

# **Überwachung der Körperzusammensetzung mit Hilfe der Bioimpedanz-Spektroskopie**

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin  
der Ingenieurwissenschaften  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieurin  
Lisa Röthlingshöfer, geb. Beckmann  
aus Tübingen

Berichter:  
Universitätsprofessor Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt  
Universitätsprofessor Prof. Dr.-Ing. Gerhard Tröster, ETH Zürich

Datum der mündlichen Prüfung: 07.07.2011



# Aachener Beiträge zur Medizintechnik

9

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher

Univ.-Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode

---

**Lisa Röthlingshöfer**

## **Überwachung der Körperzusammensetzung mit Hilfe der Bioimpedanz-Spektroskopie**

Ein Beitrag aus dem Philips Lehrstuhl für Medizinische Informationstechnik  
(Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt)

---

**RWTH**AACHEN  
UNIVERSITY

---

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2011)

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0436-6

ISSN 1866-5349

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*Für Philipp*



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Philips Lehrstuhl für Medizinische Informationstechnik der RWTH Aachen. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt für die stetige Unterstützung meiner Arbeit. Seine hervorragende Betreuung und die sehr angenehme Atmosphäre am Lehrstuhl haben mir viel Freude gemacht und wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Tröster danke ich für das große Interesse und die Übernahme des Koreferats.

Des Weiteren möchte ich mich bei unserem Oberingenieur Dr. Marian Walter für seine Betreuung und guten Ratschläge bedanken sowie auch bei allen meinen Kollegen am Lehrstuhl, insbesondere Dipl.-Ing. Axel Cordes, Dipl.-Wirt.-Ing. Stefanie Heinke, Dipl.-Ing. Saim Kim und Dipl.-Ing. Robert Pikkemaat. Das gute kollegiale Verhältnis, die vielen anregenden fachlichen Diskussionen aber auch die gemeinsamen Freizeitaktivitäten werde ich in sehr guter Erinnerung behalten.

Ein herzlicher Dank geht auch an alle meine Projektpartner im Philips Forschungslabor Aachen, bei den Firmen Suprima GmbH in Bad Berneck und Elastic Textile Europe GmbH in Neukirchen sowie den Partnern an der RWTH, den Kollegen am Lehrstuhl für elektrische Maschinen unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.h.c. Kay Hameyer und am Institut für Textiltechnik unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing Dipl.-Wirt.-Ing. Thomas Gries. Auch bei den medizinischen Projektpartnern am UKA Aachen möchte ich mich ganz herzlich bedanken u.a. Prof. Dr. med. Patrick Schauerte und seinen Mitarbeitern sowie dem Team des Koordinierungszentrum für Kardiologische Studien unter Leitung von Dipl.-Biol. Verena Deserno.

Bedanken möchte ich mich auch bei all meinen Studenten, insbesondere Dipl.-Ing Mark Ulbrich, Dipl.-Ing Thomas Schlebusch, Christoph Hoog Antink, Katharina Krämer und Agnieszka Kubisa, die tatkräftig in meinen Projekten mitgearbeitet haben und mit ihren Studien- Diplom- und Masterarbeiten viel dazu beigetragen haben, dass diese Doktorarbeit entstanden ist.

Abschließend möchte ich meinen Eltern, Schwiegereltern und Großeltern dafür danken, dass sie während des Studiums und während der Promotionszeit immer für mich da waren und mir besonders im letzten Jahr durch ihren unermüdlichen Einsatz als Babysitter eine sehr große Hilfe waren. Mein wichtigster Dank gilt abschließend meinem Mann Tobias, der mich immer unterstützt hat und viel Verständnis und Geduld für die wechselhafte Gemütslage einer Promovierenden gezeigt hat.

