

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Danksagung</b>	<b>v</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Verzeichnis der Abbildungen</b>	<b>xv</b>
<b>Verzeichnis der Tabellen</b>	<b>xix</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Motivation und Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Entwicklungsbedarf und Motivation . . . . .	5
1.2 Initiale Problemidentifikation . . . . .	6
1.3 Lösungsansatz und Gliederung der Arbeit . . . . .	7
<b>Teil I: Propädeutik</b>	<b>10</b>
<b>2 Grundlagen der operativen Versorgung mit Cochlea-Implantaten</b>	<b>11</b>
2.1 Anatomische und morphologische Grundlagen . . . . .	13
2.1.1 Topographische Anatomie der lateralen Schädelbasis . . . . .	13
2.1.2 Funktionelle Anatomie des Innenohrs . . . . .	20
2.2 Biomechanik des Hörens . . . . .	22
2.2.1 Schallleitung und -vorverarbeitung im Mittelohr . . . . .	23
2.2.2 Mikro- und Hydromechanik des Innenohrs . . . . .	23
2.2.3 Der intracochleäre Verstärker . . . . .	26
2.3 Überblick über Schwerhörigkeit und deren hörprothetische Versorgung . .	27
2.3.1 Pathologie: Arten der Schwerhörigkeit und Taubheit . . . . .	27
2.3.2 Therapie: Arten der auditorischen Rehabilitation . . . . .	27
2.4 Das Cochlea-Implantat: Historie, Aufbau und Funktion . . . . .	29
2.4.1 Die Entwicklungsgeschichte des Cochlea-Implantats . . . . .	29
2.4.2 Aufbau und Funktion des Cochlea-Implantats . . . . .	33
2.4.3 Operatives Vorgehen bei der konventionellen CI-Chirurgie . . . . .	34
<b>3 Der intracochleäre Elektrodenträger: Eine systematische Übersichtsarbeit (A)</b>	<b>39</b>
3.1 Design der intracochleären Elektrodenträger . . . . .	41
3.1.1 Elektrodenträger der Firma Cochlear Ltd. . . . .	43
3.1.2 Elektrodenträger der Advanced Bionics LLC . . . . .	49
3.1.3 Elektrodenträger der Firma MED-EL . . . . .	52
3.1.4 Konzepte, Patente, Prototypen . . . . .	55

3.2	Intracochleäres Verhalten: Felsenbeinstudien und Insertionstrauma . . . . .	65
3.2.1	Intracochleäres Trauma: Ursachen, Evaluierung und Bewertung . . . . .	65
3.2.2	Insertionsverhalten und -trauma perimodiolarer Elektrodenträger . . . . .	69
3.2.3	Insertionsverhalten und -trauma resthörerhaltender Elektrodenträger . . . . .	78
3.2.4	Insertionskräfte . . . . .	83
3.3	Resthörerhalt und Elektrisch-Akustische Stimulation . . . . .	87
3.3.1	Die messtechnische Bestimmung des Resthörerhalts . . . . .	87
3.3.2	Resthörerhalt bei konventionellen Elektrodenträgern . . . . .	93
3.3.3	Resthörerhalt bei Elektrodenträgern für begrenzte Insertionstiefe . . . . .	94
3.3.4	Resthörerhalt bei Elektrodenträgern für tiefere Insertion . . . . .	95

