

# Exposé zur Diplomarbeit “Zuverlässigkeit vs. Energieverbrauch für *Geografisches Routing* in drahtlosen Sensornetzwerken”

Christian Czekay

21. Dezember 2008

## 1 Motivation

Fortschritte in der Hardwarefertigung der letzten Jahre / Jahrzehnte haben zu einer Zunahme der Verbreitung von drahtlosen Sensornetzwerken in Forschung und Praxis geführt. Ihre Einsatzmöglichkeiten umfassen unter anderem die großflächige Datenerfassung[7] und die Verwendung als ad-hoc Kommunikationsinfrastruktur[5]. Ein drahtloses Sensornetzwerk besteht aus einfach und billig zu produzierenden Knoten, die untereinander drahtlos kommunizieren. Dadurch wird es im Einsatz vielseitig und flexibel, aber es resultieren auch Beschränkungen, die bei der Entwicklung der Algorithmen für drahtlose Sensornetzwerke zu berücksichtigen sind. Die Ressourcen eines einzelnen Knotens (Speicher, Rechenleistung, Energieversorgung) sind sehr beschränkt und die Funkreichweite ist üblicherweise deutlich kleiner als die Ausdehnung des Gesamtnetzwerks. Um die Kommunikation beliebiger Knoten miteinander sicherzustellen, sind also *multi-hop* Routingprotokolle nötig, die Pakete über mehrere Zwischenknoten zum Ziel befördern. Verschiedene Verfahren wurden für diesen Zweck entwickelt.

Pro-aktive Routingverfahren bauen in jedem Knoten eine Routingtabelle auf, die statisch zu jedem möglichen Zielknoten den passenden Nachbarknoten für die Weiterleitung enthält. Die Größe der Routingtabelle in jedem Knoten und die Anzahl der beim initialen Aufbau dieser Tabellen pro Knoten zu verarbeitenden Nachrichten skalieren linear mit der Größe des Gesamtnetzwerks. Außerdem erzeugen Änderungen der Netzwerktopologie, z.B. durch Knotenmobilität oder den (temporären) Ausfall von Knoten oder einzelnen Links, einen erheblichen Kommunikationsoverhead, da jede einzelne Änderung im gesamten Netzwerk verteilt werden muss, um die Routingtabelle jedes Knotens zu aktualisieren.

Bei reaktiven (on-demand) Verfahren wie *Dynamic Source Routing* (DSR)[14], *Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing* (AODV)[27] oder *Zone Routing Protocol* (ZRP)[13] ermittelt ein Knoten eine Route erst, wenn sie kon-

kret benötigt wird, indem er das Netzwerk mit entsprechenden Routenfindungspaketen flutet. Dies erzeugt bei jeder Routenermittlung einen Kommunikationsoverhead, der linear mit der Netzwerkgröße skaliert. Caching kann diesen Effekt mindern, aber nur um den Preis eines erhöhten Speicherbedarfs pro Knoten.

Eine weitere Alternative, die sich in den letzten Jahren zunehmender Beliebtheit erfreut, ist *Geografisches Routing*, welches erstmals von Finn[6] beschrieben wurde. Dabei wird vorausgesetzt, dass jeder Knoten seine eigene Position kennt, was sich z.B. mittels GPS erreichen lässt. Pakete werden nicht mehr an Knotenbezeichner verschickt, sondern an geografische Koordinaten. Ein Knoten leitet ein Paket immer an den Nachbarn weiter, der den Zielkoordinaten am nächsten liegt. Dieses Verfahren ist *greedy*, *stateless* und *local*. Dadurch skaliert es sehr gut mit der Netzwerkgröße, denn jeder Knoten muss nur seine eigene Position und die seiner Nachbarn speichern. Die Größe dieser Daten ist unabhängig von der Netzwerkgröße und sie können durch ausschließlich lokale Kommunikation der Knoten erlangt werden, indem jeder Knoten regelmäßig seine Position an alle Nachbarn in Reichweite broadcastet. Ein Nachteil ist, dass die Routenfindung mittels *Geografischem Routing* unzuverlässig ist, das heißt, dass es von der aktuellen Netzwerktopologie abhängt, ob eine existierende Route zwischen zwei Knoten tatsächlich gefunden wird oder diese Knoten nicht miteinander kommunizieren können.

