

"Testbeds or bad tests? Konzept einer Experimentierumgebung für energieeffiziente WSNs

Mario Pink
Forschungsgruppe Dezentrale Systeme und
Netzdienste
Institute für Telematik
Universität Karlsruhe
76131 Karlsruhe
mario.pink@kit.edu

ABSTRACT

Wir präsentieren TeZeUS einen Entwurf für skalierbare, flexible Testbed-Architekturen zur Unterstützung der Entwicklung von drahtlosen Sensor-Netzwerken (WSN). Der Entwurf von TeZeUS basiert auf der Analyse von Experimentnotwendigkeiten für eine zuverlässige Informationsbereitstellung in energiebewussten ubiquitären Systemen. Das Ziel des Entwurfs ist es die Unterstützung von WSN-Experimenten für ubiquitäre Systeme, sowohl für ressourcenstarke als auch ressourcenschwache Sensor-Knoten zu verbessern, Optimierungspotentiale über detaillierte Energiemessungen aufzuzeigen sowie mit der Simulation von verschiedenen Energiezuständen der Sensor-Knoten, WSN-Anwendungen auf ihre Robustheit zu testen. Die Möglichkeit der Analyse des Funkmediums und die Simulation von verschiedenen Sensor-Knoten-Distanzen ermöglicht zudem eine genaue Betrachtung des Einflusses von Hindernissen auf das Kommunikations- und das Energieverhalten. Zusätzlich können mit Hilfe von kontrollierten Simulationen von Umgebungseinflüssen Experimente mehrfach unter gleichen Bedingungen reproduziert und somit bessere Optimierungsstrategien identifiziert werden. Selbstorganisationsmechanismen, der Einsatz von Hardware mit standardisierten Schnittstellen, ein drahtloses Management-Backbone-Netzwerk und Open-Source Software sollen den TeZeUS-Entwurf hoch skalierbar, kostengünstig und einfach realisierbar machen.

General Terms

Design, Experimentation, Measurement

Keywords

Wireless sensor networks, Testbeds, Energie measurement, Frequency measurement

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. To copy otherwise, to republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee.
Copyright 2007 Universität-Karlsruhe.

1. EINFÜHRUNG

Drahtlose Sensor-Netzwerke oder Wireless Sensor-Networks (WSN) und deren Anwendungen besitzen ein hohes Potential, die Art der Informationsgewinnung zu revolutionieren. Sie ermöglichen die Überwachung schwer zugänglicher und gefährlicher Gebiete [17][33][11] mit einer adaptierbaren Informationsqualität, sowie die Entwicklung neuer Geschäftsprozesse, z.B. Warenverfolgung in der Logistik. Aufgrund der inhärenten Flexibilität in ihrer Anwendung und der unberechenbaren Einsatzumgebung dieser Systeme verfügen drahtlose Sensor-Netzwerke über zum Teil völlig neue Systemanforderungen, die bei ihrer Entwicklung berücksichtigt werden müssen, zum Beispiel:

- *Wartungs-, Unterbrechungsfreier Betrieb* über mehrere Jahre,
- *sehr hohe Skalierbarkeit*, von einigen 10 bis mehreren 10000 Sensor-Knoten, verbunden mit
- *hoher Fehlerrobustheit und Zuverlässigkeit* sowie
- *effiziente Verwendung von Sensor-Knoten-Ressourcen*, z.B. CPU-Power,
- *minimaler Verbrauch der beschränkten Batterieenergie* zur Maximierung der Lebenszeit

Diese Anforderungen unterscheiden sich signifikant gegenüber traditionellen Verteilten-Systemen. Im Unterschied zu diesen Systemen ist in Sensor-Netzwerken die beschränkte Verfügbarkeit von Energie der primäre Faktor, der die Funktionsfähigkeit des Netzwerkes bestimmt. Dieser Umstand erfordert daher zum einen die Entwicklung neuer Algorithmen, z.B. Datenaggregationsalgorithmen, als auch die Adaption existierender Algorithmen und Kommunikationsmechanismen auf einen geringen Energieverbrauch.

Zur Entwicklung und Optimierung werden gegenwärtig überwiegend Simulationen eingesetzt. Simulationen aber besitzen den Nachteil, dass ihre zugrundeliegenden Modelle das Verhalten von Sensor-Netzwerken meist nur beschränkt widerspiegeln. So werden sehr oft unzureichende Schätzungen, z.B. für das Datenübertragungsvolumen, Fehlermuster und Topologien, in einer Simulation verwendet. Entwicklungsschritte wie Implementierung, Evaluation und Optimierung der Anwendungsperformanz sowie Fehlerrobustheit und andere nicht funktionale Eigenschaften können in Simulationen

nur schwer analysiert werden. Aufgrund dieser mangelhaften Abbildung der Realität sind Simulationen allein unzureichend. Wirklichkeitsgetreue Experimente sind daher unumgänglich. Die integrale Komplexität solcher Experimente aber erfordert entsprechende Experimentierumgebungen, die das Experimentieren in Sensor-Netzwerken vereinfachen. Diese Experimentierumgebungen (*"Testbeds"*) unterstützen alle Phasen eines Experimentes:

- von der Spezifikation,
- über die Ausbringung der Anwendung auf den Sensor-Knoten,
- der darauffolgenden Konfiguration der Sensor-Knoten,
- bis hin zur Ausführung und
- automatisierten Überwachung des Versuchsablaufs der sich anschließenden Analyse.

Im folgenden beschreiben wir einen skalierbaren, flexiblen *Testbed-Entwurf für die zuverlässige Informationsbereitstellung in energiebewussten ubiquitären Systemen (TeZeUS)*. Der Rest des Dokuments ist wie folgt aufgebaut: Abschnitt 1.1 begründet den Entwurf von TeZeUS, über eine Analyse der Unterstützung von Experimenten, in existierenden Testbeds. Abschnitt 2 beinhaltet eine Anforderungsanalyse für Sensor-Netzwerk-Testbeds und Abschnitt 3 beschreibt darauffolgend die Realisierung dieser Anforderungen in Form des TeZeUS-Architektur-Entwurfs.

