

Lokalisierung in Ad Hoc Geosensornetzwerken mittels geodätischer Ausgleichstechnik

Zusammenfassung

Große Mengen von preiswerten und einfach auszubringenden Sensoren, die sich selbst organisieren, drahtlos miteinander kommunizieren, Messungen durchführen und auswerten können, ermöglichen eine großflächige Beobachtung städtischer Gebiete und unzugänglicher Terrains. Eine der wichtigsten Aufgaben für eine raumbezogene Auswertung ist bei der gegebenen zufälligen Ausbringung der Sensoren die Bestimmung der Position jedes einzelnen Sensors. Ungenaue Eingangsgrößen wie z.B. Distanzmessungen und die sehr eingeschränkten und begrenzten Energie- und Rechenressourcen eines jeden Knotens sowie die hoch miniaturisierte Hardware und geringe Batteriekapazität erfordern die Entwicklung robuster, energieeffizienter und präziser Lokalisierungsalgorithmen. Diese Arbeit gibt einen Überblick über aktuelle Forschungen auf dem Gebiet der Lokalisierung in Geosensornetzwerken und beschreibt Methoden zur Standortbestimmung von Sensorknoten. Der im Rahmen des DFG-Projektes GeoSens entwickelte Lokalisierungsalgorithmus auf Basis geodätischer Ausgleichungsansätze steht im Vordergrund des Beitrags. Dieser reduziert den Berechnungsaufwand und den Energieverbrauch auf den Sensorknoten deutlich bei gleichzeitig signifikanter Erhöhung der Positionierungsgenauigkeit.

Abstract

Large amounts of cheap and easily deployable wireless sensors enable area-wide monitoring of both urban environments and inhospitable terrain. Due to the random deployment of these sensor nodes, one of the key issues is their position determination. Noisy distance measurements and the highly limited resources of every sensor node, due to tiny hardware and small battery capacity, demand the development of robust, energy aware, and precise localization algorithms. This paper presents an overview of current research in the field of localization in geosensor networks and describes methods for the positioning of sensor nodes. A fine-grained positioning algorithm developed as part of the GeoSens project is the main focus of this work. This algorithm uses a least squares adjustment approach which significantly reduces the computational and energy requirements of the sensor nodes while simultaneously giving a considerable increasing in accuracy.

günstigen Geräten (Sensorknoten) bestehen, die ihre Umgebung überwachen, einfache Rechenschritte ausführen und miteinander kommunizieren können (Abbildung 1). Bei den ermittelten Informationen kann es sich z.B. um Temperatur, Luft- oder Bodenfeuchte handeln. Diese Messwerte werden dann über die direkten Nachbarn zu einer Datensinke (z.B. einem leistungsfähigen Rechner) gesendet, auf der die Daten ausgewertet werden (Akyildiz et al., 2002). Das Sensornetzwerk konfiguriert sich unmittelbar nach Ausbringung der Knoten selbst. Jeder einzelne Knoten ist in der Lage, bei Bedarf angestoßen zu werden und solange zu arbeiten, wie seine Energiequelle ausreicht. Mittels Methoden wie Selbstheilung und Selbstorganisation reagiert das Netzwerk auf Knotenausfälle und Störungen. Als skalierbares und verteiltes System erlauben Geosensornetzwerke die automatisierte und großräumige Erfassung von Umweltphänomenen in unterschiedlichsten Umgebungen, z.B. auch schwer zugänglichen Regionen und bei sich bewegenden Objekten. Derartige Geosensornetzwerke sind zukünftig als automatisierte Datengewinnungsmethoden für verschiedenste GIS-Anwendungsfelder sehr interessant. Sie ermöglichen z.B. das rechtzeitige Detektieren von Waldbränden, die Überwachung von abrutschungsgefährdeten Hanglagen und die Datengewinnung für die Teilflächenbewirtschaftung ('Precision Farming'). In allen diesen Anwendungsgebieten werden umfangreiche Daten gewonnen und mit aufwändigen Auswertalgorithmen analysiert. Dafür sind akkurate Positionsinformationen nötig.

Durch ihre geringen geometrischen Ausmaße von nur einigen Kubikmillimetern sind die Sensorknoten aber in Hinblick auf Prozessorleistung, Speichergröße und Energiereserven stark begrenzt. Die knappste Ressource in einem Sensornetzwerk ist die verfügbare Energie (Min et al., 2001). Um eine lange Laufzeit des Netzwerkes zu ermöglichen, ist es erforderlich,

AUTOREN

A. Born^a, F. Reichenbach^b, R. Bill^a, D. Timmermann^b

Universität Rostock

^aProfessur für Geodäsie und Geoinformatik - (alexander.born,ralf.bill)@uni-rostock.de

^bInstitut für Angewandte Mikroelektronik

und Datentechnik - (frank.reichenbach,dirk.timmermann)@uni-rostock.de

1 Einführung

1.1 Drahtlose Geosensornetzwerke

Drahtlose ad hoc Geosensornetzwerke (GSN) werden zukünftig aus bis zu zehntausenden winzigen, elektronischen, kosten-

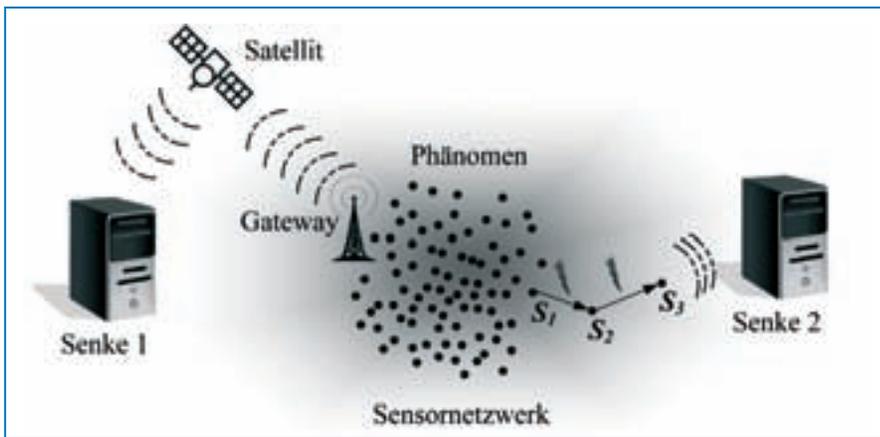


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Sensornetzwerkes

sowohl energiesparsame Hardware als auch energieoptimierte Algorithmen einzusetzen. Diese Eigenschaften unterscheiden die hier behandelten Geosensornetzwerke auch von in breiter Anwendung befindlichen fest etablierten Infrastrukturnetzwerken, bei denen i.d.R. Energie, Rechenleistung und Größe des einzelnen Sensors nur geringen Einschränkungen unterliegen.

1.2 Problemstellung

Nachdem das Geosensornetzwerk über dem Gebiet von Interesse ausgebracht wurde, verfügen die Sensorknoten noch über keinerlei Positionsinformationen. Allerdings sind aus Sensormessungen gewonnene Informationen nur sinnvoll, wenn ihre räumliche Position bekannt ist. Eine mögliche Technologie zur direkten Positionsbestimmung eines Sensorknotens ist das Global Positioning System (GPS), zukünftig ergänzt um das europäische System Galileo oder vergleichbare Systeme (Bill et al., 2004), (Gibson, 1996), (Alouini, 1996). Weitere Möglichkeiten der Positionsbestimmung sind auch heute schon in Mobilfunknetzen wie dem GSM-Netz (Global System for Mobile Communications) zur mobilen Kommunikation oder in drahtlosen Rechnernetzen (Wireless Local Area Network, WLAN) gegeben. Im Hinblick auf die miniaturisierte Größe der Knoten ist die Anwendung derartiger Positionierungsmethoden allerdings wenig sinnvoll und nur auf einigen wenigen Punkten im Geosensornetzwerk denkbar. Auch der relativ hohe Preis dieser Systeme, deren zusätzlicher Energie- und Platzbedarf sowie die z.B. bei GPS in bestimmten Bereichen (in Gebäuden oder unter Bäumen) nicht sichergestellte Verfügbarkeit machen diese Methoden für den Einsatz auf allen Knoten wenig attraktiv. Es ist zwar davon

auszugehen, dass die geometrische Größe und der Preis der jeweiligen Chips in Zukunft geringer werden, allerdings unterliegen Antennen festen geometrischen Mindestmaßen. Da der Sensorknoten bereits eine Kommunikationseinheit besitzt, wäre eine zweite Antenne z.B. für GPS nicht wünschenswert.

Die übliche Methodik besteht nun darin, einige wenige, energie- und rechenstärkere Knoten mit solchen existierenden Positionierungssystemen auszurüsten. Diese Knoten werden im Folgenden als Beacons bezeichnet. Nachdem diese Beacons ihre Position ermittelt haben, bestimmen die restlichen Knoten ihre Position, z.B. durch Streckenmessungen, eigenständig. Abbildung 2 zeigt eine Beispielkonstellation zur Bestimmung der Position eines Sensorknotens mittels Distanzmessungen zu fünf benachbarten Beacons.

Informationen zu den Positionen der Sensorknoten sind aus folgenden Gründen erforderlich:

- Ermittelte Messungen ohne Positionsinformation sind bei räumlichen Phänomenen i.d.R. wenig aussagekräftig.

- Bekannte Positionen ermöglichen ein energieeffizientes geografisches Routing.
- Selbstkonfiguration und Selbstheilung sind Schlüsselmechanismen für die Robustheit und können einfacher mittels Positionsinformation realisiert werden.
- Die Administration eines Sensornetzwerkes, bestehend aus bis zu zehntausenden Sensorknoten, erfolgt durch gezieltes Ansteuern geografisch abhängiger Gruppen von Sensorknoten.
- Hindernisse in Sensornetzwerken können ohne Mehraufwand detektiert werden.
- In vielen Anwendungen ist die Position an sich von Interesse.

In diesem Beitrag werden Lokalisierungsalgorithmen aufgeführt und klassifiziert sowie eine neue, hochgenaue Methode vorgestellt, durch deren Anwendung der Energie-, Kommunikations- und Speicherbedarf signifikant reduziert werden kann. Außerdem wird eine erhebliche Genauigkeitssteigerung im Vergleich zu den approximativen Methoden erreicht.

2 Anforderungen an drahtlose Ad Hoc Geosensornetzwerke

Drahtlose Sensornetzwerke stellen sehr hohe Anforderungen an die eingesetzte Hard- und Software. Einige Einsatz- und Ausbringungsarten (z.B. Ausstreuen per Flugzeug) erfordern neben Robustheit eine sehr hohe Knotendichte und damit eine hohe Anzahl von Sensorknoten. Auch ist die Wahrscheinlichkeit von Knotenausfällen (z.B. durch Hindernisse wie Bewuchs, Abdriften durch Wind etc.) bei solchen Ausbringungsprozessen erhöht. Zudem sollte die Hardware die Umwelt möglichst nicht belasten, also ökologisch verträglich sein. Im Idealfall sind sie ubiquitär, also nicht direkt wahrnehmbar.

Ein weiterer Aspekt bezieht sich auf ▶

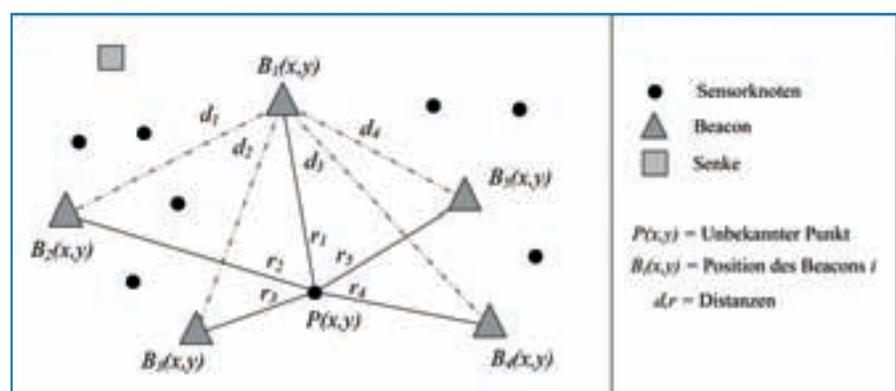


Abbildung 2: Lokalisierung eines Sensorknotens mit fünf Beacons

die Wirtschaftlichkeit der Sensorknoten. Sie müssen sehr preiswert sein, um zu tausenden oder sogar zehntausenden ausgebracht werden zu können. Weiterhin sollen sie sehr klein sein, also Seitenlängen von nur wenigen Millimetern besitzen, um Anforderungen wie unbeeinflusste Messungen oder weitestgehende Umweltverträglichkeit zu gewährleisten. Dazu werden miniaturisierte Sensorknoten entwickelt, die über energie-sparende Rechen-, Kommunikationseinheiten und Messsensoren verfügen. Weiterhin könnten, solange keine biologisch abbaubaren Sensorkomponenten entwickelt wurden, diese nach deren Einsatz mit Hilfe der bekannten Position wieder entfernt werden.

