicklungsstörungen<sup>18,61</sup>

<b>Läsion</b>	<b>Anzahl MRT-Aufnahmen</b>	<b>Zusammenhang mit Hörminderung möglich?</b>
Gyrierungsstörung + Corpus callosum Dysgenese + Heterotopie + Kolpocephalie	1	Indirekter Zusammenhang
V. a. Septo-optische-Dysplasie	1	Indirekter Zusammenhang
Kolpocephalie/Signalanhebungen um die Seitenventrikel/parietale Marklagerveränderungen bzw. jeweils V. a. periventrikuläre Leukomalazie (PVL)	3	Indirekter Zusammenhang
Kolpocephalie + unklare Marklagerläsionen	1	Indirekter Zusammenhang
Myelinisierungsverzögerung, Myelinisierungsstörung	10	Indirekter Zusammenhang
Gyrierungsstörung + CMV-typische Veränderungen	1	Ja

Tabelle 9 zeigt alle durch die MRT-Aufnahmen diagnostizierten infektiösen Veränderungen. Die Infarkte im Bereich der Stammganglien sind indirekt, durch die vorangegangene Meningitis, mit der Hörminderung verbunden.

**Tabelle 9.** Zusatzbefunde der MRT-Aufnahmen: infektiöse Veränderungen<sup>16</sup>

<b>Läsion</b>	<b>Anzahl MRT-Aufnahmen</b>	<b>Zusammenhang mit Hörminderung möglich?</b>
CMV-typische Veränderungen	3	Ja
Kleine Infarkte nach Meningitis im Bereich der Stammganglien	1	Indirekter Zusammenhang



Außerdem zeigten sich in einigen MRT-Aufnahmen Hinweise auf Stoffwechselstörungen und Mitochondriopathien, in deren Rahmen sensorineurale Hörstörungen auftreten können.<sup>16,61</sup> Die entsprechenden Auffälligkeiten liefert Tabelle 10.

**Tabelle 10.** Zusatzbefunde der MRT-Aufnahmen: Stoffwechselstörungen und Mitochondriopathien<sup>16,61</sup>

<b>Läsion</b>	<b>Anzahl MRT-Aufnahmen</b>	<b>Zusammenhang mit Hörminderung möglich?</b>
Unspezifische Leukenzephalopathie (LE) bzw. unspezifische Signalanhebungen, möglicherweise in Zusammenhang mit Stoffwechselstörungen	3	Indirekter Zusammenhang
Marklagerläsionen bzw. Thalamusläsionen, möglicherweise in Zusammenhang mit Mitochondriopathien	2	Indirekter Zusammenhang

Alle weiteren zusätzlichen Pathologien, die in den MRT-Aufnahmen festgestellt wurden, sind in der anschließenden Tabelle 11 zusammengeführt.

**Tabelle 11.** Zusatzbefunde der MRT-Aufnahmen: sonstige relevante Pathologien<sup>61,62,63</sup>

<b>Läsion</b>	<b>Anzahl MRT-Aufnahmen</b>	<b>Zusammenhang mit Hörminderung möglich?</b>
Zustand nach (Z. n.) intraventrikulärer Blutung mit verschmälertem Marklager + Kleinhirnschaden + hypoplastische Anlage des Hirnstammes	1	Indirekter Zusammenhang
Aneurysma	1	Nein
Sinus- und/oder Hirnvenenthrombose	1	Nein
Siderose	1	Ja
Siderose + spinale Ependymom	1	Ja
Durale arteriovenöse Fistel	1	Ja
Unklare Entmarkungen	1	Nein

Zusätzlich zu diesen 46 relevanten MRT-Befunden wurden in 161 (36,5%) weiteren MRT-Aufnahmen klinisch irrelevante Nebenbefunde festgestellt, die keine weitere Verlaufskontrolle benötigten und auch nicht in Zusammenhang mit einer Hörminderung

stehen. Dazu zählten zum Beispiel alterstypische Hirnatrophien, alte Infarkte, kleine Zysten oder unspezifische Marklagerläsionen wie bei zerebraler Mikroangiopathie.

### 3.2.2.2 Zusatzbefunde der CT-Aufnahmen

Wie bei der Auswertung der MRT-Aufnahmen (Kapitel 3.2.2.1) wurden auch die in den CT-Aufnahmen festgestellten zusätzlichen Befunde patientenbezogen erfasst, um eine Verfälschung der Zahlen durch beidseitig operierte Patienten zu vermeiden. In 17 (3,3 %) der 522 präoperativen CT-Aufnahmen wurden verschiedene Zusatzbefunde und Nebenbefunde mit pathologischem Wert erfasst, welche in Tabelle 12 aufgeführt sind. Daneben fiel in 116 (22,2 %) der 522 CT-Aufnahmen ein Hochstand des Bulbus venae jugularis, welcher in 59 (50,9 %) der 116 Fälle einseitig rechts, in 35 (30,2 %) Fällen einseitig links und in 22 (19,0 %) Fällen beidseits vorlag, auf.

**Tabelle 12.** Zusatzbefunde der CT-Aufnahmen

<b>Läsion</b>	<b>Anzahl</b>
Inkomplette Insertion des bereits vorhandenen CI (auf der kontralateralen Seite)	4
Osteom	2
Fibröse Dysplasie	1
Pneumosinus dilatans	2
Dünne knöcherner Begrenzung des Sinus sigmoideus	2
Einseitige Läsion im Bereich des Os occipitale	1
Malleus bar	1
Bulbusdehiszenz	1
Hyperostosen entlang des IGG	1
Erweiterter IGG nach Tumorresektion	1
Trommelfellverdickung	1

### 3.3 Vergleich der Darstellungsmöglichkeiten von CT und MRT

#### 3.3.1 Felsenbeinpathologien in den CT- und MRT-Aufnahmen

Zum Vergleich der beiden Bildgebungsverfahren wurde zunächst untersucht, in wie vielen Fällen jeweils durch die CT bzw. durch die MRT eine bestimmte Diagnose im Bereich des Felsenbeins gestellt wurde. Anschließend wurde geprüft, ob ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen den durch die beiden Untersuchungsverfahren festgestellten Diagnosen besteht. Für diese Auswertung wurden alle Operationsfälle einbezogen, bei denen beide präoperativen Bildgebungen vollständig vorlagen. Dies waren in dieser Patientengruppe insgesamt 534 Fälle, da die 10 Fälle mit den MRT-Untersuchungen ohne 3D-CISS-Sequenz in diese Auswertung nicht einbezogen wurden. Eine Otosklerose konnte in 5 (0,9 %) Fällen sowohl anhand der CT-Aufnahme, als auch anhand der MRT-Aufnahme diagnostiziert werden. In 527 (98,7 %) Fällen wurde weder in der vorhandenen MRT-Aufnahme noch in der CT-Aufnahme eine Otosklerose festgestellt. In 2 (0,4 %) Fällen wurde in der CT-Aufnahme eine Otosklerose entdeckt, während in der MRT-Aufnahme in diesen Fällen diese Diagnose nicht festgestellt wurde. Mittels exaktem Test nach Fisher wurde nun die Hypothese, dass eine Unabhängigkeit zwischen der Diagnose einer Otosklerose anhand der CT-Aufnahme und der MRT-Aufnahme besteht, statistisch überprüft. Der p-Wert lag bei  $p < 0,001$ . Damit konnte festgestellt werden, dass die Hypothese einer Unabhängigkeit zwischen der Diagnose einer Otosklerose durch die CT- und MRT-Aufnahme abgelehnt werden kann. Somit besteht unter Berücksichtigung des Signifikanzniveaus von 5 %, das heißt mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %, eine statistisch signifikante Abhängigkeit zwischen den Diagnosen einer Otosklerose durch die beiden bildgebenden Untersuchungsverfahren. Die nachfolgende Tabelle 13 zeigt am Beispiel der Diagnose einer Otosklerose die Ergebnisse, die anschließend für den exakten Test nach Fisher verwendet wurden.

**Tabelle 13.** Vierfeldertafel für die Diagnose einer Otosklerose

	Otosklerose MRT (auf OP-Seite) diagnostiziert	Otosklerose MRT (auf OP-Seite) <u>nicht</u> diagnostiziert	Gesamt
Otosklerose CT (auf OP-Seite) diagnostiziert	5	2	7
Otosklerose CT (auf OP-Seite) <u>nicht</u> diagnostiziert	0	527	527
Gesamt	5	529	534

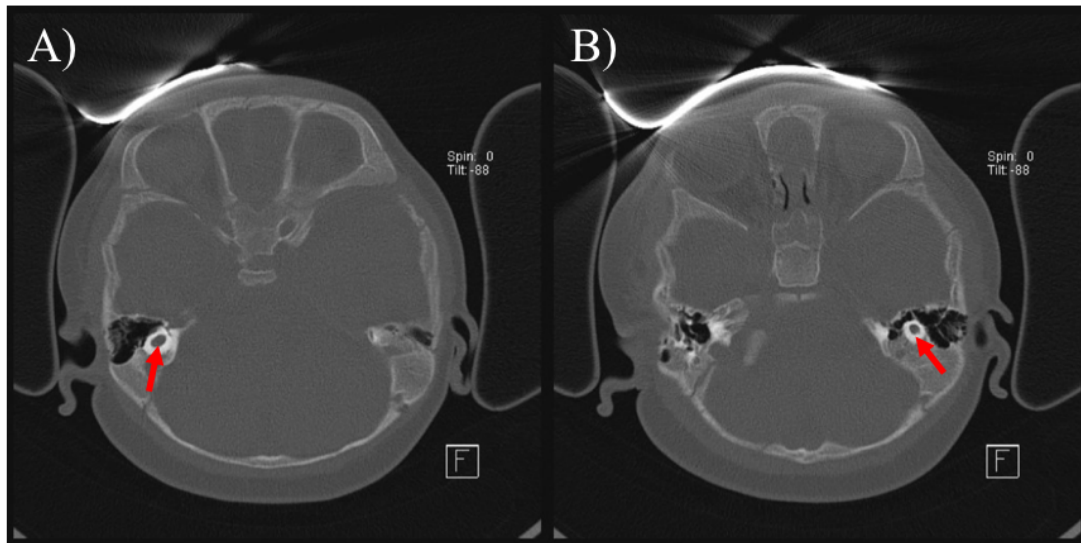
In 20 (3,7 %) Fällen wurde sowohl anhand der CT-Aufnahme als auch anhand der MRT-Aufnahme die Diagnose eines LVAS gestellt. In 508 (95,1 %) Fällen wurde weder in den CT-Aufnahmen noch in den MRT-Aufnahmen ein LVAS diagnostiziert. In 6 (1,1 %) Fällen war die Diagnose in der CT-Aufnahme positiv, während in der MRT-Aufnahme kein entsprechender Befund vorlag. Auch hier wurde zur Abklärung eines möglichen Zusammenhangs zwischen der Diagnose eines LVAS durch die CT-Untersuchung und der Diagnose eines LVAS durch die MRT-Untersuchung der exakte Test nach Fisher angewendet. Der p-Wert lag bei  $p < 0,001$ , was auf einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der gestellten Diagnose eines LVAS durch die CT-Untersuchung und der gleichen Diagnose durch die MRT-Untersuchung schließen lässt. Falls also anhand der CT-Aufnahme ein LVAS diagnostiziert bzw. ausgeschlossen wird, liegt die Wahrscheinlichkeit bei 95 %, dass dies ebenso anhand der MRT-Aufnahme diagnostiziert bzw. ausgeschlossen würde. Außerdem wurden für weitere Pathologien Fragen nach Unabhängigkeiten zwischen den beiden Untersuchungsverfahren überprüft, um damit Rückschlüsse auf mögliche Zusammenhänge ziehen zu können. Neben der Diagnose einer Otosklerose und eines LVAS wurden außerdem die Diagnosen einer IP 1, einer IP 2, einer Otozysten-Deformität, einer cochleären Hypoplasie, einer Bogengangdysplasie, einer Bogengangaplasie, einer Vestibulumdysplasie, eines Cholesteatoms und einer Malformation des IGG statistisch untersucht. Für alle genannten Diagnosen wurde in gleicher Weise wie oben beschrieben der exakte Test nach Fisher durchgeführt und anhand des p-Wertes die Frage nach einem statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen einer vorhandenen Diagnose in einem Bildgebungsverfahren

mit dem Vorhandensein derselben Diagnose in dem anderen Bildgebungsverfahren überprüft. Die folgende Tabelle 14 zeigt die jeweiligen p-Werte für die verschiedenen geprüften Diagnosen.

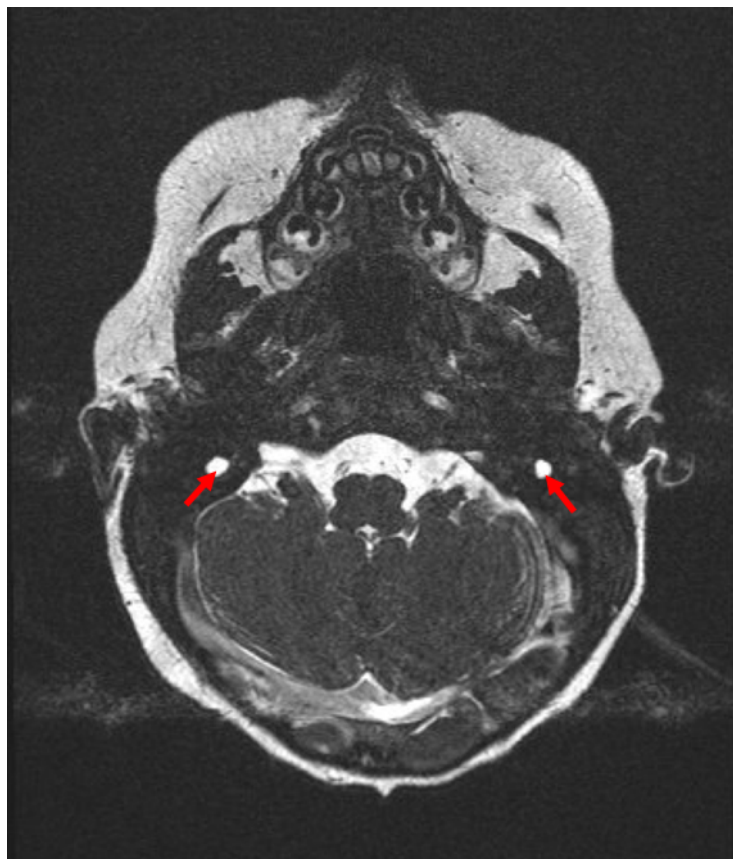
**Tabelle 14.** P-Werte der verschiedenen untersuchten Diagnosen

<b>Diagnose durch CT/MRT</b>	<b>p-Wert</b>	<b>Statistisch signifikanter Zusammenhang?</b>
Otosklerose	< 0,001	Ja
LVAS	< 0,001	Ja
IP 1	< 0,001	Ja
IP 2	< 0,001	Ja
Otozysten-Deformität	0,002	Ja
Cochleäre Hypoplasie	< 0,001	Ja
Bogengangdysplasie	< 0,001	Ja
Vestibulumdysplasie	< 0,001	Ja
Malformation des IGG	0,001	Ja

Bei allen in Tabelle 14 aufgeführten Diagnosen konnte anhand der Tests auf dem Signifikanzniveau von 5 % ein Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein oder Fehlen einer der Pathologien in der CT-Aufnahme und dem Vorhandensein oder Fehlen der gleichen Pathologie in der MRT-Aufnahme festgestellt werden. Statistisch betrachtet besteht also eine Wahrscheinlichkeit von 95 %, dass diese Pathologien sowohl mittels CT-Untersuchung als auch mittels MRT-Untersuchung diagnostiziert bzw. ausgeschlossen werden können. Im Anschluss folgen als Beispiel die beiden präoperativen Bildgebungen eines jungen CI-Patienten mit beidseitiger prälingualer sensorineuraler Schwerhörigkeit und einer beidseitigen, in beiden Bildgebungen erkennbaren, Otozysten-Deformität.



**Abbildung 10.** Axiale Schichten der CT-Untersuchung eines 6-monatigen CI-Patienten mit beidseitiger prälingualer sensorineuraler Schwerhörigkeit und beidseitiger Otozysten-Deformität, die in A) rechts und in B) links zu erkennen ist (Pfeile).



**Abbildung 11.** Axiale 3D-CISS-Sequenz (MRT) des Patienten aus obiger Abbildung mit beidseitiger Otozysten-Deformität (Pfeile).

Die Diagnosen einer Bogengangaplasie und eines Cholesteatoms wurden beide jeweils einmal anhand der vorhandenen CT-Aufnahme detektiert, die dazugehörige MRT-

Aufnahme war jeweils unauffällig. Demnach kann bei diesen beiden Diagnosen im Gegensatz zu den vorherigen Diagnosen die Hypothese einer Unabhängigkeit zwischen den beiden Untersuchungsverfahren nicht abgelehnt werden. Die relativen Häufigkeiten könnten in diesen Fällen auf eine mögliche Unabhängigkeit zwischen der CT- und der MRT-Untersuchung hinweisen.

### 3.3.2 Zusammenhang zwischen Meningitis und präoperativer Bildgebung

Als nächstes wurde untersucht, in wie vielen Fällen des Patientenkollektivs eine Meningitis in der Vorgeschichte bekannt war. Es wurde überprüft, ob und in welchen Fällen in den CT- und MRT-Bildgebungen ein Hinweis auf eine verminderte cochleäre Durchlässigkeit festgestellt werden konnte. Diese verminderte Durchlässigkeit der Cochlea kann durch eine Verknöcherung oder Verkalkung (cochleäre Obstruktion in der CT-Bildgebung bzw. cochleäre Signalauffälligkeit in der MRT-Bildgebung) – als Folge einer Meningitis – verursacht werden.<sup>64</sup> Für diese Auswertung wurde wieder fallbezogen geprüft. Dazu wurden alle CI-Fälle mit beiden vollständigen präoperativen Aufnahmen einbezogen, also insgesamt 534 Fälle. Das Studium der Anamnesen zeigte, dass insgesamt in 28 (5,2 %) der 534 Fälle ein Z. n. Meningitis als bekannt angegeben wurde. In 11 (39,3 %) der 28 Fälle mit bekanntem Z. n. Meningitis wurde in der entsprechenden präoperativen CT-Aufnahme eine Obstruktion der Cochlea und damit ein Hinweis auf die frühere Erkrankung festgestellt. In 17 (60,7 %) Fällen mit bekanntem Z. n. Meningitis wurde in der entsprechenden CT-Aufnahme keine Obstruktion der Cochlea festgestellt. Umgekehrt lag in 4 (0,75 %) der 534 Fälle in der CT-Aufnahme eine Obstruktion der Cochlea vor, während anamnestisch kein Z. n. Meningitis angegeben wurde. In 502 (94,0 %) Fällen fielen sowohl die Anamnesen, als auch die präoperativen CT-Aufnahmen bezüglich einer Meningitis negativ aus. Ähnliche Werte lieferte auch der Vergleich zwischen den Anamnesen und den MRT-Untersuchungen. Hier wurde in 14 (50,0 %) der 28 Fälle mit bekannter Meningitis eine Signalauffälligkeit in der Cochlea diagnostiziert. In den übrigen 14 (50,0 %) Fällen mit bekannter Meningitis wurde in der MRT-Untersuchung keine Auffälligkeit in der Cochlea festgestellt. In 17 (3,2 %) der 534 Fälle wurde durch die MRT-Untersuchung eine cochleäre Signalauffälligkeit diagnostiziert, während laut der Anamnesen keine frühere Meningitis bekannt war und in 489 (91,6 %) Fällen waren sowohl die MRT-Untersuchungen als auch die Anamnesen bezüglich einer

Meningitis unauffällig. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Tabelle 15 und Tabelle 16 nochmals dargestellt.

