Kontextaspekte drahtloser Sensornetze

Carsten Buschmann
Coalesenses GmbH
buschmann@coalesenses.com

Abstract: Um die von drahtlosen Sensornetzen bereitgestellten Sensordaten sinnvoll nutzen zu können, sind Kontextinformationen insbesondere hinsichtlich Ort und Zeit der Erhebung von entscheidender Bedeutung. Daher ist es erforderlich, dass sich alle Geräte ihrer Position bewusst sind. Dieses lässt sich mit Hilfe von Lokalisierungsverfahren auf Basis der Lateration sicherstellen, dabei kommt der Bestimmung räumlicher Entfernungen zwischen einzelnen Geräten große Wichtigkeit zu. In diesem Beitrag stellt der Autor einen Teilaspekt seiner Dissertation vor: ein neuartiges Verfahren zur Abstandsschätzung, welches auf dem Vergleich von Nachbarschaften basiert. Es nutzt die Tatsache aus, dass zwei dicht beieinander liegende Geräte mehr gemeinsame Nachbarn haben als solche, die weiter voneinander entfernt liegen.

1 Einleitung

Die Kombination von Sensorik, digitaler Datenverarbeitung und drahtloser Kommunikation führte in den letzten Jahren zu der Entwicklung drahtloser Sensornetze. Sie bestehen aus sogenannten Sensorknoten, meist batteriebetriebenen Geräten, die nicht nur Daten durch Messung erheben und dann verarbeiten und aufbereiten, sondern sie auch drahtlos untereinander austauschen können [AWSC02]. Visionen gehen davon aus, dass solche Geräte zukünftig nur noch Sandkorngröße haben und zu tausenden eingesetzt werden. Sie könnten „intelligenten Farben“ beigemischt werden oder gemeinsam mit Löschmitteln aus Flugzeugen abgeworfen werden, um die Bekämpfung von Waldbränden zu unterstützen.

Die gelieferten Sensordaten allein sind jedoch praktisch bedeutungslos, sie erhalten ihre Aussagekraft erst durch Informationen über den Kontext ihrer Erhebung. Kontextinformationen können darüber hinaus auch zur Optimierung des Anwendungsverhaltens herangezogen werden. Aufgrund der Wichtigkeit des Kontextes in Sensornetzen stellt der Autor in seiner Dissertation [Bus09] Verfahren vor, die Kontextinformationen bezüglich Zeit und Ort zur Verfügung stellen.

Im Hinblick auf den Kontextaspekt Zeit werden im ersten Teil der Dissertationsschrift Verfahren zur Errichtung eines konsistenten Zeitbewusstseins auf ihren Kommunikationsoverhead hin untersucht, da Energie und Kanalkapazität knappe Ressourcen darstellen und folglich ein geringes Datenaufkommen vorteilhaft ist. Es wird ein neues Verfahren vorgestellt, das kontextadaptiv sein Verhalten so anpasst, dass der Overhead minimiert wird. Basierend auf der simulativen Untersuchung des neuen Verfahrens im Vergleich mit zwei bestehenden Ansätzen wird ein Modell zur Vorhersage des Overheads aller drei Methoden entwickelt. So können sowohl zum Zeitpunkt der Anwendungsentwicklung als auch zur

Laufzeit Entscheidungen hinsichtlich der anzuwendenden Variante getroffen werden.

Eine für Sensornetze besonders geeignete Methode zur Bestimmung des räumlichen Kontextes ist die Multilateration. Weil dabei die Positionen der Sensorknoten auf Basis von Referenzpunkten und Distanzen bestimmt werden und bestehende Verfahren zur Distanzermittlung Schwächen aufweisen, wird im zweiten Teil der Dissertationsschrift ein neues Verfahren zur Distanzschätzung zwischen benachbarten Sensorknoten vorgestellt. Es basiert auf der Tatsache, dass nahe beieinander liegende Sensorknoten mehr gemeinsame Kommunikationspartner haben als solche, die weiter voneinander entfernt sind. Es wird gezeigt, wie die Distanzen, ausgehend von einem Modell der Funkübertragung, ermittelt werden können und wie das Verfahren zu einer Multihop-Distanzschätzung erweitert werden kann. Die Genauigkeit des Verfahrens wird in Simulationen untersucht und die Ergebnisse werden vorgestellt.