Ein weiteres Problem bei der Entwicklung miniaturisierter Sensorknoten ist die Gewährleistung der Energieversorgung über längere Zeit. In Kapitel 2.2 werden Probleme und Möglichkeiten zu deren Lösung diskutiert. Eine allgemeine Einführung in Sensornetze geben (Stefanidis und Nittel, 2004).

2.1 Anforderungen

Im Folgenden sind die Anforderungen an Sensornetze aufgelistet:

- Durch Methoden zur Selbstkonfiguration passt sich das Netzwerk nach der Ausbringung automatisch an die Umgebung an, initialisiert Parameter wie die optimale Kommunikationsreichweite oder ermittelt alle Nachbarknoten eines Sensorknotens.
- Falls Knoten ausfallen oder neue Knoten hinzugefügt werden, sorgt Selbstheilung für eine überganglose Anpassung des Netzwerkes an die neue Topologie.
- Komplexere Aufgaben werden durch aktive Kooperation zwischen benachbarten Knoten gelöst.
- Der hohe Datenverkehr muss aufgrund vieler Knoten im Netzwerk rechtzeitig durch Redundanzvermeidung minimiert werden, damit nur die relevanten Daten die Senke erreichen. Dies ist beispielsweise durch Datenaggregation auf einem geographisch zentralen Knoten (Clusterhead) durchführbar.
- Die frühzeitige Bestimmung von Knotenpositionen ermöglicht kürzeste Datenwege und Hinderniserkennung. Dies kann durch Lokalisierungsmethoden erreicht werden (Reichenbach et al., 2005a).
- Da die Knoten gegenüber den Netzwerkdimensionen nur sehr geringe Kommunikationsreichweiten besitzen, müssen Informationen von Knoten zu Knoten durch

Tabelle 1:

Typische Sensorknoten-Aktivitäten und deren Energieverbrauch

Aktivität	Energieverbrauch [mJ]
Temperaturmessung (1 Messung)	0,001
Kommunikation mittels Bluetooth (64 Bit werden gesendet)	0,032
Rechenoperation (1000 Operationen)	0,0018

Multihopping weitergeleitet werden. Es gibt zahlreiche Routing-Methoden, um den optimalen Weg vom Quell- zum Zielknoten zu finden (Salzmann et al., 2007), (Handy, 2006).

- Um sensible Daten vor Dritten zu schützen, müssen Methoden zur Gewährleistung der Sicherheit integriert werden.
- Eine effiziente Aufgabenverteilung im Netzwerk führt zu Energieeinsparungen. Vor allem in Netzwerken mit unterschiedlichen Knotenarten müssen die leistungsfähigeren Sensorknoten sinnvoll die ressourcenlimitierten entlasten (Reichenbach et al., 2006a).

2.2 Sensoren und ihr Energieverbrauch

Für den Einsatz auf Knoten sind einige Sensoren denkbar. Dabei muss unterschieden werden, ob es sich bei diesen um aktive oder passive handelt. Aktive (Radar, Sonar) senden Signale und bestimmen z.B. Hindernisse, Geschwindigkeiten etc. durch Laufzeitmessung der reflektierten Signale. Allerdings benötigt diese Klasse von Sensoren mehr Energie zum Aussenden dieser Signale und ist für die Verwendung auf drahtlosen, miniaturisierten Sensorknoten ungeeignet. Besser ist der Einsatz von passiven Sensoren. Diese messen physikalische Parameter wie z.B. seismische Aktivitäten, Beschleunigungen, Lichtintensität, Feuchtigkeit, Temperatur, chemische Parameter (pH-Wert, chemische Elemente).

Auch bei der Herstellung wird ein besonderes Augenmerk auf die Entwicklung immer kleiner werdender, stromsparender und kostengünstiger Sensoren gelegt, was die Implementation auf drahtlosen, miniaturisierten Sensorknoten erheblich begünstigt. Die Größe eines Sensorknotens ist so gering wie möglich zu halten. Diese Forderung ist jedoch für Energiespeicher sehr schwer zu erfüllen. Das folgende Beispiel soll dieses Problem verdeutlichen. Die Sensorknotenplattform MICA wiegt ohne Batterien 18g. Als Energieversorgung dienen zwei

herkömmliche Mignonzellen mit einem Gesamtgewicht von 54g. Damit verursachen die Batterien etwa 75% des Gesamtgewichtes des Knotens und machen zudem einen großen Anteil seiner Abmessungen aus (Landsiedel et al., 2005).

Demgegenüber stehen die Verbräuche für drei beispielhaft ausgesuchte Aktivitäten in Tabelle 1. Für eine 0,05g Li-Ion-Polymer-Batterie mit einem Energievorrat von 27J ergibt sich damit bei einer Periode von 1s für die drei Aktivitäten Messen, Kommunizieren, Rechnen eine Laufzeit von neun Tagen.

Üblicherweise sind in Geosensornetzen die Energieverbräuche in Kommunikation- und Berechnungskomponenten unterteilt. Dabei wird für die Kommunikation mehr Energie verbraucht als für die Berechnung. Z.B. benötigt ein handelsüblicher Prozessor, der 100 Millionen Befehle pro Sekunde abarbeitet, die gleiche Energie zum Senden von 1kB über 100m wie zur Durchführung einer Berechnung im Intervall von 3s. Eine Optimierung des Energieverbrauchs setzt das Wissen über die Verbräuche der einzelnen Teilkomponenten voraus und erfordert Optimierungen sowohl auf Knoten- als auch auf Netzwerkebene. Beispielsweise macht es aus Knotensicht durchaus Sinn, ein Paket an den dichtesten Nachbarn zu schicken. Allerdings könnte das aus Netzwerksicht dem Prinzip der Kürzesten-Weg-Strategie widersprechen.

2.3 Beobachtungsgrößen für die Positionsbestimmung

Für die Positionsbestimmung sind i.d.R. Distanzen bzw. Winkel zwischen den zu lokalisierenden Knoten erforderlich. Da diese praktisch nie direkt vorliegen, aber die Genauigkeit der Lokalisierung maßgeblich beeinflussen, sollen im Folgenden nur kurz ausgewählte Verfahren zur Distanzmessung vorgestellt werden, weitere Beispiele finden sich in (Bill et al., 2004).

Obwohl es erste Ansätze zur Winkel-

messung mit einer oder mehreren Richtantennen auf den Knoten gibt, ist bisher der Einsatz zusätzlicher Hardware unvermeidbar. Außerdem wird die Bestimmung des Winkels durch Rauschen und/oder Mehrwegausbreitung erschwert. Ein interessanter Prototyp ist der Medusaknoten (<http://nesl.ee.ucla.edu/projects/ahlos/>), der mit mehreren Antennen ausgestattet ist.

Die folgenden Abschnitte diskutieren einige Distanzmessverfahren und deren Potential zur Anwendung in Gesensornetzwerken. Alle Distanzmessverfahren beruhen in der Regel auf der Messung des Signalcharakters, z.B. die Signalempfangsleistung (Received Signal Strength - RSS), der Signallaufzeit (Time of Arrival - ToA, Time Difference of Arrival - TDoA, Round Trip Time - RTT) oder der Zählung der Anzahl der "Sprünge" von Knoten zu Beacon (Hop-basierte Verfahren).

Die Signale unterliegen auf ihrem Weg zwischen Sender und Empfänger den verschiedensten Einflüssen. Dadurch bedingt sind Fehler in den Distanzmessungen unvermeidbar. Vor allem sind folgende Fehlerquellen zu finden:

- Physikalische Effekte der Radiowellen an Hindernissen, wie z.B. Reflexionen, verursachen Mehrwegausbreitung.
- Interferenzen, verursacht durch elektrische Störfelder.
- Fehlender Sichtkontakt zwischen Knoten, verursacht durch das Signal abschirmende Objekte oder zu geringe Kommunikationsreichweiten.
- Parameterschwankungen der Umgebung, wie z. B. Temperatur oder Feuchtigkeit.
- Spannungsschwankungen der Batterie.
- Mobilität der Knoten.

2.3.1 Signalempfangsstärkemessung

Alle Sensorknoten in einem Sensornetzwerk besitzen eine Kommunikationseinheit, um die gesammelten Daten senden oder einfach nur um mit den anderen Knoten kommunizieren zu können. Diese Einheit kann nun benutzt werden, um über den Signalcharakter auf eine Distanz schließen zu können. Die Messung der Sendeempfangsleistung ist das am meisten verbreitete Verfahren. Der große Vorteil dieses Verfahrens ist dabei in der Tatsache begründet, dass keine zusätzliche Hardware auf den Knoten verbaut werden muss. Die Empfangsleistung wird einfach mit gemessen. Als nachteilig haben sich die relativ hohen Ungenauigkeiten bei den Distanzschätzungen ergeben.

In der Kommunikationseinheit wird die Empfangsleistung in einen Signalempfangsstärkewert (Received Signal Strength Indicator - RSSI) umgewandelt. Über diesen RSS-Indikator wird dann im Idealfall eine Distanz errechnet (Abbildung 3).

Allerdings ist in der Realität ein abweichender Verlauf der RSSI-Kurve zu verzeichnen (Abbildung 4). Diese Unterschiede sind vor allem auf unterschiedliche Hardwareeigenschaften, auf die Ausrichtung der Module und auf Reflexionen an Objekten bzw. Wänden zurückzuführen. Hinsichtlich der Zuordnung einer Distanz zu einem RSSI-Wert führen Ausreißer zu ungewollten Mehrdeutigkeiten. Die Ergebnisse werden detailliert in (Reichenbach und Timmermann, 2006) diskutiert. Die Verwendung des RSS-Indikators zur Distanzbestimmung für exakte Lokalisierungsmethoden ist nur eingeschränkt möglich.

2.3.2 Zeitmessungen

Time of Arrival Weitere Verfahren zur Distanzbestimmung messen die Laufzeit der Signale von Sender zu Empfänger. Dieses Verfahren wird als *Time of Arrival - ToA* bezeichnet und ist bereits erfolgreich beim Global Positioning System im Einsatz. Hierbei bestimmt der Sensorknoten die Zeitspanne Δt , in der das Signal die gesuchte Strecke durchlaufen hat. Mit dieser Zeitdifferenz und der Signalausbreitungsgeschwindigkeit c ergibt sich für die Distanz:

$$d = v \cdot \Delta t \text{ mit } v = c \quad (1)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit für elektromagnetische Wellen ist jedoch sehr hoch. Somit haben kleine Fehler in der Zeitmessung große Auswirkungen auf die Genauigkeit der Streckenberechnung.

