

# Lokation in Sensornetzen

Andreas Diener

Betreuerin: Svetlana Domnitcheva

ETH Zürich – Departement Informatik  
Seminar Verteilte Systeme zum Thema Sensornetze  
andiener@student.ethz.ch

*Abstract* - Für viele Anwendungen von Sensornetzen sind Informationen über die Lokation eines Knotens beziehungsweise eines Ereignisses von grundlegender Bedeutung. Auch basieren einige der im Seminar bisher vorgestellten Protokolle und Algorithmen auf Positionsinformationen, so zum Beispiel das in [5] vorgestellte TTDD Routing Protokoll oder das Prinzip des in [5] und [6] verwendeten Clusterings, das in diversen Bereichen zur Anwendung kommt. In Umwelt und Naturbeobachtungen möchte man nicht wissen bei welchem Knoten, sondern wo geographisch sich ein Objekt befindet. Es stellt sich die Frage, wieso man nicht jeden einzelnen Knoten mit GPS oder einem ähnlichen globalen Positionierungssystem ausrüstet. Anhand von Beispielen sollen die Probleme aber auch die bisher gefundenen Lösungen vorgestellt werden.

## 1. EINFÜHRUNG

### A. Motivation

Sensornetze ermöglichen eine immer bessere Beobachtung der Umgebung. Anwendungen schliessen Umweltbeobachtungen, unauffälliges Verfolgen von Tieren aber auch das Markieren von Gegenständen in Fabriken oder Spitälern ein. Für solche Anwendungen müssen die einzelnen Sensorknoten klein, leicht und unaufdringlich sein. Dies bedeutet eine substantielle Einschränkung der einem Sensorknoten zur Verfügung stehenden Hardware. Die Knoten solcher Netze benötigen oft die Fähigkeit, die eigene Position bestimmen zu können. Mit Informationen über die Lokation lassen sich energieeffiziente Routingverfahren implementieren, kontextsensitive Anwendungen können geographisch in der Nähe liegende Geräte gezielt ansprechen und eine lokationsbasierte Koordination unter den Knoten wird ermöglicht.

### B. Überblick

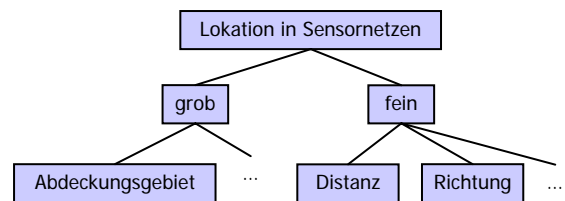


Abbildung 1: Methoden im Überblick

Lokalisierungsmethoden in Sensornetzen können in fein- und grobkörnige Methoden eingeteilt werden. Typische Vertreter der *grobkörnigen Positionierungsmethoden* basieren auf der Tatsache, dass sich Knoten im Abdeckungsgebiet anderer Knoten befinden. Man schliesst also aus der Existenz einer Kommunikationsverbindung zwischen zwei Knoten auf deren geographische Nähe, da die Kommunikationsreichweite beschränkt ist. *Feinkörnige Positionierungsmethoden* hingegen benutzen genauer gemessene Informationen, wie die Distanz oder den Winkel zu anderen Knoten für die Positionierung. Somit kann man in vergleichbaren Umgebungen mit feinkörnigen Methoden eine bessere Positionierungsgenauigkeit erreichen als mit grobkörnigen.

### C. Besonderheiten der Lokation in Sensornetzen

Knoten in Sensornetzen sind typischerweise klein, billig und beschränkt in Energie- und Rechenressourcen. Die Positionierung soll diese Aspekte berücksichtigen, also energiesparend und mit möglichst geringem Rechenaufwand durchgeführt werden können. Oben genannte Gründe schliessen einen Einbau von GPS (Global Positioning System) [7] in allen Sensorknoten aus. Eine Positionierung mittels GPS setzt eine Kommunikationsmöglichkeit mit den Satelliten voraus, welche nicht bei allen Anwendungen von Sensornetzen gegeben ist.

## D. Techniken

Knoten können mit verschiedenen Techniken kommunizieren und Informationen über Standort, Distanz und Richtung ausfindig machen. Radiofrequenzsignale haben je nach Frequenz und Sendestärke eine, im Vergleich mit anderen Techniken, grosse Reichweite. Akustische Signale weisen eine langsamere Signalgeschwindigkeit auf. Da die Signalstärke von Radio- wie auch akustischen Signalen mit der Distanz abnimmt, ergibt sich eine Möglichkeit, die Entfernung zu messen.

