

Einsatz von Low-Power Netzwerken zum Monitoring leistungsdagnostischer Daten im Teamsport

Dr.-Ing. Ulf Witkowski, Fachgruppe Schaltungstechnik, Universität Paderborn
Dipl.-Wirt.-Ing. Per Wilhelm, Fachgruppe Schaltungstechnik, Universität Paderborn
Dipl.-Ing. Tobias Parketny, Fachgruppe Schaltungstechnik, Universität Paderborn

1 Anwendungsszenario

Die sportmedizinische Überwachung von Sportlern ist seit mehreren Jahren Standard im Bereich des Leistungssports. Viele Sportler und Trainer erwarten von einer leistungsdagnostisch orientierten Untersuchung auch Aussagen darüber, mit welcher Intensität bzw. Geschwindigkeit im Training gelaufen werden soll, um den bestmöglichen Trainingserfolg sicher zu stellen. Gerade in Sportsportarten wie Handball, Fußball oder Basketball ist es aufgrund des komplexen und sportartspezifischen Belastungsprofils oft nicht einfach, die richtigen Trainingsreize für verschiedene Ausdauerformen zu setzen. Daher ist es wichtig, den aktuellen Leistungsstand der Sportler objektiv zu untersuchen. Für Trainer und Spieler ist es von großer Bedeutung, dass diese technischen Hilfsmittel keinerlei Auswirkungen auf die Beweglichkeit und Agilität des Sportlers haben und kein Verletzungsrisiko darstellen. Dementsprechend klein und tragbar („smart“) müssen die Geräte sein. Im Rahmen des Universitäts-Forschungsprojektes „Informationstechnologie zur Spielanalyse und Trainingssteuerung in Sportsportarten“ soll die ausgewertete Herzfrequenz (HF) von Handballspielern während des Wettkampfes aufgenommen und analysiert werden. Das Modul zur Aufnahme der Daten wird möglichst ohne Beeinträchtigung des Sportlers an einem T-Shirt befestigt oder in einen Brustgurt integriert. Gemeinsam mit der visuellen Erfassung der Laufwege der Sportler über ein Kamerasystem soll mit diesen Daten eine grafische Darstellung der Belastung des Sportlers in den jeweiligen Spielsituationen möglich sein (siehe Abbildung 1).

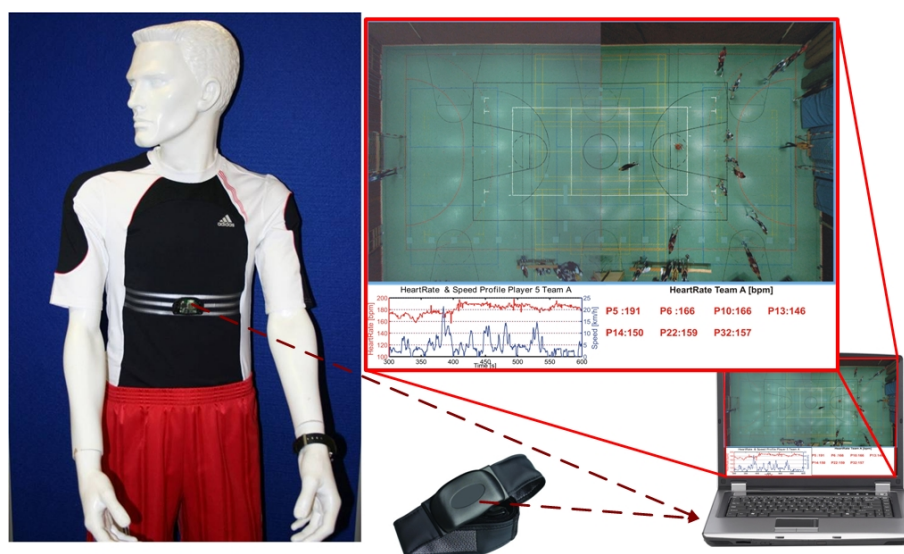


Abbildung 1: Anwendungsszenario: Einsatz eines mit Elektronik ausgestatteten Sportshirts im Mannschaftssport. Analyse physiologischer Daten und Videobilder

Gängige Herzfrequenzen liegen zwischen 30 bpm („beats per minute“) und 250 bpm. Daher bietet sich eine Technologie an, die das Funkmodul nach dem Senden der ausgewerteten Herzfrequenz bzw. eines Impulses im Rhythmus der Herzschläge in einen Schlaf-Modus versetzt. Rechtzeitig zum nächsten Herzschlag muss das Funkmodul wieder aktiviert werden, damit eine Übertragung der HF-Daten in Echtzeit gewährleistet werden kann. Gleichzeitig muss das Aktivieren und Deaktivieren des Schlaf-Modus deutlich weniger Energie benötigen als eine kontinuierliche Übertragung. Die Randbedingungen für das Szenario der leistungsdiagnostischen Anwendungen im Sport können wie folgt dargestellt werden:

- Geringes Sensordatenaufkommen
- Nicht kontinuierliche Übertragung
- Spannungsversorgung mit herkömmlicher 3V Knopfzelle (CR2032, CR2025)
- Einsatzzeit ohne Batteriewechsel ≥ 24 h
- Übertragungreichweite ≥ 30 m
- Erfassung von bis zu 30 Teilnehmern

Es werden ein Mikrocontroller zur Auswertung der Sensordaten sowie zusätzliche Sensoren, wie Temperatur-, Beschleunigungs- oder Hautleitwertensoren in einem Modul integriert.

