

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xi
-----------------------	----

1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel und Aufbau dieser Arbeit	6
1.3 Das menschliche Gehör	7
1.3.1 Eigenschaften des menschlichen Hörsystems	7
1.3.2 Anatomie des Ohres	8
1.3.3 Der Hörvorgang	10
1.4 Der cochleäre Verstärker	12
1.4.1 Bestandteile und Wirkungsweise	12
1.4.2 Nichtlinearität des Verstärkungsmechanismus	17
1.5 Pathologie des Gehörs	22
1.5.1 Klassifizierung	22
1.5.2 Prävalenz und Auswirkungen von Schwerhörigkeit	23
1.6 Otoakustische Emissionen	24
1.6.1 Entstehung und Einordnung	24
1.6.2 Reflexionsemissionen	26
1.6.3 Distorsionsprodukt-otoakustische Emissionen	30
1.6.4 Spontane otoakustische Emissionen	33
1.6.5 Ensemblemittelung zur Erfassung von EOAE	35
1.7 Stand der Technik	36
1.7.1 Innenohrdiagnostik mit Reflexionsemissionen	36
1.7.2 Innenohrdiagnostik mit DPOAE	37
1.7.3 Verfahren zur DPOAE-Quellentrennung	41
2 Erfassung und Analyse von DPOAE im Zeitbereich	47
2.1 Aufbau des DPOAE-Messsystems	47
2.1.1 Messanordnung	47
2.1.2 Kalibrierung der DPOAE-Messsonde	48
2.2 Definition der Anregungstöne	54
2.2.1 Kurzpuls-DPOAE	54
2.2.2 Multifrequenzerfassung von Kurzpuls-DPOAE	56
2.2.3 Kontinuierliche DPOAE	58
2.3 Signalvorverarbeitung	58

2.3.1	Signalverarbeitungskette	58
2.3.2	Sortierte Mittelung zur Artefaktreduktion	60
2.3.3	Spektrale Filterung	64
2.4	DPOAE-Signalanalyse im Zeitbereich	66
2.4.1	Automatisierte Signaldetektion	66
2.4.2	Analyse des DPOAE-Einschwingvorgangs	71
2.4.3	Zerlegung in Pulsbasisfunktionen	73
2.5	DPOAE-Wachstumsfunktionen	77
2.5.1	EDPT-Akzeptanzkriterien	77
2.5.2	Linearisierung durch Hochpegelkorrektur	78
3	Experimentelle Untersuchungen von Kurzpuls-DPOAE	81
3.1	Übersicht	81
3.1.1	Messreihen	81
3.1.2	Klinische Voruntersuchung des Gehörs	82
3.1.3	Referenzhörschwellenbestimmung	83
3.1.4	Erfassung von SOAE	85
3.2	Darstellung von Kurzpuls-DPOAE im Zeitbereich	87
3.2.1	DPOAE-Komponenten und Zweiquelleninterferenz	87
3.2.2	Intracochleäre Mehrfachreflexionen	88
3.2.3	Beeinflussung von Kurzpuls-DPOAE durch SOAE	90
3.3	Kurzpuls-DPOAE im gesunden Innenohr	92
3.3.1	Latenzen der DPOAE-Komponenten	92
3.3.2	Darstellung der DPOAE-Amplitude im L_1 - L_2 -Raum	94
3.3.3	Wachstumsfunktionen bei optimalen Anregungspegeln	101
3.3.4	Validierung der DPOAE-Quellentrennung im Zeitbereich	102
3.4	Einfluss von Schallempfindungsschwerhörigkeit	107
3.4.1	Semilogarithmische Wachstumsfunktionen zur EDPT-Bestimmung	107
3.4.2	Zusammenhang zwischen EDPT und Hörschwelle	111
3.4.3	Individuelle Hörschwellenschätzung	116
4	Hydrodynamisches Modell der Hörschnecke	119
4.1	Herleitung der Bewegungsgleichungen	119
4.1.1	Kinematisches Modell des Corti-Organs	119
4.1.2	Bewegungsgleichungen eines cochleären Elementes	121
4.1.3	Bewegungsgleichungen der cochleären Partition	122
4.2	Hydrodynamische Druckausbreitung	125
4.2.1	Lokale hydrodynamische Kraftwirkung	125
4.2.2	Steigbügel-Ausbreitungsfunktion	128
4.2.3	BM-BM-Ausbreitungsfunktion	130
4.3	Nachbildung der Mittelohrübertragungscharakteristik	132
4.3.1	Herleitung der Mittelohr-Bewegungsgleichung	132

