

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	1
1 Einleitung .....	3
2 Polysomnographie bei Säuglingen und Kleinkindern.....	7
2.1 Elektroenzephalogramm.....	8
2.2 Elektrookulogramm.....	14
2.3 Elektromyogramm.....	16
2.4 Elektrokardiogramm, Herzfrequenz.....	17
2.5 Atmung .....	18
2.6 Blutgaswerte (SaO <sub>2</sub> , tc pO <sub>2</sub> , tc pCO <sub>2</sub> ).....	20
2.7 Aktimeter .....	22
2.8 Körperlage .....	22
2.9 Temperatur .....	22
2.10 Blutdruck .....	22
2.11 Artefakte .....	23
3 Stand der Technik, Literaturübersicht.....	27
3.1 Konventionelle Systeme für Datenaufnahme und -auswertung.....	27
3.2 Empfehlungen für Datenaufnahme und -auswertung .....	29
3.3 Analyseverfahren für das EEG.....	32
3.4 REM-Detektion.....	34
3.5 Verlauf der Herzfrequenz während des Schlafes.....	35
3.6 Schlafstadieneinteilung bei Erwachsenen.....	36
3.7 Schlafstadieneinteilung bei Säuglingen .....	38
3.7.1 Entwicklung des Schlafes.....	39
3.7.2 Kriterien zur Einteilung des Schlafes .....	40
3.8 Klassifikationsverfahren.....	41

4 Merkmalberechnung und Klassifikation .....	45
4.1 Blockbild der digitalen Signalverarbeitung .....	45
4.2 Klassifikationsverfahren .....	46
4.3 Merkmalberechnung aus elektrophysiologischen Signalen .....	49
4.3.1 Frequenzbänder des EEG .....	49
4.3.2 REM-Erkennung .....	54
4.3.3 Herzratenvariabilität .....	61
4.3.4 Artefaktbestimmung .....	65
4.4 Klassifikation .....	71
5 Ergebnisse .....	73
5.1 Vergleich verschiedener Klassifikationsverfahren .....	73
5.2 Schlafstadienbezogene statistische Auswertung von Atemmustern .....	83
6 Implementation in das Polysomnographische Diagnosesystem .....	87
6.1 Technische Ausstattung im Schlaflabor .....	87
6.2 Registrierung und Auswertung der Meßdaten mit POLDI .....	89
6.3 Entwicklung und Einsatz von POLDI-Connect .....	90
6.4 Datenauswertung .....	92
6.4.1 Atemmuster .....	93
6.4.2 Blutgaswerte, Herzfrequenz .....	95
6.4.3 Schlafstadieneinteilung bei Säuglingen .....	96
7 Zusammenfassung .....	99
Literaturverzeichnis .....	103
Glossar .....	117
Abkürzungen .....	121
Symbolverzeichnis .....	123

Anhang .....	125
A Nomenklatur von Datensätzen .....	125
B Hjorth'sche Parameter am Beispiel eines sinusförmigen Signals .....	126
C Ergänzungen zu Klassifikationsverfahren .....	128
C1 Mahalanobis-Abstandsmaß .....	128
C2 Parametrische Zugehörigkeitsfunktion .....	129
C3 Multilayer-Perzeptron, Backpropagation-Algorithmus .....	131
D Frequenzbereich von Schlafspindeln .....	134
E Auswertungen zur Herzratenvariabilität .....	135
F Artefakterkennung .....	136
F1 Kennwert für Elektrodenabriß .....	136
F2 Unabhängigkeit des Kennwertes für Bewegungsartefakt von der Verstärkung des EKG-Signals .....	137
F3 Kennwerte zur Artefakterkennung im EKG-Signal .....	139
G Referenz- und Testmuster für Klassifikation von Schlafstadien .....	141
H Klassifikationsergebnisse .....	143
H1 Abstandsklassifikator .....	143
H2 Fuzzy-Klassifikator .....	144
H3 Multilayer-Perzeptron .....	145
H4 Hypnogramme der Referenz- und Testdatensätze .....	148
I Schlafstadienbezogene Atemmustersauswertung .....	153
J Technische Daten von POLDI-Connect .....	161
J1 Spezifikation der Hardware .....	163
J2 Konformitätsprüfung nach DIN VDE 0750-1:1996-03 .....	165
J3 Prüfung der Elektromagnetischen Verträglichkeit .....	166

# Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1: Vereinfachtes 10-20 System als Ableitschema des EEG für Säuglinge .....	9
Bild 2.2: EEG (C3-P3) während des ruhigen Schlafes .....	9
Bild 2.3: Spezifische Muster im EEG (K-Komplex, Schlafspindel, steile Vertex-Wellen) Ableitung von CZ gegen Referenzelektrode am Kinn.....	11
Bild 2.4: <i>Tracé alternant</i> eines sechs Tage alten Neugeborenen (C4-P4) .....	12
Bild 2.5: Anteil von <i>tracé alternant</i> während des ruhigen Schlafes.....	12
Bild 2.6: $\beta$ -Spindeln eines Säuglings (F4-C4) .....	13
Bild 2.7: Anteil von Schlafspindeln während des ruhigen Schlafes.....	13
Bild 2.8: Querschnitt durch das Auge.....	14
Bild 2.9: Ableitschema für das Elektrookulogramm im Schlaflabor der Vestischen Kinderklinik.....	15
Bild 2.10: Elektrookulogramm mit schnellen Augenbewegungen (REM).....	16
Bild 2.11: Elektrokardiogramm.....	17
Bild 2.12: Zentrale Apnoen von 3 bis 5 s Dauer, periodische und paradoxe Atmung.....	19
Bild 2.13: Gemischte und obstruktive Apnoen, paradoxe Atmung .....	20
Bild 2.14: Störung in Respirationssignalen Abdomen und Thorax, nasalem Luftstrom, EEG (F4-C4), EOG und EKG bei Bewegung des Patienten in der zweiten Hälfte des Signalabschnittes .....	23
Bild 3.1: Variation der Herzfrequenz in unterschiedlichen Schlafstadien .....	35
Bild 3.2: Typischer Schlafstadienverlauf eines gesunden, erwachsenen Menschen.....	36
Bild 3.3: Schlafstadienverlauf eines dreijährigen Kleinkindes.....	38
Bild 3.4: Anteil von REM- und NREM-Schlaf an der Gesamtzeit des Schlafes .....	39
Bild 4.1: Blockschema zur Klassifikation von Schlafstadien.....	45
Bild 4.2: Spektrum des EEG im ruhigen Schlaf (F4-C4).....	49
Bild 4.3: Spektrum des EEG im aktiven Schlaf (F4-C4) .....	50
Bild 4.4: Schlafspindel im EEG-Signal und zugehöriges Amplitudenspektrum .....	51
Bild 4.5: Merkmalsberechnung aus dem EEG-Signal .....	52