1.1 Stand der Technik

Gegenwärtig existiert bereits eine gewisse Anzahl von WSN-Testbeds, die in der Regel die Überwachung von Experimenten, z.B. Energie-, Radiomessungen, nur in einem beschränkten Maße unterstützen. Diese Testbeds, wie z.B. Omega [2], sMote [3], Kansei [19], WASAL [16], EmStar [27][24], mobile Emulab [4][30][31] und MistLab [8], sind in der Regel primär zur Entwicklung von WSN-Anwendungen und verteilten Kommunikations- oder Systemanalyse-Mechanismen gedacht. Für die Entwicklung und Optimierung von energieeffizienten Kommunikationsmechanismen und WSN-Anwendungen sind diese daher nicht optimal geeignet.

Einige Testbeds ermöglichen zwar die Simulation von verschiedenen Energiezuständen der Sensor-Knoten, indem diese entweder mit Hilfe konstanter Energie oder einer Batterie versorgt werden bzw. die Energieversorgung vollständig abgeschaltet wird, z.B. TWIST [28]. Eine detaillierte Beobachtung des Energieverhaltens mit Hilfe von Energiemessungen ist aufgrund des fehlenden Messequipments aber nur sehr schwierig realisierbar und in der Regel nicht ihr primärer Einsatzzweck. Andere Testbeds, wie z.B. MoteLab[26][14], gewährleisten zwar eine bessere Unterstützung für Energiemessungen, beschränken diese aber in der Regel auf eine begrenzte Anzahl von Sensor-Knoten. Neuere Testbed-Entwicklungen versuchen diesen Mangel zu beheben, indem Energiemessungen für jeden Sensor-Knoten realisiert werden können. Einige von ihnen beschränken aber aufgrund der geringen Datenübertragungsrate im Management-Netzwerk die Genauigkeit der Messungen, z.B. JAWS [29]. Wie Energiemessungen werden auch Radiomessungen gegenwärtig nur unzureichend von einigen wenigen Testbeds unterstützt, z.B. Kansei [19][25]. So kann, z.B. die Signalstärke, in vielen Testbeds ausschließlich unter Verwendung

der Sensor-Knoten ermittelt werden, wodurch die Lebenszeit des Netzwerkes beeinträchtigt wird, z.B. JAWS. Ungeachtet der beschränkten Messmöglichkeiten wird eine Validierung der Experimente, also die Sicherstellung des korrekten Ablaufs von Experimenten, die Wiederholung von Messungen unter gleichen Bedingungen und die Möglichkeit Umwelteinflüsse zu simulieren, gegenwärtig nur unzureichend zur Verfügung gestellt. Einige Testbeds eröffnen aber die Möglichkeit die realen experimentellen Resultate mit Hilfe von Simulationen näherungsweise zu Überprüfen.

Das EmStar-Testbed [27][24] bietet diese Möglichkeit, indem es Anwendungen sowohl auf realen als auch auf simulierten Sensor-Knoten ausführen kann, ohne dafür weitere Anpassungen der Anwendung vornehmen zu müssen. Die Genauigkeit dieser Simulation ermöglicht aufgrund der modellgenerierten Sensordaten bestenfalls eine sehr grobe näherungsweise Abschätzung der korrekten Experimentausführung. Kansei [19][25] erweitert diesen Ansatz, indem es zusätzlich gespeicherte Sensordaten in der Simulation verwenden kann. Insgesamt betrachtet werden die Vorteile von realen Experimenten im Vergleich zu Simulationen gegenwärtig nur unzureichend ausgeschöpft. Diese Testbeds sind daher für die Entwicklung und Optimierung von energiebewussten ubiquitären Systemen nur sehr begrenzt einsetzbar. Wir benötigen daher ein Testbed, dass eine gezieltere Unterstützung von WSN-Experimenten gewährleistet.

2. ANFORDERUNG AN WSN TESTBEDS

Damit ein Testbed optimale Hilfestellung beim Experimentieren gewährleisten kann, müssen eine Vielzahl an Anforderungen erfüllt sein. Dabei gilt: je besser die Unterstützung des Experimentierens, um so besser die Ergebnisse der Experimente. Die Anforderungen an ein Testbed lassen sich daher in:

- *Wissenschaftliche Anforderungen,*
- *Management Anforderungen*
- *Ökonomische Anforderungen*

differenzieren.

2.1 Wissenschaftliche Anforderungen

Für ein wissenschaftliches Experiment lassen sich drei Schlüssel-Anforderungen definieren, die von einem Testbed mit geeigneten Mechanismen unterstützt werden müssen [32]:

- Reproduzierbarkeit des Experimentes
- Verständnissförderung des Experimentes
- Korrekte Ausführung des Experimentes

2.1.1 Reproduzierbarkeit von Experimenten

Die Reproduzierbarkeit ermöglicht die Wiederholung von Experimenten, unter gleichen Bedingungen, mit identischem Ablauf und bildet somit die Basis der Entwicklung und Optimierung von Sensor-Netzwerken. Reproduzierbarkeit stellt hohe Anforderungen an die Überwachung und Protokollierung des experimentellen Aufbaus und der Durchführung des Versuchs. Folgende Anforderungen sind dabei von zentraler Bedeutung:

Unterstützung der Experimentspezifikation.

Um einen mehrfachen identischen Versuchsaufbau auf dem Testbed realisieren zu können, muss eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus, z.B. Knotenanzahl, Knotentyp, des Experimentablaufs, der Laufzeit des Experimentes und der Ereignisse, die während des Experimentes simuliert werden sollen in standardisierter Art realisiert werden.

Automatisierte Testbed-Konfiguration.

Damit unvorhergesehene Zustände des Testbeds während des Versuchsaufbaus, z.B. Konfiguration von Sensor-Knoten, Parametern, Diensten und Datenbanken etc., vermieden werden können, muss die Konfiguration des Testbeds automatisiert und überwacht werden, z.B. über Zustandsautomaten.

Archivierung der Experimente.

Damit ein Experiment wiederholt und auf seine korrekte Ausführung überprüft werden kann, z.B. durch Simulation, müssen alle Experimentdaten archiviert werden. Dazu gehören neben der Experimentspezifikation alle während des Experimentes gewonnenen Informationen, einschließlich der Umwelteinflüsse und des Testbedzustands, vor und nach dem Experiment.

Rekonstruktion von Umwelteinflüssen.

Umwelteinflüsse, wie z.B. Licht- oder akustische Verhältnisse, sind in der Regel temporär und einzigartig. Ergebnisse des Experimentes können daher bei jeder Wiederholung differieren und somit eine Analyse der experimentellen Ergebnisse erschweren. Umwelteinflüsse müssen somit quantifiziert, archiviert und entsprechend rekonstruiert werden können.

