

A Body Sensor Network for Fluid Management during Sport

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

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur
Saim Kim
aus Düsseldorf

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Dr. med. Steffen Leonhardt
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Reinhold Orglmeister

Datum der mündlichen Prüfung: 08.09.2015

Herausgeber:

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

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

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

Saim Kim

**A Body Sensor Network for Fluid Management
during Sport**

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

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2015)

Copyright Shaker Verlag 2015

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4106-4

ISSN 1866-5349

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Kaffee dehydriert den Körper nicht. Ich wäre sonst schon Staub.
Coffee doesn't dehydrate you. Otherwise, I'd be dust by now.

Franz Kafka (1883 - 1924)

Also, I am indebted to the group of great runners who endured the burden of going through the study.

While on my journey I was always re-energized by spending precious time with my friends. Thank you for being there for me Dinesh, Nima, Birinder, Rainer, Christian, Thomas, So-Yun, Jaroslav, Marcel & Kevin.

Without the support of my family the journey would not have been possible. Thank you dad, mom, Hyun, Moni & Liya for your unconditional trust and faith in me. It was a bumpy ride with ups and downs and I thank you, Miriam, for sitting next to me on the roller coaster :-)

My journey to the boundaries of science has come to a happy end.

Berlin, November 2015

Saim Kim

Abstract

This thesis presents a concept for a bioimpedance-based measurement system to monitor the fluid balance during sports and its validation. Two subject areas are combined, on one hand a so-called “Body Sensor Network” to measure different physical parameters and to quantify the exercise intensity, and on the other hand, a model-based compensation of exercise-related fluid shifts. Both parts were validated by a clinical trial.

A balanced hydration status is required for an optimum sports performance. An imbalance can reduce the sports performance and can even have a negative effect on health. However, exercise by itself influences the hydration status. It has been reported that athletes can lose up to 4l of fluids per hour in the form of sweat during high intensity exercise and unfavorable conditions. Literature also states that even professional athletes are not adequately hydrated. Therefore, monitoring the hydration status can contribute to maximize the sports performance.

Bioimpedance spectroscopy (BIS) is a clinically established measurement technology to assess the hydration status of a person. State of the art devices can even distinguish between extracellular water and intracellular water. However, a strict measurement regime has to be followed in order to obtain reproducible results. Any physical exercise is prohibited 24-48 h before a measurement because it may falsify the measurement. The reason for that are metabolic changes during exercise which lead to an additional fluid shift within the body. This shift is not regarded in the state of the art BIS calculation models, yet. Therefore, the applicability of BIS measurements for athletes is very limited.

A wearable system, called “Integrated Posture and Activity Network by MedIT Aachen” (IPANEMA BSN) was developed to improve the applicability of BIS measurements for athletes. The Body Sensor Network (BSN) includes e.g., accelerometers, temperature sensors and a textile integrated ECG T-Shirt. The processed data is used to quantify the exercise intensity while the BIS measurements have been performed with a commercial device.

The theoretical focus of this thesis is the extension of a BIS model to incorporate for the first time the dynamic changes of the metabolism and its related fluid shifts. The essential physiological processes e.g., sweat production in relation to the exercise intensity, have been modeled. Furthermore, the pressure conditions in the active muscles

have been modeled to include the increased perfusion due to self-heating and shifting of blood constituents. Also, endogenous compensation of fluid shifts are integrated.

Finally, the IPANEMA BSN and the enhanced fluid shift model were validated by a clinical trial with 12 athletes. Measurements were performed in a laboratory, in a climate chamber and on an outdoor track. It could be shown that the simulation results closely resembled the measured characteristic fluid shifts related to running. Thus, the influence on the BIS-measurement results could be compensated and the BIS-measurement errors of the extracellular resistance (R_e) were reduced by 80% on average.

In conclusion, the results of this thesis show that the hydration status monitoring of athletes during sports is possible with BIS measurement technology provided there is a proper compensation of exercise related perturbations.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein Konzept für ein Bioimpedanz-basiertes Messsystem zur Überwachung des Flüssigkeitshaushaltes während des Sports vorgestellt und evaluiert. Die Arbeit kombiniert zwei Themenbereiche, zum einen ein sogenanntes "Body Sensor Network" zur Aufnahme von verschiedenen physikalischen Messgrößen und Quantifizierung der sportlichen Leistung und zum anderen ein Modell zur Kompensation der sportbedingten Flüssigkeitsverschiebungen. Abschließend wurden sowohl das Messsystem als auch das Kompensationsmodell im Rahmen einer klinischen Studie validiert.

Ein ausgewogener Wasserhaushalt ist die Voraussetzung für optimale sportliche Leistungen. Abweichungen können zu einem Leistungsverlust bis hin zu schweren gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen. Das Gleichgewicht wird jedoch gerade beim Sport stark beeinflusst. So verlieren Sportler bis zu 4 l Flüssigkeit pro Stunde in Form von Schweiß bei hohen Belastungen und ungünstigen Umgebungsbedingungen. Studien belegen, dass selbst Profisportler nicht optimal mit Flüssigkeit versorgt sind. Eine Überwachung des Wasserhaushalts bietet Sportlern daher neben dem Training die Möglichkeit eine optimale sportliche Leistung zu erbringen.