Bild 4.6: Verlauf der Kurzzeit-Effektivwerte für die vier EEG-Bänder .....	53
Bild 4.7: Typische Signalverläufe von schnellen Augenbewegungen .....	54
Bild 4.8: Merkmalberechnung für REM und Störimpulse .....	55
Bild 4.9: Schema der Merkmalberechnung und Klassifikation von REM.....	56
Bild 4.10: Verteilung von Impulsen im Merkmalraum.....	59
Bild 4.11: Anzahl schneller Augenbewegungen pro Epoche ( <i>REM</i> ) .....	61
Bild 4.12: EKG-Signal eines Säuglings.....	62
Bild 4.13: Verlauf der Herzratenvariabilität ( <i>HRV</i> ) während einer Nachtmessung .....	64
Bild 4.14: Bewegungsartefakt im EEG-Kanal (C3-P3) .....	65
Bild 4.15: Kurzzeitiger Elektrodenabriß eines EEG-Kanals (F4-C4).....	65
Bild 4.16: Bewegungsartefakt und Elektrodenabriß im EEG-Kanal (C3-P3).....	67
Bild 4.17: Elektrodenabriß im EKG, Kurzzeit-Standardabweichung .....	67
Bild 4.18: Bewegungsartefakt im EKG, Kurzzeit-Standardabweichung .....	68
Bild 4.19: Basislinienschwankungen im EKG .....	70
Bild 4.20: Eingangsg- und Ausgangsgrößen des Klassifikators .....	71
Bild 5.1: Vergleich der Reklassifikationsrate der Referenzmuster für die drei Klassifikatoren geometrischer Abstandsklassifikator (AKL), Fuzzy-Klassifikator (FUZ) und Multilayer-Perzeptron (MLP) .....	75
Bild 5.2: Vergleich der Klassifikationsrate der Testmuster für die drei Klassifikatoren geometrischer Abstandsklassifikator (AKL), Fuzzy-Klassifikator (FUZ) und Multilayer-Perzeptron (MLP) .....	76
Bild 5.3: Klassifikationsrate des Multilayer-Perzeptrons für die Testmuster .....	76
Bild 5.4: Hypnogramm eines 5 Monate alten Säuglings .....	77
Bild 5.5: Verlauf der Merkmale Effektivwerte des $\delta$ - und $\beta$ -Bandes, Anzahl der schnellen Augenbewegungen ( <i>REM</i> ) und Herzratenvariabilität ( <i>HRV</i> ) beim Wechsel des Schlafstadiums.....	78
Bild 5.6: Änderung der Reklassifikationsrate der Referenzmuster ohne Klasse <i>wach</i> gegenüber den Referenzmustern mit Klasse <i>wach</i> (Multilayer-Perzeptron) .....	80
Bild 5.7: Änderung Klassifikationsrate der Testmuster ohne Klasse <i>wach</i> gegenüber den Testmustern mit Klasse <i>wach</i> (Multilayer-Perzeptron) .....	81

Bild 5.8: Hypnogramm eines sechs Monate alten Säuglings .....	82
Bild 5.9: Apnoehistogramm.....	84
Bild 5.10: Apnoen pro Stunde (020695N2) .....	84
Bild 5.11: Anteil paradoxer und periodischer Atmung in % (020695N2).....	84
Bild 5.12: Apnoen pro Stunde (180695N3) .....	85
Bild 5.13: Anteil paradoxer und periodischer Atmung in % (180695N3).....	85
Bild 5.14: Apnoen pro Stunde für acht Datensätze .....	86
Bild 6.1: Vernetzung der Aufnahme- und Arbeitsplatzrechner in den Schlafboxen der Vestischen Kinderklinik Datteln .....	88
Bild 6.2: Polysomnographisches Diagnosesystem POLDI .....	89
Bild 6.3: Blockbild von POLDI-Connect .....	90
Bild 6.4: POLDI-Connect .....	92
Bild 6.5: Gemischte und obstruktive Apnoe.....	93
Bild 6.6: Statistische Kenngrößen und Histogramme für verschiedene Apnoetypen.....	94
Bild 6.7: Histogramm, statistische Kenngrößen und Abfälle der Herzfrequenz.....	95
Bild 6.8: Effektivwerte des $\delta$ - und $\beta$ -Bandes, schnelle Augenbewegungen, Herzratenvariabilität und Hypnogramm für eine Nachtmessung .....	96
Bild 6.9: Ansicht eines 30 s Ausschnittes neurophysiologischer Signale, vier EEG- und eine EOG-Ableitung.....	97
Bild C.1: Eindimensionale unsymmetrische Zugehörigkeitsfunktion.....	129
Bild C.2: Schema eines dreilagigen Multilayer-Perzeptron mit einer Zwischenschicht .	131
Bild C.3: Struktur eines künstlichen Neurons .....	132
Bild F.1: Bewegungsartefakt und Elektrodenabriß im EEG-Kanal (C3-P3).....	136
Bild J.1: ADU-Karte, Schaltereinstellungen.....	163
Bild J.2: Lichtwellenleiter-Schnittstelle, Schaltereinstellungen .....	164
Bild J.3: Funkstörfeldstärke von POLDI-Connect im Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz (Spitzenwertanzeige) .....	167

