

Andreas Weder

Entwurf anwendungsspezifischer drahtloser Körpernetzwerke  
zur Vitalparameterübertragung



Beiträge aus der Informationstechnik

**Andreas Weder**

**Entwurf anwendungsspezifischer drahtloser  
Körpernetzwerke zur Vitalparameterübertragung**

 VOGT

Dresden 2013

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic Information published by the Deutsche Bibliothek

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2013

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation „Entwurf anwendungsspezifischer drahtloser Körpernetzwerke zur Vitalparameterübertragung“ von Andreas Weder überein.

© Jörg Vogt Verlag 2013

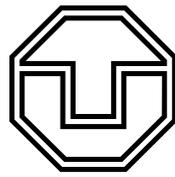
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-938860-63-2

Jörg Vogt Verlag  
Niederwaldstr. 36  
01277 Dresden  
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921  
Telefax: +49-(0)351-31403918  
e-mail: [info@vogtverlag.de](mailto:info@vogtverlag.de)  
Internet : [www.vogtverlag.de](http://www.vogtverlag.de)



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

**Entwurf anwendungsspezifischer drahtloser Körpernetzwerke  
zur Vitalparameterübertragung**

**Andreas Weder**

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktoringenieurs**

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Malberg  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Fischer  
Prof. Dr.rer.nat. Henrich

Tag der Einreichung: 29.03.2012  
Tag der Verteidigung: 25.03.2013



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Drahtlose Datenübertragung in der Medizintechnik</b>	<b>7</b>
2.1. Grundlagen	7
2.1.1. Motivation	7
2.1.2. Problemfelder von Funktechniken im Gesundheitssektor	8
2.2. Anwendungsszenarien von Funktechniken in der Medizin	11
2.2.1. Überblick	11
2.2.2. Medizinische Informationstechnik	11
2.2.3. Steuerung medizinischer Geräte	13
2.2.4. Identifikationsanwendungen	13
2.2.5. Patientenmonitoring	15
2.2.6. Zusammenfassung und Ausblick	16
2.3. Wireless Body Sensor Networks	18
2.3.1. Grundlagen	18
2.3.1.1. Geschichtliche Entwicklung	18
2.3.1.2. Motivation und Nutzen	20
2.3.1.3. Konzeptionelle Unterschiede zwischen Wireless Sensor Networks und Wireless Body Sensor Networks	22
2.3.2. Technische Betrachtungen	23
2.3.2.1. Drahtlose Kommunikation in Körpernähe	23
2.3.2.2. Gebrauchstauglichkeit	25
2.3.2.3. Netzwerktopologien	25
2.3.2.4. Energetischer Vergleich von Instruktionsausführung und Datenübertragungen	28
2.3.2.5. Betriebszustände von Transceivern	32
2.3.3. WBSN-Konzepte in der Literatur	34
2.4. Komerzielle Funktechnologien für Body Sensor Networks	36
2.4.1. Bluetooth	36
2.4.1.1. Grundlegende Eigenschaften	37
2.4.1.2. Bluetooth-Stack	38
2.4.1.3. Health Device Profile (HDP)	40
2.4.1.4. Bluetooth Low Energy	42
2.4.2. IEEE 802.15.4	43
2.4.2.1. Eigenschaften der physikalischen Schicht	43
2.4.2.2. Knotentypen und Netzwerktopologie	44
2.4.2.3. Operationsmodi und Superframe-Struktur	45
2.4.2.4. Praktische Anwendung	46