## 2 Zielstellung

Ziel meiner Diplomarbeit ist es, die Zuverlässigkeitsprobleme *Geografischen Routings* und mögliche Lösungen zu analysieren und zu bewerten, insbesondere im Hinblick auf den Tradeoff zwischen erreichbarem Gewinn an Zuverlässigkeit und den dafür nötigen zusätzlichen Energiekosten. Von den folgenden zu untersuchenden Problemen ist das erste ein *Geografisches Routing*-spezifisches Zuverlässigkeitsproblem, während die anderen unabhängig vom Routingverfahren in allen drahtlosen Sensornetzwerken auftreten.

**Dead Ends** *Geografisches Routing* kann nicht garantieren, dass es eine existierende Verbindung zwischen zwei Knoten findet. Hat ein Knoten keine Nachbarn, die näher am Zielknoten  $Z$  liegen als er selbst, stellt er also ein lokales Distanzminimum dar, so kann er ein vom Quellknoten  $Q$  versandtes Paket nicht weiterleiten und verwirft es. Da *Geografisches Routing* in statischen Netzwerken komplett deterministisch ist, kann in diesem Fall  $Q$  so lange nicht mit  $Z$  kommunizieren, bis sich Netzwerktopologieänderungen auf dieser Route ergeben. Die Signifikanz dieses Problems hängt stark von der Netzwerkdichte ab. Liegen die Knoten dicht genug, so spielen Sackgassen praktisch keine Rolle. Geringe Netzwerkdichten oder Hindernisse zwischen Knoten können aber zu erheblichen Konnektivitätsproblemen führen. Ein möglicher Ausweg

aus solchen Sackgassen, ist *Face Routing* welches erstmals in [4] beschrieben wurde. Dabei wird der der Kommunikationsgraph planarisiert und dann an den Rändern der Graphflächen entlang geroutet. Dieses Verfahren garantiert, dass ein Verbindung von  $Q$  nach  $Z$  gefunden wird, sofern sie überhaupt existiert. Aufbauend auf dieser Idee wurden verschiedene Algorithmen vorgeschlagen, die jeweils die durchschnittliche Pfadlänge der Pakete verbessern. Neben dem originalen *GreedyFaceGreedy* (GFG)[4] sollen *Greedy Perimeter Stateless Routing* (GPSR)[15], diverse Varianten aus der *Greedy Other Adaptive Face Routing*-Algorithmenfamilie (u.a. GOAFR[19], GOAFR+[18]) und *Greedy Path Vector Face Routing* (GPVFR)[22] untersucht werden. All diese Verfahren setzen als Kommunikationsmodell einen *Unit Disc Graph* voraus, in welchem zwei Knoten genau dann miteinander kommunizieren können, wenn ihr Abstand unter einer festen Größe liegt. In solchen Graphen lässt sich die nötige Planarisierung des Graphen mit einfachen lokalen Algorithmen wie *Gabriel Graph* (GG)[9], *Relative Neighborhood Graph* (RNG)[31] oder *Delaunay Triangulation*[10, 24] durchführen. Unter realistischen Bedingungen kommt es mit diesen Methoden jedoch zu Planarisierungsfehlern und Graphfragmentierungen[17]. Letztere lassen sich durch die *Mutual Witness* (MW)[30] Erweiterung der Planarisierungsalgorithmen vermeiden. Um sämtliche Planarisierungsfehler zu vermeiden und die Paketzustellung auch unter realen Bedingungen garantieren zu können, wurde das *Cross-Link Detection Protocol* (CLDP)[16] als verteilter Planarisierungsalgorithmus vorgeschlagen. Der dabei entstehende Kommunikationsoverhead während der Initialisierungsphase und nach Topologieänderungen ist allerdings erheblich. Er lässt sich aber mittels *Lazy Cross-Link Removal* (LCR)[11] deutlich reduzieren, indem Planarisierungsfehler während des Routings detektiert und on-demand behoben werden. Aufgrund des zu erwartenden Implementierungsaufwandes für CLDP und LCR werden diese Verfahren nur optional bei ausreichender Zeit betrachtet werden. In einigen neueren Arbeiten wurde gezeigt, dass gewisse *Face Routing*-Varianten entgegen der bisherigen Annahmen nicht in allen Fällen eine Routenfindung garantieren[17, 8]. Auf die sich daraus ergebenden Probleme und Erkenntnisse soll ebenfalls eingegangen werden. In Anbetracht der Planarisierungsprobleme mit denen *Face Routing* zu kämpfen hat, wurde eine alternative Vorgehensweise namens *Greedy Distributed Spanning Tree Routing* (GDSTR)[21] vorgeschlagen, die mit *Spanning Trees* arbeitet und keinerlei Planarisierung benötigt. Falls nach Betrachtung der *Face Routing*-Verfahren noch ausreichend Zeit zur Verfügung steht, wird diese Alternative ebenfalls näher untersucht werden.