Um aus mittels Lateration bestimmten Positionskoordinaten höherwertige Informationen über unterschiedliche Bereiche eines Sensornetzes ableiten zu können, wird im dritten Teil der Arbeit ein Verfahren zur räumlichen Approximation von Konturen beschrieben. Es kann für alle Arten von Phänomenen, die ein Sensornetz beobachten kann, kompakte Polygonrepräsentationen deer Ausdehnung bestimmen. Mit Hilfe von Simulationen wird gezeigt, dass die Approximationen robust gegen Fehler und trotz ihrer Kompaktheit genau sind.

Da eine vollständige Vorstellung aller in der Dissertation bearbeiteten Aspekte naturgemäß sehr oberflächlich bleiben müsste, soll im Folgenden im Detail nur auf das Distanzschätzverfahren *Neighborhood Intersection Distance Estimation Scheme (NIDES)* eingegangen werden.

Dazu werden zunächst in aller Kürze die Grundlagen der Positionsbestimmung in drahtlosen Sensornetzen erläutert und es wird auf die Schwächen bestehender Distanzschätzverfahren eingegangen. In Abschnitt 3 wird dann das Distanzschätzverfahren zwischen benachbarten Geräten vorgestellt und bewertet, Abschnitt 4 erläutert die Erweiterung auf den Multihop-Fall. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und Ansatzpunkte für weitere Arbeiten aufgezeigt.

2 Lokalisierung in Sensornetzen

Die meisten Anwendungsszenarien für drahtlose Sensornetze gehen davon aus, dass einige wenige Sensorknoten in der Lage sind, ihre Position beispielsweise mittels GPS selbständig zu bestimmen. Aufgrund der Kosten, der Baugröße und des Energieverbrauches ist es jedoch nicht möglich, alle Geräte dementsprechend auszustatten. Es ist die Aufgabe von *Lokalisierungsverfahren*, ausgehend von einzelnen bekannten Gerätepositionen (Ankern) die Positionen aller anderen Geräten mittels Interaktion zwischen direkten Nachbarn auch über viele Hops hinweg zu bestimmen.

Der Autor diskutiert in [Bus09] eine Vielzahl von Lokalisierunsverfahren und kommt zu dem Schluss, dass die Lateration in Sensornetzen besonders geeignet ist. Hier ermittelt jeder Sensorknoten seine Distanz zu mehreren Ankern, deren Position er ebenfalls kennen

muss. Geht man davon aus, dass jedes Gerät die Abstände zu seinen direkten Nachbarn mit Hilfe eines *Distanzschätzverfahrens* ermitteln kann, so könnte man das Sum-Dist-Verfahren [SPS02] zur Multihop-Distanzschätzung einsetzen. Die Anker broadcasten dabei ihre Position sowie die Distanzangabe 0. Jeder Emfänger eines solchen Pakets addiert den lokalen Abstand zwischen sich und dem Absender zur Distanzangabe im Paket hinzu und prüft, ob er durch die sich ergebende Information einen neuen Anker kennenlernt oder eine kürzere Distanz zu einem bekannten Anker erhält. Falls ja, leitet er das Paket weiter. Gerade in dichten Netzen kann man so die realen Distanzen annähern und die Gerätepositionen berechnen.

