

# Entwicklung von Sensoren auf Basis von Bluetooth

Dip. -Ing., Claudius Moor, Corscience GmbH & Co. KG, Forschung & Entwicklung

## 1. Problem- und Prozessbeschreibung

Eine der allzeit bestehenden Visionen bei der Gewinnung medizinischer Messwerte ist die drahtlose Ableitung der Signale. Der heutige Standard in der medizinischen Messwertableitung bedingt jedoch eine vollständige Verkabelung des zu behandelnden Patienten. Dabei wird meist sogar jede einzelne Elektrode mit einer drahtgebundenen Leitung an einen Monitor angeschlossen. Die entstehenden Nachteile wie

- Behinderung des Patienten,
  - Behinderung der zu behandelnden Personen
  - und Entstehung von Artefakten durch Bewegung der Elektrodenkabel
- können durch den Einsatz drahtloser Übertragungstechnik vermieden werden.

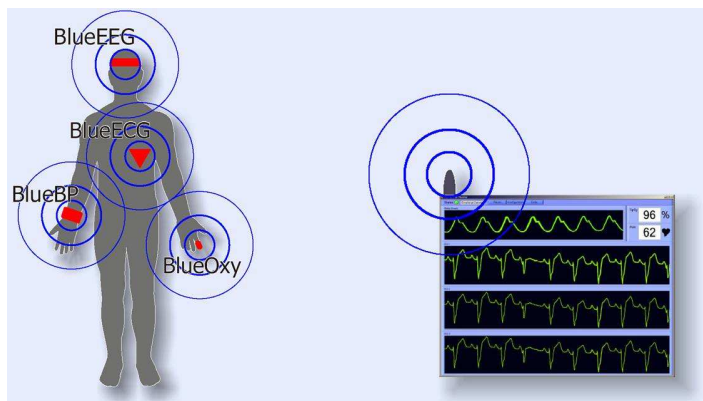


Abbildung 1: Bluetooth-Monitoring

Die Firma Corscience hat sich nun zum Ziel gesetzt, medizinische Messgeräte wie EKG, EEG, Pulsoximeter und Blutdruck mit einer drahtlosen Übertragungstechnologie auszurüsten. Die oben beschriebenen Behinderungen und Einschränkungen gehören damit der Vergangenheit an. Für Arzt und betreuendes Personal ergibt sich in den verschiedensten Bereichen wie Notfall-, Schlaf- und Intensivmedizin eine Erleichterung der medizinischen Routine.

## 2. Stand der Technik und Ergebnisse bisheriger Veröffentlichungen

### 2.1. Stand bei der Ableitung medizinischer Signale

Wie in Kapitel 1 beschrieben, bedingt die heutige medizinische Signalableitung eine Verkabelung des zu behandelnden Patienten. Das in Abbildung 2 dargestellte Blockschaltbild beschreibt den hierfür nötigen Signalweg. Ein analoges Signal  $A_0$  wird über Elektroden am Patienten gemessen und durch Kabelverbindungen an den Monitor übertragen. Der Darstellung der Signale am Monitor vorgeschaltet sind eine Analog-Digital-Wandlung  $D_0$  und die Aufbereitung der Messwerte für das Monitoring

$\check{D}_0$ . Ein aktuelles Ableitungssystem besteht somit aus einer Elektrode am Körper und den in den Monitor integrierten Einheiten.

