Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät *90(2007), 217–227*

Wolf-Joachim Fischer, Hans-Günter Despang, Hans-Jürgen Holland, Daniele Wiedemuth

Body Area Networks – Anwendung in telemedizinischen Systemen

1. Das kriselnde deutsche Gesundheitswesen

Die gewaltigen Fortschritte der Medizin in den letzten 20 Jahren, insbesondere der Einsatz von High Tech-Geräten, wie z.B. Beispiel Herzschrittmachern oder Kernspin-Tomographen, haben zu dramatischen Veränderungen der demografischen Entwicklung in den Industrieländern geführt. In Deutschland steigt die durchschnittliche Lebenserwartung pro Jahr um ungefähr 3 Monate an. Der Anteil der älteren Menschen über 65 Jahre an der Gesamtbevölkerung nimmt kontinuierlich zu (Abb. 1), während andererseits der der jüngeren unter 25 Jahren ständig abnimmt. Im Jahr 2020 wird es zum ersten Mal in der Geschichte mehr alte als junge Menschen geben.

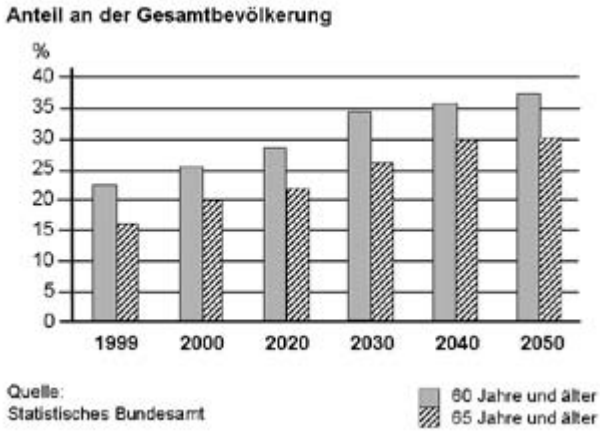

Abb. 1: Demografische Entwicklung in Deutschland

Im Ergebnis dieser Entwicklung steigen die Krankheitskosten insbesondere im Alter stark an. Während die Kosten im Altersbereich von 65 bis 85 Jahren bei durchschnittlich knapp 6000 Euro pro Jahr liegen, betragen sie bei über 85 Jährigen fast das Doppelte.

Da die seitens der Gesellschaft die für die medizinische Versorgung zur Verfügung stehenden Mittel begrenzt bleiben werden, ist eine Beibehaltung oder sogar Verbesserung der Qualität der medizinischen Versorgung nur möglich, wenn die Kosten für die medizinische Betreuung gesenkt werden. Einen erheblichen Kostenfaktor stellen dabei die stationären Krankenhauskosten dar. Ein Erfolg versprechender Lösungsansatz besteht darin, die Verweildauer im Krankenhaus zu senken und medizinische Leistungen in den Heimbereich zu verlagern. Ohne Erhöhung des Risikos für den Patienten wird das nur möglich sein, wenn durch telemedizinische Systeme eine durchgängige Patientenüberwachung gewährleistet bleibt.

In Deutschland wurden laut einer Veröffentlichung des Statistischen Bundesamtes 2004 im Jahr 2002 223,6 Mrd. Euro für Krankheitskosten ausgegeben. Mit 35,4 Mrd. Euro lagen dabei die Kosten für Krankheiten des Kreislaufsystems an der Spitze. Gerade in diesem Bereich können damit neue technische Entwicklungen zu signifikanten Kostenreduzierungen führen.

2. Telemedizin – ein neuer technischer Lösungsansatz

Die Telemedizin ist ein Teilbereich der Telematik im Gesundheitswesen und umfasst sowohl die Diagnostik als auch die Therapie. Kennzeichnend für die Telemedizin ist, dass dabei eine räumliche oder zeitliche Distanz zwischen Arzt und Patienten oder zwischen zwei sich konsultierenden Ärzten mittels Telekommunikation überbrückt wird.