Es kommen auch optische Techniken zum Einsatz. Laser werden für Winkel und Distanzmessungen eingesetzt und mit Kameras kann überprüft werden, ob eine Sichtverbindung zu Objekten besteht.

## 2. GROBKÖRNIGE POSITIONIERUNGSMETHODEN

Wie zu Beginn erwähnt, schliesst man in groben Positionierungsmethoden typischerweise aus Kommunikationsverbindungen auf geographische Nähe. Daraus erfolgt eine Positionsabschätzung. Im Folgenden sollen zwei Methoden im Detail betrachtet werden, die dieses Konzept umsetzen.

### A. Verteilter, grobkörniger Lokalisierungs-Algorithmus

In [1] wird eine verteilte, grobkörnige Methode zur Lokalisierung in Sensornetzen vorgestellt. Referenzknoten mit bekannten Positionen  $(X_i, Y_i)$  bis  $(X_n, Y_n)$  übermitteln in regelmässigen Zeitintervallen  $T$  ein Beacon-Signal, welches im Wesentlichen die Position des Referenzknotens enthält. Die Knoten mit unbekannter Position sammeln über eine fixe Periode  $S$  die empfangenen Beacon-Signale verschiedener Referenzknoten und berechnen ihre Position mit folgender Formel.

$$(X_{est}, Y_{est}) = \left( \frac{X_{i_1} + \dots + X_{i_k}}{k}, \frac{Y_{i_1} + \dots + Y_{i_k}}{k} \right)$$

$(X_{est}, Y_{est})$  steht für die geschätzte Position des Empfängers und  $k$  für die Anzahl empfangener Referenzpositionen.

Ein Knoten positioniert sich also im Schwerpunkt der Referenzknoten deren Signale er empfängt.

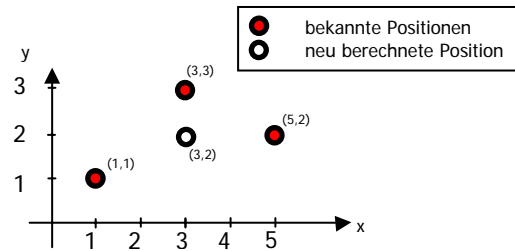


Abbildung 2: Positionierung im Schwerpunkt der benachbarten Referenzknoten

### A.1 Theoretisches Modell

Zur Abschätzung der erreichbaren Genauigkeit wird ein idealisiertes Modell der Radiokommunikation angenommen: das Beacon-Signal eines Referenzknotens kann bis zu einer bestimmten Entfernung  $R$  empfangen werden und alle Referenzknoten senden mit identischer Sendeleistung. Im Gebäude unterscheiden sich die experimentell ermittelten Daten von den theoretischen. Das Signal wird von Wänden und anderen Gegenständen so stark reflektiert und absorbiert, dass eine Positionierung verunmöglicht wird.

Draussen hingegen entsprechen die Messungen weitgehend dem theoretischen Modell, wie folgende Resultate zeigen. In die Ecke eines Parkplatzes wird ein sendender Referenzknoten gestellt und in einem Quadrat mit einer Seitenlänge von 10m das Bestehen der Verbindung in 1m Intervallen überprüft, wie dies in Abbildung 3 dargestellt ist. In 87% der Fälle stimmen die Messungen mit den theoretischen Erwartungen überein. Alle Fehler befinden sich am Rande des Gebietes und es gibt keine Bereiche ohne Empfang im Inneren des Gebietes.

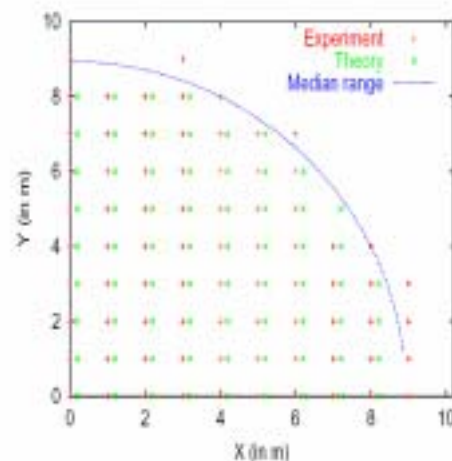


Abbildung 3: Signalreichweite des Referenzknotens in der Position (0,0)

