



Abschlussbericht für das Innoprofile-Projekt TANDEM

Zuwendungsempfänger:

IHP Microelectronics

Förderkennzeichen:

03IP601

Vorhabensbezeichnung:

TANDEM: Ein extrem verbrauchsarmes, skalierbares, TANDEM-Prozessor-basiertes Funksystem für sensorische, aktuatorische und kennzeichnende Anwendungen

Laufzeit des Vorhabens:

01.02.2007 bis 31.01.2012

Berichtszeitraum:

01.02.2007 bis 31.01.2012

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Kurze Darstellung	6
Aufgabenstellung	6
Voraussetzungen.....	6
Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
Wissenschaftlicher und technischer Stand	7
Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
Eingehende Darstellung	9
Verwendung der Zuwendung	9
Erzielte Ergebnisse	9
Technologie- und Wirtschaftsprofil	9
Verwertung der Forschungsergebnisse	10
Beitrag zum Forschungs- und Ausbildungsprofil	10
Beschreibung der wissenschaftlichen Arbeiten.....	13
AP1 Arbeitspaket Systemspezifikation	13
AP 2 Analog Frontend (AFE).....	13
AP 3 Digitale Basisbandverarbeitung (BB)	14
AP 4 Vielfachzugriffsprotokoll (MAC).....	16
AP 5 HW-Energiemanagement (PM)	18
AP 6 Prozessordesign	21
AP 7 Netzwerkprotokoll.....	22
AP 8 Middleware und Betriebssystem (MW & BS).....	24
AP 9 Integration, Test und Betrieb.....	26
AP 10 Aggregationsprotokolle	27
AP 11 Kooperative Datenübertragung.....	28
AP 12 Produktintegration	29
AP 13 Businessplan	31
Voraussichtlicher Nutzen	32
FE-Ergebnisse von dritter Seite.....	32
Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	32

Konferenzbeiträge und Workshops	33
2007	33
2008	34
2009	35
2010	37
2011	38
Monographien	40
2011	40
Vorträge	40
2009	40
Akademische Arbeiten	40
2009	40
2010	41
2011	41
Referenzen	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tandem-Stack: ein Beispiel.....	13
Abbildung 2: UWB Ein-Chip-Lösung Chip-Foto mit analogem und digitalem Teil, erster in der oberen, letzterer in der unteren Bildhälfte	14
Abbildung 3: Frame Error Rate in Abhängigkeit von Übertragungsdistanz und dem Einsatz von Forward Error Correction, gemessen mit der Ein-Chip-Lösung vgl. AP2.....	15
Abbildung 4: Ein-Chip-Lösung bestehend aus 16-Bit-Mikrocontroller mit 20-Bit-Adressunterstützung und DSSS-Basisbandprozessor sowie Krypto-Koprozessoren.	15
Abbildung 5: Blockschaltbild des PSSS-Basisbandentwurfs (links) und das Foto des gefertigten PSSS-Chips (rechts).....	16
Abbildung 6: Illustration des DLDC-MAC-Protokolls.....	17
Abbildung 7: Der linke Teil der Abbildung zeigt den zeitlichen Ablauf einer Paketverarbeitung sowie das Einsparpotential, der rechte Teil zeigt entsprechende Messwerte.....	18
Abbildung 8: Verhältnis des Energieverbrauchs durch Leckströme in Abhängigkeit von Fertigungstechnologie und Aktivitätsphasen der ASICs	18
Abbildung 9: Layout eines Isolator-Bibliothekelements (links) und eines Power-Gates (rechts)	19
Abbildung 10: Partitionierung des TANDEM-Prozessors in unterschiedliche Blöcke, die individuell an- bzw. abgeschaltet werden können.	19
Abbildung 11: Einbindung von abschaltbaren und nicht abschaltbaren funktionalen Blöcken in ein Design mit Isolation der jeweiligen Schaltungsteile	20
Abbildung 12: Power-Gating Controller mit internem Timer und individueller Steuerlogik.....	20
Abbildung 13: Testdesign mit zwei Powergates	21
Abbildung 14: Ein-Chip-Lösung bestehend aus 16-Bit-Mikrocontroller, DSSS-Basisbandprozessor und Krypto-Koprozessoren im Vergleich mit einer 1-Cent-Euromünze	22
Abbildung 15: Verschiebung der Sendeintervalle zur Vermeidung von Kollisionen bei Veränderung der Sende- und Empfangszeiten aufgrund der clock drift	23
Abbildung 16: Simulativer Vergleich der Energieeffizienz des TANDEM-Routingverfahrens und des Remaining -Energy-Routing-Verfahrens. Die Zahlen an den Verbindungslinien geben die Anzahl der erfolgreich gesendeten Nachrichten wieder, die Netzwerklebensdauer beträgt 3,1 Jahre rechts, bzw. 3 Jahre links, bei einer Startenergie von 50000 Joule je Sensorknoten.	23
Abbildung 17: Speicherabbild eines Sensorknotens mit verschiedenen installierten Komponenten.....	26
Abbildung 18: Erster Sensorknoten mit vollständig in Deutschland gefertigter Hardware und Software, bestehend aus einem 16-Bit-Mikrocontroller und einem UWB-Radiomodul	27
Abbildung 19: Datenstrom mit mehreren defekten Paketen. Die Bitfehler befinden sich an unterschiedlichen Stellen in den Paketen. Durch einen „Best of 3“-Vergleich werden die korrekten Datenbits identifiziert und die Bitfehler korrigiert.	28
Abbildung 20: Energie pro korrekt übertragenem BIT unter Berücksichtigung aller an der Übertragung beteiligten Sensorknoten.....	29
Abbildung 21: TANDEM-Knoten aus am IHP gefertigten Komponenten (16-Bit-Mikrocontroller, UWB-Radiomodul). Links ist der TANDEM-Knoten in einem Gehäuse installiert, das für Feuerwehreinsätze entwickelt wurde. Rechts ist die TANDEM-Knotenplatine zusehen.....	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht aller Veröffentlichungen des TANDEM-Projektes	33
--	----

Kurze Darstellung

Aufgabenstellung

Ziel des Projektes TANDEM war die Untersuchung und Entwicklung einer Sensorkommunikationstechnologie, die als Basis für intelligente, energieeffiziente und funkbasierte Sensornetze (Wireless Sensor Network, WSN) verwendet werden kann. Die hiermit realisierbaren Sensornetze sollen vorrangig aus den Anwendungsbereichen Verkehrstechnik, Logistik, Sicherheitstechnik und Hausautomatisierung, Tele-Medizin und Automatisierungstechnik stammen. Um ein solches Konzept umsetzen zu können sollten Software und Hardware gemeinsam entwickelt werden, so dass die größtmögliche Adaptierbarkeit gewährleistet werden kann. In den Bereich der Hardwareentwicklung fallen Aufgaben wie die Umsetzung eines zu Projektstart weltweit noch nicht vorhandenen Funksystems (Ultra Breitband Kommunikation (Ultra Wide Band, UWB)) und seiner Integration mit weiteren Hardwarebausteinen, wie Basisbandprozessoren oder Hardwarebeschleunigern für kryptographische Verfahren. Hierfür war eine Ein-Chip- oder Zwei-Chip-Lösung angestrebt. Im Bereich der Software reicht das Projektspektrum von der Anpassung eines Betriebssystems an die realisierte Hardwareplattform über den Entwurf von Energiesparmechanismen und eines eigenen Protokollstapels bis zur Realisierung von Middleware-Ansätzen.

Voraussetzungen

Das IHP hat im Rahmen folgender Projekte in den Bereichen Sensornetzwerke, Middleware, Sicherheit bzw. Funksysteme geforscht:

- Body Area System for Ubiquitous Multimedia Applications Basuma (BMWA)
- Ubiquitous Sensing and Security in the European Homeland (UbiSecSens)
- Wireless Gigabit with Advanced Multimedia Support (WIGWAM)
- Mobile Internet Business (BMBF)
- Wireless Internet (BMBF).

Darüber hinaus sind in internen Projekten bereits Protokollbeschleuniger und Prozessoren untersucht und im IHP-Reinraum gefertigt worden. Somit verfügte das IHP über die notwendige Expertise für die erfolgreiche Durchführung des TANDEM Projektes.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Der zeitliche und inhaltliche Ablauf des Vorhabens verlief insgesamt im Rahmen der ursprünglichen Planungen. Größere Abweichung gab es bei der Realisierung der Hardware. Im Gegensatz zur ursprünglichen Planung wurde kein Digitalsignalprozessor (DSP) als Coprozessor in den TANDEM-Knoten integriert, sondern es wurden dedizierte Beschleuniger für ausgewählte Funktionen realisiert und integriert. Darüber hinaus wurde als zusätzliches Konzept die Idee eines Lego-artigen Baukastensystems aufgenommen. Auslöser für diesen Schritt war die Erkenntnis, dass die angestrebte Bandbreite an Anwendungen zu sehr unterschiedlichen Anforderungen an den zu entwickelnden Sensorknoten führte und diese in einer Ein-Chip-Lösung so nicht realisiert werden können. Das modulare Konzept bietet die Möglichkeit, sehr schnell individualisierte Hardwareplattformen zu realisieren und mit diesen zumindest ein Rapidprototyping durchzuführen.

Wissenschaftlicher und technischer Stand

Hardware

Für Forschung, vereinfachte Entwicklung und Debugging wurden einige aus fertigen Komponenten gebaute Sensorknoten vorgeschlagen. Der Vergleich der Plattformen wurde in [1] vorgestellt. In dem Artikel werden die populärsten Hardwarelösungen verglichen, zum Beispiel TmoteSky von Sentilla [2] (jetzt erhältlich als TelosB [3] von MEMSIC [4]), MICA2 [5], MICAz [6], IRIS [7], von Crossbow (jetzt MEMSIC). Die Sensorknoten können in drei Gruppen aufgeteilt werden, abhängig von der Prozessorarchitektur. Sie werden entweder mit 8-Bit-Mikrocontrollern (z. B. von der AVR-Familie [8] von Atmel) oder mit 16-Bit-Mikrocontrollern (z. B. MSP430-Familie [9, 10, 11] von Texas Instruments) oder mit 32-Bit-Mikrocontrollern (basierend auf ARM [12]) ausgestattet. Die Architektur bestimmt die verfügbare Energie der Plattform und spezifiziert auch den Energieverbrauch des Prozessors. Das andere Kriterium zur Klassifizierung von Sensorknotenplattformen ist das verwendete Funkmodul. Alle obengenannten Plattformen benutzen die Radio-Module von Chipcon (jetzt Texas Instruments): CC1000 [13] und seine zwei Nachfolger CC1101 [14] und CC2500 [15], CC2420 [16] – ein IEEE 802.15.4 und ZigBee-konformer Transceiver und sein Nachfolger CC2520 [17].

Software

Protokollstapel

Das Hauptproblem im Bereich der Sensornetze ist die beschränkte Energie, da Knoten oft nur mit Standardakkus ausgestattet sind und lange Zeit arbeiten müssen. Zum Beispiel funktioniert ein mit 2 AA-Batterien ausgestatteter TmoteSky-Sensorknoten nicht länger als eine Woche, wenn er ständig bereit ist Nachrichten zu empfangen. Deswegen verlängern Sensorknoten ihre Lebensdauer, indem sie das Radio für lange Zeit ausschalten (engl. Low duty cycle). Offensichtlich müssen ein Sender und ein Receiver zum gleichen Zeitpunkt wach sein, damit sie kommunizieren können. Das Problem nennt man rendez-vous. Bisher wurden viele Protokolle, die low duty cycle und rendez-vous unterstützen, entwickelt. Zum Beispiel basieren viele Ansätze auf dem sog. Preamble Sampling [19] Mechanism. In dem Fall prüfen Empfänger periodisch, d. h. sie wachen kurz auf, ob ein Sender Daten senden will. Wenn ein Knoten Daten zu senden hat, schickt er eine lange Präambel vor den Daten. Die Empfänger erkennen die Präambel und bleiben an bis die Daten angekommen sind. Die folgenden Protokolle gehören zur Gruppe der Preamble-Sampling-Verfahren: STEM [20], B-MAC [21], WiseMAC [22], TICER / RICER [18], Koala [23]. Eine andere Gruppe von Protokollen basiert auf einem Schedule, d. h. Sender und Receiver sind zum gleichen Zeitpunkt wach. Zu dieser Gruppe gehören u. a. diese Protokolle: S-MAC [24], T-MAC [25], DMAC [26], Dozer [27] und unser DLDC-MAC [28].

Für die Bereitstellung einer Multi-Hop-Kommunikation werden Routingprotokolle untersucht, die mit der unzuverlässigen drahtlosen Kommunikation und Knotenausfällen umgehen können. Dazu gehören vor allem Routingprotokolle wie DSR [29] oder AODV [30], die einen Umweg finden, falls eine Verbindung oder ein Knoten nicht mehr arbeitet. Sensorknoten beheben auch Kommunikationsprobleme auf der Sicherungsschicht z. B. durch Einsatz von ARQ (engl. Automatic Repeat reQuest) [31].

Betriebssysteme

Die Betriebssysteme für drahtlose Sensornetze sind wegen der spezifischen Eigenschaften von drahtlosen Sensorknoten beschränkt. Das Betriebssystem für solche Geräte muss die folgenden Aspekte berücksichtigen: die Begrenzung von Codegröße, das Energie-, Speicher-, und Peripheriemanagement, die Nebenläufigkeitsmechanismen, das Steuerprogramm, das Multitasking, die Robustheit. Die bekannteren Betriebssysteme sind TinyOS [32] und Contiki [33]. Im Rahmen von TANDEM wurde das Betriebssystem REFLEX [34] eingesetzt, dass in der Wirtschaftsregion Ost-Brandenburg von der BTU Cottbus realisiert wurde.

Middleware

TeenyLIME [35, 36, 37] Middleware ist eine Implementierung der LINDA-Abstraktion und wurde für drahtlose Sensornetze entwickelt. MacroLab [38] ist ein datenzentrisches System für drahtlose Sensornetze. Die Applikation wird vom Entwickler als Einzelprogramm für das ganze Netzwerk geschrieben.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Obwohl im Rahmen des Projektes TANDEM nur das IHP gefördert wurde, gab es eine intensive Zusammenarbeit mit der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Lehrstuhl Professor Nolte zum Thema Betriebssysteme und Middleware und mit der Universität Paderborn, Lehrstuhl Professor Karl zum Themenkomplex Network-Coding und Energieeffizienz.

Darüber hinaus gab es eine enge Kooperation mit Firmen der Region sowohl als unmittelbare Einbindung in das TANDEM-Projekt z. B. mit den Firmen lesswire AG, Greenway Systeme GmbH und Dr. Wolf Wireless, die unter anderem zur Erweiterung der unterstützten Funklösungen geführt hat. Zusätzlich gab es gemeinsame Forschungsprojekte mit Firmen der Region, die durch die TANDEM-Nachwuchsgruppe initiiert wurden.

Eingehende Darstellung

Verwendung der Zuwendung

Die Zuwendung wurde konform zur Antragstellung verwendet. Alle Arbeitspakete des IHP sowie die Unteraufträge der BTU Cottbus und der Universität Paderborn wurden in vollem Umfang bearbeitet. In allen Arbeitspaketen wurden geeignete Lösungen prototypisch umgesetzt. Dies gilt insbesondere auch für die Teilaufgaben, für die während des Projektverlaufes Änderungen in der Zielsetzung notwendig wurden.