**Tabelle 15.** Vierfeldertafel für die Diagnose einer Obstruktion der Cochlea im CT-Bild bei Z. n. Meningitis

	Z. n. Meningitis bekannt	Z. n. Meningitis unbekannt	Gesamt
Obstruktion der Cochlea durch CT-Bild diagnostiziert	11	4	15
Obstruktion der Cochlea durch CT-Bild <u>nicht</u> diagnostiziert	17	502	519
Gesamt	28	506	534

**Tabelle 16.** Vierfeldertafel für die Diagnose einer cochleären Signalauffälligkeit im MRT-Bild bei Z. n. Meningitis

	Z. n. Meningitis bekannt	Z. n. Meningitis unbekannt	Gesamt
Obstruktion der Cochlea durch MRT-Bild diagnostiziert	14	17	31
Obstruktion der Cochlea durch MRT-Bild <u>nicht</u> diagnostiziert	14	489	503
Gesamt	28	506	534

Es stellte sich die Frage, ob ein Zusammenhang zwischen einer vorangegangenen Meningitis-Erkrankung der operierten Patienten und dem Vorhandensein eines darauf hinweisenden Befundes in den dazugehörigen präoperativen CT- und MRT-Aufnahmen besteht. Für beide Untersuchungsverfahren lieferte der exakte Test nach Fisher jeweils einen Wert von  $p < 0,001$ . Somit kann ein statistisch signifikanter Zusammenhang bezüglich einer vorangegangenen Meningitis und der Diagnose einer Obstruktion der Cochlea (Verkalkung oder Verknöcherung) sowohl mittels CT-Aufnahme als auch



mittels MRT-Aufnahme vermutet werden. Anschließend wurden die Aussagen zwischen den beiden Bildgebungsverfahren (CT und MRT) auf die Hypothese der Unabhängigkeit überprüft. Von den 28 Fällen, in denen eine ehemalige Meningitis bekannt war, stimmten in 11 (39,3 %) Fällen die Befunde der CT-Aufnahmen und der MRT-Aufnahmen überein. Hier wurde also mit beiden Untersuchungsverfahren eine Verkalkung oder Verknöcherung im Bereich der Cochlea diagnostiziert. In 14 (50,0 %) Fällen wurde weder mit der CT noch mit der MRT eine cochleäre Obstruktion festgestellt, obwohl eine ehemalige Meningitis bekannt war. In 3 (10,7 %) Fällen wurde in der jeweiligen MRT-Aufnahme eine cochleäre Verkalkung bzw. Verknöcherung bei bekannter Meningitis diagnostiziert, während die dazugehörigen CT-Aufnahmen unauffällig waren. Der exakte Test nach Fisher ergab einen Wert von  $p = 0,00003$ . Die Hypothese einer Unabhängigkeit zwischen den Ergebnissen einer Untersuchung mittels CT und einer Untersuchung mittels MRT bezüglich einer verminderten Durchlässigkeit der Cochlea als Folge einer Meningitis kann damit abgelehnt werden. Folglich kann eine statistisch signifikante Abhängigkeit zwischen den beiden Untersuchungsverfahren angenommen werden.

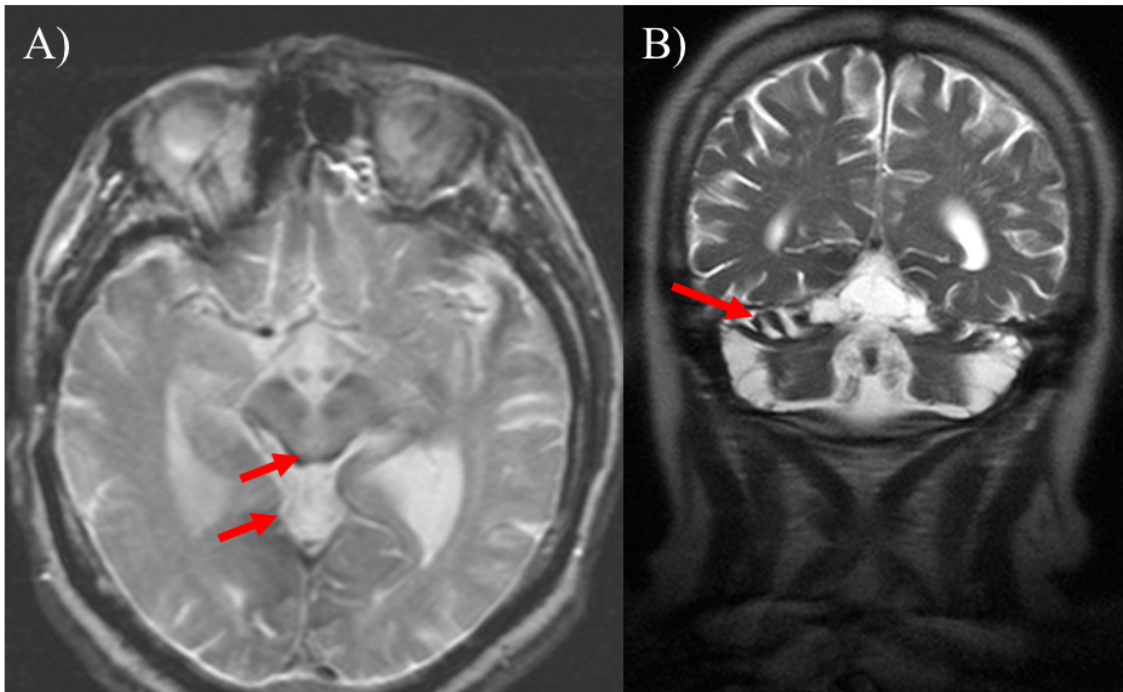
### 3.3.3 Deskriptive Befundvergleiche

Als nächstes wurde geprüft, wie häufig bei einem unauffälligen CT-Bildbefund Auffälligkeiten in der dazugehörigen MRT-Aufnahme im Bereich des Innenohrs oder Gehirns vorlagen. In gleicher Weise wurde untersucht, wie häufig bei unauffälligem MRT-Bildbefund auffällige Befunde in der CT-Aufnahme festgestellt wurden. Dazu wurden alle Patienten einbezogen, von denen jeweils eine präoperative CT- und eine präoperative MRT-Aufnahme vollständig vorlag. Da diese Fragestellung wieder, wie in den Abschnitten 3.2.2.1 und 3.2.2.2, patientenbezogen evaluiert wurde, betraf dies insgesamt 404 der 549 Patienten. Bei 297 (73,5 %) Patienten lagen weder in der MRT-Aufnahme noch in der CT-Aufnahme pathologische Befunde vor. Bei 56 (13,9 %) Patienten wurden in beiden Bildgebungen Auffälligkeiten festgestellt. Bei 42 (10,4 %) Patienten wurden Auffälligkeiten durch die MRT-Untersuchung festgestellt, während in den CT-Untersuchungen keine dazu korrelierenden Hinweise ermittelt wurden. Tabelle 17 zeigt die durch die MRT-Untersuchung festgestellten Auffälligkeiten bei gleichzeitig unauffälliger CT-Aufnahme.

Tabelle 17. MRT-Auffälligkeit bei unauffälliger CT-Aufnahme

<b>MRT-Auffälligkeit bei unauffälliger CT-Aufnahme</b>	<b>Anzahl</b>
Akustikusneurinom	3
DNET	1
Tectumgliom	1
Meningeom	2
Hypophysenadenom	1
Gyrierungsstörung + Corpus callosum Dysgenese + Heterotopie + Kolpocephalie	1
V. a. PVL; Signalanhebungen um die Seitenventrikel bzw. parietale Marklagerveränderungen	2
Myelinisierungsverzögerung, Myelinisierungsstörung	7
Gyrierungsstörung + CMV-typische Veränderungen	1
CMV-typische Veränderungen	2
Kleine Infarkte nach Meningitis im Bereich der Stammganglien	1
Unspezifische LE bzw. unspezifische Signalanhebungen, möglicherweise in Zusammenhang mit Stoffwechselstörungen	3
Marklagerläsionen bzw. Thalamusläsionen, möglicherweise in Zusammenhang mit Mitochondriopathien	2
Siderose	1
Siderose + spinale Ependymom	1
Durale arteriovenöse Fistel	1
Unklare Entmarkungen	1
Pathologisches Signal in der Cochlea	9
Sinus- und/oder Hirnvenenthrombose + pathologisches Signal in der Cochlea	1
Akustikusneurinom + pathologisches Signal in der Cochlea	1
<b>Gesamtzahl MRT-Aufnahmen mit auffälligem Befund</b>	<b>42</b>

Exemplarisch für einen pathologischen Befund in einer MRT-Untersuchung bei gleichzeitig unauffälliger CT-Bildgebung zeigt die nachfolgende Abbildung 12 Ausschnitte der präoperativen MRT-Untersuchung eines erwachsenen CI-Patienten mit zerebraler Siderose.



**Abbildung 12.** A) Axiale MRT und B) Koronare MRT eines 66-jährigen CI-Patienten mit beidseitiger Taubheit bei unauffälligem CT-Befund. Bild einer Hämosiderose bei laminären signallosen Auflagerungen in den zerebellären Fissuren, um den Hirnstamm und teils in mehreren Großhirnsulci (Pfeile).

Umgekehrt wurden bei 9 (2,2 %) von 404 Patienten Auffälligkeiten im Bereich des Felsenbeins durch die CT-Untersuchung festgestellt, während die dazugehörigen MRT-Aufnahmen unauffällig waren. Die entsprechenden Befunde sind in der folgenden Tabelle 18 aufgeführt.

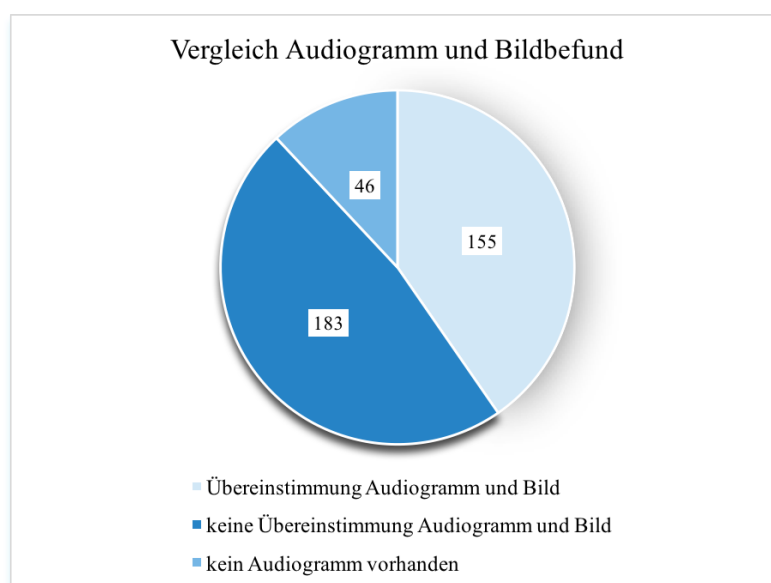
**Tabelle 18.** CT-Auffälligkeit bei unauffälliger MRT-Aufnahme

<b>CT-Auffälligkeit bei unauffälliger MRT-Aufnahme</b>	<b>Anzahl</b>
LVAS	4
Cholesteatom	1
Otosklerose	2
Felsenbeinfraktur	2
<b>Gesamtzahl CT-Aufnahmen mit auffälligem Befund</b>	<b>9</b>

### 3.4 Tonaudiogramme

Wie bereits in Kapitel 2.3.2 beschrieben, wurden die Tonaudiogramme der operierten erwachsenen Patienten analysiert. Da bei der Aktenrecherche einige Audiogramme nicht auffindbar oder unvollständig waren, konnten lediglich 338 (88,0 %) Tonaudiogramme der 384 erwachsenen Patienten ausgewertet werden. Anhand der Audiogramme wurde untersucht, ob die Patienten an einer symmetrischen oder an einer asymmetrischen Hörminderung litten (Kriterien für asymmetrischen HV siehe Abschnitt 2.3.2). Darüber hinaus stellte sich die Frage, ob bei asymmetrischer Hörminderung entsprechende asymmetrische Befunde in den Bildgebungen vorlagen. Dazu wurden die CT- und MRT-Aufnahmen der Patienten nach einseitig aufgetretenen Fehlbildungen des Innenohrs, Cholesteatomen, Otosklerosen, Felsenbeinfrakturen, Verkalkungen oder Verknocherungen im Bereich der Cochlea und Akustikusneurinomen durchsucht. Diese Auswertung fand patientenbezogen statt, da beide Ohren betrachtet werden müssen, um eine Symmetrie oder Asymmetrie feststellen zu können. Die Audiogramme zeigten bei 135 (40 %) Patienten eine auf beiden Ohren ähnlich starke Hörminderung, während bei 203 (60 %) Patienten ein asymmetrischer HV vorlag. Dieser asymmetrische HV betraf bei 103 Patienten das linke Ohr und bei 100 Patienten das rechte Ohr stärker.

Der Vergleich der Audiogramme mit den Schnittbilduntersuchungen ergab bei 155 (45,9 %) Patienten eine Übereinstimmung. So lagen bei 129 (83,2 %) der 155 Patienten weder in den Bildgebungen asymmetrische Befunde vor, noch lieferten die dazugehörigen Audiogramme einen asymmetrischen HV und bei 26 (16,8 %) Patienten lagen in den Bildgebungen asymmetrische Befunde vor und die dazugehörigen Audiogramme lieferten eine jeweils mit dem Bildbefund übereinstimmende Asymmetrie. Bei den übrigen 183 (54,1 %) Patienten stimmten die Audiogramme und die Befunde aus den Bildgebungen nicht überein. Hier zeigte bei 172 (94,0 %) der 183 Patienten das Audiogramm einen asymmetrischen HV, während in den dazugehörigen Bildgebungen keine einseitige Pathologie vorlag. Bei 6 (3,3 %) Patienten lagen asymmetrische Befunde in den Bildgebungen vor, während die dazugehörigen Audiogramme symmetrisch waren. Des Weiteren wurden bei 5 (2,7 %) der 183 Patienten im Vergleich zu den Audiogrammen genau umgekehrt asymmetrische Befunde in den Bildgebungen festgestellt. Die im Anschluss folgende Abbildung 13 gibt nochmals eine Übersicht zu den Ergebnissen der Untersuchung der Tonaudiogramme der erwachsenen Patienten.



**Abbildung 13.** Vergleich der Ergebnisse aus den Tonaudiogrammen mit den Ergebnissen der CT- und MRT-Untersuchungen bezüglich eines asymmetrischen Hörverlustes bei den erwachsenen CI-Patienten.

### 3.5 CI-Operationen

#### 3.5.1 Intraoperative Auffälligkeiten

Zur Untersuchung der CI-Operationsverläufe wurden alle 705 Fälle einbezogen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf verschiedene intraoperative Auffälligkeiten bzw. Schwierigkeiten, die z. B. durch Fehlbildungen oder anatomische Varianten verursacht wurden, gelegt. Die Auswertungen der Operationsberichte zeigten, dass in 166 (23,5 %) der 705 Operationen relevante Schwierigkeiten auftraten. So lagen in 77 (10,9 %) Operationen Verlegungen des Cochlealumens, intracochleäre Verkalkungen bzw. Verknöcherungen (cochleäre Obstruktionen) vor, welche ein Freikratzen der basalen Schneckenwindung erforderten oder zu einer erschwerten Elektrodeninsertion führten. In 19 (2,7 %) Operationen kam es zu einem intraoperativem Gusher (engl.: Springquelle), welcher eine spezielle Abdichtung erforderte. Bei einem solchen Gusher handelt es sich um einen Austritt von Liquorflüssigkeit aus der Cochlea. Sind bestimmte Fehlbildungen vorhanden, kann eine Verbindung zwischen den Flüssigkeitsräumen des Liquor cerebrospinalis und der perilymphatischen Flüssigkeit bestehen. Dadurch kann sich der hohe Druck des Liquor cerebrospinalis im IGG auf die Perilymphe im membranösen Labyrinth fortsetzen und diese Innenohrflüssigkeit bei operativer Eröffnung des Innenohrs pulsierend aus der Cochlea austreten.<sup>54</sup> Die nachfolgende Tabelle 19 stellt alle relevanten intraoperativen Auffälligkeiten, die in den Operationsberichten der Patienten protokolliert wurden, mit ihrer Häufigkeit dar. Einige Operationen wurden durch eine Kombination mehrerer Auffälligkeiten, wie zum Beispiel dem Auftreten einer cochleären Obstruktion bei gleichzeitig vorhandener Fehlbildung, erschwert. Zur besseren Übersicht wurden die protokollierten Auffälligkeiten, die zu erschwerten Operationsverhältnissen führten, im Einzelnen aufgelistet.

**Tabelle 19.** Relevante Auffälligkeiten während der CI-Operation

<b>Intraoperative Auffälligkeit</b>	<b>Häufigkeit</b>	<b>in % (n = 705)</b>
Cochleäre Obstruktion	77	10,9
Gusher	19	2,7
Weit vorspringender Sinus sigmoideus	39	5,5
Durch Fehlbildung erschwerte Operation	34	4,8
Verlegung der Scala tympani	24	3,4
Starke Variation im Verlauf des N. facialis	11	1,6

In 2 (2,6 %) der 77 Fälle, in denen von Schwierigkeiten durch cochleäre Obstruktionen im Sinne von Verkalkungen, Verlegungen oder Verknöcherungen (Ossifikationen) der Cochlea berichtet wurde, kam es nach dem Freikratzen des Cochlealumens spontan zu einem Wechsel des Implantat-Systems (Einführen einer „M-Elektrode“ bzw. eines „Short-Implantats“). In 1 (1,3 %) der 77 Fälle konnten die Elektroden des Implantats nicht vollständig in die Cochlea eingeführt werden. Von den 34 Fällen in der oben aufgeführten Tabelle, in denen von erschwerten Operationsverhältnissen durch vorliegende Fehlbildungen im Bereich des Innenohrs berichtet wurde, konnten in 2 (5,9 %) Fällen die Implantat-Elektroden aufgrund einer cochleären Fehlbildung nicht komplett inseriert werden. In 1 (2,9 %) Fall wurde durch das Vorhandensein einer Otozysten-Deformität von einer Insertion des Implantats in diese berichtet. Wie Tabelle 19 zeigt, wurde in 24 Operationen die Scala tympani durch glasiges oder granulierendes Gewebe verlegt. In 23 (95,8 %) dieser Operationen wurde daraufhin der Elektrodenträger mit den Elektroden in die Scala vestibuli implantiert. In 1 (4,2 %) Fall gelang nach Freikratzen eine Insertion in die Scala tympani.

### 3.5.2 Zusammenhang zwischen präoperativer Bildgebung und Operation

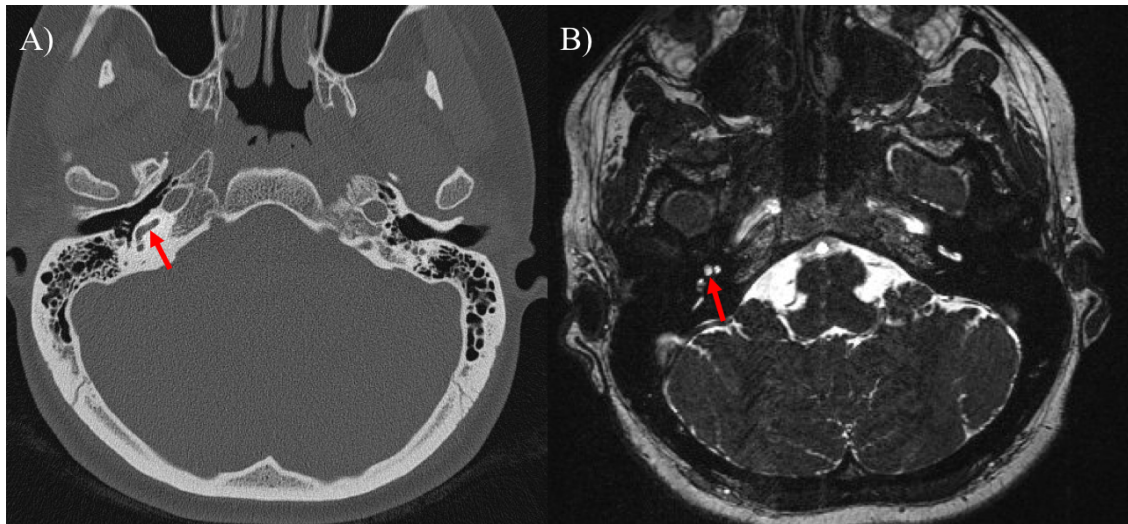
Nach Analyse der Auffälligkeiten, die in der CI-Operation auftraten, wurde die Frage nach einem möglichen Zusammenhang zwischen dem Vorliegen einer intraoperativen Auffälligkeit und einem darauf hinweisenden Befund in den präoperativen CT- und MRT-Aufnahmen statistisch überprüft. Zu dieser Auswertung wurden alle 534 OP-Fälle,

von denen beide Bildgebungen vollständig vorhanden waren, einbezogen (vgl. Kapitel 3.3.1). Es wurde überprüft, ob ein Zusammenhang zwischen einer in der Operation festgestellten Verkalkung, Verlegung oder Verknöcherung der Cochlea und einer Signalauffälligkeit im Bereich der Cochlea, die auf diese cochleäre Obstruktion hinweisen könnte, in den präoperativen Aufnahmen mittels CT und MRT besteht. Außerdem wurde untersucht, ob ein möglicher Zusammenhang zwischen einem intraoperativ aufgetretenem Gusher und einer präoperativ diagnostizierten Malformation im Bereich des Innenohrs nachgewiesen werden kann.