So würde sich bei einer Abweichung von 1ns ein Distanzfehler von 0,3m ergeben. Im Falle von GPS sind die Satelliten mit sehr teuren Atomuhren ausgerüstet, die eine sehr hohe Genauigkeit besitzen (Abweichung von einer Milliardstel Sekunde pro Monat). Außerdem ist die Entfernung Satellit - Empfänger so groß, dass die Signale 1/15s zur Erde benötigen. Die Knoten in einem Gesensornetzwerk haben dem gegenüber allerdings einen minimalen Abstand von nur einigen Zentimetern bis Metern. Außerdem widerspricht der Einsatz dieser extrem teuren und schweren Uhren dem Prinzip der Kostenersparnis und der Miniaturisierung. **Time Difference of Arrival** Bei dem so genannten Time Difference of Arrival-Verfahren (*TDoA*) werden zwei Signale mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten verwendet (z.B. Radio- und Schallwellen). Die Messung erfolgt, indem beide Signale zur selben Zeit ausgesendet werden. Aufgrund der großen Laufzeitdifferenz der beiden ▶

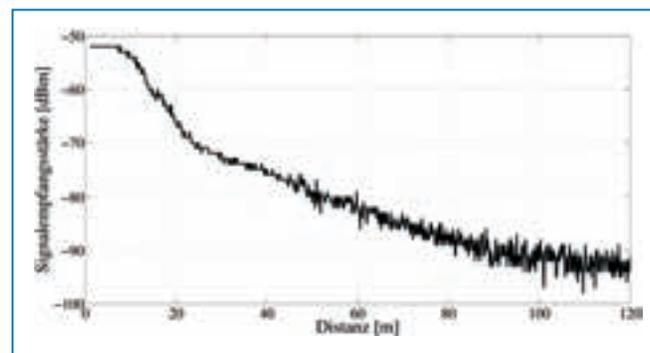


Abbildung 3: RSSI-Verfahren: Distanzbestimmung über Bestimmung des RSS-Indikators im Idealfall

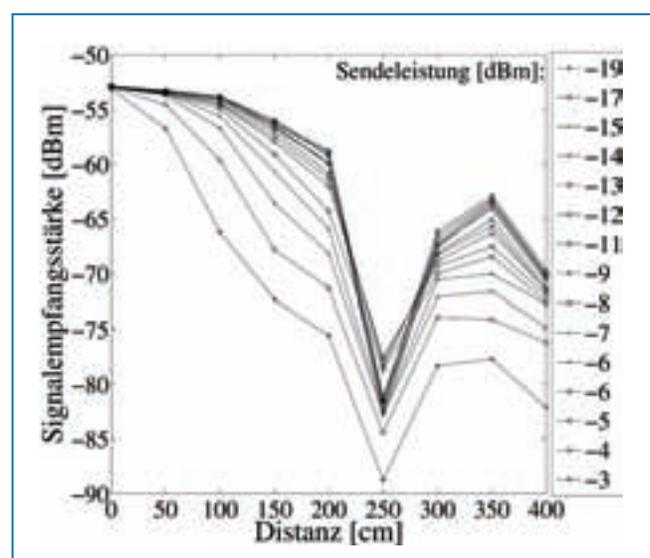


Abbildung 4: RSSI-Verfahren: Distanzbestimmung über Bestimmung des RSS-Indikators in der Realität (Reichenbach und Timmermann, 2006)

Signale verwendet der Empfänger den Empfangszeitpunkt der Radiowelle als Startzeit t_1 und den Empfangszeitpunkt der Schallwelle als Stoppzeit t_2 . Durch Anwenden der Formel (1) mit $\Delta t = t_2 - t_1$ und v als Schallgeschwindigkeit erhält man eine absolute Distanz. Ein Problem bei der Benutzung von Schallwellen ist die hohe Empfindlichkeit gegenüber äußeren Störeinflüssen und ein weiterer Nachteil ist der notwendige Einsatz zusätzlicher Hardware.

Round Trip Time Ein in der Netzwerktechnik häufig benutztes Verfahren ist die Round Trip Time-Messung RTT. Diese Methode der Messung hat gegenüber der (nur in eine Richtung gemessenen) Latenzzeit den Vorteil, dass keine aufwändige Zeitsynchronisation der beiden beteiligten Endgeräte benötigt wird. Nachteilig ist bei der RTT-Messung, dass bei vielen Netzen unsymmetrische Verzögerungszeiten auftreten können, und die halbe RTT damit nicht unbedingt eine gute Näherung für die Verzögerungszeit in eine Richtung liefert. Außerdem müssen die Sensorknoten die Datenpakete zu den Beacons zurücksenden, was einen zusätzlichen Energieverbrauch nach sich ziehen würde. Unter Umständen müssten diese auch mit zusätzlicher Hardware (Time-to-Digital-Converter) ausgestattet werden. Das Ziel in energielimitierten, drahtlosen Geosensornetzwerken soll aber darin bestehen, den Hardware- und Energieaufwand für die Lokalisierung so gering wie möglich zu halten, weswegen dieses Verfahren für diese Anwendungen eher ungeeignet ist.

2.3.3 Phasenvergleichsverfahren

Das Phasenvergleichsverfahren arbeitet nach folgendem Prinzip, welches u.a. in (Kahmen, 2005) detailliert erläutert wird. Der Sender erzeugt ein sinusförmiges Messsignal. Das ausgesendete Signal erfährt in Abhängigkeit von der Länge des durchlaufenen Weges eine Phasenverschiebung. Diese Phasendifferenz kann mittels eines Phasenmessers gemessen und eine eindeutige Distanz zwischen Sender und Empfänger ermittelt werden, wenn sie nicht größer als die halbe Wellenlänge ist. Allerdings haben Phasenmesser nur eine begrenzte Genauigkeit von $\frac{\lambda}{4000}$ bis $\frac{\lambda}{8000}$ (Kahmen, 2005). Bei einer Wellenlänge von $\lambda = 20\text{m}$ und einer Genauigkeit des Phasenmessers von $\frac{\lambda}{4000}$ ergibt sich eine Auflösung für die Genauigkeit der Strecke von 5mm.

2.3.4 Hop-basierte Verfahren

Wie bereits in Kapitel 1.1 erwähnt wurde,

bestehen Geosensornetzwerke aus einer großen Anzahl von Knoten. Diese hohe Knotendichte kann nun benutzt werden, um Rückschlüsse auf absolute Distanzen zu ziehen (Abbildung 5)

Über Multihopping soll ein Paket auf dem kürzesten Weg von dem Knoten K_1 über K_2, K_3, K_4 nach K_5 gesendet werden. Ein integrierter Hop-Zähler registriert dabei die Anzahl der ausgeführten Hops. Dieser Zähler kann auf dem Zielknoten ausgelesen werden und in eine Distanz umgewandelt werden, wenn folgende Voraussetzungen gegeben sind.

- Die Zwischenknoten auf dem kürzesten Weg zwischen K_1 und K_5 sollten möglichst nah an und am besten auf der direkten Strecke liegen.
- Alle Knoten sollten möglichst gleichverteilt sein.
- Die Knotendichte sollte möglichst hoch sein.
- Es dürfen keine Hindernisse zwischen Sender und Empfänger existieren, damit diese nicht weiträumig umgangen werden müssen und somit den Hop-Zähler unnötig erhöhen.

Die Güte der Distanzmessung wird durch die Einhaltung der genannten Bedingungen beeinflusst. Per Routingprotokollen kann der kürzeste Weg als Summe des durchschnittlichen Knotenabstandes multipliziert mit der Hopanzahl ermittelt werden.

3 Aktuelle Lokalisierungsverfahren in drahtlosen Geosensornetzwerken

Der Lokalisierungsprozess in einem drahtlosen GSN basiert auf unterschiedlichen Netzwerktopologien. Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, setzen die meisten Lokalisierungsalgorithmen einige Knoten voraus, denen ihre Position initial bekannt ist – die Beacons.

In dem ersten Fall (Abbildung 6a) besteht das Netz aus ad hoc vernetzten Sensorknoten und den Beacons. Hier wird der Lokalisierungsalgorithmus entweder auf allen Sensorknoten und/oder zusätzlich auf den Beacons durchgeführt. Das bringt den Vorteil mit sich, dass jeder Knoten seine Position mit dem geringsten Kommunikationsaufwand im Netz selbst bestimmt.

Im Gegensatz

dazu (Abbildung 6c) senden alle Sensorknoten ihre Daten zur Senke (z.B. einem Server, PC) im Netzwerk. Die Senke übernimmt dabei alle Berechnungsschritte der komplexen Lokalisierungsalgorithmen. Die Nachteile dieser Vorgehensweise sind der extrem hohe Kommunikationsaufwand im Netzwerk sowie die Anfälligkeit bei Unerreichbarkeit der Senke durch deren Ausfall oder Blockade der Weiterleitung. Vorteil ist allerdings, dass die Senke Teil einer Infrastruktur ist, die die Bestimmung eines geodätischen Datums (Ursprung, Rotation, Translation und Maßstab eines Referenzkoordinatensystems) ermöglicht. Damit kann die Position eines einzelnen Sensorknotens in einem weltweiten Referenzsystem (z.B. WGS84) wiedergegeben werden.

Beide Techniken haben den Nachteil, dass sie entweder einen hohen Kommunikations- oder Berechnungsaufwand mit sich bringen. Im günstigsten Fall ergibt sich eine Mischtopologie (Abbildung 6b), in der der weniger komplexe Teil der Lokalisierung auf den Sensorknoten und der energieaufwändige Teil, im Hinblick auf möglichst geringe Kommunikationskosten, auf die Senke ausgelagert werden. Dieser hybride Algorithmus muss flexibel genug sein, um alle möglichen Knotenausfälle zu kompensieren und damit sowohl eine dauerhafte, verteilte als auch eine zentralisierte Berechnung zuzulassen. Dieses führt dann zu einer längeren Lebensdauer des Netzwerkes.

In Abhängigkeit von der verwendeten Messgröße und der Netzkonstellation lassen sich alle Lokalisierungsmethoden in GSN, abhängig von der erreichten Genauigkeit und der Komplexität des jeweiligen Algorithmus, in exakte - auch als feinkörnig (Fine Grained Localization - FGL) bezeichnet - und approximative - auch grobkörnig (Coarse Grained Localization - CGL) genannt - Methoden unterteilen (Abbildung 7). Daneben gibt es aber noch weitere Methoden, die i.d.R. auf komplett anderen Annahmen beruhen.

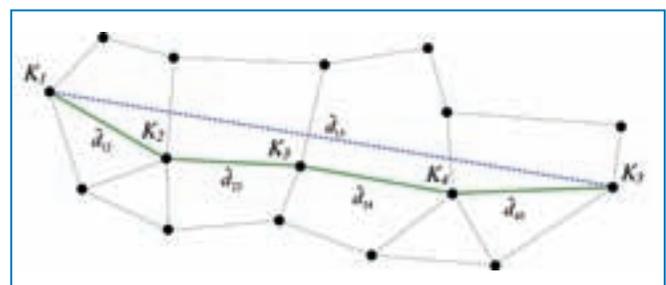


Abbildung 5: Hop-basiertes Verfahren: Distanzbestimmung über Zählen der benötigten "Hops" zwischen Start- und Zielknoten

Im Folgenden wird eine Auswahl aktueller Lokalisierungsalgorithmen vorgestellt und der jeweiligen Methode (approximativ oder exakt) zugeteilt.

3.1 Approximative Lokalisierungsmethoden

In der Literatur existieren viele approximative Lokalisierungsmethoden, von denen drei hier skizziert werden sollen. Eine Übersicht gibt Reichenbach in seiner Dissertationsschrift (Reichenbach, 2007). Diese Methoden sind ressourceneffizient, resultieren aber in größeren Positionierungsfehlern. Einige approximative Techniken verzichten komplett auf die Benutzung fehlerbehafteter Distanzmessungen.

CGL-Algorithmus In (Bulusu, 2000) wurde der Coarse Grained Localization – Algorithmus (CGL) vorgeschlagen (Abbildung 8). Hier senden in der ersten Phase alle Beacons ihre Positionen $\tilde{B}(\tilde{x}_j, \tilde{y}_j)$ und deren dazugehörige Netzwerkadresse zu allen Sensorknoten in ihrer Sendereichweite. In der zweiten Phase berechnen alle Sensorknoten ihre eigene Position durch Schwerpunktbestimmung aus allen n-Positionen der Beacons in Sendereichweite.

$$N(x_N, y_N) = \frac{1}{n} \sum \tilde{B}_j(\tilde{x}_j, \tilde{y}_j) \quad (2)$$

Dieser Algorithmus zeichnet sich durch den relativ geringen Kommunikationsaufwand - es müssen lediglich die Beaconpositionen und die Adresse von den Knoten empfangen werden - und den geringen Berechnungsaufwand aus, resultiert aber auch in relativ großen Positionierungsfehlern - bei Bulusu von ca. 18% (Bulusu, 2000).

WCL-Algorithmus Der CGL-Algorithmus hat den Nachteil, dass er Entfernungsabhängigkeiten außer acht lässt. In Blumenthal et al. wurde der CGL zum Weighted Centroid Localization - Algorithmus (WCL) (Abbildung 9) weiterentwickelt und um distanzabhängige Gewichte erweitert (Blumenthal et al., 2005b). Aufgrund der entfernungsabhängigen Fehler werden hier die näheren Beacons höher gewichtet als die weiter entfernten. Diese distanzabhängige Gewichtung verschiebt die ermittelte Position aus der Sensorfeldmitte heraus hin zu den näheren Beacons.