---

## Teil II: Analyse und Synthese

---

**99**

### **4 Schwachstellenanalyse und Problemidentifikation 99**

4.1	Auswertung des Insertionsverhaltens der Elektrodenträger . . . . .	101
4.1.1	Aussagekraft der ausgewerteten Studien . . . . .	101
4.1.2	Histologische Ergebnisse der Felsenbeinstudien . . . . .	103
4.1.3	Studienübergreifende Auswertung der Insertionskräfte . . . . .	105
4.1.4	Grenzen des Resthörerhalts, aktuelles Ertaubungsrisiko . . . . .	106
4.2	Analyse einzelner Designmerkmale der Elektrodenträger . . . . .	107
4.2.1	Querschnittsprofil und Volumen . . . . .	107
4.2.2	Insertionstiefe und Implantatlänge . . . . .	109
4.2.3	Absolute und effektive Steifigkeit . . . . .	111
4.2.4	Verformungsverhalten bzw. Elektrodenkinematik . . . . .	114
4.3	Analogiebetrachtung und Problemidentifikation . . . . .	115
4.3.1	Der Prozessgedanke bei der Elektrodeninsertion . . . . .	115
4.3.2	Fazit der Analogiebetrachtung . . . . .	117
4.4	Identifizierte Hauptdefizite und Konkretisierung der Aufgabenstellung . . . . .	120

### **5 Senkung der Invasivität des Zugangswegs (B) 125**

5.1	Einleitung und Motivation . . . . .	127
5.2	Grundlagen der bild- und navigationsgestützten Chirurgie . . . . .	128
5.2.1	Grundlagen und Prinzipien der intraoperativen Navigation . . . . .	128
5.2.2	Systemgenauigkeit und Fehlerbetrachtung . . . . .	131
5.3	Der minimal-invasive Zugang zum Innenohr: Stand der Technik . . . . .	137
5.3.1	„Minimal-invasiv“ – eine Begriffsdefinition . . . . .	137
5.3.2	Review prinzipieller Verfahren und Herangehensweisen . . . . .	138
5.4	Experimentelle Untersuchungen zur Senkung der Invasivität des Zugangs . . . . .	147
5.4.1	Navigationsgestützte, manuelle Anlage des Bohrkanals . . . . .	148
5.4.2	Roboterassistierte Anlage des Bohrkanals: die erste Serie . . . . .	155
5.4.3	Roboterassistierte Anlage des Bohrkanals: die zweite Serie . . . . .	160
5.4.4	Roboterassistierte Anlage des Bohrkanals: die dritte Serie . . . . .	162
5.5	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	165
5.5.1	Fehlerdiskussion und Analyse der Einflussfaktoren . . . . .	165