Die Telemedizin wird bereits heute in den Bereichen Telediagnostik, Teleradiologie, Telekonsultation, Telechirurgie, Telekardiologie, Telepathologie und Telemontitoring eingesetzt. Im Mittelpunkt dieses Beitrages stehen Anwendungen im Bereich des Telemonitorings.

In einer Studie von Korb [1] wurden die Anzahl von Krankenhauseinweisungen unter dem Leitsymptom „Brustschmerz“ für eine Gruppe, die mit Diagnosegeräten (EKG) im Heimbereich ausgerüstet war und mit einem telemedizinischen Zentrum in Kontakt stand, sowie einer konventionellen Vergleichsgruppe untersucht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass durch den Einsatz telemedizinischer Lösungen die Anzahl an Notarzteinsätzen sowie stationären Aufnahmen signifikant gesenkt werden konnte. Ver-

bunden damit sind eine Reduzierung der Kosten sowie eine Senkung der Mortalitätsrate.

Ein Netzwerk für die telemedizinische Versorgung von Patienten im Heimbereich (TeleHomeCare) besteht in der Regel aus drei Komponenten. Im Heimbereich des Patienten bzw. am Körper des Patienten befinden sich verschiedene medizinische Diagnosegeräte. Ein Gateway überträgt die medizinischen Daten über öffentliche Netze wie GSM, UMTS oder Internet zu einem telemedizinischen Auswertezentrum. Von diesem Zentrum wird entweder der Notarzt alarmiert oder die Daten werden an den Haus- bzw. Facharzt oder ein Krankenhaus weitergeleitet (Abb. 2).

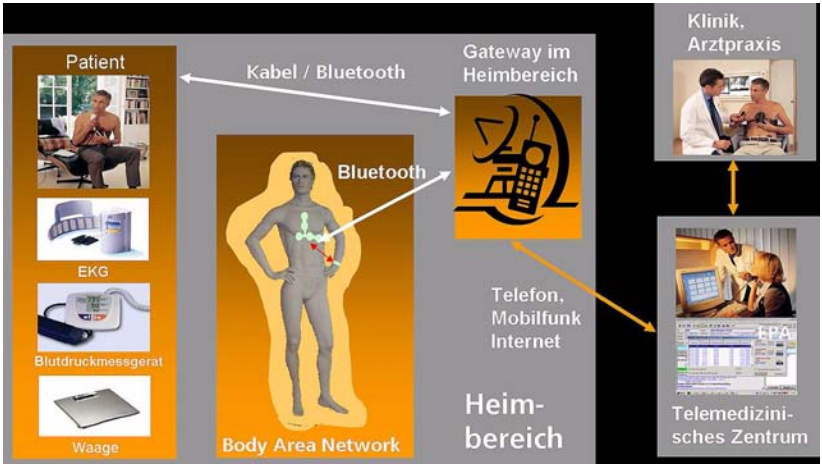

Abb. 2: Netzwerk für TeleHomeCare

Im einfachsten Fall befinden sich im häuslichen Bereich des Patienten medizinische Standarddiagnosegeräte, wie EKG, Blutdruckmessgerät oder Waage, die technisch so aufgerüstet sind, dass eine Datenübertragung über das stationäre Telefonnetz zum telemedizinischen Zentrum möglich ist. Moderner, weil im Einsatz wesentlich flexibler und leistungsfähiger sind so genannte Body Area Networks.

3. Body Area Networks

Ein Body Area Network ist ein Sensornetzwerk, dessen Knoten drahtlos miteinander sowie mit einer Basisstation (Gateway) kommunizieren können. Die Sensorknoten beinhalten medizinische Diagnosegeräte, die vom Patienten am

Körper getragen werden. Zukünftig ist auch die Einbindung von Implantaten (intrakorporale Sensoren) in ein solches Netzwerk bereits angedacht. Die Kommunikation der Sensorknoten untereinander erfolgt drahtlos mittels Bluetooth, ZigBee oder proprietären Funksystemen. Für die Übertragung großer Datenmengen, wie sie bei einem Langzeit-EKG anfallen, zur Basisstation ist die Verwendung optischer Übertragungssysteme (High-Speed-IrDa) eine interessante Alternative.