Die Schwerpunkgleichung wird durch das Gewicht ρ als Funktion der Distanz wie folgt erweitert:

$$N(x_N, y_N) = \frac{\sum (\rho_{ij} \cdot \tilde{B}_j(\tilde{x}_j, \tilde{y}_j))}{\sum \rho_{ij}} \quad (3)$$

Der Algorithmus läuft ähnlich dem CGL-Algorithmus ab. In der ersten Phase empfangen die Knoten die Positionen der Beacons in

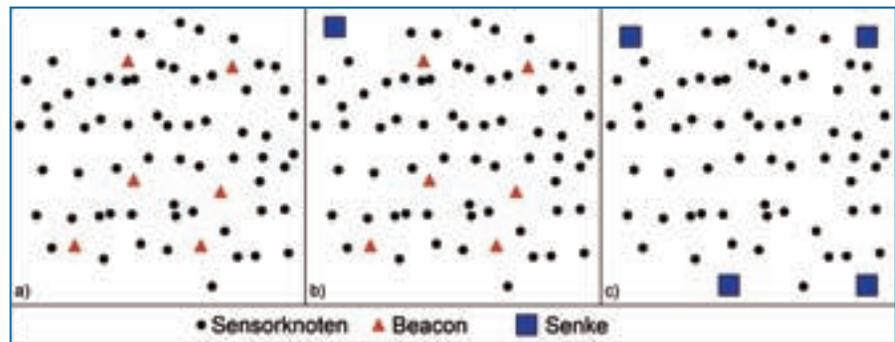


Abbildung 6: Ad hoc vernetzte Sensorknoten: a) mit Beacons, b) mit Beacons und einer festen Senke (freies Netz), c) ohne Beacons und vier Senken (Infrastrukturfall).

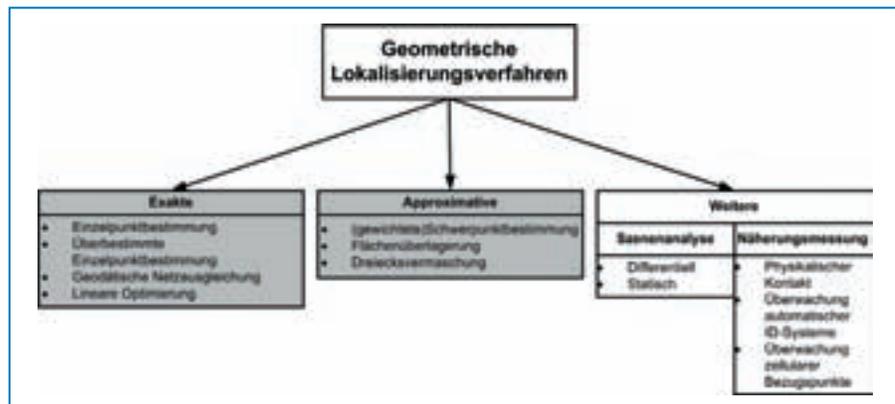


Abbildung 7: Klassifizierung üblicher Lokalisierungstechniken in Sensornetzwerken.

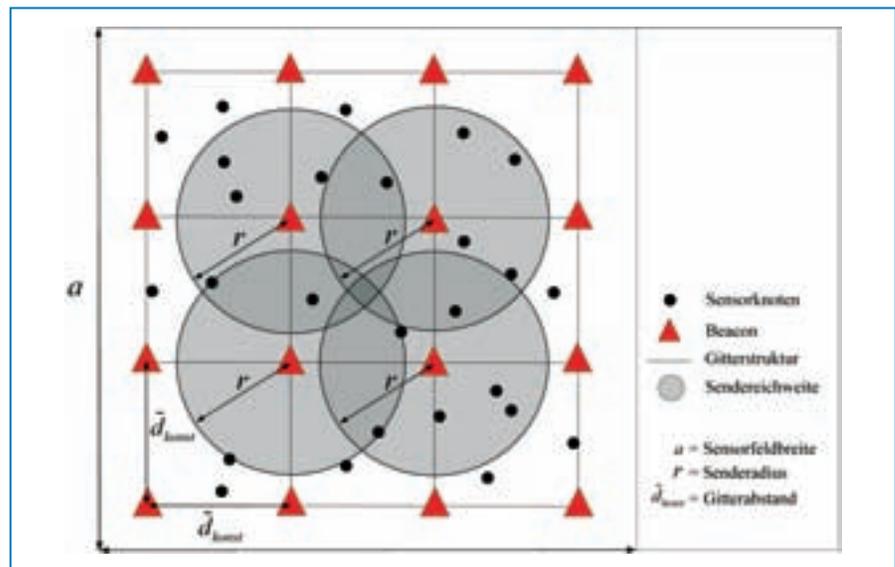


Abbildung 8: Coarse Grained Localization - Algorithmus nach (Bulusu, 2000).

deren Sendereichweite und deren Netzwerkadresse. Zudem wird die Entfernung nach einem geeigneten Verfahren nach Kapitel 2.3 bestimmt. In Phase zwei ermittelt jeder Sensorknoten seine eigene Position nach der gewichteten Schwerpunktbestimmung selbstständig. Mittels WCL ist im Vergleich zu CGL eine gesteigerte Genauigkeit von ca. 13% zu erreichen.

APIT-Algorithmus Tian et al. verzichten in

ihrem Approximate Point In Triangulation - Algorithmus (APIT) komplett auf Distanzen (Tian et al., 2003). Abbildung 10 zeigt hierzu den schematischen Aufbau.

Zu Beginn werden aus allen Beaconpositionen Dreiecke gebildet. Dann bestimmt jeder Knoten durch einen Point in Triangulation-Test, auf welcher Dreiecksfläche er sich befindet. Diesem Test liegen ausschließlich Nachbarschaftsbe-

ziehungen zu Grunde. Eine nachfolgende Schnittmengenbildung mit allen betreffenden Dreiecken führt zu einem Flächenstück, dessen Schwerpunkt im letzten Schritt als wahrscheinlichste Position des unbekanntes Sensorknotens ermittelt wird.

Abbildung 10b) zeigt einen theoretisch erfolgreichen PIT-Test. Wenn sich der Sensorknoten in irgendeine Richtung um einen geringen Wert dx bewegt, muss eine Richtung existieren, um von allen Beaconpositionen gleichzeitig weiter weg oder an alle näher heran zu kommen.

In Abbildung 10c) ist ein praktisch erfolgreicher PIT-Test wiedergegeben. Dabei werden RSSI-Werte zu vier Nachbarn bestimmt und getestet, ob sich einer der Nachbarn gleichzeitig weiter weg oder näher an allen drei Dreieckspunkten befindet.

3.2 Exakte Lokalisierungsmethoden

In dieser Arbeit wird, wie auch in zahlreichen anderen Literaturstellen, der Begriff 'exakt' (feinkörnig oder englisch fine-grained) als Abgrenzung zu 'approximativ' (coarse-grained) in Verbindung mit den einzelnen Lokalisierungsmethoden verwendet. Dabei sollte beachtet werden, dass alle Messungen fehlerbehaftet sind und diese Klassifizierung ausschließlich der Unterscheidung zu den approximativen Methoden hinsichtlich der Genauigkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit dient.

Die Anwendung von mehr als drei Beacons erlaubt eine Überbestimmung und damit eine Genauigkeitssteigerung sowie die Ermittlung und Eliminierung von groben Fehlern und Ausreißern (Multilateration). Die gängigste Methode zur Lösung der dabei entstehenden nichtlinearen Gleichungssysteme ist die Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate (MdkQ). Die MdkQ liefert die besten, linearen, un-

verzerrten Schätzer (best linear unbiased estimators - BLUE), ist in ihrer Berechnung aber sehr komplex, ressourcenintensiv und daher eigentlich unbrauchbar für den Einsatz auf den sehr ressourcenarmen Sensorknoten. Zudem müssen die nichtlinearen Gleichungssysteme für die Lösung mittels MdkQ linearisiert werden, wozu wiederum Näherungskordinaten für die unbekanntes Sensorknoten ermittelt werden müssen. Einen Ansatz zur Verwendung approximativer Lokalisierungsmethoden zur Näherungskordinatenbestimmung im Hinblick auf deren Genauigkeit geben Born et al. (Born et al., 2006).

Savvides et al. entwarfen das wohl bekannteste exakte Verfahren, um diese Komplexitätsprobleme zu lösen - den Fine Grained Localization-Algorithmus (FGL) (Savvides et al., 2001). Er benötigt mindestens drei Beacons und läuft auf jedem Sensorknoten, also völlig verteilt, ab.

FGL basiert auf der Methode der kleinsten Quadrate und einem überbestimmten Gleichungssystem bei mehr als drei Beacons. Jeder Sensorknoten misst die Distanz s_{ij} zu allen Beacons in deren Sendereichweite. Aus diesen s_{ij} und den geschätzten Distanzen aus den geschätzten Positionen der Sensorknoten $N_i(x_i, y_i)$ und den genauen Positionen der Beacons $\tilde{B}_j(\tilde{x}_j, \tilde{y}_j)$ wird der Distanzfehler errechnet:

$$m_i = s_{ij} - \sqrt{(\tilde{x}_j - x_i)^2 + (\tilde{y}_j - y_i)^2} \quad (4)$$

Dieser Grundalgorithmus wird in der Literatur als atomare Multilateration bezeichnet und wurde von Savvides et al. in weiteren Schritten zur iterativen und kollaborativen Multilateration weiterentwickelt. Bei der iterativen Multilateration (iMUL) geht die atomare Multilateration von einem Sensorknoten aus und breitet sich dann über die Nachbarknoten aus. Dabei wird jeder Knoten, der seine Position ermittelt hat, selbst zu einem Beacon und sendet seine Koordinaten zu seinen Nachbarn. Die Genauigkeit der iterativen Multilateration hängt stark von der Genauigkeit der geschätzten Position der Sensorknoten

ab, da sich der Lokalisierungsfehler über die Sensorknoten fortpflanzt.

Kwon et al. präsentieren eine verteilte Lösung, die ebenfalls auf der MdkQ beruht und Fehler in der Distanzmessung mittels Ultraschall reduziert (Kwon et al., 2005). Ahmed et al. schlagen einen neuen Ansatz vor, welcher die Vorteile von absoluter und relativer Lokalisierung vereint (Ahmed et al., 2005). Weiterhin entwickelten Karalar et al. ein energiearmes System zur Positionierung mit Hilfe von MdkQ zur Integration auf einzelnen Sensorknoten (Karalar et al., 2004). Einen generellen Überblick über verteilte Positionierungssysteme geben Langendoen und Reijersin (Langendoen und Reijersin, 2003).

In einer statischen Umgebung mit festen Beacons besitzt der Ausbreitungscharakter von Signalen eine bestimmte Signatur. Diese kann z.B. bei der Szenenanalyse eingesetzt werden. An mehreren Messpunkten werden dann die Signaleigenschaften aufgenommen und in einer sogenannten Signalkarte abgespeichert, welche dann aus einer Vielzahl von Messungen an unterschiedlichsten Positionen besteht. Diese Eigenschaften können z.B. die Signalempfangsstärken zu mehreren Beacons sein. Auf den Sensorknoten wird nun diese Signalkarte abgespeichert, welcher dann die gemessenen Werte an den jeweiligen Orten mit denen auf der Signalkarte vergleicht. Die Datensätze, die am besten mit den gemessenen Werten korrelieren, sind die wahrscheinlichsten Positionen. Anhand derer wird dann die Schätzposition aus der Signalkarte angenommen. Diese Methode ist in der Literatur auch als Pattern Matching Technique, Pattern Recognition oder Fingerprinting zu finden (Bahl und Padmanabhan, 2000).

In einem weiteren beschriebenen Algorithmus Ad Hoc Positioning System - (APS) fluten die Beacons ihre Koordinaten ins Netzwerk. Die Distanzbestimmung erfolgt über das DV-Hop-Verfahren (Abschnitt 2.3). Dazu werden die minimalen Hop-Zähler abgespeichert und anschließend eine Trilateration durchgeführt (Niculescu und Nath, 2001), (Niculescu und Nath, 2003).