2.4.3.	ZigBee . . . . .	46
2.4.3.1.	Allgemeines . . . . .	46
2.4.3.2.	Netzwerk und Routing . . . . .	48
2.4.3.3.	Anwendungsschicht und Profile . . . . .	49
2.4.3.4.	ZigBee Health Care Profile . . . . .	51
<b>3.</b>	<b>Entwicklung eines Experimentalsystems</b>	<b>53</b>
3.1.	System-Konzept . . . . .	53
3.2.	Hardwareentwurf . . . . .	54
3.2.1.	Überblick . . . . .	54
3.2.2.	Entwurfsentscheidungen . . . . .	55
3.2.3.	Transceiverschaltkreise . . . . .	56
3.2.4.	Mikrocontroller . . . . .	60
3.2.5.	Ergebnisse . . . . .	61
3.2.5.1.	Entwicklungshardware »BSN-Develboard« . . . . .	61
3.2.5.2.	Universelle BSN-Hardware »BSN-UniNode« . . . . .	63
3.2.5.3.	Spezialisierte Hardwarebaugruppen . . . . .	65
3.3.	Firmware . . . . .	67
3.3.1.	BSN-Modem-Firmware . . . . .	68
3.3.2.	SD-Kartenübertragung . . . . .	75
3.4.	Softwarewerkzeuge zur Nutzung und Optimierung der Körpernetzwerke . . . . .	78
3.4.1.	Konfigurationssoftware . . . . .	79
3.4.2.	Programmiersoftware . . . . .	80
3.4.3.	Evaluationssoftware . . . . .	81
3.4.3.1.	Konzept . . . . .	82
3.4.3.2.	Formatbeschreibung der Testfälle . . . . .	83
3.4.3.3.	Umsetzung und Anwendung . . . . .	85
3.5.	Strommessung zur Charakterisierung von Transceiverschaltkreisen . . . . .	86
3.5.1.	Vorgehensweise . . . . .	86
3.5.2.	Strommessungen am Beispiel des nRF24L01 . . . . .	90
3.5.3.	Zusammenfassung der Messergebnisse . . . . .	94
3.6.	Ergebnisse . . . . .	95
3.6.1.	Szenario I: Periodische Sensordatenübertragung . . . . .	96
3.6.2.	Szenario II: Dateiübertragung . . . . .	100
<b>4.</b>	<b>Modellierung und Simulation</b>	<b>103</b>
4.1.	Motivation . . . . .	103
4.2.	Diskrete Ereignissimulation . . . . .	105
4.3.	Simulationswerkzeuge . . . . .	106
4.3.1.	ns-2 und ns-3 . . . . .	106
4.3.2.	OPNET-Modeler . . . . .	108
4.3.3.	OMNeT++ . . . . .	108
4.3.4.	Weitere Simulationswerkzeuge . . . . .	110
4.3.5.	Zusammenfassung . . . . .	111
4.4.	Energieberechnungsmodelle des nRF24L01 in C++ . . . . .	111
4.4.1.	FSM-Modell . . . . .	111

4.4.2. Empirisches Modell . . . . .	113
4.4.3. Zusammenfassung . . . . .	118
4.5. Simulationsmodell in MiXiM . . . . .	119
4.5.1. Grundlagen . . . . .	119
4.5.2. Konzept des Simulationsmodells . . . . .	119
4.5.3. Physikalische Schicht . . . . .	121
4.5.4. MAC-Schicht . . . . .	123
4.6. Anwendung des Simulationsmodells . . . . .	125
4.6.1. Energetische Untersuchungen . . . . .	125
4.6.2. Protokollanalyse . . . . .	127
4.6.3. Entwicklung eines Protokolls mit reduziertem Energieverbrauch auf Empfängerseite . . . . .	130
4.7. Zusammenfassung . . . . .	134
<b>5. Zusammenfassung</b>	<b>137</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>141</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>157</b>
<b>A. ISM-Bänder</b>	<b>161</b>
<b>B. Hardware</b>	<b>163</b>
B.1. Entwicklungshardware »BSN-Develboard« . . . . .	163
B.2. Erweiterungsplatine »nRF24L01-Daughter-Card« . . . . .	165
B.3. Universelle BSN-Hardware »BSN-UniNode« . . . . .	166
B.4. Optimierte Basisstation »BSN-USBBaseStation« . . . . .	168
B.5. Körpereinheit »BSN-BodyUnit« . . . . .	170
B.6. BSN-Funkmodul »BSN-Modem« . . . . .	172
<b>C. Software</b>	<b>175</b>
C.1. XML-Syntax-Definition für Testfälle . . . . .	175
C.2. Beispielkonfiguration für das FSM-Modell in C++ . . . . .	177
C.3. Messsoftware für LabVIEW . . . . .	178