Die typische maximale kontinuierliche Stromabgabe einer CR2032 Knopfzelle liegt bei 4mA. Die Komponenten zur Aufnahme und Auswertung der Daten werden einen Großteil der Batteriekapazität beanspruchen. Die durchschnittliche Stromaufnahme einer passenden Kommunikationslösung sollte demnach bei einer Spannung von 3V einen Wert von deutlich unter 1mA aufweisen.

2 Stand der Technik und eigene Umsetzungen

Es existieren bereits viele standardisierte und nicht-standardisierte Lösungen zur Umsetzung von drahtlosen Netzwerken. Die standardisierten Lösungen Bluetooth und ZigBee bieten eine einfache Integration und eine breite Auswahl an bestehenden Produkten. Demgegenüber stehen die Lösungen führender Pulsuhrenhersteller wie Polar oder Suunto. Das Gros der existierenden Komponenten arbeitet im lizenzfreien 2,4GHz ISM Band. In den lizenzfreien Frequenzbändern unterhalb von 1GHz sind wenig standardisierte Lösungen zu finden, wenngleich eine Vielzahl an Low-Power Transceivern oder Single-Chip-Lösungen existieren.

2.1 Bluetooth

Bluetooth ist der bekannteste Standard für die Funkvernetzung von Geräten mit geringer Reichweite („Wireless Personal Area Network“ – WPAN). Es werden drei Transmitterklassen unterschieden:

1. Klasse 1: maximale Ausgangsleistung 100mW
2. Klasse 2: maximale Ausgangsleistung 2,5mW
3. Klasse 3: maximale Ausgangsleistung 1mW

Laut der Spezifikation (Bluetooth SIG, 2007) ist es möglich, mit Bluetooth ein energieeffizientes Netzwerk aufzubauen. Abhängig von der Sniff-Zeit (Sniff: Reduktion

der Zykluszeit der Slaves um einen bestimmten Wert) kann ein Slave auf eine mittlere Stromaufnahme von unter 1mA kommen (CSR, 2007). Der Bluetooth-Standard unterstützt innerhalb eines Piconetzes bis zu sieben Teilnehmer. Für eine Realisierung mit 30 oder mehr Teilnehmern gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Für jeweils sieben Teilnehmer wird ein zusätzlicher Empfänger, der als Master fungiert, an den PC angeschlossen
2. Bei mehr als sieben Teilnehmern sind weitere Module mit Masterfunktion zur Abfrage der Daten einzusetzen.

Die erste Variante ist realisierbar, aber aufgrund der unflexiblen Konfiguration des Empfängers bzw. der Empfänger nicht praktikabel. Für den Fall, dass in einem bestimmten Szenario mehr Knoten benötigt würden, müssten immer neue Empfänger dem System hinzugefügt werden. Der Aufwand hierfür steht in keinem Verhältnis zum Nutzen. Die zweite Lösung ist aufgrund der schlechten Energieeffizienz der Brücken- und Masterknoten nicht realisierbar. Es ist denkbar, die Master der zusätzlichen Piconetze als Brücke arbeiten zu lassen, so dass keine zusätzlichen Brückenknoten für den Übergang der Netze nötig sind. Diese Masterknoten müssten dann die Synchronisierung mit zwei Netzwerken aufrecht erhalten. Zudem müsste der Übergangsknoten zwischen dem ersten und dem zweiten Piconetz die gesamten Datenmengen von allen weiteren Netzen weiterleiten. Diese Master können nicht die angestrebte maximale durchschnittliche Stromaufnahme von unter 1mA erreichen.

2.2 ZigBee

Der IEEE 802.15.4 Standard (IEEE, 2003) bzw. ZigBee (ZigBee Alliance, 2006) bietet Netzwerkgrößen bis über 60.000 Teilnehmer an. Innerhalb eines sternförmigen Netzwerkes mit nur einem Koordinator können die einzelnen Knoten bestmöglich von den Energiesparfunktionen profitieren. In diesem Szenario wird eine asynchrone Datenübertragung sinnvoller sein als eine Beacon-basierte. In letzterem Fall müssen sich sämtliche Knoten mit dem Koordinator synchronisieren und immer entsprechend der Beacon-Intervalle aufwachen und den Kanal abhören. Diese aktive Zeit kann reduziert werden, indem die Knoten ihre Daten asynchron an den Koordinator senden. Allerdings muss vorher eine Identifizierungsphase voraus gehen. Jeder Knoten muss sich bei dem Netzwerkkoordinator anmelden. Dieser Datenaustausch kann ebenfalls asynchron stattfinden. Mit dem sehr geringen Stromverbrauch im Schlafmodus ist diese Lösung theoretisch für das Anwendungsszenario der leistungsdiagnostischen Überwachung im Sport denkbar.