Savarese et al. erweitern den APS-Algorithmus um einen weiteren Schritt, einer sogenannten Refinementphase (Savarese et al., 2002). Die Positionen aus der ersten Phase ("Hop-Terrainphase") werden an alle Nachbarn weitergesendet, welche sich dann anhand der neuen Daten eine neue Position berechnen. Sogenannte "Confidence-Wer-

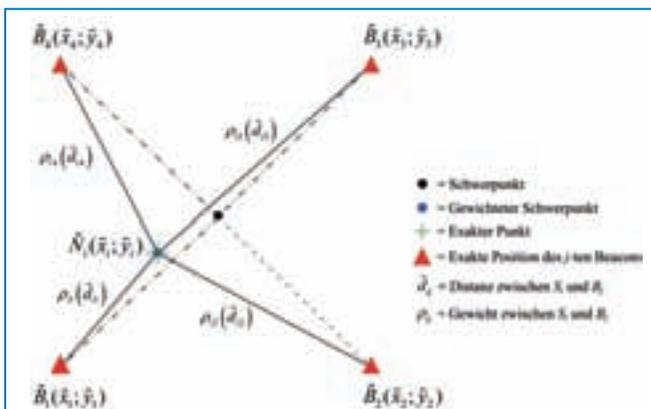


Abbildung 9: "Weighted Centroid Localization"-Algorithmus.

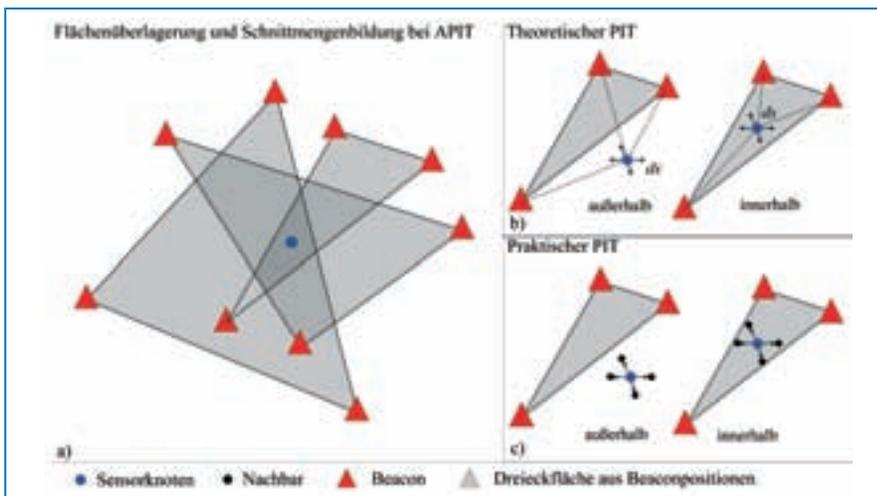


Abbildung 10: APIT-Algorithmus nach (Tian et al., 2003): a) Flächenüberlagerung bei APIT; b) theoretisch erfolgreicher PIT-Test. c) praktisch erfolgreicher PIT-Test.

te“ sollen die Fehlerfortpflanzung verringern, indem sie mehr oder weniger stark mit in die Berechnung eingehen.

4 Distributed least Squares – Algorithmus

Innerhalb des von der DFG geförderten Geosens-Projektes am Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik und der Professur für Geodäsie und Geoinformatik der Universität Rostock wurde ein exakter Lokalisierungsalgorithmus entwickelt, der die Vorteile der approximativen Methoden (geringer Rechen- und Kommunikationsaufwand) mit denen der exakten Verfahren (hohe Präzision, Robustheit) verbindet. Der Distributed Least Squares Algorithmus (DLS) beruht auf Distanzmessungen und zur Lösung der überbestimmten Gleichungssysteme auf der Methode der kleinsten Quadrate. Im Folgenden wird der Algorithmus skizziert und auf Erweiterungen kurz eingegangen. Reichenbach stellt in seiner Dissertationsschrift die Methoden und Erweiterungen detailliert vor (Reichenbach, 2007).

Die im Folgenden dargestellten Berechnungen sind in 3D möglich und auch simuliert worden. Der Einfachheit halber wird der DLS-Algorithmus hier nur für den zweidimensionalen Raum hergeleitet.

4.1 DLS - Grundlagen

Wie bereits in Kapitel 1.2 angesprochen, ist das Hauptproblem exakter Lokalisierungsalgorithmen in Geosensornetzwerken der hohe Ressourcenverbrauch. Aufgrund der fortschreitenden Miniaturisierung der Knoten werden die Ressourcen auch weiterhin sehr kostbar bleiben und sollten anwen-

dungsspezifisch optimal ausgenutzt werden. Dazu gehört auch die Anpassung der Lokalisierungsalgorithmen an diese Restriktionen und damit verbunden eine Senkung der Komplexität bei gleich bleibender oder sogar erhöhter Genauigkeit. Dazu bieten sich einige Eigenschaften von Geosensornetzwerken an, z.B. die hohe Knotenanzahl oder die unterschiedlichen Knotenarten wie ressourcenreiche Beacons und einfache Sensorknoten. Vor diesem Hintergrund wurde der Distributed Least Squares-Algorithmus (DLS) entwickelt (Reichenbach et al., 2007), (Reichenbach et al., 2006b), (Reichenbach et al., 2006c). Aus den in Kapitel 3 beschriebenen Gründen werden alle Berechnungsschritte intelligent im Netz verteilt. Außerdem wird eine Erhöhung des Kommunikationsaufwandes vermieden. Optimierungen ermöglichen eine sofortige Abarbeitung der Daten am Eingang eines Sensorknotens, wodurch nur minimale Speicheranforderungen entstehen. Die hohe Genauigkeit von DLS basiert auf der optimierten Nutzung einer hohen Anzahl von verfügbaren Eingangsdaten. Der Distributed Least Squares-Algorithmus baut auf den Grundlagen der geodätischen Ausgleichsrechnung auf, wobei aus allen im Netz verfügbaren Beaconpositionen durch Einführung der Euklidischen Distanzen ein überbestimmtes Gleichungssystem entsteht. Das funktionale Modell bei der Neupunktbestimmung baut auf der Trilateration auf, wobei an dieser Stelle mehr als drei Euklidische Distanzen d_1, \dots, d_m ein überbestimmtes Gleichungssystem mit m Gleichungen (m ist die Anzahl der Beacons, zu denen von dem jeweiligen Sensorknoten Distanzen

$d_i \forall i=1 \dots m$ gemessen wurden) und $n = 2$ Unbekannten (x_N, y_N) bilden.

$$\begin{aligned} (\tilde{x}_1 - x_N)^2 + (\tilde{y}_1 - y_N)^2 &= \tilde{d}_1^2 \\ &\vdots \\ (\tilde{x}_m - x_N)^2 + (\tilde{y}_m - y_N)^2 &= \tilde{d}_m^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Bekannt ist diese Methode, wie schon in Kapitel 3.2 erwähnt, als Multilateration. Das Gleichungssystem besitzt nichtlineare Anteile. Es kann entweder eine nichtlineare Optimierung, z.B. das Simplex-Verfahren (Lagarias et al., 1998), mit dem Ziel der Minimierung der Summe der Fehlerquadrate oder eine Linearisierung zur anschließenden Lösung eines linearen Gleichungssystems erfolgen. Da die nichtlineare Optimierung eine gute Näherung der Anfangsposition benötigt, nicht im voraus Aussagen über den Berechnungsaufwand sowie die Konvergenz zulässt und nicht explizit das globale Minimum, sondern evtl. auch nur ein lokales Minimum als Ergebnis liefert, wird diese Methode hier nicht weiter verfolgt.

Zur Linearisierung sowie zur Lösung des linearisierten Gleichungssystems existieren hingegen zuverlässige und effiziente Methoden. Um das Gleichungssystem zu linearisieren, wurde die Linearisierung bei dem DLS-Algorithmus mit Hilfe des Linearisierungswerkzeuges (Murphy und Hereman, 1995) gewählt. Die Anzahl der Gleichungen wird hier mit der Anzahl der Beaconpositionen gleichgesetzt zu $m = b$ und die erste Gleichung dient als Linearisierungshilfe. Addition und Subtraktion von \tilde{x}_1 und \tilde{y}_1 in Gleichung (5) führen zu:

$$\begin{aligned} (\tilde{x}_i - x_N + \tilde{x}_1 - \tilde{x}_1)^2 + (\tilde{y}_i - y_N + \tilde{y}_1 - \tilde{y}_1)^2 &= \tilde{d}_i^2 \\ (i=2,3,\dots,b) \end{aligned} \quad (6)$$

Durch Umformen und Umstellen erhält man:

$$\begin{aligned} (x_N - \tilde{x}_1)(\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1) + (y_N - \tilde{y}_1)(\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1) &= \frac{1}{2}(d_1^2 - d_2^2 + \tilde{d}_{21}^2) \\ (x_N - \tilde{x}_1)(\tilde{x}_3 - \tilde{x}_1) + (y_N - \tilde{y}_1)(\tilde{y}_3 - \tilde{y}_1) &= \frac{1}{2}(d_1^2 - d_3^2 + \tilde{d}_{31}^2) \\ &\vdots \\ (x_N - \tilde{x}_1)(\tilde{x}_b - \tilde{x}_1) + (y_N - \tilde{y}_1)(\tilde{y}_b - \tilde{y}_1) &= \frac{1}{2}(d_1^2 - d_b^2 + \tilde{d}_{b1}^2) \end{aligned} \quad (7)$$

Oder in Matrixschreibweise:

$$A = \begin{pmatrix} \tilde{x}_2 - \tilde{x}_1 & \tilde{y}_2 - \tilde{y}_1 \\ \tilde{x}_3 - \tilde{x}_1 & \tilde{y}_3 - \tilde{y}_1 \\ \vdots & \vdots \\ \tilde{x}_b - \tilde{x}_1 & \tilde{y}_b - \tilde{y}_1 \end{pmatrix}, x = \begin{pmatrix} x_N - \tilde{x}_1 \\ y_N - \tilde{y}_1 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} b_{21} \\ b_{31} \\ \vdots \\ b_{b1} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Die durch das Erweiterungsverfahren linearisierte Matrixform (8) besitzt die folgenden positiven Eigenschaften: ▶

1. Alle Elemente der Koeffizientenmatrix A berechnen sich nur aus Beaconpositionen $\tilde{B}_1(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1) \dots \tilde{B}_b(\tilde{x}_b, \tilde{y}_b)$. Diese Beaconpositionen sind vor der Berechnung bereits bekannt.

2. Vektor \mathbf{b} - nicht zu verwechseln mit der Beaconanzahl b - beinhaltet einerseits die Distanzen zwischen dem Neupunkt und allen Beacons $d_1 \dots d_b$ und andererseits die Distanzen $\tilde{d}_{21} \dots \tilde{d}_{b1}$ zwischen dem ersten Beacon und allen anderen Beacons, welche ebenfalls vor der Berechnung zur Verfügung stehen.

Durch die Methode der kleinsten Quadrate soll das entstandene Gleichungssystem gelöst werden. Im weiteren Verlauf wird ausschließlich auf die Lösung mittels Normalgleichungen eingegangen. Es wurden aber auch andere Orthogonalisierungsmethoden wie die QR-Faktorisierung - (QVD) und die Singulärwertzerlegung - (SVD) getestet (Reichenbach et al., 2006b), (Reichenbach et al., 2006c).

$$A^T \mathbf{A} \mathbf{x} = A^T \mathbf{b} \quad (9)$$

Durch Umstellen der Normalgleichung 9 ergibt sich die Lösung zu:

$$\mathbf{x} = (A^T A)^{-1} A^T \mathbf{b} \quad (10)$$

Mit diesen Eigenschaften bietet es sich an, die Berechnung des Gleichungssystems in einen komplexeren und einen weniger komplexen Teil zu unterteilen, d.h. die Berechnung der Lösungsgleichung (10) wird in die Vorberechnung $A_p = (A^T A)^{-1} A^T$ mit der komplexeren Invertierung und in die weniger komplexe Nachberechnung $A_p \cdot \mathbf{b}$ aufgesplittet.

Die grundlegend neue und bedeutsame Kernidee ist nun, die Vorberechnung auf einem leistungsstarken Knoten wie der Senke oder auch einem Beacon auszulagern und den Aufwand auf den ressourcenlimitierten Sensorknoten dadurch drastisch zu verringern. In den weiteren Betrachtungen übernimmt vorerst die Senke die Vorberechnung.

Der Algorithmus kann jetzt wie folgt zusammengefasst werden. DLS läuft in drei Phasen ab, was in Abbildung 11 und 12 schematisch dargestellt wird.