## A.2 Genauigkeit

Um nun die Genauigkeit der Lokalisierungsmethode beurteilen zu können, wird der Lokalisierungsfehler  $LE$  als Distanz zwischen der berechneten und der tatsächlichen Position  $(X_a, Y_a)$  verwendet:

$$LE = \sqrt{(X_{est} - X_a)^2 + (Y_{est} - Y_a)^2}$$

Wenn man in jeder Ecke des 10m Quadrates einen Referenzknoten platziert und mit der beschriebenen Methode die Position berechnet, ergibt sich im Experiment ein Lokalisierungsfehler wie in Abbildung 4 dargestellt. Im Schwerpunkt des Quadrates ist der Fehler am geringsten und nimmt gegen die Ecken hin zu. Der durchschnittliche Fehler liegt bei 1.83m bei einer Standardabweichung von 1.07m. Der minimale Fehler beträgt 0m, der maximale 4.12m.

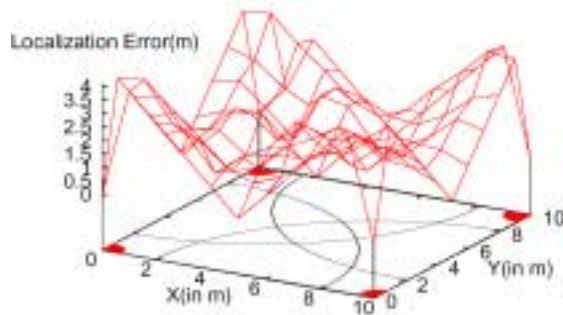


Abbildung 4: Position vs. Lokalisierungsfehler

## A.3 Auswertung

Die vorgestellte Methode skaliert gut und ist verteilt und ad hoc einsetzbar. Bei einer konkreten Implementierung sind die im Folgenden aufgeführten Aspekte zu beachten.

Mögliche Kollisionen von Beacon-Signalen der Referenzknoten müssen verhindert werden, wofür in [1] ein randomisiertes Verfahren vorgestellt wird. Angesichts der beschränkten Ressourcen in Sensornetzen soll der Energieverbrauch minimiert werden. Um eine maximale Energieeffizienz zu erreichen, müssen folgende Parameter optimiert werden: Zeitperiode  $T$  zwischen den Beacon-Signalen eines Referenzknoten, Zeitperiode  $S$  während der ein Knoten die Beacon-Signale einsammelt und die Sendestärke der Referenzknoten.

Es wurde vorausgesetzt, dass die Referenzknoten ihre genaue Position wissen. Vorstellbare Möglichkeiten dies zu erreichen, stellen die Konfiguration von Hand, sowie der Gebrauch einer feinkörnigen Positionierungsmethode wie GPS dar.

Der Erfolg der Methode hängt vom einwandfreien Funktionieren der Referenzknoten ab. Diese sollten

deshalb überwacht werden und im Falle eines Fehlverhaltens oder fallender Energieversorgung automatisch ausgeschaltet werden.

## B. Zentral optimierter Lokalisierungs-Algorithmus

Das in [2] erläuterte Verfahren hat zum Ziel, aus gegebenen Nebenbedingungen zentral eine global beste Lösung zu bestimmen. Mit konvexer Optimierung wird ein mögliches Resultat gefunden, welches alle Nebenbedingungen erfüllt. Die Ausgangslage wird in Abbildung 5 aufgezeigt, wobei bekannte und unbekannte Positionsangaben als Knoten und die Nebenbedingungen als Kanten dargestellt werden.

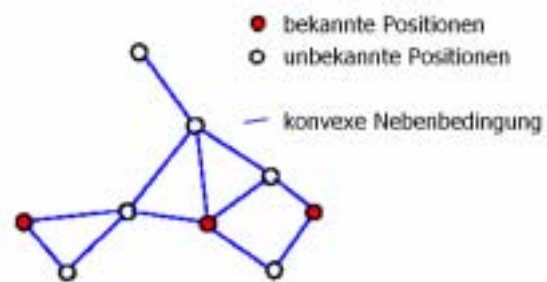


Abbildung 5: Ausgangslage

### B.1 Konvexe Nebenbedingungen

Die Methode setzt voraus, dass die Nebenbedingungen als konvexe Gebiete formuliert werden. Ein Gebiet  $G$  heisst konvex, wenn die direkte Verbindung zweier beliebiger Punkte aus  $G$  auch ganz in  $G$  liegt.

