

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xvii</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>xxv</b>
<b>Symbole</b>	<b>xxvii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Prävention von Herz-Kreislauf-Erkrankungen . . . . .	1
1.1.1 Monitoring des Gefäßsystems . . . . .	2
1.1.2 Relevanz der Information der PW . . . . .	2
1.1.3 Limitationen der Blutdruckmessung . . . . .	3
1.1.4 PW-Monitoring zur Prävention . . . . .	4
1.2 Eigener Beitrag und Ziel . . . . .	4
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	6
<b>2 Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>7</b>
2.1 Medizinische Relevanz . . . . .	7
2.1.1 Historischer Hintergrund der PW-Analyse . . . . .	8
2.1.2 Prädiktor für Gefäßerkrankungen . . . . .	10
2.1.3 Physiologie der arteriellen Gefäßfunktion . . . . .	11
2.1.4 Anatomie des Unterarms . . . . .	15
2.1.5 PW-Laufzeit als Modellparameter . . . . .	18
2.1.6 Alternativer Ableitort für die Pulsoximetrie . . . . .	22
2.1.7 Zusammenfassung . . . . .	23
2.2 Sensorik zur PW-Erfassung . . . . .	24
2.2.1 Druckpulsbasierte Methoden . . . . .	24
2.2.2 Flusspuls-basierte Methoden . . . . .	27
2.2.3 Volumenpuls-basierte Methoden . . . . .	30
<b>3 Eigener Beitrag - Idee und Realisierung</b>	<b>39</b>
3.1 Forschungsziel . . . . .	40
3.2 Überblick . . . . .	41

<b>4 Optisch-transmissives Sensorsystem</b>	<b>43</b>
4.1 Aufgabe und Ziel . . . . .	44
4.2 Erste PPG-Sensor-Entwicklungen . . . . .	46
4.2.1 Prototyp "Life Status Sensor" . . . . .	46
4.2.2 Prototyp "Wrist-Pleth-V1" . . . . .	47
4.3 Systemanforderungen . . . . .	49
4.3.1 Lichtquelle . . . . .	49
4.3.2 Photoempfängerzweig . . . . .	52
4.3.3 Strahlenschutz . . . . .	54
4.4 Mehrkanal-Sensor . . . . .	54
4.4.1 Systemaufbau . . . . .	55
4.4.2 Mikrocontroller-Modul . . . . .	57
4.4.3 Ansteuerung der Lichtquelle . . . . .	57
4.4.4 Photoelektrischer Eingangszweig . . . . .	60
4.4.5 LED-PD-Kanalzuordnung . . . . .	65
4.4.6 Ermittlung der Signalpegel . . . . .	67
4.5 Einkanal-Sensor . . . . .	68
4.5.1 Armbandfixierbare Sensorik . . . . .	69
4.5.2 Elektronikmodul . . . . .	70
4.6 Labormessplatz . . . . .	70
4.6.1 Messtechnisches System . . . . .	71
4.6.2 Lichtquelle . . . . .	72
4.6.3 Empfängerzweig . . . . .	73
4.6.4 Messgeräte . . . . .	73
<b>5 Bewertung von PW-Signalen</b>	<b>75</b>
5.1 Aufgabenstellung . . . . .	75
5.2 Verfahren zur PW-Analyse . . . . .	76
5.2.1 Detektion von Referenzpunkten . . . . .	77
5.2.2 Die diskrete Wavelet-Transformation . . . . .	78
5.3 Datenbank mit Signalepisoden . . . . .	80
5.3.1 Kriterien der Identifikation . . . . .	80
5.3.2 Beispiele von Signalepisoden . . . . .	81
5.4 Algorithmus zur PW-Bewertung . . . . .	81
5.5 Signalvorverarbeitung . . . . .	82
5.5.1 Entfernung Trendwanderung . . . . .	83
5.5.2 Entfernung höherfrequenten Rauschens . . . . .	86
5.6 Merkmalsakquisition . . . . .	88
5.6.1 SNR aus Vorverarbeitung . . . . .	88
5.6.2 GFP mittels FT . . . . .	89
5.6.3 ARP mithilfe Peak-Detektion und Haar-Wavelet . . . . .	91
5.6.4 Korrelation segmentierter Pulsszyklen . . . . .	99
5.6.5 AUC segmentierter Pulsszyklen . . . . .	100
5.7 Klassifikation . . . . .	102
5.7.1 Verfahren zur Klassifikation . . . . .	102