■ Die einmalige Ausführung der Vorberechnung auf einem einzigen Knoten im Netzwerk verhindert redundante Berechnungen, da die Vorberechnung auf jedem Sensorknoten identisch ist. Dies resultiert daraus, dass die Vorberechnung nur auf Basis der Koeffizientenmatrix A stattfindet, die für jeden Sensorknoten gleich ist. Demzufolge muss die Vorberechnung

anstatt auf s Sensorknoten nur noch auf einem Knoten (einem Beacon) durchgeführt werden.

■ Unterschiedliche Distanzmessungen auf den Sensorknoten führen zu unterschiedlichen Absolutgliedern b . Dementsprechend muss die Nachberechnung auf jedem Sensorknoten individuell ausgeführt werden. Allerdings benötigt die Nachberechnung weitaus weniger Ressourcen als die Gesamtberechnung.

4.2 Analyse des Ressourcenverbrauchs

Das lineare Gleichungssystem

$$\mathbf{x} = (A^T A)^{-1} \cdot A^T \cdot \frac{1}{2} \cdot [d_1^2 - \mathbf{d}^2 + \tilde{\mathbf{d}}] \quad (11)$$

besitzt die folgenden Teilkomplexitäten:

1. Die Matrixmultiplikation der transponierten $[n \times m]$ -Matrix A^T mit der $[m \times n]$ -Matrix A führt auf $\frac{n(n+1)}{2}$ flops. Dabei werden durch die Spiegelstruktur der resultierenden Matrix Operationen eingespart.

2. Die aus Schritt 1. gewonnene $[n \times n]$ -Matrix wird invertiert (Die Invertierung einer Matrix ist sehr aufwendig und besitzt nach Golub (Golub und Loan, 1996) eine Komplexität n^3 , n ist hier aber gleich 2, nämlich der Anzahl der zu bestimmenden Koordinaten x, y).

3. Die aus Schritt 2. entstandene $[n \times n]$ -Matrix $(A^T A)^{-1}$ wird mit der $[n \times m]$ -Matrix A^T multipliziert, was $2n^2 m - nm$ Berech-

nungsschritte erfordert. Damit entsteht die nun definierte Matrix $A_p = (A^T A)^{-1} A^T$.

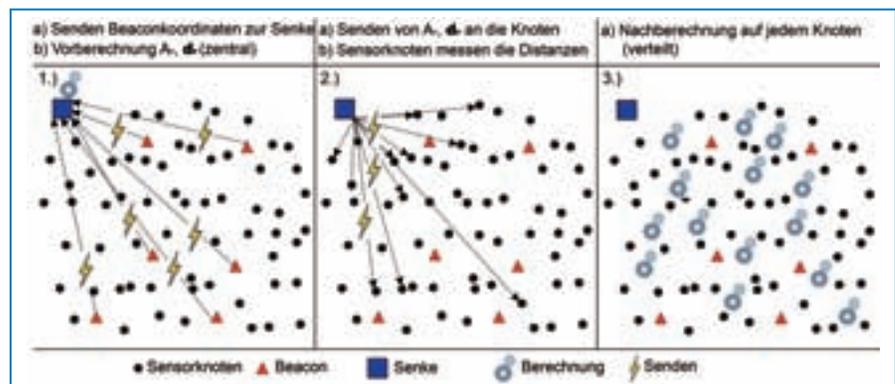
4. Die Matrix A_p wird mit dem $[m]$ -Vektor \mathbf{b} multipliziert, was eine Komplexität von $2mn - 1n$ besitzt.

5. Zur Berechnung von b werden zudem noch $5m + 1$ Rechenschritte benötigt

Dies führt auf eine Gesamtkomplexität von $15m - 5$ für die Methode der kleinsten Quadrate bei m Beacons und $n=2$ Unbekannten. Das heißt bei 100 Beacons und der Aufsummierung von \tilde{x}_1 und \tilde{y}_1 (siehe Gl. 8) werden 1497 Berechnungsschritte benötigt. Diese sollen im Folgenden reduziert werden, in dem der Algorithmus für die Normalgleichungen analysiert wird. Dabei soll die Komplexität der noch übrig gebliebenen Hauptberechnung und der Kommunikations- und Speicheraufwand untersucht werden. Diese Werte werden dann den vollständigen Berechnungen gegenüber gestellt.

4.2.1 Rechenaufwand

Auf der Senke werden bereits $A_p = (A^T A)^{-1} A^T$ und $\tilde{\mathbf{d}}_p$ aus dem Vektor \mathbf{b} vorberechnet. Das aufwändigste ist in der Regel das Berechnen einer Inversen $(A^T A)^{-1}$, wobei in dem Fall der Normalgleichungen nur eine 2×2 -Matrix invertiert werden muss. Die auf der Senke berechneten Elemente werden dann über die Beacons zu den Sensorknoten gesendet. Da die Distanzen zwischen den Sensorkno-



Abbildungen 11 und 12: Phasen des DLS - Algorithmus (Reichenbach, 2007)

Phase 1: Initialisierung (verteilt):

Alle Beacons senden ihre Position $\tilde{B}_i(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ direkt oder über direkte Nachbarn zur Senke

Phase 2: Vorberechnung (zentral):

Die Senke wartet, bis alle Beaconpositionen empfangen wurden.

Die Vorberechnung wird auf der Senke ausgeführt, wobei A_p und $\tilde{\mathbf{d}}_p$ die Resultate sind.

Kommunikation (verteilt):

Die Senke verteilt A_p , $\tilde{\mathbf{d}}_p$ sowie \tilde{x}_1 und \tilde{y}_1 über Beacons an alle Sensorknoten.

Phase 3: Nachberechnung (verteilt)

Die Sensorknoten:

■ ermitteln die Distanzen $d_1 \dots d_b$ zu allen Beacons.

■ empfangen Matrix A_p , Vektor $\tilde{\mathbf{d}}_p$ sowie \tilde{x}_1 und \tilde{y}_1

■ erstellen Vektor \mathbf{b} und berechnen Schätzposition N .

ten und den Beacons von den Sensorknoten selbst gemessen werden, verbleibt die reduzierte Berechnungsgleichung:

$$A_p \cdot \frac{1}{2} \cdot (d_1 - \mathbf{d}^2 + \tilde{\mathbf{d}}_p) \quad (12)$$

Diese Gleichung besitzt eine Komplexität von nur $8m-11$ flops, was bei 100 Beacons und der Aufsummierung von \tilde{x}_1 und \tilde{y}_1 (siehe Gl. 8) zu einem Aufwand von 791 Berechnungsschritten führt.

4.2.2 Analyse und Optimierung des Speicherbedarfs

Beginnend mit Gleichung (12) müssen im extremen Fall A_p , \mathbf{d} und $\tilde{\mathbf{d}}_p$ komplett im Speicher abgelegt werden, bevor die Multiplikation beginnen kann (Abbildung 13). Dies führt zur Abspeicherung von $[2 \cdot (m-1)] + (m-1) + (m-1) = 4m-4$ Elementen. Die Werte müssen digital als Gleitkommazahl abgespeichert werden. Dieses Abspeichern mittels Mantisse/Exponenten-Schreibweise erfordert im Allgemeinen 4 Byte. Das würde bedeuten, dass bei nur $m = 100$ Beacons bereits 0,796 kbytes allein für das Abspeichern der Eingangsmatrizen benötigt werden. Während der Berechnung muss zusätzlich Speicher für weitere temporäre Variablen alloziiert werden. (Transponieren kann man sich durch geschickte Abspeicherung mit Pointern sparen)

Die Eingangsdaten der Matrizen kommen in der Realität in einem seriellen Datenstrom an. Dabei ist keine Sortierung gewährleistet, da die Pakete eventuell verschiedene Wege durch das Netz nehmen oder, aufgrund von Übertragungsfehlern, Pakete erneut versendet werden müssen. Dadurch kommen die Daten in zufälliger Reihenfolge an und die Berechnung könnte erst nach Ankommen aller Daten beginnen. Jedoch besitzt die reduzierte Berechnung eine weitere vorteilhafte Eigenschaft. So können einzelne Berechnungen von $A_p \cdot \mathbf{b}$ bereits nach Eintreffen der Zeilenelemente sofort durchgeführt werden und müssen nicht erst abgespeichert werden. Dazu benötigt man nur jeweils einen Akkumulator für die Position x_N und die Position y_N des Unbekannten. Es ergibt sich in jedem Fall folgende Multiplikation:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1(m-1)} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2(m-1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{(m-1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} \cdot b_1 + a_{12} \cdot b_2 + \dots + a_{1(m-1)} \cdot b_{(m-1)} \\ a_{21} \cdot b_1 + a_{22} \cdot b_2 + \dots + a_{2(m-1)} \cdot b_{(m-1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_N \\ y_N \end{pmatrix}$$

Mit a_{ij} ($i=1..2, j=1..(m-1)$) und b_k ($k=1..(m-$

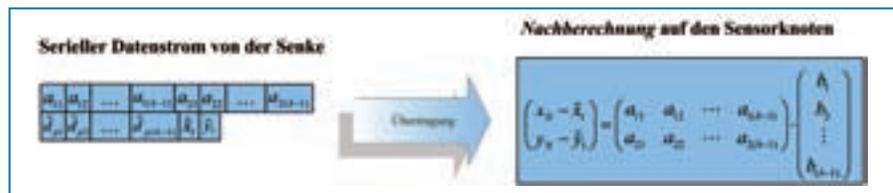


Abbildung 13: Im ungünstigsten Fall müssen alle Eingangsdaten zwischengespeichert werden, bevor der Sensorknoten mit der Nachberechnung beginnen kann.

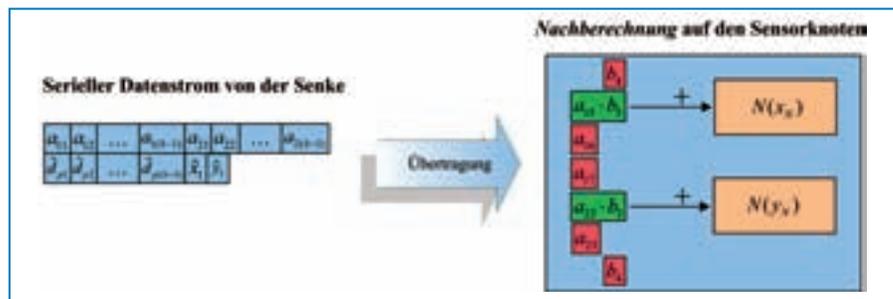


Abbildung 14: Optimierung beim Empfang des Datenstroms, wobei passende Zeilen sofort multipliziert und akkumuliert werden. Die grün gekennzeichneten Pakete können sofort akkumuliert werden. Bei den rot dargestellten fehlen noch Elemente, somit muss zwischengespeichert werden.

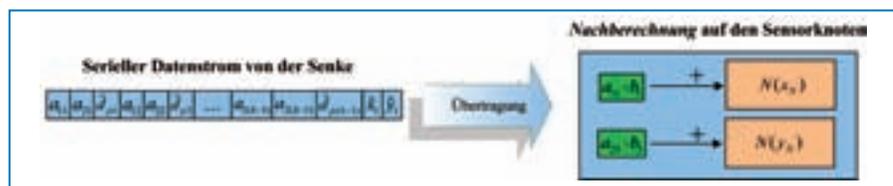


Abbildung 15: Die Ausgangsdaten müssen beim Sender in Tupeln versendet werden, um beim Empfänger den Speicherplatz zu verringern.

1)) ergibt sich folgende Vereinfachung. Falls Elemente mit $j=k$ verfügbar sind, ist eine sofortige Multiplikation von $a_{ij} \cdot b_k$ und eine anschließende Akkumulation in (x_N, y_N) möglich (Abbildung 14).