Unter allen 534 Fällen mit beiden vollständigen Bildgebungen war in 49 (9,2 %) Fällen die Operation durch eine Obstruktion der Cochlea erschwert. Zunächst wurden die CT-Aufnahmen ausgewertet. Dabei wurde in 8 (16,3 %) dieser 49 Fälle, in denen die Operation erschwert war, in den dazugehörigen CT-Aufnahmen ein zur cochleären Verlegung passender Befund festgestellt. In den übrigen 41 (83,7 %) Fällen war die dazugehörige CT-Aufnahme unauffällig. In 7 (1,3 %) der untersuchten 534 Fälle wurde eine cochleäre Obstruktion in der CT-Aufnahme diagnostiziert, während in der OP keine dazu passende Auffälligkeit im Bereich der Cochlea vorlag. In 478 (89,5 %) der 534 Fälle war sowohl die CT-Aufnahme als auch die Situation in der OP bezüglich einer cochleären Obstruktion unauffällig. Die anschließenden Auswertungen der MRT-Aufnahmen zeigten in 13 (26,5 %) dieser genannten 49 auffälligen Operationen eine Signalauffälligkeit in der Cochlea, welche zu der beschriebenen cochleären Obstruktion passt. In den übrigen 36 (73,5 %) Fällen mit auffälligen Operationen wurde in der MRT-Aufnahme keine Signalauffälligkeit in der Cochlea festgestellt. In 18 (3,4 %) der untersuchten 534 Fälle wurde ein auffälliges cochleäres Signal in der MRT-Aufnahme festgestellt, während in den Operationen dieser Fälle von keiner Schwierigkeit durch eine Verlegung der Cochlea berichtet wurde. 467 (87,5 %) der 534 Fälle zeigten weder in der MRT-Aufnahme noch im Operationsbericht eine cochleäre Obstruktion bzw. Signalauffälligkeit. Nach Durchführung des exakten Tests nach Fisher konnte jeweils ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen einem präoperativem CT- bzw. MRT-Bildbefund bezüglich einer cochleären Obstruktion bzw. Signalauffälligkeit und einer intraoperativen (Teil-)Obstruktion der Cochlea festgestellt werden, da der p-Wert jeweils kleiner als 0,001 war. Das heißt, statistisch gesehen, stimmen im Falle einer cochleären Obstruktion präoperativer CT-Bildbefund und präoperativer MRT-Bildbefund mit einer



Wahrscheinlichkeit von 95 % mit der intraoperativen Situation überein. Als Beispiel folgen im Anschluss die präoperativen Schnittbilduntersuchungen einer jungen Patientin mit Taubheit rechts bei Z. n. Meningitis. Während der CI-Operation auf der rechten Seite zeigte sich eine Fibrose der basalen Schneckenwindung. Sowohl in der CT- also auch in der MRT-Aufnahme zeigten sich bereits Hinweise auf die cochleäre Obstruktion.



**Abbildung 14.** A) Repräsentative CT-Aufnahme in axialer Schichtführung und B) MRT-Aufnahme in axialer 3D-CISS-Sequenz einer 24-jährigen CI-Patientin mit Taubheit rechts. Es zeigen sich cochleäre Kalzifikationen rechts. Der Pfeil in A) markiert die pathologische Dichteanhebung in der basalen Schneckenwindung. In der CISS-Sequenz der korrespondierenden MRT ist eine entsprechende Signalauslöschung zu erkennen (Pfeil in B).

Anschließend wurde untersucht, in wie vielen der 534 OP-Fälle mit beiden vollständigen Bildgebungen ein intraoperativer Gusher zu Erschwernissen führte. Dies wurde in 16 (3,0 %) der 534 Operationen beobachtet, wovon es sich in 11 (68,8 %) der 16 Fälle um Operationen bei Kindern und in 5 (31,3 %) Fällen um Operationen bei Erwachsenen handelte. Zunächst wurden wieder die CT-Aufnahmen analysiert. So zeigten diese in 10 (62,5 %) dieser 16 Fälle eine damit potentiell korrelierende Malformation im Bereich des Innenohrs. In 2 (12,5 %) der 16 Fälle zeigten die CT-Aufnahmen eine Fraktur des Felsenbeins und in den übrigen 4 (25,0 %) Fällen waren die CT-Aufnahmen unauffällig. In 38 (7,1 %) der 534 CT-Aufnahmen wurde eine Fehlbildung im Bereich des Felsenbeins diagnostiziert, während die Operation dieser Patienten ohne Gusher verlief. In den übrigen 480 (89,9 %) Fällen trat in der CI-Operation kein Gusher auf und auch die dazu korrelierende CT-Untersuchung lieferte keinen Hinweis auf einen möglichen Gusher. Ähnliche Werte ergaben sich bei der daran anschließenden Analyse der MRT-

Aufnahmen. Auch hier lag in 10 (62,5 %) der 16 Operationen, in denen es zu einem Gusher kam, ein dazu passender Befund (Malformation) in der MRT-Aufnahme vor, in den anderen 6 (37,5 %) MRT-Aufnahmen war kein Hinweis zu finden. In 31 (5,8 %) der 534 MRT-Aufnahmen wurden mit einem möglichen Gusher in Verbindung stehende Innenohrfehlbildungen festgestellt, während die entsprechenden Operationen diesbezüglich unauffällig verliefen. In 487 (91,2 %) Fällen wurde kein Gusher in der Operation beobachtet und die MRT-Untersuchungen waren bezüglich einer Innenohrfehlbildung unauffällig. Auch hier wurde zur statistischen Überprüfung einer Abhängigkeit zwischen Operation und präoperativem CT- und MRT-Bildbefund jeweils der exakte Test nach Fisher durchgeführt. Durch die errechneten p-Werte von jeweils  $p < 0,001$  konnte festgestellt werden, dass zwischen dem präoperativen CT- und MRT-Bildbefund bezüglich einer schweren Malformation im Innenohrbereich und dem Auftreten eines Gushers während der CI-Operation ein statistisch signifikanter Zusammenhang besteht. Die folgende Tabelle 20 zeigt die präoperativen Befunde der CT- und MRT-Untersuchungen der 16 Fälle, in denen es während der CI-Operation zu einem Gusher kam.

**Tabelle 20.** CT- und MRT-Bildbefunde bei intraoperativem Gusher

<b>Geschlecht (m/w)</b>	<b>Kind/Erwachsener</b>	<b>CT-Bildbefund</b>	<b>MRT-Bildbefund</b>
w	Kind	IP 2	IP 2
m	Kind	Bogengangdysplasie	Bogengangdysplasie
m	Kind	IP 1	IP 1
w	Kind	IP 1	IP 1
w	Kind	IP 1	IP 1
m	Kind	LVAS, Bogengang-, Vestibulumdysplasie	LVAS, Bogengang-, Vestibulumdysplasie
w	Kind	IP 2	IP 2
w	Kind	unauffällig	unauffällig
w	Kind	unauffällig	unauffällig
w	Kind	Felsenbeinfraktur	unauffällig
m	Kind	unauffällig	unauffällig
m	Erwachsener	LVAS	LVAS
m	Erwachsener	LVAS	LVAS
m	Erwachsener	Felsenbeinfraktur	unauffällig
w	Erwachsener	LVAS	LVAS
w	Erwachsener	unauffällig	unauffällig

Zuletzt stellte sich die Frage, ob bestimmte Befunde in den präoperativen CT- und MRT-Aufnahmen der Patienten zu Änderungen im geplanten Ablauf der CI-Operation geführt oder die Wahl der OP-Seite direkt beeinflusst hatten. Dazu wurde nochmals in allen 705 Operationsberichten nach möglichen Hinweisen recherchiert. Dabei zeigte sich, dass in 1 (0,1 %) Fall bei einem einseitig ertaubten Patienten ein im Rahmen der präoperativen MRT-Untersuchung als Zufallsbefund diagnostiziertes Akustikusneurinom simultan mit der Cochlea-Implantation auf der gleichen Seite reseziert wurde. In 1 (0,1 %) weiteren

Fall wurde bei einem beidseits operierten Patienten eine in der präoperativen CT-Aufnahme einseitige, unklare Verschattung des Mastoids festgestellt. Aufgrund dieses Befundes wurde bei diesem Patienten als erste Implantations-Seite gezielt die Seite mit dieser Verschattung gewählt, um die Ursache des unklaren Befundes zu klären. Intraoperativ zeigte sich eine okkulte Mastoiditis.

#### 4. Diskussion

Die Versorgung hochgradig schwerhöriger und ertaubter Menschen mit Cochlea-Implantaten zählt zu einer der bedeutendsten Errungenschaften der Ohrenheilkunde. Bereits Anfang des 19. Jahrhunderts begann Alessandro Volta mit den ersten Versuchen zu der elektronischen Hörprothese, die sich heute besonders bei Kindern und Jugendlichen bei bestehender Indikation als Standardversorgung etabliert hat und aus der modernen Medizin nicht mehr wegzudenken ist.<sup>65,66</sup> Cochlea-Implantate ermöglichen den meist hochgradig hörgeschädigten Patienten durch eine bestmögliche Verbesserung des Sprachverständnisses eine deutliche Zunahme ihrer Lebensqualität. Durch den steten Fortschritt der Forschung und ständig neue Entwicklungen auf dem Markt wird der Indikationsbereich für eine CI-Operation immer größer und die Anzahl der Operationen, insbesondere bei Kindern, steigt. Studien zeigen, dass hochgradig schwerhörige oder taub geborene Kinder, die vor ihrem zweiten Lebensjahr mit Cochlea-Implantaten versorgt wurden, ein besseres Sprachverständnis und eine bessere Sprachproduktion entwickelten, als Kinder, die zwischen dem zweiten und sechsten Lebensjahr operiert wurden. Daher wird bei beidseits hochgradig schwerhörigen oder ertaubten Kindern meist eine möglichst frühzeitige bilaterale Cochlea-Implantation empfohlen.<sup>67,68</sup> Wie bereits beschrieben ist zur CI-Indikationsstellung und zu einer ausführlichen präoperativen Diagnostik eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen verschiedenen fachärztlichen Bereichen notwendig. Für die prächirurgische radiologische Diagnostik, die zur Darstellung der Cochlea und zum Nachweis eines vorhandenen Hörnervs, sowie zur Abklärung verschiedenster Pathologien und anatomischer Varianten genutzt wird, stehen CT- sowie konventionelle und funktionelle MRT-Untersuchungen zur Verfügung.<sup>20</sup>

Das Ziel dieser Arbeit war, retrospektiv die Bedeutung der präoperativ durchgeführten CT- und MRT-Untersuchungen von 549 an der Klinik und Poliklinik für Hals- Nasen- und Ohrenheilkunde des Universitätsklinikums Würzburg operierten Patienten zu evaluieren.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse dieser Arbeit nochmals präsentiert und im Hinblick auf ihre Aussagefähigkeit diskutiert.

## 4.1 Ergebnisanalyse

### 4.1.1 Art der Hörstörung und Ätiologie

Zunächst wurde anhand der in den Patientenakten vorgefundenen Anamnesen und ärztlichen Befunde untersucht, um welche Art von Hörstörung es sich bei den operierten Patienten handelte. Die Ergebnisse zeigen, dass bei allen 254 Kinder-OP-Fällen auf dem operierten Ohr eine SES bestand. Bei den 451 Erwachsenen-OP-Fällen lag in 428 (95,0 %) Fällen ebenso eine SES auf dem operierten Ohr vor. In 23 (5 %) Fällen lag eine kombinierte Schwerhörigkeit auf dem operierten Ohr vor. Es war zu erwarten, dass keine rein schallleitungsschwerhörigen Patienten mit einem CI versorgt wurden, da die Indikation für ein CI in einer Funktionsstörung im Bereich des Innenohrs liegt und daher im Rahmen einer SES bzw. kombinierten Schwerhörigkeit zur Therapie genutzt wird.<sup>16</sup> Patienten, die an einer kombinierten Schwerhörigkeit leiden, werden vor einer CI-Operation häufig bereits durch hörverbessernde Operationen im Mittelohr, wie beispielsweise Stapesplastiken oder Tympanoplastiken, therapiert (vgl. Kapitel 1.4.1).<sup>12</sup> Eine vorangegangene Operation im Ohrbereich galt in dieser Arbeit als Ausschlusskriterium. Somit war nicht verwunderlich, dass das untersuchte Patientenkollektiv aus nur wenigen kombiniert-schwerhörigen Patienten bestand.

Wie in Kapitel 1.2.2 bereits beschrieben, können verschiedenste Ursachen unterschiedlichster Genese verantwortlich für sensorineurale Schwerhörigkeiten sein. In der vorliegenden Arbeit konnten von den 705 OP-Fällen anhand der Untersuchungsbefunde und der Anamnesen aus den Patientenakten sowie durch die präoperativen CT- und MRT-Bildgebungen in insgesamt 53,3 % der Fälle mögliche Ursachen für die Hörminderung eruiert werden. Bei Trennung des Untersuchungskollektives in Kinder und Erwachsene zeigte sich, dass in der Kinder-Gruppe in 163 (64,2 %) von insgesamt 254 OP-Fällen mögliche Ursachen gefunden werden konnten. In der Erwachsenen-Gruppe waren in 213 (47,2 %) von insgesamt 451 Fällen mögliche Ursachen feststellbar. Die am häufigsten vermutete Ursache bestand in der Kinder-Gruppe in einer Frühgeburt (49 Fälle, 19,3 %), gefolgt von auffälligen peri- und postnatalen Ereignissen und Komplikationen (38 Fälle, 15,0 %) und einem genetischen Defekt, der Connexin-26-Mutation (31 Fälle, 12,2 %). Bei den Erwachsenen wurde am häufigsten als mögliche Ursache eine akute Hörminderung durch einen

idiopathischen Hörsturz angegeben (36 Fälle, 8,0 %), gefolgt von einer durchgemachten Meningitis (28 Fälle, 6,2 %).

Häufig bleiben die Ursachen für eine hochgradige sensorineurale Schwerhörigkeit oder Taubheit aber auch ungeklärt. So zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass in 46,7 % aller operierten Fälle keinerlei Ursachen für die Hörstörung des jeweils operierten Ohrs bekannt waren und weder klinische noch radiologische Untersuchungen zur Abklärung der möglichen Ätiologie verhalfen. In der Kinder-Gruppe betraf dies 91 (35,8 %) der 254 Fälle und in der Erwachsenen-Gruppe 238 (52,8 %) der 451 Fälle. Damit zeigt sich, dass in der Erwachsenen-Gruppe die Ursache für die bestehende Hörstörung häufiger unbekannt war als in der Kinder-Gruppe.

Downs et al. (1972) veröffentlichten Anfang der 1970er Jahre an der Colorado-Universität ein Screening-Programm zur Früherkennung von Taubheit und schwerem Hörverlust bei Neugeborenen.<sup>69</sup> Erst seit dem Jahr 2009 ist in Deutschland das NGHS zur Früherkennung von Hörstörungen ein zentraler Bestandteil der Vorsorgeuntersuchungen im Kindesalter.<sup>23</sup> Somit könnte die sich erst im Laufe der letzten Jahre entwickelte Etablierung des NGHS eine mögliche Erklärung sein, warum in dieser Arbeit bei einem Großteil der Patienten, insbesondere bei den Erwachsenen, kein Hinweis für die Ursache ihrer Hörminderung zu finden war. Es ist anzunehmen, dass nicht alle erwachsenen Patienten des Untersuchungskollektivs unmittelbar nach ihrer Geburt einer Früherkennungsuntersuchung unterzogen wurden. Dies wiederum erlaubt den Rückschluss, dass bei den erwachsenen Patienten nicht immer der exakte Eintrittszeitpunkt des Hörverlustes festgestellt wurde und deshalb zum Beispiel ein angeborener Hörverlust erst während der Sprachentwicklung bemerkt wurde, was wiederum die Ursachenfindung im Nachhinein erschwert.

Ähnlich wie in dieser Arbeit, beschäftigten sich Schwartz et al. (2014) in einer Studie mit der Bedeutung präoperativer Bildgebung vor Cochlea-Implantation bei 168 postlingual ertaubten Erwachsenen. Dabei war bei 111 (65,3 %) Patienten die Ursache für deren Hörminderung unbekannt. Die häufigsten bekannten Ursachen bestanden in infektiösen Erkrankungen (18 Fälle, 10,7 %), gefolgt von ototoxischen Auslösern (9 Fälle, 5,3 %) und Traumata (8 Fälle, 4,7 %). Eine Meningitis lag in 6 Fällen (3,6 %) als vermuteter Auslöser vor. Weitere Ursachen bestanden in hereditären Gründen (7 Fälle, 4,1 %), Morbus Menière (7 Fälle, 4,1 %) und anderen Ursachen (3 Fälle, 1,8 %), die nicht näher

beschrieben wurden.<sup>57</sup> Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit der vorliegenden Arbeit. Wie bereits zuvor beschrieben, blieb auch in dieser Arbeit bei einem großen Teil des gesamten Untersuchungskollektivs der Grund für die Hörstörung ungeklärt und die Zahl der Erwachsenen mit unbekannter Ursache (52,8 %) weicht um etwa 10 % von den Ergebnissen von Schwartz et al. (2014) ab. Neben der Anzahl der bekannten und unbekanntenen Ursachen zeigen sich auch Parallelen im Bereich der erfassten Auslöser, die für die Hörstörungen der untersuchten Patienten in Frage kommen. Wie bei Schwartz et al. (2014) wurden auch in dieser Arbeit ototoxische Medikamenteneinnahmen (12 Fälle, 1,7 %), Traumata (20 Fälle, 2,8 %) und Morbus Menière (17 Fälle, 2,4 %) als mögliche Gründe erfasst. Beim Vergleich der Häufigkeiten zeigt sich jedoch, dass diese drei Auslöser in dieser Arbeit insgesamt seltener als in der Vergleichsstudie erfasst wurden. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte darin liegen, dass im Rahmen dieser Arbeit Traumata (Felsenbein- und Schädelbasisfrakturen) als mögliche Ursachen in insgesamt 19 (95,0 %) von 20 Fällen und ein Morbus Menière in 17 (100,0 %) von 17 Fällen bei den erwachsenen Patienten festgestellt wurden. Diese beiden Ursachen wurden in der vorliegenden Arbeit somit nahezu ausschließlich bei den Erwachsenen festgestellt. Da in der Patientenkohorte dieser Arbeit im Gegensatz zu der Patientenkohorte von Schwartz et al. (2014) jedoch zusätzlich Kinder evaluiert wurden, kamen möglicherweise aus diesem Grund diese Auslöser im Gesamtkollektiv seltener vor. Bezüglich der medikamentös-bedingten Hörminderung trifft dies allerdings nicht zu, da in dieser Arbeit häufiger Kinder von einer ototoxischen Medikamenteneinnahme betroffen waren. Außerdem wurden in dieser Arbeit die infektiösen und hereditären Auslöser in weitere Untergruppen aufgeteilt (z. B. Z. n. konnataler CMV-Infektion, Masern, rezidivierende Otitiden, Röteln-Embryopathie), während bei Schwartz et al. (2014) nicht nachvollziehbar ist, welche Faktoren genau zu den infektiösen und hereditären Ursachen gezählt wurden. Des Weiteren wurden in dieser Arbeit, wie bereits aufgeführt, nicht nur postlingual ertaubte Erwachsene, sondern auch Kinder, die häufig prälingual schwerhörig oder ertaubt sind und insgesamt eine deutlich höhere Patientenzahl in die Auswertungen einbezogen. Dies könnte erklären, warum noch eine Vielzahl weiterer Faktoren und Erkrankungen, wie Frühgeburt oder auditorische Neuropathie, als mögliche Auslöser der Schwerhörigkeiten erfasst werden konnten.



Bezüglich der Ursachen, die bei den Kindern festgestellt wurden, zeigt eine Studie von Manrique et al. (2004) vergleichbarere Ergebnisse. Sie untersuchten eine Gruppe von 36 Kindern, die vor dem zweiten Lebensjahr mit einem CI versorgt wurden, und eine weitere Gruppe von 94 Kindern, die zwischen dem zweiten und sechsten Lebensjahr mit einem CI versorgt wurden. Die Ergebnisse ihrer Untersuchungen zeigten, dass in der Gruppe der unter 2-jährigen Kinder in 15 (41,7 %) Fällen die Ursache unbekannt war und in der Gruppe der 2–6-Jährigen in 42 (44,7 %) Fällen. Die bekannten Ursachen bestanden dabei in genetischen Faktoren (unter 2-Jährige: 7 Fälle, 19,4 %; 2–6-Jährige: 26 Fälle, 27,7 %), pränatal-infektiösen Ursachen (unter 2-Jährige: 1 Fall, 2,8 %; 2–6-Jährige: 2 Fälle, 2,1 %), postnatal-infektiösen Ursachen (unter 2-Jährige: 3 Fälle, 8,3 %; 2–6-Jährige: 0 Fälle, 0,0 %), ototoxischen Medikamenteneinnahmen (unter 2-Jährige: 1 Fall, 2,8 %; 2–6-Jährige: 1 Fall, 1,1 %) und anderen Ursachen, die nicht weiter bestimmt wurden (unter 2-Jährige: 6 Fälle, 16,7 %; 2–6-Jährige: 10 Fälle, 10,6 %).<sup>68</sup>

In der vorliegenden Arbeit war in der Kinder-Gruppe in 91 (35,8 %) Fällen die Ursache unbekannt. In 31 (19,0 %) der 163 Kinder-CI-Fälle mit bekannter Ursache war ein Connexin-26-Defekt und somit eine genetische Ursache bekannt und in 16 (9,8 %) Kinder-CI-Fällen eine syndromale Erkrankung. Geht man davon aus, dass es sich bei diesen syndromalen Erkrankungen um genetisch bedingte Erkrankungen handelt, so können in 47 (18,5 %) Fällen aller 254 Kinder-CI-Fälle genetische Ursachen vermutet werden. Zu den prä- und postnatal-infektiösen Ursachen können in dieser Arbeit die erfassten konnatalen CMV-Infektionen und Röteln-Embryopathien gezählt werden, welche in insgesamt 13 (5,1 %) Fällen aller Kinder-CI-Fälle als Ursache in Frage kamen. Daneben wurden auch medikamentös-induzierte sensorineurale Hörstörungen angenommen, welche in dieser Arbeit in 9 (3,5 %) Fällen aller Kinder-CI-Fälle festgestellt wurden. Zum einen bestehen somit Parallelen zwischen dieser Arbeit und den Ergebnissen von Manrique et al. (2004), da sich die vermuteten Ursachen der operierten Kinder ähneln und auch die Verteilungen der Auslöser nur leicht (um maximal 14,1 %) differieren. Zum anderen wurden jedoch die in dieser Arbeit am häufigsten vermuteten Ursachen der Kinder, nämlich eine Frühgeburt sowie peri- und postnatale Komplikationen, bei Manrique et al. (2004) nicht festgestellt bzw. dokumentiert.