Beim Einsatz von Sensoren, die außerhalb des Körpers getragen werden (extrakorporal), wird unterschieden zwischen Systemen [2], bei denen sich die Sensoren an der Körperoberfläche befinden bzw. in die Kleidung integriert sind (Abb. 3).

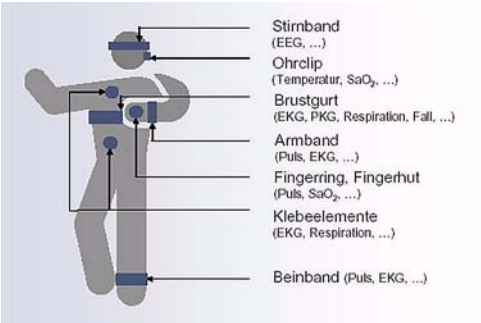

Abb. 3a: Sensoren an der Körperoberfläche

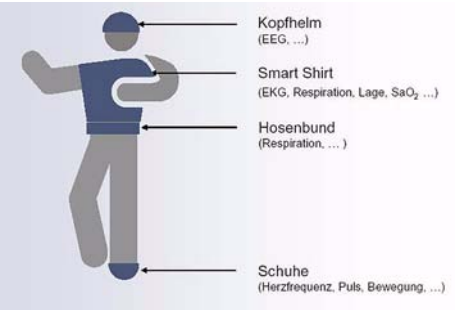

Abb. 3b: Sensoren in der Kleidung (wearable)

Die Einbindung von Implantaten, wie Herzschrittmacher, implantierbarer Defibrillator, künstliche Organe, Drug Delivery Systeme, Endoskop Kapseln oder Cochlear Implantate in Body Area Networks gewinnt zunehmend an In-

teresse. Die Firma Biotronik hat bereits einen Herzschrittmacher vorgestellt, der in der Lage ist, Daten über ein externes Mobilfunktelefon (Gateway) an ein medizinisches Auswertezentrum zu übertragen.

Bei der Funkkommunikation mit Implantaten muss berücksichtigt werden, dass mit zunehmender Frequenz die Eindringtiefe elektromagnetischer Wellen in das Körpergewebe stark abnimmt (Abb. 4). Systeme wie Bluetooth oder ZigBee, die im Frequenzbereich von 2,4 GHz arbeiten, kommen schon aus diesem Grunde, selbst wenn man den relativ großen Energiebedarf dieser Systeme beim Senden vernachlässigt, für Implantate nur bedingt in Frage.

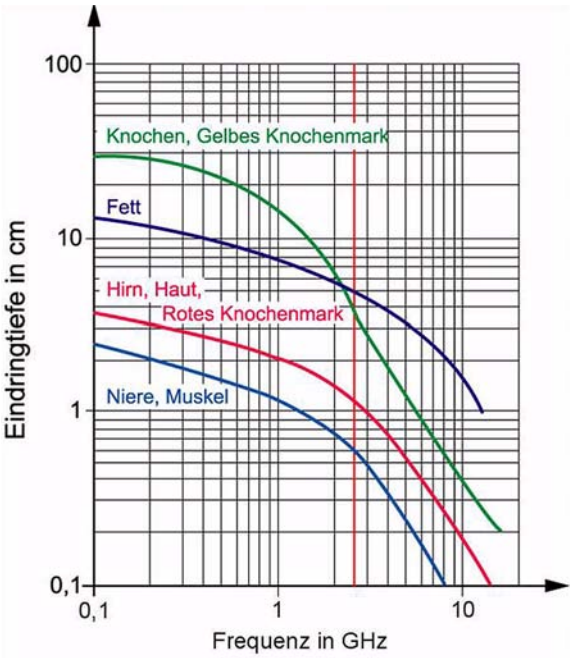

Abb. 4: Frequenzabhängige Eindringtiefe elektromagnetischer Strahlung in Körpergewebe Quelle: Elektromagnetische Felder im Alltag, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