**Knotenausfälle** Fällt ein Knoten aus, sind sämtliche Pakete in seiner Warteschlange verloren. Dies lässt sich vermeiden, indem Pakete dupliziert und auf verschiedenen Routen verschickt werden (siehe nächster Punkt). Alternativ können multi-hop-ACK-Verfahren die Auswirkungen dieses Problems

zwar nicht komplett vermeiden, aber zumindest deutlich reduzieren. Schließlich repräsentieren Knoten- und Linkausfälle Topologieänderungen und es sollte untersucht werden, wie die verschiedenen Verfahren darauf reagieren. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Kommunikationsaufwand, der nötig ist, um die Änderungen im Netzwerk zu propagieren, und auf der Zeit, die vergeht, bis korrektes Routing wiederhergestellt werden kann.

**Congestion** Paketverluste aufgrund von Congestion können abhängig von der Lastverteilung immer auftreten. In diversen Arbeiten wurde gezeigt, dass bei zufälliger Kommunikation in kreisförmigen Netzwerken die Knoten im Zentrum deutlich stärker belastet werden als Knoten an den Rändern (*Crowded Center Effect*[23, 12, 28]). Bei Sensornetzen kommt erschwerend hinzu, dass die Datenströme von einer Vielzahl von Sensoren bei einem oder wenigen Datensammelknoten konvergieren, wodurch dort und in unmittelbarer Nähe Kommunikationshotspots entstehen. Neben Paketverlusten aufgrund von Congestion ergibt sich daraus auch das Problem, dass diese Hotspots ihrer Energie wesentlich schneller verbrauchen und damit als erste ausfallen werden. Vermeiden lässt sich dies durch die Variation der Paketrouten mit dem Ziel, alle Knoten gleichmäßig zu nutzen. Im Kontext von geografischem Routing kann dies auf Basis von *Trajectory Based Forwarding* (TBF)[26] geschehen oder durch geeignete Koordinatentransformationsverfahren wie *Curveball Routing*[29] oder *Routing In Outer Space*[25]. Außerdem kann es hilfreich sein, beim Weiterleiten Nachbarn mit hohen Energiereserven zu bevorzugen.

**Allgemeine Effizienzverbesserungen** Normales *Geografisches Routing* leitet ein Paket immer an den Knoten mit dem größten Distanzgewinn zum Ziel weiter. Dies ist oft nicht optimal, weshalb im Paper zu *Normalized Advance* (NADV)[20] beschrieben wird, wie man bei der Auswahl des nächsten Knotens den Distanzgewinn mit dem gewünschten Kostenmaß wichten kann, um die Gesamtkosten zu minimieren. Bei *Geographic Opportunistic Routing* (GOR)[32] wird ein Paket nicht nur an einen Knoten weitergeleitet sondern an mehrere. Hat der primäre Weiterleitungsknoten das Paket nicht empfangen, so wird es von einem der sekundären Knoten weitergeleitet. Da drahtlose Links oft unzuverlässig sind, kann dies viele Retransmissions einsparen und so die Energiekosten senken.