Unter Berücksichtigung der CT- und MRT-Aufnahmen zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass von allen 705 OP-Fällen in 92 (13,0 %) Fällen mit Hilfe der bildgebenden

Untersuchungen pathologische Korrelate zur Hörstörung im Bereich des Felsenbeins gefunden werden konnten. Bei den operierten Kindern handelte es sich dabei fast ausschließlich um verschiedene Anomalien und Fehlbildungen, wie ein LVAS, eine IP 2 oder eine Bogengangdysplasie, die zum Teil in kombinierten Formen vorlagen (vgl. Abbildung 8). Auch bei Manrique et al. (2004) wurden unter allen Kindern anhand von CT-Untersuchungen der Schläfenbeine in insgesamt 11 Fällen Auffälligkeiten diagnostiziert, wovon es sich in 6 Fällen um Anomalien und Fehlbildungen und in 5 Fällen um Ossifikationen im Bereich des Innenohrs handelte. Bei den Anomalien und Fehlbildungen stellten sie, ähnlich wie in dieser Arbeit, in 3 Fällen eine cochleäre Hypoplasie, in 2 Fällen einen erweiterten Aquaeductus vestibuli und in 1 Fall eine IP 2 fest. Im Gegensatz zu dieser Arbeit wurde in der Studie von Manrique et al. (2004) bei jedem Kind zunächst nur eine CT-Untersuchung durchgeführt. Eine zusätzliche MRT-Untersuchung wurde nur im Falle einer in der CT-Aufnahme bereits detektierten Malformation oder Ossifikation hinzugefügt.<sup>68</sup> In der vorliegenden Arbeit wurden bei den operierten Erwachsenen neben Innenohrfehlbildungen knöcherne Auffälligkeiten, wie eine Otosklerose oder eine Schläfen- bzw. Felsenbeinfraktur als mögliche Ursachen erfasst (vgl. Abbildung 8). Auch Schwartz et al. (2014) stellten in ihren Untersuchungen an postlingual ertaubten Erwachsenen in insgesamt 37 Fällen verschiedene radiologische Auffälligkeiten fest. Dazu gehörten ebenso Fehlbildungen und Anomalien (wie zum Beispiel ein LVAS, IP 2) sowie Otosklerosen und Schläfenbeinfrakturen, die auch, wie in dieser Arbeit, in den Schnittbilduntersuchungen der Erwachsenen diagnostiziert wurden. Zur Diagnostik dienten bei Schwartz et al. (2014) ebenfalls sowohl CT- als auch MRT-Untersuchungen.<sup>57</sup>

Neben diesen Auffälligkeiten, die in der Felsenbeinregion als potentielle Auslöser für cochleäre Schwerhörigkeiten festgestellt wurden, können außerdem retrocochleäre, also weiter zentral im Bereich der Hörbahn lokalisierte Läsionen, ursächlich für eine SES sein oder in Zusammenhang mit dieser stehen.<sup>55</sup> Die Auswertungen der 441 kraniellen MRT-Aufnahmen der Patienten dieser Arbeit ergaben, dass insgesamt bei 13 (2,9 %) Patienten laut Bildbefund Läsionen im retrocochleären Bereich bestanden, die, wie bereits angesprochen, sensorineurale Schwerhörigkeiten verursachen können. Dazu wurden zum Beispiel Tumoren wie das Akustikusneurinom oder infektionsbedingte Veränderungen im Marklager, wie z. B. nach CMV-Infektionen, gezählt. In 23 (5,2 %) weiteren MRT-

Aufnahmen wurden Pathologien wie Fehlbildungen und stoffwechselstörungsbedingte Veränderungen festgestellt, die zwar nicht direkt ursächlich für sensorineurale Schwerhörigkeiten sind, jedoch mit diesen in Zusammenhang stehen können (vgl. Tabelle 7 bis Tabelle 11). Auch in einigen der 522 CT-Aufnahmen wurden zusätzliche Befunde erfasst, die jedoch alle in Form von Nebenbefunden für die CI-Versorgung keine weitere Relevanz hatten und nicht in Zusammenhang mit Hörstörungen stehen.

Auch Tamplen et al. (2016) stellten in einer Studie in präoperativen MRT-Aufnahmen von CI-Patienten neben Läsionen im Bereich des Schläfenbeins zusätzliche retrocochleäre Läsionen, die verantwortlich für sensorineurale Schwerhörigkeiten sein können, fest. Von insgesamt 102 MRT-Untersuchungen diagnostizierten sie in 1 Aufnahme ein Akustikusneurinom, in 2 Aufnahmen ein Meningeom und in 2 weiteren Aufnahmen einen hypoplastischen Hörnerv. Neben den MRT-Aufnahmen lagen auch 110 präoperative CT-Untersuchungen vor. Wie in dieser Arbeit verhalten die CT-Aufnahmen zur Diagnostik von Auffälligkeiten im Bereich des Innenohrs, wie zum Beispiel zur Detektion einer dysplastischen Cochlea oder einer Vestibulumdysplasie, welche in 8 (7,3 %) Aufnahmen auffiel, zu einer in 3 (2,7 %) Aufnahmen festgestellten cochleären Obstruktion, oder zu einem in 3 (2,7 %) Aufnahmen diagnostizierten erweiterten Aquaeductus vestibuli. Die retrocochleären Läsionen, die mit Hörstörungen verbunden sein können, wurden jedoch alle anhand der MRT-Untersuchungen festgestellt.<sup>56</sup>

Zusammengefasst konnten in dieser Arbeit die präoperativen CT- und MRT-Untersuchungen der Felsenbeine in 92 (13 %) der 705 Fälle zur Ursachenfindung für die hochgradige Schwerhörigkeit bzw. Ertaubung der CI-Patienten beitragen. Da demnach ohne diese radiologischen Bildgebungen bei einem deutlich größeren Teil der Patienten die Ursachen für deren Schwerhörigkeit ungeklärt geblieben wären, wird hier die Bedeutung einer präoperativen CT- und MRT-Untersuchung erkennbar. Neben den Auffälligkeiten im Bereich des Felsenbeins lieferten die MRT-Aufnahmen zusätzlich bei 36 (8,2 %) von 441 Patienten weitere Auffälligkeiten im intrazerebralen Bereich, die potentiell ursächlich für deren sensorineurale Schwerhörigkeit gewesen sein könnten. Zwar konnten auch anhand der CT-Aufnahmen bei 17 (3,3 %) von 522 Patienten zusätzliche Nebenbefunde festgestellt werden, diese waren jedoch, wie bereits beschrieben, im Gegensatz zu den Zusatzbefunden der MRT-Untersuchungen für die CI-

Versorgung nicht von weiterer Relevanz. Auf Basis dieser Ergebnisse kann daher angenommen werden, dass eine MRT-Aufnahme des Schädels aufgrund der zusätzlichen Darstellung des Gehirns mehr ätiologische Hinweise bezüglich einer ungeklärten Hörminderung liefern kann als eine CT-Aufnahme des Schläfen-, bzw. Felsenbeins.

#### 4.1.2 Vergleich der Darstellungsmöglichkeiten von CT und MRT

##### 4.1.2.1 Felsenbeinpathologien in den CT- und MRT-Aufnahmen

Ein weiterer Teil dieser Arbeit bestand in einer vergleichenden Untersuchung der Auffälligkeiten, die in den CT- und MRT-Aufnahmen der CI-Fälle erfasst wurden. Für einen genauen Diagnostikvergleich der beiden bildgebenden Verfahren wurde der Fokus auf ausgewählte Pathologien im Bereich des Felsenbeins gelegt. Wie die Ergebnisse zeigen, konnten durch die mit Hilfe des exakten Tests nach Fisher errechneten p-Werte für die Diagnosen Otosklerose, LVAS, IP 1, IP 2, Otozysten-Deformität, cochleäre Hypoplasie, Bogengangdysplasie, Vestibulumdysplasie und Malformation des IGG signifikante Abhängigkeiten zwischen den Aussagen der beiden bildgebenden Verfahren festgestellt werden. Statistisch betrachtet können diese Diagnosen also mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % gleichermaßen gut durch die CT-Untersuchung wie durch die MRT-Untersuchung festgestellt oder ausgeschlossen werden. Bei den Diagnosen Bogengangaplasie, Cholesteatom und Felsenbeinfraktur konnten keine statistisch signifikanten Zusammenhänge zwischen den beiden Untersuchungsverfahren festgestellt werden. Im Einleitungsteil (vgl. Kapitel 1.5.2) wurden bereits auf Grundlage mehrerer Publikationen die geeigneten Darstellungsmöglichkeiten verschiedener Pathologien, die mit sensorineuraler Schwerhörigkeit zusammenhängen, vorgestellt. Nun stellt sich die Frage, ob die Ergebnisse dieser Arbeit zu diesen Empfehlungen sowie zu den Ergebnissen anderer Studien passen.

Laut Casselman et al. (1997) und Biller et al. (2007) kann ein LVAS sowohl mittels CT- als auch mittels MRT-Untersuchung diagnostiziert werden.<sup>20,54</sup> Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen ebenfalls, dass statistisch betrachtet ein LVAS sowohl mittels CT-Aufnahme als auch mittels MRT-Aufnahme festgestellt werden kann und bestätigen damit die Aussagen der oben genannten Vergleichsarbeiten. Wie bereits erläutert, weisen die ermittelten p-Werte auch für die drei Diagnosen IP 2, Otozysten-Deformität und Malformation des IGG auf statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen der

Diagnostik mittels CT- und MRT-Bildgebung hin. Da laut Biller et al. (2007) diese drei Fehlbildungen ebenfalls sowohl durch die CT als auch durch die MRT diagnostiziert werden können, passen auch diese Ergebnisse zueinander.<sup>20</sup> Für die Diagnose Otosklerose, cochleäre Hypoplasie und Bogengangdysplasie unterscheiden sich die Ergebnisse dieser Arbeit von der Literatur. Auch die ermittelten p-Werte für diese Diagnosen deuten auf Abhängigkeiten zwischen den beiden Untersuchungsverfahren hin. Laut Casselman et al. (1997) sind jedoch otosklerose-typische Veränderungen durch MRT-Untersuchungen schlechter als durch CT-Untersuchungen zu erkennen.<sup>54</sup> Auch Tamplen et al. (2016) bevorzugen auf Grund der Ergebnisse ihrer Studie die CT zur Diagnostik einer Otosklerose.<sup>56</sup> Des Weiteren eignet sich laut Biller et al. (2007) im Gegensatz zu den Ergebnissen dieser Arbeit die MRT nicht zur Diagnostik einer cochleären Hypoplasie und auch laut Purcell et al. (2006) ist eine exakte Größenmessung der Cochlea mittels CT notwendig um diese Fehlbildung, die häufig mit sensorineuralem Hörverlust assoziiert ist, feststellen zu können.<sup>20,70</sup> Ebenso zeigen die Ergebnisse der Literaturrecherche, dass zur Diagnostik einer Bogengangdysplasie die CT bevorzugt wird und nicht, wie die p-Werte dieser Arbeit vermuten lassen, beide Verfahren gleichermaßen gut geeignet sind.<sup>54</sup> Für die Diagnosen eines Cholesteatoms, einer Bogengangaplasie und einer Felsenbeinfraktur wurden in der vorliegenden Arbeit, wie oben bereits aufgeführt, keine Zusammenhänge festgestellt, da sie nur mittels der CT-Untersuchungen der Patienten diagnostiziert wurden. Casselman et al. (1997) bevorzugen zur Diagnostik einer Bogengangaplasie und einer Felsenbeinfraktur ebenso die CT. Zur Diagnostik eines Cholesteatoms sind laut Casselman et al. (1997) zwar beide Untersuchungsverfahren geeignet, für eine genaue Abklärung bestimmter Cholesteatome sollte neben einer MRT- jedoch auch eine CT-Untersuchung durchgeführt werden.<sup>54</sup> Daneben zeigte eine Untersuchung von Tada et al. (2016), dass die CT dazu geeignet ist, verschiedene Formen des kongenitalen Cholesteatoms zu unterscheiden.<sup>71</sup> Somit ist anzunehmen, dass zur Detektion bestimmter Cholesteatome aufgrund ihrer besseren örtlichen Auflösung die CT besser als die MRT geeignet ist.

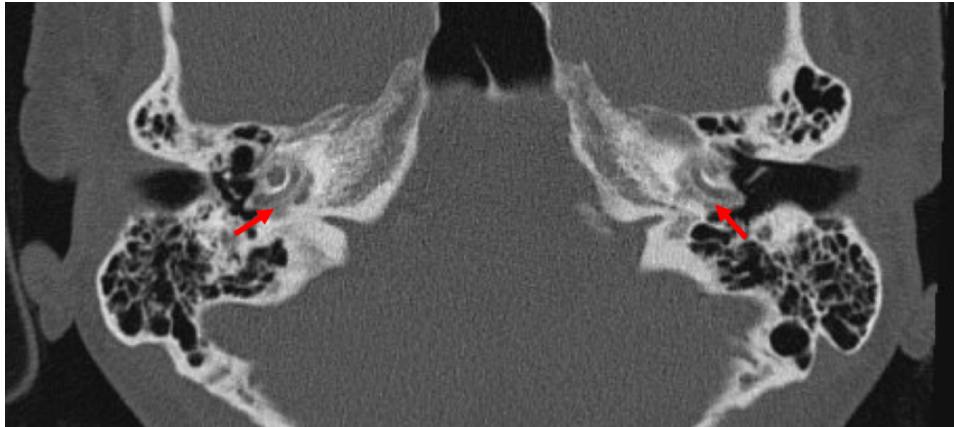
Auch Digge et al. (2016) beschäftigten sich in einer Studie mit Bildgebungen vor CI-Operationen bei Patienten mit beidseitigem sensorineuralem Hörverlust. Ähnlich wie in dieser Arbeit analysierten und verglichen sie dabei die verschiedenen Befunde der präoperativen CT- und MRT-Untersuchungen von insgesamt 144 Schläfenbein-

Aufnahmen. Als die am häufigsten beobachtete cochleäre Fehlbildung stellten Digge et al. (2016) in 14 der 144 untersuchten Fälle eine IP 2 fest, die sowohl in den CT-Aufnahmen als auch in den MRT-Aufnahmen zu sehen war. Die zweithäufigste detektierte cochleäre Fehlbildung bestand in einer IP 1, die in 9 Fällen jeweils sowohl in der CT-Aufnahme als auch in der MRT-Aufnahme detektiert wurde. Eine Otozysten-Deformität (bei Digge et al. (2016) als Common Cavity-Deformität bezeichnet) wurde in 4 Fällen sowohl durch die CT als auch durch die MRT diagnostiziert.<sup>72</sup> Hier zeigen sich Parallelen zu der vorliegenden Arbeit. Wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, wurden die drei Fehlbildungen im Bereich der Cochlea (IP 2, IP 1, Otozysten-Deformität) ebenfalls jeweils sowohl mittels CT als auch mittels MRT diagnostiziert. Die IP 2 wurde in 7 (1,3 %) der 534 Fälle mittels CT- und MRT-Aufnahme detektiert, die IP 1 wurde in jeweils 4 (0,7 %) CT- und MRT-Aufnahmen der 534 Fälle erfasst und eine Otozysten-Deformität wurde in 1 (0,2 %) der 534 Fälle in der CT- und der MRT-Aufnahme festgestellt. Des Weiteren wurde in der Studie von Digge et al. (2016) in 8 (6,0 %) der 144 untersuchten Fälle sowohl in der CT-Aufnahme als auch in der MRT-Aufnahme eine Vestibulumdysplasie detektiert.<sup>72</sup> Auch diese Ergebnisse passen zu den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, da, wie bereits festgestellt, der für die Diagnose einer Vestibulumdysplasie errechnete p-Wert auf einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen CT- und MRT-Untersuchung hinweist. Der Vergleich der absoluten und relativen Häufigkeiten zeigt, dass die Vestibulumdysplasie bei Digge et al. (2016) deutlich häufiger diagnostiziert wurde als in dieser Arbeit, da sie hier in nur 3 (0,6 %) der 534 Fälle festgestellt wurde.

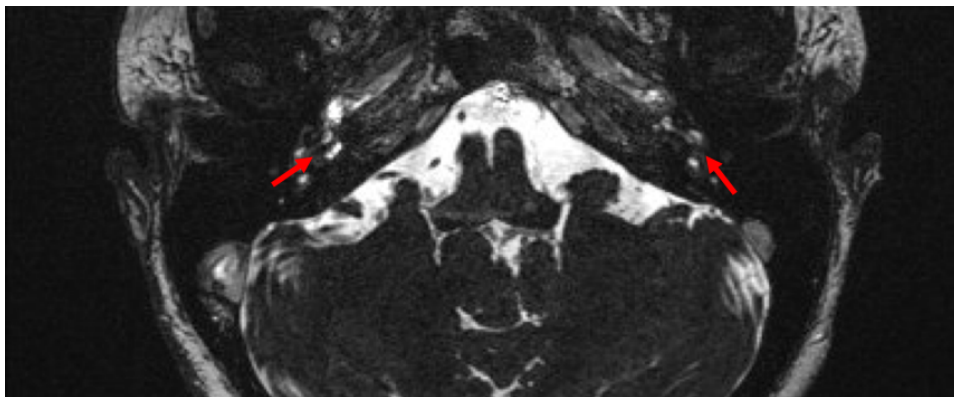
Zusammenfassend kann nun auf Grund der Ergebnisse dieser Arbeit und der Vergleichsliteratur die Vermutung zugelassen werden, dass bestimmte Diagnosen im Bereich des Felsenbeins mit einer hohen Wahrscheinlichkeit sowohl mittels CT-Untersuchung, als auch mittels MRT-Untersuchung festgestellt werden können. Dabei handelt es sich um bestimmte Fehlbildungen, nämlich das LVAS, die IP 1, die IP 2, die Otozysten-Deformität, die Vestibulumdysplasie sowie eine Malformation des IGG. Daneben ist anzunehmen, dass für bestimmte Auffälligkeiten die Diagnostik durch die CT besser geeignet ist als durch die MRT. Zu diesen Auffälligkeiten zählen die Bogengangaplasie, Frakturen im Bereich des Felsen- bzw. Schläfenbeins und bestimmte Formen von Cholesteatomen.

Für die Diagnostik einer Otosklerose, einer cochleären Hypoplasie und einer Bogengangdysplasie differieren die Ergebnisse dieser Arbeit mit den Informationen anderer Studien. Aus den Ergebnissen dieser Arbeit könnte die Vermutung zugelassen werden, dass diese drei genannten Diagnosen mit beiden Untersuchungsverfahren gleichgut detektiert bzw. ausgeschlossen werden können (als Beispiel für eine Otosklerose vgl. Abbildung 15 bis Abbildung 17).

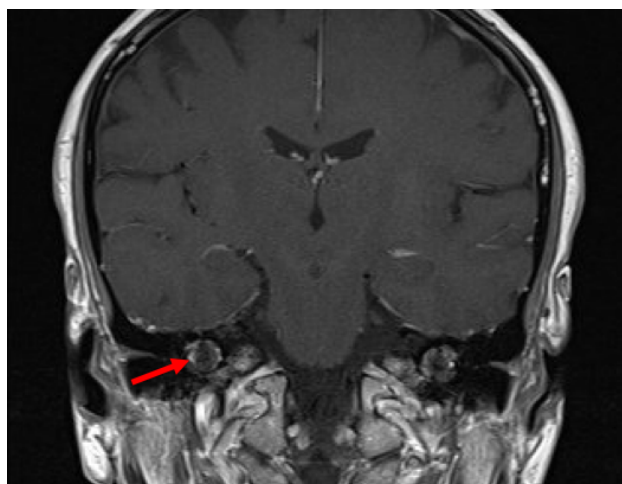
Verschiedene Vergleichsarbeiten lassen jedoch annehmen, dass zur Diagnostik einer Otosklerose und einer cochleären Hypoplasie die CT besser als die MRT geeignet ist.<sup>20,54,56,70</sup> Zur Diagnostik einer Bogengangdysplasie zeigten sich jedoch auch in den Vergleichsarbeiten unterschiedliche Ergebnisse. Wie bereits erwähnt bevorzugen Casselman et al. (1997) die CT zur Diagnostik von Bogengangdysplasien und Bogengangaplasien. Digge et al. (2016) stellten hingegen in 5 Fällen häufiger in der MRT-Aufnahme als in der CT-Aufnahme eine Bogengangdysplasie fest.<sup>54,72</sup> Eine Erklärung für diese divergierenden Ergebnisse bezüglich der Diagnostik einer Bogengangdysplasie könnte eine befunderspezifische Abhängigkeit sein, die vermuten lässt, dass verschiedene Kriterien oder Grenzwerte für die Diagnose einer Bogengangdysplasie existieren.