Wenn man von einem idealisierten Modell der Radiokommunikation ausgeht, entspricht das Abdeckungsgebiet eines sendenden Knotens  $a$  einem Kreis und somit einem konvexen Gebiet. Wenn Sensorknoten  $a$  mit einem Sensorknoten  $b$  kommunizieren kann, muss  $b$  im Abdeckungsgebiet von  $a$  liegen, was uns folgende konvexe Nebenbedingung formulieren lässt:

$$\|a - b\|_2 < R \quad (\text{siehe Abbildung 6})$$

Für ein Problem mit Nebenbedingungen, die auf konvexe Gebiete beschränkt sind, lässt sich effizient eine bestmögliche Lösung mittels linearen Programmen (LP) oder deren Generalisierung, semidefiniten Programmen (SDP), berechnen.

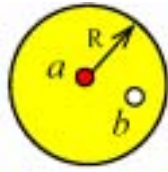


Abbildung 6: Radiokommunikation als konvexe Nebenbedingung

### B.2 Nicht-konvexe Gebiete

Folgende Gebiete können nicht als konvexe Nebenbedingungen formuliert werden.

$$\|a - b\|_2 = r_{ab} \text{ und } \|a - b\|_2 > R$$

Aus diesem Grund ist es nicht möglich, minimale Entfernungen zwischen zwei Knoten zu bestimmen und somit zu verhindern, dass Knoten in einen Punkt zusammenfallen. Für die in Abbildung 7 dargestellte Netzwerktopologie erfüllt das Zusammenfallen aller Knoten in einen Punkt alle Nebenbedingungen und ist somit eine zulässige Lösung.

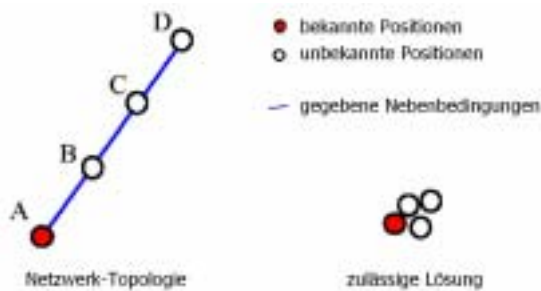


Abbildung 7: Zusammenfallen aller Knoten in einem Punkt

### B.3 Kombination individueller Nebenbedingungen

Die mögliche Positionierung eines Knotens ist eingeschränkt durch seine Kommunikationsverbindungen zu mehreren anderen Knoten und deren Nebenbedingungen. Alternativ ausgedrückt kann man aus den Kommunikationsverbindungen eines Knotens auf das Gebiet schließen, in welchem sich der Knoten befinden muss. Durch die Kombination mehrerer Nebenbedingungen wird dieses Gebiet immer mehr eingeschränkt und somit eine genauere Positionierung ermöglicht. Eine Veranschaulichung dieses Vorgangs findet sich in Abbildung 8.

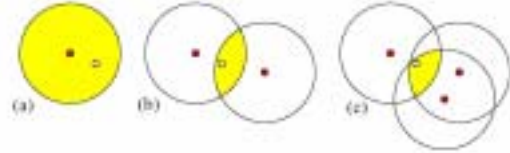


Abbildung 8: Kombination radialer Nebenbedingungen

### B.4 Test der Methode durch Simulation von Sensornetzen

Die beschriebene Methode wurde in Simulationen getestet. Dazu wurden zufällig und uniformverteilt 200 Sensorknoten in einer quadratischen Fläche mit 10 R Seitenlänge verteilt. R entspricht der Kommunikationsreichweite eines Sensorknotens.

Der Lokalisierungsfehler wird mit folgender Formel bestimmt:

$$LE = \frac{1}{n - m} \sum_{i=m+1}^n \|x_{est}^i - x_a^i\|_2$$

$n$  ist die Anzahl Sensorknoten,  $m$  die Anzahl Referenzknoten mit bekannter Position,  $x_{est}^i$  die berechnete Position des Knotens  $x^i$  und  $x_a^i$  dessen tatsächliche Position. Diese Fehlerdefinition entspricht der durchschnittlichen Entfernung von berechneter und tatsächlicher Position aller Knoten, die keine Referenzknoten sind.

Die konvexe Optimierung berechnet das Gebiet, in welchem sich ein Knoten befinden kann, ohne die Nebenbedingungen zu verletzen. Um für einen Knoten eine konkrete Position möglichst gut zu bestimmen, berechnet man den Schwerpunkt des kleinsten Rechtecks, welches jenes Gebiet enthält. Dies ist in Abbildung 9 illustriert.

