

Lokalisierungstechniken zur verteilten Berechnung in energielimitierten drahtlosen Sensornetzwerken

Dipl.-Ing. Frank Reichenbach¹, Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill², Prof. Dr.-Ing. Dirk Timmermann¹

¹Institut für Angewandte
Mikroelektronik und Datentechnik /
Fakultät für Informatik und
Elektrotechnik / Universität
Rostock

²Professur für Geodäsie und
Geoinformatik / Agrar- und
Umweltwissenschaftliche Fakultät
/ Universität Rostock

{frank.reichenbach; ralf.bill; dirk.timmermann}@uni-rostock.de

ZUSAMMENFASSUNG

Ein drahtloses Sensornetzwerk besteht aus tausenden Sensorknoten, die in der Nähe eines Phänomens von Interesse verteilt werden. Die Aufgabe des Sensornetzwerkes ist die Messwertaufnahme physikalischer Umgebungsdaten durch integrierte Sensoren. Aufgrund der geringen Größe der Sensorknoten, bestehend aus einer Batterie, einem Prozessor und Speicher, sind die Energiereserven im Allgemeinen stark limitiert. Eine wesentliche Eigenschaft in solchen Sensornetzen ist das Lokalisationsbewusstsein der Sensorknoten, um z.B. einen erfassten Umweltparameter einem bestimmten Raumausschnitt zuordnen zu können. Da derzeitige Methoden zur Lokalisierung zu ungenau oder nicht ressourcenarm genug sind, präsentieren wir in diesem Artikel approximative, energiearme Algorithmen zur Positionsbestimmung einzelner Knoten. Im Detail wird ein Algorithmus mit Schwerpunktberechnung beschrieben. Durch eine analytische Berechnung kann die optimale Übertragungreichweite von Beacons zur Verringerung der Sendeenergie berechnet werden. Durch Nutzung zusätzlicher Beobachtungsgrößen wie der Signalabschwächung als Gewichtung konnte eine weitere Reduzierung des Lokalisierungsfehlers erreicht werden.

EINLEITUNG

Die steigenden Integrationsdichten im Halbleiterbereich ermöglichen die Entwicklung extrem kleiner, kostengünstiger, intelligenter Sensorknoten, die Berechnungen durchführen und Umweltparameter messen können. Tausende dieser Sensoren bilden durch drahtlose Kommunikation ein selbstkonfigurierbares Sensornetzwerk (Wireless Sensor Network - WSN).

Aufgrund der geringen Größe eines Sensorknotens von einigen Kubikmillimetern sind die Dimensionen für die Konstruktion von Übertragungseinheit und Batterie besonders kritisch. Die knappste Ressource innerhalb eines Netzwerkes ist folglich die zur Verfügung stehende

Energie. Es ist demnach unerlässlich, neben stromsparenden Bauelementen auch energieeffiziente Algorithmen einzusetzen.

Bisher herrschen zur Positionsbestimmung von Sensorknoten noch Näherungsmethoden vor. In einer interdisziplinären Arbeitsgruppe an der Universität Rostock beschäftigen wir uns mit der Entwicklung präziser und rechenarmer Algorithmen zur Lokalisierung von Sensorknoten in drahtlosen Sensornetzwerken.

DRAHTLOSE SENSORNETZWERKE

Ein WSN wird in der Regel über einem Gebiet oder innerhalb eines Objektes von Interesse platziert (Akyildiz et al. 2002). Durch spezielles Routen der Informationen sind aufgenommene Messdaten durch das WSN über Multihopping von Sensorknoten A über D zur Senke zu leiten (Abb. 1). Die Senke besitzt einerseits Schnittstellen zu weiteren Netzen (z.B. das Internet), über welche die Daten zum aufgabenleitenden Knoten gelangen. Andererseits kann sie als Beacon bzw. Infrastrukturknoten ausgebaut weitere Funktionen (Globale Positionierung, Speicher- und Berechnungsleistung) übernehmen.

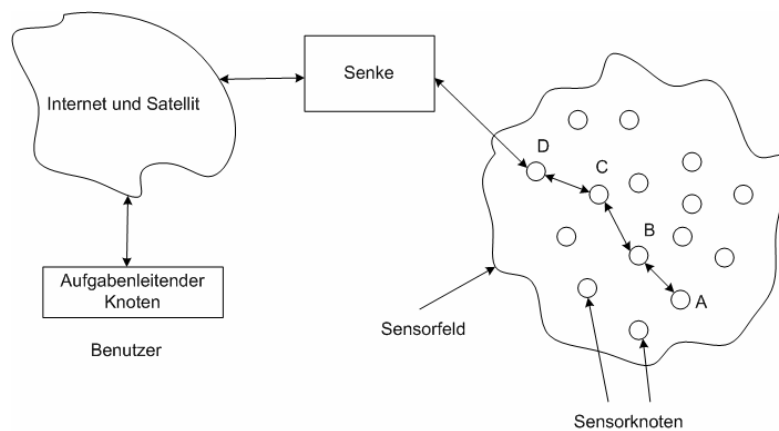


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer Sensornetzwerkumgebung.

