

# Inhaltsverzeichnis

## Abkürzungsverzeichnis

xvii

<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Stand der Technik . . . . .	2
1.2 Veröffentlichungen . . . . .	5
1.3 Gliederung . . . . .	6
<b>2 Bioimpedanzmessungen</b>	<b>7</b>
2.1 Elektrische Impedanz . . . . .	7
2.2 Bioimpedanz und der Elektroden-Hautübergang . . . . .	8
2.2.1 Zwei-Elektroden-Messung . . . . .	14
2.2.2 Vier-Elektroden-Messung . . . . .	15
2.2.3 Gleichtaktspannungen . . . . .	16
2.3 Messwertaufnahme . . . . .	17
2.3.1 Abtastung . . . . .	18
2.3.2 Monofrequente Anregungen . . . . .	20
2.3.3 Breitbandanregungen . . . . .	20
2.3.4 Einfrequenz-Demodulation . . . . .	23
2.3.5 Mehrfrequenz-Demodulation auf Basis der Diskreten Fouriertransformation (DFT) . . . . .	25
2.3.6 Digital-Analog- / Analog-Digital-Umsetzung . . . . .	27
2.4 Mögliche Messprinzipien . . . . .	29
2.4.1 Strom- oder Spannungsanregung . . . . .	30
2.4.2 Messung des Anregungsstroms . . . . .	31
2.4.3 Vier-Elektroden-Bioimpedanzmessung mit asymmetrischer Stromeinspeisung und -Messung . . . . .	32
2.4.4 Gleichtaktfreie Strom- und Spannungsmessung . . . . .	33
2.4.5 Symmetrische Stromeinspeisung zur gleichtaktfreien Spannungsmessung . . . . .	34
2.4.6 Symmetrische Stromeinspeisung mit Transformator . . . . .	35
2.5 Einflüsse auf die Messunsicherheit . . . . .	36
2.5.1 Abschätzung der Messunsicherheit der Vier-Elektroden-Messung . . . . .	37
2.5.2 Abschätzung des Gleichtaktfehlers . . . . .	38
2.5.3 Quantisierungsrauschen . . . . .	39

2.5.4	Überabtastung . . . . .	42
2.5.5	Jitter . . . . .	44
2.5.6	Der Einfluss von Einschwingvorgängen auf das Messergebnis . . . . .	45
2.6	Regulatorische Anforderungen . . . . .	47
<b>3</b>	<b>Elektroimpedanztomographie (EIT)</b>	<b>49</b>
3.1	Physikalische Modellierung . . . . .	49
3.2	Messstrategien . . . . .	50
3.2.1	Statische und Differenzbildgebung . . . . .	51
3.2.2	Messprotokolle und die Anzahl der möglichen Transferimpedanzen . . . . .	52
3.3	Messwertaufnahme . . . . .	55
3.3.1	Kategorisierung von EIT-Systemen . . . . .	56
3.3.2	Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines seriellen EIT- Systems . . . . .	58
3.3.3	Benötigte Messzeit . . . . .	59
3.3.4	Leistungsbewertung . . . . .	61
3.4	Rekonstruktion der Leitwertverteilung . . . . .	63
3.4.1	Vorwärtsproblem . . . . .	66
3.4.2	Inverses Problem . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Bioimpedanzmesssystem (BMS)</b>	<b>73</b>
4.1	Anforderungsanalyse . . . . .	73
4.2	Grundlegende Systemarchitektur . . . . .	75
4.3	Anregungsgenerierung . . . . .	80
4.3.1	Generierung des digitalen Anregungssignals . . . . .	81
4.3.2	Generierung des Konstantstroms . . . . .	82
4.3.3	Mögliche Anregungsströme und damit messbare Impedanzen . . . . .	87
4.4	Messwertaufnahme . . . . .	88
4.5	Getriebener Kabelschirm . . . . .	90
4.6	Firmware und Interface-Software . . . . .	92
4.7	Systemverifikation . . . . .	96
4.7.1	Elektrisches Ersatzschaltbild . . . . .	97
4.7.2	Theoretische und messtechnische Abschätzung des Signal-Rausch-Abstandes . . . . .	101
4.7.3	Der Einfluss des FIR-Filters vor der FFT . . . . .	104

4.7.4	Kalibrierung . . . . .	105
4.7.5	Verbesserung der Schirmung . . . . .	106
4.7.6	Langzeitstabilität und Standardabweichungen . . . . .	108
4.8	Messungen . . . . .	110
4.8.1	R + R    C – Phantom . . . . .	110
4.8.2	Bioimpedanzmessung an einer Kartoffel . . . . .	111
4.8.3	Messungen zur zeitlich veränderlichen Bioimpedanz . . . . .	113
4.8.4	Erfassung von realen Elektroden-Haut-Übergangsimpedanzen (ESI) . . . . .	117
4.9	Abschließende Bewertung . . . . .	123
<b>5</b>	<b>Mehrfrequenz-EIT-System</b>	<b>125</b>
5.1	Anforderungsanalyse . . . . .	125
5.2	Grundlegende Systemarchitektur . . . . .	126
5.3	Multiplexing . . . . .	130
5.4	Systemverifikation . . . . .	133
5.4.1	Theoretische und messtechnische Abschätzung des Signal-Rausch-Abstandes . . . . .	135
5.4.2	Abschätzungen zur Genauigkeit . . . . .	136
5.4.3	Messung der Kanalabweichungen . . . . .	139
5.4.4	Messtechnische Verifizierung der Genauigkeit . . . . .	140
5.5	Messungen . . . . .	144
5.5.1	Aufbau und Messung eines Mikrotankphantoms . . . . .	144
5.5.2	Aufbau und Adaption eines Tankphantoms . . . . .	147
5.5.3	Signalqualität am Tankphantom mit 16 Elektroden . . . . .	151
5.5.4	Signalqualität am Tankphantom mit 32 Elektroden . . . . .	155
5.5.5	Differenzbildgebung am Tankphantom . . . . .	157
5.5.6	Messungen am Thorax . . . . .	160
5.6	Abschließende Bewertung . . . . .	166
<b>6</b>	<b>EIT-System basierend auf Aktivelektroden</b>	<b>171</b>
6.1	Anforderungsanalyse . . . . .	171
6.2	Systemarchitektur . . . . .	172
6.2.1	Aktivelektrode . . . . .	175
6.2.2	Aktivelektroden-Controller und Bussystem . . . . .	177
6.3	Abschließende Bewertung . . . . .	180

<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>183</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>187</b>