Erzielte Ergebnisse

Technologie- und Wirtschaftsprofil

Das TANDEM-Team hat über den gesamten Projektzeitraum in enger Kooperation mit Wirtschaftsunternehmen der Region seine Strategie adaptiert. Als zentrale Ergebnisse lassen sich hier folgende technische Kernpunkte festhalten:

- Verbreiterung der anvisierten Funktechniken zur besseren Unterstützung der vielfältigen Anwendungsfelder für drahtlose Sensornetze
- Bereitstellung einer flexiblen adaptierbaren Architektur, mit der auf Veränderungen in den Anwendungen schneller und leichter reagiert werden kann.

Um diese enge Kooperation zu unterstützen und regionale Unternehmen bei der Entwicklung neuer Produkte für den Bereich der drahtlosen Sensornetze zu unterstützen wurden gemeinsam mit Unternehmen der Region gemeinsame Anträge für Forschungsprojekte gestellt, von denen hier einige exemplarisch benannt werden:

- Sens4U, ein Wachstumskern-Potential mit Firmen aus Cottbus (Philotech GmbH, Gesellschaft für System- und Tankanlagentechnik mbH, BIOM, Ezent GmbH (bewilligt))
- EU-Antrag StrokeBack (MEYTEC GmbH, Brandenburgklinik Bernau, Universität Potsdam) (bewilligt)
- Antrag PflänSen (Zimplant GmbH, FH Eberswalde), geplant war ein Landesprojekt, hierfür lag im Dezember 2010 ein vorzeitiger Maßnahmenbeginn vor; allerdings wurde der Antrag 2011 doch abgelehnt).
- ZIM-Antrag Pegelsonde (Prignitz System Technik, Quantum Hydrometrie, Frankfurter Wasser und Abwassergesellschaft) (erfolgreich, Projekt bereits erfolgreich abgeschlossen)
- der EU-Antrag PREACTION (Getemed, MeyTec GmbH) (nicht erfolgreich)
- Antrag Chiron (MeyTec, Nanotron) im Rahmen der Technologieplattform ARTEMIS (erfolgreich, leider reichen in Deutschland die Mittel zur Förderung der deutschen Partner nicht aus)
- EU-Antrag Impact Sens (lesswire, MTC) (nicht erfolgreich).

Diese Strategie wird über die Projektlaufzeit hinaus weiterverfolgt. So wurden im Jahr 2011 bzw. 2012 drei weitere EU-Anträge mit Beteiligung regionaler Unternehmen gestellt. Die finale Bewertung steht noch aus. Darüber hinaus wurde mit der Umweltgerätetechnik ein weiterer ZIM-Antrag gestellt, der voraussichtlich im August 2012 bewilligt wird.

Verwertung der Forschungsergebnisse

Um die Forschungsergebnisse des TANDEM-Projekts in eine Verwertung zu überführen, wurden verschiedene Maßnahmen entwickelt und umgesetzt. Dabei wurden auch Ideen entwickelt, die einzigartig in Deutschland sind.

Veranstaltung Gründungsmanagement mit der BTU Cottbus

In Zusammenarbeit mit der BTU Cottbus wird versucht, die Forschungsergebnisse in Produkte und Verwertungskonzepte zu integrieren. Dabei wurde gemeinsam mit dem Lehrstuhl ABWL und Besondere der Planung und des Innovationsmanagement von Frau Prof. Dr. Mißler-Behr die Veranstaltung „Gründungsmanagement“ angeboten. Hier wurden erstmalig in Deutschland interdisziplinäre Teams aus technischen und betriebswirtschaftlichen Studiengängen zusammengeführt um gemeinsam einen Businessplan für eine technische Fragestellung zu erstellen. Hierbei dienten die Forschungsergebnisse des TANDEM-Projekts und der assoziierten Projekte als Vorgabe. Die rege Teilnahme an der Veranstaltung zeigt die Wichtigkeit derartiger Veranstaltungen. Es wird in Zukunft immer wichtiger, innerhalb interdisziplinärer Teams Ideen umzusetzen und diese in Ausgründungen zu überführen. Dies ist für die Region Brandenburg-Berlin sehr wichtig und die TANDEM-Initiative ist froh, einen Beitrag hierzu geleistet zu haben und weiter zu leisten. Dass dieses Vorgehen ein wichtiger Schritt in die richtige Richtung ist, wurde uns durch die Vorstellung der Idee in der Informationsbroschüre zur InnoProfile-Initiative, die Ende Juli 2012 erscheinen wird, und weiteren Zeitungsartikeln bestätigt.

Die erarbeiteten Geschäftsideen wurden beim Lausitzer Existenzgründerwettbewerb eingereicht, hierfür erhielt die BTU Cottbus den Initiativpreis 2011.

Vom BIEM und dem Lehrstuhl für Innovation und Planung wurde die Veranstaltung in dieser Form in den Lehrkanon übernommen. Inzwischen beteiligen sich auch andere technische Einrichtungen und Lehrstühle an diesem Seminar.

Beitrag zum Forschungs- und Ausbildungsprofil

Die TANDEM-Initiative hat sich stark für ein Ausbildungsprofil für die regionalen Universitäten und Firmen bemüht. Dabei unterscheidet man zwischen Ausbildung im universitären Bereich und bei Firmen der regionalen Wirtschaft.

Weiterbildung der Nachwuchswissenschaftler

Um die Nachwuchsforscher der TANDEM-Initiative auf die Themen Verwertung und Ausgründung vorzubereiten wurden verschiedene Maßnahmen ermöglicht. Zum einen fand 2011 ein vom IHP organisierter Ausgründungsworkshop statt. Bei diesem nahmen verschiedene Projektgruppen mit Ausgründungs- und Verwertungsbestrebungen teil. An zwei Tagen wurden Vorträge unter anderem zu den Themen Businessplan, Förderungsmöglichkeiten und Finanzierung gehalten, die anschließend in kleinen Gruppen in Workshops vertieft wurden.

Eine weitere Maßnahme, die durch die Initiative angenommen wurde, ist die Einzelförderung von Gründerteams über das Programm „Investition braucht Mut“ (IBM). Bei diesem Programm ist es möglich, bis zu 10 Tagen individuelles Coaching zu bestimmten Problemstellungen zu erhalten. Die Coachs und Themen werden hierbei im Dialog zwischen Coach und Gründerteam erarbeitet.

Universitäres Profil

An der BTU Cottbus wird die Lehrveranstaltung „Drahtlose Sensornetze“ und ein Praktikum für drahtlose Sensornetze jährlich angeboten. Die Vorlesung findet stets im Wintersemester statt und das Praktikum im Sommersemester. Die Vorlesung konnte sich in jedem Jahr über eine steigende Teilnehmerzahl freuen. Im Wintersemester 2011/2012 besuchten 18 Studenten diese Veranstaltung.

Eine weitere Veranstaltung an der BTU ist das bereits oben erwähnte Seminar „Gründungsmanagement“ in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl ABWL und Besondere der Planung und des Innovationsmanagement von Frau Prof. Dr. Mißler-Behr. Eine ähnliche Veranstaltung wurde mit der Viadrina durchgeführt, in der drei Themen von Studierenden als Bachelorarbeiten bearbeitet wurden.

Neben diesen Veranstaltungen betreut die TANDEM-Initiative jährlich mehrere Studierende bei Praktika, Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten. In 2011 erhielten Nicole Todtenberg den Studentenförderpreis für ihre Abschlussarbeit „Entwicklung und Umsetzung von Mechanismen zur Verbesserung der "Quality of Experience" beim mobilen Zugriff auf Streaming orientierte Internet-Dienste über zellulare Netze“ und Olaf Krause den Preis der Deutschen Bank für seine Abschlussarbeit „Entwicklung einer drahtlosen Authentifizierungs- und Updatekomponente für die Debugschnittstelle von Mikrocontrollern“.

Aus- und Weiterbildungsangebote für und mit der Industrie

Die TANDEM-Initiative hat viele Maßnahmen ergriffen um mit der regionalen Wirtschaft zusammenzuarbeiten. Hierzu gehören Veranstaltungen wie der „Brandenburger Sensornetztag“, um regionalen Firmen der Branche eine effektive Möglichkeit des Netzwerkens zu ermöglichen, Workshops zum Kernthema „drahtlose Sensornetze“ der TANDEM-Initiative und die Betreuung von Doktoranden aus der Industrie.

Brandenburger Sensornetztag

Um in der Region Brandenburg-Berlin einen Beitrag zur Vernetzung der regionalen Wirtschaft zu leisten, hat die TANDEM-Initiative den „Brandenburger Sensornetztag“ ins Leben gerufen. Auf diesem treffen sich Firmen der Region aus den Bereichen Sensorik, Aktuatorik und drahtloser Kommunikation, um aktuelle Themen zu diskutieren. Am 18. November 2011 trafen sich 27 Teilnehmer aus 17 Firmen zum dritten Mal, um interessanten Vorträgen zu den Themen

- Telemedizin
- Koexistenz von Sensornetzwerken
- konfigurierbarer drahtloser Sensorknoten des IHP
- Einsatz von Sensorknoten im Umweltmonitoring

zuzuhören und im Anschluss in lockerer Atmosphäre beim Get-Together weiter zu diskutieren.

Der Erfolg und die Wichtigkeit, die dem „Brandenburger Sensornetz“ zugesprochen wird führten dazu, dass ihn die IHP-Geschäftsführung als jährliche Veranstaltung fest in den IHP-Veranstaltungskalender aufgenommen hat. Der nächste Sensornetztag wird sich speziell mit der Thematik Sicherheit und Zuverlässigkeit in drahtlosen Sensornetzen beschäftigen. Er wird im dritten Quartal 2012 stattfinden.

Der Sensornetztag wurde jedes Jahr in enger Zusammenarbeit mit dem TZO – Transferzentrum Ostbrandenburg e. V. und der IHK Ostbrandenburg durchgeführt.

Workshop zu drahtlosen Sensornetzen

Auf Grund des regen Interesses im Bereich der drahtlosen Sensornetze hat die TANDEM-Initiative 2011 erstmals einen einführenden Workshop zum Thema „Drahtlose Sensornetze“ angeboten. Dieser richtete sich an Firmen aus dem Bereich Sensorik, Aktuatorik und drahtloser Kommunikation, die bereits im Bereich drahtloser Sensornetze arbeiten oder in zukünftigen Projekten auf dem Gebiet arbeiten möchten.

Der Workshop wurde als Zweitagesveranstaltung durchgeführt. Es nahmen 10 Teilnehmer aus der Wirtschaft und anderen Forschungseinrichtungen teil. Der Workshop bestand aus einem Theorie- und einem Praxisteil. Es wurden im Theorieteil Grundlagen vermittelt, die im Praxisteil direkt angewendet und umgesetzt werden konnten. Im Praxisteil wurde ein am IHP entwickelter Sensorknoten verwendet. Dieser bietet die Möglichkeit, mit unterschiedlichsten Sensoren und Aktuatoren verbunden zu werden und eine drahtlose Kommunikation mit drei verschiedenen Radiomodulen für unterschiedliche Funkbänder zu realisieren. Die Themen des Workshops waren:

- Prinzipien und Anwendungen
- Aufbau und Funktionsweise eines Sensorknotens
- ausgewählte Anwendungsgebiete
- Medienzugriff, Routing, Middleware, Distributed Shared Memory.

Der Praxisteil des Workshops beinhaltet:

- Programmierung serieller Schnittstellen
- Ansteuerung von Sensorik und Kommunikationsmodulen
- Kommunikation zwischen zwei Sensorknoten
- Aufbau eines drahtlosen Sensornetzwerks.

Die rege Teilnahme und das positive Feedback auf den Workshop sowie die zahlreichen Anregungen haben uns darin bestärkt, derartige Workshops mit variierenden Themenschwerpunkten rund um drahtlose Sensornetzwerke weiterhin anzubieten.

Beschreibung der wissenschaftlichen Arbeiten

AP1 Arbeitspaket Systemspezifikation

Im Rahmen der Kooperation mit Firmen der Region und parallel durchgeführten Projekten im Bereich der drahtlosen Sensornetze wurde festgestellt, dass eine einheitliche Architektur für alle Sensornetzanwendungen aufgrund der sehr heterogenen Anforderungen der Anwendungen nicht realistisch ist. Um diesem Umstand gerecht zu werden, wurden auf unterschiedlichen Abstraktions-ebenen für die finale TANDEM-Systemarchitektur zwei gleichartige Konzepte entwickelt, die eine Adaptierbarkeit der TANDEM-Hardwareplattform sicherstellen:

- **On chip:** Es wurden geeignete Wrapper entwickelt, die es erlauben, die AMBA-Bus-Architektur für die Verbindung unterschiedlicher in Hardware realisierter Funktionen in einen gemeinsamen Entwurf eines Sensorknotens zu integrieren. Auf diese Weise können insbesondere auch 16-Bit-Mikrocontroller den AMBA-Bus zur Kommunikation mit ihrer Peripherie nutzen. So wird eine Austauschbarkeit der Prozessoren deutlich erleichtert, dass die Schnittstellen zu den Co-Prozessoren und Hardwarebeschleunigern nicht angepasst werden müssen.
- **Systemebene:** Es wurde ein modulares Konzept entwickelt, das es erlaubt, unterschiedliche Hardwarekomponenten wie Funklösungen oder sensorische Messeinrichtungen über eine einheitliche Hardwareschnittstelle zu einem flexiblen Sensorknoten zu integrieren. Mit Hilfe dieses Lego-artigen Ansatzes lassen sich sehr leicht Sensorknoten zusammenstellen, die an die speziellen Anforderungen ausgewählter Anwendungen angepasst sind. Die Erweiterbarkeit des Baukastens kann ebenfalls sehr leicht durch Einhalten der Schnittstellen sichergestellt werden. Auf diese Weise können auch Hardwaremodule, die nicht am IHP entwickelt wurden, in den Baukasten integriert werden. Die folgende Abbildung 1 zeigt das Konzept, das als TANDEM-Stack bezeichnet wird.

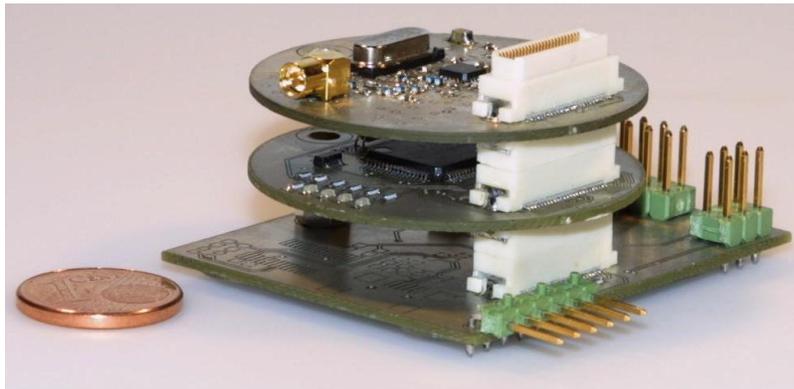


Abbildung 1: Tandem-Stack: ein Beispiel

AP 2 Analog Frontend (AFE)

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde eine Funklösung entworfen und realisiert, die dem Standard IEEE 802.15.4a entspricht, und ein Modul zur Ultra-Breitband-Kommunikation bereitstellt. Für die 250-nm-Technologie des IHP wurde erfolgreich eine Ein-Chip-Lösung entworfen und gefertigt. Diese beinhaltet sowohl das analoge Frontend als auch die digitale Basisbandverarbeitung (vgl. auch „AP 3 Digitale Basisbandverarbeitung (BB)“). Diese Implementierung ist also ein Mixed-Signal-Design. Die finale Integration der beiden Teillösungen wurde im letzten Jahr der Projektlaufzeit abgeschlossen.