Die Entwicklung eines Sensornetzwerkes bedarf hoher Sorgfalt und intensiver Analyse der Umgebung (Blumenthal et al. 2003). Eine gründliche Umsetzung der folgenden Kriterien fördert nicht nur die Robustheit des Gesamtsystems, sondern gewährleistet eine optimale Einsatzfähigkeit:

- Ein Sensornetzwerk muss skalierbar und selbstorganisierend sein.
- Sensornetzwerke unterliegen strengen Hard-/Softwarerestriktionen.
- Kooperative Abarbeitung von Aufgaben führt zu präziseren Ergebnissen und neuen Anwendungsfeldern.

- Sensornetzwerke benötigen Sicherheitsmechanismen, die anpassungsfähig an die sich verändernde Umwelt sind.
- Die eingesetzten Algorithmen und Protokolle müssen energiesparend und speicheroptimiert sein.

Weiterhin zeichnet Sensornetzwerke ein zeitlich unvorhersagbares, dynamisches Verhalten aus. Das Platzieren von zusätzlichen Sensorknoten in einem bestehenden WSN ist vorstellbar. Dies ist nötig, wenn die geforderte Funktionalität durch zu hohen Knotenausfall nicht mehr gewährleistet werden kann. Des Weiteren können zusätzliche Knoten eine Netzwerkregion verstärken, weil die Genauigkeit der Messergebnisse dort nachhaltig wichtiger ist.

Die Anwendungsgebiete für drahtlose Sensornetzwerke sind zahlreich und spiegeln die immer größer werdende Bedeutung dieser Netzwerke wieder (Cerpa et al. 2001, Schwiebert et al. 2001, Srivastava et al. 2001, Tilak et al. 2002). Sie finden beispielsweise Einsatz in Medizin, Umwelttechnik, Katastrophenschutz, Automatisierungstechnik und auch im Heimbereich. Sensornetzwerke übernehmen überwiegend Überwachungs- und Kontrollfunktionen. Falls die Sensorknoten zusätzlich mit Aktoren ausgestattet sind, lassen sich außerdem Steuerungsaufgaben erledigen.

POSITIONSBESTIMMUNG IN DRAHTLOSEN SENSORNETZWERKEN

Nach der Ausbringung eines Sensornetzwerkes besitzen die Sensorknoten anfangs noch keine eigene Standortinformation, wenn diese nicht schon durch gezieltes Ausbringen auf einem topographischen Raster oder durch manuelle Einmessung jedes einzelnen Knotens beigesteuert wird. Ein Lokationsbewusstsein des Sensorknotens ist aus folgenden Gründen erforderlich:

- Ein Messdatum ohne dazugehörige Position ist nahezu nutzlos.
- Selbstkonfiguration und Selbstheilung ermöglichen ein robustes und skalierbares Sensornetzwerk. Mit Standortinformationen sind diese Funktionen ohne hohen Aufwand zu erreichen.
- Ein energiearmes und effizientes Routen der Informationen ist eine der Grundvoraussetzungen. Standortinformationen der Knoten ermöglichen gegenüber klassischen Routingmethoden ein energiearmes geografisches Routing.
- In einigen Sensornetzwerken ist die Position des einzelnen Sensorknotens selbst die geforderte Kenngröße, die es zu ermitteln gilt.

Aktuelle Lokalisierungsmethoden

Derzeitig kann die Position eines mobilen Gerätes durch GPS (Global Positioning System) oder GSM (Global System for Mobile Communications) bestimmt werden. Mit dem Ausbau von Galileo (Bauer, 2003) wird der globalen Positionsbestimmung in vielen Bereichen eine dominante Rolle zukommen. Diese Systeme sind jedoch nur eingeschränkt nutzbar: sie funktionieren in ausreichender Genauigkeit nur Outdoor, eingeschränkt auch Indoor, benötigen aber zusätzliche Hardware. Die hohe Stromaufnahme und die hohen Kosten pro Teilmodul verhindern zusätzlich die Integration auf einer hohen Anzahl von energiearmen Sensorknoten. Somit kommt die GPS-Nutzung eigentlich nur auf Beacons oder Infrastrukturknoten in Frage.