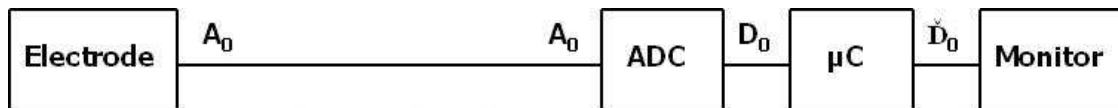


Abbildung 2: Blockschaltbild einer heutigen medizinischen Datenübertragung

## 2.2. Drahtloses Monitoring

Der erste Schritt bei der Entwicklung drahtloser medizinischer Sensoren besteht in der Auswahl der Übertragungstechnologie. Da bei kabelreichen Anwendungen wie im Rettungswesen, der Schlafmedizin und auf Intensivstationen keine Sichtverbindung gewährleistet werden kann, scheidet der Infrarot-Standard der Infrared Data Association (IrDA) aus [1]. Für die Übertragung medizinischer Sensordaten kommt daher nur eine Funkverbindung in Betracht. Um den Entwicklungsaufwand möglichst gering zu halten, ist die Verwendung einer standardisierten Übertragungsform anzuraten. Ohne weiteres lassen sich hier fertige Funkmodule einsetzen, deren Programmierung über definierte Übertragungsprotokolle geschieht, die bereits eine Fehlerkorrektur und eine Absicherung gegen Störer implementieren. Des Weiteren haben standardisierte Funkübertragungen den Vorteil, untereinander kompatibel zu sein. So reicht es bei einigen Anwendungen aus, lediglich den Datensender, also in unserem Fall das medizinische Messgerät, mit einer Drahtlosschnittstelle auszustatten. Bei der Verwendung von Personal Computern, Laptops oder PDAs als Monitor ist diese standardisierte Drahtlosschnittstelle schon integriert. Auch beachtet werden sollte bei der Auswahl der Technologie, dass mehr als ein Messgerät an einem Monitor dargestellt werden muss. Deutlich wird dies am Beispiel eines Notfalleinsatzes, wo EKG, Pulsoximeter und Blutdruck zu den standardmäßig abgeleiteten Signalen gehören. Entscheidet man sich gegen einen Standard und somit für eine proprietäre Lösung, so müssen die oben beschriebenen Punkte alle selbst implementiert werden.

## 2.3. Der Funkstandard Bluetooth

Die Bluetooth-Funktechnik arbeitet im Frequenzbereich um 2,4 Gigahertz. Ein Frequenzsprungverfahren und spezielle Fehlersicherungsprotokolle schützen Bluetooth vor Störungen und vor unberechtigtem Abhören. Jede Bluetooth-Apparatur besitzt eine 48 Bit lange Adresse, mit der sie sich weltweit identifizieren lässt. Durch die mögliche Verschlüsselung und Authentifizierung ist ein weiterer Datenschutz gegeben. Die Entfernung zwischen Sender und Empfänger darf bei Bluetooth 10 m betragen. Der Standard sieht jedoch auch einen Modus mit höherer Funkleistung vor, mit dem sich bis zu 100 m überbrücken lassen. Bluetooth bietet je nach Bedarf mehrere Datenkanäle, bis zu drei parallel nutzbare Sprachkanäle oder einen Mischkanal, der Daten und Sprache gleichzeitig übertragen kann. Die Datenkanäle erreichen entweder eine asymmetrische Übertragungsrate von 721/57,6 KBit/s oder eine symmetrische Übertragung von 432,6 KBit/s in beiden Richtungen [2].

Per Bluetooth ist die Kommunikation von bis zu 7 Slaves in einem Piconetz möglich. Einzelne Piconetze können nun wieder zu so genannten Skatternetzen zusammengeslossen werden (s. Abbildung 3).

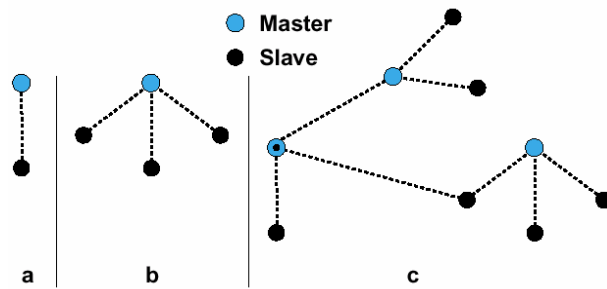


Abbildung 3: (a) Piconetze mit einem Slave, (b) mit mehreren Slaves und (c) ein Skatternetz [3]

Um die Einhaltung des Bluetooth-Standards zu gewährleisten wurden von der Bluetooth SIG (Special Interest Group) das Bluetooth Protokoll [3] und die Bluetooth-Profile definiert [4]. Ein Bluetooth-Profil legt eine standardisierte Abfolge an verbindungs-aufbauenden sowie verbindungs-steuernden Befehlen aus dem Protokoll fest. Hierdurch wird die Übertragungs-kompatibilität zwischen Geräten verschiedener Hersteller sichergestellt.