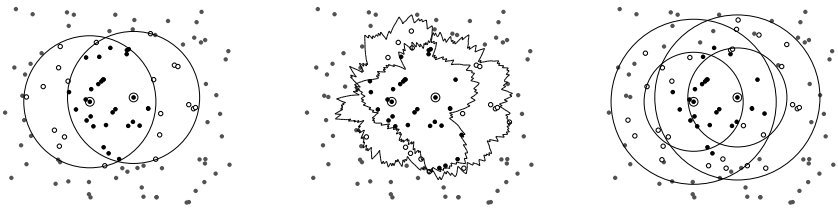
In [Bus09] werden auch die bekannten Distanzschätzverfahren eingehend diskutiert. Viele Verfahren benötigen Spezialhardware und scheiden somit wegen der entsprechenden Nachteile hinsichtlich Energieverbrauch, Baugröße oder Kosten aus. Andere können Nähe nur qualitativ aber nicht quantitativ ermitteln, verursachen extremen Rechenaufwand oder benötigen lange Messzeiten. Signalstärkenmessungen können zwar die vorhandene Funkschnittstelle verwenden, sind jedoch aufgrund von Signalreflektionen, der resultierenden Multipfadausbreitung und Signalüberlagerung eher ungenau und insbesondere sehr empfindlich gegenüber Umfeldänderungen. Signallaufzeitmessungen sind ebenfalls anfällig gegenüber Reflektionen und führen leicht zu extremen Distanzüberschätzungen.

3 Überblick über die Funktionsweise von NIDES

Das *Neighborhood Intersection Distance Estimation Scheme (NIDES)* basiert auf der Idee, dass nahe beieinander liegende Knoten im Allgemeinen mehr gemeinsame Nachbarn haben als weiter voneinander entfernte. Allerdings hängt der Anteil gemeinsamer Nachbarn neben der Distanz noch von anderen Faktoren wie den Ausbreitungseigenschaften der eingesetzten Funkschnittstelle ab. Im Folgenden wird aufgezeigt, wie aus einem Modell der Funkeigenschaften eine Funktion $d(s)$ zur Abschätzung des Abstandes aus dem Anteil gemeinsamer Nachbarn s bestimmt werden kann.

Nimmt man an, dass Knoten innerhalb einer gewissen Reichweite r miteinander kommunizieren können, ergibt sich als Kommunikationsbereich ein Kreis. Auf Basis dieses Kreismodells kann man mittels geometrischer Überlegungen einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem Anteil der Kreisüberdeckung und dem Abstand der Kreismittelpunkte herstellen. Geht man von einer Gleichverteilung der Knoten aus, kann man vom Anteil der gemeinsamen Nachbarn auf die Distanz der betreffenden Knoten schließen.

In drahtlosen Netzwerken ist die Funkausbreitung jedoch in den seltensten Fällen wirklich kreisförmig. Dies gilt insbesondere in Sensornetzwerken mit ihren einfachen Funkschnittstellen [GKW+02]. Vielmehr ist die Kommunikationsreichweite eines Knotens richtungsabhängig und zeitlich variabel. Diese Erkenntnisse wurden in komplexeren Funkausbreitungsmodellen wie dem RI-Modell oder dem stochastischen Modell aufgenommen. Das *Radio Irregularity Model* [ZHKS04] beschreibt die Kommunikationsreichweite als Funktion des Winkels, so dass sich statt eines Kreises eine unregelmäßige Form ergibt. Beim *stochastischen Modell* [ZK04] ist Kommunikation zwischen Knoten, deren Distanz oberhalb



(a) Kreismodell (b) RI-Modell (c) Stochastisches Modell

Abbildung 1: Die Anzahl der gemeinsamen Nachbarn zweier Knoten in Abhängigkeit vom Funkmodell

einer Schranke liegt, nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit möglich. Diese nimmt mit zunehmender Distanz ab.

In Abbildung 1 sind die Nachbarschaften zweier Knoten für die drei genannten Funkausbreitungsmodelle gezeigt. Offensichtlich variiert die Anzahl der gemeinsamen Nachbarn bei ansonsten unveränderten Bedingungen zwischen 26 (Kreismodell, Abbildung 1(a)), 27 (RI-Modell, Abbildung 1(b)) und 23 (stochastisches Modell, Abbildung 1(c)).

Da die Funkeigenschaften also einen wichtigen Einflussfaktor bezüglich der Entwicklung einer geeigneten Distanzschätzung darstellen, stellt ein Modell dieser Eigenschaften den Ausgangspunkt zur Bestimmung der Schätzfunktion $s(d)$ dar. Es wird durch eine Funktion $f : \mathbb{R}\times\mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ beschrieben. Sie gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Knoten, der an der Position (x, y) liegt, Funksignale eines im Ursprung positionierten Knotens empfangen kann.