2.1.2 Verständnis der Experimente

Um das Verständnis von Experimenten zu fördern und Optimierungsansätze, im Hinblick auf den Energieverbrauch, aufzuzeigen, sind überwachte Experimente unter unterschiedlichen Bedingungen, z.B. Sensor-Knoten-Ausstattung, Kommunikationsbeziehungen, Umgebungseinflüssen, Skalierbarkeit, erforderlich. Testbeds müssen daher Mechanismen zur Verfügung stellen, die solche unterschiedliche Bedingungen realisieren und sinnvolle Informationen über das Verhalten des Systems während des Experimentes ermitteln können.

Messungen.

Messungen ermöglichen die Überwachung des Experimentes und die Quantifizierung des Experimentstatus in Zahlen. Für Sensor-Netzwerke sind besonders folgende Messungen von zentraler Bedeutung:

- *Messung des Energieverbrauchs* aller Sensor-Knoten.
- *Messung des Funkverhaltens* aller Sensor-Knoten z.B. zur Analyse von Frequenz-Sprung-Verfahren, Beeinflussung der Kommunikationsreichweite durch Hindernisse (z.B. Bäume).

Neben diesen eher praktischen Messungen sollten weitere Messungen über konkrete Analysen des Sensor-Netzwerkes zur Verfügung gestellt werden. Diese Messungen lassen sich wie folgt klassifizieren:

- Vermessung des Sensor-Knoten-Verhaltens, z.B. CPU-Auslastung, Speicherauslastung.

- Vermessung des Verhaltens von Sensor-Knoten-Gruppen, z.B. Latenz, Datendurchsatz, Aggregationsverhalten.
- Vermessung der gruppenübergreifenden Kommunikation und des Verhaltens des gesamten Sensor-Netzwerkes, z.B. Latenz, Datenaufkommen, Datendurchsatz.

Heterogenität der Umgebung.

Das Verhalten von Sensor-Netzwerken unterscheidet sich entsprechend seiner Einsatzumgebung. Sensor-Netzwerke in Laborumgebungen sind in der Regel Umgebungseinflüssen, wie z.B. Wind, Sonnenlicht, Hitze, Eis, nicht in dem Maße ausgesetzt wie in der freien Natur. Testbeds müssen daher die Vielfältigkeit der unterschiedlichen Umgebungseinflüsse sowohl aus Laborumgebungen (Indoor) als auch der freien Natur (Outdoor) abbilden können.

Mobilität der Sensor-Knoten.

Sensor-Netzwerke bzw. deren Sensor-Knoten unterliegen einer unterschiedlichen Dynamik. Diese Dynamik kann zum einen Bestandteil ihrer Anwendung sein, z.B. Hochseebojen zur Erforschung von Strömungsverhältnissen, oder aber sich unvorhergesehen sporadisch ändern, z.B. Herabfallen der Sensor-Knoten von Bäumen[11]. Zur Analyse solcher dynamischen Zustandsänderungen in Experimenten sollten Testbeds daher sowohl statische als auch mobile Sensor-Knoten zur Verfügung stellen und deren Dynamik zur Reproduktion quantifizierbar machen.

Vielfalt der Ausstattung.

Abhängig vom verwendeten Sensor-Knoten-Typ unterscheidet sich möglicherweise das Verhalten des Sensor-Netzwerkes bei gleicher Anwendung. Messungen auf einer homogenen Sensor-Knoten-Plattform können diese Verhaltensunterschiede nur unzureichend erfassen. Testbeds sollten daher Sensor-Knoten mit geringen Ressourcen ("reduzierte Funktion") als auch mit hohen Ressourcen ("vollständiger Funktion") und möglichst unterschiedlichen Hardware- und Software-Architekturen zur Verfügung stellen.

Vielfalt der Architekturen.

Damit komplexe Experimente und deren integrale Anwendungen sukzessive aufgebaut und verbessert werden können, um dadurch verteilte Zusammenhänge besser zu verstehen. Sollte ein Testbed die Anwendungsentwicklung mit Hilfe verschiedener Abstraktionstufen der Zielnetzwerk-Architektur vereinfachen. Man unterscheidet drei Abstraktionstufen:

- *Flache Architekturen:* bestehen aus homogenen Sensor-Knoten mit identischen Anwendungen und Protokollen.
- *Segmentierte Architekturen:* bestehen aus mehreren, über Gateways gekoppelten, flachen Architekturen.
- *Schichten-, hierarchische Architekturen:* bestehen aus Hierarchien von flachen Architekturen.

Vielfalt der Topologien.

Abhängig von der verwendeten Netzwerk-Topologie kann es in Folge von Sensor-Knoten-Ausfällen aufgrund der Selbstorganisationsmechanismen von Sensor-Netzwerken zu spo-

radischen Topologieänderung kommen. Der Ressourcenverbrauch erhöht sich dabei in der Regel unkalkulierbar. Die Fehleranfälligkeit und der Energieverbrauch von Sensor-Netzwerken sind somit entscheidend von der verwendeten Netzwerk-Topologie abhängig. Ein Testbed sollte daher Experimente mit verschiedenen Sensor-Netzwerk-Topologien ermöglichen.

Skalierbarkeit.

Aufgrund der hohen Anzahl von Sensor-Knoten in Sensor-Netzwerken sollte ein Testbed über eine möglichst hohe Anzahl an Sensor-Knoten verfügen. Um diese Anzahl zusätzlich zu erhöhen, sollten neben physischen auch simulierte und emulierte Sensor-Knoten für Experimente zur Verfügung stehen.

Simulation von Umwelteinflüssen.

Umwelteinflüsse und Energiezustände der Sensor-Knoten bilden eine Vielzahl variabler Parameter, die in die Entwicklung und Optimierung von Sensor-Netzwerken mit einbezogen werden müssen. Abhängig von der Art des Experimentes verringert sich dadurch das Verständnisspotential der experimentellen Resultate. Ein Testbed sollte daher eine zielgerichtete kontrollierte Simulation der Umweltbedingungen, z.B. Verringerung, Erhöhung der Lichtintensität, sowie die Simulation von verschiedenen Sensor-Knoten-Zuständen, z.B. Batterie-, Konstante-Energieversorgung, ermöglichen, um diese Variabilität temporär zu kompensieren.