5.5.2	Quantitative Auswertung: Welche Genauigkeit ist erreichbar? . . . .	172
5.5.3	Qualitative Auswertung: Unversehrtheit der Risikostrukturen . . . .	177
5.5.4	Der <i>Recessus facialis</i> : Nadelöhr des minimal-invasiven Zugangswegs . . . .	179
5.5.5	Die Cochleostomie: Dreh- und Angelpunkt des Resthörerhalts . . . .	184
5.6	Synopsis: Der minimal-invasive Zugang zum Innenohr – Fakt oder Fiktion? . . . .	188
<b>6</b>	<b>Optimierung der Insertion passiver, vorgeformter Elektrodenträger (C)</b>	<b>193</b>
6.1	Einleitung und Motivation . . . . .	195
6.2	Methodik der Vermessung und Modellierung des Verformungsverhaltens . . . .	197
6.2.1	Vermessung und Modellierung der Contour Advance Elektrode . . . .	197
6.2.2	Modellierung des intracochleären Verformungsverhaltens . . . . .	202
6.2.3	Das Traumarisiko – ein Maßstab für die qualitative Auswertung . . . .	209
6.3	Ergebnisse der Vermessung des Verformungsverhaltens und Optimierung . . . .	213
6.3.1	Charakteristik des passiven Verformungsverhaltens . . . . .	213
6.3.2	Ergebnisse der Simulationen des Insertionsverhaltens . . . . .	216
6.4	Diskussion: Möglichkeiten und Grenzen der Optimierung . . . . .	222
6.4.1	Charakteristik der passiven Elektrodenkinematik . . . . .	223
6.4.2	Ausblick auf die klinische Umsetzung . . . . .	224
6.4.3	Güte und Zuverlässigkeit der Modellierung . . . . .	227
6.4.4	Das Traumarisiko: Bewertung und Grenzen der Simulation . . . . .	230
6.4.5	Bewertung der simulierten Insertionsszenarien . . . . .	233
6.5	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	238
<b>7</b>	<b>Automatisierung der Insertion der CI-Elektrodenträger (D)</b>	<b>241</b>
7.1	Einleitung und Motivation . . . . .	243
7.2	Aufbau und Funktion des automatisierten Insertionstools . . . . .	243
7.2.1	Konzeption und Anforderungskatalog . . . . .	243
7.2.2	Erste Funktionsmuster des automatisierten Insertionstools . . . . .	244
7.3	Experimentelle Evaluation der automatisierten Insertion . . . . .	246
7.3.1	Versuchsaufbau und -durchführung . . . . .	246
7.3.2	Ergebnisse der automatisierten Insertion . . . . .	247
7.4	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	251
7.4.1	Machbarkeit und Zuverlässigkeit einer automatisierten Insertion . . . .	253
7.4.2	Intracochleäre Trajektorie und Verformungsverhalten . . . . .	254
7.4.3	Insertionskräfte, Verformungsmechanismen und Elektrodenesign . . . .	256
7.4.4	Grenzen und Möglichkeiten der individuellen Optimierung . . . . .	258
7.4.5	Eignung der Kraftsensorik als Online-Prozesskontrolle . . . . .	259
7.4.6	Schlussbetrachtung und Ausblick auf zukünftige Insertionsstudien . . . .	259
7.5	Konzeptionelle Weiterentwicklung des Insertionstools . . . . .	261
7.5.1	Analyse des Stands der Technik . . . . .	261
7.5.2	Konkretisierung des Anforderungskatalogs . . . . .	265
7.5.3	Gesamtkonzept des Insertionstools (Sterilisation und Handhabung) . . . .	273
7.5.4	Synthese: Entwurf und Umsetzung der Insertionstoolspitze . . . . .	274
7.5.5	Diskussion der neuen Insertionstoolspitze . . . . .	287
7.6	Optimierung der Elektrodenträger für den minimal-invasiven Zugang . . . .	292
7.6.1	Minimierung der Raumforderungen bei geraden Elektrodenträgern . . . .	293

7.6.2	Kompensation der Anfangskrümmung . . . . .	294
7.6.3	Vereinfachung des Stilettrückzugs . . . . .	296
<b>8</b>	<b>Schlussbetrachtung und Ausblick</b>	<b>299</b>
8.1	Beantwortung der Hauptfragestellungen . . . . .	301
8.1.1	Schwerpunkt B: Senkung der Invasivität des Zugangswegs . . . . .	301
8.1.2	Schwerpunkt C: Optimierung der Insertion . . . . .	306
8.1.3	Schwerpunkt D: Automatisierung der Insertion . . . . .	310
8.2	Resümee und Ausblick . . . . .	313
8.2.1	Plädoyer für eine ganzheitliche Betrachtungsweise . . . . .	313
8.2.2	Die Zukunft des minimal-invasiven Zugangs . . . . .	314
8.2.3	Klinische Überprüfung der Elektrodeninsertion . . . . .	317
8.2.4	Optimierung der Elektrodeninsertion . . . . .	317
8.2.5	Vision einer ganzheitlich minimal-invasiven CI-Chirurgie . . . . .	318
8.3	Schlussbetrachtung . . . . .	319
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>321</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>325</b>
A.1	Ergänzende Abbildungen . . . . .	327
A.2	Ergänzende Tabellen . . . . .	331
A.3	Glossar . . . . .	339
A.4	Bildnachweise und Genehmigungen . . . . .	344
A.5	Liste der studentischen Arbeiten . . . . .	345
A.6	Liste der eigenen Publikationen . . . . .	346
	<b>Thesen zur Dissertationsschrift</b>	<b>349</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>351</b>