4.3.2	Dimensionierung des Mittelohrmodells	135
4.4	Modellierung der cochleären Verstärkung	138
4.4.1	Krafteinkopplung durch ÄHZ	138
4.4.2	Nichtlinearität des cochleären Verstärkers	139
4.4.3	Interne Viskosität des cochleären Verstärkers	140
4.5	Bestimmung der Modellparameter	142
4.5.1	Dimensionierung der hydrodynamischen Kopplung	142
4.5.2	Mikromechanik des Corti-Organs	143
4.5.3	Frequenzabstimmung der Basilarmembran	145
4.5.4	Tektorialmembran	147
4.5.5	Cochleärer Verstärker	148
4.5.6	Cochleäre Irregularität	151
4.6	Bestimmung der numerischen Lösung	151
4.6.1	Aufstellung des Differentialgleichungssystems	151
4.6.2	Diskretisierung und Implementierung	155
4.7	Eigenschaften des Modells	157
4.7.1	Transiente Anregung	157
4.7.2	Harmonische Anregung	159
4.8	Bewertung und Einordnung des Modells	163
4.8.1	Einordnung des Modellierungsansatzes	163
4.8.2	Annahmen und Vereinfachungen	165
4.8.3	Vergleich mit experimentellen Untersuchungen	168
5	Numerische Simulation von Kurzpuls-DPOAE	171
5.1	DPOAE-Generierung im L_1 - L_2 -Raum	171
5.1.1	Übersicht	171
5.1.2	Pegelabhängigkeit der BM-Geschwindigkeit am f_2 -Ort	172
5.1.3	DPOAE-Pegelkarten	175
5.2	DPOAE-Wachstumsfunktionen und cochleäre Verstärkung	177
5.2.1	Übersicht	177
5.2.2	Globale Reduzierung der Verstärkung	179
5.2.3	Lokale Reduzierung der Verstärkung	183
5.3	Beitrag der kohärenten Reflexion zum DPOAE-Signal	187
5.3.1	Übersicht	187
5.3.2	Visualisierung der Reflexionskomponente	188
5.3.3	Pegelabhängigkeit der Reflexionskomponente	191
6	Anwendung der DPOAE-Zeitbereichsanalyse	197
6.1	Artefaktreduktion durch DPOAE-Quellentrennung	197
6.1.1	Auswirkungen der Zweiquelleninterferenz	197
6.1.2	Merkmalsextraktion und Signalzerlegung	199
6.1.3	Einschränkungen des Zweiquellenmodells	200

6.2	Messunsicherheiten bei der DPOAE-Erfassung	202
6.2.1	Technische Messunsicherheiten	202
6.2.2	Artefakt- und Störsignaleinfluss	204
6.3	Objektive Innenohrdiagnostik mit Kurzpuls-DPOAE	205
6.3.1	Beeinflussung der DPOAE-Generierung durch Anregungsparameter	205
6.3.2	DPOAE-Parameter zur Bewertung der Innenohrfunktionalität	207
6.3.3	Objektive Hörschwellenschätzung	210
7	Schlussfolgerung	215
	Literaturverzeichnis	217
	Abbildungsverzeichnis	239
	Tabellenverzeichnis	243
	Bildnachweis	245
A	Anhang	247
A.1	Taylor-Reihenentwicklung	247
A.1.1	Reihenentwicklung für $\tanh(x)$ mit Entwicklungsstelle im Ursprung	247
A.1.2	Reihenentwicklung für $\tanh(x)$ mit beliebiger Entwicklungsstelle	248
A.2	Kalibrierung der ER-10C-Messsonde	250
A.2.1	Multitondeffinition	250
A.2.2	Übertragungsfunktionen des Messsystems	250
A.2.3	Abschätzung technischer Verzerrungen bei f_{DP} für $L_2 = 75$ dB SPL	250
A.3	Ergänzungen zur DPOAE-Signalverarbeitung	251
A.3.1	Rauschbewertungsgleichung der sortierten Mittelung	251
A.3.2	Definition der Nullphasenfilterung	252
A.3.3	Alternative Filterbandbreiten	253
A.3.4	Vordefinierte Abtastpunkte der Einschwingabtastung	253
A.4	PBF-Zerlegung mittels Differentialevolution	254
A.4.1	Parameter der Differentialevolution	254
A.4.2	Abschätzung der Standardabweichungen der PBF-Parameter	254
A.4.3	Modellparameter der PBF-Zerlegungen	255
A.5	Experimentelle DPOAE-Erfassung	256
A.5.1	Definition der Messreihen	256
A.5.2	Frequenzspezifischer Zusammenhang zwischen BT und EDPT	257
A.6	Simulation von Kurzpuls-DPOAE	258
A.6.1	Vereinfachte Kinematik des Corti-Organs	258
A.6.2	Toleranzen und Ortsdiskretisierung	259
A.6.3	Frequenzabhängige Statistik der Hörverlustsimulation	260