2.3 Drahtlose Sensornetzwerke

Drahtlose Sensornetzwerke werden heutzutage in vielen Bereichen und Szenarien verwendet. Einige Szenarien werden von der ZigBee Spezifikation bereits bedient. Zahlreiche proprietäre Protokolle bauen auf der Bitübertragungsschicht des IEEE 802.15.4 Standards auf und setzen dann die höheren Schichten anwendungsspezifisch um. Für WSNs gilt, dass im Allgemeinen keine Knopfzellen verwendet werden, da die Größe der Sensorknoten nicht unbedingt das ausschlaggebende Kriterium

dieser Anwendungen ist. Die meisten Netzwerke setzen Maschen- oder Baumtopologien (Crossbow Technologies, 2008) um und benötigen somit Routing Algorithmen. Diese Algorithmen werden zwar auf Zuverlässigkeit und Energieeffizienz optimiert, der dauerhafte Betrieb erfordert aber entweder einige Routingknoten mit größerem Energiespeicher, die für das Weiterleiten der Nachrichten der Endknoten zuständig sind, oder eine sehr exakte Zeitsynchronisierung bei sehr geringem Duty-Cycle, z.B. das Time Synchronized Mesh Protocol von Dust Networks (Dust Networks, 2008). Der M2135 (Dust Networks, 2008) hat zum Beispiel bei einem Duty-Cycle von einer Minute eine Stromaufnahme von 57 μA bei 3V.

2.4 Leistungsdiagnostische Anwendungen im Sport

Es existieren bereits zahlreiche Pulsuhren und Beschleunigungsmesser auf dem Markt. Diese Module haben alle eine angegebene Laufzeit von über einem Jahr (kein Dauerbetrieb). Keine dieser Varianten verwendet ein standardisiertes Netzwerkprotokoll zur Realisierung der Funkübertragung. Die führenden Hersteller verwenden durchgehend das von der Firma Dynastream Innovations (Dynastream Innovations, 2008) entwickelte Protokoll ANT (Dynastream Innovations, 2007) oder eine eigene Anpassung dieses Protokolls.

Das Protokoll setzt die drei untersten Schichten des ISO/OSI-Referenzmodells um. Es sind sowohl die Bitübertragungsschicht, die Sicherungs- und Medienzugriffsschicht als auch die Vermittlungsschicht implementiert. Dynastream Innovations verwendet die Low-Power-Transceiver der Firma Nordic Semiconductor. Hierzu stehen der nRF24L01 und der nRF2401A zur Verfügung. Der nRF24AP1 von Nordic Semiconductor stellt eine integrierte „Single-Chip“ Lösung dar.

2.5 Auswahl

Es wurden zwei Hardware-Lösungen für die Aufnahme der Herzfrequenz mit einer Bluetooth Übertragungseinheit (Bluetooth 1.1 und 2.1, siehe Abbildung 3) und eine Lösung mit einer ZigBee Übertragungseinheit (MC13214 von Freescale Semiconductor) entwickelt. Der Vorteil der Bluetooth Lösungen liegt in der einfachen Integration als serielle Schnittstelle mit einem beliebigen käuflich erhältlichen USB-Bluetooth-Dongle. Sie ist somit mit einem externen Batteriepack und für wenige Probanden praktikabel, erweist sich aber für die Aufnahme der Daten einer kompletten Mannschaft als ungeeignet.

Die Umsetzung der Sensoreinheit mit einem ZigBee Transceiver in einer Single-Chip Lösung mit integriertem Mikrocontroller hat nicht den erhofften Erfolg gebracht, den das ZigBee Protokoll verspricht. Ohne die direkte Trennung zwischen dem signalverarbeitenden Teil (idealerweise durch einen zusätzlichen Mikrocontroller) und der Sende-/Empfangseinheit können die Schlafmechanismen nicht vollständig ausgenutzt werden.

Mit einer Sendefrequenz von 5Hz war es nicht möglich eine durchschnittliche Stromaufnahme des Moduls (inklusive sämtlicher Sensoren) unter 4mA sicher zu stellen. Eine Lösung mit einem kompletten ZigBee Drop-In Modul und einem zusätzlichen Mikrocontroller wäre die geeignete Lösung. Da die Spitzenstromaufnahme der Transceiver im Sendemodus mit ca. 40mA (bei 0dBm) noch deutlich höher ist als bei

vergleichbaren Low-Power Transceivern und die Funktionen des Protokolls ohnehin nicht oder nur in geringem Maße genutzt werden könnten, wird eine proprietäre Lösung bevorzugt.