4. Beispiel für ein Body Area Network für die Herz-Kreislaufüberwachung

Im Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme Dresden wurde ein Body Area Network für die Überwachung von Patienten mit Herz-Kreislauf-

Krankheiten entwickelt [3]. Dieses System besteht aus einem 3-Kanal-EKG mit Bluetooth-Übertragung, einem Photoplethysmographie-Sensor mit Bluetooth-Modul sowie einem Labtop oder PDA als Basisstation (Abb. 5). Damit ist es möglich, ein 3-Kanal-EKG über 48 Stunden aufzuzeichnen sowie modellbasiert über die Messung der Pulswellenlaufzeit vom Herzen (R-Zacke) bis zur Hand (Photoplethysmographie-Sensor) den systolischen und diastolischen Blutdruck kontinuierlich zu bestimmen [4]. Das Verfahren basiert darauf, dass die Geschwindigkeit der Blutwelle vom Herzen zu einer Extremität direkt vom Blutdruck abhängt. Näherungsweise wird dieser Zusammenhang durch ein lineares Gleichungssystem [5]

$$p_{sys} = m_{sys} * 1/t_{RP} + b_{sys} \quad (1)$$

$$p_{dias} = m_{dias} * 1/t_{RP} + b_{dias} \quad (2)$$

mit

p_{sys}, p_{dias} – systolischer bzw. diastolischer Blutdruck

t_{RP} – Pulswellenlaufzeit

m_{sys}, m_{dias}, b_{sys}, b_{dias} – probandenspezifische Konstanten

beschrieben. Gegenüber der verbreiteten auskultatorischen Blutdruckmessung mit aufblasbarer Manschette nach Korotkoff hat das Verfahren den Vorteil, dass eine kontinuierliche, pulsschlaggenaue Blutdruckbestimmung möglich ist und keine für ein Langzeitmonitoring störende Manschette erforderlich ist. Ein Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die probandenspezifischen Konstanten vor der ersten Messung und in zeitlichen Abständen durch Vergleichsmessungen bestimmt werden müssen. Dazu sind am Probanden mindestens 2 Messungen bei unterschiedlichen Blutdruckwerten mit einem Vergleichsmessgerät, das z.B. auf dem auskultatorischen Blutdruckmessverfahren beruht, durchzuführen. Unterschiedliche Blutdruckwerte des Probanden lassen sich erreichen, wenn die Messungen in Ruhe und nach körperlicher Belastung durchgeführt werden. Abbildung 6 zeigt im oberen Teil einen Ausschnitt aus dem EKG, das mit der drahtlosen 3-Kanal EKG-Folie gemessen worden ist. Im unteren Bildteil ist das Messsignal des Photoplethysmographiesensors dargestellt. Aus beiden Signalen kann die Pulswellenlaufzeit t_{RP} bestimmt werden. Der systolische bzw. diastolische Blutdruck wurde mit den Gleichungen 1 und 2 berechnet, nachdem die probandenspezifischen Konstanten experimentell bestimmt worden waren. Der Zusammenhang zwischen Pulswellenlaufzeit und Blutdruck ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Annahme eines linearen Zusammenhanges zwischen Blutdruck und Pulswellenlaufzeit wird in guter Näherung bestätigt. Die Messun-

gen wurden an 5 gesunden Probanden durchgeführt und im Abstand von wenigen Tagen bis maximal 3 Wochen wiederholt. Für die Bestimmung der probandenspezifischen Konstanten wurden jeweils 30 Messwerte verwendet.