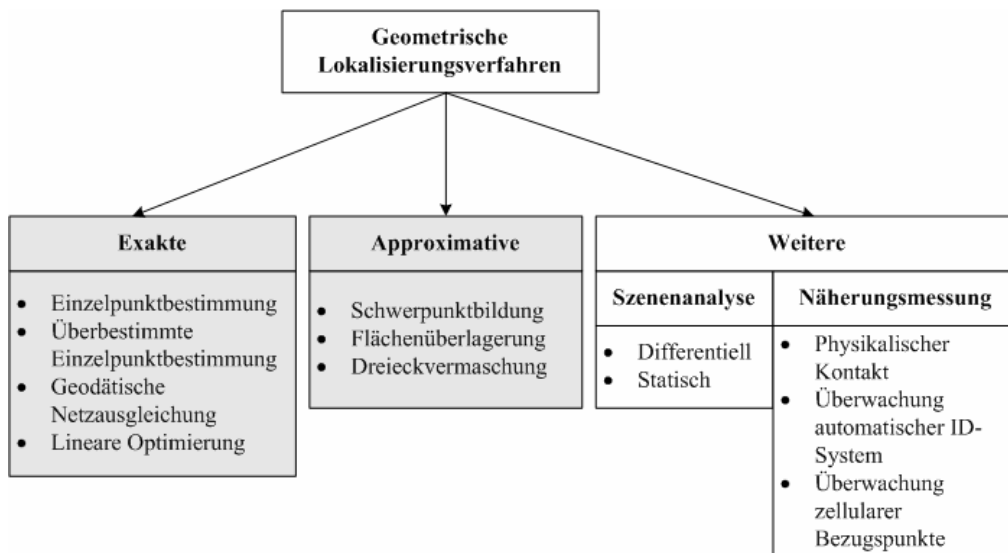


Abb. 2: Übersicht über die Verfahren zur Positionsbestimmung.

Eine Übersicht über die existierenden Verfahren zur Lokalisierung gibt Abb. 2. Die Mehrzahl dieser Verfahren beruht auf der Messung von Distanzen (Trilateration) oder Winkeln (Triangulation) zwischen koordinatenmäßig bekannten (geodätisch Festpunkte genannt) und unbekanntem (geodätisch Neupunkte genannt) Sensorknoten. Aus diesen Informationen wird die unbekannte Position eines Sensorknotens im Netzwerk bestimmt. Dies kann Knoten für Knoten im Sinne einer Einzelpunktbestimmung oder im Verbund als geodätisches Netz geschehen. Im zweidimensionalen Koordinatensystem reichen drei Distanzen von einem unbekanntem Knoten zu drei bekannten Knoten, um eine eindeutige Position mittels einer exakten Trilateration (Bogenschluss) zu berechnen. Jede weitere Beobachtung führt zu einer Überbestimmung, die z.B. genutzt werden kann, um einerseits Genauigkeitsaussagen für die

Punktbestimmung abzuleiten oder andererseits grobe Fehler in den Beobachtungen (so genannte Ausreißer) zu erkennen (Savvides 2001, Savvides 2002). Zur Auswertung überbestimmter Einzelpunktbestimmungen bzw. geodätischer Netze werden Ausgleichungsverfahren (z.B. die Methode der kleinsten Quadrate, siehe Benning 2002, Koch 1997) eingesetzt.

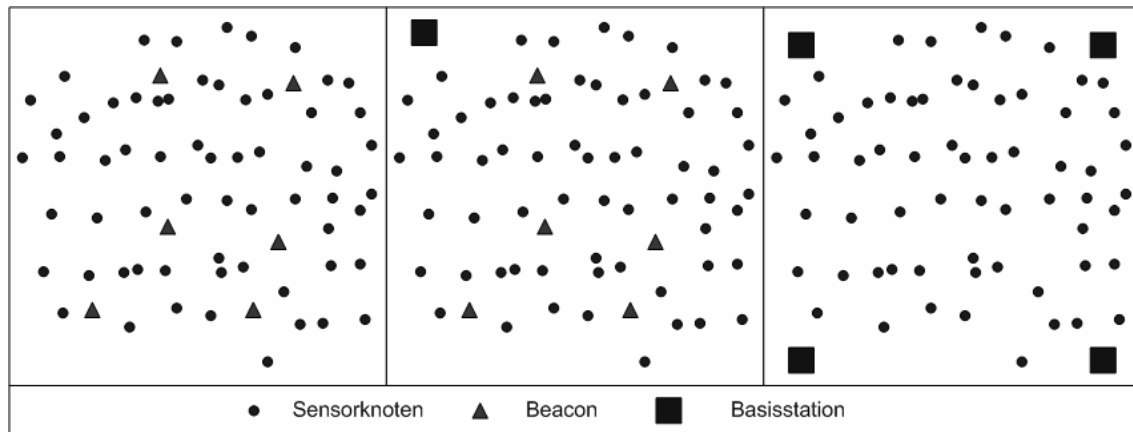
Neben den im Rahmen der Messgenauigkeit exakten geodätischen Methoden existieren zusätzlich die approximativen Verfahren. Diese nutzen einfache Ansätze und erreichen eine niedrige Präzision bei geringem Ressourcenverbrauch. Aufbauend auf der Schwerpunktbildung (Bulusu 2000), durch Einführung von Zwangsbedingungen (Doherty et al. 2001), durch Flächenüberlagerung (Tian 2003) oder durch Einführung lokaler Koordinatensysteme (Nagpal 2003) nutzen diese Methoden ebenfalls Distanz- oder Winkelmessungen und die Koordinaten von bekannten Knoten zur Positionsbestimmung.