Diese beiden Verfahren haben nichts mit dem Primärziel meiner Diplomarbeit, der Erhöhung der Zuverlässigkeit von *Geografischem Routing*, zu tun. Da sie aber die Energieeffizienz verbessern, sind sie durchaus von Interesse und werden bei ausreichender Zeit optional betrachtet werden.

### 3 Geplante Vorgehensweise

Die verschiedenen Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Paketzustellung in drahtlosen Sensornetzwerken sollen jeweils anhand eines geeigneten theoretischen Modells analysiert werden. Anschließend werden die gewonnenen Aussagen zum Tradeoff zwischen Zuverlässigkeitserhöhung und Energiekosten durch Simulationen verifiziert und ergänzt. Außerdem soll betrachtet werden, wie gut die einzelnen Verfahren mit der Größe des Netzwerks skalieren und wie sie sich unter verschiedenen Netzwerkdichten verhalten. Bei letzterem Punkt sollen insbesondere die in [19] beschriebenen *kritischen* Netzwerkdichten besonders gründlich untersucht werden.

Die Simulationen sollen auf Basis des Java-basierten *JiST/SWANS* (Java in Simulation Time[3] und Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator[2]) durchgeführt werden.

Die zu simulierende Netzwerklast soll sowohl auf synthetischem Wege als auch durch Anfragen von existierenden Programmen an die simulierten Sensorknoten erzeugt werden.

Das verwendete Funkmodell soll sich nicht auf *Unit Disc Graphen* beschränken, sondern möglichst realitätsnah beschaffen sein und Effekte wie Shadowing, Fading und Hindernisse beinhalten.

Es sollen folgende Netzwerktopologien betrachtet werden: Grids, die gleichmäßige, zufällige Anordnung von Knoten und eine Reihe von konstruierten Szenarien.

Knotenmobilität wird explizit nicht betrachtet werden.

### Literatur

- [1] A. L. Barabási and R. Albert. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286:509, 1999.
- [2] Rimon Barr. SWANS – scalable wireless ad hoc network simulator - user guide.
- [3] Rimon Barr, Zygmunt J. Haas, and Robbert van Renesse. JiST: an efficient approach to simulation using virtual machines. *Softw, Pract. Exper*, 35(6):539–576, 2005.
- [4] Prosenjit Bose, Pat Morin, Ivan Stojmenović, and Jorge Urrutia. Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks. In *DIALM '99: Proceedings of the 3rd international workshop on Discrete algorithms and methods for mobile computing and communications*, pages 48–55, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [5] CAR 2 CAR Communication Consortium. <http://www.car-to-car.org/>.

- 
- [6] G. Finn. Routing and addressing problems in large metropolitan-scale internetworks. *Tech. Rep. ISI/RR-87-180*, March 1987.
  - [7] Joachim Fischer. Selbstorganisation im Wettlauf mit tödlichen Wellen - Start des interdisziplinären Graduiertenkollegs METRIK. *Humboldt-Spektrum*, pages 32–37, March 2006.
  - [8] Hannes Frey and Ivan Stojmenovic. On delivery guarantees of face and combined greedy-face routing in ad hoc and sensor networks. In *MobiCom '06: Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 390–401, New York, NY, USA, 2006. ACM.
  - [9] K. R. Gabriel and R. R. Sokal. A new statistical approach to geographic variation analysis. *Systematic Zoology*, 18:259–278, 1969.
  - [10] Jie Gao, Leonidas J. Guibas, John Hershberger, Li Zhang, and An Zhu. Geometric spanner for routing in mobile networks. In *MobiHoc '01: Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 45–55, New York, NY, USA, 2001. ACM.
  - [11] Young-Jin Kim Ramesh Govindan, Brad Karp, and Scott Shenker. Lazy cross-link removal for geographic routing. In *SenSys '06: Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 112–124, New York, NY, USA, 2006. ACM.
  - [12] P. Gupta and P. R. Kumar. The capacity of wireless networks. *IEEE Transaction On Information Theory*, 46(2):388–404, March 2000.
  - [13] Zygmunt J. Haas and Marc R. Pearlman. The performance of query control schemes for the zone routing protocol. In *SIGCOMM*, pages 167–177, 1998.
  - [14] David B. Johnson and David A. Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In Imielinski and Korth, editors, *Mobile Computing*, volume 353 of *THE KLUWER INTERNATIONAL SERIES IN ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE*. Kluwer Academic Publishers, 1996.
  - [15] Brad Karp and H. T. Kung. Gpsr: greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In *MobiCom '00: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 243–254, New York, NY, USA, 2000. ACM.
  - [16] Young-Jin Kim, Ramesh Govindan, Brad Karp, and Scott Shenker. Geographic routing made practical. In *NSDI*. USENIX, 2005.

