Broadband Measurement Techniques for Impedance Spectroscopy- and Time Domain Reflectometry Applications



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Broadband Measurement Techniques for Impedance Spectroscopy- and Time Domain Reflectometry Applications

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Technischen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

> vorgelegt von Dennis Trebbels

Freiburg im Breisgau 2012

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

 Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2013 Zugl.: Freiburg im Breisgau, Univ., Diss., 2012

978-3-95404-360-6

Dekan

Prof. Dr. Yiannos Manoli

Referenten

Prof. Dr. Roland Zengerle Prof. Dr. Yiannos Manoli

Tag der Prüfung

12.02.2013

Dennis Trebbels HSG-IMIT Wilhelm-Schickard-Str. 10 78052 Villingen-Schwenningen

 CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2013 Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen Telefon: 0551-54724-0 Telefax: 0551-54724-21 www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.
1. Auflage 2013 Gedruckt auf säurefreiem Papier.

978-3-95404-360-6

Contents

Lis	st of	Figures		iii
Lis	st of	Publica	tions	vii
Zι	ısamr	nenfass	ung	xi
Ał	ostrac	t		xiii
1	Intro 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6	Impeda Impeda Broadl Labora Electro State o System	n ance Basics	1 2 4 6 10 11 14
2	Bior 2.1 2.2	nedical Physio Hemat 2.2.1 2.2.2 2.2.3 2.2.4 2.2.5 2.2.6 2.2.7 2.2.8 2.2.9 2.2.10	Applications logical Background ocrit Measurement Introduction to Hematocrit Measurement Existing Measurement Techniques New Capacitive System Concept Finite Element Method Simulation Sensor Prototypes Laboratory Measurement Results Temperature Drift Measurement Measurement at different Flow Rates	19 20 24 25 26 26 27 33 35 36 39 42 43
	2.3	2.2.11 Tissue 2.3.1 2.3.2 2.3.3 2.3.4 2.3.5 2.3.6 2.3.7 2.3.8 2.3.9 2.3.10 2.3.11	Summary and ConclusionsDiscrimination for Needle and Cannula GuidanceIntroduction and OverviewExisting Needle Guidance MethodsExisting Needle Guidance based on Step-Pulse MeasurementsNeedle Guidance based on Step-Pulse MeasurementsFEM Simulation of a solid Coaxial NeedleLaboratory Measurements with a solid Coaxial NeedleConclusions for the Step-Pulse Signal based Coaxial Needle ConceptImproved System Concept and Model for a Coaxial CannulaFEM Simulation of the hollow Coaxial Cannula TipChirp Measurement Signals and ProcessingLaboratory Measurement SetupLaboratory Measurement SetupLaboratory Measurement Setup	$\begin{array}{c} 44\\ 45\\ 46\\ 46\\ 47\\ 49\\ 50\\ 52\\ 53\\ 55\\ 57\\ 59\\ 61\\ \end{array}$

i Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

		2.3.12	Measurement Results	. 63
		2.3.13	Evaluation and Discussion of Measurement Results	. 65
		2.3.14	Tissue Classification	. 66
		2.3.15	Conclusions	. 69
3	Tim	e Dom	ain Reflectometry Applications for Moisture Measurement	71
	3.1	State of	of the Art in TDR-Moisture-Measurement	. 72
	3.2	Moistu	re Detection in Buildings	. 75
		3.2.1	Problem Description and proposed Solution	. 75
		3.2.2	Laboratory Experiments and Measurement Results	. 77
		3.2.3	Installation of a TDR Measurement System in a Building	. 79
	3.3	Groun	dwater Monitoring	. 79
4	Broa	adband	Measurement Electronics	83
	4.1	Miniat	urized Time Domain Reflectometer	. 85
		4.1.1	System Concept	. 86
		4.1.2	Sampling Concept	. 87
		4.1.3	Electronic Circuit	. 92
		4.1.4	Laboratory Experiments	. 95
		4.1.5	Conclusions	. 101
	4.2	High F	Precision Phase Measurement	. 102
		4.2.1	Overview and Target Application	. 103
		4.2.2	State of the Art in Broadband Phase Measurement Circuits	. 103
		4.2.3	Delta Modulator based Sampling Circuit Concept	. 103
		4.2.4	Sampling Concept for Low and High Frequency Signals	. 106
		4.2.5	Prototype Circuit and Test Results	. 107
		4.2.6	Conclusions	. 108
	4.3	Fast C	hirp Signal based Impedance Measurement Platform	. 109
		4.3.1	Potential Target Applications for fast broadband Impedance Mea-	
			surement	. 109
		4.3.2	System Concept for measuring with Chirp Signals	. 109
		4.3.3	Signal Processing of the Chirp Signals	. 110
		4.3.4	Prototype Circuits and Test Measurements	. 112
		4.3.5	Discussion and Conclusions	. 116
5	Con	clusion	s of the Thesis and Outlook	117
List of Abbreviations 1				
Bibliography 1				