Neben den überwiegend verwendeten Techniken existieren die für Sensornetzwerke weniger nutzbaren Methoden wie die Szenenanalyse und die Näherungsmessung. Bei der statischen Szenenanalyse werden beispielsweise Bilddaten nach der Ausbringung mit den bereits vorher aufgenommenen Bilddaten der Umgebung aus einer Datenbank verglichen und somit eine Position bestimmt. Die differentielle Szenenanalyse wertet hingegen die Unterschiede zwischen aufeinander folgenden Szenen aus. Die Näherungsmessung erfolgt mittels Sensoren mit beschränkter Reichweite und ermöglicht eine Positionsbestimmung allein durch die Information, ob sich ein bekanntes Objekt in der unmittelbaren Nähe befindet.

Struktur des Sensornetzwerkes

Die Wahl des einzusetzenden Lokalisierungsalgorithmus ist abhängig von der zu Grunde liegenden Netzstruktur. Nach Abb. 3 sind drei Fälle zu unterscheiden. Im ersten Fall (3a) existieren zu den ad hoc vernetzten Sensorknoten (Punkte) noch zusätzliche Beacons (Dreiecke), die zwar auf gleiche Weise wie die Sensorknoten ausgebracht werden, sich aber dennoch durch deren leistungsstärkere Hardware (GPS, mehr Speicher, höhere CPU-Leistung, mehr Batteriekapazität) von den einfachen Sensorknoten unterscheiden. In diesem Fall ist eine verteilte Berechnung der Positionen auf den Sensorknoten sinnvoll (geodätisch als freies Netz zu berechnen). Jeder Sensorknoten muss also seine Position aus den Koordinaten der Beacons und den Distanzen zu ihnen selbst bestimmen.

Im Fall (3b) liegt die gleiche Struktur vor. Hinzu kommt in diesem Fall noch die Existenz mindestens eines Infrastrukturknotens (Quadrat), der



a)

b)

c)

Abb. 3: Ad hoc vernetzte Sensorknoten (Punkte): a) mit Beacons (Dreiecke); b) mit Beacons und einem fixen Infrastrukturknoten (Quadrat) als Datensenke - freies Netz; c) ohne Beacons und mit fixen Infrastrukturknoten - Infrastrukturfall, angeschlossenes Netz.

vorrangig als sehr leistungsstarke Datensenke zur Weiterleitung der Sensordaten aus dem Netz dient. Komplexe Teilalgorithmen der

hauptsächlich verteilten Lokalisierung können zusätzlich auf den Infrastrukturknoten ausgelagert werden. Im dritten Fall (3c) werden keine Beacons mehr benötigt, da die Berechnung komplett durch die Infrastrukturknoten durchgeführt wird. Dies ist der Infrastrukturfall, der auch den höchsten Kommunikationsaufwand benötigt, da alle Informationen durch das Netz an die am Rande gelegenen Infrastrukturknoten geleitet werden müssen. Ziel muss es sein, energiearme verteilte Methoden mit zentralen rechenaufwendigen Methoden derart zu kombinieren, so dass ein hybrider energiesparender Algorithmus mit einer hohen erreichbaren Präzision entsteht, der die speziellen Eigenschaften eines Sensornetzwerkes effizient ausnutzt.

Neuartige Ansätze und Optimierungsstrategien

Die bereits beschriebenen Methoden zur Lokalisierung können in existenter Form nicht ohne weiteres auf Sensornetze adaptiert werden. Im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik wurden Grundlagen der Positionsbestimmung aufgearbeitet und unterschiedliche Algorithmen aus der Literatur zur Positionsbestimmung in Sensornetzen untersucht (Reichenbach 2004).