Auswertung der Experiment-Daten.

Neben den Möglichkeiten das Verständniss der Zusammenhänge und Ergebnisse von Experimenten in Sensor-Netzwerken mit den erwähnten Mechanismen zu unterstützen. Müssen geeignete Werkzeuge zur automatisierten Analyse der ermittelten Experimentdaten zur Verfügung stehen. Ein Testbed sollte daher entsprechende Analyse-Werkzeuge, z.B. Benchmarks, und Schnittstellen zur Verfügung stellen, um zusätzliche Werkzeuge, z.B. von Simulatoren, verwenden zu können.

2.1.3 Korrekte Ausführung von Experimenten

Das beste Verständnis eines Experimentes ist unzureichend, wenn das Experiment inkorrekt realisiert wurde. Um falsche Schlussfolgerungen aus Experimenten zu vermeiden, muss daher von jedem Testbed die korrekte Ausführung von Experimenten sichergestellt werden.

Diagnose des Testbed-Equipments.

Das Testbed-Equipment sollte entweder im Vorfeld von Experimenten oder in periodischen Zyklen unter kontrollierten Bedingungen auf seine korrekte Funktionsweise überprüft werden. Das Testbed sollte folgende Diagnostesttests zur Verfügung stellen:

- Sensor-Knoten-Tests, z.B. Sensor-Test, CPU-Test, Memory-Test, Batterie-Test
- Sensor-Netzwerk Kommunikationstests, z.B. Erreichbarkeit von Sensor-Knoten etc.
- Management-Netzwerk Kommunikations-Tests
- Messinstrumente-Tests

Validierung durch Simulation.

Zur Validierung des korrekten Experimentablaufs sollte das gesamte Experiment ebenfalls in einer parallelen Simulation ausgeführt werden. Die daraus resultierenden Simulationsergebnisse ermöglichen somit eine wahrscheinlichkeitsbehaftete Validierung der Experimentergebnisse. Ein Testbed sollte daher eine Experimentspezifikation verwenden die ebenfalls von einem Simulator interpretiert werden kann und die parallele Simulation unterstützen.

2.2 Ökonomische Anforderungen

Ökonomische Aspekte die beim Entwurf und der Entwicklung eines Testbeds primär beachtet werden müssen, sind vor allem die finanziellen Kosten.

2.2.1 Systemkosten

Sensor-Knoten variieren von der Größe (Formfaktor) einer Schuhkiste bis zur mikroskopischen Größe eines Partikels. Dementsprechend variieren auch die Kosten von einigen bis zu mehreren hundert Euro. Die hohe Skalierbarkeit und nicht die Ressourcenstärke der Sensor-Knoten macht Sensor-Netzwerke einzigartig. Es sollte daher eine möglichst hohe Anzahl an Sensor-Knoten angestrebt werden.

2.2.2 Wartungskosten

Insbesondere bei sehr großen Testbeds, kann der Wartungsaufwand beträchtlich sein, z.B. zur Auswechslung von Batterien. Die Wartung des gesamten Testbeds sollte daher mit geeigneten Mechanismen unterstützt werden, die eine Validierung der Funktionsfähigkeit des Testbed-Equipment ermöglichen und einen regelmäßigen Austausch der Sensor-Knoten-Batterien vermeiden.

3. TEZEUS

Der Testbed-Entwurf TeZeUS basiert auf einer hybriden Testbed-Architektur, die sich aus verschiedenen Testbed-Abschnitten zusammensetzt. TeZeUS unterscheidet einen statischen, einen portablen und einen Testbed-Abschnitt mit mobilen Sensor-Knoten. Jeder Testbed-Abschnitt ist für einen bestimmten Einsatzzweck sowie Einsatzort optimiert und kann aus mehreren Sensor-Knoten-Instanzen bestehen. Diese Sensor-Knoten-Instanzen werden mit Hilfe von emulierten, simulierten oder physischen Sensor-Knoten realisiert. Ein auf dem TeZeUS-Entwurf basierendes Testbed kann somit für die individuellen Nutzeranforderungen maßgeschneidert werden.

Wie Abbildung 1 zeigt, verwendet TeZeUS drei Softwareeinheiten: Emulations-, Simulations- und Managementeinheiten. Um die Komplexität der TeZeUS-Testbeds zu vereinfachen, können sowohl Emulations- als auch Simulations-einheiten mehrfach in einem Testbed-Abschnitt vorhanden sein.

- *Emulierte Sensor-Knoten* imitieren das Verhalten eines Sensor-Knoten in einem Sensor-Netzwerk. Sie verfügen über einen von der Netzwerk bis zur Anwendungsschicht anwendungsspezifisch implementierten Protokollstack. Ausschließlich die physikalische und die Netzwerkschicht werden simuliert oder in hybriden Emulationen auf einem realen Sensor-Knoten ausgeführt. TeZeUS verwendet sowohl simulierte als auch hybride Emulationen.