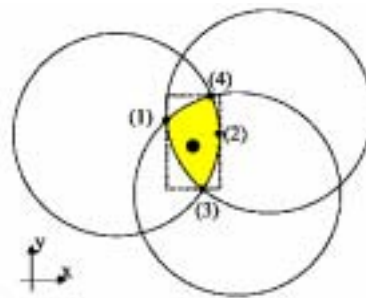


Abbildung 9: Konkrete Positionierung

Folgende Analyse wurde mit radialen Nebenbedingungen in einem Netz mit zufälliger, uniformverteilter Knotenplatzierung ausgeführt.

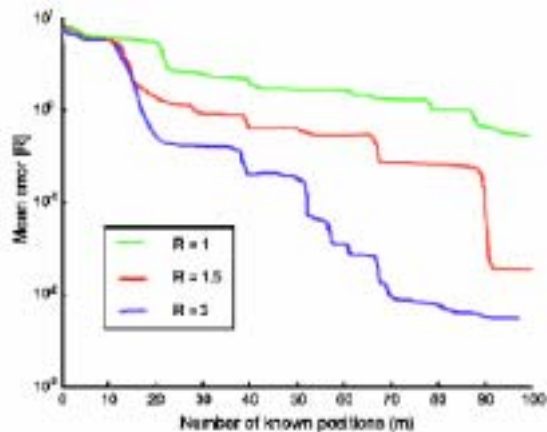


Abbildung 10: Verschiedene Knotendichten

Durch das Erhöhen der Signalreichweite der Knoten kann eine dichtere Platzierung der Knoten simuliert werden. Abbildung 10 zeigt auf, wie sich der durchschnittliche Fehler bei zunehmender Knotendichte verhält. Die Sprünge der Fehlerkurven entstehen durch die Hinzunahme eines "wichtigen" Knotens zu den Referenzknoten und nehmen bei erhöhter Knotendichte zu.

Welches sind aber diese "wichtigen" Knoten?

Wie in Abschnitt 2.B.2 erläutert, haben konvexe, radiale Nebenbedingungen keine Möglichkeit, minimale Distanzen zwischen zwei Knoten festzulegen. Unbekannte Knoten werden so nie ausserhalb der konvexen Hülle aller Referenzknoten platziert. Daher werden die besten Resultate erzielt, wenn die Referenzknoten am Rande des Netzes liegen. Gemittelt über zehn Testnetzwerke ergibt sich durch die Wahl der Referenzknoten nahe bei den Ecken des Netzes eine Verbesserung des mittleren Fehlers von 2.4 R auf 1.2 R. Wenn man bei total 8 Referenzpunkten zusätzlich die Knoten bei den Mittelpunkten der Netzwerkränder zu Referenzknoten macht, verbessert sich der durchschnittliche Fehler von 1.7 R auf 0.72 R. Dies entspricht dem Resultat, das erreicht wird, wenn man 100 Referenzknoten zufällig wählt.

### B.5 Auswertung

Diese Methode erlaubt es, effizient und zentral eine global beste Positionierung zu bestimmen. Die Rechenzeiten für Netze bis 2000 Knoten liegen auf einem durchschnittlichen PC (AMD 400 MHz Prozessor mit 64 MB RAM) unter einer Minute. Für Sensornetze mit 10'000 oder sogar 1'000'000 Knoten wird der Rechenaufwand zu gross, so dass dieser zentrale Ansatz nicht mehr geeignet ist. Es wird vorgeschlagen, das Problem hierarchisch anzugehen oder die Nebenbedingungen pro Knoten zu limitieren.

Bei dieser Methode wurden weder Energie-Aspekte noch Nachrichtenverkehr in Betracht gezogen.

## 3. FEINKÖRNIGE POSITIONIERUNGSMETHODEN

Bei feinkörnigen Positionierungsmethoden werden Messparameter in die Positionsbestimmung einbezogen. Einige Methoden arbeiten zum Beispiel mit Distanzmessungen zwischen verschiedenen Knoten, andere betrachten die Winkel zu Referenzpunkten. Um die Distanz zwischen zwei Knoten zu bestimmen, existieren verschiedene Techniken. RSSI (Received Signal Strength Indicator) zum Beispiel misst die Energie des Signals beim Empfänger. Aus bekannter Sendestärke und der Dämpfung des Signals schliesst man auf die Entfernung des Senders. Alternativ lässt sich aus der Signallaufzeit bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit der Abstand von Sender und Empfänger bestimmen. Auf ToA (time-of-arrival) basierende Methoden benutzen dafür die Ankunftszeit eines Signals, auf TDoA (time-difference-of-arrival) basierende die unterschiedlichen Ankunftszeiten verschiedener Signale.