Der eigentliche Berechnungsschritt wird nun zunächst anschaulich beschrieben. Zur Vereinfachung wird hierzu eine rotationssymmetrische Funktion f herangezogen. Der voraussichtliche Anteil gemeinsamer Nachbarn s bei einer konkreten Distanz d lässt sich bestimmen, indem man f um d entlang der x-Achse verschiebt, sie mit ihrer nicht verschobenen Ausgangsfunktion multipliziert und das resultierende Volumen des Ergebnisses ins Verhältnis zum Volumen von f setzt, also auf das Volumen von f normiert. Dieses ist in Abbildung 2 beispielhaft für das Kreismodell dargestellt, das Ergebnis der Multiplikation ist grau markiert. Um einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Verschiebung (oder auch Distanz) d und dem Anteil der gemeinsamen Nachbarn s zu erhalten, muss man diesen Vorgang für alle d durchführen. Diesen Prozess nennt man Faltung (die abschließende Normierung ist allerdings nicht Teil der Faltung).

Die Faltung von f entlang der x-Achse wird von der Gleichung

$$(f * f)(d) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x-d, y)\ f(x, y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y \tag{1}$$

beschrieben. Nimmt man die Normierung hinzu, ergibt sich

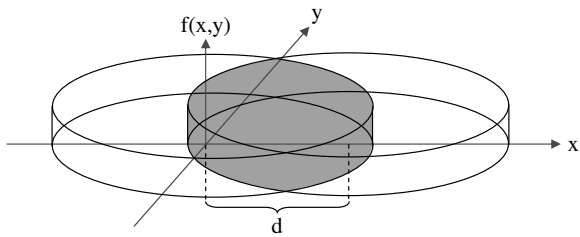


Abbildung 2: Veranschaulichung einer Faltung

$$s(d) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x-d,y)f(x,y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y}{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y}. \tag{2}$$

Da im Allgemeinen f nicht rotationssymmetrisch ist, muss während der Faltung auch eine Rotation durchgeführt werden.

$$f_{rot}(x,y,\alpha) = f(x\ cos(\alpha) + y\ sin(\alpha), -x\ sin(\alpha) + y\ cos(\alpha)) \tag{3}$$

gibt eine Funktion an, die aus f durch Drehung um die z-Achse um den Winkel α entsteht. Durch Subtraktion von d wird sie entlang der x-Achse um d verschoben, d entspricht dabei dem Abstand zwischen Sender und Empfänger.

Der Anteil gemeinsamer Nachbarn über der Distanz lässt sich somit durch $s : \mathbb{R}^+ \rightarrow [0,1]$ beschreiben:

$$s(d) = \int_0^{2\pi} \frac{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f_{rot}(x-d,y,\alpha)\ f_{rot}(x,y,\alpha)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y}{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f_{rot}(x,y,\alpha)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y}\,\mathrm{d}\alpha. \tag{4}$$

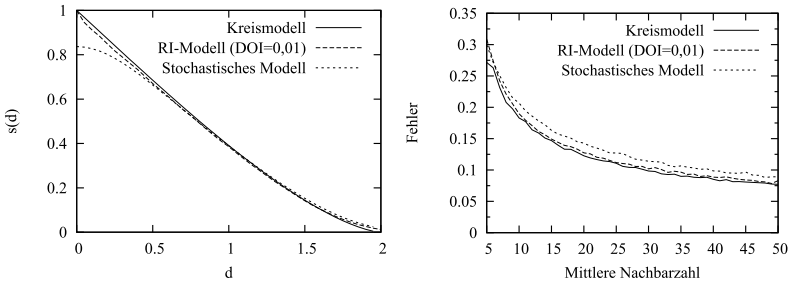
In beiden Fällen gibt $s(d)$ den zu erwartenden Anteil gemeinsamer Nachbarn für eine bestimmte Distanz d an.

Abbildung 3(a) zeigt die resultierenden Verläufe von $s(d)$ für unterschiedliche Funkmodelle. Dabei ist die Distanz auf den mittleren Kommunikationsradius r normiert.