**Abbildung 15.** Ausschnitt einer präoperativen Felsenbein-CT-Aufnahme (axiale Schichtführung) einer 47-jährigen Patientin mit beidseitiger, progredienter Schwerhörigkeit aufgrund beidseitiger Kapselotosklerose (Pfeile). Es zeigt sich Dichteminderungen der otischen Kapsel, besonders ausgeprägt um die Cochlea.



**Abbildung 16.** Präoperative MRT-Aufnahme in axialer 3D-CISS-Sequenz der Patientin aus Abbildung 15 mit beidseitiger Kapselotosklerose (Pfeile). Die Strukturalterationen der otischen Kapsel lassen sich auch MR-tomographisch erahnen.



**Abbildung 17.** Die kontrastmittelgestützte koronare Sequenz zeigt ein kräftiges Enhancement um die Cochlea beidseits.



#### 4.1.2.2 Deskriptive Befundvergleiche

Nach dem Vergleich der Darstellungsmöglichkeiten ausgewählter Pathologien im Bereich des Felsenbeins wurden anschließend nochmals alle Auffälligkeiten, also auch die zusätzlichen Befunde, die in den CT- und MRT-Untersuchungen festgestellt wurden, miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass von allen 404 Patienten, von denen eine präoperative CT-Aufnahme und eine vollständige präoperative MRT-Untersuchung inklusive 3D-CISS-Sequenz vorlagen, bei 42 (10,4 %) Patienten Pathologien in den MRT-Untersuchungen festgestellt werden konnten, während die CT-Untersuchungen keine Auffälligkeiten zeigten. Umgekehrt lagen nur bei 9 (2,2 %) dieser Patienten auffällige CT-Aufnahmen vor, während die MRT-Aufnahmen unauffällig waren. Bei den festgestellten Pathologien in den 42 auffälligen MRT-Aufnahmen handelte es sich in 33 (78,6 %) Aufnahmen um Läsionen im Bereich des Gehirns, wovon in 2 Aufnahmen zusätzliche Signalauffälligkeiten im Bereich der Cochlea festgestellt wurden. In den übrigen 9 (21,4 %) Aufnahmen handelte es sich um eine reine Signalauffälligkeit im Bereich der Cochlea. Demnach wurde also in 31 (7,7 %) MRT-Untersuchungen eine intrazerebrale Pathologie festgestellt, während das Felsenbein unauffällig war. Bei den 9 auffälligen CT-Untersuchungen handelte es sich in 4 (44,4 %) Aufnahmen um eine Innenohrfehlbildung, in 1 (11,1 %) Aufnahme um ein Cholesteatom, in 2 (22,2 %) Aufnahmen um eine Otosklerose und in 2 (22,2 %) Aufnahmen um eine Felsenbeinfraktur. Damit zeigen die Ergebnisse, dass die MRT-Untersuchungen der Patienten im Vergleich zu den CT-Untersuchungen mehr als viermal häufiger pathologische Befunde lieferten, wovon es sich in über 70 % (33 Aufnahmen) um intrazerebrale Läsionen handelte. Somit konnten anhand der MRT insgesamt bei einem deutlich größeren Teil der Patienten Auffälligkeiten festgestellt werden und dadurch auch mehr Hinweise auf mögliche Ursachen für deren Hörminderung vermutet werden (vgl. dazu Kapitel 4.1.1).

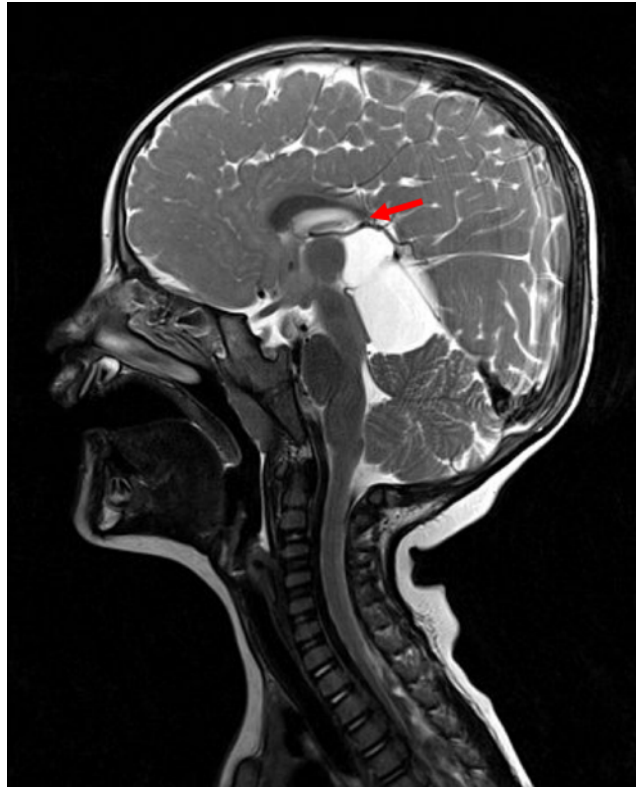
Diese Resultate unterstützen die bereits im Einleitungsteil beschriebenen Vorteile der Darstellungsmöglichkeiten der MRT, da Weichteilstrukturen des Innenohrs sowie Läsionen im Bereich des Kleinhirnbrückenwinkels und im Gehirn besser beurteilt werden können.<sup>55</sup>

Bei genauer Betrachtung der zusätzlichen intrazerebralen Befunde, die neben den Befunden in der Felsenbeinregion mittels MRT festgestellt wurden, zeigt sich, dass in 20

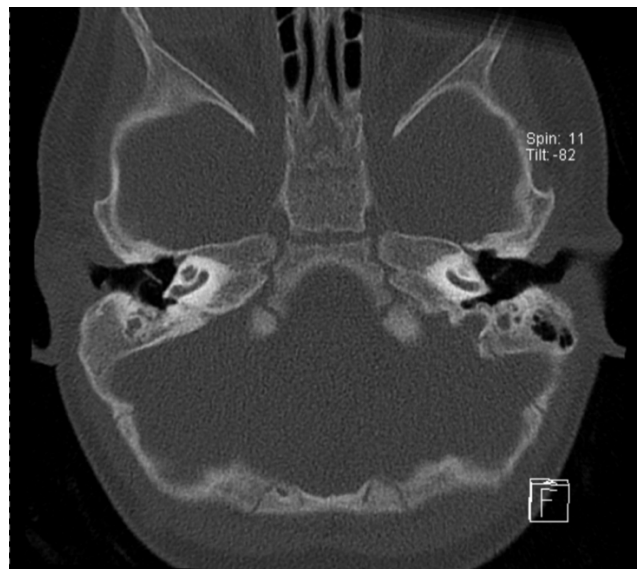
(6,6 %) aller Erwachsenen-MRT-Aufnahmen Auffälligkeiten im Bereich des Gehirns festgestellt wurden. Bei den Kindern mit vorhandener MRT-Aufnahme betraf dies insgesamt 26 (19,0 %) und somit mehr als doppelt so viele.

Zu der Bedeutung von präoperativen kraniellen MRT-Untersuchungen bei Kindern liegen multiple Studien vor. Xu et al. (2015) stellten in einer retrospektiven Untersuchung an 157 Kindern mit sensorineuralem Hörverlust intrazerebrale Auffälligkeiten in 23 (14,6 %) MRT-Aufnahmen fest.<sup>73</sup> Lapointe et al. (2006) konnten in einer retrospektiven Studie anhand der MRT-Untersuchungen von 40 Kindern mit sensorineuralem Hörverlust feststellen, dass in 8 (20 %) Fällen Auffälligkeiten im Bereich des ZNS vorhanden waren.<sup>74</sup> Moon et al. (2012) fanden in den präoperativen MRT-Untersuchungen von 177 Kindern in 27 (15,3 %) Fällen intrazerebrale Läsionen. Sie stellten außerdem fest, dass bei prälingual ertaubten Kindern mit bestimmten Läsionen ab einer bestimmten Größe nach der CI-Versorgung häufiger Schwierigkeiten mit den Wahrnehmungsprozessen der auditorischen Information im Gehirn auftreten können.<sup>75</sup>

Aus diesen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass anhand einer präoperativen MRT-Untersuchung, die neben dem Felsenbein das Gehirn einbezieht, vor allem bei Kindern eine Reihe intrazerebraler Läsionen diagnostiziert werden kann (vgl. Abbildung 18). Diese Läsionen können zum einen weitere Ursachen für einen nicht abgeklärten Hörverlust darstellen, zum anderen können sie im Rahmen eines Zufallsbefundes weiteren Behandlungsbedarf erfordern. Außerdem können die MRT-Untersuchungen des Gehirns laut Moon et al. (2012) bei frühzeitig ertaubten Kindern mit bestimmten intrazerebralen Auffälligkeiten dazu verhelfen, bereits vor der CI-Operation eine Prognose für die zukünftige Sprach- und Gehörentwicklung zu stellen.<sup>75</sup>



**Abbildung 18.** Sagittale T2-gewichtete Sequenz (MRT) eines 1-jährigen CI-Patienten mit beidseitiger hochgradiger sensorineuraler Schwerhörigkeit. Es zeigen sich multiple intrazerebrale Fehlbildungen (Corpus callosum Dysgenese, Gyrierungsstörung, Heterotopie, Kolpocephalie, große Arachnoidalzyste in der Pinealisregion) bei unauffälligem CT-Befund des Felsenbeins (vgl. Abbildung 19). Der Pfeil markiert den dysplastischen und teilweise fehlenden posterioren Anteil des Balkens.



**Abbildung 19.** Unauffällige Felsenbein-CT (axial) des Patienten aus Abbildung 18.

#### 4.1.2.3 Zusammenhang zwischen Meningitis und präoperativer Bildgebung

Besonders bei Kindern ist eine Meningitis häufig Ursache einer hochgradigen sensorineuralen Schwerhörigkeit. Nicht selten folgt eine postmeningitische Verknöcherung der Cochlea.<sup>64</sup> In der vorliegenden Arbeit wurde für einen weiteren Vergleich zwischen präoperativer CT- und MRT-Untersuchung analysiert, in wie vielen Fällen sowohl bei den Kindern als auch bei den Erwachsenen eine vorangegangene Meningitis bekannt war und wie häufig in diesen Fällen eine zu einer Verlegung, Verkalkung oder Verknöcherung der Cochlea (cochleäre Obstruktion) passende Auffälligkeit in der Bildgebung nachgewiesen wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass statistisch gesehen sowohl zwischen CT-Befunden und Anamnese als auch zwischen MRT-Befunden und Anamnese ein möglicher Zusammenhang festgestellt werden konnte. Somit lässt sich folgern, dass statistisch gesehen keines der beiden Verfahren besser oder schlechter ist, was die Diagnostik einer Obstruktion der Cochlea bei Z. n. Meningitis angeht. Des Weiteren lassen die p-Werte der statistischen Untersuchungen vermuten, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit eine cochleäre Obstruktion sowohl in der CT-Untersuchung als auch in der MRT-Untersuchung diagnostiziert bzw. ausgeschlossen werden kann.

#### 4.1.3 CI-Operation: intraoperative Auffälligkeiten und Zusammenhang mit präoperativer Bildgebung

Der letzte Teil dieser Arbeit bestand in der Analyse der 705 CI-Operationsberichte. Zunächst wurden aufgetretene relevante intraoperative Schwierigkeiten und deren Management untersucht. Anschließend wurden die präoperativen Bildgebungen mit den intraoperativen Geschehnissen verglichen, um so die Frage nach einem möglichen Zusammenhang zwischen einem bestimmten präoperativen Bildbefund und dem Auftreten einer bestimmten intraoperativen Auffälligkeit zu untersuchen. Abschließend wurde recherchiert, ob präoperative CT- und MRT-Bildbefunde vorhanden waren, die zu Änderungen der Operationsplanung führten.

Die am zahlreichsten protokollierte relevante intraoperative Auffälligkeit bestand in dem Vorliegen einer cochleären Obstruktion. Eine solche Obstruktion der Cochlea, die, wie bereits beschrieben, unter anderem bei schwer hörgeschädigten Kindern nach Meningitis beobachtet wird, kann zu einer erschwerten Elektrodeninsertion während der CI-

Operation führen.<sup>64</sup> Die Ergebnisse dieser Arbeit können dies bestätigen. 77 (10,9 %) Fälle erforderten aufgrund cochleärer Verlegungen, Verkalkungen oder Verknöcherungen spezielle Freilegungen im Bereich der basalen Schneckenwindung. In 2 (2,6 %) dieser 77 Fälle wurde das Implantat-System gewechselt und in 1 (1,3 %) Fall konnten die Elektroden nicht vollständig eingeführt werden. Um anschließend zu untersuchen, ob die präoperativen Bildbefunde bereits auf die intraoperativ festgestellten cochleären Obstruktionen hinwiesen, wurden alle 534 Fälle untersucht, von denen beide Bildgebungen vorlagen. Von diesen 534 Fällen zeigte sich in der Operation in 49 (9,2 %) Fällen eine Verkalkung oder Verknöcherung der Cochlea. Nur in 8 (16,3 %) dieser 49 Fälle zeigte die präoperative CT-Aufnahme bereits Hinweise auf diese cochleäre Obstruktion. In weiteren 7 (1,3 %) Fällen der untersuchten 534 Fälle zeigten die CT-Aufnahmen Hinweise auf eine cochleäre Obstruktion, in diesen Fällen traten in der Operation allerdings keine Schwierigkeiten auf. Somit zeigte sich nur in etwa der Hälfte der Fälle mit einem auffälligen CT-Bildbefund eine Schwierigkeit in der Operation. Die MRT-Aufnahmen zeigten in 13 (26,5 %) der 49 Fälle und damit in etwa 10 % häufiger als die CT-Aufnahmen Hinweise auf eine cochleäre Obstruktion, die auch intraoperativ zu erschwerten Bedingungen führte. In 18 (3,4 %) Fällen zeigten die MRT-Aufnahmen allerdings cochleäre Signalauffälligkeiten, die in der Operation zu keiner Schwierigkeit führten.

Unabhängig von den statistischen Ergebnissen zeigt sich, deskriptiv betrachtet, dass die MRT in einigen Fällen häufiger als die CT Hinweise auf eine cochleäre Obstruktion detektierte. Im Gegensatz zur CT zeigte die MRT jedoch auch in einigen Fällen häufiger falsch positive Ergebnisse. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass die MRT durch ihren Weichgewebkontrast auch Fibrosierungen, die eine cochleäre Obstruktion verursachen können, darstellen kann.

Insgesamt zeigen die statistischen Untersuchungen dieser Arbeit jedoch, dass im Falle einer cochleären Obstruktion sowohl zwischen dem CT-Bildbefund und der intraoperativen Situation als auch zwischen dem MRT-Bildbefund und der intraoperativen Situation signifikante Zusammenhänge bestehen. Ein Grund für dieses Ergebnis könnte sein, dass in 478 (89,5 %) Fällen die CT-Aufnahme und die Operation und in 467 (87,5 %) Fällen die MRT-Aufnahme und die intraoperative Situation bezüglich einer cochleären Obstruktion unauffällig waren.

Die Ergebnisse dieser Arbeit weisen Parallelen zu der bereits erwähnten Studie von Schwartz et al. (2014) auf. Auch sie stellten in ihren Untersuchungen an den 168 erwachsenen Patienten in 12 Fällen in der CI-Operation eine Ossifikation der basalen Schneckenwindung fest. Im Gegensatz zu dieser Arbeit konnten in allen 12 Fällen die Cochlea-Implantate jedoch komplett inseriert werden, während in der vorliegenden Arbeit in einem Fall aufgrund einer cochleären Obstruktion das CI nicht vollständig inseriert werden konnte.<sup>57</sup> Des Weiteren lagen auch bei Schwartz et al. (2014) Unterschiede zwischen intraoperativer Situation und präoperativem Bildbefund vor. Von den 12 intraoperativ identifizierten cochleären Ossifikationen existierten in nur 2 dieser Fälle dazu korrelierende Befunde in der präoperativen MRT-Aufnahme. In den übrigen 10 Fällen wurde weder in der CT-Aufnahme, noch in der MRT-Aufnahme ein Hinweis darauf festgestellt.<sup>57</sup> Weitere Studien beschäftigten sich mit dem Vergleich der Diagnostik einer cochleären Obstruktion zwischen einer CT-Untersuchung und einer MRT-Untersuchung und kamen zu unterschiedlichen Konklusionen. So eignet sich laut Isaacson et al. (2009) vor allem bei postmeningitisch ertaubten Patienten die MRT besonders gut zur Diagnostik einer cochleären Obstruktion.<sup>76</sup> Demgegenüber konnten Bettman et al. (2004) in ihrer Studie keine offensichtlichen Vorteile der MRT gegenüber der CT zur Beurteilung der cochleären Durchgängigkeit feststellen. Wie in dieser Arbeit folgerten sie, dass die Abklärung der cochleären Durchgängigkeit sowohl mittels CT als auch mittels MRT erfolgen kann.<sup>77</sup>

Multiple Innenohrfehlbildungen können mit einem Gusher-Phänomen während der operativen Eröffnung des Innenohrs einhergehen (vgl. Kapitel 3.5.1). Zu den mit einem Gusher assoziierten Innenohrmalformationen gehören laut Sennaroglu et al. (2017) die Otozysten-Deformität, bestimmte Formen der cochleären Hypoplasie, die IP 1, IP 2 und IP 3 (cochleäre Malformation bei X-linked Deafness) sowie der erweiterte Aquaeductus vestibuli.<sup>78</sup> Außerdem kann ein Gusher-Phänomen akut oder Monate später nach einem Trauma im Bereich des Schläfenbeins auftreten.<sup>79</sup> In der vorliegenden Arbeit kam es in insgesamt 19 (2,7 %) der 705 CI-Operationen zu einem Gusher-Phänomen. In all diesen Fällen konnte der Liquorausstritt durch eine spezielle Abdichtung gestoppt werden und keine weiteren intraoperativen Komplikationen fanden daraufhin statt. Anschließend wurde wie im Falle der cochleären Obstruktion nach Hinweisen auf einen intraoperativen Gusher in den präoperativen Bildgebungen gesucht. Wie die Auswertungen zeigen,

wurde von den 534 Fällen mit beiden Bildgebungen in 16 (3,0 %) Fällen ein Gusher während der CI-Operation festgestellt, wovon es sich in 11 (68,8 %) Fällen um Kinder-Operationen handelte. Sowohl in den CT- als auch in den MRT-Untersuchungen wurden in 10 (62,5 %) dieser 16 Fälle Innenohrfehlbildungen, die mit dem Gusher korrelieren können, diagnostiziert. In 2 (12,5 %) der 16 Fälle wurde anhand der CT-Aufnahme eine Fraktur erfasst, in den übrigen 4 (25,0 %) Fällen war die CT-Aufnahme unauffällig. Bei den MRT-Untersuchungen waren 6 (37,5 %) MRT-Aufnahmen trotz intraoperativem Gusher unauffällig. Anhand der statistischen Auswertungen konnte festgestellt werden, dass bezüglich eines intraoperativen Gushers sowohl zwischen der CT-Aufnahme und der intraoperativen Situation als auch zwischen der MRT-Aufnahme und der intraoperativen Situation ein signifikanter Zusammenhang besteht. Wie bei der cochleären Obstruktion wurde auch bezüglich des Gushers nach vergleichbaren Studien gesucht. Schwartz et al. (2014) erfassten in einem Fall einen intraoperativen Gusher, der ebenfalls operativ versorgt wurde, was eine vollständige CI-Insertion ermöglichte. Zu diesem Fall wurde in den präoperativen Bildgebungen keine darauf hinweisende Diagnose gestellt.<sup>57</sup> Auch Roberts et al. (2014) berichten in ihrer Studie von 3 (2,5 %) aus insgesamt 118 CI-Operationen, in denen es zu einem Gusher kam. Die CT-Untersuchungen dieser 3 Fälle waren wie bei Schwartz et al. (2014) unauffällig. Genauso wie in der vorliegenden Arbeit und wie bei Schwartz et al. (2014) konnten alle 3 Fälle intraoperativ versorgt werden und es folgten keine weiteren Komplikationen. Im Gegensatz zu dieser Arbeit wurden bei Roberts et al. (2014) allerdings nur Patienten über 21 Jahre in die Auswertungen einbezogen und nur präoperative CT-Aufnahmen, keine MRT-Aufnahmen, ausgewertet.<sup>58,57</sup>

Bei Wootten et al. (2006) lagen in 50 % der Patienten, in deren CI-Operation ein Gusher-Phänomen auftrat, unauffällige Befunde in den präoperativen Bildgebungen vor. Wie in dieser Arbeit wurden sowohl Kinder als auch Erwachsene in die Studie einbezogen. Obwohl in der Literatur häufiger von dem Auftreten eines intraoperativen Gushers bei Kindern berichtet wird, traten bei Wootten et al. (2006) 50 % der intraoperativen Gusher-Phänomene in den CI-Operationen der erwachsenen Patienten auf.<sup>79</sup> Im Gegensatz dazu waren in der vorliegenden Arbeit von den insgesamt 19 Operationen, in denen ein Gusher auftrat, zu mehr als zwei Drittel (68,4 %) Kinder betroffen. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass in der vorliegenden Arbeit die Mehrzahl der Innenohrfehlbildungen, die mit

einem Gusher-Phänomen einhergehen können, bei den Kindern diagnostiziert wurde. Andererseits traten sowohl in dieser Arbeit als auch in den Vergleichsstudien in vielen Fällen intraoperative Liquorausstritte auf, in denen vorher keine Hinweise auf Malformationen oder Frakturen im Bereich des Felsenbeins in den Schnittbildern detektiert wurden. Daneben ist auffällig, dass in dieser Arbeit in 38 (7,1 %) CT-Bildbefunden Hinweise auf die Gefahr eines möglichen intraoperativen Gushers vorlagen, in der entsprechenden CI-Operation jedoch kein Gusher auftrat. Bei den MRT-Bildgebungen wurde in 31 (5,8 %) Fällen eine Fehlbildung, die mit einem Gusher korrelieren kann diagnostiziert, die Operation dieser Fälle verlief allerdings unauffällig. Es wurde also sowohl mittels CT-Aufnahme als auch mittels MRT-Aufnahme deutlich häufiger eine mit einem möglichen Gusher korrelierende Auffälligkeit diagnostiziert, als diese dann tatsächlich zu Schwierigkeiten in der Operation führte. Anhand dieser Ergebnisse lässt sich trotz der wie oben beschrieben statistisch signifikanten Ergebnisse vermuten, dass die präoperative Diagnostik mittels CT und MRT nicht zuverlässig zur Vorhersage eines intraoperativen Gushers geeignet ist, jedoch Risikopatienten identifiziert werden können.