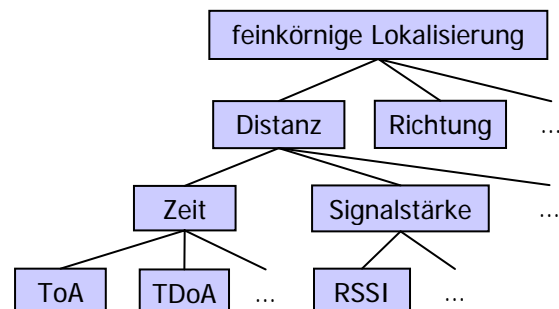


Abbildung 11: Feinkörnige Positionierungsmethoden im Überblick

### A. AHLoS – Feinkörnige Lokalisierungsmethode

Ad-Hoc Localization System (AHLoS) [3] [8] ist eine feinkörnige Positionierungsmethode, die sowohl verteilt als auch zentral durchgeführt werden kann. Es werden Referenzknoten mit bekannten Positionen vorausgesetzt. Das Protokoll besteht aus drei Phasen:

- Phase 1 – Distanzmessung
- Phase 2 – Kombination
- Phase 3 – Referenzknoten

#### Phase 1 - Distanzmessung

Jeder Knoten ermittelt die Entfernung zu all seinen Nachbarknoten. Hierfür wurden zwei Methoden getestet, eine nur mit Radiofrequenz-Signalen und eine sowohl mit Ultraschall- als auch mit Radiofrequenz-Signalen.

#### RF-Radio

Für die Distanzmessung mit Radiofrequenz-Signalen wurden WINS Sensorknoten [9] einge-

setzt und beim Empfänger wurde mit RSSI die Stärke des Signals ausgelesen. Abbildung 12 zeigt sowohl die gemessenen als auch die theoretisch erwarteten Signalstärken über verschiedenen Entfernungen. Es ist leicht zu erkennen, dass bei solchen Diskrepanzen zwischen gemessenen und theoretisch berechneten Werten eine Distanzberechnung zu ungenau ausfallen würde und somit für die Positionierung eines Sensorknotens nicht geeignet ist.

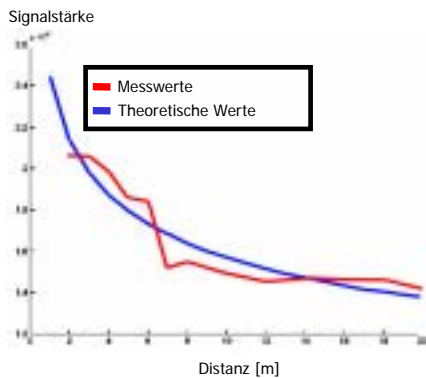


Abbildung 12: RSSI mit WINS Sensorknoten vs. Distanz

### Ultraschall

Medusa Sensorknoten [3] sind sowohl mit RF- als auch mit Ultraschall-Kommunikation ausgerüstet. Die Reichweite des Ultraschallsenders beträgt ungefähr drei Meter. Wenn der Sender gleichzeitig ein RF- und ein Ultraschall Signal aussendet, kann der Empfänger wie in Abbildung 13 illustriert die Differenz der Signallaufzeiten bestimmen und mit Hilfe der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $S$  des Ultraschallsignals die Distanz zwischen Sender und Empfänger berechnen.

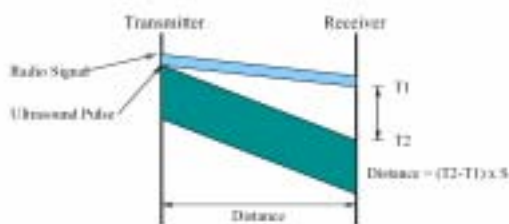


Abbildung 13: TDoA zur Distanzbestimmung

Die Signallaufzeit des Radio-Signals wird vernachlässigt, da es sich um kleine Distanzen handelt. Diese Methode liefert erheblich bessere Messungen, was in Abbildung 14 gezeigt wird.

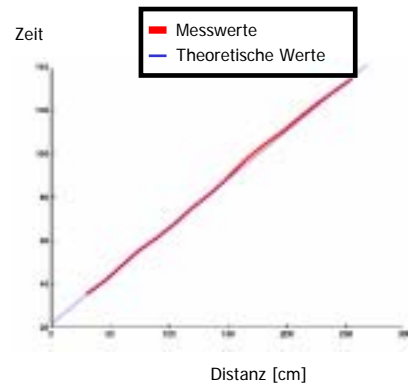


Abbildung 14: TDoA mit Medusa Sensorknoten vs. Distanz

Bei Ultraschall ist zu beachten, dass atmosphärische Parameter wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Luftdruck einen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit haben [4].