#### 2.4. Evaluierung von Bluetooth für die drahtlose Sensorik

Bluetooth bietet sich durch die Eigenschaft der Netzwerk-bildung, seiner kleinen Modulbauform 12,6 x 11,6 mm [6], des geringen Stromverbrauchs und der Standardisierung einer Funkschnittstelle für den Einbau in Messgeräte an. Sichergestellt wird auch die fehlerfrei Übertragung der Daten durch den Standard. Eine Verschlüsselung zur Erhöhung der Datensicherheit kann im Bedarfsfall aktiviert werden.

Wie die Bandbreite in einem Piconetz genutzt werden kann, wurde in [5] dargestellt. Zusammenfassend wurde gezeigt, dass bei der EEG-Ableitung eine minimale Abtastfrequenz von 100 Hz und eine 12 Bit A/D-Wandlung nötig ist, um die 1  $\mu\text{V}/\text{Bit}$  Auflösung zur anschließenden automatischen Schlaferkennung zu erhalten (s. auch Tab. 1).

Tab. 1: Minimalanforderungen an digitale Polysomnographie als Basis zur automatischen Schlaferkennung [7]

Signal	Abtastfrequenz	Digitale Auflösung
EEG	100 Hz	1 $\mu\text{V}/\text{Bit}$
EOG	100 Hz	1 $\mu\text{V}/\text{Bit}$
EMG	100 Hz	0,5 $\mu\text{V}/\text{Bit}$
EKG	100 Hz	10 $\mu\text{V}/\text{Bit}$

Nimmt man diese Angaben als Grundlage und geht davon aus, dass 12 Bit in zwei Bytes übertragen werden, dann ergibt sich hieraus folgende Rechnung:

$$100\text{Hz} * 16\text{Bit} = 1,5625\text{Kbit} / \text{s} \quad (1)$$

Da für die Übertragung der Messdaten ein Protokoll verwendet werden muss, um die Kanäle auf der Empfangsseite eindeutig zuordnen zu können, ist zu (1) noch ein Protokolloverhead von 2% zu addieren:

$$1,5625\text{Kbit} / \text{s} * 1,02 = 1,59375 \quad (2)$$

Nimmt man eine maximal mögliche Datenrate von 721 kbit/s in die Richtung der Basisstation an, dann ergibt sich nach dem obigen Berechnungsbeispiel die Übertragung von 452 möglichen Kanälen in einem Piconetz. Ein EEG-Kanal belegt dabei 0,22% der möglichen Übertragungskapazität.

### 3. Neue Lösungsansätze und Kernaussagen

#### 3.1. Voraussetzungen

Das Hauptkriterium bei der Entwicklung drahtloser medizinischer Sensoren stellt der geringe Energieverbrauch durch das Sensormodul dar. Hierbei gilt, dass sich der Datensender bei annehmbarer Akkugröße mindestens 24 h betreiben lassen sollte. Nötig ist deshalb, sämtliche Energiesparoptionen von Bluetooth auszureizen, auch wenn dies bedeutet, dass nicht mit maximal möglicher Datenrate übertragen werden kann. Da im Normalfall die benötigte Datenrate nicht im oberen Bluetoothbereich liegt, können die Stromsparmodi entsprechend eingesetzt werden.

Wie auch die Datenrate, ist die Reichweite der Übertragung stark verknüpft mit dem Strom- und Energiebedarf. Aus diesem Grund fällt die Verwendung von Class 1 Modulen beim Sensor weg. Setzt man nun Class 2 Module ein, so muss trotzdem eine Reichweite von 5 m in einer extremen Umgebung möglich sein. Extreme Umgebung bedeutet hierbei, dass ein beliebiger Patient in einem Schlaflabor direkt auf dem Sender liegt, ohne es zu merken.