Dabei wurde insbesondere ein Teil der Basisbandverarbeitung in den analogen Teil der Schaltung verlagert. Für diesen wurde dann ein Layout von Hand erstellt, um die Taktrate von 500 MHz, die zur Realisierung der 2 Nanosekunden Impulse der Funklösung notwendig sind, garantieren zu können. Um unerwartete Schwierigkeiten bei der Fertigung zu vermeiden wurden die Designs sehr intensiv simuliert, wobei auch parasitäre Effekte berücksichtigt wurden. Das entstandene Ein-Chip-Design wurde erfolgreich gefertigt und getestet. Die folgende Abbildung 2 zeigt die Ein-Chip-Lösung, im oberen Teil sind die analogen Bauelemente zu sehen, im unteren Teil sieht man die digitalen Basisbandkomponenten.

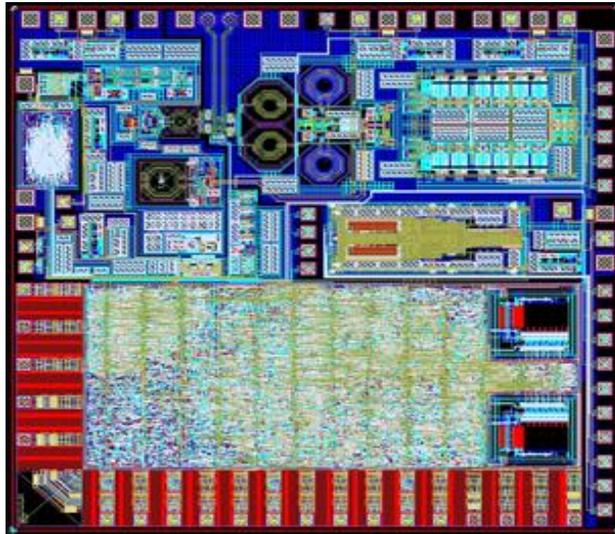


Abbildung 2: UWB Ein-Chip-Lösung Chip-Foto mit analogem und digitalem Teil, erster in der oberen, letzterer in der unteren Bildhälfte

Leider muss festgestellt werden, dass die Umsetzung des UWB-Funksystems in der 130-nm-Technologie im Rahmen des TANDEM-Projektes aufgrund von Verzögerungen bei der Fertigstellung der Bibliotheken für diese Technologie nicht möglich war. Diese betraf nicht nur das TANDEM-Projekt, sondern auch externe IHP-Kunden. Für eine detaillierte Diskussion der Probleme sei auf den Zwischenbericht des Jahres 2010 verwiesen.

AP 3 Digitale Basisbandverarbeitung (BB)

In diesem Arbeitspaket wurden digitale Schaltungen für die Basisbandverarbeitung entworfen, implementiert und verifiziert. Hierbei sollte neben der Leistungsfähigkeit auf eine hohe Energieeffizienz und Robustheit des Verfahrens geachtet werden.

Für die Realisierung der Basisbandverarbeitung für das Ultrabreitbandverfahren wurden während der Projektbearbeitung drei Designvarianten untersucht. Mit der letzten Version konnte im Laufe des Projektes eine Reduktion des Energiebedarfes um ca. 60 Prozent im Vergleich zur ursprünglichen Implementierung erreicht werden. Dieses wurde überwiegend durch die Umstrukturierung der Funktionalität und das teilweise Verschieben dieser in den analogen Teil der Schaltung (s. auch „AP 2 Analog Frontend (AFE)“) erreicht. Um eine möglichst hohe Robustheit zu erreichen unterstützt diese Implementierung eine Forward Error Correction (FEC) die es erlaubt, Übertragungsfehler zu kompensieren. Da diese Funktionalität optional ist, das heißt sie kann bei Bedarf zu- bzw. abgeschaltet

werden, kann die Datenübertragung an die Kanaleigenschaften angepasst werden. Bei guten Übertragungseigenschaften - also wenigen Fehlern - wird die FEC ausgeschaltet, so dass Energie bei der Berechnung, aber auch bei der Übertragung eingespart wird. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die Verbesserung der Fehlerrate bei Verwendung der FEC.

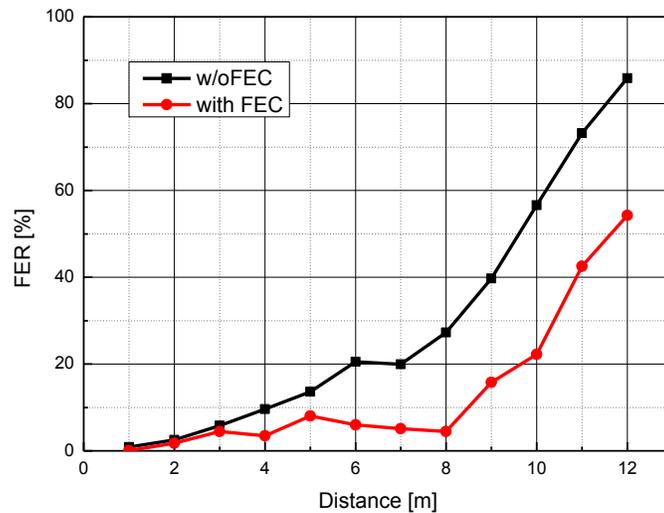


Abbildung 3: Frame Error Rate in Abhängigkeit von Übertragungsdistanz und dem Einsatz von Forward Error Correction, gemessen mit der Ein-Chip-Lösung vgl. AP2

Für die Übertragung im 868-MHz-Band wurden zwei unterschiedliche Basisbandprozessoren entworfen und gefertigt, DSSS und PSSS. Der DSSS-Basisbandprozessor wurde bereits in eine Ein-Chip-Lösung integriert. Hierbei wurde der TANDEM-Prozessor ipms_430x durch das DSSS-Basisband erweitert. Abbildung 4 zeigt die entstandene Ein-Chip-Lösung.

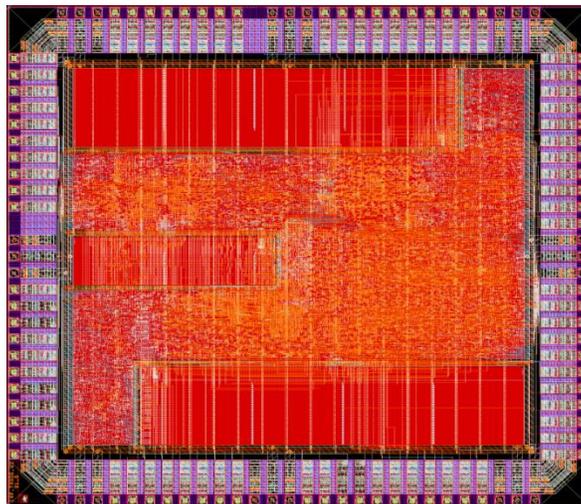


Abbildung 4: Ein-Chip-Lösung bestehend aus 16-Bit-Mikrocontroller mit 20-Bit-Adressunterstützung und DSSS-Basisbandprozessor sowie Krypto-Koprozessoren.

PSSS ist eine Technologie, die auf Initiative des TANDEM-Partners Dr. Wolf Wireless GmbH als Erweiterung in den Standard IEEE 802.15.4,2006 übernommen wurde. Diese Basisbandtechnologie

zeichnet sich im Vergleich zu den anderen im gleichen Standard spezifizierten Spreiz- und Modulations-techniken durch eine größere Datenrate bei vergleichbarer benötigter Bandbreite aus. Eine weitere wesentliche PSSS-Eigenschaft ist die besondere Robustheit der Übertragung in Umgebungen, deren Übertragungskanal durch massive Mehrwegeausbreitung charakterisiert ist. Die Ausnutzung der höheren Robustheit der PSSS-Technologie erlaubt es, kleinere Sendeleistungen für die Übertragung von Paketen zu nutzen und somit besonders energieeffizient Sensornetze aufzubauen.

Im Rahmen des TANDEM-Projektes wurde ein PSSS-Basisband-IC vollständig entwickelt und produziert. Das Design des ICs wurde erstmals vollständig unter Verwendung eines modellbasierten Ansatzes erstellt. Als Werkzeug für die Modellierung, Simulation und die Generierung der Hardwarebeschreibungssprache kam Matlab/Simulink zum Einsatz.

Die Chip-Entwicklung bis hin zum vollständig funktionstüchtigen PSSS-Transceiver erfolgte in drei Schritten, wobei alle drei Designs gefertigt wurden und als Basis für weitere Verbesserungen dienten. Die spezifikationsgemäße Funktion der drei Designs wurde auf den IHP-Testsystemen für digitale Schaltungen erfolgreich nachgewiesen. Die folgende Abbildung 5 zeigt im linken Teil ein Blockschaltbild des finalen Designs und rechts das entsprechende Chip-Foto.

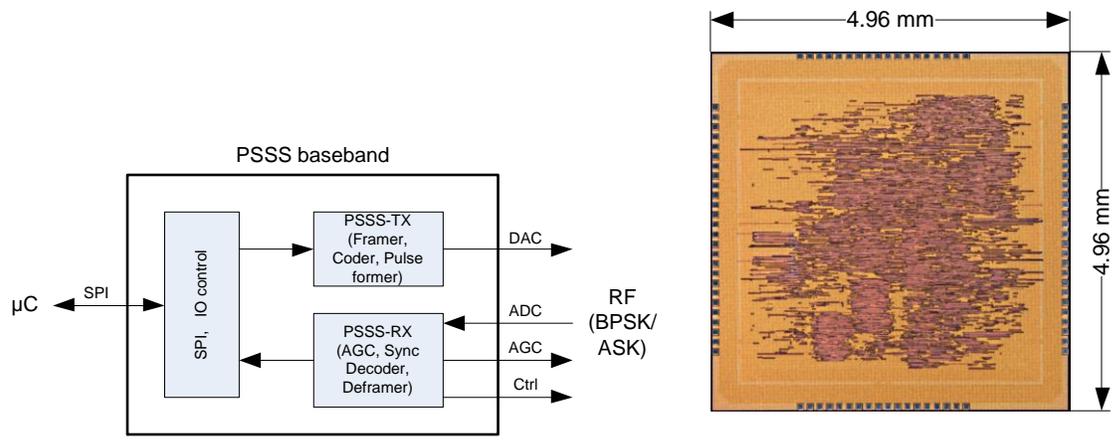


Abbildung 5: Blockschaltbild des PSSS-Basisbandentwurfs (links) und das Foto des gefertigten PSSS-Chips (rechts)

AP 4 Vielfachzugriffsprotokoll (MAC)

In diesem AP wurden Mediumzugriffsverfahren entwickelt und getestet. Die Analyse der Anwendungsfelder hat gezeigt, dass die Unterstützung des IEEE 802.15.4-Protokolls eine deutlich breitere Nutzbarkeit der Projektergebnisse ermöglicht als die ursprünglich geplante Umsetzung des IEEE 802.15.3-Protokolls. Diese Konkretisierung war für die Spezifikationsphase geplant und wurde entsprechend umgesetzt. Hierbei spielte die Erweiterung der angestrebten Funklösungen auf die Unterstützung von 868 MHz ebenfalls eine Rolle, da IEEE 802.15.4 sowohl die UWB- als auch die 868-MHz-Funklösung unterstützt. Zur Unterstützung von ausgewählten Dienstgüteparametern wurden im Rahmen dieses Arbeitspaketes eigene Protokollansätze entwickelt und umgesetzt. Diese zeichnen sich insbesondere dadurch aus, dass sie auch mit anderen MAC-Verfahren als dem IEEE 802.15.4 verwendet werden können.

Realisierung IEEE 802.15.4

Es wurde eine für die unterschiedlichen Varianten von IEEE 802.15.4 einsetzbare, modulare Softwareimplementierung umgesetzt und getestet. Für weitergehende Untersuchungen und für die Vorbereitung der Hardwareimplementierung des IEEE 802.15.4 wurde diese Softwarelösung in ein Systemmodell für Simulationen überführt. Auf dieser Basis konnten Taktzyklen genau Untersuchungen zur Komplexität der jeweiligen Protokollfunktionen durchgeführt werden. Diese wurden verwendet um zu definieren, welche Protokollfunktionen in Hardware realisiert werden sollten. Im Jahr 2011 wurde die Hardwareimplementierung des IEEE 802.15.4 fertig gestellt und in den TANDEM-Prozessor integriert. Die anschließende Fertigung in der 130-nm-Technologie war leider nicht erfolgreich, da während der Fertigung Probleme mit der Fertigungstechnik auftraten.

Zusätzlich zur Umsetzung des IEEE 802.15.4 wurden folgende Ansätze entwickelt:

- Zuerst wurde ein Ansatz zur verteilten Festlegung der Sendereihenfolge in Netzwerken mit seltenen Aktivitätsphasen (distributed low duty cycle MAC (engl. Medium Access Protocol)) entworfen und implementiert. Dieses Protokoll nutzt die Synchronisation der Sensorknoten über als Beacon bezeichnete Nachrichten, in denen die Sensorknoten sich gegenseitig mitteilen, wann sie wieder sende- bzw. empfangsbereit sind. So lassen sich lange Phasen der Inaktivität überbrücken, ohne dass dabei Energie verbraucht wird. Das Protokoll besteht aus 2 Phasen. In der ersten Phase entdecken die Knoten ihre Nachbarn. Danach findet die Kommunikation in den in den Beacon angegebenen Zeiten statt. Die folgende Abbildung 6 illustriert das Verfahren.

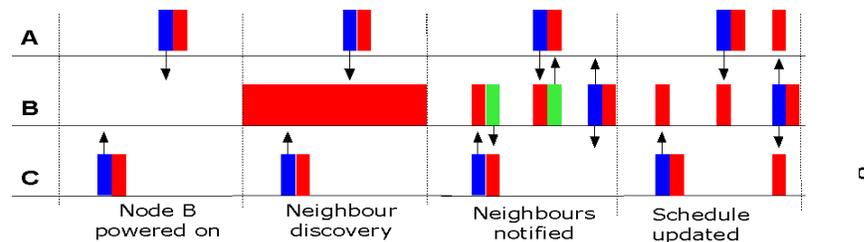


Abbildung 6: Illustration des DLDC-MAC-Protokolls

Damit die Sensorknoten tatsächlich zur gleichen Zeit aktiv sind, müssen die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der lokalen Uhren (clock drift) berücksichtigt werden. Das heißt, die Knoten müssen deutlich früher aufwachen und länger wachbleiben als bei Verwendung idealer Uhren.

- Das ILA (Idle Listening Avoidance) Verfahren wurde entwickelt um inaktive Kommunikationsperioden, also Zeiten, in denen die Sensorknoten wach werden um zu kommunizieren, in denen aber keine Nachrichten gesendet werden, weil keine entsprechenden Ereignisse eingetreten sind, zu erkennen. Bei diesem Verfahren wird erkannt ob ein Paket eingeht, indem der „start frame delimiter“ erkannt wird. Der theoretische Vergleich der implementierten Softwarelösung mit einer idealisierten Hardwarelösung hat ergeben, dass die Softwarelösung nur ca. 0,3 Prozent schlechter ist als die idealisierte Hardwarelösung. Die folgende Abbildung 7 zeigt das Prinzip des ILA-Verfahrens und die potentielle Einsparung links und entsprechende Messwerte rechts.