Das von der Firma Dynastream Innovations entwickelte Protokoll ANT ist explizit für den Einsatz von Low-Power-Netzwerken entwickelt worden. Es bietet ausreichend Funktionen zum Aufbau eines sternförmigen Netzwerkes mit asynchroner Datenübertragung über jeweils einen unabhängigen Kanal.

Mit den Transceivern von Nordic Semiconductor verfügen die ANT-Umsetzungen zudem über energieeffiziente Lösungen. Der nRF24AP1 ist eine „Single-Chip“-Lösung mit integriertem Mikrocontroller. Diese Umsetzung lässt nur begrenzt Spielraum für die Entwicklung proprietärer Netzwerkkonzepte. Aufgrund der besseren Konfigurierbarkeit und der Möglichkeit das Kommunikationsprotokoll spezifisch für jede benötigte Anwendung anpassen zu können, wurde ein eigenes Funkmodul umgesetzt.

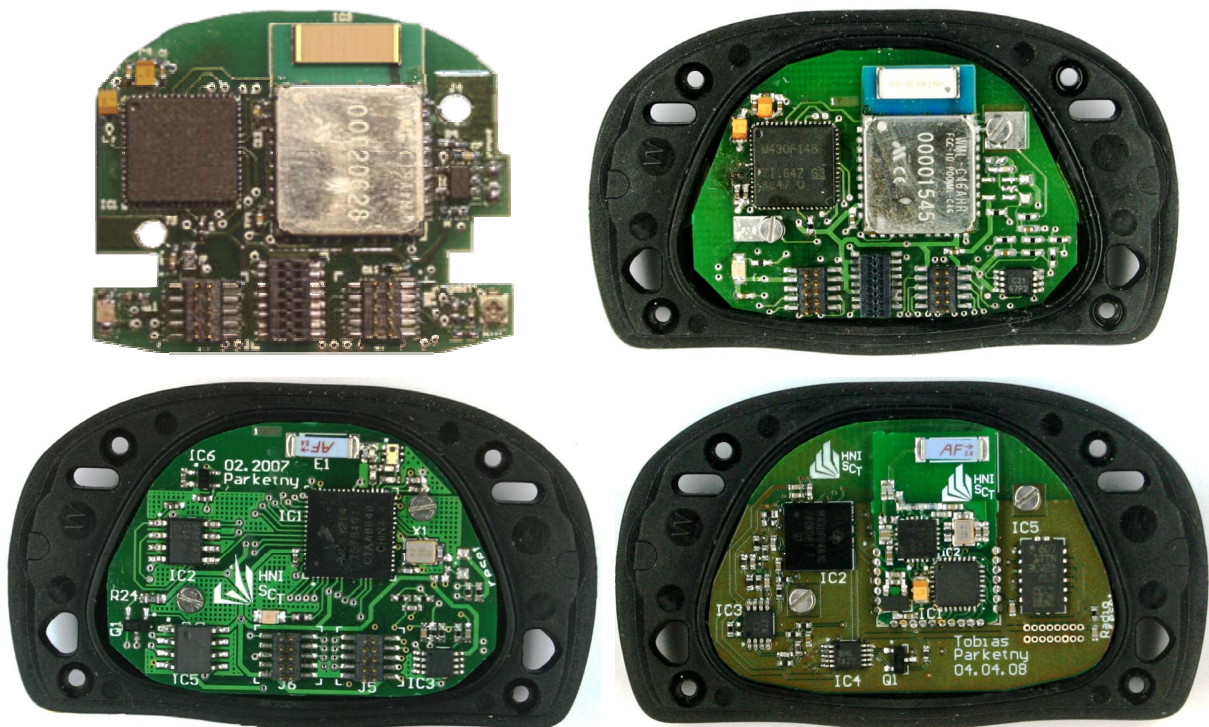


Abbildung 2: Brustgurtmodule zur Aufnahme physiologischer Größen mit unterschiedlichen Funkübertragungstechniken (Bluetooth V1.1, Bluetooth V2.0, ZigBee, neues Funkmodul)

3 Implementierung

Die Transceiver Grundlage des Kommunikationsmoduls ist der nRF24L01 von Nordic Semiconductor. Dieser Low-Power Transceiver bietet neben einer sehr geringen Spitzenstromaufnahme (11,3 mA TX @ 0dBm) ein integriertes Basisbandprotokoll und bis zu 2Mbps Datenübertragungsrate.

An die Auswahl eines geeigneten Mikrocontrollers sind gewisse Randbedingungen geknüpft. Der Einsatz als energieeffizientes Funkmodul erfordert einen Mikrocontroller mit möglichst geringer Leistungsaufnahme, variablen Schlaf-Modi und möglichst abschaltbaren Peripheriegeräten. Desweiteren ist eine große Aussteuerungsmöglichkeit der Versorgungsspannung für langwierigen Batterieeinsatz wichtig. Die Fläche des Controllers sowie die verfügbaren Kommunikationsschnittstellen (SPI ist aufgrund der Kommunikation mit dem Transceiver unabdingbar) sind weitere Gesichtspunkte. Zusätzliche Kriterien sind der Programmspeicher, verfügbare Open-Source Compiler sowie der Preis.