Dabei unterscheidet j , ob in den Akkumulator x_N bei $j=1$ oder y_N bei $j=2$ geschrieben wird. Voraussetzung dafür ist, dass das Element b_k aus den Beaconsabständen \tilde{d}_j und den Abständen zwischen Beacons und Sensorknoten d_j vorliegt. Aus diesem Grund ist, wie im Algorithmus auch zuerst aufgeführt, eine Versendung des Vektors $\tilde{\mathbf{d}}_p$ und die sofortige Entfernungsmessung erforderlich. Letztendlich benötigt die optimierte reduzierte Berechnung im schlechtesten Fall eine Berechnungszeit von $((m-1)/2)$, wenn die Elemente in umgekehrt sortierter Reihenfolge eintreffen würden. Dies ist jedoch recht unwahrscheinlich, da ein sortiertes Versenden der Elemente bei der Senke eine gewisse aufsteigende Grundsortierung bewirkt. Allerdings kann es jedoch vorkommen, dass Daten verloren gehen, welche wiederholt gesendet werden müssen und damit die Reihenfolge der eintreffenden

Datenpakete verändert wird. Um genau diesen Effekt zu vermeiden, ist es zweckmäßig, die Elemente a, d in passenden Tupeln zu verschicken, wobei beispielhaft $(a_{1,1}, d_1; a_{1,2}, d_2, \dots)$ aneinander gehängt werden (Abbildung 15). Dabei nutzt man die höhere Wahrscheinlichkeit aus, dass die Daten in einem ganzen Paket eher fehlerfrei ankommen als das Paket selber. Im besten Fall müssen dadurch nur wenige temporäre Variablen und zwei Akkumulatoren im Speicher gehalten werden und der Speicherverbrauch ist nahezu minimal.

4.2.3 Kommunikationsaufwand

Wie schon im Vorfeld erläutert wurde, muss der Kommunikationsaufwand im Sensornetzwerk auf ein Minimum reduziert werden. Insbesondere das Senden von Paketen über große Entfernungen benötigt viel Energie. Die Kommunikation zwischen Beacons untereinander sowie Beacons und Senke ist weniger kritisch und sollte, wenn möglich, gegenüber der Kommunikation mit Sensorknoten bevorzugt verwendet werden. Aus diesen Gründen wird die Kommunikati- ▶

on in zwei Fälle unterteilt. Im ersten Fall ist die Kommunikation unkritisch, da nur die Beacons untereinander und mit der Senke kommunizieren, wobei die Sensorknoten nicht am Verkehr teilnehmen. Im zweiten, kritischen Fall nehmen die Sensorknoten aktiv an der Kommunikation teil.

Bezogen auf DLS senden die Beacons in Phase 1 (Abbildung 11) entweder über Nachbarbeacons oder direkt zur Senke. Somit ist die erste Phase unkritisch. In Phase 2 sendet die Senke Daten über Beacons. Dies ist ebenfalls unkritisch. Allerdings senden die Beacons danach Daten zu den Sensorknoten, wodurch Empfangsaufwand entsteht. Ein Senden durch die Sensorknoten ist beim Grundalgorithmus von DLS nicht vorgesehen. Jedoch kann ein Senden auf unterer Protokollschicht, wie z. B. die Signalisierung eines erfolgreichen Paketempfangs auf MAC-Schicht, erforderlich sein. An dieser Stelle wird allerdings nur eine Untersuchung auf algorithmischer Ebene vorgenommen.

Versendet werden müssen die Elemente A_p , \vec{q}_p , \vec{x}_1 und \vec{y}_1 . Die Matrizen haben die Dimensionen $[2 \cdot (b-1) + (b-1) + 2]$. Für 100 Beacons ergibt sich damit ein Kommunikationsaufwand von 299 Elementen und 1196 Byte.

4.3 Erweiterungen zum DLS

Reichenbach erweitert in seiner Dissertation den DLS-Algorithmus (Reichenbach, 2007). Zum einen wurde er auf mobile Geosensornetze ausgedehnt - mobile Distributed Least Squares-Algorithmus (mDSL) und zum anderen zum iterative Distributed Least Squares-Algorithmus (iDLS), bei dem Geosensorknoten, die sich eine Position errechnen haben, auch zu Beacons werden und in die Berechnung der Positionen der verbliebenen Unbekannten einfließen.

5 Anwendungen für Geosensornetze

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die breitgefächerten Einsatzmöglichkeiten von drahtlosen Geosensornetzen. Allerdings befinden sich solche Netzwerke noch in der Entwicklungsphase, so dass sie vermehrt im wissenschaftlichen Bereich prototypisch anzutreffen ist. Es ist aber vorauszusehen, dass die Anwendung von GSN in der Wirtschaft und im alltäglichen Leben Einzug halten wird.

5.1 Monitoring natürlicher Lebensräume

Die weltweite Zunahme von Naturkatastrophen und der damit verbundene Verlust an Menschenleben und materiellen Werten erfordert den Einsatz zuverlässiger Frühwarnsysteme. In dem BMBF-Projekt SLEWS – Sensorbased Landslide Early Warning System – der Professur für Geodäsie und Geoinformatik der Universität Rostock ist die Entwicklung von geeigneten Methoden und Technologien der Frühwarnung bei Massenbewegungen (Arnhardt et al., 2007) das Ziel (Abbildung 16). Die zu entwickelnde Geodiensteinfrastruktur umfasst Sensoren, Geodatenbestände, Informations- und Kommunikationstechnologien sowie Methoden und Modelle zur Ableitung von stabilitätsrelevanten Parametern. Mittels verschiedener Sensoren sollen zuverlässige Echtzeitinformationen gewonnen und aus denen wiederum nach der Aufbereitung mit Hilfe geeigneter Verfahren und Algorithmen Warnungen oder Prognosen (Frühwarnungen) abgeleitet werden können. Insofern stellt SLEWS ein ideales Anwendungsbeispiel für Geosensornetze dar.

Auch in Überflutungsgebieten sind Geosensoren vielseitig einsetzbar. Zukünftig denkbar sind Geosensornetze, die in künstliche Hochwasserschutzdeiche eingebracht werden und somit eine flächendeckende, automatisierte Überwachung ermöglichen (Schulz, 2006). Dazu können dem Füllmaterial für die Sandsäcke Sensoren beigemischt und später die Feuchte innerhalb des Sandsackes registriert werden. Steigt diese signifikant an, lösen die Sensoren frühzeitig Alarm aus und die Rettungsmannschaften sind in der Lage, zeitnah Verstärkungen der undichten Stelle vorzunehmen. Katastrophale Folgen wie z.B. beim Elbehochwasser 2002 wären durch diese Technologie mit hoher Wahrscheinlichkeit in Grenzen gehalten worden. Neben diesen Beispielen gibt es noch viele Anwendungsmöglichkeiten im Katastrophenschutz wie z.B. Frühwarnungen bei Waldbränden, aktiven Vulkanen (Werner-Allen et al., 2006) oder zur Überwachung der Gebäudestatik (Chintalapud et al., 2006).

Auch ist es denkbar, chemisch oder biologisch kontaminierte Gebiete zu erkunden, ohne Rettungsmannschaften unnötigen Gefahren auszusetzen. Die Detektion besonders gefährlicher Sektoren können Geosensornetze, die von Flugzeugen ausgebracht werden, übernehmen.

(Reichenbach und Timmermann, 2005),

(Reichenbach et al., 2005b), (Dunkels et al., 2004), (Yang et al., 2002) beschreiben das sogenannte Large Scale Ocean Monitoring, bei dem Ozeansichten großflächig mittels Geosensoren auf verschiedenste Parameter, wie z.B. Strömungsgeschwindigkeit, Salinität, Temperatur etc. hin untersucht werden sollen. Bisher ist das nur an ausgewählten Punkten möglich.

Im Fall der Präzisionslandwirtschaft (Precision Farming) (Nash et al., 2007) werden Sensorknoten über Agrarflächen ausgebracht, die in der Lage sind, den Boden auf unterschiedliche chemische und biologische Substanzen, pH - Werte und Bodenfeuchten zu untersuchen. Aus deren Daten ließen sich z.B. ein eventueller Pflanzenschutz-, Dünge- oder Bewässerungsbedarf ermitteln. Finanziell würde bei dieser Anwendung durch den sparsamen Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln der Landwirt profitieren sowie die Umwelt durch geringere Pflanzenschutzmittelbelastung.

Aber auch das Erkunden von Tierverhalten in natürlichen oder auch künstlichen Umgebungen ist ein interessanter Anwendungsfall. Bei dem Great-Duck-Island-Project wurde das Brutverhalten von Schwalben durch auf der Insel installierte Sensoren untersucht (Mainwaring et al., 2002). Dies ist eines der bekanntesten frühen Beispiele von Geosensornetzen. Im Skomer Island Project wird eine Kombination aus GPS und drahtlosen Sensornetzen verwendet, um das Fütterungs- und Futter-suchverhalten von Seevögeln zu überwachen (Guilford et al., 2007). Im Precision Livestock Farming (der hochgenauen Nutztierhaltung) sind Geosensornetze zur Beobachtung des Verhaltens von Nutztieren von Interesse. Neben den zurückgelegten Wegen oder Fresszeiten werden in (Sikka et al. 2006) auch Reaktionen auf Aktoren (Vibration und Schall) einbezogen.

5.2 Verbesserung des Lebensstandards

Auf dem Gebiet des sogenannten Health Monitoring ist mit der Überwachung der Vitalfunktion älterer Menschen eine Erhöhung ihrer Lebensqualität denkbar. So können Sensornetze in Wohnungen derart platziert werden, dass der Hausarzt jederzeit über den jeweiligen aktuellen Aufenthaltsort, Vital- und Umgebungszustand informiert ist (Jafari et al., 2005), (Rost und Balakrishnan, 2006). Ändert sich die Position der betroffenen Person in einer ungewöhnlichen Position und Umgebung nicht

innerhalb einer gewissen Zeit, weil sie z.B. nach einem Sturz nicht in der Lage ist Hilfe zu rufen, ist eine automatische Alarmierung der jeweiligen Rettungsstelle möglich.

5.3 Geosensornetzwerke für Industrie und Militär

Auch in der Industrie ist der Einsatz von Sensornetzwerken zum Monitoring und zur Kosteneinsparung möglich. Dazu ist es denkbar, in großen Werkshallen Objekte zu orten oder durch Produktions- und Lagerstraßen nachzuverfolgen. Ein Beispiel stellt das "Center for Life Science Automation" in Rostock-Warnemünde dar. Hier wurden ganze Räume mit Sensoren ausgestattet, welche zahlreiche Parameter messen. Dabei können z.B. eine gleichbleibende Temperatur oder saubere, giftfreie Luft gewährleistet werden. Mittels solcher Sensoren wären auch Personen oder Mischproben auf Transportwagen zu orten (Reichenbach et al., 2004), (Blumenthal et al., 2005a), (Grassert et al., 2006).

Auch das Militär hat ein erhebliches Interesse an der Weiterentwicklung von Sensoren und -netzwerken. So können beispielsweise mit Hilfe von Sensornetzwerken Panzer aufgespürt oder feindliche Stellungen ausspioniert sowie Truppenbewegungen mittels Sensoren detektiert werden. In den USA finanziert die "Defense Advanced Research Projects Agency" (DARPA) zahlreiche solcher Projekte.

6 Ausblick

Im Vordergrund zukünftiger wissenschaftlicher Arbeiten im DFG-Projekt 'GeoSens' steht vor allem die Optimierung und Weiterentwicklung von DLS. Dabei gilt es, ins-

besondere Ausreißer in Distanzmessungen vorab zu eliminieren. Weiterhin erscheint es sinnvoll, eine gewichtete Methode der kleinsten Quadrate auszuführen, um zuverlässigen Eingangswerten entsprechend höhere Gewichte in der Berechnung zu verleihen.

Bei dem iDLS-Algorithmus, der hier nur am Rande erwähnt wurde, könnte zudem in jedem Iterationsschritt eine Genauigkeitsverbesserung berechnet werden. Diese ermöglicht generelle Aussagen über die Entfernung der aktuellen Schätzposition zu der gesuchten exakten Position. Falls die Verbesserung einen Grenzwert erreicht, erfolgt zur Vermeidung eines unnötigen Energieverbrauchs der Abbruch des Algorithmus.

Besonders wichtig ist zudem eine intensive praktische Analyse der Algorithmen in größeren Netzwerken mit sehr viel mehr Knoten. Bisher stützen sich die praktischen Ergebnisse zu DLS auf sehr wenige Knoten (Simulationen mit bis zu 100 Beacons) und verhindern somit relevante Aussagen über den tatsächlichen Kommunikationsaufwand oder den Energieverbrauch in sehr großen Netzwerken mit Zehntausenden von Knoten.

