

# 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</b>	<b>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</b>	<b>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 Pulszyklen	99
5.6.5	AUC segmentierter Pulszyklen	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-Ableitort	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 Photonen ausbreitung	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