# 1. Einleitung

Moderne IT-Systeme, die eine digitale Datenverarbeitung ermöglichen, sind inzwischen ein fester Bestandteil der Infrastruktur im Medizinsektor geworden. Mit ihrer Hilfe lassen sich Abläufe effizienter gestalten und somit der Anteil zeitaufwendiger Routinearbeiten minimieren.

Auch Systeme, die sich die Vorteile drahtloser Datenübertragungen zu Nutze machen befinden sich bereits im praktischen Einsatz [25, 88]. Solche Funknetzwerke werden beispielsweise eingesetzt, um dem medizinischen Personal einfachen und vor allem ortsunabhängigen Zugriff auf Patientenakten zu gewähren [25]. So können Ärzte bei der täglichen Visite mit Hilfe von Notebooks, PDAs oder Smartphones drahtlos auf digital vorliegende Daten wie die Behandlungshistorie, neue Untersuchungsergebnisse oder Laborberichte zugreifen (»*Mobile Visite*«). Ein umständliches und zeitaufwendiges Herstellen einer Verbindung zum Krankenhausnetzwerk mit Hilfe von Kabeln ist dabei nicht mehr notwendig.

Die Anwendung mobiler, funkbasierter Geräte vermeidet an dieser Stelle auch den Medienbruch zwischen analoger und digitaler Welt. Notizen und Behandlungsanweisungen können direkt digital aufgezeichnet werden, ein späteres Übertragen der handschriftlichen Notizen an einem stationären Arbeitsplatzrechner ist nicht mehr notwendig. Dadurch wird die Gefahr von Fehleingaben reduziert und unnötige Doppelarbeit vermieden.

Bei der Technik, die in Kliniken am häufigsten für Funknetzwerke eingesetzt wird, handelt es sich in der Regel um speziell für den Krankenseinsatz zertifizierte WLAN-Geräte nach dem IEEE802.11-Standard [88, 80].

Betrachtet man die vom Statistischen Bundesamt bis 2030 erwarteten und in Abbildung 1.1 dargestellten Veränderungen in der Altersstruktur der deutschen Bevölkerung, zeigt sich, dass der Anteil der Älteren in der Gesellschaft weiter wächst. Verknüpft mit dem Wissen über die erwartete Häufigkeit von Krankenhaufällen (Abbildung 1.2a) und die im Alter stark steigenden Krankheitskosten (Abbildung 1.2b), wird deutlich, dass das Gesundheitssystem vor einer weiteren grundlegenden Herausforderung steht. Weil eine durchschnittlich ältere Gesellschaft mehr medizinische Versorgung benötigt, wird sich der demographische Wandel im Gesundheitssystem also vor allem durch Kostensteigerungen bemerkbar machen. Neben der Verbesserung bestehender IT-Systeme, gilt es daher auch neuartige technische Ansätze zu betrachten um dieser Entwicklung in gewissen Maß entgegenzuwirken.

Ein solcher neuartiger Ansatz ist die Verwendung von drahtlosen Körpernetzwerken (*Wireless Body Sensor Networks*, WBSN). Ein WBSN ist ein Funknetzwerk aus kleinen Geräten, die direkt am Körper getragen werden. Mit Hilfe von Sensoren zeichnen sie verschiedenste Vitalparameter auf und kommunizieren drahtlos miteinander.

Abbildung 1.3 zeigt ein mögliches Anwendungsszenario eines solchen WBSNs für die autonome Langzeitüberwachung von Patienten. Das dargestellte System besteht in diesem Fall aus mehreren Sensoren zur Erfassung diverser Vitalparameter (Körpertemperatur, EKG, EEG, Blutsauerstoffsättigung (SPO<sub>2</sub>), Atmung und Bewegung) und einer zentralen Steuereinheit, die das Netzwerk kontrolliert und die empfangenen Sensordaten auswertet und speichert.