- 
- [17] Young-Jin Kim, Ramesh Govindan, Brad Karp, and Scott Shenker. On the pitfalls of geographic face routing. In *DIALM-POMC '05: Proceedings of the 2005 joint workshop on Foundations of mobile computing*, pages 34–43, New York, NY, USA, 2005. ACM.
  - [18] Fabian Kuhn, Roger Wattenhofer, Yan Zhang, and Aaron Zollinger. Geometric ad-hoc routing: of theory and practice. In *PODC '03: Proceedings of the twenty-second annual symposium on Principles of distributed computing*, pages 63–72, New York, NY, USA, 2003. ACM.
  - [19] Fabian Kuhn, Roger Wattenhofer, and Aaron Zollinger. Worst-case optimal and average-case efficient geometric ad-hoc routing. In *MobiHoc '03: Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 267–278, New York, NY, USA, 2003. ACM.
  - [20] Seungjoon Lee, Bobby Bhattacharjee, and Suman Banerjee. Efficient geographic routing in multihop wireless networks. In *MobiHoc '05: Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 230–241, New York, NY, USA, 2005. ACM.
  - [21] Ben Leong, Barbara Liskov, and Robert Morris. Geographic routing without planarization. In *NSDI*. USENIX, 2006.
  - [22] Ben Leong, Sayan Mitra, and Barbara Liskov. Path vector face routing: Geographic routing with local face information. In *ICNP '05: Proceedings of the 13TH IEEE International Conference on Network Protocols*, pages 147–158, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
  - [23] Jinyang Li, Charles Blake, Douglas S.J. De Couto, Hu Imm Lee, and Robert Morris. Capacity of ad hoc wireless networks. In *MobiCom '01: Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 61–69, New York, NY, USA, 2001. ACM.
  - [24] Xiang-Yang Li, Gruia Calinescu, and Peng-Jun Wan. Distributed construction of planar spanner and routing for ad hoc wireless networks. In *INFOCOM*, 2002.
  - [25] Alessandro Mei and Julinda Stefa. Routing in outer space: fair traffic load in multi-hop wireless networks. In *MobiHoc '08: Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 23–32, New York, NY, USA, 2008. ACM.
  - [26] Dragos Niculescu and Badri Nath. Trajectory based forwarding and its applications. In *MobiCom '03: Proceedings of the 9th annual interna-*

- 
- tional conference on Mobile computing and networking*, pages 260–272, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [27] Charles E. Perkins and Elizabeth M. Belding-Royer. Ad-hoc on-demand distance vector routing. In *WMCSA*, pages 90–100. IEEE Computer Society, 1999.
- [28] Peter P. Pham and Sylvie Perreau. Performance analysis of reactive shortest path and multi-path routing mechanism with load balance, February 28 2003.
- [29] Lucian Popa, Afshin Rostamizadeh, Richard Karp, Christos Papadimitriou, and Ion Stoica. Balancing traffic load in wireless networks with curveball routing. In *MobiHoc '07: Proceedings of the 8th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 170–179, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [30] Karim Seada, Ahmed Helmy, and Ramesh Govindan. On the effect of localization errors on geographic face routing in sensor networks. In *IPSN '04: Proceedings of the 3rd international symposium on Information processing in sensor networks*, pages 71–80, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [31] Godfried Toussaint. The relative neighbourhood graph of a finite planar set. *Pattern Recognition*, 12:261–268, 1980.
- [32] Michele Zorzi and Ramesh R. Rao. Geographic random forwarding (ge-raF) for ad hoc and sensor networks: Energy and latency performance. *IEEE Trans. Mob. Comput*, 2(4):349–365, 2003.