Grobkörnige Lokalisierung durch Schwerpunktbestimmung

Das im Folgenden betrachtete Verfahren basiert auf der von Bulusu vorgestellten Schwerpunktbestimmung in Sensornetzen (Bulusu 2000). Die

Basis der Positionsbestimmung bildet ein idealisiertes Radiomodell, um die Grenzen der Kommunikationsreichweite einzelner Knoten bestimmen zu können. Sendeaktivität findet lediglich durch Beacons statt. Perfekte kreisförmige Radiowellenausbreitung im zweidimensionalen Koordinatensystem mit dem Radius r und identische Sendebereiche für alle Transceiver ergänzen das Modell.

Als Vereinfachung betrachten wir ein zweidimensionales, quadratisches Feld mit b Beacons. Die Beacons $B_1 \dots B_b$ sind in einem Gitternetz mit einem homogenen Abstand d zueinander angeordnet (Abb. 4a). Sie befinden sich an den bekannten Stellen $(x_1 \dots x_b), (y_1 \dots y_b)$ und senden zeitlich versetzt in periodischen Abständen ein Signal in Form eines Paketes aus, das von den in Reichweite befindlichen einfachen Knoten mit unbekannter Position (Unbekannte Knoten) empfangen wird. Jeder Unbekannte überwacht das Übertragungsmedium für eine ausreichend lange Zeit t und registriert alle empfangenen Pakete. Anschließend bestimmt er die Anzahl n der sich in Reichweite befindlichen Beacons.

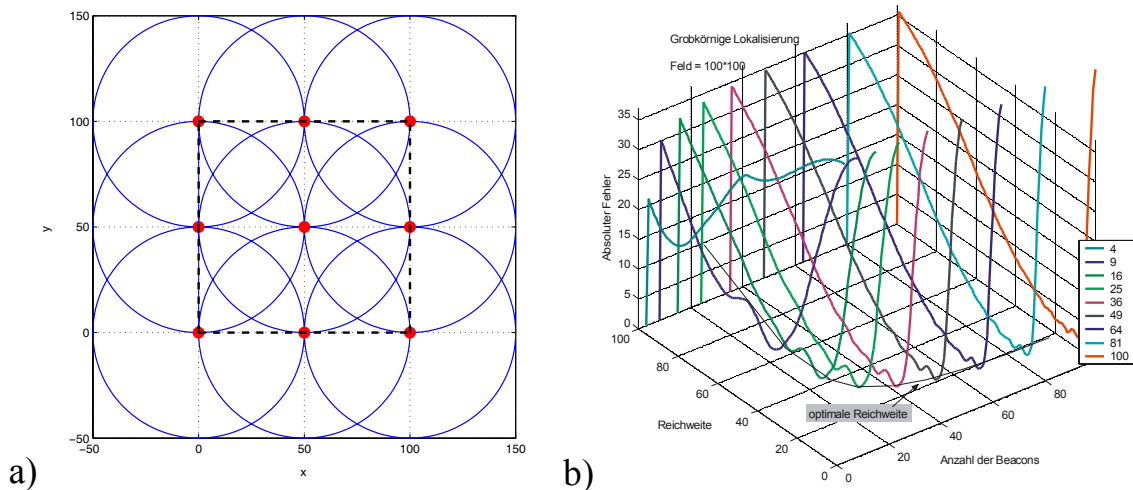


Abb. 4: a) Beaconverteilung mit $d = 50$ und $r = 50$; b) Grafische Darstellung des Verlaufs der optimalen Reichweite r_{opt} über der Übertragungsreichweite r und den Beacons b in einem Feld 100×100 .

Durch den idealen kreisförmigen Sendebereich der Beacons ist eine Aufteilung des Feldes in Überlappungsbereiche möglich. In Abhängigkeit der Verteilung der Beacons entstehen Regionen mit $0 \dots b$ Überlappungen (Abb. 4a). Jeder Knoten innerhalb eines Überlappungsbereiches kann durch einfache Schwerpunktbestimmung (Gleichung 1) der empfangenen Beaconpositionen einen Schätzwert der eigenen Position berechnen:

$$x_{i_{app}}, y_{i_{app}} = \left(\frac{\sum_{k=1}^n x_{B_k}}{n}, \frac{\sum_{k=1}^n y_{B_k}}{n} \right) \quad \text{mit} \quad x_{i_{app}}, y_{i_{app}} = \text{geschätzte Koordinaten} \quad (1)$$

Der Schätzwert ist für alle Knoten innerhalb einer Überlappungsregion konstant, im Gegensatz zum Positionierungsfehler. Er ist definiert als Abstand zwischen der geschätzten und der exakten Position des Unbekannten. Diese Beziehung drückt Gleichung 2 aus.