Der ATmega88V (Atmel Corporation, 2007) bietet in diesem Vergleich das beste Verhältnis aus Größe, Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz. Der Mikrocontroller ist in einem 32-Pin 5x5mm QFN Gehäuse erhältlich. Die Stromaufnahme beträgt im aktiven Modus 550 μ A (bei einem Takt von 1MHz), im Power-Down Modus¹ sinkt die Stromaufnahme auf unter 8 μ A.

3.1 Funkmodul Hardware

Die entworfene Kommunikationseinheit ist ein universell einsetzbares Drop-In-Modul zur Realisierung von proprietären, energieeffizienten Funklösungen.

Das Modul umfasst einen Transceiver von Nordic Semiconductor angesteuert mit einem Mikrocontroller vom Typ ATmega. Die Möglichkeit der bidirektionalen Kommunikation ermöglicht einen komfortablen Einsatz des Moduls als drahtlose UART Schnittstelle in verschiedenen Applikationen.

Die maximale theoretische Leistungsaufnahme des Moduls beträgt im Sendemodus 36 mW sowie im Empfangsmodus 39 mW (Angaben der Spitzenleistung laut Hersteller). Bei einem typischen Szenario (Sendefrequenz 5 Hz, Payload 13 Byte) erhält man eine durchschnittliche Gesamtleistungsaufnahme von unter 100 μ W. Die Größe des Moduls beträgt 12,8 x 19,75 mm² und ist damit kleiner als vergleichbare ZigBee oder Bluetooth-Lösungen. Das Modul verfügt desweiteren über folgende Peripherie: 8-Kanal 10 Bit ADC, UART, SPI, I²C.

Mit Hilfe dieses Funkmoduls ist es möglich, ein Funknetzwerk aufzubauen, welches Sensordaten diskret und energieeffizient überträgt. Wir bedienen hiermit einen Anwendungsbereich, den bisherige Funktechnologien nicht abdecken, um für unsere Applikation Einsatzzeiten von mehreren Wochen Dauerbetrieb mit einer Knopfzelle zu ermöglichen. Der Datenempfang auf Seiten des PCs wird in unserem Fall von einem erweiterten Modul übernommen. Der Transceiver verfügt in über eine externe Antenne und eine UART Verbindung zu einem Rechner. Diese Maßnahme ist notwendig, wenn Reichweiten von bis zu 30m erreicht werden sollen. Die Übertragung von Modul zu Modul ist über mehr als 10m aufgrund der geringen Effizienz der Chip-Antennen nicht möglich. Die Entwicklung des Funkmoduls und der dazugehörigen

¹ Die Stromaufnahme ist abhängig von den verwendeten peripheren Modulen. Selbst im Power-Down Modus kann z.B. noch der Watchdog oder der I²C Bus abgeschaltet werden.

Software ist für den Einsatz in dem Anwendungsszenario der leistungsdiagnostischen Überwachung optimiert worden. Die Randbedingungen dieses Szenarios (Energieeffizienz, Übertragung 5 Pakete/Sekunde, Reichweite ca. 30 Meter, Unterstützung für bis zu 30 Teilnehmer) sind aber durchaus auch in anderen Anwendungen gegeben. Die Firmware des Funkmoduls ist aufgrund der ISP-Programmierung und der leichten Zugänglichkeit des Systems für den Anwender