Die Bioimpedanzspektroskopie (BIS) ist eine klinisch etablierte Messtechnik, um den Wasserhaushalt von Menschen zu bestimmen. Dabei kann extrazelluläres Wasser von intrazellulärem Wasser unterschieden werden. Jedoch müssen dazu sehr strenge Messbedingungen erfüllt werden. Unter anderem ist jede körperliche Anstrengung im Zeitraum von 24-48 h vor einer BIS-Messung zu vermeiden, da diese zu Messwertverfälschungen führen. Hintergrund ist, dass die Stoffwechselveränderungen beim Sport zu einer zusätzlichen Flüssigkeitsverschiebung im Körper führen. Diese werden in den aktuell vorhandenen BIS-Modellen nicht berücksichtigt. Daher ist die praktische Anwendbarkeit von BIS-Messungen bei Sportlern stark eingeschränkt.

Um die Anwendbarkeit der BIS-Messung bei Sportlern zu ermöglichen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein tragbares Messsystem entwickelt, das sogenannte "Integrated Posture and Activity Network by MedIT Aachen" (IPANEMA BSN). Das Body Sensor Network (BSN) beinhaltet u.a. Beschleunigungssensoren, Temperatursensoren und ein textilintegriertes EKG-T-Shirt. Die aufbereiteten Messdaten dienen als Grundlage zur Klassifikation der sportlichen Belastung. Die BIS-Messungen wurden mit einem kommerziell erhältlichen Gerät durchgeführt.

Der theoretische Schwerpunkt dieser Dissertation liegt auf einem erweiterten BIS-Modell, mit dem erstmals die dynamischen Stoffwechselveränderungen und die einhergehende Flüssigkeitsverschiebung nachgebildet werden konnten. Dabei werden die wesentlichen physiologischen Vorgänge im Körper modelliert, z.B. die Schweißproduktion in Abhängigkeit der sportlichen Belastung. Ein weiterer Aspekt ist die genaue Modellierung der Druckverhältnisse in der aktiven Muskulatur. Diese verändern sich im Vergleich zur nicht-aktiven Muskulatur durch die Eigenerwärmung, die Verschiebung von Blutbestandteilen und die resultierende verstärkte Durchblutung. Zusätzlich wird die körpereigene Kompensation des Flüssigkeitsverlusts mitberücksichtigt.

Das IPANEMA BSN und das Flüssigkeitsverschiebungsmodell wurden abschließend im Rahmen einer klinischen Studie mit 12 Sportlern validiert. Dabei wurden Messungen im Labor, in einer Klimakammer und auf einem Sportplatz durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die Simulationsergebnisse detailgetreu mit der gemessenen charakteristischen Flüssigkeitsverschiebung auf Grund einer sportlichen Belastung durch Laufen übereinstimmt. Zum einen konnte die Auswirkung auf die BIS-Messkurve nachgebildet werden und zum anderen konnte der BIS-Messfehler für den extrazellularen Widerstand (R_e) um durchschnittlich 80 % verringert werden.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse ermöglichen die Anwendung der BIS-Messtechnik zur Flüssigkeitshaushaltsüberwachung von Sportlern, trotz der Störeinflüsse durch die sportlichen Belastungen.

Contents

List of Symbols and Abbreviations

xvii

1	Introduction	1
1.1	Thesis aim	1
1.2	Thesis Structure	2
2	Basics and State of the Art	4
2.1	Body Sensor Networks	4
2.1.1	Overview	4
2.1.2	Energy Management	7
2.1.3	Radio Protocols	10
2.1.4	Network Topology	18
2.1.5	Operating Systems	22
2.1.6	Medical Applications	24
2.2	Basics of Classification	27
2.2.1	Classification Workflow	30
2.2.2	Classification Algorithms	34
2.3	Fluid Physiology	41
2.3.1	Fluid Regulation Mechanisms	42
2.3.2	Body Composition Measurement Methods	48
2.4	Sport Physiology	51
2.4.1	Cardiovascular Response	52
2.4.2	Cardiopulmonary Response	54
2.4.3	Temperature Response	55
2.4.4	Electrolyte and Protein Dynamics	56
2.4.5	Energy Expenditure [5]	59
2.5	Bioimpedance Spectroscopy	61
2.5.1	BIS Overview	61
2.5.2	BIS Influence Factors	63
2.5.3	BIS Modeling	65

3	Material and Methods	75
3.1	IPANEMA BSN	75
3.1.1	System Description	76
3.1.2	IPANEMA Sensor Modules	83
3.2	Classification of Energy Expenditure [5]	86
3.2.1	Signal Processing and Feature Extraction	88
3.2.2	Pre-processing and Feature Selection	94
3.2.3	Classification Methods	95
3.2.4	Validation	99
3.3	Sport BIS Model	100
3.3.1	Sweat Model	101
3.3.2	Cardiopulmonary Model	103
3.3.3	Cardiovascular Model	104
3.3.4	Enhanced Starling Model	105
3.3.5	Modified Hanai Model	106
3.3.6	Model-based Correction of BIS Measurements During Exercise	107
3.4	Clinical Scenario “UMIC Sports Study”	108
3.4.1	Study Design	109
3.4.2	IPANEMA ECG T-shirt Validation	113
3.4.3	IPANEMA Temperature Sensor Validation	114
4	Results	117
4.1	IPANEMA BSN Validation	117
4.1.1	UMIC ECG T-shirt Evaluation	117
4.1.2	Temperature Sensor Validation	123
4.2	Energy Expenditure Classification	126
4.2.1	Naive Bayes	127
4.2.2	Support Vector Machine	130
4.2.3	Random Forest	132
4.2.4	Classifier Validation and Comparison	132
4.3	Sport BIS Model	134
4.3.1	Sweat Model	134
4.3.2	BIS Measurement Compensation	135
5	Discussion and Outlook	141
A	Appendix	143
A.1	Subject Description UMIC Sports Study	143
A.2	Sweat Loss	143
A.3	Measurement Protocol	144

B Own Publications	147
Bibliography	152