Abb. 5a: Patient mit drahtlosem 3-Kanal-EKG, PDA mit Bluetooth als Basisstation
Quelle: FHG-IPMS

Abb. 5b: Photoplethysmographie-Sensor
Quelle: FHG-IPMS

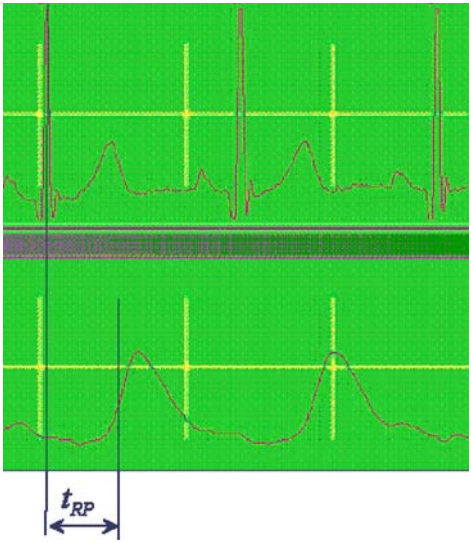

Abb. 6: Bestimmung der Pulswellenlaufzeit tRP aus dem EKG- und Photoplethysmographiesignal

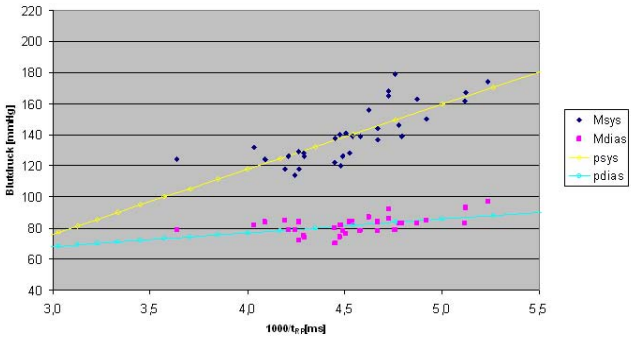

Abb. 7: Modellbasiert bestimmter systolischer und diastolischer Blutdruck in Abhängigkeit der gemessenen Pulswellenlaufzeit

Der Patient kann sich mit dem Body Area Network auch außerhalb seiner Wohnung frei bewegen. Alle Daten werden im Body Area Network für maximal 48 Stunden aufgezeichnet. Gelangt der Patient im Heimbereich in die Nähe des Gateways, so erfolgt automatisch die Datenübertragung zum Gate-

way und weiter über öffentliche Netze (GSM, UMTS) zum medizinischen Auswertezentrum. Dabei müssen teilweise erhebliche Datenmengen übertragen werden, wie das folgende Beispiel zeigt. Ein 24h-3-Kanal-EKG mit einer Abtastrate von 200 Samples pro Sekunde (Monitoring, DIN EN 60601-2-47) erzeugt mit einem AD-Wandler mit 12 bit Wandlungsbreite eine Datenmenge von 78 MByte. Die Tabelle 1 zeigt, welche Übertragungszeiten sich für die verschiedenen Übertragungsverfahren ergeben. Für den Fall, dass das gesamte 24h-EKG auf einmal vom Body Area Network zum Gateway übertragen wird, so ergeben sich nur mit dem High-Speed-IrDa akzeptable Übertragungszeiten. Eine Übertragungszeit von fast 15 Minuten bei Verwendung von Bluetooth liegt sicher an der Grenze dessen, was vom Patienten toleriert wird. Für die Übertragung vom Gateway zum medizinischen Auswertezentrum bietet sich eine Übertragung mit UMTS oder ADSL an. Deutlich günstigere Verhältnisse ergeben sich, wenn eine sensornahe Auswertung der Daten vorgenommen wird und nur medizinisch relevante Daten übertragen werden. Aus juristischen Gründen müssen aber in diesem Fall alle Messdaten im Body Area Network bis zum Abschluss der Befundung in einem zerstörungsfreien Speicher (Flash-Karte) gesichert werden.