Je nach Anwendungsgebiet ergeben sich durch den Einsatz drahtloser Körpernetzwerke verschiedene Vorteile: Im Krankenhaus lassen sich damit kabelgebundene Vitalparameterüberwa-

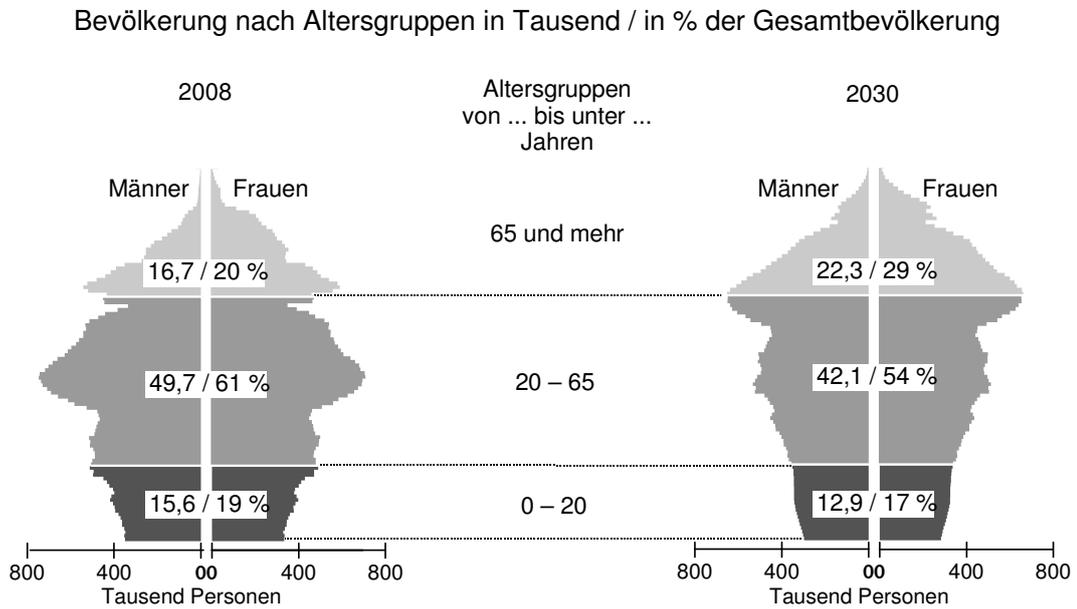
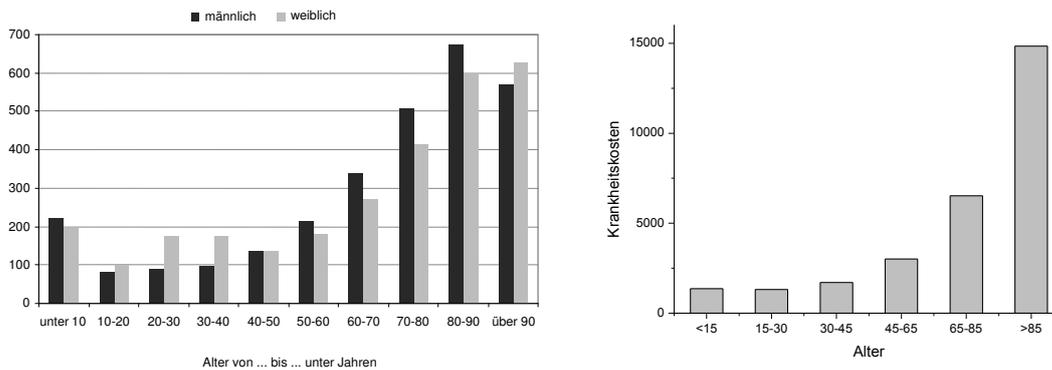