$$f_i = \sqrt{(x_{i_{app}} - x_{i_a})^2 + (y_{i_{app}} - y_{i_a})^2} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} f_i = \text{Positionierungsfehler} \\ x_{i_a}, y_{i_a} = \text{exakte Koordinaten} \end{array} \quad (2)$$

Jeder Knoten berechnet seine Position mit einem Positionierungsfehler aufgrund der Algorithmeigenschaften. Der Fehler ist null, wenn die Koordinaten des Knotens mit dem Schwerpunkt aller Nachbarbeacons übereinstimmen. Der Fehler variiert mit den geometrischen Eigenschaften des Feldes. Einerseits ist der Fehler durch Variation der Anzahl der Beacons einstellbar. Andererseits beeinflusst den Fehler die Übertragungreichweite, wodurch sich der Schwerpunkt verschiebt. Dies resultiert durch eine unterschiedliche Anzahl von Beacons, die in die Positionsberechnung mit eingehen.

In einer Simulation unter Matlab untersuchten wir das Verhalten des Positionierungsfehlers genauer. Die Ergebnisse werden in Abb. 4b grafisch dargestellt. Eine Erhöhung der Anzahl von Beacons reduziert den Fehler. Weiterhin sinkt der Fehler mit zunehmender Übertragungreichweite schnell ab und steigt dann nach einem Minimum annähernd linear an. Es scheint eine optimale Übertragungreichweite der Beacons zu existieren. Unsere Untersuchungen konzentrieren sich somit auf die Möglichkeit, durch Optimierung der Übertragungreichweite Energie einzusparen. Das ist besonders vorteilhaft, da der Energieverbrauch beim Senden von Nachrichten quadratisch mit der Entfernung wächst, wie aus der vereinfachten Gleichung 3 zur Energiebilanz einer Funkübertragung zu erkennen ist.

$$E = E_{mit} + nE_{Bit} \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2 \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} n = \text{Anzahl der zu übertragenden Bits} \\ E_{mit} = \text{Basisbedarf des Transceivers} \\ E_{Bit} = \text{Energie zur Übertragung eines Bits} \\ \lambda = \text{Wellenlänge} \end{array} \quad (3)$$

Es soll die optimale Übertragungreichweite der Beacons analytisch bestimmt werden. Für eine fixe Anordnung von n Beacons (Abb. 4a) in einem quadratischen Feld der Breite w ist der Abstand d zwischen den Beacons nach Gleichung 4 berechenbar.

$$d = \frac{w}{\sqrt{n-1}} \quad \text{mit } n \in \mathbb{N}, 4 \leq n < \infty \quad (4)$$

Die Beziehung zwischen der Distanz d und der Übertragungreichweite r bildet eine neue einzuführende Größe – die Granularität G :

$$G = \frac{r}{d} \quad (5)$$

Eine über- bzw. eine unterdimensionierte Übertragungreichweite der Beacons verursacht einen maximalen Lokalisierungsfehler (Abb. 4b). Die gesuchte optimale Übertragungreichweite r_{opt} , die den Fehler minimiert, liegt innerhalb dieser Grenzen. Durch Einsetzen von (Gleichung 4 in Gleichung 5) entsteht Gleichung 6, durch die die optimale Übertragungreichweite bestimmt werden kann.

$$r_{opt}(w, n) = \frac{G_{opt} \cdot w}{\sqrt{n-1}} \quad (6)$$

In dieser Gleichung dient die optimale Granularität G_{opt} als Grundlage zur Berechnung von r_{opt} .

Nach Gleichung 5 beschreibt sie das Verhältnis zwischen der Übertragungreichweite der Beacons und deren Abstand zueinander. Eine Skalierung der Geometrie beeinflusst die Übertragungreichweite sowie die Feldbreite und somit den Beaconabstand gleichartig. Es existiert eine optimale Granularität, die konstant ist. Unterschiedliche Simulationen des Algorithmus in Matlab zeigten eine konstante Granularität für das Feld 100×100 . Dabei wurde eine optimale Granularität $G_{opt} = 0,88$ ermittelt. Die approximativen Simulationsergebnisse sollten verfeinert und formal bewiesen werden.