Tab. 2: Sendeleistungsklassen [3]

Leistungsklassen	Maximale Sendeleistung $P_{\max}$
1	100 mW (20 dBm)
2	2,5 mW (4 dBm)
3	1 mW (0 dBm)

#### 3.2. Aufbau der Sensorik

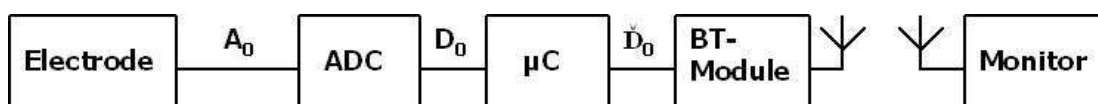


Abbildung 4: Blockschaltbild einer drahtlosen Übertragung

Eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung drahtloser medizinischer Geräte stellt die Integration der Messsensorik in den Sender dar. Dies ist deshalb so, weil Messsignale beim Ableiten in analoger Form vorliegen, teilweise noch verstärkt werden müssen und erst anschließend durch einen A/D-Wandler analog nach digital gewandelt werden können. In der dann vorliegenden digitalen Form der Signale ist die drahtlose Übertragung der Messwerte zu einem Monitor möglich (s. Abbildung 4).

## 4. Versuchsergebnisse, Einsatzbereiche und Betriebserfahrungen

### 4.1. Medizinische Sensoren

Die hier beschriebenen Sensormodule stellen den ersten Ansatz bei der Entwicklung von medizinischen Bluetooth-Sensoren dar.

#### 4.1.1. Bluesense

Ein mit Bluesense (Abbildung 5) ausgerüsteter Sensor kann sich in einem Bluetooth-Netz als Slave anmelden und seine Daten an einen drahtlosen Monitor oder einen PC/Laptop mit Bluetooth-Masterfunktion übertragen. Bluesense besitzt zwei Schnittstellen, einen gewöhnlichen UART sowie acht 12 Bit A/D-Wandler. Hierdurch können einerseits Daten eines bestehenden Messgerätes wie auch Signale eines Analogverstärkers versendet werden. Werden die A/D-Wandler zur Übertragung analoger Messdaten verwendet, so können diese mittels Bluetooth konfiguriert werden. Beispielsweise sind die Anzahl der A/D-Kanäle, die Abtastfrequenz sowie der Profilname der Messeinheit über einen Bluetooth-Master einstellbar.



Abbildung 5: Bluesense-Modul: (a) Ansicht von oben, (b) Ansicht von unten

Um Messgeräte mit unterschiedlicher UART-Geschwindigkeit anbinden zu können, lässt sich die Datenrate über externe Pins konfigurieren. Eine von vier Übertragungsraten zwischen 9600 bit/s und 115,2 kbit/s (9600, 19200, 57600, 115200) kann ausgewählt werden. Des Weiteren sind zur Flusskontrolle CTS- und RTS-Funktionen implementiert. Ein Carrier Detect (CD) Signal zeigt an, wann eine Verbindung zu einem Bluetooth-Master aufgenommen wurde. Über Inquiry Scan Enable (ISE) kann das Modul für andere Bluetooth-Geräte sichtbar gemacht werden.

Die Entwicklung der Datenrate von Bluesense ist in Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellt. Bluesense erreicht somit ohne einen Patienten als Hindernis eine Reichweite von 15 m bei einer Datenrate von über 90 kbit/s. Die Beschränkung auf maximal 95 kbit/s bei kurzen Distanzen ergibt sich durch den stromsparenden Aufbau von Bluesense. Als Host Controller kommt ein Mikrocontroller zum Einsatz, der bei voller Auslastung lediglich eine Stromaufnahme von 4 mA besitzt.