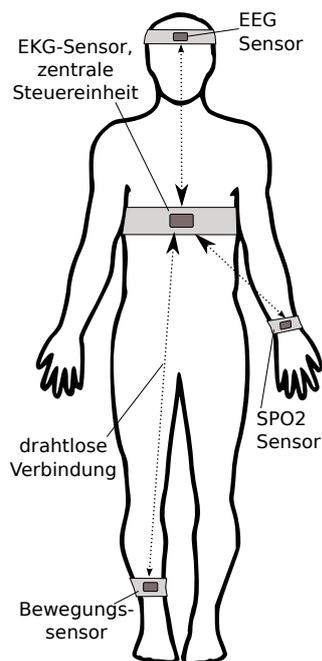
Abbildung 1.1.: Demographischer Wandel in Deutschland (Quelle [206]).



(a) Krankenhausfälle je 1 000 Einwohner nach Alter und Geschlecht 2008 (Quelle [207])

(b) Krankheitskosten nach Alter (Datenbasis [205]).

Abbildung 1.2.: Statistische Angaben zu Kosten und Krankheitshäufigkeiten im deutschen Gesundheitssystem für unterschiedliche Altersgruppen.



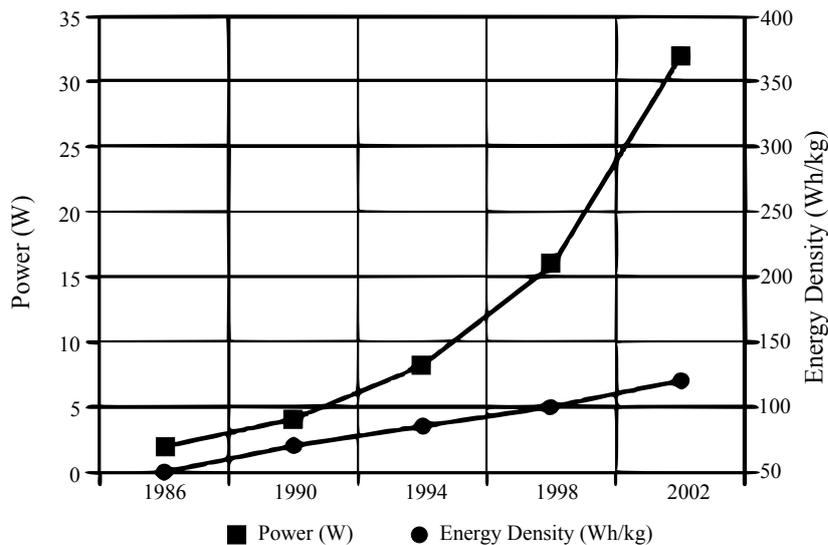
**Abbildung 1.3.:** Anwendungsbeispiel eines autonomen drahtlosen Körpernetzwerks (WBSN) mit zentraler Steuereinheit und verschiedenen Vitalparametersensoren.

chungssysteme ersetzen. Die einzelnen Sensorknoten werden beispielsweise mit Hilfe von Klebesystemen, elastischen Bändern oder Gurten am Patienten befestigt. Das zeitaufwendige und fehleranfällige Verkabeln einzelner Sensoren mit einem zentralen Patientenmonitor kann entfallen. Die drahtlose Verbindung wird vom System autonom hergestellt. Denkbar ist auch die automatische Neukonfiguration ohne Nutzereingriff bei der Verlegung von Patienten. Durch die einfachere Handhabung wird hier besonders das medizinische Personal entlastet. Für den Patienten resultiert der Wegfall der Kabelverbindungen in einer gesteigerten Bewegungsfreiheit.

Der Einsatzbereich von WBSNs ist dabei jedoch nicht auf die Verwendung im Krankenhaus beschränkt. Andere Konzepte [247] sehen beispielsweise vor, stabile Patienten zeitiger aus der Klinik in ihr gewohntes Lebensumfeld zu entlassen. Voraussetzung dafür ist die Nutzung eines zuverlässigen autonomen Körpernetzwerks, das durch eine permanente Überwachung der Vitalparameter sicherstellt, dass bei kritischen Änderungen des Gesundheitszustands ein Alarm ausgelöst wird. Damit lassen sich Kosteneinsparungen realisieren, ohne aber gleichzeitig die Qualität der Betreuung zu verringern.