Da s den Anteil der gemeinsamen Nachbarn in Abhängigkeit von der Distanz beschreibt, wird für die Distanzschätzung ihre Umkehrfunktion benötigt:

$$d(s) = s^{-1}(d) \tag{5}$$

Um bei diesem Inversionsschritt eindeutige Ergebnisse zu erhalten ist es erforderlich, dass s bijektiv ist. Das bedeutet, dass sich nicht zwei Distanzen finden lassen, denen s den gleichen Anteil gemeinsamer Nachbarn zuordnet, oder spezieller formuliert, dass s streng monoton fallend ist. Wie in Abbildung 3 zu erkennbar, ist dies für alle drei vorgestellten Funkmodelle der Fall.



(a) Schätzfunktion $s(d)$

(b) Schätzfehler in Abhängigkeit von der mittleren Anzahl von Nachbarn

Abbildung 3: Schätzfunktion und Schätzfehler für verschiedene Funkausbreitungsmodelle.

Das Protokoll, das das hier beschriebene Verfahren umsetzt, wurde in [BHF+07] im Detail beschrieben. Es benötigt lediglich 2 versendete Nachrichten pro Gerät, weniger als 50 Byte Speicher und ist auch auf einfachsten Controllern implementierbar.

3.1 Evaluation

Die Genauigkeit der Schätzungen wurde mit Hilfe von Simulationen mit ns-2 [NS201] überprüft. Abbildung 3(b) zeigt den Schätzfehler für verschiedene Ausbreitungsmodelle in Abhängigkeit von der Netzdichte, also der mittleren Anzahl von Nachbarn. Dabei ist der Fehler als Bruchteil des Kommunikationsradius r angegeben. Es ist zu erkennen, dass es kaum Unterschiede zwischen den verschiedenen Funkausbreitungsmodellen gibt. Der mittlere Schätzfehler nimmt mit zunehmender Netzdichte kontinuierlich ab. Er liegt bei etwa 20% des mittleren Kommunikationsradius bei einer Dichte von 10 und fällt auf 8% des mittleren Kommunikationsradius bei einer Dichte von 50 ab. Das bedeutet, dass die Schätzungen mit zunehmender Dichte immer genauer werden. Die Schätzungen sind ausgewogen, dass heißt es gibt keine Tendenz zu systematischen Über- oder Unterschätzungen. Details können [BHF+07] entnommen werden. Dort wurde auch gezeigt, dass NIDES auch in Netzwerken mit variabler Netzdichte gleichbleibende Leistungen erzielt.

4 Multihop-Distanzschätzung: NIDES in Verbindung mit Sum-Dist

Die Analyse von Szenarien mit zufällig gleichverteilten Knoten zeigt, dass die Netzwerkdichte keineswegs gleichmäßig ist. Vielmehr ergibt sich eine Verteilung der Nachbarschaftsgrößen, die einer Normalverteilung um die avisierte Netzdichte gleicht. Abbildung 4 zeigt exemplarisch ein solches Histogramm der Nachbarschaftsgrößen.

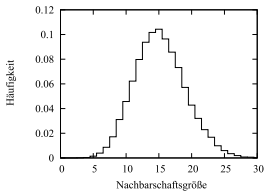


Abbildung 4: Histogramm der Nachbarschaftsgrößen

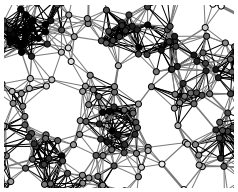


Abbildung 5: Ausschnitt aus einem Szenario

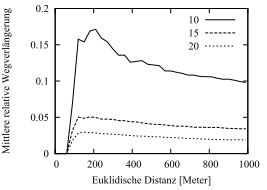


Abbildung 6: Wegverlängerung bei Multihoppfaden

In Abbildung 5 ist ein Ausschnitt aus einem Szenario der Dichte 15 zu sehen. Sie zeigt Knoten sowie die sich ergebenden Kommunikationsverbindungen zwischen ihnen. Der Grauton der Knoten repräsentiert dabei die Anzahl der Nachbarn: weiß steht für wenige, schwarz für viele Nachbarn, Grauschattierungen stehen für mittlere Dichten. Es ist klar zu erkennen, dass sich Cluster höherer Dichte und dazwischen Bereiche mit weniger Knoten bilden, die im Extremfall zu Löchern entarten können.