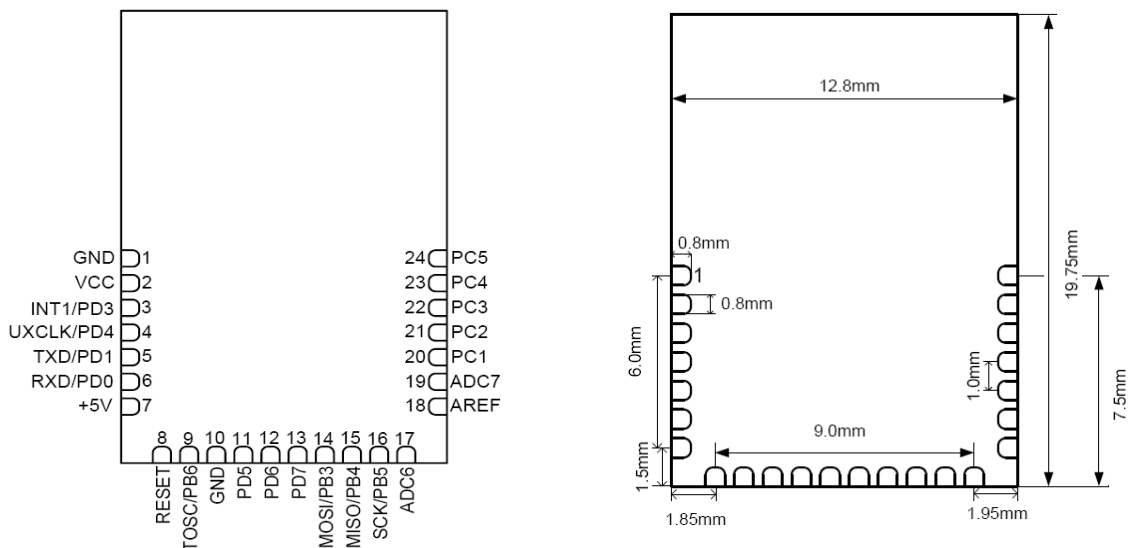


Abbildung 3: Pinout und mechanische Darstellung des Funkmoduls

schnell auf andere Anforderungen portierbar. Die Stromaufnahme wird zu einem großen Teil von der UART-Kommunikation mit der Host MCU dominiert. Da das Funkmodul mit dem ATmega88V über eine leistungsfähige Recheneinheit verfügt, kann es auch in einer „Standalone“-Anwendung arbeiten. Denkbar wäre beispielsweise eine autonome, mobile (oder stationäre) Sensoreinheit. Über die 7 AD-Wandler-Eingänge können Sensoren, wie z.B. ein Temperatursensor, ein Feuchtigkeitssensor oder Luftdruckmesser eingebunden werden.

Für ein zeitunkritisches Szenario zur simplen Überwachung dieser drei Parameter könnte die mittlere Stromaufnahme des Moduls auf ca. 7 μA reduziert werden². Die Kapazität einer herkömmlichen CR2032-Batterie liegt bei 210 mAh. Lässt man die Selbstentladung der Batterie außer Acht, so ergibt sich mit dieser Konfiguration eine Lebenszeit des Sensors von $210 \text{ mAh} / 7 \mu\text{A} = 30000 \text{ h} = 1250 \text{ Tage} \approx 3,5 \text{ Jahre}$. Wenn es von der Anwendung her möglich ist, den Mikrocontroller durch einen externen Interrupt zu wecken, dann kann die Stromaufnahme im Power-Down-Modus durch das Abschalten des Watchdog-Timers um ca. 4 μA reduziert werden.

3.2 Funkmodul Software

Die Kommunikationssoftware wurde für das Anwendungsszenario der leistungsdiagnostischen Überwachung entworfen. Für diesen Fall ist eine bidirektionale Übertragung von Daten unnötig. Die Module dienen ausschließlich der Sensordatenaufnah-

² Folgendes Szenario angenommen:

Nutzdaten: 20 Byte, Watchdog Interrupt alle 4 s, AD-Wandler und MCU im Aktivmodus, Senden mit 2 Mbps, kein Acknowledge. Die Stromaufnahme der analogen Sensoren ist nicht berücksichtigt.

me und müssen die Ergebnisse lediglich in regelmäßigen Abständen an einen Empfänger senden.

Hierbei ist es unkritisch, wenn einige Pakete aufgrund eventueller Beeinträchtigungen des Übertragungskanal (Entfernung, Rauschen, Paketkollisionen) verloren gehen.

Die Datenaufbereitung und Auswertung wird von dem auf dem Brustgurtmodul befindlichen Mikrocontroller übernommen, so dass der ATmega88V nur für das Versenden der Daten zuständig ist. Das Modul befindet sich solange im Schlafzustand, bis es durch einen Pegelwechsel der Host-CPU geweckt wird. Der Datenempfang wird über die UART Schnittstelle stattfinden. Die Daten werden in Paketen zu je 11 Byte Payload übertragen. Die Datenübertragungsrate beträgt 1Mbps.

In diesem Szenario wird die Anwendungs-MCU die Daten mit einer festgelegten Sendefrequenz von 5Hz senden. In einem Szenario mit mehr als einem Teilnehmer ist es möglich, dass Paketkollisionen stattfinden. Bei einer fixen Sendefrequenz werden sich diese Kollisionen kontinuierlich wiederholen und somit die beiden beteiligten Teilnehmer komplett ausschalten.

Um dies zu verhindern wird zusätzlich eine Zufallszeit eingeführt, die den Sendezeitpunkt verschiebt. Diese Jitter-Zeit wird pseudo-zufällig in Software generiert. Unterschiedliche Jitter-Zeiten für die einzelnen Module werden durch die unterschiedlichen Adressen sichergestellt, auf deren Grundlage die Zufallswerte berechnet werden.