5.7.2	Nächster-Nachbar-Klassifikator (KNN) . . . . .	103
5.7.3	Linear-Diskriminanz-Analyse (LDA) . . . . .	104
5.7.4	LDA nach Fischer (FLDA) . . . . .	105
5.8	K-Means-Clusteranalyse . . . . .	106
<b>6</b>	<b>Modelle zur Lichtausbreitung</b>	<b>109</b>
6.1	Lichtausbreitung im Gewebe . . . . .	110
6.1.1	Das bio-optische Fenster des Gewebes . . . . .	110
6.1.2	Hämoglobin und Cytochromoxidase . . . . .	111
6.2	Theorie multipler Streuvorgänge . . . . .	111
6.2.1	Strahlungstransportgleichung . . . . .	112
6.2.2	Erweitertes Lambert-Beer-Gesetz . . . . .	114
6.3	Modellvarianten . . . . .	117
6.3.1	Multi-Wellenlängenmessung . . . . .	117
6.3.2	Multi-Probandenmessung . . . . .	119
6.3.3	Zeitvariante Weglängen . . . . .	120
6.3.4	Auswahl der Modellvariante . . . . .	122
6.4	MRT-PPG-Studie . . . . .	122
6.4.1	Motivation . . . . .	122
6.4.2	Ziel und Inhalt . . . . .	123
6.4.3	Studienprotokoll . . . . .	124
6.4.4	Bester PW-Signal-Ableitor . . . . .	125
6.4.5	MRT am Unterarm . . . . .	125
6.5	Modell minimaler optischer Pfad . . . . .	128
6.5.1	Motivation . . . . .	128
6.5.2	Anatomie des Unterarms . . . . .	130
6.5.3	Minimale Pfadlängen . . . . .	133
6.5.4	Definition des Modells . . . . .	135
6.5.5	Implementierung . . . . .	137
6.5.6	Limitationen . . . . .	140
6.6	MCS der Lichtausbreitung . . . . .	141
6.6.1	Definition MCS . . . . .	141
6.6.2	MCS der Photonenausbreitung . . . . .	142
6.6.3	Planares Schichtenmodell . . . . .	144
6.6.4	Zylindrisches Unterarmmodell . . . . .	147
<b>7</b>	<b>Messungen und Ergebnisse</b>	<b>151</b>
7.1	Validierung sensorischer Methoden . . . . .	151
7.1.1	Anforderungsanalyse . . . . .	152
7.1.2	Messgeräte . . . . .	152
7.1.3	Studie zur Praktikabilität . . . . .	153
7.1.4	Studie zur Bewegungstoleranz . . . . .	154
7.1.5	Gesamtbewertung . . . . .	159
7.2	PW-Verteilung in MKS-Messungen . . . . .	160
7.2.1	Amplituden nach Probanden . . . . .	161
7.2.2	Amplituden nach PD- und LED-Position . . . . .	162