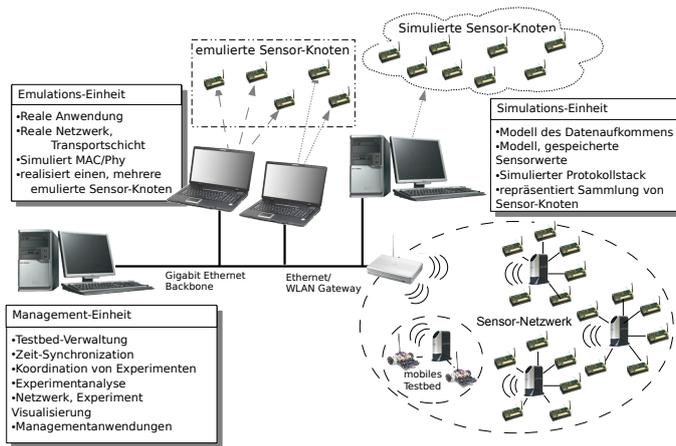


Abbildung 1: TeZeus-Architektur

- *Simulierte Sensor-Knoten* modellieren den gesamten Protokollstack eines Sensor-Knoten. TeZeus verwendet ebenfalls simulierte Sensor-Knoten und unterscheidet zwei verschiedene Arten der Sensordatenerzeugung: die Erzeugung von Sensordaten über Modelle und die Verwendung von gespeicherten Sensordaten.
- Die *Testbed-Abschnitt Management-Einheit* verwaltet den jeweiligen Testbed-Abschnitt und die darin enthaltenen emulierten, simulierten als auch physischen Sensor-Knoten. Sie steuert die Ausführung der Experimente und überwacht das Verhalten des Sensor-Netzwerk im Testbed-Abschnitt. Jede Testbed-Abschnitt Managementeinheit wird zudem über die hierarchische Managementtopologie in TeZeus von einer globalen Managementeinheit verwaltet.
- Die *globale Managementeinheit* koordiniert den Experimentablauf im gesamten Testbed und stellt grafische Nutzerschnittstellen für die Visualisierung der Netzwerkdynamik sowie Veränderung von Parametern zur Verfügung. Sowohl globale als auch Testbed-Abschnitt Managementeinheiten werden in der Regel auf einem System ausgeführt. Ausschließlich bei der Verwendung des portablen Testbed-Abschnitts besteht die Möglichkeit, dessen Managementeinheit auf einem anderen System auszuführen.

Die Verwendung einer hybriden Testbed-Architektur besitzt viele Vorteile.

- Erstens, die Untergliederung der Testbed-Architektur in mehrere äquivalente Teilbereiche ermöglicht die nebenläufige Ausführung von Experimenten und die Erfassung von vielfältigen Umwelteinflüssen in Laborumgebungen sowie unterschiedlichen natürlichen Regionen.
- Zweitens, die Verwendung von emulierten, simulierten und physischen Sensor-Knoten verbessert die Skalierbarkeit des gesamten Testbeds.

- Drittens, die Verwendung von archivierten und modellbasierten Sensordaten ermöglicht realitätsgetreue Simulationen und Emulationen.

3.1 Die TeZeus-Architektur

Die TeZeus-Architektur basiert auf einem leicht modifizierten Deployment-Support-Network (DSN) [23] [21] und besteht aus zwei verschiedenen Arten von Knoten: DSN-Knoten und Sensor-Knoten. Abbildung 2 beschreibt die Hardware-Architektur von TeZeus. Jeder DSN-Knoten verwal-

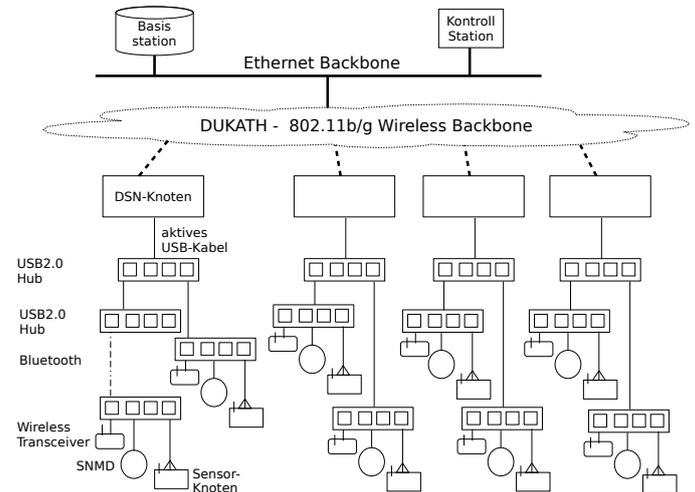


Abbildung 2: Hardware-Architektur des TeZeus-Testbeds

tet eine bestimmte Anzahl von Sensor-Knoten, in Form eines Clusters und kommuniziert drahtlos über ein Funknetzwerk mit einer Basisstation. Diese clusterorientierte, drahtlose Testbedstruktur ermöglicht den einfachen Aufbau von stationären und portablen Testbed-Einheiten. DSN-Knoten und deren assoziierte Sensor-Knoten können dadurch einfach aus der stationären Testbed-Einheit entnommen und als portable Testbed-Einheit verwendet werden.

3.2 Sensor-Knoten

Um den vielfältigen Experimenten in WSN gerecht zu werden und der Entwicklung von Sensor-Netzwerken zu begegnen, verwendet TeZeus sowohl ressourcenschwache als auch ressourcenstarke Sensor-Knoten. Als Vertreter für die ressourcenschwachen Sensor-Knoten ist besonders der MICAz Sensor-Knoten für einen Einsatz im TeZeus prädestiniert, da er gegenwärtig als informeller Standard für ressourcenschwache Sensor-Knoten angesehen werden kann und den Standard IEEE 802.15.4 unterstützt. Die Architektur des MICAz ist mit der Architektur vieler Sensor-Knoten weitestgehend identisch, z.B. BTnode [20], Tmote-Sky [15], Iris [5], MICAz [7], TelosB [13] etc., und unterscheidet sich nur geringfügig in der Sensor- und CPU-Ausstattung. Im Gegensatz zu den ressourcenschwachen Sensor-Knoten existieren gegenwärtig nur einige wenige ressourcenstarke Sensor-Knoten, z.B. Sun-SPOT, die für einen Einsatz im TeZeus geeignet sind. Der TeZeus verwendet daher Sun-SPOTS als Vertreter für ressourcenstarke Sensor-Knoten.

3.2.1 MICAz

Der MICAz [7] Sensor-Knoten besteht aus einem *Prozessor*- und einem *Sensorboard*, die über eine *Batterie* mit Energie versorgt werden. Das Prozessorboard besteht aus einem Atmel Atmega 128 8-Bit Microcontroller mit 64kByte internem RAM, 4 KByte EEPROM und 64 KByte Flash-Speicher sowie 64 KByte externem Flash-Speicher. Insgesamt steht somit ein 128KByte und 512 KByte seriell beschreibbarer Flash-Speicher zur Verfügung. Das Prozessorboard bietet zusätzlich zwei Universal-Asynchronous-Receiver-Transmitter (UART), einen 10-Bit Analog/Digital Converter mit acht Kanälen, mehrere Digitale Ein-,Ausgänge, Inter-Integrated-Circuit- (I^2C) und Serial-Peripheral-Interface (SPI)-Busanschlüsse und 3 LEDs. Die Funkschnittstelle besteht aus einem IEEE 802.15.4 kompatiblen Transceiver, der eine Kommunikation mit maximal 250 kbps im ISM Band auf 2.4 GHz ermöglicht. Die Reichweite beträgt in Gebäuden ca. 20 Meter und auf freiem Feld ca. 100 Meter. Jeder MICAz im TeZeuS ist anstatt seinen AA-Batterien mit einem Lithium-Ionen (LiION) Akku von 750mAh Kapazität ausgestattet. Bei einer minimalen Leistungsaufnahme (CPU-Sleep-Modus) beträgt die theoretische Betriebsdauer somit.

$$\frac{750mAh}{(24h * 15uA)} = 2083Tage(\approx 6Jahre) \quad (1)$$

Zusätzlich ist jeder MICAz mit einer Signalleitung zur Aktivierung von Energiemessungen und einem modifizierten USB-Gatewayboard [6] ausgestattet. Dieses USB-Gatewayboard ermöglicht somit auch bei Batteriebetrieb die Überwachung des MICAz über den USB-Bus. Dieser Sensor-Knoten kann somit sehr einfach im TeZeuS integriert werden. Als Betriebssystem wird das frei verfügbare TinyOS verwendet.