Auch in den Bereichen Home-Care, *Ambient Assisted Living* (AAL), Wellness und Sportmedizin besteht zunehmend Bedarf an Langzeitüberwachungssystemen [147]. Der Trend geht bei allen genannten Bereichen dahin, die verschiedensten Vitalparameter zu analysieren und miteinander in Verbindung zu setzen (Sensordatenfusion) und dadurch die Diagnosemöglichkeiten zu verbessern.

Ein wichtiger Vorteil einer Langzeitüberwachung besteht darin, dass die Vitalparameter über einen langen Zeitraum in der typischen Lebensumgebung und nicht nur bei einer kurzfristigen Untersuchung in der Klinik aufgezeichnet werden. Daraus resultiert in der Regel zuverlässigeres Datenmaterial. Weiterhin können solche Systeme dazu beitragen, die Eigenverantwortlichkeit



**Abbildung 1.4.:** Vergleich der Entwicklung vom Energiebedarf mobiler Systeme und der Energiedichte von Energiespeichern (Quelle: [191, S. 218])

der Patienten zu stärken, Gesundheitstrends frühzeitig zu erkennen und gegebenenfalls rechtzeitig gegensteuern und eine Einlieferung in eine Klinik vermeiden zu können [70]. Die Anwendung neuartiger WBSN-Konzepte adressiert also nicht nur Kostenaspekte sondern gibt Ärzten eine bessere Datenbasis für ihre Entscheidungen und macht schließlich auch zielgerichteteren Behandlungen einschließlich einer besseren Erfolgskontrolle möglich.

Die Herausforderung bei der Entwicklung von WBSN-Systemen besteht darin, dass eine Vielzahl unterschiedlicher und teilweise gegensätzlicher Anforderungen zu erfüllen sind. Abbildung 1.4 verdeutlicht eines dieser grundlegenden Gegensätze: Der Energiebedarf mobiler Systeme ist aufgrund der Verwendung immer schnellerer Prozessoren und Funksystemen mit immer höheren Datenraten in den letzten Jahren deutlich angestiegen. Die Energiedichte gängiger Energiespeicher ist hingegen deutlich langsamer gewachsen. Die vergleichsweise langsamen Fortschritte in der Batterietechnologie müssten also durch eine Zunahme von Batteriegröße und -gewicht kompensiert werden, um den gestiegenen Energiebedarf zu decken und ausreichend lange Laufzeiten zu erreichen. Eine Zunahme von Größe und Gewicht steht aber im Widerspruch zu den Anforderungen die verlangen, dass ein Körpernetzwerk aus kleinen, leichten und mobilen Sensoren besteht, die sich direkt in oder auf der Kleidung tragen lassen.

Eine weitere Herausforderung ist die große Vielzahl der unterschiedlichen Anwendungsszenarien. Den meisten drahtlosen Körpernetzwerken ist jedoch gemein, dass sie lediglich mit einer geringen Datenrate, dafür aber über einen sehr langen Zeitraum übertragen müssen. Aufgrund dieser Anforderungen sind WBSNs in der Regel nicht mit den zuvor beschriebenen klassischen funkbasierten IT-Systemen zu vergleichen. Klassische medizinische Funksysteme auf WiFi-Basis wurden eher für die schnelle Übertragung großer Datenmengen entworfen und haben in der Regel auch kein Energieproblem. Ihre Nutzung ist daher für WBSNs nicht empfehlenswert.

Für den erfolgreichen Einsatz von WBSNs müssen die genutzte Hardware und das Funksystem also gezielt optimiert werden. Besonders die energetischen Optimierungen lassen sich nur bei genauer Kenntnis des Anwendungsfalls effizient vornehmen. Der Entwurfs- und Optimierungspro-

---

zess ist daher für jeden Anwendungsfall erneut zu durchlaufen. Werkzeuge, die dabei Unterstützung leisten existieren bisher nicht.