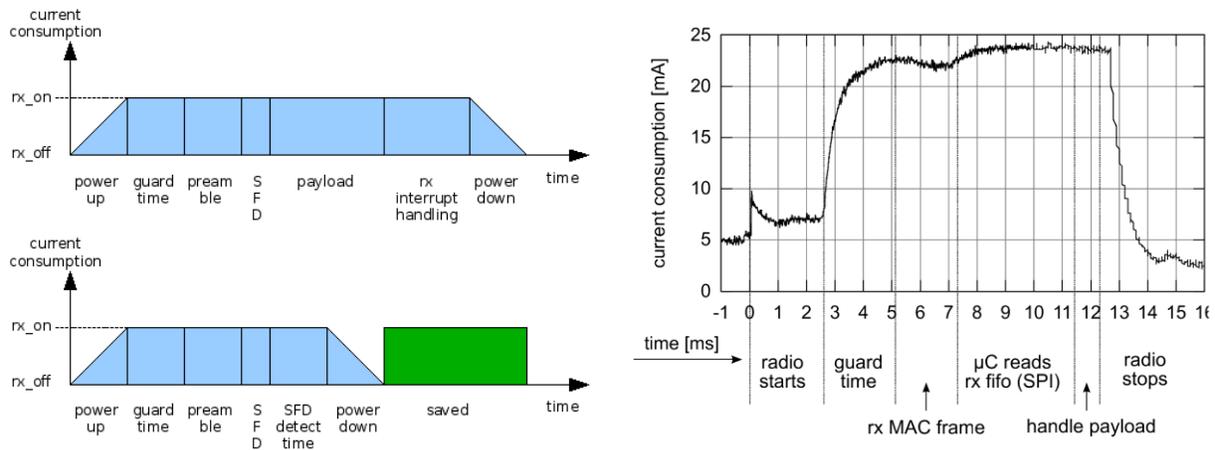


Abbildung 7: Der linke Teil der Abbildung zeigt den zeitlichen Ablauf einer Paketverarbeitung sowie das Einsparpotential, der rechte Teil zeigt entsprechende Messwerte

AP 5 HW-Energiemanagement (PM)

Dieses Arbeitspaket beschäftigte sich mit dem Entwurf, der Implementierung und Verifikation eines hardwarebasierten Energiemanagementmoduls. Das beinhaltet auch die Entwicklung von Schaltern auf CMOS/LDMOS-Basis zur An-/Abschaltung von Hardwareblöcken. Die Untersuchung der Eigenschaften aktueller und zukünftiger Fertigungstechnologien hat ergeben, dass das Verhältnis zwischen Schaltströmen und Leckströmen erst ab Strukturgrößen kleiner 250 nm relevant wird, solange die Aktivitätsphasen nicht seltener sind als 1 Prozent der Lebensdauer, vgl. auch Abbildung 8.

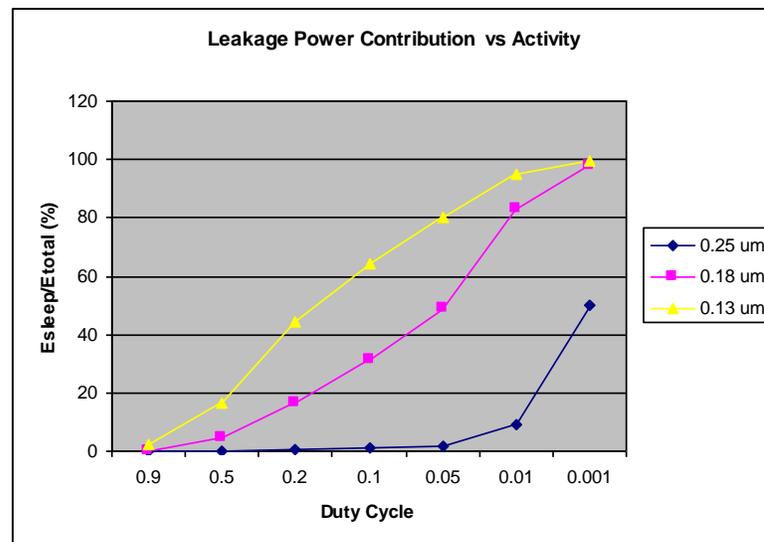


Abbildung 8: Verhältnis des Energieverbrauchs durch Leckströme in Abhängigkeit von Fertigungstechnologie und Aktivitätsphasen der ASICs

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden deshalb zwei Strategien zur Reduktion des Stromverbrauches auf Hardwareebene verfolgt. Der erste Ansatz wird als Clock-Gating bezeichnet und wird bereits seit Jahren erfolgreich eingesetzt um den Stromverbrauch einzelner Teile eines ASICs zu minimieren, indem diese nur dann mit dem Taktsignal versorgt werden, wenn sie aktiv in die Bearbeitung der Daten

eingebunden sind. Der zweite Ansatz wird als Power-Gating bezeichnet und ermöglicht es, Teile eines ASIC tatsächlich vollständig von der Stromversorgung zu trennen und hilft so Leckströme vollständig zu vermeiden. Die zur Umsetzung dieses Ansatzes notwendigen Bibliothekselemente, Power Switches und Isolatoren wurden für die IHP-Technologie entworfen, gefertigt und getestet. Abbildung 9 zeigt links ein Power-Gate und rechts einen Isolator.

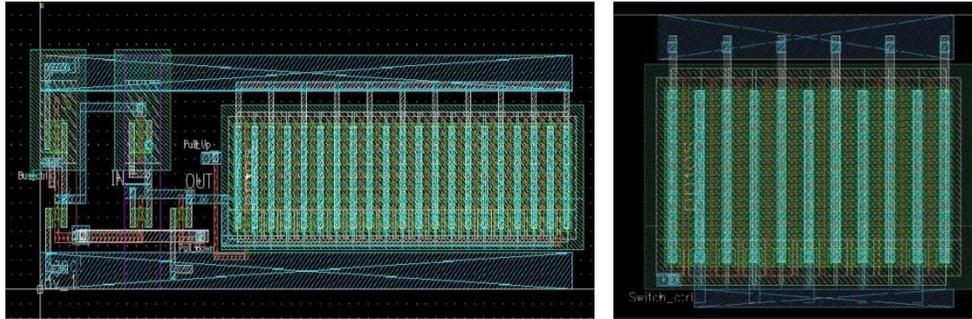


Abbildung 9: Layout eines Isolator-Bibliothekselements (links) und eines Power-Gates (rechts)

Um die Möglichkeit des Clock und Power-Gatings voll ausschöpfen zu können, müssen einzelne funktionale Blöcke eines Designs identifiziert werden, so dass diese gemeinsam an- bzw. abgeschaltet werden können. Abbildung 10 zeigt eine entsprechende Partitionierung für den TANDEM-Prozessor. Dabei ist zu beachten, dass einige Blöcke wie die Power-Gating Control und das Wake-Up-Module nicht abgeschaltet werden können.

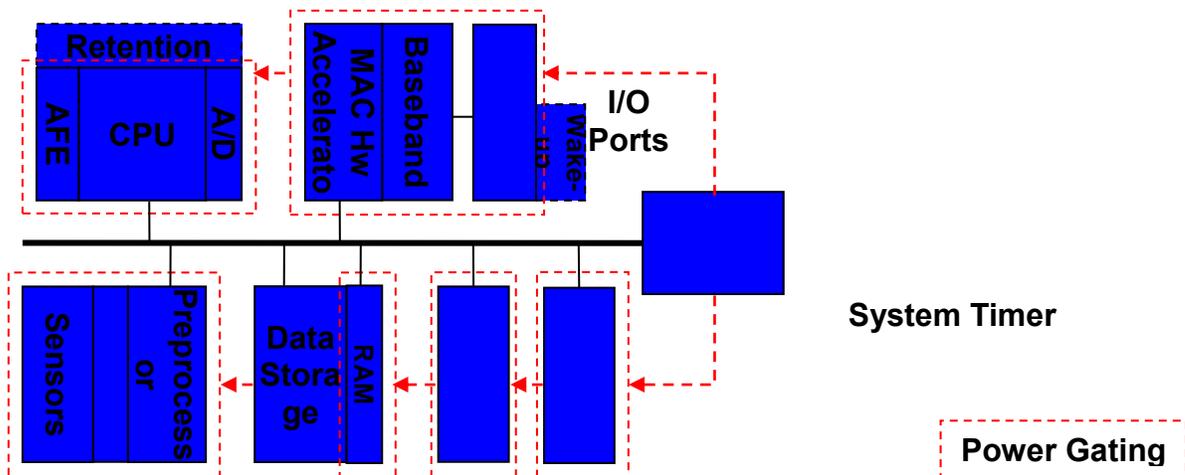


Abbildung 10: Partitionierung des TANDEM-Prozessors in unterschiedliche Blöcke, die individuell an- bzw. abgeschaltet werden können.

Die Einbindung von abschaltbaren und ständig mit Strom versorgten Blöcken in eine gemeinsame Schaltung zeigt Abbildung 11. Der interne Aufbau des Power-Gating Controllers ist in Abbildung 12 dargestellt.

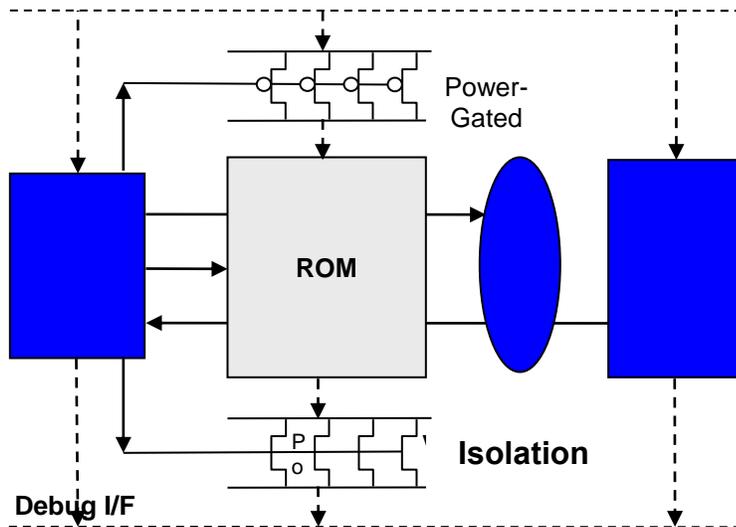


Abbildung 11: Einbindung von abschaltbaren und nicht abschaltbaren funktionalen Blöcken in ein Design mit Isolation der jeweiligen Schaltungsteile

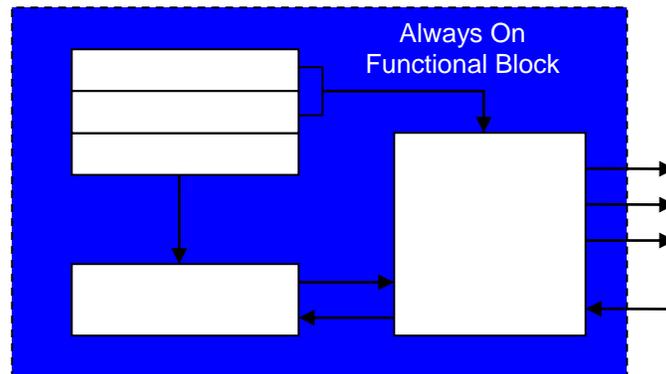


Abbildung 12: Power-Gating Controller mit internem Timer und individueller Steuerlogik

Die Power-Gates wurden in der 250-nm-Technologie des IHP gefertigt und getestet. Für den Test wurden sie in ein Design eines Testprozessors integriert, Abbildung 13 zeigt das resultierende Design.

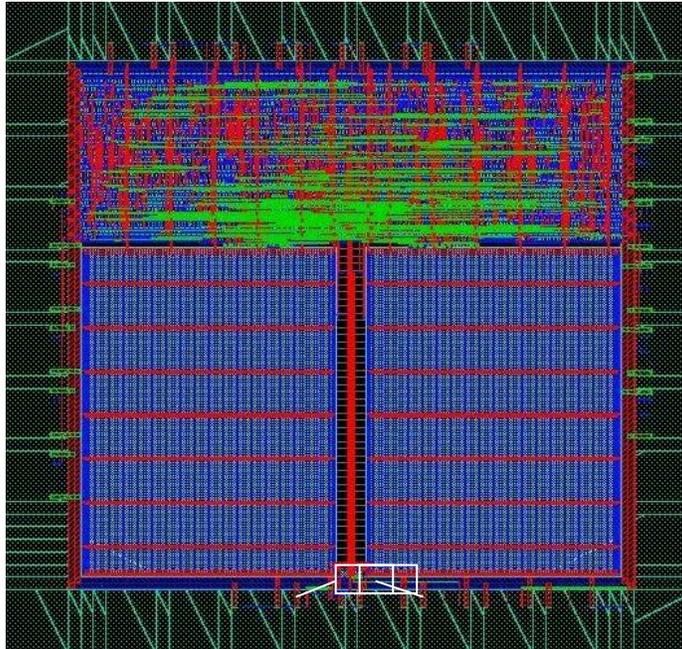


Abbildung 13: Testdesign mit zwei Powergates

AP 6 Prozessordesign

In diesem Arbeitspaket wurde das TANDEM-Prozessorkonzept entworfen, implementiert und verifiziert. Als TANDEM-Prozessor wird ein Derivat des äußerst energieeffizienten MSP430 von Texas Instruments verwendet. Dieses bietet in der hier genutzten Version einen 16-Bit-Mikrocontroller mit 20 Bit Adressbreite. Das Design ist teilweise asynchron gestaltet, wodurch auf der einen Seite eine gute Energieeffizienz erreicht wird, auf der anderen Seite aber einige Schwierigkeiten mit der Erweiterung des Prozessors zu bewältigen waren. Es mussten geeignete Wrapper-Module entwickelt werden, mit denen ein einheitlicher Anschluss z. B. von Speicherbausteinen über die Standard-AMBA-Busschnittstelle (vgl. „AP1 Arbeitspaket Systemspezifikation“) realisiert werden konnte. Des Weiteren wurden folgende Prozessoren für die Integration mit dem TANDEM-Prozessor überarbeitet bzw. angepasst:

- DSSS-868-MHz-Basisband (vgl. „AP 3 Digitale Basisbandverarbeitung (BB)“)
- Hardwarebeschleuniger für elliptische Kurvenkryptographie (Kurve B-233)
- Advanced Encryption Standard (ECB Mode, 128 Bit Schlüssellänge)
- sichere Hash Funktion SHA-1.

Der Prozessor wurde in der IHP-250-nm-Technologie gefertigt und erfolgreich getestet. Im Jahr 2011 wurde das gleiche Design zur Fertigung in der 130-nm-Technologie des IHP vorbereitet und in die Fertigung eingesteuert. Leider traten Probleme im Fertigungsprozess auf, so dass keine 130-nm-Hardware vorliegt (vgl. „AP 3 Digitale Basisbandverarbeitung (BB)“).

Das 250-nm-Design ist in Abbildung 4 in AP2 Basisbandverarbeitung gezeigt. Die folgende Abbildung 14 zeigt das Design im Größenvergleich mit einer 1-Cent-Euromünze.