### Phase 2 – Kombination

In der Kombination berechnet ein Knoten aus den bekannten Positionen der Referenzknoten und den in Phase 1 ermittelten Distanzen seine eigene Position. Er benutzt dafür den Iterativen Multilateration Algorithmus. Zuerst sollen hier nun zwei grundlegende Komponenten erläutert werden, die für ebendiese Iterative Multilateration benötigt werden, nämlich die Atomare Multilateration sowie die Kollaborative Multilateration.

#### Atomare Multilateration

Falls ein Knoten drei oder mehr Referenzknoten in seiner Nachbarschaft hat und er die Distanzen zu diesen Knoten kennt, kann, wie in Abbildung 15 illustriert ist, die Position des Knotens bestimmt werden.

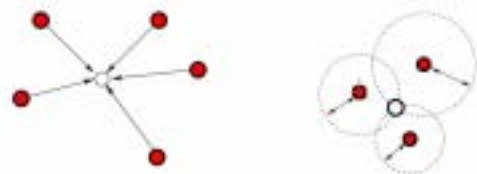


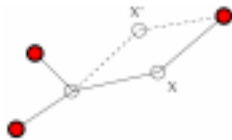
Abbildung 15: Atomare Multilateration

Dazu wird ein Gleichungssystem aufgestellt, indem für jede Kante zu einem Referenzknoten eine Gleichung formuliert wird. Mit einer Maximum Likelihood Schätzung wird die Position berechnet, die den Gesamtfehler der Distanzmessungen minimiert.

#### Kollaborative Multilateration

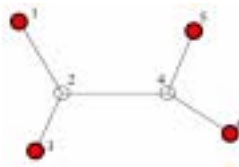
Falls ein Knoten weniger als drei Referenzknoten in seiner Nachbarschaft hat, versucht er an einer kollaborativen Multilateration teilzunehmen. Ein Knoten kann an einer kollaborativen Multilateration

teilnehmen, wenn er Referenzknoten ist oder wenn er mindestens drei Nachbarn hat, die entweder Referenzknoten sind oder mindestens drei teilnehmende Nachbarn haben. Diese Regel muss eingehalten werden, um unterbestimmte Gleichungssysteme zu verhindern, wie dies in Abbildung 16 der Fall ist. Hier ist es mit den vorhandenen Informationen (Positionen der Referenzknoten und Distanzen zwischen den Knoten) nicht möglich, die Knoten eindeutig zu platzieren. Position  $x'$  und  $x$  erfüllen die Nebenbedingungen in gleichem Masse.



**Abbildung 16:** Fehlschlagende Kollaborative Multilateration

Falls ein Knoten nach dieser Regel an einer Kollaborativen Multilateration teilnehmen darf, stellt er wiederum für jede Kante eine Gleichung auf. In dem in Abbildung 17 gezeigten Beispiel ergibt das fünf Gleichungen, die dann mit einer Optimierungsmethode wie Gradient Descend [10] oder Simulated Annealing [11] so gelöst werden, dass der Gesamtfehler der Distanzmessungen minimiert wird. Dies erlaubt eine feine Positionsbestimmung, auch wenn ein Knoten weniger als drei Referenzknoten in seiner Nachbarschaft hat.



**Abbildung 17:** Kollaborative Multilateration

### *Iterative Multilateration*

Die Atomare und die Kollaborative Multilateration sind Bausteine, die bei der Iterativen Multilateration verwendet werden. Falls ein Knoten drei oder mehr Referenzknoten in seiner Nachbarschaft hat, wendet er vorrangig die Atomare Multilateration an. Falls dies nicht möglich ist, versucht er an einer Kollaborativen Multilateration teilzunehmen.

### *Phase 3 – Referenzknoten*

Nachdem mit Hilfe der Iterativen Multilateration die Position eines Knotens bestimmt wurde und dieser seine Position kennt, kann er im Sensornetz als Referenzknoten fungieren und weiteren Knoten bei deren Positionierung behilflich sein.