Zürich, im September 2011

*Lisa Röthlingshöfer*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbole und Abkürzungen</b>	<b>ix</b>
<b>1 Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2 Medizinische Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Körperzusammensetzung . . . . .	5
2.1.1 Modelle der Körperzusammensetzung . . . . .	5
2.1.2 Messmethoden zur Bestimmung der Körperzusammensetzung . . . . .	8
2.1.3 Gesamtkörperwasser (TBW) . . . . .	13
2.2 Änderungen der Körperzusammensetzung . . . . .	18
2.2.1 Sportbedingte Änderungen . . . . .	18
2.2.2 Altersbedingte Änderungen . . . . .	21
2.2.3 Krankheitsbedingte Änderungen am Beispiel der Herzinsuffizienz . . . . .	25
2.3 Zusammenfassung . . . . .	29
<b>3 Bioimpedanz-Spektroskopie</b>	<b>31</b>
3.1 Bioimpedanz-Messung . . . . .	31
3.1.1 Leitfähigkeit von Körpergewebe . . . . .	33
3.1.2 Modellbildung . . . . .	35
3.2 Nichtlineare Optimierung . . . . .	42
3.2.1 Grundlagen der nichtlinearen Optimierung . . . . .	42
3.2.2 Validierung der Optimierungsverfahren anhand von BIS-Daten . . . . .	55
3.3 Hardware . . . . .	58
3.3.1 Stand der Technik . . . . .	58
3.3.2 Systemaufbau . . . . .	61
3.4 Zusammenfassung . . . . .	66
<b>4 Modellbildung</b>	<b>69</b>
4.1 Grundlagen der FE-Simulation . . . . .	70
4.1.1 Ablauf einer FE-Simulation . . . . .	72
4.2 Simulation 1: BIS-Messung beim Sport . . . . .	74
4.2.1 Simulationsmodell einer Bein-zu-Bein BIS-Messung . . . . .	74
4.2.2 Simulationsablauf . . . . .	76
4.2.3 Simulationsergebnisse . . . . .	77
4.3 Simulation 2: Altersbedingte Einflussfaktoren auf BIS-Messungen . . . . .	81
4.3.1 Simulationsmodell und -ablauf einer BIS-Messung am Oberschenkel . . . . .	81

4.3.2	Simulationsergebnisse . . . . .	83
4.4	Simulation 3: Transthorakale BIS-Messung . . . . .	85
4.4.1	Simulationsmodell . . . . .	86
4.4.2	Simulationsergebnisse . . . . .	88
4.5	Zusammenfassung . . . . .	91
<b>5</b>	<b>Textile Integration der Messtechnik</b>	<b>93</b>
5.1	Stand der Technik . . . . .	93
5.2	Herstellung leitfähiger Textilien . . . . .	96
5.2.1	Leitfähige Garne . . . . .	96
5.2.2	Leitfähige Flächen . . . . .	97
5.3	Textile Elektroden . . . . .	99
5.3.1	Stand der Technik . . . . .	99
5.3.2	Elektrodenteststand . . . . .	106
5.3.3	Herstellung von textilen Bioimpedanz-Elektroden . . . . .	110
5.3.4	Charakterisierung textiler Elektroden . . . . .	111
5.4	Textile Leiterbahnen . . . . .	118
5.4.1	Stand der Technik . . . . .	118
5.4.2	Teststand für textile Leiterbahnen . . . . .	119
5.4.3	Herstellung textiler Leiterbahnen . . . . .	120
5.4.4	Charakterisierung textiler Leiterbahnen . . . . .	121
5.5	Zusammenfassung . . . . .	125
<b>6</b>	<b>Medizinische Anwendung</b>	<b>127</b>
6.1	Körperwassermonitoring bei Sportlern und älteren Menschen . . . . .	128
6.1.1	Messsystem . . . . .	128
6.1.2	Textile Prototypen . . . . .	129
6.1.3	Überwachung des Körperwasserhaushaltes beim Sport . . . . .	132
6.2	Kontinuierliche Überwachung der Lungenimpedanz bei Patienten mit Herzversagen . . . . .	141
6.2.1	Beschreibung des Messsystems . . . . .	141
6.2.2	Einflussfaktoren auf eine transthorakale BIS-Messung . . . . .	143
6.2.3	Überwachung der Lungenimpedanz bei CHF Patienten . . . . .	148
6.3	Zusammenfassung . . . . .	153
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>155</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>159</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>160</b>