Verfahren	Datenüber-tragungsrate	Minimale Übertragungsdauer für ein EKG von 78 MByte
WLAN	11 MBit/s	0,9 min
GSM (GPRS-Technologie)	53,6 KBit/s	194 min = 3,2 h
UMTS (HSDPA-Technologie)	1,8 MBit/s	5,8 min
ISDN	128 KBit/S	81,3 min = 1,35 h
ASDL	8 MBit/s	1,3 min
ZigBee	250 KBit/s	41,6 min
Bluetooth	723 KBit/s	14,4 min
16 MBit High-Speed-IrDa	12 MBit/s	0,9 min

Tab. 1: Übertragungsdauer für ein 24h-3-Kanal-EKG für verschiedene drahtlose Übertragungsverfahren

Für ein Langzeit-Monitoring der Patienten ist es zweckmäßig das Body Area Network in Textilien zu integrieren. Im Fraunhofer IPMS wurde dazu ein EKG-Shirt sowohl für Männer als auch für Frauen entwickelt (Abb. 8).

Abb. 8: EKG-BH-Shirt mit integriertem 3-Kanal-EKG und Bluetooth-Modul
Quelle: FHG-IPMS

5. Ausblick

Gegenwärtig erfolgt ein Monitoring von Herz-Kreislauf-Parametern (EKG, Blutdruck) in der Regel über 24 Stunden. Künftige Systeme werden in der Lage sein, die Überwachung über mindestens eine Woche ohne Batteriewechsel durchführen zu können. Die dabei anfallenden großen Datenmengen erfordern eine sensornahe Signalverarbeitung. Damit ist sowohl eine Vorbefundung (Alarmfunktion) als auch eine erhebliche Datenreduktion möglich.

Die zurzeit im Einsatz befindlichen Systeme werden teilweise erheblich durch Bewegungsartefakte gestört. An der Erkennung und Unterdrückung solcher Artefakte wird gearbeitet.

Ein Langzeitmonitorinjg ist nur dann erfolgreich durchführbar, wenn eine hohe Patientenakzeptanz erreicht wird. Ein hoher Tragekomfort der Systeme

ist dabei eine wesentliche Voraussetzung. Ein Erfolg versprechender Ansatz stellt dabei die Integration von Body Area Networks in Textilien dar.

Literatur

[1] H. Korb, D. Baden, M. Wähner, T. Helms, Ch. Zugck: Telemonitoring bei „Akutem Koronarsyndrom“; Proc. Telemed 2006, 7.-8. April 2006, Berlin

[2] W. Niederlag: Smart Home und Telemedizin. Ringvorlesung „Computeranwendungen in der Medizin“; RWTH Aachen, 2005 www.rwth-aachen.de/fi/Ww/aktuelles/Aachen-Ringvorlesung-05.12.2005.pdf

[3] G. Despang, H. J. Holland, W. J. Fischer, B. Jettkant, B. Clasbrummel: Nichtinvasive kontinuierliche Blutdruckmessung mit drahtlosem EKG und Photo-Plethysmographie-Sensor; Proc. Telemed 2005, 8.-9. Mai 2005, Berlin, pp. 262-267

[4] G. Despang, H.J. Holland, D. Wiedemuth, W. J. Fischer, P. Heymer, E. Wunderlich: Blutdruckmessung über Pulswellenlaufzeit mit Task Force Monitor, EKG-Folie und Photo-Plethysmographie-Sensor; Gemeinsame Jahrestagung der Deutschen, Österreichischen und Schweizerischen Gesellschaft für Biomedizinische Technik, 6.-9. September 2006, Zürich

[5] D. Barschdorff, M. Erig: Kontinuierliche Blutdruckbestimmung während des Belastungs-EKG; Biomedizinische Technik 43(1998), 34-39