3.2.2 Sun-Spot

Sun-SPOTs (Small Programmable Object Technology) [12] bestehen wie MICAz aus drei Hauptkomponenten. Einem Prozessor-Board mit Funkschnittstelle, einem austauschbaren Sensor-Board und einem LiION Akku mit 750 mAh Kapazität. Das Prozessor-Board besteht aus einem 180 MHz getakteten 32-Bit ARM920T Prozessor, 512 kByte RAM und 4MByte Flash-Speicher sowie einem IEEE 802.15.4 kompatiblen Radiochip mit integrierter Antenne, der eine maximale Datenübertragungsrate von 250 kbps über eine maximale Reichweite von bis zu 80 Meter ermöglicht. Das Sensorboard besteht aus mehreren Dreifarb-LEDs, einem 3-Achsen Beschleunigungssensor (2G oder 6G-Skala), einem Temperatur- und Lichtsensor, sechs analogen Eingängen, fünf beliebig verwendbaren Ein-, Ausgängen sowie vier Ausgangspins für Hochstrom. Zur Interaktion mit einem Host-System ist das Prozessorboard zusätzlich mit einer USB-Schnittstelle ausgestattet. Der integrierte LiIon-Akku ermöglicht bei einer minimalen Leistungsaufnahme einen theoretischen Betrieb von

$$\frac{750mAh}{(24h * 48uA)} = 651Tage(\approx 2Jahre). \quad (2)$$

Als Betriebssystem wird eine spezielle Java Virtual Machine (Squawk) verwendet. Diese VM ermöglicht es Anwendungen für Sensor-Netzwerke in der Programmiersprache Java (Spezifikation CLDC 1.1) zu entwickeln.

3.3 Mobile Sensor-Knoten

Mobile Sensor-Knoten im TeZeuS werden über frei programmierbare ASURO-Roboter [1] realisiert, die mit einem MICAz oder Sun-SPOT Sensor-Knoten ausgestattet sind. Der ASURO-Roboter ist ein multisensorieller Roboter bestehend aus einem Atmel Microcontroller und zwei separat steuerbaren Antriebsrädern. Zusätzlich stehen sechs Kollisionstaster, eine optische Linienverfolgungseinheit, zwei Odometer und einige Anzeigeelemente zur Verfügung. Für die Integration des Roboters in das Testbed und zur Gewährleistung der Kommunikation des Roboters mit dem Testbed ist dieser mit einem Infrarot-Bluetooth-Transceiver ausgestattet. Der Roboter kann somit über Bluetooth gesteuert und bei Bedarf sehr einfach durch einen anderen, ebenfalls über eine Infrarotschnittstelle steuerbaren Roboter ersetzt werden. Der Roboter übermittelt seine Position über einen zusätzlichen GPS-Empfänger an seinen DNS-Knoten und ist über das Testbed mit einer konstanten Energieversorgung verbunden. Diese Energieversorgung besitzt die Form eines Oberleitungssystems, ähnlich dem von Autoscootern, und ermöglicht dadurch die freie Bewegung des Roboters im mobilen Testbed-Abschnitt.

3.4 Sensor Node Management Device

Die optimale Analyse des Energieverhaltens der Sensor-Knoten und somit des Sensor-Netzwerkes erfordert die Vermessung des Energieverbrauches jedes einzelnen Sensor-Knoten. Energiemessgeräte mit der notwendigen Genauigkeit und der Möglichkeit, Spannung und Stromstärke simultan zu vermessen sind gegenwärtig mit sehr hohen Kosten verbunden (ca. 500 Eur). Diese Energiemessgeräte ermöglichen zwar die simultane Vermessung von mehreren Energiequellen und könnten somit theoretisch für die Vermessung mehrerer Sensor-Knoten verwendet werden. Die dafür benötigten Kabel und deren integraler Kabelwiderstand verursachen aber fehlerhafte Messungen. TeZeuS verwendet daher ein speziell für Testbeds entworfenes Sensor-Knoten-Management-Gerät (SNMD), das hoch genaue Energiemessungen für ein Testbed zur Verfügung stellt und ca.80 Euro kostet. Die Funktionen des SNMD lassen sich wie folgt klassifizieren:

- Mehrfach redundante Energiemessungen mit einer Genauigkeit von 10-, 15- und 16-Bit/5Volt
- Simultane Messung von Spannung und Stromstärke
- Realisierung verschiedener Energieversorgungszustände des Sensor-Knoten (Ausfall, Konstante-, Akkuenergie)
- Automatisiertes Aufladen der Sensor-Knoten-Akkus
- kontrolliertes entladen des Akku zur Rekonstruktion von Akkuzuständen
- Diagnose, Funktionsüberprüfung des Sensor-Equipments
- Simulation der Umwelt für Experiment-Wiederholungen

Mit Hilfe dieses Gerätes ist es möglich, das fehleranfällige Verhalten von Sensor-Knoten zu simulieren und reale Sensor-Knotenausfälle durch Experiment-Migration zu kompensieren. Die mehrfach redundante Möglichkeit der Energiemessung gewährleistet zudem die Korrektheit der Energiemessungen. Notwendige Wartungen des Testbeds werden

auf ein Minimum reduziert und erfordern nunmehr ausschließlich einen manuellen Eingriff bei defekten Sensor-Knoten oder Akkus.