Solche Löcher führen dazu, dass die Multihoppfade nicht gerade, sondern in Abhängigkeit von der Netzdichte mehr oder weniger stark im Zickzack verlaufen. Aufgrund dieser Tatsache ist die Summe der Distanzen zwischen den benachbarten Knoten im Pfad stets größer als die euklidische Distanz der Knoten an beiden Enden des Pfades. Diese Verlängerung des Weges ist von der Netzdichte abhängig: Je geringer die Dichte, desto länger sind die Pfade im Vergleich zur euklidischen Distanz. Abbildung 6 zeigt diesen Effekt beispielhaft für die Dichten 10, 15 und 20. Es ist weiterhin erkennbar, dass dieser Effekt bei kurzen Distanzen ausgeprägter ist als bei langen. Ein Grund dafür ist, dass bei großen Distanzen mehr Hops zwischen den Knoten liegen und es somit mehr Möglichkeiten für günstige Pfade gibt. Weiterhin werden für Knoten mit geringerer Distanz zum Teil Pfade gefunden, die sehr viel länger sind als die euklidische Distanz, weil sie große Umwege nehmen. Für Knoten mit großer Distanz finden sich derartig lange Umwege nicht, findet sich kein kurzer Pfad, liegen sie in unterschiedlichen Netzpartitionen.

Einzelne Links, die im Weiteren *Brückenlinks* genannt werden, durchqueren die Löcher zwischen Clustern und verbinden so die Knoten auf der einen Seite mit denen auf der anderen. Ihre verbindende Eigenschaft führt dazu, dass sie mit überdurchschnittlicher Wahrscheinlichkeit in Multihoppfaden enthalten sind. Betrachtet man (wie hier) alle möglichen Knotenpaarungen, hat das zur Folge, dass sich Fehler beim Schätzen von Distanzen entlang von Brückenlinks überproportional auf die Multihopschätzung niederschlagen.

In Abbildung 5 sind solche Links schwarz eingetragen, entlang derer es bei Distanzschätzungen mit NIDES zu Unterschätzungen kam, grau steht für einen Link, entlang dem überschätzt wurde. Die Dicke der Linie steht für den Grad der Über- bzw. Unterschätzung: eine dicke Linie repräsentiert eine starke Verschätzung. Es fällt auf, dass die häufig verwendeten Brückenlinks fast immer überschätzt werden, und das in einem zum Teil erheblichen Maße. Die Ursache dafür ist, dass die Knoten an beiden Seiten des Links meist keine weiteren gemeinsamen Nachbarn haben. Daher gelangen sie zu einer Schätzung, die

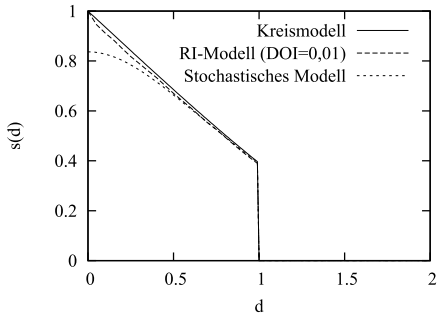


Abbildung 7: Modifizierte Schätzfunktionen

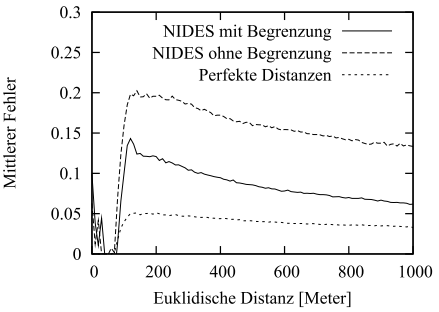


Abbildung 8: Prozentualer Schätzfehler

etwa beim Zweifachen ihrer mittleren Kommunikationsreichweite r liegt (vergleiche Abbildung 3(a)), obwohl sie auch beim RI-Modell im Mittel nicht weiter als r von einander entfernt sind.