### *Diskussion von AHLoS*

Die Kollaborative Multilateration bedarf der Lösung eines oftmals grossen Gleichungssystems und kann deshalb sehr aufwändig sein. Die Berechnung kann zentral oder verteilt, in den dürftig ausgerüsteten Sensorknoten, durchgeführt werden. Falls man sich für eine zentrale Implementierung entscheidet, muss man in Kauf nehmen, dass alle Informationen zum zentralen Punkt der Berechnung gelangen müssen. Dies resultiert in einem erhöhten Energieverbrauch derjenigen Knoten, die um das Zentrum herum liegen, und natürlich in einem signifikanten Anstieg der total übertragenen Bytes, was den totalen Energieverbrauch des Netzwerks erhöht. Zusätzlich werden Änderungen der Netzwerktopologie bei zentraler Berechnung nicht sofort beachtet, da die entsprechenden Informationen zuerst zum Zentrum gelangen, in der Berechnung berücksichtigt und dann wieder zu den Knoten zurückgelangen müssen. Andererseits kann man mit stärker ausgerüsteten Rechenknoten den normalen Sensorknoten einen manchmal grossen Rechenaufwand abnehmen.

AHLoS beschreibt ein Vorgehen, wie man in einem Sensornetz eine feine Lokalisierung mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern durchführen kann.

## 4. SCHLUSSBETRACHTUNGEN

Lokalisierung in Sensornetzen ist keineswegs eine triviale Herausforderung und bildet doch für viele Anwendungen eine kritische Voraussetzung. Alle betrachteten Positionierungsmethoden setzen die Existenz von Referenzknoten mit bekannten Positionen voraus. Dies zu erreichen kann in konkreten Anwendungen eine grosse Hürde darstellen, nämlich wenn eine Positionsbestimmung mit GPS nicht möglich ist und wenn man auch nicht zu den Sensorknoten gelangen kann, um eine manuelle Konfiguration vorzunehmen.

In allen Methoden wurden durch Kommunikation oder Messverfahren Daten gesammelt, aus denen in einer anschliessenden Berechnung Informationen über die Lokation der Knoten bestimmt wurden. Verschiedene Techniken der Kommunikation und Messung wurden vorgestellt und Aspekte der verteilten wie zentralen Berechnung diskutiert.

Die erreichbare Genauigkeit der Methoden liegt im Rahmen von wenigen Zentimetern bis mehreren Metern. Eine an die Applikationsbedürfnisse angepasste Wahl der Lokalisierungsmethode ist demnach von grosser Bedeutung.

Die existierenden Methoden werden in fein- und grobkörnige Positionierungsmethoden unterteilt. Anhand dreier Beispiele wurden detaillierte Aspekte und Probleme aufgezeigt.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] N. Bulusu, J. Heidemann, D. Estrin, "*GPS-less Low Cost Outdoor Localization For Very Small Devices*", Department of Computer Science, University of Southern California, Apr. 2000
- [2] L. Doherty, K. S. J. Pister, L. El Ghaoui, "*Convex Position Estimation in Wireless Sensor Networks*", Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, Apr. 2001
- [3] A. Savvides, C. Han, M. B. Strivastava, "*Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors*", Department of Electrical Engineering, University of California, Los Angeles, Jan. 2001
- [4] L. Girod, D. Estrin, "*Robust Range Estimation Using Acoustic and Multimodal Sensing*", Department of Electrical Engineering, University of California, Los Angeles, Mar. 2001
- [5] P. von Rickenbach, "*Datenverarbeitung und Aggregation, Routing*", Department of Computer Science, ETH Zürich, [http://www.inf.ethz.ch/vs/edu/SS2003/DS/reports/07\\_routing\\_report.pdf](http://www.inf.ethz.ch/vs/edu/SS2003/DS/reports/07_routing_report.pdf)
- [6] H. Zhou, "*Energieeffiziente, drahtlose Sensornetze - Auswirkung der Hardware auf das Protokolldesign*", Department of Computer Science, ETH Zürich, [http://www.inf.ethz.ch/vs/edu/SS2003/DS/reports/02\\_energie\\_report.pdf](http://www.inf.ethz.ch/vs/edu/SS2003/DS/reports/02_energie_report.pdf)
- [7] A. Köhne, M. Wössner, "*GPS - Positionsbestimmung*", <http://www.kowoma.de/gps/Positionsbestimmung.htm>
- [8] A. Savvides, "*The Ad-Hoc Localization System(AHLOS)*", Department of Electrical Engineering, University of California, Los Angeles, <http://nesl.ee.ucla.edu/projects/ahlos/>
- [9] "*Wireless Integrated Network Systems (WINS)*", <http://wins.rsc.rockwell.com/>
- [10] D. J. Dayley, B. M. Bell, "*A Method for GPS Positioning*", IEE Trans., Aerosp. Electron. Syst., 1996
- [11] W. H. Press, "*Numerical recipes in C: the art of scientific computing, 2<sup>nd</sup> ed.*", Cambridge University Press, 1992