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Frequenzbänder des EEG.....	10
Tabelle 2.2: Ursachen für Artefakte im EEG .....	24
Tabelle 3.1: Konventionelle Systeme für die Polysomnographie.....	28
Tabelle 3.2: Physiologische Signale für eine polysomnographische Untersuchung im Schlaflabor mit Angabe des Frequenz- und Wertebereiches .....	31
Tabelle 3.3: Merkmale für die Schlafstadienerkennung bei Erwachsenen .....	37
Tabelle 3.4: Merkmale für die Schlafstadienerkennung beim Säugling.....	40
Tabelle 4.1: Klassifikationsrate der Testdaten für REM-Klassifikator .....	60
Tabelle 4.2: Herzratenvariabilität im aktiven und ruhigen Schlaf.....	63
Tabelle 5.1: Risikogruppe der Säuglinge und Kleinkinder für die einzelnen Registrierungen.....	74
Tabelle 5.2: Statistische Auswertung der Atemmuster bezogen auf das Schlafstadium ..	83
Tabelle 6.1: Abgeleitete physiologische Signale im Schlaflabor.....	87
Tabelle A.1: Aufbau der Patienten-ID .....	125
Tabelle D.1: Dominante Frequenzen von Schlafspindeln.....	134
Tabelle E.1: Herzratenvariabilität im aktiven und ruhigen Schlaf.....	135
Tabelle F.1: Kurzzeit-Standardabweichungen für 30 s Zeitabschnitt des EEG.....	136
Tabelle F.2: Kennwerte für Artefakterkennung im EKG .....	139
Tabelle G.1: Registrierungen für den Referenzdatensatz.....	141
Tabelle G.2: Verteilung der Muster des Referenzdatensatzes.....	141
Tabelle G.3: Registrierungen für den Testdatensatz.....	142
Tabelle G.4: Verteilung der Muster des Testdatensatzes.....	142
Tabelle H.1: Reklassifikationsrate des Referenzdatensatzes (Abstandsklassifikator)....	143
Tabelle H.2: Klassifikationsrate des Testdatensatzes (Abstandsklassifikator) .....	143
Tabelle H.3: Reklassifikationsrate des Referenzdatensatzes (Fuzzy-Klassifikator).....	144
Tabelle H.4: Klassifikationsrate des Testdatensatzes (Fuzzy-Klassifikator) .....	144
Tabelle H.5: Reklassifikationsrate des Referenzdatensatzes (Multilayer-Perzeptron)...	145
Tabelle H.6: Klassifikationsrate des Testdatensatzes (Multilayer-Perzeptron) .....	145

Tabelle H.7: Reklassifikationsrate des Referenzdatensatzes ohne Klasse <i>wach</i> (Multilayer-Perzeptron).....	146
Tabelle H.8: Klassifikationsrate des Testdatensatzes ohne Klasse <i>wach</i> (Multilayer- Perzeptron).....	146
Tabelle H.9: Änderung der Reklassifikationsrate des Referenzdatensatzes ohne Klasse <i>wach</i> gegenüber dem Referenzdatensatz mit Klasse <i>wach</i> (Multilayer-Perzeptron).....	147
Tabelle H.10: Änderung Klassifikationsrate des Testdatensatzes ohne Klasse <i>wach</i> gegenüber dem Testdatensatz mit Klasse <i>wach</i> (Multilayer-Perzeptron).....	147
Tabelle J.1: Verstärkung der ADU-Eingangverstärker (J1x).....	163
Tabelle J.2: Eigenschaften der ADU-Eingangverstärker (J2x, P1x) .....	163
Tabelle J.3: Grenzfrequenz des ADU-Eingangsfilters.....	163
Tabelle J.4: Basisadresse der ADU-Karte .....	164
Tabelle J.5: Basisadresse der Lichtwellenleiter-Schnittstelle.....	165
Tabelle J.6: Interrupt der Lichtwellenleiter-Schnittstelle .....	165