

Inhalt

Kurzfassung	VII
Abstract	XI
1 Einleitung	1
1.1 Forschungsfeld Biomechanik des Hörens	2
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit	7
2 Grundlagen	9
2.1 Biomechanik	9
2.1.1 Gelenke	10
2.1.2 Bänder und Sehnen	12
2.2 Anatomie und Funktion des Gehörs	13
2.2.1 Strukturen des Mittelohrs	16
2.2.2 Gelenke des Mittelohrs	17
2.3 Messverfahren	21
2.3.1 Weg- und Geschwindigkeitsmessung	21
2.3.2 Kraftmessung	22
2.4 Elastische Mehrkörpersysteme	23
2.4.1 Kinematik	24
2.4.2 Bewegungsgleichungen	25
2.4.3 Modellreduktion	26
2.4.4 Fluid	29
2.4.5 Kontaktberechnung	30
3 Messtechnik	33

3.1	Anforderungen an die Messeinrichtung	34
3.2	Messgeräte	36
3.3	Messdatenerfassung	37
3.4	Messeinrichtung zur Analyse des Incudo-Malleolaren Gelenks	38
3.4.1	Aufbau	38
3.4.2	Messablauf	40
3.4.3	Validierung	43
3.4.4	Dynamische Messung	43
3.4.5	Quasi-statische Messung	44
3.5	Technische Ersatzmodelle	45
3.6	Rekonstruktion der räumlichen Bewegung	50
3.6.1	Position der Messpunkte	51
3.6.2	Vorgehen bei großen Verschiebungen	54
4	Messungen am isolierten Hammer-Amboss Komplex	59
4.1	Material und Methoden	60
4.1.1	Präparation und Messaufbau	60
4.1.2	Messsystem	62
4.1.3	Anregung des IM-Komplex	63
4.1.4	Messung der räumlichen Verschiebung	63
4.1.5	Mikro-CT und Orientierung	65
4.1.6	Rekonstruktion der räumlichen Bewegung	66
4.1.7	Berechnung der Kontaktregion	66
4.2	Vorversuche am technischen Ersatzmodell	67
4.3	Ergebnisse	69
4.3.1	Kraft-Verschiebungskurven	70
4.3.2	Viskoelastizität - stufenförmige Anregung	75
4.3.3	Zusammenhang zwischen den Kraft-Verschiebungskurven und der Bewegung des Amboss	77
4.3.4	Zusammenhang zwischen der Bewegung des Amboss und der Geometrie des IM-Gelenks	80

4.4	Diskussion	85
4.4.1	Messablauf	85
4.4.2	Viskoelastische Eigenschaften des IM-Gelenks	87
4.4.3	Das IM-Gelenk als mechanisches Filter	88
4.4.4	Zusammenfassung	94
5	Messung der räumlichen Bewegung von Hammer und Amboss bei akustischer Anregung	95
5.1	Material und Methoden	96
5.1.1	Präparation und Messaufbau	97
5.1.2	Messung der räumlichen Geschwindigkeit	99
5.1.3	Mikro-CT und Orientierung	100
5.1.4	Rekonstruktion der räumlichen Bewegung	101
5.2	Ergebnisse	105
5.2.1	Messpunkte und Orientierung	105
5.2.2	Räumliche Bewegung von Hammer und Amboss	106
5.2.3	Ein- und Ausgangsverhalten des IM-Komplex	110
5.3	Diskussion	112
5.3.1	Messablauf	113
5.3.2	Mobilität des IM-Gelenks bei akustischer Anregung	118
5.3.3	Übertragungsverhalten des IM-Komplex	120
5.3.4	Vergleich mit Messungen am Steigbügel	122
5.3.5	Zusammenfassung	123
6	Modellierung	125
6.1	Modell des isolierten Incudo-Malleolaren Gelenks	125
6.1.1	Modellierung der Gehörknöchelchen	126
6.1.2	Modellierung des Bänder der Gelenkkapsel	126
6.1.3	Kontaktformulierung	129
6.2	Gesamtmodell des Außen- und Mittelohrs	130

6.3 Ansätze zur Identifikation und Modellierung von Unsicherheiten in der Biomechanik	136
7 Simulation	143
7.1 Simulation des isolierten Incudo-Malleolaren Gelenks	143
7.1.1 Verschiebung bei quasi-statischer Anregung	144
7.1.2 Kontaktregion bei quasi-statischer Anregung	146
7.1.3 Einfluss der Modellparameter	149
7.2 Simulation Gesamtmodell	152
7.2.1 Verschiebung der Gehörknöchelchenkette bei quasi-statischer Anregung	152
7.2.2 Untersuchung der Schallübertragung bei verschiedenen Anregungsmustern	156
8 Zusammenfassung	159
Anhang	165
A.1 Modell des isolierten IM-Gelenks	165
A.2 Modell des menschlichen Mittelohrs	166
A.3 Feder-Masse-System mit Unsicherheiten	168
Abkürzungen, Formelzeichen und Notation	175
Literatur	178