List of Figures

1.1	Parallel Plate Test Cell and Equivalent Schematic	2
1.2	Sinusoidal Voltage and Current Signals for Complex Impedances	4
1.3	Bode Diagram of a lossy Dielectric	5
1.4	Nyquist Diagram of a lossy Dielectric	5
1.5	Sine Wave Signal	7
1.6	Multisine Signal	7
1.7	Linear Chirp Signal	8
1.8	Square Wave Signal	9
1.9	Maximum Length Sequence (MLS) Signal	9
1.10	LCR Bridge and Network Analyser	10
1.11	Measurement Electrodes	11
1.12	Capacitive Test Cells	12
1.13	Coaxial Probe	12
1.14	Transmission Line Measurement	13
1.15	Free Space Measurement Setup	13
2.1	Dispersion of Biological Tissue	20
2.2	Nyquist-Plot of a Biological Tissue	21
2.3	Equivalent Circuit of a Cell	21
2.4	Bode Diagram of an ideal Cell Model	22
2.5	Current Paths through Tissue	22
2.6	3D View of a Tissue Transfer Function	23
2.7	Simplified Dialysis Machine Circuit	25
2.8	Electrode Designs for HCT Measurement	27
2.9	Field Patterns of Half-Shell Electrodes	28
2.10	Equivalent Schematic for Half-Shell Electrodes	29
2.11	Potential between Half-Shell Electrodes	29
2.12	Capacitance as a Function of the Electrode Angle	30
2.13	Relative Measurement Effect as a Function of the Electrode Angle	30
2.14	Connection Scheme for Ring Electrodes	31
2.15	Equivalent Schematic for Ring Electrodes	31
2.16	Electric Field Pattern for Ring Electrodes	32
2.17	Capacitance and Sensitivity of the Ring Electrode Design	33
2.18	Deformation of a PVC Tubing inside the HCT Sensor	34
2.19	Prototype HCT Sensor with Half-Shell Electrodes	34
2.20	Prototype HCT Sensor with Ring Electrodes	35
2.21	Laboratory Measurement Setup for the HCT Sensor	36
2.22	HCT Sensor Capacitance as a Function of the Frequency	37
2.23	HCT Sensor Capacitance as a Function of the HCT Value	37
2.24	HCT Sensor Phase as a Function of the Frequency	38
2.25	HCT Sensor Phase as a Function of the HCT Value	38
2.26	Temperature Drift of the PVC Tubing	40