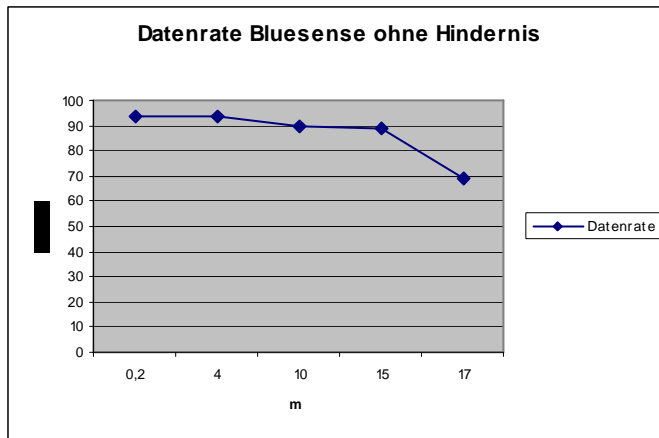


Abbildung 6: Datenrate von Bluesense ohne Hindernis

Da Bluesense auch für den Einsatz in der Schlafmedizin gedacht ist, musste die gewählte Antenne im nahen Körperumfeld eine gute Charakteristik aufweisen. Wie in 3.1 beschrieben, tritt die Extremsituation für den Bluetooth-Sender hier genau dann auf, wenn ein Patient während einer Nachtmessung auf dem am Körper befestigten Sensormodul liegt. Messungen haben nun gezeigt, dass Bluesense auch in einer solchen Situation gute Eigenschaften aufweist (s. Abbildung 7).

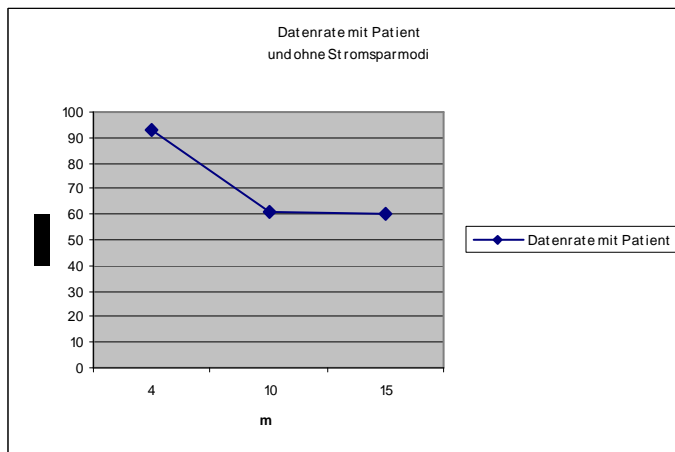


Abbildung 7: Datenrate von Bluesense mit Patient

Die Stromaufnahme von Bluesense mit und ohne Hindernis bei maximal möglicher Datenrate ist in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Durchschnittswert mit der Entfernung und dem Vorhandensein eines Hindernisses von 52 mA bis auf bis zu 64 mA ansteigt.