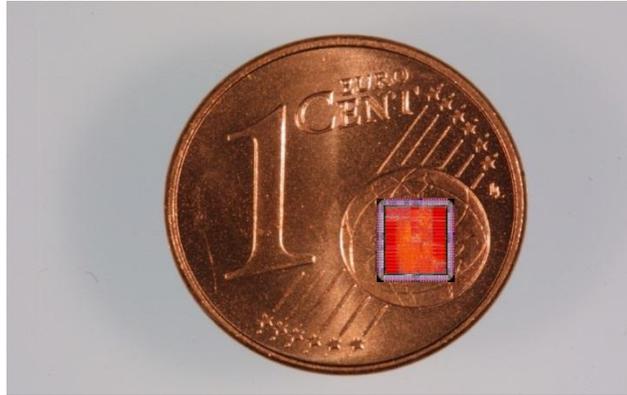


Abbildung 14: Ein-Chip-Lösung bestehend aus 16-Bit-Mikrocontroller, DSSS-Basisbandprozessor und Krypto-Koprozessoren im Vergleich mit einer 1-Cent-Euromünze

AP 7 Netzwerkprotokoll

Die Untersuchungen zu den Anwendungen haben gezeigt, dass insbesondere die Dienstgüte- (Quality of Service (QoS)) Anforderungen hinsichtlich der maximalen Verzögerung bei der Zustellung von Nachrichten von Bedeutung sind. Bei der Analyse der existierenden Routingprotokolle wurde festgestellt, dass diese Anforderungen nicht unterstützen bzw. dass die QoS-Parameter nicht in die Planung des Netzwerkes einfließen können. Deshalb haben wir uns entschlossen, einen protokollschichtenübergreifenden Ansatz zu untersuchen und umzusetzen. Dieser Ansatz unterstützt eine zeitlich geplante Weiterleitung von Nachrichten von den Sensorknoten zur Senke. Der zeitbasierte Ansatz wurde auf dem IEEE 802.15.4-Protokoll aufgesetzt, die Auswahl der Sendezeitschlitze der Knoten definiert hier implizit den Weg von bzw. zur Senke.

Mit dem LETED-Ansatz wurde ein Verfahren entwickelt und getestet, mit dem für eine vorgegebene maximale Verzögerungszeit berechnet werden kann, wie lange die Schlafperioden der Knoten maximal sein dürfen und in welcher Reihenfolge die Sensorknoten aufwachen müssen. Für die Einhaltung dieses Schedules müssen die kommunizierenden Knoten ein gemeinsames Verständnis der Länge von Zeitintervallen haben. Die mit dem DLDC-MAC durchgeführten Experimente haben gezeigt, dass man die „clock drift“ voraussagen kann und damit das Idle-Listening-Problem (Abhören des Funkkanals, wenn keine Kommunikation stattfindet) stark reduzieren kann. Für diese Vorhersage wurde mit dem „moving average“-Verfahren eine sehr gute und für Sensorknoten ausreichend leichtgewichtige Lösung gefunden. Auf diese Weise lässt sich die Einhaltung des zeitlichen Schedules sicherstellen. Zusätzlich führt die Anwendung der „clock drift“-Vorhersage zu einer Verlängerung der Lebensdauer einfacher Sensorknoten von 5 Prozent und zu einer Lebensdauerverlängerung von 10 Prozent für Sensorknoten, die als Gateway dienen.

Durch die „clock drift“ kann es dazu kommen, dass sich die Schedules unterschiedlicher Pfade im Netzwerk im Laufe der Betriebszeit überschneiden können. Für die Anpassung des Schedules wurde ein Algorithmus entwickelt, der die 2-Hop-Nachbarschaft der einzelnen Knoten berücksichtigt und die größtmögliche zeitliche Lücke zwischen 2 Sendeintervallen als neuen Startpunkt für den Schedule des betroffenen Pfades wählt. Abbildung 15 illustriert das Vorgehen, hier kann es bei Knoten C zu Kollisionen kommen, deshalb verschiebt Knoten A als Startknoten des Pfades A-C-E sein Sendeintervall.

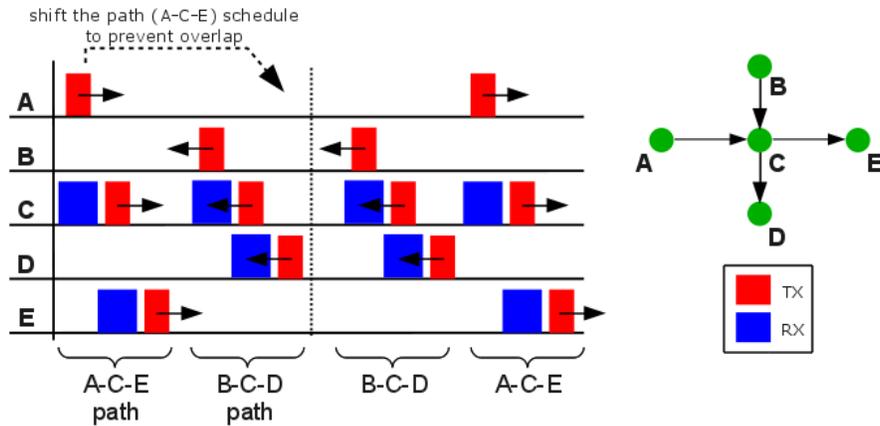


Abbildung 15: Verschiebung der Sendeintervalle zur Vermeidung von Kollisionen bei Veränderung der Sende- und Empfangszeiten aufgrund der clock drift

Zusätzlich wurde in diesem Arbeitspaket im Jahr 2011 ein energiesensitives Routingverfahren implementiert, das sich im Vergleich mit anderen Routingverfahren dadurch auszeichnet, dass nicht nur die bereits verbrauchte Energie – also der aktuelle Batteriestand – in die Routingentscheidung einbezogen wird, sondern auch der voraussichtliche Energieverbrauch für die Vermittlung der aktuellen Nachricht. Um dieses zu ermöglichen, muss die tatsächliche Qualität des Übertragungskanals bewertet werden. Hierfür werden periodisch Testnachrichten mit unterschiedlicher Sendeleistung und der „link quality indicator“ ausgetauscht. So wird ermittelt, mit wie viel Energie ein Sensorknoten die Nachricht senden muss um eine korrekte Übermittlung zu erreichen. Die Berücksichtigung der zukünftigen Übertragungskosten macht das Verfahren fairer als vergleichbare Routingverfahren, die nur die Vergangenheit berücksichtigen. Der simulative Vergleich unseres Ansatzes mit dem als „Remaining Energy“ bezeichneten Ansatzes aus der Literatur hat gezeigt, dass unser Verfahren die Lebensdauer eines einfachen Beispielnetzwerkes mit 6 Knoten um 73 Tage, also von 3 Jahren auf 3,1 Jahre verlängert. Abbildung 16 zeigt das Netzwerk sowie die Anzahl der erfolgreich gesendeten Nachrichten für das TANDEM-Verfahren links und Remaining-Energy-Verfahren rechts.

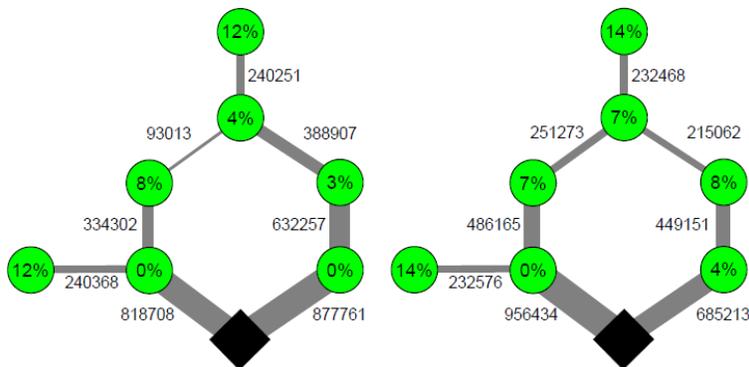


Abbildung 16: Simulativer Vergleich der Energieeffizienz des TANDEM-Routingverfahrens und des Remaining -Energy- Routing-Verfahrens. Die Zahlen an den Verbindungslinien geben die Anzahl der erfolgreich gesendeten Nachrichten wieder, die Netzwerklebensdauer beträgt 3,1 Jahre rechts, bzw. 3 Jahre links, bei einer Startenergie von 50000 Joule je Sensorknoten.

Das hier beschriebene Routingverfahren ist für unterschiedliche Betriebssysteme implementiert und wird auch im Feld verwendet.

AP 8 Middleware und Betriebssystem (MW & BS)

Jedes System muss mit einem entsprechenden Betriebssystem ausgestattet werden, um funktionsfähig zu sein. Sensorknoten sind jedoch äußerst limitiert in ihren Ressourcen, so dass keine üblichen Betriebssysteme wie Windows oder Linux eingesetzt werden können. Daneben ist die Echtzeitfähigkeit unabdingbar. In diesem Arbeitspaket wurde das an der BTU Cottbus entwickelte Echtzeitbetriebssystem REFLEX für eingebettete Systeme für den TANDEM-Prozessor angepasst.

Da REFLEX auf der Programmiersprache C++ basiert, konnte im Zuge der Portierung die Nutzbarkeit des Systems für den Anwendungsentwickler durch die sprachlichen Möglichkeiten weiter verbessert werden. Durch Anpassungen konnte auf die aktuelle Compilerversion gewechselt werden, was sich positiv auf die Qualität und Größe der erzeugten Programme auswirkte.

Das entwickelte Powermanagement basiert auf dem so genannten Duty Cycling, welches zum Energiesparen genutzt wird. Dabei werden Teile des Systems abgeschaltet um den Verbrauch zu verringern und die Standzeiten somit zu erhöhen. Dieser Ansatz wird mit REFLEX durch das konsequente Deaktivieren nicht benötigter Komponenten umgesetzt. Die Entscheidung, ob ein Gerät benötigt wird oder nicht, hängt von dem Gerät selbst ab. So können manche Geräte deaktiviert werden wenn keine Anfragen anliegen (z. B. das Senden von Daten), andere jedoch haben keine Information ob sie gebraucht werden (z. B. beim Empfangen von Daten). Erstere werden durch den entwickelten Powermanager implizit deaktiviert. Letztere müssen durch die Anwendung gesteuert werden. Der Anwendungsentwickler wird bei der Implementierung dieser Steuerungsmechanismen durch das System unterstützt. Dies geschieht durch Methoden der Benutzersicht auf das Energiemanagement. Dort können Gruppen von Verbrauchern gebildet werden, die gemeinsam durch den Powermanager (de-) aktiviert werden können. Die aktiven Gruppen bestimmen dann die aktuelle Phase, in der sich die Applikation befindet.

Neben der Benutzersicht wurde eine Systemsicht entwickelt um den tiefsten möglichen Schlafmodus des Mikrocontrollers implizit zu ermitteln. Dies ist notwendig, da durch die Vielzahl von Schlafmodi und Komponenten die Wahl des richtigen Modus für den Entwickler zu komplex sein kann. Eine falsche Entscheidung kann zur Energieverschwendung führen oder dem Verlust von Ereignissen, die für die Applikation von Wichtigkeit sind. Da REFLEX ereignisbasiert ist, ist die Entscheidung, ob der Knoten schlafen kann, einfach, da in diesem Fall kein Ereignis vorliegt. Der Powermanager ermittelt den tiefsten aktuell möglichen Schlafmodus und betritt diesen.

Im Vergleich mit anderen Betriebssystemen für eingebettete Systeme und Sensorknoten zeigte sich, dass der entwickelte Ansatz gleichwertig oder energieeffizienter ist. Zusätzlich ist der Ansatz bis auf wenige hardwarespezifische Teile plattformunabhängig und leicht portierbar.

Um eine Softwarewartung der Knoten zu ermöglichen, wurde ein Konzept für eine dynamische Reprogrammierung der Sensorknoten implementiert. Für die Reprogrammierung eines Sensorknotens im Feld unter Benutzung der Funkschnittstelle wurden verschiedene Ansätze untersucht. Generell ist

eine Aktualisierung durch einen erhöhten Ressourcenbedarf gekennzeichnet. Dies betrifft sowohl den Speicherverbrauch als auch den Energiebedarf aller an einem Update beteiligten Sensorknoten.

Zwei wesentliche Anwendungsszenarien für das Aktualisieren wurden herausgearbeitet:

1. Das erste beschreibt die Aktualisierung während der Anwendungsentwicklung. Fehler in der Anwendung sind hier wahrscheinlich und viele Knoten befinden sich auf engstem Raum und damit in Funkreichweite. Tritt ein Fehler auf oder die Anwendung wird angepasst, müssen alle Knoten neu programmiert werden. Das konventionelle Vorgehen durch Anschließen des Knotens an einen PC ist allerdings zeitaufwendig. Eine Reprogrammierung mittels Funk kann die notwendige Zeit hier deutlich verkürzen. Da keine langen Standzeiten notwendig sind und Änderungen oft viele unterschiedliche Teile der Knotensoftware umfassen können, ist ein Austausch des gesamten Betriebssystems sinnvoll. Allerdings benötigt diese Form der Aktualisierung Speicherplatz auf dem Knoten um ein neues Image zwischenspeichern bzw. einen kleinen „Update-Kern“, der die Aktualisierung nach dem Löschen des ursprünglichen Systems durchführt.
2. Das zweite Szenario beschreibt die eigentliche Aktualisierung während einer Ausbringung im Feld. Ein solches produktives Netz ist potenziell dünn besetzt und Multihop-Kommunikation die Regel.

Programmänderungen sind eher gering und betreffen möglicherweise nicht alle Knoten. Um die Kosten für den Datentransfer zu verringern muss die Größe der zu versendenden Daten reduziert werden. Da REFLEX in C++ implementiert ist und sich Programme aus einzelnen Komponenten zusammensetzen, bietet es sich an, die Aktualisierung auf der Granularität von Komponenten durchzuführen.

Während der Entwicklung wurde das Linken auf dem Knoten evaluiert und getestet, welches es ermöglicht, Komponenten an beliebige Positionen im Speicher zu installieren. Allerdings steigt der Aufwand gegenüber dem statischen Binden auf den Host-PC unverhältnismäßig. So ist zusätzlicher Platz auf dem Knoten für den Linker notwendig und die zu übertragende Datenmenge einer Komponente wächst durch die Relokationsinformationen auf das 13-fache.

Abbildung 17 zeigt den Speicher eines Knotens mit verschiedenen installierten Komponenten. Für jede Komponente sind Verwaltungsinformationen gespeichert. Sie ermöglichen den Start und Stopp der Komponente, also die Anbindung an den Ereignisfluss von REFLEX, sowie die Identifikation um die Komponente zu entfernen oder zu Aktualisieren.

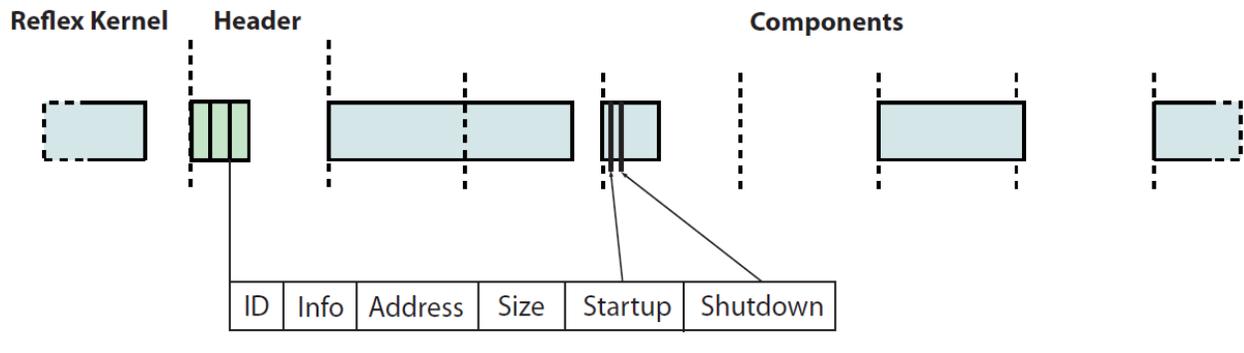


Abbildung 17: Speicherabbild eines Sensorknotens mit verschiedenen installierten Komponenten

Zusätzlich wurde in diesem Arbeitspaket die Middleware TinyDSM für REFLEX umgesetzt und für die Verwendung in einem objektorientierten Betriebssystem angepasst. Die Umsetzung für REFLEX kann dank der verwendeten Template-Mechanismen auf einen Präprozessor, welcher die Konfiguration der verteilten Variablen vornimmt, verzichten. Dadurch wird die Verwendung vereinfacht und eine mögliche Fehlerquelle, welche durch den zusätzlichen Kompilierungsschritt entsteht, ausgeschlossen. Stattdessen werden die Variablen direkt bei ihrer Definition spezifiziert. Um zu verhindern, dass nicht benötigte Funktionalitäten zu einer unnötigen Vergrößerung des Programmcodes führen, werden die zu verwendenden Funktionalitäten mit Hilfe von Templates eingebunden, wodurch nur die Programmteile in das übersetzte Programm übernommen werden, die tatsächlich benötigt werden.