Durch die abschließende Untersuchung konnte festgestellt werden, dass in nur 2 (0,3 %) der 705 Fälle ausschließlich der präoperative MRT- bzw. CT-Bildbefund die Wahl der CI-Operationsseite und somit die Operationsplanung beeinflusst hatte. In einem der beiden Fälle handelte es sich dabei um ein bei einem erwachsenen Patienten durch die präoperative MRT-Untersuchung diagnostiziertes Akustikusneurinom, welches mit der CI-Operation auf gleicher Seite entfernt werden sollte. In dem zweiten Fall sollte bei einem Kind eine mit Hilfe der CT- und MRT-Untersuchung festgestellte einseitige unklare Auffälligkeit (Verschattung in der CT-Aufnahme und Sekretverhalt in der MRT-Aufnahme) im Zuge der Cochlea-Implantation auf dieser ipsilateralen Seite abgeklärt werden.

In den Untersuchungen von Schwartz et al. (2014) kam es in insgesamt 8 (4,8 %) aller 168 Fälle zu Änderungen der Operation durch die präoperativen radiologischen Befunde. Bei den auffälligen präoperativen Befunden handelte es sich in 2 Fällen um einen zufällig entdeckten Tumor (Vestibularisschwannom), der eine kontralaterale Implantation auslöste. In 4 Fällen führten präoperativ detektierte Fehlbildungen und Malformationen sowie ein Schwannom des N. facialis zur kontralateralen Implantations-Seite. In 1 Fall



erforderte eine Bogengangdehiszenz und in 1 weiteren Fall eine vorangegangene Mastoidektomie Änderungen des geplanten Operationsverlaufs.<sup>57</sup> Genauso wie in der vorliegenden Arbeit beeinflussten also Tumoren als Zufallsbefunde die Seitenwahl der CI-Operation. Jedoch führte in der vorliegenden Arbeit der Tumor zur Wahl der ipsilateralen Seite und bei Schwartz et al. (2014) wurde die kontralaterale Seite für das CI gewählt. Zwar führten in 34 (4,8 %) Operationen dieser Arbeit Fehlbildungen oder Malformationen zu erschwerten Verhältnissen, welche in 2 (5,9 %) Fällen dazu führten, dass die Implantat-Elektroden nicht komplett inseriert werden konnten. Im Gegensatz zur Arbeit von Schwartz et al. (2014) führten sie jedoch nie zu einem Wechsel der Implantations-Seite. Tamplen et al. (2016) identifizierten 21 aus insgesamt 137 CI-Fällen, in denen die Operation durch die präoperative Bildgebung beeinflusst wurde. Dabei handelte es sich in 8 (7,9 %) Fällen um Erwachsenen-Operationen und in 13 (65,0 %) Fällen um Kinder-Operationen. Bei den 8 Erwachsenen-Fällen führten in 3 Fällen intrakranielle Tumoren (Vestibularisschwannom bzw. Meningeom), in 3 Fällen eine cochleäre Obstruktion und in 2 Fällen ein erweiterter Aquaeductus vestibuli zur Wahl der kontralateralen Seite für das CI. Bei den 13 (65,0 %) Kinder-Fällen handelte es sich in 8 Fällen um eine Dysplasie der Cochlea, in 3 Fällen um einen erweiterten Aquaeductus vestibuli und in 2 Fällen um hypoplastische Hörnerven, die ebenfalls alle zu einem Wechsel der Implantations-Seite führten. Wie in der vorliegenden Arbeit beeinflussten auch hier die intrakraniellen Tumoren die Wahl der CI-Seite. Allerdings wurde in diesen Fällen, nicht wie in der vorliegenden Arbeit, die Seite mit Akustikusneurinom, sondern, wie bei Schwartz et al. (2014) die kontralaterale Seite als Implantations-Seite gewählt.<sup>56,57</sup> So zeigt sich also, dass sowohl bei Schwartz et al. (2014) als auch bei Tamplen et al. (2016), im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit, einseitige Fehlbildungen zur Wahl der jeweils kontralateralen Implantations-Seite geführt hatten.<sup>56,57</sup> Es ist jedoch nicht verwunderlich, dass in den beiden Fällen, in denen bei Tamplen et al. (2016) ein hypoplastischer Hörnerv vorlag, die kontralaterale Seite für das CI gewählt wurde, da eine Aplasie des N. cochlearis als Kontraindikation für ein CI gilt.<sup>56,80</sup> Roberts et al. (2014) registrierten in ihrer Studie insgesamt 1 (0,8 %) von 118 CI-Fällen, in denen ein mittels CT diagnostizierter beidseits erweiterter Aquaeductus vestibuli dazu führte, dass das geplante CI in die Seite mit der geringeren Ausprägung des erweiterten Aquaeductus vestibuli inseriert wurde.<sup>58</sup>

In der Summe kann also gefolgert werden, dass nur selten die Wahl der Implantations-Seite alleine durch die präoperativen CT- und MRT-Bildbefunde beeinflusst wurde. In der Studie von Roberts et al. (2014) und in der vorliegenden Arbeit kam es nur in weniger als 1 % aller untersuchten CI-Operationen zu einer Änderung der Implantations-Seite als Folge der Ergebnisse der präoperativen radiologischen Diagnostik. Bei Schwartz et al. (2014) und bei Tamplen et al. (2016) wurde etwas häufiger die Wahl der Implantations-Seite durch die Bildgebung beeinflusst. Auffallend ist jedoch, dass in allen beschriebenen Studien aufgrund einer radiologischen Auffälligkeit die jeweils kontralaterale Kopfseite für die Cochlea-Implantation gewählt wurde.<sup>56,57,58</sup> In der vorliegenden Arbeit wurde allerdings gerade aufgrund der Auffälligkeit in den beiden oben genannten Fällen (Akustikusneurinom bzw. unklare Verschattung im Mastoid) die ipsilaterale Seite zur Implantation gewählt. Daraus lässt sich vermuten, dass viele verschiedene Faktoren die Wahl der CI-Operationsseite beeinflussen und das Ergebnis der präoperativen radiologischen Diagnostik wohl meist nicht das alleinige Kriterium ist.

## 4.2 Material- und Methodenkritik

### 4.2.1 Studiendesign und Patientenkollektiv

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine retrospektive Untersuchung. Somit waren bestimmte Ergebnisse von den Angaben der Patienten oder der Dokumentation durch die behandelnden Ärzte abhängig. Die Vorerkrankungen der Patienten, welche Hinweise auf mögliche Ursachen für den Hörverlust lieferten, und die Art der Hörstörung wurden anhand der Anamnesen und Audiogramme aus den Krankenakten der Patienten erfasst. Da insbesondere die Dokumentation von Vorerkrankungen von den Angaben der Patienten abhängt, ist nicht auszuschließen, dass nicht alle in Frage kommenden Ursachen für die Hörminderung des Patientenkollektivs erfasst wurden. Außerdem wurden zur Beurteilung der CI-Operationen die 705 Operationsberichte zwar sorgfältig und jeweils mindestens zweimal nach intraoperativen Auffälligkeiten und Schwierigkeiten durchsucht, dennoch kann nicht garantiert werden, dass alle intraoperativen Geschehnisse exakt wiedergegeben wurden, da ein Operationsbericht in gewissem Umfang immer von der Betrachtung und Wahrnehmung des Operateurs abhängt. Das Patientenkollektiv dieser Arbeit bestand aus 549 Patienten, die insgesamt 705 CI-Operationsfälle ergaben. Voroperierte Patienten wurden bewusst ausgeschlossen, da sichergestellt werden sollte,

dass die vorhandenen CT- und MRT-Bildgebungen der Patienten nur im Rahmen der präoperativen Diagnostik für die anstehende CI-Operation angefertigt wurden. Nicht von allen Patienten war sowohl eine präoperative CT- als auch eine vollständige präoperative MRT-Untersuchung vorhanden. Für die Auswertungen, in denen ein Vergleich zwischen der Diagnostik mittels CT und der Diagnostik mittels MRT wichtig war, wurden nur die Patienten bzw. Fälle einbezogen, von denen beide Bildgebungen vollständig vorhanden waren. Dies betraf 404 Patienten bzw. 534 Fälle. Wären für diese statistischen Auswertungen alle 705 Fälle einbezogen worden, wäre die Aussagekraft der erhobenen Daten gemindert worden.

Im Vergleich zu den beschriebenen Studien konnte für die vorliegende Arbeit jedoch ein deutlich größeres Patientenkollektiv gewonnen werden, was den dargestellten Ergebnissen eine hohe Aussagekraft verleiht.

#### 4.2.2 Auswertung der Schnittbilder und Tonaudiogramme

Die präoperativen CT- und MRT-Aufnahmen aller 705 Fälle wurden, wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, von einem erfahrenen Neuroradiologen untersucht und beurteilt. Da der Untersucher stets nach den gleichen Kriterien vorging, konnte einerseits eine gewisse Konstanz der Untersuchungsergebnisse eingehalten werden, andererseits könnte dies auch dazu geführt haben, dass, besonders in Grenzfällen, Diagnosen gestellt wurden, die ein anderer Untersucher möglicherweise nicht oder anders gestellt hätte. Hätten mehrere Untersucher die Bildgebungen analysiert, wären die Ergebnisse sicherer, besonders was die Beurteilung von nicht eindeutigen Fällen, schwierig auszuwertenden Aufnahmen oder Grenzfällen angeht. Aus diesem Grund können gewisse „Fehldiagnosen“ oder Unvollständigkeiten nicht ausgeschlossen werden, die letztendlich auch die Ergebnisse in unterschiedlichem Umfang beeinflusst haben können. Auch die Auswertung der Tonaudiogramme wurde nur von einer Person durchgeführt. Somit besteht auch hier wie bei der Auswertung der Schnittbilder zwar eine gewisse Konstanz, aber gleichzeitig auch eine mögliche Fehlerquelle. Demnach wäre ein sinnvoller Ansatzpunkt für weitere Arbeiten, die Auswertungen der Schnittbilder und Tonaudiogramme von mehreren Untersuchern, die unabhängig voneinander und stets nach einem gleichen vorgegebenen Schema vorgehen, durchführen zu lassen.

### 4.2.3 Statistik

Die statistischen Überprüfungen mittels exaktem Test nach Fisher ergaben bei einem Großteil der durchgeführten Untersuchungen sehr niedrige p-Werte, die unter dem festgelegten Signifikanzniveau von 0,05 lagen und damit nicht nur auf statistisch signifikante, sondern zum Teil auch auf hochsignifikante Ergebnisse hinwiesen. In einigen Fällen war bei Betrachtung der absoluten Häufigkeiten das Ergebnis des p-Wertes, wenn er auf ein statistisch signifikantes Ergebnis hinwies, zunächst überraschend. Dies soll anhand eines Beispiels, nämlich dem Vergleich der Diagnostik eines LVAS zwischen einer CT- und MRT-Untersuchung, verdeutlicht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass von 534 operierten Fällen, in denen beide Bildgebungen vorhanden waren, in 20 (3,7 %) Fällen sowohl in der CT-Aufnahme als auch in der MRT-Aufnahme ein LVAS diagnostiziert wurde. In 6 (1,1 %) Fällen wurde ein LVAS nur in der CT-Aufnahme detektiert und die MRT-Untersuchung fiel in diesen 6 (1,1 %) Fällen bezüglich des LVAS unauffällig aus. Hier war zunächst unklar, warum der errechnete p-Wert die Hypothese der Unabhängigkeit zwischen der Diagnostik eines LVAS mittels CT und der Diagnostik eines LVAS mittels MRT ablehnt, obwohl in 6 Fällen die Befunde in der CT-Aufnahme und in der MRT-Aufnahme nicht zusammenpassten. Um das Ergebnis des p-Wertes besser nachvollziehen zu können, müssen die Ergebnisse auch bezüglich der unauffälligen Befunde betrachtet werden. Dabei zeigt sich, dass in 508 (95,1 %) der 534 Fälle weder in der CT-Aufnahme noch in der MRT-Aufnahme ein LVAS festgestellt wurde. Somit stimmen insgesamt also in 528 (98,9 %) Fällen die Befunde, die durch die CT-Aufnahme und durch die MRT-Aufnahme festgestellt wurden, überein. In nur 6 (1,1 %) Fällen unterscheiden sich die Befunde in der CT- und der MRT-Aufnahme. Diese häufig übereinstimmenden unauffälligen Befunde können eine Erklärung für die sehr niedrigen p-Werte, die auf signifikante Abhängigkeiten hinweisen, sein. Dennoch ist zu beachten, dass in dem beschriebenen Beispiel in 6 (1,1 %) Fällen anhand der CT-Untersuchung ein LVAS festgestellt wurde und anhand der MRT-Untersuchung nicht. Auch wenn zwar ein solcher Diagnostikvergleich zwischen CT- und MRT-Aufnahme ein statistisch signifikantes Ergebnis liefert, können bei Betrachtung der Zahlen geringfügige Unterschiede bestehen und es ist zu überdenken, wie weit diese statistischen Ergebnisse tatsächlich in die Praxis übertragen werden können.

### 4.3 Schlussfolgerung und Ausblick

Die dokumentierten Ergebnisse zeigen, dass schnittbildgebende Verfahren zur Ursachenfindung einer häufig nicht abgeklärten sensorineuralen Schwerhörigkeit beitragen. Eine Reihe verschiedener Läsionen im Bereich des Felsenbeins, die hochgradige Schwerhörigkeiten oder Ertaubungen verursachen, können mittels moderner CT- und MRT-Techniken detektiert werden. In der vorliegenden Arbeit konnte festgestellt werden, dass bestimmte Fehlbildungen im Innenohr sowie bestimmte Veränderungen im Bereich des Felsenbeins bei Patienten mit sensorineuralem Hörverlust statistisch gesehen gleichmäßig gut sowohl mit Hilfe einer CT-Untersuchung als auch mit Hilfe einer MRT-Untersuchung diagnostiziert werden können (vgl. Abschnitt 4.1.2.1).

Für bestimmte Diagnosen zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass dies nicht zutrifft. So kann angenommen werden, dass zur Diagnostik bestimmter Formen von Cholesteatomen, einer Bogengangaplasie sowie einer Fraktur im Bereich des Schläfen- bzw. Felsenbeins die CT besser geeignet ist als die MRT. Im Gegensatz dazu kann aus den Ergebnissen dieser Arbeit gefolgert werden, dass durch die MRT besonders bei Kindern zusätzliche wichtige Befunde im Bereich des Gehirns detektiert werden können. Diese Befunde können zum einen weitere Hinweise zur Ursache einer Hörminderung liefern, zum anderen in Form eines Zufallsbefundes einer bisher nicht bekannten Erkrankung weiteren Behandlungsbedarf erfordern.

Nicht selten treten Schwierigkeiten während einer CI-Operation auf, die meist durch präoperativ oder intraoperativ festgestellte atypische Befunde verursacht werden. Insbesondere eine intraoperativ auftretende Obstruktion der Cochlea und ein Gusher erfordern besondere Maßnahmen, die den Ablauf der CI-Operation beeinflussen können. Zur Diagnostik bestimmter Auffälligkeiten, die eine solche intraoperativ auftretende Schwierigkeit verursachen können, sind die präoperativen CT- und MRT-Untersuchungen gleichermaßen gut geeignet. Allerdings zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit auch, dass besonders ein intraoperativer Gusher spontan und auch bei unauffälliger präoperativer Bildgebung auftreten kann.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte außerdem festgestellt werden, dass bei einseitig operierten, aber beidseits schwerhörig oder ertaubten Patienten die Wahl der Implantations-Seite zwar durch den präoperativen Bildbefund beeinflusst werden kann, meist dafür jedoch multiple Faktoren verantwortlich sind.

Das Hauptziel dieser Arbeit bestand darin, zu untersuchen, ob es möglich ist, eine Empfehlung für die zukünftige Wahl der radiologischen Diagnostikmethoden vor einer CI-Operation abzugeben.

Auf Grundlage der Ergebnisse konnte festgestellt werden, dass die CT bestimmte Auffälligkeiten detektieren kann, die durch die MRT alleine nicht diagnostiziert werden können. Umgekehrt kann aber auch die MRT Auffälligkeiten darstellen, die durch die CT nicht oder ungenügend darstellbar sind. Die entscheidenden Auffälligkeiten, die in dieser Arbeit nur durch die CT darstellbar waren, bestanden in knöchernen Läsionen in Form von Frakturen im Bereich des Schläfen- und Felsenbeins. Daneben wurden auch bestimmte Formen von Cholesteatomen und eine Bogengangaplasie nur anhand von CT-Untersuchungen festgestellt. Im Gegensatz dazu konnten mit Hilfe der MRT durch ihren hohen Weichteilkontrast und die zusätzliche Darstellung des Gehirns eine Reihe von Läsionen, die nicht nur im Bereich des Felsenbeins, sondern auch im Bereich des Gehirns lokalisiert sind, diagnostiziert werden. Studien zeigen, dass die Kenntnis von Erkrankungen im Bereich des ZNS, die mit Hilfe der MRT detektiert werden können, für die Prognose nach einer CI-Operation entscheidend sein kann.<sup>75</sup>

Deshalb stellt die Kombination von CT- und MRT-Untersuchung zur präoperativen Diagnostik vor Cochlea-Implantation auch in Zukunft weiterhin die umfangreichste radiologische Diagnostikmethode dar. Im Gegensatz zur alleinigen Anwendung eines der beiden bildgebenden Verfahren reduziert die kombinierte Anwendung beider Untersuchungsverfahren die Wahrscheinlichkeit, bestimmte diagnostizierbare Pathologien nicht zu erkennen. Außerdem erhöht die Anwendung beider Verfahren die Chance, alle radiologisch detektierbaren ätiologischen Hinweise einer unklaren Hörminderung aufzufinden. Nicht nur der Operateur kann mit den Informationen aus beiden Untersuchungen bestmöglich auf die bevorstehende Implantation vorbereitet werden, sondern auch die Prognosestellung für die spätere Gehör- und Sprachentwicklung eines Patienten wird damit erleichtert.