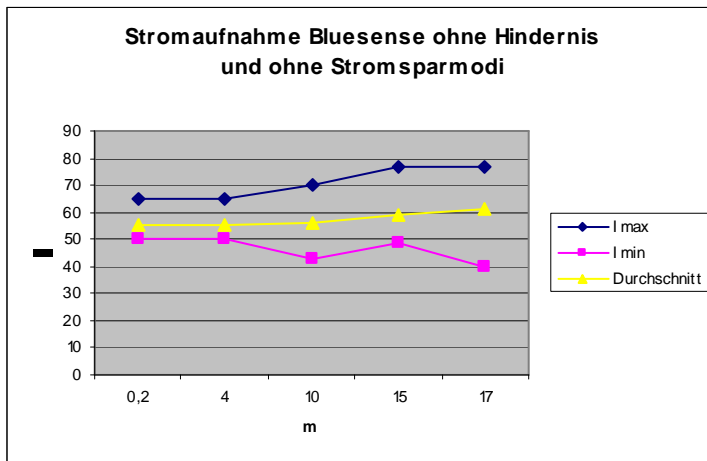


Abbildung 8:  
Stromaufnahme von  
Bluesense ohne Hindernis

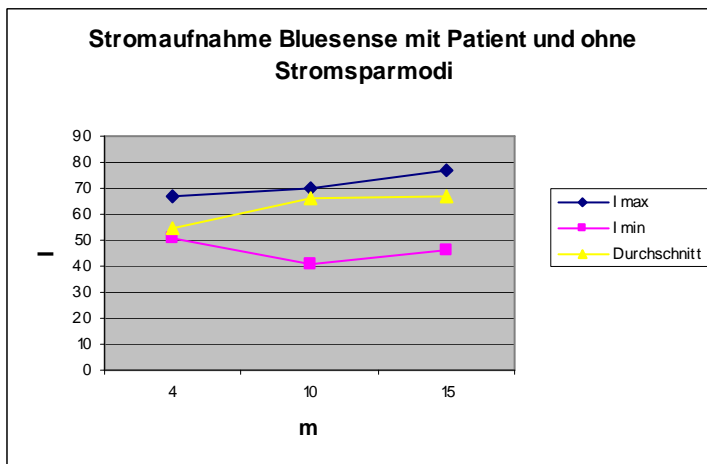


Abbildung 9:  
Stromaufnahme von  
Bluesense mit Patient

Abschließend kann gesagt werden, dass Bluesense mit den oben dargestellten Messwerten schon ohne weiteres in der drahtlosen medizinischen Sensorik eingesetzt werden kann. Eine weitere Verbesserung der Stromaufnahme wird sich ergeben, wenn der Sniff-Modus bei der Datenübertragung aktiviert wird. Der Sniff-Modus ist ein von Bluetooth unterstützter Stromsparmodus. Wird dieser eingeschaltet, dann kann der Bluetooth-Slave für eine vorher definierte Zeit keine Daten empfangen und senden, was zu einer Reduzierung des Stromverbrauchs auf Senderseite führt. Messungen mit Vorgängerversionen haben gezeigt, dass Bluesense bei einem maximalen Sniff-Modus von 1,15 s nur noch 11 mA an Strom benötigt [8].

Neben der Aktivierung des Sniff-Modus zur Reduzierung der Stromaufnahme, ist auch über eine Reduzierung der Sendeleistung nachzudenken. Die durchschnittliche benötigte Reichweite bei der drahtlosen medizinischen Messwertübertragung liegt bei etwa 5 m. Diese lässt sich auch noch bei einer Drosselung der Übertragungsleistung erreichen.

#### 4.1.2. Bluetooth-EKG

Aufbauend auf Bluesense wurde von der Firma Corscience GmbH & Co. KG ein drahtloser 2-Kanal EKG-Sender realisiert. Der Entwicklungsschwerpunkt lag

dabei in einem möglichst geringen Leistungsverbrauch bei guter Signalqualität. Das Ergebnis der Arbeit ist nun ein EKG, was nicht mehr als 500  $\mu\text{A}$  für die Verstärkung der analogen Signale benötigt.

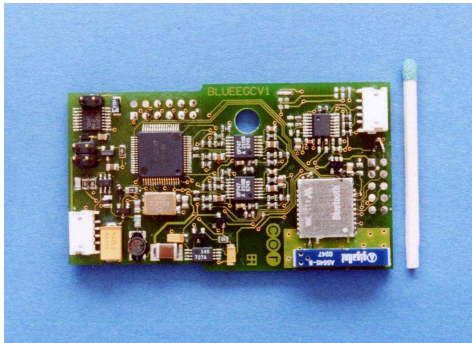


Abbildung 10: BlueECG

#### 4.1.3. Bluetooth-Pulsoximeter

Der Bluetooth-Pulsoximeter (Abbildung 11) kombiniert ein Bluetooth-Modul und einen Pulsoximeter zu einer drahtlosen Übertragungseinheit. Integriert in die Oberschale eines  $\text{SPO}_2$ -Fingersensor und mit einer wiederaufladbaren Batterie in der Unterschale versehen, ist die kabellose Übertragung von Sauerstoffsättigung, Pulsfrequenz und Plethysmogramm möglich. Der Sensor lässt sich in einem Bluetooth-Netz als Slave anmelden und kann Daten an einen drahtlosen Monitor oder einen PC/Laptop mit Bluetooth-Masterfunktion übertragen.