4 Ergebnisse

Das entworfene Funkmodul erfüllt die für das Anwendungsszenario erforderlichen Randbedingungen. Die Stromaufnahme wird in Abbildung 5 dargestellt. Der Datenempfang über die UART Schnittstelle ist in dieser Anwendung (Sendefrequenz 5/s, 11 Byte Nutzdaten) der zeitaufwändigste Teil, da nur eine Datenübertragungsrate von 9600 Baud/s zu Grunde gelegt wird. Es ist sinnvoll diese Rate zu erhöhen, um die Zeit im aktiven Modus möglichst gering zu halten. Mit dieser Konfiguration beträgt die durchschnittliche Stromaufnahme des Funkmoduls ca. 50 μ A (bei 3V). Für unsere Anwendung ist das ausreichend, da die EKG-Datenaufnahme und -auswertung eine Stromaufnahme von ca. 3 mA aufweist.

Abbildung 4 zeigt eine prozentuale Auswertung zweier Datensätze zur Bestimmung der Reichweite des Funkmoduls. Die Tests wurden mit einem Empfänger mit externer Antenne und im Freien durchgeführt. Die Fehlerrate steigt ab 30m Entfernung sehr schnell an, so dass dies als die maximale sinnvolle Entfernung angegeben werden kann. Es ist allerdings zu beachten, dass auch bei dieser Entfernung je nach Szenario schon erhebliche Fehlerraten zu Stande kommen können (siehe Datensatz 2, Abbildung 4). Mit dem Bezug zur Anwendung der Aufnahme leistungsdiagnostischer Daten kann auch eine erhöhte Fehlerrate toleriert werden, solange der Datenfluss nicht über längere Zeit aussetzt.

Ein großes Problem der Datenübertragung sind Objekte zwischen dem Sender und dem Empfänger. Diese können den Datenfluss vollständig unterbrechen. Dies gilt insbesondere auch für den Körper des Probanden, der den Brustgurt mit dem Sendemodul trägt.

Ein erster Test mit vergleichbaren Sendemodulen während eines Handballspiels hat gezeigt, dass dieser Verlust der Daten unkritisch ist. Ein Test mit dem neuen Funkmodul steht noch aus.

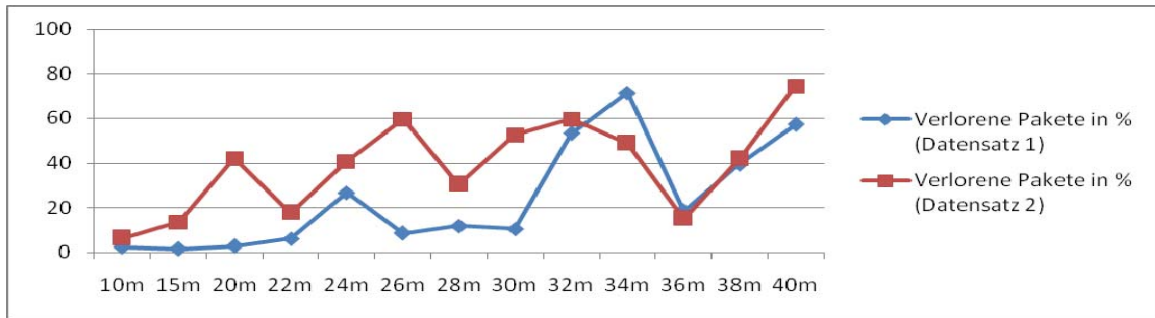


Abbildung 4: Fehlerrate / Reichweite

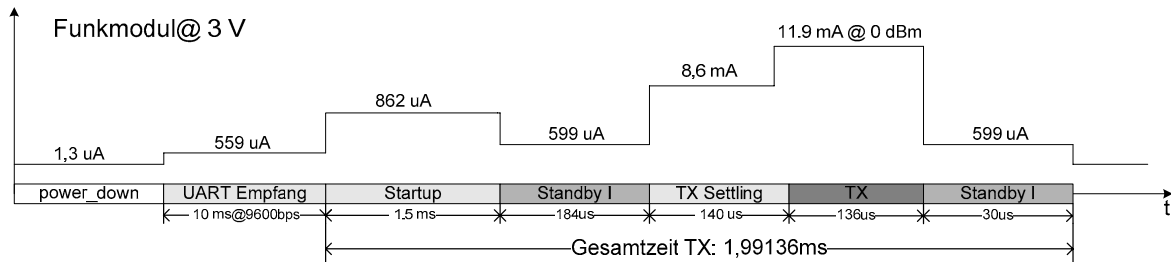


Abbildung 5: Stromverbrauch Funkmodul bei 3V (laut Datenblätter)

Die Kollisionswahrscheinlichkeit für ein Szenario mit vielen Sendern ist von der Sendefrequenz, der Datenübertragungsrate (bzw. der Datenverarbeitungsrate des Empfängers) und der Paketlänge abhängig. Abbildung 6 zeigt die Auswertung der Anzahl der empfangenen Daten mit 26 vergleichbaren Sendemodulen. Der maximale Datendurchsatz beträgt für diese Aufnahme 9000 Pakete/Sender. Der maximale Paketverlust liegt bei ca. 8% und der durchschnittliche Verlust bei 0,5%.