iii

2.27	Sensor Capacitance as a Function of the Temperature	40
2.28	Electrode Polarization Effect	40
2.29	Phase Angle of the HCT Sensor as a Function of the Temperature	41
2.30	Phase Angle as a Function of the Frequency for 4 different HCT Values .	41
2.31	Phase Angle as a Function of the HCT Values for different Temperatures .	41
2.32	Capacitance as a Function of the Flow Rate for three HCT Values	42
2.33	Phase Angle as a Function of the Flow Rate for three HCT Values	42
2.34	Drawing of a solid Coaxial Needle	48
2.35	TDR Laboratory Measurement Setup for Coaxial Needles	48
2.36	Photograph of a Coaxial Needle Tip	48
2.37	Equivalent Schematic for Tissue as complex Load on the Needle Tip	48
2.38	Spectrum of a Step-Pulse Signal	49
2.39	FEM Model of the Coaxial Needle Tip	49
2.40	FEM Simulation Results for a Coaxial Needle Tip	49
2.41	FEM Simulation Result for a solid Coaxial Needle	50
2.42	TDB Traces of different Tissues on the Needle Tip	51
2 43	Comparison of different Amplitudes of tested Tissues	51
2.44	Drawing of the hollow Coaxial Prototype Cannula	53
2.45	Electrical Model of the Needle Tip	54
2.46	Electrode Polarization Effect	55
2.47	FEM Simulation of the Current Density at the Cannula Tip	56
2.48	Losses as a Function of the Distance to the Cannula Tip	56
2.49	Linear Chirp Signal in Time Domain	57
2.10 2.50	Linear Chirp Signal in Frequency Domain	57
2.50 2.51	Chirp Signal Processing Concept	58
2.52	Block Schematic of the Chirp Signal Measurement Setup	59
2.53	Illustration of Voltage and Current Sensing	59
2.54	Photograph of the Chirp Signal Measurement Setup	60
2.55	Fouvalent Circuit Model for Calibration	61
2.56	Measurement Curves before and after Calibration and Correction	61
2.57	Coaxial Needle Prototypes	62
2.58	Transfer Function of Blood at the Cannula Tip	63
2.50	Transfer Function of Fat at the Cannula Tip	63
2.00	Transfer Function of Muscle at the Cannula Tip	63
2.00	Cannula Positions within Spatial Resolution Experiment	64
2.01 2.62	Phase Signal at a Boundary of Fat to Muscle Tissue	64
2.62	Measured Values as a Function of Insertion Speed	64
2.00 2.64	Transfer Functions of different Tissues	66
2.01	Correlation Coefficients for the Impedance Modulus	67
2.00 2.66	Correlation Coefficients for the Impedance Modulus in Detail	67
2.00 2.67	Correlation Coefficients for the Impedance Phase	67
2.01 2.68	Correlation Coefficients for the Impedance Phase in Detail	67
2.00 2.60	Table showing the Impact of Mechanical Tolerances	68
2.09	Table showing the impact of Mechanical Tolerances	00
3.1	Flat Ribbon Cable for TDR Measurements	72
3.2	Equivalent Electrical Schematic of the Flat Ribbon Cable	72
3.3	Electric Field Strength of a Flat Ribbon Cable	72
3.4	Equipotential Field Lines of a Flat Ribbon Cable	72
3.5	Some TDR-meters available on the Market	73
3.6	Block Schematic of a typical TDR Field Measurement Setup	74