AP 9 Integration, Test und Betrieb

Die in den anderen Arbeitspaketen realisierte Software wurde schrittweise erfolgreich integriert. Hierfür wurden erste Sensorknoten mit diskreten Komponenten aufgebaut, so wie sie in den durch das TANDEM-Projekt initiierten Schwesterprojekten verwendet wurden. Nach der Fertigung des ipms_430x-basierten TANDEM-Prozessors wurde die Software auf diesen portiert. Die Software wurde in einfachen aber realen Anwendungen mit den zur Verfügung stehenden Sensorknoten getestet und hat sich als robust erwiesen. Das TANDEM-Routingprotokoll wird beispielsweise in einem realen System zur Grundwasserüberwachung verwendet.

Im Jahr 2011/12 wurde die Software auf den ersten vollständig am IHP gefertigten Sensorknoten (vgl. Abbildung 18) portiert. Hierbei mussten vor allem die Treiber für die Kommunikation mit dem UWB-Frontend nochmals angepasst werden. Die Tests haben gezeigt, dass auch größere Datenpakete korrekt übertragen werden können. Damit existiert zum ersten Mal ein Sensorknoten, der nicht nur in Deutschland aus COTS (Components of the Shelf) aufgebaut, sondern der tatsächlich aus ausschließlich in Deutschland gefertigten Komponenten realisiert wurde. Hinzu kommt, dass nicht nur die Hardware sondern auch die Software vollständig hier in Deutschland entwickelt wurde.



Abbildung 18: Erster Sensorknoten mit vollständig in Deutschland gefertigter Hardware und Software, bestehend aus einem 16-Bit-Mikrocontroller und einem UWB-Radiomodul

AP 10 Aggregationsprotokolle

Aggregationsprotokolle und Routingprotokolle sind sehr eng verzahnt, da die Routingprotokolle festlegen, entlang welcher Wege die Daten gesendet und damit auch aggregiert werden können. Die Arbeiten im Rahmen des AP 7 zur geschedulten Weiterleitung der Daten bietet auch für die Aggregation eine gute Ausgangsbasis. Das Versenden von Sensordaten entlang eines Pfades erlaubt es, die einzelnen Daten, die von den Sensoren entlang des Pfades gemessenen Werte, in einem Paket zusammenzufassen. Dabei können die Daten im Sinne des bekannten „piggy backing“ in Paketen zusammengefasst werden. Beim „piggy backing“ werden Daten in einem Paket zusätzlich zu den eigentlich zu sendenden Daten mitgeschickt. Dieses geht so lange, bis die maximale Paketgröße erreicht ist. Das DLDC-Verfahren unterstützt „piggy backing“ und wird für diese Form der Aggregation verwendet.

Die Middleware tinyDSM (vgl. „AP 8 Middleware und Betriebssystem (MW & BS)“) erlaubt es, Ereignisse festzulegen, an die bestimmte Operationen gebunden werden können. Auf diese Weise können Berechnungsvorschriften definiert werden, die z. B. eine Durchschnittsbildung oder ähnliches erlauben.

Auf diese Weise können individuelle anwendungsspezifische Aggregationsverfahren in das Sensornetz eingebettet werden, so dass auf starre vordefinierte Mechanismen verzichtet werden kann.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sind Verfahren der „concealed data aggregation (CDA)“ untersucht worden. Hierunter versteht man Verfahren, bei denen die Sensordaten verschlüsselt übertragen werden und trotzdem zusammengefasst werden können. Normalerweise stellt die Tatsache, dass die Daten verschlüsselt werden müssen, eine Hürde bei der Verwendung von CDA-Verfahren dar. Da der TANDEM-Prozessor jedoch über geeignete Krypto-Prozessoren verfügt (vgl. „AP 6 Prozessordesign“), ist die Verwendung von CDA-Verfahren in Sensornetzen, die aus TANDEM-Knoten aufgebaut sind, möglich, ohne dass die Lebensdauer der Sensornetze hierdurch negativ beeinflusst wird.

AP 11 Kooperative Datenübertragung

In vielen Anwendungen ist es notwendig, dass Sensor- oder Steuerdaten zuverlässig übertragen werden. Aufgrund der begrenzten Ressourcen eines Sensorknotens und des damit einhergehenden recht einfachen Funktransceivers kann in vielen Szenarien nicht die geforderte Zuverlässigkeit während der Übertragung erreicht werden. Als Kernidee wurde die Eignung von Network-Coding untersucht. Die Annahme hierbei ist, dass ein vollständiges korrektes Nachrichtenpaket aus zwei oder mehr fehlerhaft empfangenen Paketen aufgebaut werden kann, da in allen Paketen unterschiedliche Teile fehlerhaft sind. Abbildung 19 illustriert diese Idee, die rot markierten Bits sind fehlerhaft empfangen worden, durch einen „Best of 3“-Vergleich wird hier das korrekt empfangene Bit identifiziert. Damit lässt sich die Bitfehlerrate (BER) dramatisch reduzieren.

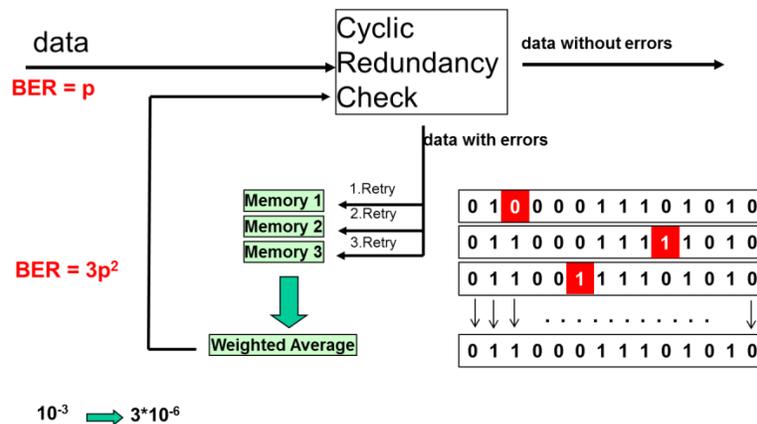


Abbildung 19: Datenstrom mit mehreren defekten Paketen. Die Bitfehler befinden sich an unterschiedlichen Stellen in den Paketen. Durch einen „Best of 3“-Vergleich werden die korrekten Datenbits identifiziert und die Bitfehler korrigiert.

Die Eignung insbesondere von Network-Coding für drahtlose Kooperationsverfahren wurde untersucht. Hierfür wurden die folgenden Szenarien definiert:

1. Direct-MPS: Dieses Szenario besteht aus zwei Knoten, Sender und Empfänger, wobei der Sender das aus der Literatur bekannte Minimum Preamble Sampling (MPS) verwendet, um den Empfänger zu wecken.

2. Relaying-MPS: In diesem Szenario gibt es einen zusätzlichen Knoten zwischen Sender und Empfänger. Der Sender weckt zunächst den zusätzlichen Knoten mit Hilfe von MPS, dann weckt der Zwischenknoten den eigentlichen Empfänger, falls er das Paket korrekt erhalten hat. Falls der Empfänger das Paket korrekt vom Sender und vom Zwischenknoten empfängt, verwirft er eines der Pakete unter Verwendung entsprechender Sequenznummern.
3. CPS-MAC: In diesem Szenario wird das Cooperative Preamble Sampling Protokoll (CPS) für 3 Sensorknoten angewendet. Bei diesem im Rahmen des TANDEM-Projekts entwickelten Protokolls wird der Effekt des Overhearings - also des Mithörens von Nachrichten, die für andere Knoten gedacht sind - ausgenutzt. Die durch Overhearing empfangenen Nachrichten, können von den Knoten in der Nachbarschaft von Sender und Empfänger dazu genutzt werden Nachrichtübertragungen zu wiederholen.

Abbildung 20 zeigt für die drei skizzierten Szenarien und die Energie, die für die Übertragung eines korrekten Bits (energy consumed per useful bit (EPUB)) benötigt wird. Die EPUB-Metrik berücksichtigt die Übertragungsenergie für alle Knoten im Szenario. Bei hohen Übertragungsleistungen ist klar zu erkennen, dass das TANDEM-Protokoll kaum Vorteile bietet, aber bei niedrigen Übertragungsleistungen ergibt sich ein deutlicher Vorteil.

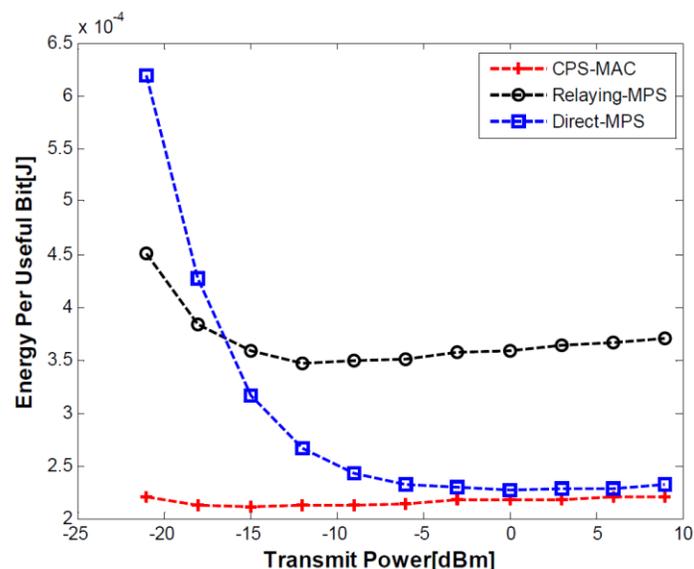


Abbildung 20: Energie pro korrekt übertragenem BIT unter Berücksichtigung aller an der Übertragung beteiligten Sensorknoten

Die Implementierung der kooperativen Datenübertragungsverfahren konnte nicht in vollem Umfang erfolgen, da die TANDEM-Basisbandprozessoren die Bewertung der Qualität eingehender Bits nicht speichern und der Softwareimplementierung nicht bereitstellen.

AP 12 Produktintegration

Im Laufe des TANDEM-Projektes hat es sich gezeigt, dass trotz der Kooperation mit den Partnerunternehmen eine direkte Integration von Projektergebnissen in Produkte nicht erreicht werden kann. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen wurde mit den Industriepartnern eine Reihe von Projekten im

Bereich der drahtlosen Sensornetze beantragt, um im Rahmen dieser Projekte gemeinsame Forschung zu betreiben, aber auch die Möglichkeit zu haben, TANDEM-Komponenten mit Komponenten der Partner in deren Anwendungen zu integrieren. Auf diese Weise sind Demonstratoren entstanden, die die Tragfähigkeit der TANDEM-Konzepte zeigen. Einige dieser Demonstratoren haben eine sehr hohe Robustheit erlangt:

- Trusted Sensor Node: die im TANDEM-Prozessor verwendeten Krypto-Prozessoren wurden mit einem 32-Bit-RISC-Prozessor kombiniert und eine Kleinserie von 50 Stück wurde an das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) ausgeliefert
- Pegelsonde: das TANDEM-DLDC-Protokoll sowie das TANDEM-Routingprotokoll wurden für eine Umweltmonitoring-Anwendung mit extrem langen Schlafzyklen von 12 Stunden je Tag verwendet. Im Rahmen dieser Anwendung werden Grundwasserstände erfasst und über eine Multihopverbindung den Frankfurter Wasserwerken zur Verfügung gestellt. Als Hardware-Plattform dient der TANDEM-Stack
- FeuerWhere: die Middleware tinyDSM wurde als robustes Verfahren zur Vitaldatenerfassung von Feuerwehrleuten im Einsatz getestet. Dazu wurde der am IHP entworfene Sensorknoten in ein entsprechendes feuerfestes Gehäuse eingebaut und das System wurde in einem Brandhaus unter realistischen Bedingungen getestet. Die mehrere Stunden dauernde Vorführung am Tag der offenen Tür am IHP hat gezeigt, dass das System eine sehr gute Selbstheilungseigenschaft hat. Trotz mehrfachen Batteriewechsels haben sich die Sensorknoten ohne weitere Konfiguration immer wieder in das Sensornetz integriert.

Die im TANDEM-Projekt entwickelten Softwarekomponenten wurden auf Standard-Hardwarekomponenten implementiert und innerhalb des Jahres 2011/2012 auf den TANDEM-Prozessor portiert. Abbildung 21 zeigt den TANDEM-Knoten (vgl. „AP 9 Integration, Test und Betrieb“) in einem für Feuerwehreinsätze geeigneten Gehäuse. Vor einem Test unter realen Bedingungen muss jedoch das Antennendesign so verändert werden, dass auch die Antenne durch das feuerfeste Gehäuse geschützt wird.

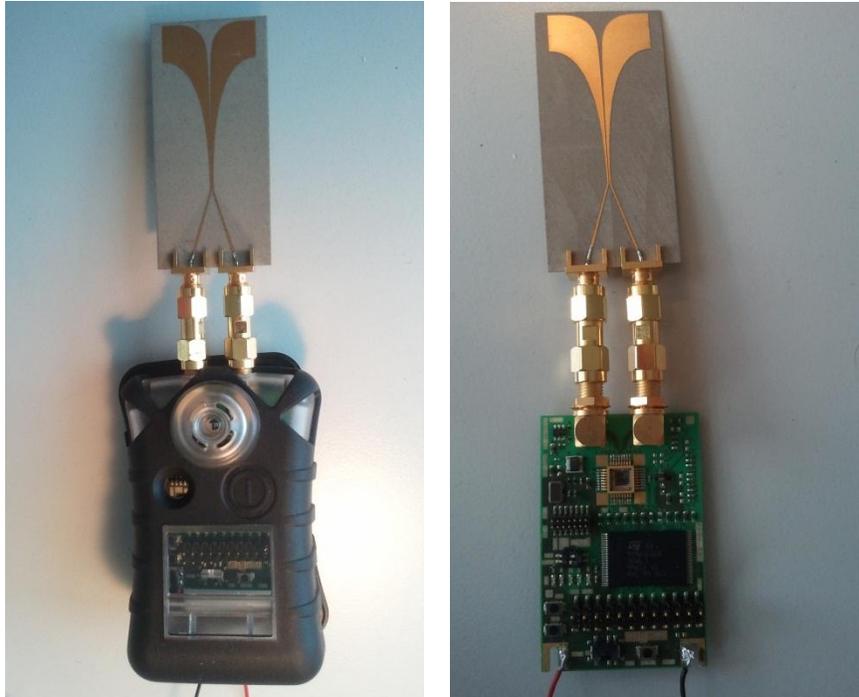


Abbildung 21: TANDEM-Knoten aus am IHP gefertigten Komponenten (16-Bit-Mikrocontroller, UWB-Radiomodul). Links ist der TANDEM-Knoten in einem Gehäuse installiert, das für Feuerwehreinsätze entwickelt wurde. Rechts ist die TANDEM-Knotenplatine zusehen.