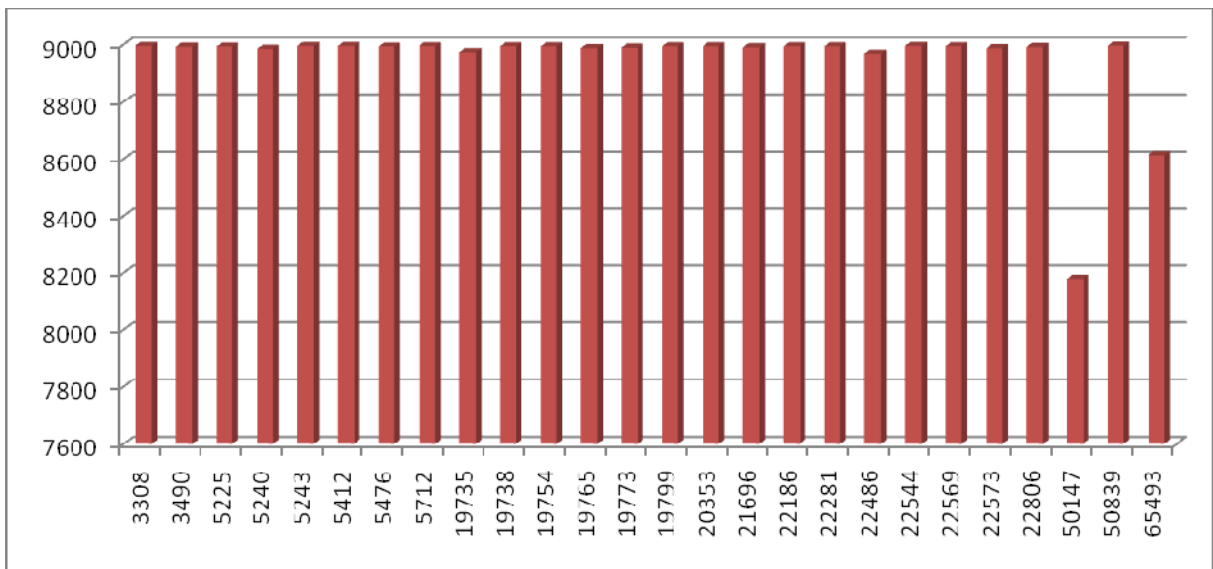


Abbildung 6: Anzahl empfangener Pakete nach Sendern (x-Achse: 26 Sender mit vergebenen ID; y-Achse: Anzahl erfolgreich übertragener Pakete pro Sender)

Eine Abschätzung der Kollisionswahrscheinlichkeit mit 30 Sendern bestätigt dieses Ergebnis.

5 Ausblick

Das entworfene Funkmodul erfüllt sämtliche Kriterien, die für das Anwendungsszenario der leistungsdiagnostischen Überwachung von Sportlern relevant sind. Die Aufnahme beider kompletten Mannschaft innerhalb eines Handballspiels wird Aufschluss über die Beeinträchtigung der Reichweite der Module durch die Körperbewegungen geben.

Diesbezüglich ist es möglich, das Spielfeld mit mehreren Empfängern zu versehen und so den Datenverlust des Gesamtsystems zu minimieren. Der aus dieser Maßnahme resultierende Gewinn und Aufwand, die Daten der beiden Sender zu verbinden, muss noch untersucht werden.

6 Literaturverzeichnis

Atmel Corporation. (2007). *ATMega48/v ATMega88V ATMega168/V datasheet*.

Bluetooth SIG. (2007). *Bluetooth Core Specification Version 2.1 + EDR*.

Crossbow Technologies. (2008). *Crossbow Wireless Sensor Networks*. Von www.xbow.com/Home/wHomepage.aspx abgerufen

CSR. (2007). *BlueCore 4 ROM Product Data Sheet*.

Dust Networks. *SmartMesh-XT M2135*. Dust Networks.

Dust Networks. (2008). *Time Synchronized Mesh Protocol*. Von <http://www.dustnetworks.com/technology/tsmp.shtml> abgerufen

Dynastream Innovations. (2007). *ANT Message Protocol and Usage*.

Dynastream Innovations. (2008). *Dynastream Innovations*. Von <http://www.dynastream.com> abgerufen

IEEE. (2003). *IEEE802.15.4 Wireless Medium Access and Physical Layer Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS)*. IEEE.

Nordic Semiconductor. (kein Datum). *Nordic Semiconductor*. Von <http://www.nordicsemi.com> abgerufen

Nordic Semiconductor. (2006). *Product Specification nRF24AP1*.

Parkety, T. (2008). *Diplomarbeit: Ein energieeffizientes drahtloses Sensornetzwerk für leistungsdiagnostische Anwendungen im Sport*.

Suunto. (2008). *Suunto*. Von <http://www.suunto.com> abgerufen

ZigBee Alliance. (2006). *ZigBee Specification, ZigBee Document 053474r13*. ZigBee Alliance.