List of Figures

3.7	Examples of constructed TDR-meter Field Stations	. 74
3.8	Desired Design of a Miniaturized TDR-System	. 74
3.9	TDR System Installation for Moisture Detection in Buildings	. 76
3.10	Prototype TDR-meter for Installation into a Building	. 77
3.11	Measured TDR Traces for Water Detection	. 78
3.12	TDR Trace Raw Data and Filtered Data	. 78
3.13	Installation of a flat Ribbon Cable in a Building	. 79
3.14	TDR-meter Installation at a Borehole	. 80
3.15	Developed Miniaturized TDR-Meter in a Water Resistant Housing	. 80
3.16	Measured TDR-Trace as a Sample Measurement Result in a Borehole	. 81
3.17	Histogram for multiple Groundwater Level Measurements	. 81
4.1	TDR Laboratory Setup with a Signal Generator and an Oscilloscope	. 86
4.2	Equivalent Schematic for the TDR Transmission Line	. 86
4.3	Typical TDR Waveforms for Step Pulse Excitation	. 87
4.4	Equivalent Time Sampling Scheme	. 87
4.5	Abstract Block Schematic Delta Modulator	. 88
4.6	Practical Block Schematic Delta Modulator	. 88
4.7	Acquisition Time vs. Pulse Frequency	. 89
4.8	Delta Frequency vs. Pulse Frequency	. 89
4.9	Frequency Limit by Line Length	. 90
4.10	Frequency Limit by Circuit Processing Time	. 90
4.11	Minimum Rise Time vs. Temporal Resolution	. 91
4.12	Maximum Frequency vs. Temporal Resolution	. 91
4.13	Minimum Rise Time vs. Amplitude Resolution	. 92
4.14	Prototype Circuit Board of the TDR-meter	. 93
4.15	Block Schematic of the developed TDR-meter	. 93
4.16	Line Driver Circuit Schematic	. 94
4.17	Comparison TDR-Traces	. 96
4.18	Amplitude Accuracy of Sampled Curves	. 97
4.19	Difference in Excitation Signal Amplitudes	. 97
4.20	Overview over Load Error	. 98
4.21	Measured Time Base Linearity	. 99
4.22	Jitter Histogram for different Frequencies	. 100
4.23	Typical Broadband Phase Measurement Circuit	. 104
4.24	Block Schematic of Delta Modulator based Phase Measurement	. 104
4.25	Simulation of Delta Modulator based Sampling of a Sine Wave	. 105
4.26	Trigger Principle in Undersampling Mode	. 106
4.27	Frequency Ranges for Oversampling and Undersampling Modes	. 107
4.28	Phase Measurement Prototype Circuit Board	. 107
4.29	Comparison of the DM-Circuit to a Laboratory Reference LCR-Meter .	. 108
4.30	Block Schematic of the Chirp Signal Measurement Platform	. 110
4.31	Frequency Resolution of the computed Spectrum	. 111
4.32	FFT Processing Time in the FPGA	. 113
4.33	Digital Circuit Board of the Chirp Measurement Platform	. 113
4.34	Analog Circuit Board of the Chirp Measurement Platform	. 114
4.35	Simulated Bode Diagram of the Test Circuit	. 115
4.36	Excited Chirp Signal in time domain and frequency domain	. 115
4.37	Comparison of Chirp Signal Measurement Results	. 116

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

List of Publications

Peer-reviewed journal papers

- <u>D. Trebbels</u>, F. Fellhauer, M. Jugl, G. Haimerl, M. Min, R. Zengerle; On-line Tissue Discrimination for Transcutaneous Needle Guidance Applications Using Broadband Impedance Spectroscopy IEEE Transactions on Biomedical Engineering, VOL. 59, NO 2, pp. 494-503, February 2012
- 2. <u>D. Trebbels</u>, A. Kern, F. Fellhauer, C. Huebner, R. Zengerle; **Miniaturized high resolution FPGA based Time Domain Reflectometer** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, accepted for publication, October 2012
- 3. <u>D. Trebbels</u>, R. Zengerle; **Capacitive On-line Hematocrit Measurement in Extracorporeal Circuits** IEEE Transactions on Biomedical Engineering, submitted July 2012
- M. Min, R. Land, T. Paavle, T. Parve, P. Annus, <u>D. Trebbels</u>; Broadband spectroscopy of dynamic impedances with short chirp pulses Physiological Measurement, Vol 32, Number 7, July 2011, pp. 945-958.

Peer-reviewed conference publications

- <u>D. Trebbels</u>, R. Zengerle, D. Hradetzky; Concepts for Non-Contact Hematocrit Measurement based on high precision Impedance Spectroscopy at low cost ISEMA 2009, 8th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, Conference Proceedings, pp. 183-189, Helsinki, June 1-5, 2009
- D. Trebbels, R. Zengerle, D. Hradetzky; Hematocrit Measurement A high precision on-line measurement system based on impedance spectroscopy for use in hemodialysis machines World Congress 2009, 11th International Congress of the IUPESM Medical Physics and Biomedical Engineering, IFMBE Proceedings 25/VII, pp. 247-250, Munich, September 7-12, 2009