7.2.3	Amplituden nach Sensorgeometrie . . . . .	165
7.2.4	Zusammenfassung . . . . .	167
7.3	Bewertung von PW-Signalen . . . . .	168
7.3.1	Relevanz der Merkmale . . . . .	168
7.3.2	Klassifikationsergebnisse . . . . .	169
7.3.3	Ressourcenbedarf der Verfahren . . . . .	175
7.3.4	Zusammenfassung . . . . .	182
7.4	Messung der Gesamtintensitäten . . . . .	184
7.4.1	Messtechnischer Aufbau . . . . .	184
7.4.2	Fremdlicht, Stör- und Rausch-Signale . . . . .	185
7.4.3	Intensitätsprofile des Unterarmumfangs . . . . .	186
7.4.4	Intensitätswerte aus Signalepisoden . . . . .	188
7.4.5	PW-Anteile in Gesamtintensitäten . . . . .	191
7.5	Verifikation Modell MINOP . . . . .	191
7.5.1	Verifikation mit dem Wechselanteil . . . . .	192
7.5.2	Verifikation mit der Gesamtintensität . . . . .	195
7.5.3	Verifikation mithilfe der MCS . . . . .	198
7.6	Verifikation des Zylindermodells . . . . .	199
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>205</b>
<b>A</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>213</b>
	Abbildungsverzeichnis . . . . .	215
	Tabellenverzeichnis . . . . .	221
	Index . . . . .	223
	Literaturverzeichnis . . . . .	225
<b>B</b>	<b>Tabellen</b>	<b>235</b>
B.1	Innenradien/Blutflussgeschwindigkeit . . . . .	235
B.2	Parameter zur Blutdruckapproximation . . . . .	236
B.3	Vergleich von LED-Bauelementen . . . . .	238
B.4	MINOP-Weglängen . . . . .	239
B.5	Mittlere Optische Intensitäten . . . . .	240
B.6	Intensitätsprofile der Probanden . . . . .	241
B.7	Priorisierung sensorischer Methoden . . . . .	242
<b>C</b>	<b>Verfahren</b>	<b>243</b>
C.1	Signalvorverarbeitung . . . . .	244
C.2	Merkmalsgewinnung . . . . .	245
C.2.1	Verfahren basierend auf der Peak-Detektion . . . . .	245
C.2.2	Verfahren basierend auf DHWT . . . . .	246
C.2.3	Vergleich beider Verfahren . . . . .	246
C.2.4	Flussplan zur Peak-Detektion mithilfe der DHWT . . . . .	247
C.3	Verfahren zur Klassifikation . . . . .	248
C.4	Clusteranalyse zur Qualitätsbewertung . . . . .	248
C.5	Vergleich der Filter-Methoden . . . . .	249

C.6	Validierung der Sensor-Methoden . . . . .	249
C.7	MINOP-Modellparameter . . . . .	250
C.7.1	Berechnung transmittierter Intensitäten . . . . .	250
C.7.2	MINOP-Modell . . . . .	252
C.8	MCS-Modellentwicklung . . . . .	254
C.8.1	MCS-Schichtenmodell . . . . .	254
C.8.2	MCS-Zylindermodell . . . . .	257
<b>D</b>	<b>Dokumente</b>	<b>259</b>
D.1	PW-Verlauf im Alter . . . . .	259
D.2	Strahlenschutz . . . . .	260
D.3	Schaltplan MKS-Prototyp . . . . .	268
D.3.1	Zentralbaugruppe . . . . .	268
D.3.2	LED-Treiber . . . . .	269
D.3.3	Photoempfänger . . . . .	269
D.4	Messplatz-LED-Treiberverstärker . . . . .	274
D.5	Signalbeispiele EKS . . . . .	275
D.6	Validierung sensorischer Methoden . . . . .	276
D.6.1	Geräte-Repräsentanten . . . . .	276
D.6.2	Studie zur Praktikabilität . . . . .	280
D.6.3	Studie zur Bewegungsrobustheit . . . . .	281
D.6.4	Zusammenfassende Bewertung . . . . .	294
D.7	Intensitätsprofile Probanden . . . . .	296
D.8	Ressourcenbedarf der Verfahren . . . . .	298
D.8.1	Signalvorverarbeitung . . . . .	298
D.8.2	Merkmalsakquisition . . . . .	303
<b>E</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>307</b>
E.1	Wavelet-Transformation . . . . .	307
E.1.1	Kontinuierliche Wavelet-Transformation (CWT) . . . . .	308
E.1.2	Diskrete Wavelet-Transformation (DWT) . . . . .	310
E.2	Clusterverifikation . . . . .	314