3.5 2.4 GHz Wireless Transceiver

Sensor-Netzwerke besitzen im Gegensatz zu kabelgebundenen Netzwerken eine ungeplante Struktur. Die Sendereichweiten der einzelnen Sensor-Knoten können daher beim Entwurf dieser Systeme nicht exakt definiert werden. Abhängig von der Distanz zwischen den Sensor-Knoten steigt bzw. sinkt für die Kommunikation benötigte Energieverbrauch. Die Kommunikation hat somit einen direkten Einfluss auf das Energieverhalten und somit die Lebenszeit des gesamten Sensor-Netzwerkes. Testbeds aber besitzen eine vordefinierte Struktur und verfügen somit über das inherente Problem, dass sie diese Realität nicht genau reflektieren können. Jeder Sensor-Knoten im Testbed besitzt eine bestimmte nicht veränderbare Position mit exakt ermittelbarem Abstand zu den übrigen Sensor-Knoten. Der Energieaufwand für die Kommunikation ist somit in der Regel konstant. Der TeZeUS verwendet daher einen speziellen 2.4 GHz Wireless Transceiver[18], der für den TeZeUS entsprechend adaptiert wird und die Möglichkeit eröffnet verschiedene Distanzen zwischen den Sensor-Knoten zu simulieren sowie die vom Sensor-Knoten abgestrahlte, aufgenommene Energie zu ermitteln.

3.6 Sensor-Knoten und USB-Verkabelung

Jeder "vollausgestattete" Sensor-Knoten verfügt über einen USB-Hub inklusive eines Sensor-Knoten (MICAz, Sun-SPOT), eines SNMD und eines 2.4 GHz Wireless Transceiver. Dieser USB-Hub ist bei statischen Sensor-Knoten über aktive USB-Kabel und bei mobilen Sensor-Knoten über Bluetooth mit einem DSN-Knoten verbunden (siehe Abbildung 2). Die Verwendung von aktiven USB-Kabeln besitzt den inheranten Vorteil, dass die Distanz zwischen Sensor-Knoten und DSN-Knoten nicht wie bei passiven USB-Kabeln auf eine maximale Länge von 5 Meter beschränkt ist. Der Abstand zwischen Sensor-Knoten und DSN-Knoten kann somit auf mehr als 5 Meter vergrößert werden. Aktive USB-Kabel werden in TeZeUS über USB-Hubs realisiert. Neben der Kommunikationsmöglichkeit erhält jeder Sensor-Knoten über seinen DSN-Knoten und seine USB-Bus Geräte-ID einen eindeutigen Identifikator innerhalb von TeZeUS und kann somit direkt adressiert werden.

3.7 Der DSN-Knoten

Jeder DSN-Knoten des Management-Backbone wird über einen Linksys Network Storage Link für USB 2.0 (NSLU2) [9] realisiert, der mit einer konstanten Energieversorgung, einer USB-WLAN Karte (802.11 b/g) sowie 1 GB USB-Speicher ausgestattet ist. Die NSLU2 basiert auf einem 266 MHz getakteten Intel 32-bit ARM-Prozessor mit 32 MB RAM, 8 MByte Flash-Speicher und realisiert mit Hilfe des freien Betriebssystems Linux Debian (Etch Release) die Form eines drahtlosen Mikroserver. Neben einem Ethernet RJ-45 Anschluss verfügt dieses Gerät über zwei USB 2.0 Anschlüsse, über die maximal 127 USB-Geräte angeschlossen werden können. Jeder DSN-Knoten kann somit 125 zusätzliche USB-Geräte oder 23 vollausgestattete Sensor-Knoten über USB-Hubs verwalten. Zusätzlich wurde dieses Gerät mit einer seriellen Schnittstelle [10] (RS232) ausgestattet, um dessen Verwaltung über eine serielle Konsole zu vereinfachen.

3.8 Das Testbed Management-Backbone

Das TeZeUS Testbed-Management-Backbone besteht aus zwei unterschiedlichen Teilnetzwerken, einem drahtlosen (WLAN) und einem kabelgebundenen Ethernet-Netzwerk. Das IEEE 802.11b/g konforme drahtlose Netzwerk, z.B. DUKATH-Netz, verbindet die DSN-Knoten über verschiedene WLAN/Ethernet Gateways, z.B. Access-Points, WLAN-Router, mit dem kabelgebundenen Netzwerk. Jedem DSN-Knoten wird dabei über einen DHCP-Server seine IP-Adresse zugewiesen, mit der er über das drahtgebundene Ethernet der Basisstation kommuniziert. Neben der Basisstation und den DSN-Knoten werden zusätzlich verschiedene Simulations- und Emulationssysteme sowie eine Kontrolleinheit verwendet.

3.9 Basisstation

Um Experimente spezifizieren, analysieren zu können und deren Ausführung sowohl zeitlich als auch räumlich koordinieren zu können, verwendet TeZeUS eine Basis- oder Managementstation. Diese Einheit bildet das Herz des Testbeds und kontrolliert die Ausführung der Experimente sowie die Funktion des Testbeds. Das Kernstück der Basisstation bildet der DSN-Server des JAWS-Testbeds[22], der für den TeZeUS mit entsprechenden Anpassungen versehen wird. Dieser DSN-Server führt die Testbed-Datenbank aus und ermöglicht eine persistente Speicherung der Experimentdaten, die von den DSN-Knoten an die Basisstation übertragen werden. Diese Experimentdaten können daraufhin von verschiedenen Managementanwendungen über eine XML-RPC Schnittstelle verwendet werden. Hardware und Software-Ressourcen der Basisstation sind dementsprechend dimensioniert, um die Hochverfügbarkeit des Testbeds zu garantieren. Als Betriebssystem wird daher ebenfalls Linux, eine Standard Ubuntu Installation, verwendet.

3.10 Kontrolleinheit

Um eine Überlastung der Basisstation durch Ausführung von Management-Anwendungen zu vermeiden, ist der TeZeUS mit einer zusätzlichen Kontrolleinheit ausgestattet. Diese Kontrolleinheit erhält über die XML-RPC Schnittstelle der Basisstation direkten Zugriff auf deren Dienste und die Datenbasis der Experimente, um damit verschiedene Management-Anwendungen auszuführen und bei Bedarf die Basisstation entsprechend zu steuern.