List of Publications

- 3. D. Trebbels, D. Hradetzky, R. Zengerle; Capacitive on-line hematocrit sensor design based on Impedance Spectroscopy for use in hemodialysis machines IEEE EMBC 2009, 31st Annual International Conference of the IEEE EMBS, pp. 1208-1211, Minneapolis/USA, September 3-6, 2009
- 4. D. Trebbels, D. Woelki, R. Zengerle; High Precision Phase Measurement Technique for Cell Impedance Spectroscopy, ICEBI 2010, 14th International Conference on Electrical Bioimpedance, Journal of Physics: Conference Series 224 (2010) 012159, Gainesville/Florida, April 4-8, 2010
- 5. D. Trebbels, M. Jugl, R. Zengerle; Real-Time Cannula Navigation in Biological Tissue with high temporal and spatial resolution based on Impedance Spectroscopy, IEEE EMBC 2010, 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS, pp. 1886-1889, Buenos Aires, August 31-September 4, 2010
- 6. D. Trebbels, C. Huebner, R. Becker, R. Zengerle; Digital low-cost Time Domain Reflectometer Circuit optimized for use in Field Applications, AQUAMETRY 2010, 1st European Conference on Moisture Measurement, Conference Proceedings, pp. 174-181, Weimar, October 5-7, 2010
- 7. D. Trebbels, M. Jugl, R. Zengerle; Impedance Spectroscopy based Tissue Classification for the Navigation of a Cannula during Vessel Puncture, BMT 2010, 44th DGBMT Jahrestagung, Biomed Tech 2010, 55 (Suppl. 1), Rostock, October 5-8, 2010
- 8. D. Trebbels, F. Fellhauer, C. Huebner, R. Zengerle; Miniaturized TDR-meter for large scale Field Experiments ISEMA 2011, 9th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, Conference Proceedings, Kansas City, May 31 - June 3, 2011
- 9. D. Trebbels, M. Jugl, R. Zengerle; Fluid Compartment Estimation in Dialysis Patients by use of regional and continuous Bioimpedance Spectroscopy, BMT 2011, 45th DGBMT Jahrestagung, Freiburg, September 27-30, 2011
- 10. T. Paavle, M. Min, <u>D. Trebbels</u>; Low-Energy Chirps for Bioimpedance Measurement IEEE TSP2011, 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, Budapest, August 18-20, 2011

viii

\mathbf{Q}

Peer-reviewed workshops and symposia contributions

- <u>D. Trebbels</u>, M. Jugl, D. Anselmi, R. Zengerle; Miniaturized low-cost Time-Domain-Reflectometer circuit for wideband impedance spectroscopy measurement applications, IWIS 2010, 3rd International Workshop on Impedance Spectroscopy, Chemnitz, October 13-15, 2010
- D. Trebbels, M. Jugl, D. Anselmi, R. Zengerle; Digital chirp signal processing for broadband impedance spectroscopy - practical considerations for fast measurements, IWIS 2010, 3rd International Workshop on Impedance Spectroscopy, Chemnitz, October 13-15, 2010
- 3. <u>D. Trebbels</u>, M. Jugl, D. Anselmi, R. Zengerle; **Biological tissue classifica**tion for needle guidance - a fast impedance measurement method based on chirp signals, IWIS 2010, 3rd International Workshop on Impedance Spectroscopy, Chemnitz, October 13-15, 2010
- 4. <u>D. Trebbels</u>, M. Jugl, R. Zengerle; **Impedanzspektroskopie mittels Zeitbereichsreflektometrie: Einsatz des Delta-Modulations-Verfahrens zur Realisierung effizienter Messelektronik**, 15. Heiligenstaedter Kolloquium, Technische Systeme fuer die Lebenswissenschaften, Heilbad Heiligenstadt, September 27-29, 2010
- 5. <u>D. Trebbels</u>, M. Min; Fast FPGA based Chirp Signal Processing for Broadband Impedance Estimation, IWIS 2011, 4th International Workshop on Impedance Spectroscopy, Chemnitz, September 28-30, 2011
- <u>D. Trebbels</u>, F. Fellhauer, C. Huebner, R. Zengerle; Miniaturized self contained Spatial-TDR Field Measurement System, IWIS 2011, 4th International Workshop on Impedance Spectroscopy, Chemnitz, September 28-30, 2011

Patent applications related to this doctoral thesis

- 1. <u>D. Trebbels</u>, M. Jugl, R. Zengerle; Vorrichtung und Verfahren zur elektrischen und dielelektrischen Charakterisierung von biologischen Materialien unter Verwendung einer Reflexionsmessung; DE102010039797
- 2. <u>D. Trebbels</u>, M. Jugl, R. Zengerle; Vorrichtung und Verfahren zur elektrischen und dielektrischen Charakterisierung von biologischen Materialien unter Verwendung eines Chirp- oder MLS-Signals ; DE102010039790