AP 13 Businessplan

Die technischen Inhalte des TANDEM-Projektes wurden auch an der Viadrina vorgestellt, um den Studenten die Möglichkeit zu geben, im Rahmen von Bachelorarbeiten Verwertungskonzepte für die TANDEM-Ergebnisse zu erarbeiten. Insgesamt wurden 3 Themen für Bachelorarbeiten gemeinsam mit dem Centre for Entrepreneurship vergeben. Als besonders geeigneter Weg der Nachnutzung der TANDEM-Ergebnisse hat sich dabei die Beantragung eines Folgeprojekts, das genau auf die Übergangsphase zwischen Forschungsergebnissen und Produktentwicklung ausgelegt ist, erwiesen. Hierfür wurde zum einen das EXIST-Programm des BMBF ausgewählt. Dabei wird eine zweistufige Förderung angeboten. Die erste Förderphase läuft über 18 Monate. Hierbei besteht die Hauptaufgabe darin, die Ausgründung vorzubereiten. Wenn am Ende der ersten Phase eine Ausgründung erfolgt ist, besteht die Möglichkeit weitere Förderungen zu bekommen, um die neu gegründete Unternehmung auf den ersten selbstständigen Schritten zu unterstützen. Diese Form eines Nachfolgeprojektes wurde von der TANDEM-Gruppe bereits beantragt.

Um den Bereich der Vermarktung weiter zu stärken wurde im IHP unter Einbeziehung des TANDEM-Projektes ein Antrag für ein Projekt zur sektoralen Verwertung gestellt und genehmigt. Ziel dieses Projektes ist es, Forschungsergebnisse auf ihre Verwertbarkeit hin zu überprüfen, diese mit einem externen Verwertungspartner dann auch in eine Verwertung, z. B. durch Ausgründungen, umzusetzen.

Voraussichtlicher Nutzen

Für die Beurteilung des tatsächlichen und voraussichtlichen Nutzens des TANDEM-Projektes müssen die wissenschaftlichen wie auch die nichtwissenschaftlichen Aspekte des Projektes betrachtet werden. Im nichtwissenschaftlichen Bereich lässt sich feststellen, dass über die Projektlaufzeit ein Bewusstsein für die Chancen, die der Einsatz drahtloser Sensornetze für die Unternehmen der Region bietet, geschaffen werden konnte. Dieses zeigt sich zurzeit noch vor allem in den gemeinsamen Forschungsprojekten. Über diese Forschungsprojekte ist eine intensive Zusammenarbeit gewachsen, die eine Verwertung der Ergebnisse deutlich leichter machen wird. Darüber hinaus wurde und wird auf diesem Weg die Innovationskraft der regionalen Unternehmen deutlich gestärkt und es wurden neue Arbeitsplätze geschaffen, allein am IHP ist die Gruppe auf 20 Mitarbeiter gewachsen.

Eine Verwertung der TANDEM-Ergebnisse kann in unterschiedlichen Kontexten erfolgen. Hier ist insbesondere der modulare Ansatz als besonderer Vorteil für die ersten Schritte zu sehen. Die Anwendungsgebiete sind sehr breit:

- Umweltmonitoring
- Automatisierungstechnik
- „Home Land Security“
- Telemedizin

Um nur die Anwendungsgebiete zu nennen, in denen bereits mit Partnern erste Sensornetze untersucht wurden. Für ausgewählte Teillösungen sehen wir gute Chancen, diese mittelfristig in Produkte einfließen zu lassen. Dies gilt insbesondere für die Module, die in den ZIM-Projekten nachgenutzt und im Hinblick auf Aspekte, die für Produkte besonders relevant sind, wie Zuverlässigkeit und Wartbarkeit, entsprechend überarbeitet und erweitert wurden.

Für die Verwertung wird sowohl angestrebt, die erzielten Ergebnisse in weiteren Forschungsprojekten zu verbessern und in ihrem Leistungsumfang zu erweitern als auch einen direkten Schritt in Richtung Produktentwicklung zu gehen. Hierfür wurde bereits ein Antrag im Rahmen der EXIST-Förderung gestellt (vgl. „AP 13 Businessplan“). Dieser Ansatz soll weiterverfolgt werden.

FE-Ergebnisse von dritter Seite

Es sind zum momentanen Zeitpunkt keine FE-Ergebnisse von dritter Seite bekannt, die die wesentlichen Projektziele beeinflussen.

Veröffentlichungen der Ergebnisse

Während der Projektlaufzeit sind die folgenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen entstanden. Eine Übersicht ist in Tabelle 1 zu sehen. Im Folgenden werden die Veröffentlichungen nach Beitragsart und Jahren sortiert aufgelistet.

Tabelle 1: Übersicht aller Veröffentlichungen des TANDEM-Projektes

	2007	2008	2009	2010	2011	Summe
Published Paper	6	12	12	11	6	47
Invited Presentation					1	1
Presentation			4		0	4
Reports					6	6
Monographs					1	1
Diss. / habil.			1	0	4	5
DA / MA / BA - Thesis			7	2	2	11
Patents	1			2	0	3
Accepted papers					6	6
Accepted Presentation					0	0
	7	12	24	15	26	84

Konferenzbeiträge und Workshops

2007

M. Brzozowski; R. Karnapke; J. Nolte

IMPACT - A Family of Cross-Layer Transmission Protocols for Wireless Sensor Networks

IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications Conference, 2007.
IPCCC 2007. 11-13 April 2007, Page(s): 619 - 625.

Dereje H. Woldegebreal, S. Valentin, H. Karl

Outage Probability Analysis of Cooperative Transmission Protocols without and with Network Coding: Inter-User Channels based Comparison

In Proc. 10th ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)

D. Dietterle, J.-P. Ebert, R. Kraemer

A Hardware Accelerated Implementation of the IEEE 802.15.3 MAC Protocol

Proc. 1st IFIP International Conference on Wireless Sensor and Actor Networks (WSAN '07), Wireless and Actuator Networks / eds. L. Orozco-Barbosa, T. Olivares, R. Casado, A. Bermudez, (Boston:

Springer), 215 (2007)

D. Dietterle

Entwicklung von energieeffizienten drahtlosen Sensornetzen - das TANDEM-Projekt am IHP
Innovationstag touchIT, Frankfurt (Oder), May 05, 2007, Germany (Invited Presentation).

P. Langendörfer

TANDEM Ein extrem verbrauchsarmes, skalierbares, TANDEM-Prozessor-basiertes Funksystem für sensorische, aktuatorische und kennzeichnende Anwendungen
Vortrag Netzwerk Treffen ProSenQU, September 2007.

Z. Stamenkovic, D. Dietterle, G. Panic, W. Bocer, G. Schoof, and J.-P. Ebert

MAC Processor for BASUMA Wireless Body Area Network
Proc. 5th IASTED International Conference on Circuits, Signals, and Systems, Banff 2007, (pp.47-52).

2008

D. H. Woldegebreal, S. Valentin, H. Karl

Incremental Network Coding in Cooperative Transmission Wireless Networks
In Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC-Fall)

Dereje H. Woldegebreal, H. Karl

Network-Coding-based Cooperative Transmission in Wireless Sensor Networks: Diversity-Multiplexing tradeoff and Coverage Area Extension
In Proc. 5th European conference on Wireless Sensor Networks (EWSN)

Oliver Maye, Michael Maaser, Frank Herzel

Various implementations of a heading module for an optical positioning system
Proceedings of Workshop "Progress in Local and Global Positioning in Europe" at IMS 2008, June 20, 2008 - Atlanta, GA, USA

S. Olonbayar, R. Kraemer

Performance of UW and its suitability for wireless sensors
Workshop Proceedings on Positioning, Navigation and Communication 2008 (WPNC'08), Hannover, Germany, March 2008

S. Olonbayar, G. Fischer, R. Kraemer

Synchronisation performance of wireless sensor networks
International Conference on UWB 2008 (ICUWB2008), Hannover, Germany, September 2008

Steffen Ortmann, Peter Langendörfer

Enhancing reliability of sensor networks by fine tuning their event observation behaviour

2nd IEEE WoWMoM Workshop on Adaptive and Dependable Mission- and bUsiness-critical mobile Systems (ADAMUS), 2008

G. Panic, Z. Stamenkovic, and R. Kraemer

Power Gating in Wireless Sensor Networks

International Symposium on Wireless Pervasive Computing, Santorini Island (Greece), 2008

G. Panic, D. Dietterle, Z. Stamenkovic

Architecture Of A Power-Gated Wireless Sensor Node

Euromicro Symposium On Digital System Design, DSD2008, Parma, Italy, 2008

Steffen Peter, Mario Zessack, Frank Vater, Goran Panic, Horst Frankenfeldt, and Michael Methfessel

An Encryption-Enabled Network Protocol Accelerator

6th International Conference on Wired/Wireless Internet Communications (WWIC 2008), May 28-30, 2008 - Tampere, Finland

D. Platz, Dereje H. Woldegebreal, H. Karl

Random Network Coding in Wireless Sensor Networks: Energy Efficiency via Cross-Layer Approach

In Proc. 10th IEEE ISSSTA 2008

S. Valentin, T. Volkhausen, F. Atay Onat, H. Yanikomeroglu, H. Karl

Decoding-based channel estimation for selective cooperation diversity protocols

Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)

S. Valentin, T. Volkhausen, F. Atay Onat, H. Yanikomeroglu, H. Karl

Enabling partial forwarding by decoding-based one and two-stage selective cooperation

Proc. IEEE Cognitive and Cooperative Wireless Networks (CoCoNET) Workshop collocated with IEEE ICC

2009

M. Brzozowski, K. Piotrowski, P. Langendörfer

A Cross-Layer Approach for Data Replication and Gathering in Decentralized Long-Living Wireless Sensor Networks

9th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, Athens, March 23-25, 2009, Greece

M. Brzozowski, H. Salomon, P. Langendörfer

Completely Distributed Low Duty Cycle Communication for Long-Living Sensor Networks

7th IEEE / IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC-9), Vancouver, August 29 - 31, 2009, Canada

M. Brzozowski, P. Langendörfer

On Prolonging Sensornode Gateway Lifetime by Adapting its Duty Cycle

WWIC 2009, 7th International Conference on Wired / Wireless Internet Communications, Twente, May 27 - 29, 2009, The Netherlands

O. Klymenko, D. Martynenko, G. Fischer

An UWB Receiver Front-End for Low Data Rate Wireless Personal Area Networks

IEEE MTT-S International Microwave Workshop on Wireless Sensing, Local Positioning, and RFID, Cavtat, September 24 - 25, 2009, Croatia

P. Langendörfer, F. Vater, K. Piotrowski

Customizing Sensor Nodes and Software for Individual Pervasive Health Applications

Proceedings 3rd International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare, 2009

D. Martynenko, G. Fischer, O. Klymenko

A High Band Impulse Radio UWB Transmitter for Communication and Localization

Proc. ICUWB 2009, Vancouver, Sep. 2009, Canada

S. Olonbayar, D. Kreiser, R. Kraemer

Performance and Design of IR-UWB Transceiver Baseband for Wireless Sensors

Proc. ICUWB 2009, Vancouver, Sep. 2009, Canada

St. Ortmann, M. Maaser, P. Langendörfer

Adaptive pruning of Event Decision Trees for energy efficient collaboration in event-driven WSN

Accepted for Third International Workshop on Information Fusion and Dissemination in Wireless Sensor Networks, in conjunction with MobiQuitous'09, 2009

St. Peter, O. Stecklina, P. Langendörfer

An Engineering Approach for Secure and Safe Wireless Sensor and Actuator Networks for Industrial Automation Systems

14th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Palma, 2009, Spain

A. Sieber, K. Walther, St. Nürnberger, J. Nolte

Implicit Sleep Mode Determination in Power Management of Event-driven Deeply Embedded Systems
7th International Conference on Wired / Wireless Internet Communications, University of Twente,
2009, The Netherlands

S. Valentin, D. H. Woldegebreal, T. Volkhausen, H. Karl

Combining for cooperative WLANs -- A reality check based on prototype measurements

Proc. IEEE Workshop on Cooperative Mobile Networks (CoCoNET2), collocated with IEEE ICC

T. Volkhausen, D. H. Woldegebreal, H. Karl

Improving Network Coded Cooperation by Soft Information

In Proc. IEEE International Workshop on Wireless Network Coding (WiNC2009)

2010

T. Basmer, P. Kulse, M. Birkholz

Systemarchitektur intelligenter Sensorimplante

BMT 2010, 44. DGBMT Jahrestagung, Rostock, Oktober 2010

M. Brzozowski, H. Salomon, P. Langendörfer

ILA: Idle Listening Avoidance in Scheduled Wireless Sensor Networks

Proc. 8th International Conference on Wired / Wireless Internet Communications, (WWIC 2010),
Berlin, Springer, LNCS 6074, 363 (2010)

M. Brzozowski, H. Salomon, P. Langendörfer

Limiting End-to-End Delays in Long-Lasting Sensor Networks

8th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access (MobiWac 2010),
Bodrum, October 17 - 21, 2010, Turkey

M. Brzozowski, H. Salomon, P. Langendörfer

On Efficient Clock Drift Prediction Means and Their Applicability to IEEE 802.15.4

Proc. 8th IEEE / IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC-10)

J. Hund, S. Olonbayar, R. Kraemer, C. Schwingenschlögel

Evaluation and Optimisation of Robustness in the IEEE.802.15.4a Standard

ICUWB 2010, Sep. 2010, Nanjing China

Dan Kreiser, Sonom Olonbayar

Efficient synchronization method for IR-UWB 802.15.4a non-coherent energy detection receiver

IOTS 2010 - The 1st IEEE/ACM Internet of Things Symposium Hangzhou, PR China, December 18-20,

2010

P. Langendörfer, K. Piotrowski, O. Stecklina, St. Peter, F. Vater

Wireless Sensor Nodes as Building Blocks for Real Life

2nd Workshop on Architectures, Services and Applications for the Next Generation Internet (WASA-NGI), Karlsruhe June, 29, 2010, Germany

P. Langendörfer, O. Krause, O. Stecklina, St. Peter, F. Vater

Sichere drahtlose Sensorknoten: Herausforderungen und Lösungen

Workshop Mobilität und Sicherheit Daten und Objekte fest im Griff, Wildau, June 24, 2010, Germany

S. Olonbayar, G. Fischer, D. Kreiser, R. Kraemer

Automatic Gain Controlling in IR-UWB Communications Designed for Wireless Sensors

2010 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB 2010), Nanjing, September 20 - 23, 2010, PR China

Goran Panic, Thomas Basmer, Klaus Tittelbach-Helmrich, Lukasz Lopacinski

Low Power Sensor Node Architecture

The 17th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems, ICECS 2010, 12th-15th December 2010, Athens, Greece

Jorge Portilla, José Andrés Otero, Eduardo de la Torre, Teresa Riesgo, Oliver Stecklina, Steffen Peter, Peter Langendörfer

Adaptable Security in Wireless Sensor Networks by Using Reconfigurable ECC Hardware Coprocessors

29. September 2010: International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol. 2010

2011

T. Basmer, H. Schomann, St. Peter

Implementation Analysis of the IEEE 802.15.4 MAC for Wireless Sensor Networks

Proc. International Conference on Selected Topics in Mobile & Wireless Networking, (accepted paper)

D. Kreiser, S. Olonbayar

Design and Implementation of a UWB-Baseband IEEE 802.15.4a for Non-Coherent Energy Detection Receiver

Proc. Wireless Communications (WCSP 2011), (accepted paper)

St. Lange, O. Stecklina, M. Methfessel

Simulationsgestützte Algorithmenentwicklung für drahtlose Sensornetze

Proc. Fachgespräch Sensornetze 2011, 45, 2011

S. Olonbayar, D. Kreiser, R. Kraemer

IEEE 802.15.4a IR-UWB Noncoherent receiver design and performance

Wireless Congress 2011, Nov. 2011, Munich, Germany

St. Ortmann, P. Langendörfer

The Impact of Social Networks on User Privacy - What Social Networks Really Learn about their Users

Proc. 7th International Conference on Web Information Systems and Technologies (WEBIST 2011), 21, 2011

St. Ortmann, P. Langendörfer

Social Networking and Privacy, a Contradiction?