Deshalb wurde die optimale Granularität durch einen Beweis auf den Wert $G_{opt} = 0,86$ korrigiert. Der komplette Beweis ist sehr umfangreich und kann bei Interesse in Reichenbach 2004 eingesehen werden. Mit der optimalen Abdeckung entsteht letztendlich die Gleichung 7, mit der die optimale Übertragungreichweite für die definierten Anfangsbedingungen auf einfache Weise berechnet werden kann.

$$r_{opt}(w, n) = 0,88 \cdot d \quad (7)$$

Untersuchungen einer gewichteten Schwerpunktbestimmung

In einem erweiterten Ansatz betrachten wir aufbauend auf der Schwerpunktbestimmung zusätzlich Distanzen, um die Präzision der Positionsbestimmung zu erhöhen. Distanzen können aus unterschiedlichen Beobachtungsgrößen wie der Signallaufzeit oder der Signalabschwächung gewonnen werden. Die Signalabschwächung steht in der Regel in Form

eines „Received Signal Strength“ – Wertes (RSSI) bei jedem Transceiver zur Verfügung. Beim Empfang eines Paketes wird der RSSI-Wert mit verhältnismäßig geringem Mehraufwand gemessen. Aufgrund von Interferenzen, Hindernissen und Messungenauigkeiten ist der RSSI-Wert für eine exakte Distanzbestimmung jedoch nur eingeschränkt brauchbar. Aus diesem Grund nutzen wir den RSSI-Wert nur als Gewicht innerhalb einer gewichteten Schwerpunktbestimmung nach Gleichung 8.

$$x_{i_{app}}, y_{i_{app}} = \left(\frac{\sum_{j=1}^n (w_{ij} \cdot x_{B_j})}{\sum_{j=1}^n w_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n (w_{ij} \cdot y_{B_j})}{\sum_{j=1}^n w_{ij}} \right) \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} w_{ij} = \text{Gewicht zwischen Knoten } i \\ \text{und Beacon } j \\ n = \text{Anzahl der Beacons } b \text{ in} \\ \text{Reichweite} \end{array} \quad (8)$$

Simulationen unter Matlab zeigen bei einer ansteigenden Anzahl von Beacons einen monoton fallenden Fehler. (Abb. 5a). Bei beispielsweise 50 gleichverteilten Beacons wird ein sehr geringer durchschnittlicher absoluter Lokalisierungsfehler unter 4% erreicht. Zusätzlich wird ein flacher Fehlerverlauf ohne Ausreißer über dem Feld erzielt (Abb. 5b).

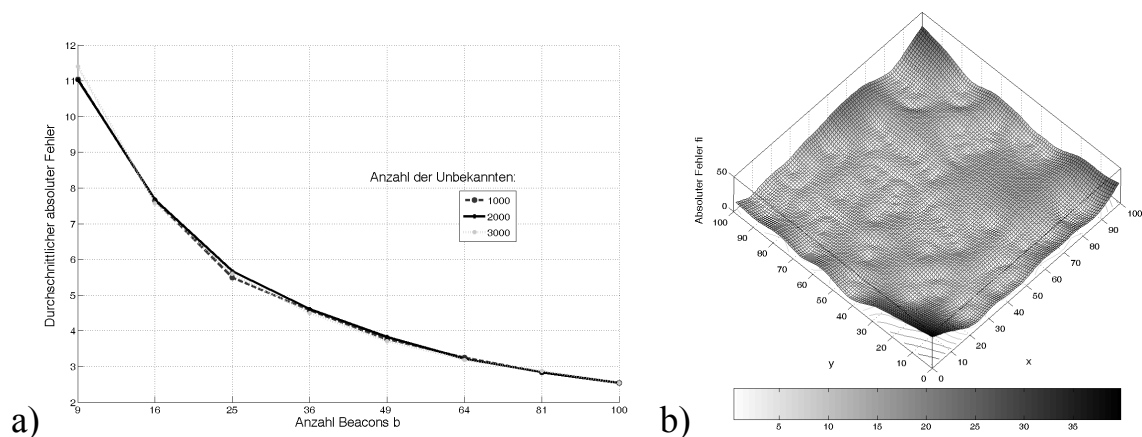


Abb. 5: a) Durchschnittlicher Fehler f_i über der Anzahl Beacons b in Abhängigkeit verschiedener Knotenmengen; b) Verlauf des Lokalisierungsfehlers einer gewichteten Schwerpunktbestimmung mit 100×100 Sensorknoten und 60 zufällig verteilten Beacons

In verschiedenen Publikationen untersuchten wir die Eignung und die Einstellung der wichtigsten Parameter in einer Multihopping-Umgebung (Blumenthal 2004 und Reichenbach 2004). Weiterhin wurde ein geringer Fehlereinfluss des beschriebenen Algorithmus im Vergleich mit einer Multilateration bei ansteigenden Eingangsfehlern wie ungenauen Gewichten und unpräzisen Positionen der Beacons festgestellt (Blumenthal 2005).