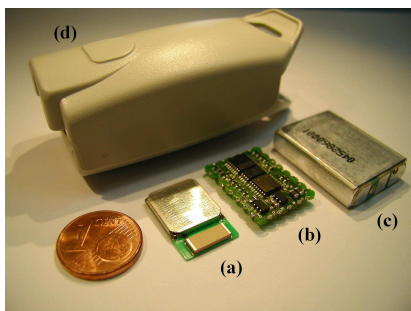


Abbildung 11: Bluetooth-Pulsoximeter, (a) Bluetooth-Modul, (b) Pulsoxymeter, (c) Akku, (d) Fingersensor

Konfiguriert wird der Sensor über den Bluetooth-Master. So können zur Übertragung Kombinationen zwischen Sauerstoffsättigung, Pulsfrequenz und Plethysmogramm am Monitor ausgewählt werden.

## 5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Wie in diesem Beitrag gezeigt wurde, lässt sich Bluetooth ohne weiteres in der drahtlosen medizinischen Sensorik einsetzen. In naher Zukunft werden Produkte auf den Markt kommen, welche die lästigen Kabelverbindungen überflüssig machen.

Ein weiterer Schritt besteht nun in der Integration von möglichst viel Intelligenz in den Sensor selbst. Beispiele hierfür sind das vorgestellte Pulsoximeter und Blutdruckmessgeräte. Ein Pulsoximeter berechnet aus der gemessenen optischen Transmission die Sauerstoffsättigung und Herzfrequenz, ein Blutdruckmessgerät aus

der Druckkurve den Blutdruck. Werden diese Berechnungen in den Sensor verlegt, so reicht es aus, den endgültigen Messwert zu übertragen. Dies führt zu einer Reduzierung der Datenrate über die drahtlose Schnittstelle, was eine Reduzierung der aufzuwendenden Leistung nach sich zieht. Genau berechnet werden muss aber, ob die höhere Rechenleistung durch einen verbrauchsarmen Mikrocontroller geleistet werden kann. Ein weiterer Vorteil, den die Integration von Intelligenz in den Sensor mit sich bringt, ist die einfache Anbindung von Messgeräten an unterschiedliche Monitore. Da keine Berechnung der Absolutwerte auf dem Monitor gemacht werden muss, wird dieser zur reinen Darstellungseinheit. Gerade für Entwickler von OEM-Geräten (OEM – Original Engineered Manufacture) bietet dies eine Möglichkeit, ihre Entwicklung und ihr Wissen abzugrenzen.

## 6. Diskussion

Der Anstoß zur Entwicklung des drahtlosen Übertragungsstandards Bluetooth kommt aus dem Consumer-Bereich. Über diesen wird heute und auch in Zukunft die weitere Entwicklung vorangetrieben werden. Die Anwendung in der Medizintechnik stellt wie so oft nur ein Randgebiet dar. Da jedoch im Consumer-Bereich so genannte Personal Area Networks (PAN) entwickelt werden, die um einen Personal Computer sämtliche Peripherieeinheiten mit diesem drahtlos verbinden sollen (z.B. Maus, Tastatur, Drucker, ...), ist von einer Weiterentwicklung, mit dem Ziel die Größe sowie den Strombedarf zu reduzieren, auszugehen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Infrared Data Association, *Technical Summary of "IrDA Data" and "IrDA Control"*, <http://www.irda.org>.
- [2] J. Bray, C. F. Sturman, *BLUETOOTH Connect Without Cables*, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- [3] Bluetooth SIG, *Specification of Bluetooth System: Core*, Version 1.1, 2001.
- [4] Bluetooth SIG, *Specification of Bluetooth System: Profiles*, Version 1.1, 2001.
- [5] C. Moor, M. Schwaibold, J. Schöchlin und A. Bolz, *Bluetooth als drahtloses Datenerfassungsnetzwerk für medizinische Anwendungen*, Biomedizinische Technik, vol. 46-1, pp. 488–489, 2001.
- [6] Mitsumi, *WML-C19Nx mechanical drawings*, WML-C19Nx\_mech\_drawings.pdf, Datasheet.
- [7] T. Penzel, R. Conrath, „Computer based sleep recording and analysis“ in *Sleep Medicine Reviews*, Vol. 4, No. 2, pp 131-148, 2000.
- [8] C. Moor, M. Schwaibold, H. Roth, J. Schöchlin, A. Bolz, *Entwicklung drahtloser Sensoren auf Basis von Bluetooth*, Biomedizinische Technik, vol. 47-1, pp. 325-327, 2002.