Business Social Networking: Organizational, Managerial, and Technological Dimensions, IGI Global, (accepted paper)

St. Ortmann, P. Langendörfer, St. Kornemann

WiSec 2011 Demo: Demonstrating Self-Contained on-node Counter Measures for Various Jamming Attacks in WSN

ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, (accepted paper)

A. Sojka, K. Piotrowski, P. Langendörfer

Symbiosis on a Lightweight ECC Security and Distributed Shared Memory in Wireless Sensor Networks

Proc. 4th International Workshop on Dependable Network Computing and Mobile Systems (DNCMS), (accepted paper)

O. Stecklina, F. Vater, T. Basmer, E. Bergmann, H. Menzel

Hybrid Simulation Environment for Rapid MSP430 System Design Test and Validation Using MSPSim and SystemC

Proc. 14th IEEE International Symposium on Design and Diagnostics Of Electronic Circuits and Systems (DDECS 2011), 167

O. Stecklina, P. Langendörfer, H. Menzel

Towards a Secure Address Space Separation for Low Power Sensor Nodes

Proc. 1st International Conference on Pervasive and Embedded Computing and Communication Systems (PECCS 2011), 512, 2011

O. Stecklina, P. Langendörfer

Ubiquitous Computing Asks for Ubiquitous Line of Defense

Proc. Workshop über IT-Sicherheit in kollaborativen und stark vernetzten Systemen, Berlin, October 04 2011, Germany, (accepted paper)

Monographien

2011

Steffen Ortmann

Definition and Configuration of Reliable Event Detection for Application in Wireless Sensor Networks

Monographie; Shaker Verlag, 2011

Vorträge

2009

P. Langendörfer

UbiSec&Sens: Overview, Selected Achievements and Lessons Learnt

Concertation Meeting on Wireless Sensor Networks & Cooperating Objects, organized by DG INFSO G3 Embedded Systems and Control, Brüssel, 5 March 2009

P. Langendörfer

Wireless Sensor and Actuator Networks for the Protection of Critical Infrastructures

Verein der Brandenburgischen Ingenieure und Wirtschaftler e. V. (VBIW) IHP, Frankfurt (Oder), 6. Mai 2009

P. Langendörfer

Wireless Sensor and Actuator networks chance or risk for critical infrastructure protection

4th German-Norwegian Security Conference, Berlin, 2 December 2009

St. Peter

Integration zuverlässiger drahtloser Kommunikationssysteme in Sensor-/Aktornetze in Automatisierungsanwendungen

Vortrag bei Profibus Nutzer Organisation / Arbeitskreis IO-Link Gesamt, Frankfurt (Main), 8. Juli 2009

Akademische Arbeiten

2009

J. Gäbler

DSMQL Query processing in resource constrained environments

Diplomarbeit, BTU Cottbus, 2009

C. Goltz

Entwurf und Implementierung eines Protokolls zur Modellierung exklusiver Ressourcen in drahtlos kommunizierenden Roboterschwärmen

Bachelorarbeit, BTU Cottbus, 2009

J. Krause

Entwicklung einer modularen Softwarearchitektur für den Standard IEEE 802.15.4

Masterarbeit, BTU Cottbus, 2009

O. Krause

Implementierung des Beacon-enable-mode im Standard IEEE 802.15.4

Studienarbeit, BTU Cottbus, 2009

L. Lopacinski

Implementation and verification of an ultra low power baseband processor

Masterarbeit, West Pomeranian University of Technology Szczecin, Department of Computer Science, 2009

M. Petrick

Entwicklung und Evaluierung eines Store & Forward-Protokolls für Drahtlose Sensornetze

Bachelorarbeit, BTU Cottbus, 2009

2010

Olaf Krause

Entwicklung einer drahtlosen Authentifizierungs- und Updatekomponente für die Debugschnittstelle von Mikrocontrollern

Diplomarbeit, BTU Cottbus, 2010

Hannes Menzel

Evaluierung und Implementierung von Konzepten für eine Sensorknoten-spezifische Separierung von Ressourcen

Masterarbeit, BTU Cottbus, 2010

2011

Analyse und Vorhersage des Flächen- und Energieverbrauches- optimaler Hardware Polynom-Multiplizierer für $GF(2^n)$ für elliptische Kurven Kryptographie

Zoya Dyka

Dissertation, BTU Cottbus, 2011 (eingereicht)

Entwurf und Implementierung eines energieeffizienten Multihop-Routing auf Basis eines verteilten Low Duty-Cycle Protokolls

C. Goltz

Diplomarbeit, BTU Cottbus, 2011

Tool-Support Development of Secure Wireless Sensor Networks

Steffen Peter

Dissertation, BTU Cottbus, 2011 (eingereicht)

Assessment of the feasibility of Distributed Shared Memory and Data Consistency for Wireless Sensor Networks

Krzysztof Piotrowski

Dissertation, BTU Cottbus, 2011 (eingereicht)

A. Sänn

Der Lead-User Ansatz im Bereich sicherheitskritischer Entwicklungen spezieller Sensornetzwerke

Masterarbeit, BTU Cottbus, 2011

N. Todtenberg

Entwicklung und Umsetzung von Mechanismen zur Verbesserung der "Quality of Experience" beim mobilen Zugriff auf Streaming orientierte Internet-Dienste über zellulare Netze

Diplomarbeit, BTU Cottbus, 2011

Referenzen

- [1] M. Johnson, M. Healy, P. van de Ven, M.J. Hayes, J. Nelson, T. Newe, and E. Lewis. A comparative review of wireless sensor network mote technologies. In *Sensors*, 2009 IEEE, pages 1439-1442. IEEE.
- [2] Sentilla Corp. Sentilla Corp. - Homepage, 2011. <http://www.sentilla.com/>.
- [3] MEMSIC Inc. TELOS Mote Platform, 2011. <http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=152:telosb>.
- [4] MEMSIC Corp. MEMSIC Corp. - Homepage, 2011. <http://www.memsic.com>.

- [5] MEMSIC Inc. MICA2 Wireless Measurement System, 2011.
<http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=147:mica2>.
- [6] MEMSIC Inc. MICAz Wireless Measurement System, 2011.
<http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=148:micaz>.
- [7] MEMSIC Inc. IRIS Wireless Measurement System, 2011.
<http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=135:iris>.
- [8] Atmel Corp. Atmel AVR 8- and 32-bit, 2011. <http://www.atmel.com/products/avr/>.
- [9] Texas Instruments Inc. MSP430x1xx Family User's Guide, 2006.
<http://www.ti.com/litv/pdf/slau049f>.
- [10] Texas Instruments Inc. MSP430x5xx/MSP430x6xx Family User's Guide, 2010.
<http://www.ti.com/litv/pdf/slau208h>.
- [11] Texas Instruments Inc. CC430F613x, CC430F612x, CC430F513x MSP430 SoC With RF Core, 2010. <http://www.ti.com/lit/gpn/cc430f6137>.
- [12] ARM Ltd. ARM Ltd. - Homepage, 2011. <http://www.arm.com/>.
- [13] Texas Instruments Inc. Single-Chip Very Low Power RF Transceiver, 2007.
<http://www.ti.com/lit/gpn/cc1000>.
- [14] Texas Instruments Inc. CC1101 Low-Power Sub-1 GHz RF Transceiver, 2010.
<http://www.ti.com/lit/gpn/cc1101>.
- [15] Texas Instruments Inc. Low-Cost Low-Power 2.4 GHz RF Transceiver, 2009.
<http://www.ti.com/lit/gpn/cc2500>.
- [16] Texas Instruments Inc. 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-Ready RF Transceiver, 2007.
<http://www.ti.com/lit/gpn/cc2420>.
- [17] Texas Instruments Inc. 2.4 GHz IEEE 802.15.4/ZIGBEE RF TRANSCEIVER, 2007.
<http://www.ti.com/lit/gpn/cc2520>.
- [18] E.-Y.A. Lin, J.M. Rabaey, and A. Wolisz. Power-E-cient Rendez-vous Schemes for Dense Wireless Sensor Networks. In Proceedings ICC 2004.

- [19] A. El-Hoiydi. Aloha with Preamble Sampling for Sporadic Traffic in Ad Hoc Wireless Sensor Networks. In Proceedings ICC 2002.
- [20] C. Schurgers, V. Tsiatsis, S. Ganeriwal, and M. Srivastava. Optimizing Sensor Networks in the Energy-Latency-Density Design Space. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2002.
- [21] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler. Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks. In Proceedings SenSys '04.
- [22] A. El-Hoiydi and J.-D. Decotignie. WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for Multi-hop Wireless Sensor Networks. In Proceedings ALGOSENSORS 2004.
- [23] R. Musaloiu-E., C.J.M. Mike Liang, and A. Terzis. Koala: Ultra-Low Power Data Retrieval in Wireless Sensor Networks. In Proceedings IPSN 2008.
- [24] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In Proceedings INFOCOMM 2002.
- [25] T. Van Dam and K. Langendoen. An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In Proceedings SenSys 2003.
- [26] G. Lu, B. Krishnamachari, and C.S. Raghavendra. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for tree-based data gathering in sensor networks. Wireless Communications and Mobile Computing, 2007.
- [27] N. Burri, P. von Rickenbach, and R. Wattenhofer. Dozer: Ultra-Low Power Data Gathering in Sensor Networks. In Proceedings IPSN 2007.
- [28] M. Brzozowski, H. Salomon, and P. Langendörfer. Completely distributed low duty cycle communication for long-living sensor networks. In Proceedings EUC 2009.
- [29] David B. Johnson and David A. Maltz. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. In Mobile Computing, pages 153_181. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [30] Ch. E. Perkins and E. M. Royer. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing. In Proceedings WMCSA '99.
- [31] S. Lin and D.J. Costello. Error Control Coding. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1983.
- [32] P. Levis, S. Madden, J. Polastre, R. Szewczyk, K. Whitehouse, A. Woo, D. Gay, J. Hill, M. Welsh, E. Brewer, et al. Tinyos: An operating system for sensor networks. Ambient Intelligence, pages 115{148, 2005

- [33] Adam Dunkels, Bjorn Gronvall, and Thiemo Voigt. Contiki - a lightweight and exible operating system for tiny networked sensors. In Proceedings of the First IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (Emnets-I), Tampa, Florida, USA, November 2004.
- [34] Karsten Walther and Jorg Nolte. A exible scheduling framework for deeply embedded systems. In Proceedings of the 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops - Volume 01, AINAW '07, pages 784{791, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society.
- [35] P. Costa, L. Mottola, A. Murphy, and G. Picco. Programming Wireless Sensor Networks with the Teeny Lime Middleware. Middleware 2007, pages 429{449, 2007.
- [36] P. Costa, L. Mottola, A.L. Murphy, and G.P. Picco. TeenyLIME: transiently shared tuple space middleware for wireless sensor networks. In Proceedings of the international workshop on Middleware for sensor networks, pages 43{48. ACM, 2006.
- [37] Paolo Costa, Luca Mottola, Amy L. Murphy, and Gian Pietro Picco. Developing sensor network applications using the teenylime middleware. Technical report, 2006.
- [38] T.W. Hnat, T.I. Sookoor, P. Hooimeijer, W. Weimer, and K. Whitehouse. Macrolab: a vector-based macroprogramming framework for cyber-physical systems. In Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems, pages 225{238. ACM, 2008.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) <i>Schlussbericht</i>
3. Titel <i>Ein extrem verbrauchsarmes, skalierbares, TANDEM-Prozessor-basiertes Funksystem für sensorische, aktuatorische und kennzeichnende Anwendungen (TANDEM) - Schlussbericht</i>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] <i>Langendörfer, Peter;</i> <i>Basmer, Thomas</i>	5. Abschlussdatum des Vorhabens <i>Januar 2012</i>
	6. Veröffentlichungsdatum <i>Juni 2012</i>
	7. Form der Publikation <i>Broschüre</i>
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) <i>IHP GmbH</i> <i>Im Technologiepark 25</i> <i>15236 Frankfurt (Oder)</i>	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen <i>03IP601</i>
	11. Seitenzahl 45
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 38
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 21
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Der Abschlussbericht des Tandem Projektes erläutert den Entwurf und die Umsetzung eines energie-effizienten Sensorknoten, von dem sowohl alle Hardware Komponenten einschliesslich der Funkschnittstelle und des Prozessors sowie geeigneter Spezialprozessoren im Rahmen des Projektes entwickelt und in der IHP Technologie gefertigt wurden. Darüber hinaus beschreibt der Bericht die Entwicklung von Protokollen auf fast allen Protokollebenen von der Sicherungsschicht bis zur Anwendung. Hauptaugenmerk bei der Entwicklung sowohl der Hardware als auch der Software war die Energie-effizienz der entstehenden Lösung um eine Möglichst lange Lebensdauer der Sensorknoten gewährleisten zu können. Entstanden ist als Endergebnis ein Sensorknoten der vollständig in Deutschland entworfen und gefertigt wurde. Neben den wissenschaftlich/ technischen Arbeiten wird in dem Abschlussbericht ein Einblick in die Entwicklung eines Wissenschafts- und Forschungsprofils zum Thema Sensornetze sowie zur Kooperation mit Unternehmen der Region z.B. im Hinblick auf gemeinsame Forschung aber auch gemeinsame Weiterbildung.	
19. Schlagwörter Sensorknoten, Mikrokontroller, Energieeffizienz, Protokollstapel, UWB	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) <i>Final Report</i>
3. title <i>An extremely energy efficient scalable, wireless TANDEM processor based system for sensing applications (TANDEM)- Final report</i>	
4. author(s) (family name, first name(s)) <i>Langendörfer, Peter; Basmer, Thomas</i>	5. end of project <i>January 2012</i>
	6. publication date <i>June 2012</i>
	7. form of publication <i>brochure</i>
8. performing organization(s) (name, address) <i>IHP GmbH Im Technologiepark 25 15236 Frankfurt (Oder)</i>	9. originator's report no.
	10. reference no. <i>03IP601</i>
	11. no. of pages 45
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 38
	14. no. of tables 1
	15. no. of figures 21
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract This final report describes the actions taken to design, implement and manufacture an energy efficient sensor node. In this project all components of the sensor node, including hardware such as the radio frontend, micro-controller and special purpose processors have been designed and manufactured. In addition all software components have been developed in the project starting from the medium access control layer up the protocol stack to the application. The major design guideline was energy efficiency in order to guarantee long life time of battery powered sensor nodes. The final result of this project is a sensor node that is fully –software and hardware- engineered in Germany and it was even manufactured in the IHP cleanroom. In addition to the description of the scientific and technical achievements this reports provide some insight into the non technical objectives of the TANDEM project. It explains to a certain extend the effort under taken to generate a scientific profile in the region for the field of sensor networks, as well as cooperation with regional companies in the area of common research and education.	
19. keywords Sensor node, UWB, energy efficiency, protocol stack, micro controller	
20. publisher	21. price