Danksagung

Dieses Projekt wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter den Förderkennzeichen BI467/17-1 und TI254/15-1 (Schlüsselwort: GeoSens) gefördert. Ein besonderer Dank gilt auch allen Gutachtern, die durch ihre hilfreichen Kritiken, Kommentare und dem damit verbundenen Zeitaufwand zur Verbesserung dieses Papers beitragen. ■

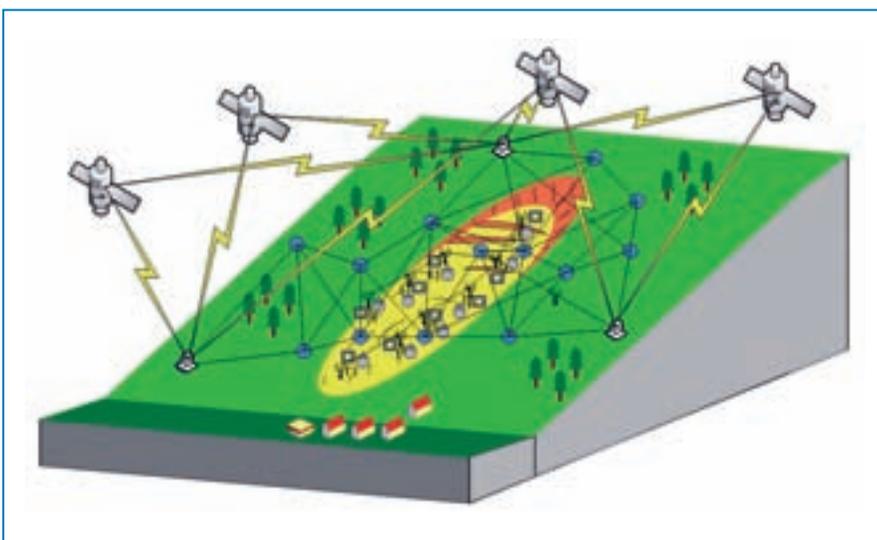


Abbildung 16: Hangrutschungsszenario

Literatur:

- Ahmed, A. A., Shi, H. und Shang, Y., 2005.: SHARP: A New Approach to Relative Localization in Wireless Sensor Networks. In: Second International Workshop on Wireless Ad Hoc Networking (WWAN) ICDCSW'05, S. 892–898.
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramanian, Y. und Cayirci, E., 2002. Wireless Sensor Networks: A Survey. *Computer Networks* 38(3), S. 393–422.
- Alouini, M., 1996.: Global Positioning System: An Overview. California Institute of Technology.
- Arnhardt, C., Asch, K., Azzam, R., Bill, R., Fernandez-Steeger, T., Hornfeld, S., Kallash, A., Niemeyer, F., Ritter, H., M.Toloczyki und Walter, K., 2007. Sensor based Landslide Early Warning System - SLEWS, Development of a Geoservice Infrastructure as Basis for Early Warning Systems for Landslides by Integration of Real-Time Sensors. Vol. 10, Koordinationsbüro GEOTECHNOLOGIEN.
- Bahl, P. und Padmanabhan, V., 2000. RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System. In: 5.GI/ ITG KuVS-Fachgespräch Drahtlose Sensornetzwerke, Technischer Bericht 2006/7., S. 775–784.
- Bill, R., Cap, C., Kofahl, M. und Mundt, T., 2004. Indoor and outdoor positioning in Mobile Environments – A Review and some Investigations on WLAN Positioning. *Geographic Information Sciences* 10(2), S. 91–98.
- Blumenthal, J., Reichenbach, F. und Timmermann, D., 2005a. Drahtlose Sensornetzwerke in der Laborautomatisierung. In: GIT Labor-Fachzeitschrift., S. 128–129.
- Blumenthal, J., Reichenbach, F. und Timmermann, D., 2005b. Precise Positioning with a Low Complexity Algorithm in Ad hoc Wireless Sensor Networks. *PIK - Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation* 28(2), S. 80–85.
- Born, A., Reichenbach, F., Bill, R. und Timmermann, D., 2006. Bestimmung Optimaler Startwerte zur Exakten Lokalisierung mittels Geodätischer Ausgleichung. In: 5.GI/ ITG KuVS-Fachgespräch Drahtlose Sensornetzwerke, Technischer Bericht 2006/7., S. 93–98.
- Bulusu, N., 2000. GPS-less low cost outdoor localization for very small devices. *IEEE Personal Communications Magazine* 7(5), S. 28–34.
- Chintalapud, K., Fu, T., Peak, J., Kothari, N., Rangwala, S., Caffrey, J., Govindan, R., Johnson, E. und S.Masri, 2006. Monitoring Civil Structures with a Wireless Sensor Network. In: *IEEE Internet Computing* 10., S. 26–14.
- Dunkels, A., Vogt, T., Alonso, J., Ritter, H. und Schiller, J., 2004. Connecting Wireless Sensor networks with TCP/IP Networks. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Wired/*

Literatur: (Fortsetzung)

- Wireless Internet Communications., S. 143–152.
- Gibson, J., 1996. *The Mobile Communications Handbook*. CRC Press.
- Golub, G. H. und Loan, C. F. V., 1996. *Matrix Computations*. The Johns Hopkins University Press.
- Grassert, F., Reichenbach, F., Blumenthal, J., Gólatkowski, F., Thurow, K. und Timmermann, D., 2006. Drahtloses Sensornetzwerk - Messen, was los ist. In: *Landestechnologieanzeiger*, Vol. 1, S. 4–5.
- Guilford, T. C., Meade, J., Freeman, R., M., P. C., Biro, D., Evans, T., Bonadona, F. und Boyle, D., 2007. Tracking the foraging movements of Manx shearwaters from Skomer Island by GPS. In: *Technical report for the Countryside Council for Wales*.
- Handy, M., 2006. *Energieeffiziente Algorithmen und Protokolle für drahtlose Ad-hoc- und Sensornetze*. Dissertationsschrift, Universität Rostock.
- Jafari, R., Encarnacao, A., Zahoor, A., Dabiri, F., Noshadi, H. und Sarrafzadeh, M., 2005. Wireless Sensor Networks for Health Monitoring. In: *Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems*, S. 479–481.
- Kahmen, H., 2005. *Vermessungskunde*. Walter de Gruyter.
- Karalar, T. C., Yamashita, S., Sheets, M. und Rabaey, J., 2004. An Integrated, Low Power Localization System for Sensor Networks. In: *First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services (MobiQuitous'04)*, S. 24–30.
- Kwon, Y., Mechitov, K., Sundresh, S., Kim, W. und Agha, G., 2005. Resilient Localization for Sensor Networks in Outdoor Environments. In: *25th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'05)*, S. 643–652.
- Lagarias, J., Reeds, J., Wright, M. und Wright, P., 1998. Convergence Properties of the Neldermead Simplex Methode in Low Dimensions. 9, S. 112–147.
- Landsiedel, O., Wehrle, K. und Gotz, S., 2005. Accurate Prediction of Power Consumption in Sensor Networks. In: *Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors*, S. 37–44.
- Langendoen, K. und Reijers, N., 2003. Distributed Localization in Wireless Sensor Networks: A Quantitative Comparison. *Computer Networks* (Elsevier), special issue on Wireless Sensor Networks 43(4), S. 499–518.
- Mainwaring, A., Polastre, J., Szewczyk, R., Culler, D. und Anderson, J., 2002. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. In: *International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, S. 88–97.
- Min, R., Bhardwaj, M., Cho, S., Sinha, A., Shih, E., Wang, A. und Chandrakasan, A., 2001. Low-Power Wireless Sensor Networks. In: *International Conference on VLSI Design*.
- Murphy, W. und Hereman, W., 1995. Determination of a Position in Three Dimensions using Trilateration and Approximate Distances. *Technischer Bericht MCS-95-07*.
- Nash, E., Korduan, P. und Bill, R., 2007. Optimising data flows in precision agriculture using open geospatial web services. In: J. Stafford (ed.), *Precision Agriculture '07*, NL: Wageningen Academic Publishers, S. 753–759.
- Niculescu, D. und Nath, B., 2001. Ad hoc positioning system (APS). In: *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference*, S. 2926–2931.
- Niculescu, D. und Nath, B., 2003. Ad Hoc Positioning System (APS) using AOA. In: *Proceedings of the IEEE Annual Joint Conference Computer and Communications Societies*, S. 1734–1743.
- Reichenbach, F., 2007. *Ressourcensparende Algorithmen zur exakten Lokalisierung in drahtlosen Sensornetzwerken*. Dissertationsschrift, Universität Rostock.
- Reichenbach, F., Bill, R. und Timmermann, D., 2005a. Lokalisierungstechniken zur verteilten Berechnung in energielimitierten drahtlosen Sensornetzwerken. In: *Münsteraner GI-Tage, Geosensornetzwerke - von der Forschung zur praktischen Anwendung*, S. 25–37.
- Reichenbach, F., Blumenthal, J. und Timmermann, D., 2004. Drahtlose Sensornetzwerke in der Laborautomatisierung. In: *GI Laboratory IT User Service (LITUS)*, S. 20–21.
- Reichenbach, F., Bobek, A., Hagen, P. und Timmermann, D., 2006a. Increasing Lifetime of Wireless Sensor Networks with EnergyAware Role-Changing. In: *Proceeding of the 2nd IEEE International Workshop on Self-Managed Networks, Systems and Services*, S. 157–170.
- Reichenbach, F., Born, A., Salzmann, J., Timmermann, D. und Bill, R., 2007. DLS: A Resource-Aware Localization Algorithm with High Precision in Large Wireless Sensor Networks. In: *4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, 2007. S. 247–254.
- Reichenbach, F., Born, A., Timmermann, D. und Bill, R., 2006b. A Distributed Linear Least Squares Method for Precise Localization with Low Complexity in Wireless Sensor Networks. In: *2nd IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'06)*, Springer Verlag, S. 514–528.
- Reichenbach, F., Born, A., Timmermann, D. und Bill, R., 2006c. Splitting the Linear Least Squares Problem for Precise Localization in Geosensor Networks. In: *GIScience 2006*, S. 321–337.
- Reichenbach, F., Handy, M. und Timmermann, D., 2005b. Monitoring the Ocean Environment with Large-Area Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 8th EUROMICRO Conference on Digital System Design*, S. 57–58.
- Reichenbach, F. und Timmermann, D., 2005. Großflächige drahtlose Sensornetze zur Überwachung der Meeresumwelt.
- Reichenbach, F. und Timmermann, D., 2006. Indoor Localization with Low Complexity in Wireless Sensor Networks. In: *4th International IEEE Conference on Industrial Informatics*, S. 1018–1023.
- Rost, S. und Balakrishnan, H., 2006. Memento: A Health Monitoring System for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, S. 575–584.
- Salzmann, J., Kubisch, S., Reichenbach, F. und Timmermann, D., 2007. Energy and Coverage Aware Routing Algorithm in Self Organized Sensor Networks. In: *Proceeding of the 4th International Conference on Networked Sensing Systems*, S. 77–80.
- Savarese, C., Rabaey, J. und Langendoen, K., 2002. Robust Positioning Algorithms for Distributed Ad-hoc Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference*, S. 317–327.
- Savvides, A., Han, C.-C. und Srivastava, M. B., 2001. Dynamic fine grained localization in ad-hoc networks of sensors. In: *7th ACM MobiCom (Rome, Italy, 2001)*, S. 166–179.
- Schulz, J., 2006. *Entwicklung eines funkgestützten Sensorknotens zur Detektion der Feuchtigkeit in künstlichen Deichen*. Studienarbeit, Universität Rostock.
- Sikka, P., Corke, P., Valencia, P., Crossman, C., Swain, D. und G. Bishophurley, 2006. *Wireless Adhoc Sensor and Actuator Networks on the Farm*. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, S. 492–499.
- Stefanidis, A. und Nittel, S., 2004. *GeoSensor Networks*. CRC Press.
- Tian, H., Chengdu, H., Brian, B. M., John, S. A. und Tarek, A., 2003. Range-free localization schemes for large scale sensor networks. In: *9th annual international conference on Mobile computing and networking*.
- Werner-Allen, G., Lorincz, K., Welsh, M., Marcillo, O. und Johnson, J., 2006. Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano. In: *IEEE Internet Computing* 10., S. 18–25.
- Yang, X., Ong, K., Dreschel, W., Zeng, K., Mungle, C. und Grimes, C., 2002. Design of a Wireless Sensor Network for Long-term In-Situ Monitoring of an Aqueous Environment. In: *Sensors*, S. 455–472.