Um dennoch eine Tendenz abgeben zu können, ob und wenn ja welches der beiden bildgebenden Verfahren zur präoperativen Diagnostik mehr Informationen liefert, sollte das Augenmerk nochmal auf einige Ergebnisse dieser Arbeit gelegt werden. Die Auswertungen ergaben, dass von den insgesamt vorhandenen 522 CT-Aufnahmen in 11 (2,1 %) CT-Aufnahmen eine Fraktur diagnostiziert wurde. In 4 (0,8 %) Aufnahmen

wurde ein Cholesteatom festgestellt, welches in 2 (0,4 %) Aufnahmen auf der kontralateralen Seite, also auf der Seite die nicht mit einem CI versorgt wurde, lag. In 1 (0,2 %) weiteren Aufnahme wurde eine Bogengangaplasie, die beidseits vorlag, diagnostiziert. Somit lagen also in insgesamt 16 (3,1 %) Aufnahmen relevante Befunde durch die CT-Untersuchung vor, die vermutlich nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit oder gar nicht durch die MRT diagnostiziert worden wären. Diesen Ergebnissen gegenüber steht die Anzahl der zusätzlichen Befunde, die mittels MRT-Untersuchung festgestellt wurden. Von den 441 vorhandenen präoperativen MRT-Aufnahmen des Schädels wurden in insgesamt 46 (10,4 %) Aufnahmen intrazerebrale Läsionen festgestellt, die weiteren Behandlungsbedarf erforderten oder sogar ursächlich für die Hörminderung der Patienten waren.

Die MRT-Untersuchungen lieferten daher in dieser Arbeit etwa dreimal so viele Befunde, die von Relevanz waren, wie die CT-Untersuchungen.

Zudem sollte abschließend der Aspekt der Strahlenbelastung als ein entscheidender Nachteil der CT gegenüber der MRT beachtet werden. Die Augenlinse ist ein besonders strahlensensibles Organ (vgl. Kapitel 1.5.1.2). Da diese bei einer Felsenbein-CT-Untersuchung im Bereich des Nutzstrahls liegen kann, ist sie besonders zu berücksichtigen. Neriishi et al. (2012) bestätigten in einer Studie die geschätzte Schwellendosis der ICRP (vgl. Kapitel 1.5.1.2), die zur Auslösung einer radiogenen Linsentrübung notwendig ist. Auf Grundlage ihrer Ergebnisse empfehlen sie, dass die einmalige kurzzeitige Dosis einer ionisierenden Strahlung zum Schutz der Augenlinse bei maximal 0,50 Gy liegen sollte. Außerdem kann anhand ihrer Ergebnisse angenommen werden, dass Kinder besonders sensibel gegenüber einer Kataraktentstehung reagieren.<sup>44,81</sup> Darüber hinaus beobachteten Ross et al. (1983) in einer in vitro Studie an Ratten beginnende Degenerationen der Augenlinse bereits bei Strahlendosen von 0,10 Gy.<sup>82</sup> Zur Beurteilung der Strahlenbelastung bei verschiedenen Schläfenbein-Bildgebungsmodalitäten führten Conte et al. (2017) in einer Studie Untersuchungen durch. Dabei konnten sie anhand eines speziellen Thermolumineszenz-Dosimeters nach einer Schläfenbein-Aufnahme durch einen 64-zeiligen Multislice-CT-Scanner eine mittlere Strahlendosis von 53,8 mSv im Bereich der Augenlinse messen.<sup>83</sup> Unter der Annahme einer beginnenden Degeneration der Augenlinse bei 0,10 Gy, könnten nach den

Messungen von Conte et al. (2017) also bereits zwei CT-Untersuchungen des Schläfenbeins ausreichen, um detektierbare Linsentrübungen auszulösen.

Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Strahlendosis je nach Geräte- und Aufnahmetyp bei einer Felsenbein-CT-Untersuchung variieren kann. Es existieren beispielsweise Computertomographen, bei denen die Augenlinse für eine Reduktion der Strahlenbelastung durch spezielle Techniken aus dem Nutzstrahl genommen werden kann. Aus der Studie von Conte et al. (2017) konnte nicht erfasst werden, ob sich die Augenlinse während der Untersuchungen durch den beschriebenen Multislice-CT-Scanner im Bereich des Nutzstrahls befand oder nicht. Somit ist die gemessene mittlere Strahlendosis im Bereich der Augenlinse nur auf Untersuchungen durch CT-Scanner mit vergleichbarer Funktionsweise übertragbar.

Dennoch lassen diese Ergebnisse und die Tatsache einer unvermeidbaren Strahlenbelastung durch eine CT-Untersuchung die Überlegung zu, in Zukunft routinemäßig nur noch eine MRT-Untersuchung zur präoperativen radiologischen Diagnostik vor einer Cochlea-Implantation durchzuführen und eine CT-Untersuchung nur unter bestimmten Voraussetzungen ergänzend hinzuzufügen. Zu diesen Voraussetzungen sollte z. B. die Abklärung eines ehemaligen Schädel-Hirn-Traumas gehören, um eine mögliche Fraktur auszuschließen.

Mit dem Verzicht auf eine routinemäßige CT-Untersuchung stünden sich also das Risiko einer eventuell nicht detektierten Auffälligkeit und die Reduktion einer nicht unerheblichen Strahlenexposition, deren Langzeitfolgen grundsätzlich unklar sind, gegenüber.

Welche ausschlaggebenden Kriterien seitens des Patienten gegeben sein müssten, die es nicht erlauben, auf die CT-Untersuchung verzichten zu können, wäre ein sinnvoller Ansatzpunkt für weitere Studien. Ferner lassen die Ergebnisse die Schlussfolgerung zu, dass unabhängig von den Befunden der bildgebenden Verfahren jeder Operateur zu jeder Zeit auf eine intraoperativ auftretende Schwierigkeit vorbereitet sein muss.

Um die Ergebnisse dieser Arbeit zu bekräftigen, wären prospektive Studien wünschenswert, die noch exakter untersuchen können, inwiefern die Planung einer CI-Operation durch die präoperative Bildgebung beeinflusst wird. Des Weiteren wäre anzustreben, die Langzeitergebnisse nach erfolgreicher CI-Operation hinsichtlich der



Sprach- und Persönlichkeitsentwicklung, insbesondere bei betroffenen Kindern, zu untersuchen.

## 5. Zusammenfassung

Bei Patienten mit hochgradigem sensorineuralem Hörverlust, der nicht mehr ausreichend mittels Hörgeräten kompensiert werden kann, hat sich die CI-Versorgung zur Verbesserung der Hörfähigkeit als Standardmethode etabliert und ihr Indikationsbereich wächst. Zur Beurteilung des auditorischen Systems sowie seiner angrenzenden Nachbarstrukturen zählt die neuroradiologische Diagnostik mittels spezieller CT- und MRT-Techniken zu den entscheidenden Kriterien zur CI-Indikationsstellung und der Operationsplanung. In der Literatur finden sich verschiedenste Meinungen zur Bedeutung dieser präoperativen Bildgebungen vor Cochlea-Implantationen und die Wahl einer CT- und bzw. oder einer MRT-Untersuchung zur präoperativen Diagnostik wird diskutiert. So wurden am Universitätsklinikum Würzburg im Zeitraum von 2005 bis zum Jahr 2015 zur Diagnostik vor der CI-Operation eines Patienten meist sowohl eine CT-Aufnahme des Felsenbeins als auch eine MRT-Aufnahme des Schädels angefertigt. Im Rahmen dieser Arbeit sollte untersucht werden, inwieweit diese beiden präoperativen CT- und MRT-Untersuchungen für die CI-Operation und die Ursachenabklärung der Hörminderung von Relevanz waren und ob eine Empfehlung für die zukünftige Wahl der Diagnostikmethoden abgegeben werden kann. Dazu wurden Anamnesen, Voruntersuchungen, präoperative CT- und MRT-Bildgebungen und die Operationsberichte von 705 CI-Fällen bei 549 Patienten, die in diesem Zeitraum operiert wurden, retrospektiv ausgewertet. Die Darstellbarkeiten verschiedener Pathologien, die mit Hilfe der beiden Bildgebungsverfahren detektiert wurden, wurden miteinander verglichen und es wurde überprüft, ob ein Verfahren möglicherweise besser zur Diagnostik bestimmter Auffälligkeiten geeignet war als das andere. Durch die Auswertung der Operationsberichte wurde evaluiert, ob und wie die Befunde der präoperativen Bildgebungen mit den intraoperativen Situationen übereinstimmten und ob diese Befunde die Operationsplanung beeinflusst hatten.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigten, dass die bildgebenden Verfahren zur Ursachenfindung einer nicht abgeklärten Hörminderung beitragen können. Des Weiteren konnte gefolgert werden, dass ein Großteil von Auffälligkeiten im Bereich des Felsenbeins, die mit sensorineuralen Schwerhörigkeiten assoziiert sind, mit hoher Wahrscheinlichkeit sowohl mittels CT- als auch mittels MRT-Untersuchung diagnostiziert werden kann. Für einzelne Läsionen konnte vermutet werden, dass diese

nur durch die CT und umgekehrt bestimmte Läsionen nur durch die MRT detektiert werden können. Außerdem zeigte sich, dass die beiden bildgebenden Verfahren auf bestimmte Schwierigkeiten, die während einer CI-Operation auftreten können, präoperativ hinweisen können. Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass die Wahl der Implantations-Seite bei einseitig operierten aber beidseits schwerhörigen Patienten neben den CT- und MRT-Untersuchungen in den meisten Fällen von weiteren Faktoren abhing. Aus den Ergebnissen dieser Arbeit konnte gefolgert werden, dass die Durchführung einer präoperativen CT- und einer MRT-Untersuchung die umfangreichste radiologische Diagnostikmethode ist, um eine CI-Operation zu planen, möglichst alle Auffälligkeiten, die zu Schwierigkeiten in der Operation führen können, zu detektieren und Ursachen für eine nicht abgeklärte Hörminderung zu finden. Dennoch sollte, insbesondere unter Berücksichtigung der Strahlenbelastung, die ein Patient im Rahmen eines Felsenbein-CTs erfährt, die Überlegung zugelassen werden, ob zukünftig nur die Durchführung einer MRT-Untersuchung als routinemäßiges Diagnostikverfahren ausreichen könnte. Eine zusätzliche CT-Untersuchung wäre dann nur unter bestimmten Voraussetzungen (z. B. Traumaanamnese des Schädels oder Hinweise auf ein Cholesteatom) indiziert. Weitere Untersuchungen, die zeigen, welche genauen Kriterien dazu seitens des Patienten gegeben sein müssten, sowie Langzeitergebnisse nach erfolgreichen CI-Operationen sollten Gegenstand weiterer Studien sein.

## 6. Literaturverzeichnis

1. Probst R. Anatomie und Physiologie des Ohres. In: Probst R, Grevers G, Iro H, eds. *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 3rd ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2008:144-153.
2. Streppel M, Walger M, von Wedel H, Gaber E. Hörstörungen und Tinnitus. *Gesundheitsberichterstattung des Bundes*. 2006;(29):1-39. doi:10.25646/3106
3. Probst R. Audiologie (Gehörprüfungen). In: Probst R, Grevers G, Iro H, eds. *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 3rd ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2008:154-180.
4. World Health Organization. Deafness and hearing loss. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>. Published 2018. Accessed January 5, 2019.
5. von Gablenz P, Holube I. Prävalenz von Schwerhörigkeit im Nordwesten Deutschlands. *HNO*. 2015;63(3):195-214. doi:10.1007/s00106-014-2949-7
6. Lenarz T, Boenninghaus H-G. Untersuchungsmethoden. In: Lenarz T, Boenninghaus H-G, eds. *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 14th ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2012:31-65. doi:10.1007/978-3-642-21131-7
7. Kaschke O. Ohr, Erkrankungen des äußeren Ohres. In: Berbohm H, Kaschke O, Nawka T, eds. *Kurzlehrbuch Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 1st ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2009:33-39.
8. Kaschke O. Ohr, Erkrankungen des Mittelohres. In: Behrbohm H, Kaschke O, Nawka T, eds. *Kurzlehrbuch Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 1st ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2009:40-56.
9. Probst R. Äußeres Ohr. In: Probst R, Grevers G, Iro H, eds. *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 3rd ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2008:190-207.
10. Probst R. Mittelohr. In: Probst R, Grevers G, Iro H, eds. *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 3rd ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2008:208-232.
11. Lenarz T, Boenninghaus H-G. Klinik des äußeren Ohres. In: Lenarz T, Boenninghaus H-G, eds. *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 14th ed. Berlin

- Heidelberg: Springer-Verlag; 2012:67-75. doi:10.1007/978-3-642-21131-7
12. Lenarz T, Boenninghaus H-G. Klinik des Mittelohres. In: Lenarz T, Boenninghaus H-G, eds. *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 14th ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2012:77-110. doi:10.1007/978-3-642-21131-7
  13. Mattheis S, Siegert R, Klingmann C, Plinkert PK, Maune S, Reiß M, Reiß G, Dost P. Erkrankungen des äußeren Ohres und des äußeren Gehörgangs. In: Reiß M, ed. *Facharztwissen HNO-Heilkunde*. 1st ed. Heidelberg: Springer Medizin Verlag; 2009:193-218.
  14. Mattheis S, Siegert R, Klingmann C, Plinkert PK, di Martino E, Leuwer R, Reiß M, Schwager K, Keck T, Issing PR. Erkrankungen des Mittelohrs. In: Reiß M, ed. *Facharztwissen HNO-Heilkunde*. 1st ed. Heidelberg: Springer Medizin Verlag; 2009:218-249.
  15. Probst R. Innenohr und retrokochleäre Störungen. In: Probst R, Grevers G, Iro H, eds. *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 3rd ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2008:233-246.
  16. Lenarz T, Boenninghaus H-G. Klinik des Innenohres. In: Lenarz T, Boenninghaus H-G, eds. *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 14th ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2012:111-135. doi:10.1007/978-3-642-21131-7
  17. Mattheis S, Siegert R, Klingmann C, Plinkert PK, Schwager K, Plontke S, Reiß M, Reiß G, Kummer P, Schick B, Iro H, Waldfahrer F. Erkrankungen des Innenohrs und des Labyrinths einschließlich Laterobasis. In: Reiß M, ed. *Facharztwissen HNO-Heilkunde*. 1st ed. Heidelberg: Springer Medizin Verlag; 2009:250-297.
  18. Probst R. Kindliche Hörstörungen/Pädaudiologie. In: Probst R, Grevers G, Iro H, eds. *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 3rd ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2008:181-189.
  19. Hauser K. Funktion biologischer Membranen. In: Rassow J, Hauser K, Netzker R, Deutzmann R, eds. *Duale Reihe – Biochemie*. 3rd ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2012:346-357.
  20. Biller A, Bartsch A, Knaus C, Müller J, Solymosi L, Bendszus M. Neuroradiologische Diagnostik bei Patienten mit sensorineuralem Hörverlust vor

- Cochlea-Implantation. *RöFo*. 2007;179(9):901-913. doi:10.1055/s-2007-963124
21. Giesemann A, Götz F, Lanfermann H. Fehlbildungen des Innenohrs – Diagnostik und Einteilung in CT und MRT. *Radiol up2date*. 2013;13(03):201-218. doi:10.1055/s-0033-1344189
  22. Sennaroglu L, Saatci I. A New Classification for Cochleovestibular Malformations. *Laryngoscope*. 2002;112(12):2230-2241. doi:10.1097/00005537-200212000-00019
  23. Gemeinsamer Bundesausschuss. Bekanntmachung eines Beschlusses des Gemeinsamen Bundesausschusses über eine Änderung der Kinder-Richtlinien: Einführung eines Neugeborenen-Hörscreenings. Richtlinien über die Früherkennung von Krankheiten bei Kindern bis zur Vollendung des 6. Lebensjahres. [https://www.g-ba.de/downloads/39-261-681/2008-06-19-Kinder-Hörscreening\\_BAnz.pdf](https://www.g-ba.de/downloads/39-261-681/2008-06-19-Kinder-Hörscreening_BAnz.pdf). Published 2008. Accessed October 28, 2018.
  24. Kaschke O. Ohr, Diagnostik. In: Berbohm H, Kaschke O, Nawka T, eds. *Kurzlehrbuch Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. 1st ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2009:15-32.
  25. Lenhardt E. Akustische und audiometrische Grundbegriffe. In: Lenhardt E, Laszig R, eds. *Praxis der Audiometrie*. 9th ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2009:1-8.
  26. Lenhardt E. Hörschwellenmessung und -wertung. In: Lenhardt E, Laszig R, eds. *Praxis der Audiometrie*. 9th ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2009:9-13.
  27. Shehata-Dieler W, Großmann W. Präoperative audiologische Evaluation und postoperative Verlaufsdagnostik bei Cochleaimplantatversorgung. *HNO*. 2017;65(4):298-307. doi:10.1007/s00106-016-0214-y
  28. Mattheis S, Siegert R, Reiß M, Iro H, Waldfahrer F. Spezielle HNO-Chirurgie, Ohr. In: Reiß M, ed. *Facharztwissen HNO-Heilkunde*. 1st ed. Heidelberg: Springer Medizin Verlag; 2009:875-910.
  29. Leuwer R, Klein M. Apparative und epithetische Therapieformen. In: Reiß M, ed. *Facharztwissen HNO-Heilkunde*. 1st ed. Heidelberg: Springer Medizin Verlag; 2009:837-844.

30. Ear Cross Section – MAESTRO Cochlear Implant System, Firma MED-EL. <https://www.medel.com/img/b3d171ef6ad33cd755986f515d5a1f2d.jpg>. Accessed February 17, 2019.
31. Oldendorf WH. Isolated Flying Spot Detection of Radiodensity Discontinuities—Displaying the Internal Structural Pattern of a Complex Object. *Ire Trans Biomed Electron.* 1961;8(1):68-72. doi:10.1109/TBMEL.1961.4322854
32. Broad WJ. Riddle of the Nobel Debate. *Science.* 1980;207(4426):37-38. doi:10.1126/science.6985744
33. Mazziotta JC, Collins RC. William H. Oldendorf, M. D. (1925-1992). *J Comput Assist Tomogr.* 1993;17(2):169-171.
34. Dössel O. Computertomographie. In: Dössel O, ed. *Bildgebende Verfahren in der Medizin.* 2nd ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2016:131-178. doi:10.1007/978-3-642-54407-1
35. Buzug TM. Historie der Computertomographie. In: Buzug TM, ed. *Einführung in die Computertomographie.* 1st ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2004:41-61.
36. Radeleff B, Kauffmann G. Gerätekunde. In: Kauffmann G, Sauer R, Weber W, eds. *Radiologie.* 4th ed. München: Urban&Fischer Verlag der Elsevier GmbH; 2011:57-97.
37. Hünnerbein R. Computertomografie (CT). In: Reiser M, Kuhn F-P, Debus J, eds. *Duale Reihe – Radiologie.* 4th ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2017:85-91. doi:10.1055/b-004-132212
38. Lutz J, Jäger L, Reiser M. Computertomographie, Magnetresonanztomographie und Angiographie. In: Schwenzler N, Ehrenfeld M, eds. *Chirurgische Grundlagen (Zahn-Mund-Kiefer-Heilkunde).* 4th ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2008:113-131.
39. Der Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2013/59/EURATOM des Rates vom 5. Dezember 2013. Amtsblatt der Europäischen Union. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2014:013:0001:0073:DE:PDF>. Published 2013. Accessed February 17, 2019.

40. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV). StrlSchV. [https://www.gesetze-im-internet.de/strlschv\\_2018/StrlSchV.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/strlschv_2018/StrlSchV.pdf). Published 2018. Accessed February 17, 2019.
41. Rücker M, Spitzer WJ. Zahnärztliche Röntgenologie. In: Schwenzer N, Ehrenfeld M, eds. *Chirurgische Grundlagen (Zahn-Mund-Kiefer-Heilkunde)*. 4th ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2008:70-112.
42. Europäische Kommission. Leitlinien für die Überweisung zur Durchführung von bildgebenden Verfahren. Strahlenschutz 118. <https://www.ap.t.drg.de/media/document/1601/Ueberweisungskriterien-EU.pdf>. Published 2000. Accessed February 17, 2019.
43. Lutz J, Jäger V, Hempel MJ, Srivastav S, Reiser M, Jäger L. Delineation of temporal bone anatomy: feasibility of low-dose 64-row CT in regard to image quality. *Eur Radiol*. 2007;17(10):2638-2645. doi:10.1007/s00330-007-0578-1
44. ICRP. ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. ICRP Publication 118. *Ann ICRP*. 2012;41(1/2):1-322. doi:10.1016/j.icrp.2012.02.001
45. Damadian R. Tumor Detection by Nuclear Magnetic Resonance. *Science*. 1971;171(3976):1151-1153. doi:10.1126/science.171.3976.1151
46. Lauterbur PC. Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance. *Nature*. 1973;242:190-191. doi:10.1038/242190a0
47. Chang K, Paul C, Lauterbur, 77, Dies; Won Nobel Prize for M.R.I. *Magn Reson Med*. 2007;58(3):439-440. doi:10.1002/mrm.21318
48. Macchia RJ, Termine JE, Buchen CD, Raymond V, Damadian, M.D.: Magnetic Resonance Imaging and the Controversy of the 2003 Nobel Prize in Physiology or Medicine. *J Urol*. 2007;178(3):783-785. doi:10.1016/j.juro.2007.05.019
49. Dössel O. Magnetresonanz-Tomographie. In: Dössel O, ed. *Bildgebende*



- Verfahren in der Medizin*. 2nd ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2016:285-390. doi:10.1007/978-3-642-54407-1
50. Hünnerbein R. Magnetresonanztomografie (MRT). In: Reiser M, Kuhn F-P, Debus J, eds. *Duale Reihe – Radiologie*. 4th ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2017:92-96. doi:10.1055/b-004-132212
51. Weishaupt D. Aufbau eines MR-Tomographen. In: Weishaupt D, Köchli VD, Marincek B, eds. *Wie funktioniert MRI?*. 7th ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2014:41-45. doi:10.1007/978-3-642-41616-3
52. Iro H, Waldfahrer F, Vogl TJ, Bisdas S, Zöphel K, Kotzerke J. Bildgebende Diagnostik und interventionelle Therapie. In: Reiß M, ed. *Facharztwissen HNO-Heilkunde*. 1st ed. Heidelberg: Springer Medizin Verlag; 2009:12-21.
53. Schünke M, Schulte E, Schumacher U. Kopf, Schädelknochen. In: Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker K, eds. *Prometheus – Kopf und Neuroanatomie*. 1st ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2006:2-43.
54. Casselman JW, Bensimon JL. Bildgebung des Innenohrs. *Radiologe*. 1997;37(12):954-963. doi:10.1007/s001170050307
55. Swartz JD. Sensorineural Hearing Deficit: A Systematic Approach Based on Imaging Findings. *Radiographics*. 1996;16(3):561-574. doi:10.1148/radiographics.16.3.8897624
56. Tamplen M, Schwalje A, Lustig L, Alemi AS, Miller ME. Utility of Preoperative Computed Tomography and Magnetic Resonance Imaging in Adult and Pediatric Cochlear Implant Candidates. *Laryngoscope*. 2016;126(6):1440-1445. doi:10.1002/lary.25659
57. Schwartz SR, Chen BS. The Role of Preoperative Imaging for Cochlear Implantation in Postlingually Deafened Adults. *Otol Neurotol*. 2014;35(9):1536-1540. doi:10.1097/MAO.0000000000000499
58. Roberts DM, Bush ML, Jones RO. Adult progressive sensorineural hearing loss: is preoperative imaging necessary before cochlear implantation? *Otol Neurotol*. 2014;35(2):241-245. doi:10.1097/MAO.0b013e3182a437b3

59. Leuwer RM, Bertuleit H, Wittkugel O, Freitag H-J. Indikationen zur Darstellung des Innenohres mit Hilfe der CISS-MRT. *Laryngo-Rhino-Otologie*. 1999;78(8):417-420. doi:10.1055/s-2007-996901
60. Bartmann P, Roos R. Erkrankungen in der Neugeborenenperiode. In: Sitzmann FC, ed. *Duale Reihe – Pädiatrie*. 3rd ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2007:71-123.
61. Lowe LH, Vézina LG. Sensorineural Hearing Loss in Children. *Radiographics*. 1997;17(5):1079-1093. doi:10.1148/radiographics.17.5.9308102
62. Pribitkin EA, Rondinella L, Rosenberg SI, Yousem DM. Superficial siderosis of the central nervous system: an underdiagnosed cause of sensorineural hearing loss and ataxia. *Am J Otol*. 1994;15(3):415-418.
63. Kim MS, Oh CW, Han DH, Kwon O-K, Jung H-W, Han MH. Intraosseous dural arteriovenous fistula of the skull base associated with hearing loss. *J Neurosurg*. 2002;96(5):952-955. doi:10.3171/jns.2002.96.5.0952
64. Kemink JL, Zimmerman-Phillips S, Kileny PR, Firszt JB, Novak MA. Auditory Performance of Children With Cochlear Ossification and Partial Implant Insertion. *Laryngoscope*. 1992;102(9):1001-1005. doi:10.1288/00005537-199209000-00009
65. Eshraghi AA, Nazarian R, Telischi FF, Rajguru SM, Truy E, Gupta C. The cochlear implant: Historical aspects and future prospects. *Anat Rec*. 2012;295(11):1967-1980. doi:10.1002/ar.22580.
66. Mlynski R, Plontke S. Cochleaimplantatversorgung bei Kindern und Jugendlichen. *HNO*. 2013;61(5):388-398. doi:10.1007/s00106-013-2699-y
67. Ramsden JD, Gordon K, Aschendorff A, Borucki L, Bunne M, Burdo S, Garabedian N, Grolman W, Irving R, Lesinski-Schiedat A, Loundon N, Manrique M, Martin J, Raine C, Wouters J, Papsin BC. European Bilateral Pediatric Cochlear Implant Forum Consensus Statement. *Otol Neurotol*. 2012;33(4):561-565. doi:10.1097/MAO.0b013e3182536ae2
68. Manrique M, Cervera-Paz FJ, Huarte A, Molina M. Advantages of Cochlear Implantation in Prelingual Deaf Children before 2 Years of Age when Compared

- with Later Implantation. *Laryngoscope*. 2004;114(8):1462-1469. doi:10.1097/00005537-200408000-00027
69. Downs MP, Silver HK. The “A.B.C.D.’s” to H.E.A.R. Early Identification in Nursery, Office and Clinic of the Infant Who is Deaf. *Clin Pediatr (Phila)*. 1972;11(10):563-566. doi:10.1177/000992287201101006
70. Purcell DD, Fischbein NJ, Patel A, Johnson J, Lalwani AK. Two Temporal Bone Computed Tomography Measurements Increase Recognition of Malformations and Predict Sensorineural Hearing Loss. *Laryngoscope*. 2006;116(8):1439-1446. doi:10.1097/01.mlg.0000229826.96593.13
71. Tada A, Inai R, Tanaka T, Marukawa Y, Sato S, Nishizaki K, Kanazawa S. The difference in congenital cholesteatoma CT findings based on the type of mass. *Diagn Interv Imaging*. 2016;97(1):65-69. doi:10.1016/j.diii.2015.02.008
72. Digge P, Solanki RN, Shah DC, Vishwakarma R, Kumar S. Imaging Modality of Choice for Pre-Operative Cochlear Imaging: HRCT vs. MRI Temporal Bone. *J Clin Diagnostic Res*. 2016;10(10):TC01-TC04. doi:10.7860/JCDR/2016/18033.8592
73. Xu X-Q, Wu F-Y, Hu H, Su G-Y, Shen J. Incidence of Brain Abnormalities Detected on Preoperative Brain MR Imaging and Their Effect on the Outcome of Cochlear Implantation in Children with Sensorineural Hearing Loss. *Int J Biomed Imaging*. 2015;2015:1-6. doi:10.1155/2015/275786
74. Lapointe A, Viamonte C, Morriss MC, Manolidis S. Central nervous system findings by magnetic resonance in children with profound sensorineural hearing loss. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*. 2006;70(5):863-868. doi:10.1016/j.ijporl.2005.09.022
75. Moon IJ, Kim EY, Park G-Y, Jang MS, Kim JH, Lee J, Chung W-H, Cho Y-S, Hong SH. The Clinical Significance of Preoperative Brain Magnetic Resonance Imaging in Pediatric Cochlear Implant Recipients. *Audiol Neurotol*. 2012;17(6):373-380. doi:10.1159/000341818
76. Isaacson B, Booth T, Kutz JW, Lee KH, Roland PS. Labyrinthitis ossificans: How accurate is MRI in predicting cochlear obstruction? *Otolaryngol – Head Neck*

- Surg.* 2009;140(5):692-696. doi:10.1016/j.otohns.2008.12.029
77. Bettman R, Beek E, Van Olphen A, Zonneveld F, Huizing E. MRI versus CT in Assessment of Cochlear Patency in Cochlear Implant Candidates. *Acta Otolaryngol.* 2004;124(5):577-581. doi:10.1080/00016480310016848
78. Sennaroğlu L, Bajin MD. Classification and Current Management of Inner Ear Malformations. *Balkan Med J.* 2017;34(5):397-411. doi:10.4274/balkanmedj.2017.0367
79. Wootten CT, Backous DD, Haynes DS. Management of Cerebrospinal Fluid Leakage From Cochleostomy During Cochlear Implant Surgery. *Laryngoscope.* 2006;116(11):2055-2059. doi:10.1097/01.mlg.0000240286.43289.87
80. Slattery WH, Luxford WM. Cochlear Implantation in the Congenital Malformed Cochlea. *Laryngoscope.* 1995;105(11):1184-1187. doi:10.1288/00005537-199511000-00008
81. Neriishi K, Nakashima E, Akahoshi M, Hida A, Grant EJ, Masunari N, Funamoto S, Minamoto A, Fujiwara S, Shore RE. Radiation Dose and Cataract Surgery Incidence in Atomic Bomb Survivors, 1986–2005. *Radiology.* 2012;265(1):167-174. doi:10.1148/radiol.12111947/-/DC1
82. Ross WM, Creighton MO, Inch WR, Trevithick JR. Radiation Cataract Formation Diminished by Vitamin E in Rat Lenses in vitro. *Exp Eye Res.* 1983;36(5):645-653. doi:10.1016/0014-4835(83)90102-1
83. Conte G, Scola E, Calloni S, Brambilla R, Campoleoni M, Lombardi L, Berardino F Di, Zanetti D, Gaini LM, Triulzi F, Sina C. Flat Panel Angiography in the Cross-Sectional Imaging of the Temporal Bone: Assessment of Image Quality and Radiation Dose Compared with a 64-Section Multisection CT Scanner. *Am J Neuroradiol.* 2017;38(10):1998-2002. doi:10.3174/ajnr.A5302

## 7. Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1.** Ausschnitt einer axialen CT-Untersuchung des Felsenbeins mit inkompletter Partition Typ 2 rechts. Die inkomplette Partitionierung des apikalen Cochleaabschnittes ist erkennbar (Pfeil). ..... 7
- Abbildung 2.** Ausschnitt der CT-Untersuchung desselben Falles, in der die inkomplette Partition Typ 2 links mit erweitertem Aquaeductus vestibuli zu sehen ist. .... 7
- Abbildung 3.** Schema eines CI-Systems der Firma MED-EL (Innsbruck, Österreich).<sup>30</sup> ..... 15
- Abbildung 4.** CT-Aufnahme (axial) eines 34-jährigen CI-Patienten mit einseitiger Taubheit nach Felsenbeinfraktur links. Die in die Paukenhöhle einstrahlende Frakturlinie ist in der CT deutlich zu erkennen (Pfeil)... 19
- Abbildung 5.** Verteilung der Schwerhörigkeit der Kinder-OP-Fälle..... 32
- Abbildung 6.** Verteilung der Schwerhörigkeit der Erwachsenen-OP-Fälle..... 33
- Abbildung 7.** Ursachen der Schwerhörigkeit aus den Anamnesen. Die Gesamtsumme (= Anzahl der betroffenen Kinder- und Erwachsenen-OP-Fälle) der jeweils festgestellten Ursache ist rechts neben dem jeweiligen Balken aufgeführt..... 34
- Abbildung 8.** Ursachen der Schwerhörigkeit aus CT- und MRT-Untersuchung. Die Gesamtsumme (= Anzahl der betroffenen Kinder- und Erwachsenen-OP-Fälle) ist rechts neben dem jeweiligen Balken aufgeführt. „Multiple Fehlbildungen 1“ entspricht einem LVAS und einer Bogengangdysplasie. „Multiple Fehlbildungen 2“ fasst ein LVAS mit einer Bogengang- und einer Vestibulumdysplasie zusammen. „Multiple Fehlbildungen 3“ entspricht einer Otozysten-Deformität und einer Malformation des IGG. „Multiple Fehlbildungen 4“ fasst eine cochleäre Hypoplasie, eine Bogengang- und eine Vestibulumdysplasie zusammen. „Multiple Fehlbildungen 5“ entspricht einer cochleären Dysplasie, einer Vestibulumdysplasie und einer Bogengangaplasie. „Multiple

- Fehlbildungen 6“ fasst eine Bogengang- und eine Vestibulumdysplasie sowie eine Malformation des IGG zusammen..... 36
- Abbildung 9.** Kontrastmittelgestützte koronare dünn-schichtige T1-gewichtete Sequenz (MRT) eines erwachsenen Patienten mit beidseitiger asymmetrischer sensorineuraler Schwerhörigkeit und Akustikusneurinom rechts (Pfeil). ..... 39
- Abbildung 10.** Axiale Schichten der CT-Untersuchung eines 6-monatigen CI-Patienten mit beidseitiger prälingualer sensorineuraler Schwerhörigkeit und beidseitiger Otozysten-Deformität, die in A) rechts und in B) links zu erkennen ist (Pfeile). ..... 46
- Abbildung 11.** Axiale 3D-CISS-Sequenz (MRT) des Patienten aus obiger Abbildung mit beidseitiger Otozysten-Deformität (Pfeile). ..... 46
- Abbildung 12.** A) Axiale MRT und B) Koronare MRT eines 66-jährigen CI-Patienten mit beidseitiger Taubheit bei unauffälligem CT-Befund. Bild einer Hämosiderose bei laminären signallosen Auflagerungen in den zerebellären Fissuren, um den Hirnstamm und teils in mehreren Großhirnsulci (Pfeile). ..... 51
- Abbildung 13.** Vergleich der Ergebnisse aus den Tonaudiogrammen mit den Ergebnissen der CT- und MRT-Untersuchungen bezüglich eines asymmetrischen Hörverlustes bei den erwachsenen CI-Patienten..... 53
- Abbildung 14.** A) Repräsentative CT-Aufnahme in axialer Schichtführung und B) MRT-Aufnahme in axialer 3D-CISS-Sequenz einer 24-jährigen CI-Patientin mit Taubheit rechts. Es zeigen sich cochleäre Kalzifikationen rechts. Der Pfeil in A) markiert die pathologische Dichteanhebung in der basalen Schneckenwindung. In der CISS-Sequenz der korrespondierenden MRT ist eine entsprechende Signalauslöschung zu erkennen (Pfeil in B). ..... 57
- Abbildung 15.** Ausschnitt einer präoperativen Felsenbein-CT-Aufnahme (axiale Schichtführung) einer 47-jährigen Patientin mit beidseitiger, progredienter Schwerhörigkeit aufgrund beidseitiger Kapselotosklerose

- (Pfeile). Es zeigen sich Dichteminderungen der otischen Kapsel, besonders ausgeprägt um die Cochlea ..... 72
- Abbildung 16.** Präoperative MRT-Aufnahme in axialer 3D-CISS-Sequenz der Patientin aus Abbildung 15 mit beidseitiger Kapselotosklerose (Pfeile). Die Strukturalterationen der otischen Kapsel lassen sich auch MR-tomographisch erahnen. .... 72
- Abbildung 17.** Die kontrastmittelgestützte koronare Sequenz zeigt ein kräftiges Enhancement um die Cochlea beidseits..... 72
- Abbildung 18.** Sagittale T2-gewichtete Sequenz (MRT) eines 1-jährigen CI-Patienten mit beidseitiger hochgradiger sensorineuraler Schwerhörigkeit. Es zeigen sich multiple intrazerebrale Fehlbildungen (Corpus callosum Dysgenese, Gyrierungsstörung, Heterotopie, Kolpocephalie, große Arachnoidalzyste in der Pinealisregion) bei unauffälligem CT-Befund des Felsenbeins (vgl. Abbildung 19). Der Pfeil markiert den dysplastischen und teilweise fehlenden posterioren Anteil des Balkens. .... 75
- Abbildung 19.** Unauffällige Felsenbein-CT (axial) des Patienten aus Abbildung 18. . 75

## 8. Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1.</b>	Ursachen für Schallleitungsschwerhörigkeit <sup>7,8,9,10,11,12,13,14</sup> .....	3
<b>Tabelle 2.</b>	Ursachen für sensorineurale Schwerhörigkeit <sup>15,16,17</sup> .....	4
<b>Tabelle 3.</b>	Klassifikation der Innenohrfehlbildungen, modifiziert nach Giesemann et al. (2013) <sup>21</sup> .....	6
<b>Tabelle 4.</b>	Syndrome mit Hörstörungen <sup>16,18</sup> .....	8
<b>Tabelle 5.</b>	Pathologien und ihre Darstellungsmöglichkeiten nach Biller et al. (2007), Casselman et al. (1997) und Swartz et al. (1996) <sup>20,54,55</sup> .....	25
<b>Tabelle 6.</b>	Felsenbeinbefunde bei unauffälliger Anamnese.....	37
<b>Tabelle 7.</b>	Zusatzbefunde der MRT-Aufnahmen: Tumoren <sup>15</sup> .....	39
<b>Tabelle 8.</b>	Zusatzbefunde der MRT-Aufnahmen: Fehlbildungen und Entwicklungsstörungen <sup>18,61</sup> .....	40
<b>Tabelle 9.</b>	Zusatzbefunde der MRT-Aufnahmen: infektiöse Veränderungen <sup>16</sup> .....	40
<b>Tabelle 10.</b>	Zusatzbefunde der MRT-Aufnahmen: Stoffwechselstörungen und Mitochondriopathien <sup>16,61</sup> .....	41
<b>Tabelle 11.</b>	Zusatzbefunde der MRT-Aufnahmen: sonstige relevante Pathologien <sup>61,62,63</sup> .....	41
<b>Tabelle 12.</b>	Zusatzbefunde der CT-Aufnahmen .....	42
<b>Tabelle 13.</b>	Vierfeldertafel für die Diagnose einer Otosklerose.....	44
<b>Tabelle 14.</b>	P-Werte der verschiedenen untersuchten Diagnosen .....	45
<b>Tabelle 15.</b>	Vierfeldertafel für die Diagnose einer Obstruktion der Cochlea im CT-Bild bei Z. n. Meningitis.....	48
<b>Tabelle 16.</b>	Vierfeldertafel für die Diagnose einer cochleären Signalauffälligkeit im MRT-Bild bei Z. n. Meningitis.....	48
<b>Tabelle 17.</b>	MRT-Auffälligkeit bei unauffälliger CT-Aufnahme.....	50
<b>Tabelle 18.</b>	CT-Auffälligkeit bei unauffälliger MRT-Aufnahme.....	52
<b>Tabelle 19.</b>	Relevante Auffälligkeiten während der CI-Operation.....	55



**Tabelle 20.** CT- und MRT-Bildbefunde bei intraoperativem Gusher ..... 59

## 9. Anhang

Gewebewichtungsfaktoren, modifiziert nach den Richtlinien der europäischen Atomgemeinschaft.<sup>39</sup>

$w_T$	0,12	0,08	0,04	0,01
<b>Organ bzw. Gewebe</b>	Knochenmark (rot) Kolon Lunge Magen Brust Restliche Gewebe (*)	Keimdrüsen	Blase Oesophagus Leber Schilddrüse	Knochenoberfläche Gehirn Speicheldrüsen Haut

(\*) Zu den restlichen Geweben zählen Mundschleimhaut, obere Atemwege, Lymphknoten, Thymus, Herz, Gallenblase, Bauchspeicheldrüse, Dünndarm, Milz, Nieren, Nebennieren, Prostata (Männer), Gebärmutter/Gebärmutterhals (Frauen) sowie Muskelgewebe. Der  $w_T$ -Wert bezieht sich auf das arithmetische Mittel der Dosen dieser Organe und Gewebe.

---

## Danksagung

Ich möchte mich ganz herzlich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung meiner Dissertation unterstützt haben.

Dazu bedanke ich mich zuallererst besonders bei Herrn Professor Dr. László Solymosi für das Vertrauen und die Überlassung des Themas meiner Dissertation.

Ein weiterer besonderer Dank gilt Herrn Dr. Bálint Alkonyi, der mir unzählige Stunden sowohl bei der Datenerhebung als auch während der schriftlichen Niederlegung meiner Arbeit mit Rat und Tat zur Seite stand und mich zuverlässig während meiner gesamten Arbeit betreute.

Des Weiteren bedanke ich mich herzlich bei Herrn Dr. Thomas Günthner-Lengsfeld für die anfängliche Idee für meine Dissertation und die Hilfsbereitschaft.

Ein weiterer herzlicher Dank gilt Frau Lena Gutjahr-Lengsfeld für ihre freundliche Unterstützung beim statistischen Teil meiner Arbeit.

Zusätzlich danke ich Herrn Professor Dr. Andreas Radeloff für die tatkräftige Unterstützung aus der HNO-Klinik in der Anfangsphase meiner Datensammlung.

Meinem Freund Tobias danke ich für seine fortdauernde Geduld während meiner gesamten Zeit auf dem Weg zur Fertigstellung.

Ein großer Dank gilt meinen Eltern und meinen beiden Schwestern für die stetige Motivation und Unterstützung.

---

## Curriculum Vitae

### **Persönliche Daten**

---

Name Kathrin Ofenhitzer

### **Schul- und Hochschulbildung**

---

05/2015 Abschluss: Staatsexamen Zahnmedizin

04/2010-05/2015 Studium der Zahnmedizin an der Julius-  
Maximilians-Universität Würzburg