Ausblick auf geodätische Methoden

Alle genaueren Lokalisierungsmethoden nutzen als Beobachtungsgrößen Entfernungen oder Winkel zwischen den Sensorknoten, die mittels unterschiedlicher Messtechniken gewonnen werden. Hier bieten sich vor allem Phasendifferenzmessungen, Laufzeitmessungen („Time of Flight“) und Signalstärkenmessungen („Received Signal Strength“) als mögliche Techniken der Entfernungsbestimmung an. Vorteilhaft ist dabei die Nutzung des ohnehin auf dem Sensorknoten vorhandenen Übertragungsmoduls, wodurch keine neue Hardware erforderlich wird. In der Praxis ist die erreichte Genauigkeit von Signalempfangsstärkemessungen aber gering. Allerdings liegen in einem Sensornetzwerk aufgrund der Vielzahl der möglichen Verbindungsmessungen zwischen den Knoten hohe Überbestimmungen vor, die eine Auswertung mittels überbestimmter Einzelpunktbestimmungen bzw. der geodätischen Netzausgleichung (Methode der kleinsten Quadrate) nahe legen. Diese geodätischen Ausgleichungsverfahren sind jedoch an die speziellen Bedingungen in limitierten Sensornetzwerken anzupassen. So sind z.B. die entstehenden Gleichungssysteme sehr groß und damit nicht auf den limitierten Sensorknoten, sondern nur an den leistungsfähigeren Infrastrukturknoten zu lösen. Jedoch kann die Struktur der entstehenden Gleichungssysteme zur Effizienzsteigerung genutzt werden.

LITERATUR

- Akyildiz, I., F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E. (2002): *A Survey on Sensor Networks*, IEEE Communications Magazine, 102- 114.
- Bauer, M. (2003): *Vermessung und Ortung mit Satelliten. GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme.*, 5., neubearb. u. erw. Aufl., Herbert Wichmann Verlag.
- Benning, W. (2002): *Statistik in Geodäsie*, Geoinformation und Bauwesen. Herbert Wichmann Verlag.
- Blumenthal, J., Handy, M., Golatowski, F., Haase, M., Timmermann, D. (2003): *Wireless Sensor Networks - New Challenges in Software Engineering*, 9th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 551-555.
- Blumenthal, J., Reichenbach, F., Timmermann, D. (2004): *Low Power Optimization of the Coarse Grained Localization Algorithm in Wireless Sensor Networks*, 1st Workshop on Positioning, Navigation and Communication 2004, 137-146.
- Blumenthal, J., Reichenbach, F., Timmermann, D. (2005): *Precise Positioning with a Low Complexity Algorithm in Ad hoc Wireless Sensor*

- Networks*, PIK - Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation, Sonderheft Wireless Sensor Networks, No 4.
- Bulusu, N. (2000): *GPS-less low cost outdoor localization for very small devices*, IEEE Personal Communications Magazine, 28–34.
- Cerpa, A., Elson, J., Estrin, D., Girod, L., Hamilton, M., Zhao, J. (2001): *Application Driver for Wireless Communications Technology*, First ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications, 20-41.
- Doherty, L., Pister, K.S., J., Ghaoui, L., El (2001): *Convex Position Estimation in Wireless Sensor Networks*, In Proceedings of IEEE Infocom, 1655-1663.
- Koch, K.R. (1997): *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen*, 3. Auflage, Dümmler, Bonn.
- Nagpal, R., Shrobe, H., Bachrach, J. (2003): *Organizing a Global Coordinate System from Local Information on an Ad Hoc Sensor Network*, 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks.
- Reichenbach, F., (2004): *Positionsbestimmung in drahtlosen Ad-hoc Sensornetzwerken*, Diplomarbeit, Universität Rostock.
- Savvides, A., Han, C.C., Srivastava, M.B. (2001): *Dynamic fine grained localization in ad-hoc networks of sensors*, MOBICOM 2001, 166-179.
- Savvides, A., Park, H., Srivastava, M.B. (2002): *The Bits and Flops of the N-Hop Multilateration Primitive for Node Localization Problems*, Proceedings of the First International Workshop on Wireless Networks and Applications held in conjunction with Mobicom 2002, 231-238.
- Schwiebert, L., Gupta, S., Weinmann, J. (2001): *Research Challenges in Wireless Networks of Biomedical Sensors*, The seventh annual international conference on Mobile computing and networking, 151-165.
- Srivastava, M., Muntz, R., Potkonjak, M. (2001): *Smart Kindergarten: Sensor-based Wireless Networks for Smart Developmental Problem-solving Environments*, The seventh annual international conference on Mobile computing and networking, 132-138.
- Tian, H. (2003): *Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks*, MobiCom 2003.
- Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N.B., Heinzelman, W. (2002): *A taxonomy of Wireless Micro-Sensor Network Models*, ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 28-36.