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung der breitbandigen elektrischen Impedanzmessung, häufig auch Impedanzspektroskopie genannt, sowie verwandten breitbandigen Messmethoden wie der Zeitbereichsreflektometrie. Breitbandige Messungen der komplexen elektrischen Impedanz einer Probe werden bereits seit rund einem Jahrhundert erfolgreich eingesetzt, um charakteristische frequenzabhängige elektrische und dielektrische Materialeigenschaften zu ermitteln. Anhand gewonnener Messdaten und mittels geeigneter Auswerteverfahren und Modelle kann in vielen Fällen eine Aussage über den Zustand der Probe gemacht werden. Das potentielle Anwendungsgebiet der Impedanzspektroskopie und der verwandten Zeitbereichsreflektometrie umfasst fast alle Bereiche des täglichen Lebens und reicht von medizinischen, biologischen und chemischen Anwendungen über KFZ-, Industrie- und Umweltmesstechnik bis hin zur Pharmazie und Lebensmittelanalyse. Obwohl dieses Forschungs- und Arbeitsgebiet bereits seit langem bekannt ist und unzählige Publikationen existieren, gibt es bis heute vergleichsweise wenige technische Realisierungen in Form von Produkten. Ein Grossteil der publizierten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten behandelt theoretische Grundlagen und weist die prinzipielle Machbarkeit in einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen nach. In vielen Fällen ist zu beobachten, dass die bereits publizierten Ergebnisse auf der Basis von Laborversuchen mittels teurer und aufwendiger Labormesstechnik beruhen. Ein Nachweis der prinzipiellen Anwendbarkeit der Messmethode ist damit meist zwar geführt, zu einer Umsetzung in Form eines real nutzbaren Produktes kommt es jedoch in vielen Fällen aufgrund der hohen Kosten nicht. Neben den zahlreichen bereits untersuchten Anwendungsfällen gibt es auch immer noch viele Aufgaben- und Problemstellungen, die sich zwar mit Hilfe breitbandiger Messverfahren prinzipiell lösen lassen, aber noch nicht bzw. nicht ausreichend untersucht wurden. Viele dieser noch nicht untersuchten Anwendungsgebiete befinden sich in Marktsegmenten, die zusätzliche oder spezielle Anforderungen an entsprechende Produkte stellen wie z.B. eine miniaturisierte Bauform, energieeffizientes und batteriebetriebenes Messen und nicht zu letzt niedrige Kosten.

Die vorliegende Arbeit ist inhaltlich in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil beschäftigt sie sich mit der ausführlichen Untersuchung von drei praktischen Aufgabenstellungen. Zwei davon aus dem Bereich der Medizintechnik sowie eine weitere aus dem Bereich Feuchtemesstechnik. Im zweiten Teil der Arbeit werden neu entwickelte universelle elektronische Schaltungskonzepte und Messkonzepte erläutert, mit denen es möglich ist die untersuchten Anwendungen kostengünstig in reale Produkte zu überführen.

In der ersten medizintechnischen Anwendung wird ein kapazitiver Sensor entwickelt, der basierend auf Impedanzmessungen in der Lage ist, den Hämatokritwert (HCT) von Blut zu bestimmen. Besonderheit dieses Sensors ist, dass er in bestehenden Systemen mit extrakorporalen Blutkreisläufen von aussen an einem Schlauch angebracht werden kann, ohne direkten Kontakt zum Blut zu haben. Mit dem neu entwickelten Sensor wurde im Labor eine Messgenauigkeit von 4 % HCT erreicht bei einer Auflösung von etwa 0,1 % HCT. In der zweiten untersuchten medizintechnischen Anwendung wird biologisches Gewebe an der Spitze einer Kanüle während des dynamischen Einstechvorgangs impedanzspektroskopisch analysiert und klassifiziert. Dies ermöglicht eine genaue Positionierung der Kanülenspitze in einem bestimmten Zielgewebe mit minimalem technischem Auf-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden. Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