3.11 Systeme für Simulation, Emulation

Um die Skalierbarkeit im TeZeUS zu erhöhen, können neben physischen Sensor-Knoten zusätzlich simulierte und emulierte Sensor-Knoten verwendet werden. Der TeZeUS verfügt dafür über entsprechend ausgestattete IT-Systeme, die sowohl simulierte als auch emulierte Sensor-Knoten ausführen können. Diese IT-Systeme sind nicht primär für Simulationen, Emulationen von Sensor-Knoten im TeZeUS gedacht, sondern können bei Bedarf anderweitig verwendet werden. Der TeZeUS verwendet dafür spezielle virtuelle DSN-Knoten, die dynamisch entsprechend den verfügbaren Ressourcen die Anzahl der simulierten, emulierten Sensor-Knoten variieren und ausführen können. Wie die Basisstation verwenden auch die Simulations- und Emulations IT-Systeme eine Standard Ubuntu Linux Installation.

4. ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN

Die Entwicklung des TeZeus befindet sich gegenwärtig in der prototypischen Phase zur Erprobung des vorgestellten Testbed-Ansatzes. Zukünftige Arbeiten im TeZeus Kontext befassen sich mit dem Aufbau des statischen und des portablen Testbed-Abschnitts sowie der Realisierung des Testbed-Managements mit Hilfe des DSN-Server.

5. REFERENZEN

- [1] Asuro roboter website. <http://www.asurowiki.de/>.
- [2] Berkeley omega testbed website. <http://omega.cs.berkeley.edu/>.
- [3] Berkeley smote testbed website. <http://www.millennium.berkeley.edu/sensornets/>.
- [4] Emulab - mobile wireless networking website. <http://www.emulab.net/tutorial/mobilewireless.php3>.
- [5] Iris sensor-node website. <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=264>.
- [6] Mib520-usb gateway website. <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=227>.
- [7] Micaz website. <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=156>.
- [8] Mit mistlab testbed website. <http://mistlab.csail.mit.edu/>.
- [9] Network storage link unit for usb 2.0 website. <http://www.linksys.com/>.
- [10] Serial interface for nslu2 website. <http://www.nslu2-linux.org/wiki/HowTo/AddASerialPort>.
- [11] Sonoma redwood forrest. http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2003/07/28_redwood.shtml.
- [12] Sun-spot sensor-node website. <http://www.sunspotworld.com>.
- [13] The telows b sensor-node website. <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=252>.
- [14] the motelab testbed website. <http://motelab.eecs.harvard.edu/>.
- [15] Tmote-sky website. <http://www.moteiv.com/>.
- [16] The wireless ad-hoc sensor and actuator nets lab website. <http://wasal.epfl.ch/>.
- [17] Environmental studies with the sensor web: Principles and practice. pages 103–117. *Sensors*, vol. 5, 2005.
- [18] S. Armitage. Low-cost 2.4-ghz spectrum analyzer, April 2006.
- [19] A. Arora, E. Ertin, R. Ramnath, M. Nesterenko, and W. Leal. Kansei: A high-fidelity sensing testbed. volume 10, pages 35–47, Piscataway, NJ, USA, 2006. IEEE Educational Activities Department.
- [20] J. Beutel. Fast-prototyping using the btnode platform. <http://btnode.ethz.ch>, March 2006.
- [21] J. Beutel, M. Dyer, L. Meier, M. Ringwald, and L. Thiele. Next-generation deployment support for sensor networks. In *TIK-Report No: 207*, Computer Engineering and Networks Lab Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich 8092 Zurich, Switzerland, Jul.
- [22] J. Beutel, C. Zimmermann, and L. Thiele. Online sensor-network monitoring. Jul 2005.
- [23] M. Dyer, J. Beutel, L. Thiele, T. Kalt, P. Oehen, K. Martin, and P. Blum. Deployment support network - a toolkit for the development of wsns. In *Proceedings of the 4th European Conference on Wireless Sensor Networks*, pages 195–211. Springer, Berlin, Jan. 2007.
- [24] J. Elson, S. Bien, N. Busek, V. Bychkovskiy, A. Cerpa, D. Ganesan, L. Girod, B. Greenstein, T. Schoellhammer, T. Stathopoulos, and D. Estrin. EmStar: An Environment for Developing Wireless Embedded Systems Software. Technical Report CENS Technical Report 0009, Center for Embedded Networked Sensing, University of California, Los Angeles, March 2003.
- [25] E. Ertin, A. Arora, R. Ramnath, V. Naik, S. Bapat, V. Kulathumani, M. Sridharan, H. Zhang, H. Cao, and M. Nesterenko. Kansei: a testbed for sensing at scale. In *IPSN '06: Proceedings of the fifth international conference on Information processing in sensor networks*, pages 399–406, New York, NY, USA, 2006. ACM Press.
- [26] W. A. Geoff, P. Swieskowski, and M. Welsh. Motelab: A wireless sensor network testbed. Technical report, Harvard University, April 2005.
- [27] L. Girod, J. Elson, A. Cerpa, T. Stathopoulos, N. Ramanathan, and D. Estrin. Emstar: a software environment for developing and deploying wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2004 USENIX Technical Conference*, Boston, MA, 2004. USENIX.
- [28] H. Handziski, A. Köpke, A. Willig, and A. Wolisz. Twist: A scalable and reconfigurable wireless sensor network testbed for indoor deployments. Technical Report TKN-05-008, Telecommunication Networks Group, Technische Universität Berlin, Nov. 2005.
- [29] D. Hobi, L. Winterhalter, and L. Thiele. Large-scale bluetooth sensor-network demonstrator. october 2005.
- [30] D. Johnson, T. Stack, R. Fish, D. Flickinger, R. Ricci, and J. Lepreau. Truemobile: A mobile robotic wireless and sensor network testbed. In *Flux Technical Note FTN-2005-02*, University of Utah, April 2005.
- [31] D. Johnson, T. Stack, R. Fish, D. Flickinger, L. Stoller, R. Ricci, and J. Lepreau. Mobile emulab: A robotic wireless and sensor network testbed. In *Proceedings of INFOCOM*. IEEE, Apr. 2006.
- [32] W. Kiess, S. Zalewski, A. Tarp, and M. Mauve. Thoughts on mobile ad-hoc network testbeds. In *Proceedings of IEEE ICPS Workshop on Multi-hop Ad hoc Networks: from theory to reality*, pages 93–100, Santorini, Greece, Jul 2005.
- [33] N. Xu, S. Rangwala, K. K. Chintalapudi, D. Ganesan, A. Broad, R. Govindan, and E. Estrin. A wireless sensor network for structural monitoring. In *SenSys '04: Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 13–24, New York, NY, USA, 2004. ACM Press.