Den beschriebenen Ausreißern kann mit einer leichten Modifikations von NIDES entgegengewirkt werden. Geschätzte Distanzen, die oberhalb von r liegen, sind im Allgemeinen das Resultat von Überschätzungen, da es sehr unwahrscheinlich ist, dass zwei Knoten mit einem Abstand von mehr als r durch einen Link verbunden sind. Daher ist es sinnvoll, die Schätzungen auf den mittleren Kommunikationsradius zu begrenzen. Die entsprechend angepassten Schätzfunktionen (aus Abbildung 3) sind in Abbildung 7 dargestellt. Diese Limitierung wirkt Überschätzungen effektiv entgegen, ohne das Schätzverfahren ansonsten zu beeinträchtigen.

4.1 Evaluation

Um die Genauigkeit von Multihop-Distanzschätzungen auf Basis von Nachbarschaften zu untersuchen, wurde eine Reihe von Simulationen mit ns-2 [NS201] durchgeführt. Dazu war es erforderlich, NIDES so zu erweitern, dass Distanzen über mehrere Hops hinweg akkumuliert werden können. Es kam das Sum-Dist-Verfahren (vergleiche Abschnitt 2) zum Einsatz, da es schnell, robust, umfassend und ohne weitere Voraussetzungen funktioniert.

Zur Bewertung der Genauigkeit wurden für alle Knotenpaare die kürzesten Pfade untereinander ermittelt, wie es das Sum-Dist-Verfahren vorsieht. Entlang dieser Pfade wurden dann die NIDES-Distanzschätzungen der einzelnen Hops aufaddiert und mit der euklidischen Distanz der Knoten an den Pfadenden verglichen. Details zu den Simulationen können [Bus09] entnommen werden.

Im Rahmen der simulativen Evaluation wurde untersucht, wie sehr die Multihop-Distanzschätzungen zweier belieber Knoten von ihren euklidischen Distanzen abweichen. Dabei wurde das RI-Funkausbreitungsmodell verwendet. Die Netzwerkdichte betrug 15, das heißt jeder Knoten hatte im Mittel 15 Nachbarn.

Um den Erfolg der Modifikation von NIDES einschätzen zu können, wurden sowohl Simulationen mit der modifizierten Version von NIDES mit Begrenzung der Schätzungen auf den mittleren Kommunikationsradius wie auch ohne durchgeführt. Als Referenz wurden darüber hinaus Simulationen mit einer *perfekten* Distanzmessung entlang der Multihoppfade durchgeführt. Diese drei Messverfahren wurden dann jeweils mit der euklidischen Distanz verglichen.

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse. Auf der Abszisse ist die euklidische Distanz der betrachteten Knoten aufgetragen. Die Ordinate zeigt die mittleren Messfehler der drei Verfahren als Bruchteil der tatsächlichen Distanz.

Es ist zu erkennen, dass die Messfehler ab einer Distanz von etwa 100 stark ansteigen. Das liegt daran, dass ab hier aufgrund der simulierten Kommunikationsreichweite ein zweiter Hop zur Überwindung der Distanz erforderlich ist. Die Kurve der perfekten Distanzmessung zeigt, dass hier auch ohne Fehler in der eigentlichen Distanzschätzung circa 5% zu lange Distanzen resultieren. Die Ursache hierfür ist, wie im vorigen Abschnitt erläutert, dass die Distanz entlang des Multihoppfades tatsächlich länger ist als die euklidische, da der Pfad nicht gerade verläuft.

Der mittlere Fehler für NIDES mit Begrenzung steigt auf etwa 13% an, um dann kontinuierlich auf 6% für große Distanzen zurückzugehen. Am Verlauf der Kurve der perfekten Distanzen wird erkennbar, dass ein Drittel bis die Hälfte dieses Fehlers auf die Eigenschaften der Multihoppfade zurückgehen und selbst mit fehlerfreier Distanzschätzung nicht vermeidbar ist.

Ebenfalls wird deutlich, dass der Fehler für NIDES ohne Begrenzung auf 20% ansteigt und dann sukzessive auf 13% abfällt. Er liegt damit etwa 7% höher als der mit Begrenzung. Das belegt, dass die Begrenzung der Distanzschätzungen auf den mittleren Kommunikationsradius ein äußert effektives Mittel zur Fehlerreduzierung ist.