Die vorliegende Arbeit stellt einen möglichen Lösungsansatz vor, die zuvor angesprochenen Herausforderungen zu meistern und die Entwicklung anwendungsspezifischer drahtloser Körpernetzwerke einfacher zu gestalten.

Statt einer isolierten Betrachtung von Funktion, Hardware, Software, Funksystem und Protokoll umfasst das Konzept vielmehr den kompletten Entwurfsprozess. Auf Basis der Analyse vorhandener Lösungen und existierender Probleme werden die spezifischen Anforderungen herausgearbeitet und Konzeptvorschläge für die anwendungsspezifische Entwicklung besonders energieeffizienter Körpernetzwerke unterbreitet. Als Ergebnis der Forschungsarbeiten wurde eine universelle Experimentalplattform entworfen und umgesetzt, mit der sich die Richtigkeit der gewählten Lösungsansätze demonstrieren lässt. Ergänzt wird diese durch eine Simulationsumgebung mit welcher sich verschiedenste Konzepte und Protokollentwürfe detailliert und mit geringem Aufwand analysieren und optimieren lassen. Den eingesetzten Funkprotokollen kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Daher wurden speziell auf diesem Gebiet umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Mit Hilfe dieser Werkzeuge wird es für den Entwickler von WBSNs möglich, die Funkprotokolle sehr einfach an die speziellen Anwendungsszenarien anzupassen und so einen minimalen Energiebedarf zu garantieren.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt: Das Kapitel 2 beschreibt die grundlegenden Konzepte des Einsatzes drahtloser Datenübertragungstechniken im Medizinsektor. Dazu wird zuerst herausgearbeitet, warum die Nutzung von Funktechniken dort sinnvoll ist und in welchen Anwendungsszenarien sie konkret zum Einsatz kommen (Abschnitt 2.2). Darauf basierend wird im Abschnitt 2.3 das spezielle Anwendungsgebiet der drahtlosen Körpernetzwerke betrachtet, mit denen sich diese Arbeit beschäftigt. Anschließend wird in Abschnitt 2.4 gezeigt, mit welchen kommerziellen Funktechniken solche Körpernetzwerke gegenwärtig umgesetzt werden, welche Probleme dabei auftreten und welches Optimierungspotential für zukünftige Realisierungen existiert.

In Kapitel 3 wird Entwurf und Umsetzung des vorgeschlagenen Gesamtkonzeptes vorgestellt. Dieses ermöglicht die vereinfachte Entwicklung und Optimierung von anwendungsspezifischen Körpernetzwerken. Das Gesamtkonzept umfasst dabei die Entwicklung einiger besonders energieeffizienter Hardwarebaugruppen zur praktischen Demonstration der verschiedenen Konzepte (Abschnitt 3.2), die Umsetzung und Optimierung der notwendigen Betriebsfirmware für unterschiedliche Anwendungsszenarien (Abschnitt 3.3), die Implementierung diverser Softwarewerkzeuge zur Nutzung und Optimierung der Körpernetzwerke (Abschnitt 3.4) sowie die messtechnische Validierung der angewendeten Prinzipien am umgesetzten Experimentalsystem (Abschnitt 3.5).

Kapitel 4 beschreibt das Simulationsframework, welches einen wesentlichen Teil des Gesamtkonzeptes darstellt und vorrangig der einfachen Analyse und Optimierung drahtloser Körpernetzwerke im jeweiligen Anwendungsfall dient. Die wichtigsten Komponenten sind dabei das auf Messungen basierende C++-Energiemodell (Abschnitt 4.4) eines Transceiverschaltkreises als Referenzimplementierung und das eigentliche Transceiver-Simulationsmodell (Abschnitt 4.5). Anhand einiger Beispiele demonstriert Abschnitt 4.6 die Anwendung der Simulationsumgebung für Energieabschätzung, Parameteroptimierung und Protokollentwurf.

Das Kapitel 5 fasst abschließend die gewonnenen Ergebnisse zusammen.