xi



Zusammenfassung

wand. Durch die Verwendung eines koaxialen Kanülenaufbaus wird eine hohe örtliche Auflösung erreicht die in etwa dem Durchmesser der Kanüle entspricht. Der Einsatz von kurzen Chirp-Signalen als Messsignal ermöglicht eine Gewebeerkennung innerhalb einer Mess- und Auswertezeit von unterhalb einer Millisekunde. Die dritte untersuchte Anwendung kommt aus dem Bereich der Feuchtemesstechnik. Hier wird mithilfe der Zeitbereichsreflektometrie eine ortsaufgelöste Erkennung des Wasserstandes von Grundwasser bzw. die Erkennung von eindringendem Fremdwasser in Gebäude realisiert. Die entwickelte Messelektronik ermöglicht durch den Einsatz geeigneter Abtast- und Auswerteverfahren eine Detektion von Wasser entlang der verwendeten Messleitung mit einer \ddot{o} rtlichen Auflösung im Bereich weniger Millimeter und einer Genauigkeit von etwa +/-3 cm.

Durch den universellen und modularen Aufbau und Charakter der entwickelten Elektroniken eignen sich diese darüber hinaus hervorragend auch zur Lösung weiterer messtechnischer Aufgaben in verwandten Themengebieten. Ziel der Schaltungsentwicklungen ist es, den Platzbedarf, die Stromaufnahme und die Kosten gegenüber dem aktuellen Stand der Messtechnik deutlich zu senken, so dass sich basierend auf den entwickelten Prototypen leicht anwendungsspezifische Produkte realisieren lassen. Obwohl die breitbandige Impedanzmesstechnik kein neues wissenschaftliches Arbeitsgebiet ist, herrscht derzeit immer noch ein grosser Mangel an miniaturisierter und kostengünstiger Messtechnik. In den letzten Jahren gab es jedoch insbesondere im Bereich der programmierbaren bzw. konfigurierbaren digitalen Logikschaltungen einigen technischen Fortschritt, so dass heute extrem leistungsfähige Bausteine zu sehr geringen Kosten zur Verfügung stehen. Die in dieser Arbeit entwickelten Schaltungskonzepte basieren auf dem Einsatz solcher programmierbarer Logikschaltungen. Die technischen Moglichkeiten der verwendeten Bausteine werden genutzt in Verbindung mit geeigneten Messsignalen und Abtastprinzipien. Als Ergebnis dieser Arbeit stehen zwei unterschiedliche Plattformen zur Verfügung. Die erste Plattform ist optimiert für statische Anwendungen, in denen die Messdauer ein unkritischer Parameter ist, jedoch hohe Anforderungen an die (virtuelle) zeitliche Auflösung des gemessenen Signals gestellt werden. Das technische Abtastprinzip dieser Plattform basiert auf dem Verfahren der Unterabtastung eines periodischen Messsignals, wobei zur Abtastung eine digitale Variante eines Delta-Modulators verwendet wird. Die zweite entwickelte Plattform ist optimiert für dynamische Anwendungen, bei denen die benötigte Messdauer zur Aufnahme eines komplexen Impedanzspektrums ein kritischer Parameter ist. Aufgrund der hervorragenden Skalierbarkeit in Bezug auf Signaldauer, Signalamplitude und Signalbandbreite sowie der Möglichkeit einer sehr schnellen digitalen Verarbeitung der abgetasteten Signale in Hardware werden hier Chirp-Signale als Messsignale eingesetzt.

Basierend auf den messtechnischen Überlegungen wurden jeweils Prototypen - Schaltungen aufgebaut und erfolgreich getestet. Die Plattform zur Messung mit virtuell sehr hoher zeitlicher Auflösung wurde zusätzlich im Rahmen eines Projektes mit der University of Queensland, Brisbane, Australien, weiterentwickelt zu einem miniaturisierten hochauflösenden Zeitbereichsreflektometer. Derzeit werden in Pilotstudien in der Nähe von Brisbane 20 dieser Geräte genutzt zur ortsaufgelösten Messung des Grundwasserpegels. Weitere 20 Geräte wurden in Kooperation mit der TU Darmstadt modifiziert und werden erfolgreich in der Gebäudetechnik zur Feuchtemessung eingesetzt.

xii