Für Distanzen unterhalb von 100 Metern (also im Singlehopfall) liegt der Fehler für beide Varianten von NIDES bei etwa 5-10%.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags hat der Autor ein ausgewähltes Thema seiner Doktorarbeit dargestellt: es wurde ein Verfahren zur Multihop-Distanzschätzung in drahtlosen Funknetzwerken entwickelt, das auf dem Vergleich von Nachbarschaften basiert. Es hat den Vorteil, dass für die Distanzschätzung lediglich die ohnehin vorhandene Funkschnittstelle benötigt wird, die Ungenauigkeiten von RSSI-basierten Verfahren aber nicht auftreten.

Es wurde aufgezeigt, wie die verschiedenen Einflussfaktoren, die sich aus den Eigenschaften von zufällig gleichverteilten Adhoc-Netzen ergeben, bei der Multihop-Distanzschätzung berücksichtigt werden können. Die Genauigkeit des Verfahrens wurde mit Hilfe von Simulationen untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass der mittlere Fehler der Schätzungen 13% der euklidischen Distanz nicht überschreitet, für große Distanzen liegt er bei 6%.

Ein Ansatz für zukünftige Arbeiten ist eine Erweiterung dahingehend, dass 2-Hopnachbarschaften betrachtet werden. Dies ermöglicht es, dass Knoten den zwischen zwei Nachbarn und sich selbst eingeschlossenen Winkel abschätzen können. Auf diese Weise können unter anderem die Winkel zwischen einzelnen Segmenten eines Multihoppfades berücksichtigt werden, um die Präzision der Distanzschätzung weiter zu verbessern.

Literatur

[AWSC02] I. F. Akyildiz, Y. Sankarasubramaniam W. Su und E. Cayirci. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422, Marz 2002.

[BHF+07] Carsten Buschmann, Horst Hellbrück, Stefan Fischer, Alexander Kröller und Sandor Fekete. Radio Propagation-Aware Distance Estimation Based on Neighborhood Comparison. In *Proceedings of the 14th European conference on Wireless Sensor Networks (EWSN 2007), Delft, The Netherlands*, Januar 2007.

[Bus09] Carsten Buschmann. *Zeitliches und räumliches Kontextbewusstsein in drahtlosen Sensornetzen*. Dissertation, Institut für Telematik, Universität zu Lübeck, Germany, 2009.

[GKW+02] D. Ganesan, B. Krishnamachari, A. Woo, D. Culler, D. Estrin und S. Wicker. Complex Behavior at Scale: An Experimental Study of Low-Power Wireless Sensor Networks, 2002.

[NS201] The Network Simulator ns-2 (v2.29). http://www.isi.edu/nsnam/ns/, October 2001.

[SPS02] Andreas Savvides, Heemin Park und Mani B. Srivastava. The Bits and Flops of the N-Hop Multilateration Primitive for Node Localization Problems. In *First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Application*, Atlanta, GA, USA, 2002.

[ZHKS04] Gang Zhou, Tian He, Sudha Krishnamurthy und John A. Stankovic. Impact of radio irregularity on wireless sensor networks. In *MobiSys '04: Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services*, Seiten 125–138, New York, NY, USA, 2004. ACM Press.

[ZK04] Marco Zuniga und Bhaskar Krishnamachari. Analyzing the Transitional Region in Low Power Wireless Links. In *First IEEE International Conference on Sensor and Ad hoc Communications and Networks (SECON)*, October 2004.

Carsten Buschmann ist Geschäftsführer der Coalesenses GmbH, einem jungen Unternehmen, das Hardware, Software sowie komplette Lösungen im Bereich massiv verteilter Systeme, speziell drahtloser Sensornetze, anbietet. Er hat im Januar 2009 seine Promotion an der Universität zu Lübeck mit Auszeichnung abgeschlossen. Zuvor war er am Insitut für Telematik der Universität zu Lübeck sowie am Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund der Technischen Universität Braunschweig als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Seine Forschungsarbeiten dort konzentierten sich auf Middleware und Verfahren zur Erlangung von Kontextinformationen in drahtlosen Sensornetzen.