

Der Einfluss von Schwankungen der Übertragungsreichweite auf die Leistungsfähigkeit von Ad-Hoc Netzwerken

Ralf Schmitz

Kontakt: schmitz@netlab.nec.de

NEC Network Laboratories, Heidelberg und
Universität Mannheim, Praktische Informatik IV

Hannes Hartenstein

Kontakt: hannes.hartenstein@rz.uni-karlsruhe.de

Universität Karlsruhe, Rechenzentrum und Institut für Telematik

Telemaco Melia und Xavier Perez-Costa

Kontakt: {melia|perez-costa}@netlab.nec.de

NEC Network Laboratories, NEC Europe Ltd., Heidelberg

Wolfgang Effelsberg

Kontakt: effelsberg@informatik.uni-mannheim.de

Universität Mannheim, Lehrstuhl für Praktische Informatik IV

Abstract: Die Leistungsfähigkeit eines drahtlosen, mobilen Ad-Hoc Netzwerkes wird im wesentlichen durch die Fähigkeit der Protokolle bestimmt, auf Änderungen der Netzwerktopologie effektiv zu reagieren. Die für diese Netzwerke charakteristische Eigenschaft der Dynamik in der Netztopologie basiert im wesentlichen auf der Mobilität der Knoten und auf Schwankungen der Funkreichweite. Während der Mobilitätsaspekt bereits umfassend untersucht wurde, werden die Eigenschaften des drahtlosen Mediums in Modellen meist idealisiert mittels konstantem Funkradius evaluiert. Solche Ergebnisse werden den tatsächlichen Begebenheiten, wie Erfahrungen in Feldtests belegen, nicht gerecht.

In dieser Arbeit untersuchen wir den Einfluss von Mobilität, von zeitabhängigen Schwankungen der Übertragungsreichweite und der Kombination beider Faktoren auf die Netzwerk-Leistungsmerkmale Topologieänderungsrate (Topological Change Rate, TCR) und Linkstabilität. Die temporären Fluktuationen des Funkradius werden mittels eines Gauss-Markov Prozesses erster Ordnung modelliert, während die Auswirkungen der Mobilität basierend auf dem Random Waypoint Mobilitätsmodell untersucht werden. Die Ergebnisse unserer vergleichenden Simulationsstudie zeigen, dass Fluktuationen der Übertragungsreichweite zusätzlich zur Mobilität die Leistungsmetriken eines Ad-Hoc Netzwerkes erheblich beeinflussen. Daher empfehlen wir, Fluktuationen der Radiowellenausbreitung bei dem Entwurf von Ad-Hoc Protokollen und Ad-Hoc Modellierung nicht zu vernachlässigen.

1 Einleitung

Eines der wichtigsten Kennzeichen drahtloser mobiler Ad-Hoc Netzwerke ist die Dynamik in der Netztopologie. Die Leistungsfähigkeit von Protokollen für mobile Ad-Hoc Netzwerke wird in der Regel daran gemessen, wie effizient und effektiv die Protokolle mit eben dieser Netzdynamik umgehen können. Gründe für Änderungen der Netztopologie sind (i) die Mobilität der Knoten und (ii) die Fluktuation der Funkreichweite. Die zeitliche Veränderung der Funkreichweite ist abhängig von der Umgebung, z.B. Hindernisse und Wetterbedingungen. Durch die allgegenwärtige Bewegung von Objekten in der Umgebung treten Fluktuationen der Funkreichweite auch dann auf, wenn Sender und Empfänger statisch sind. Bezieht man die für Ad-Hoc Netzwerke typische Mobilität der Knoten mit ein, so ist die resultierende dynamische Netzwerktopologie und die Netzwerkleistung abhängig von der Kombination der beiden Faktoren Mobilität und Schwankungen der Funkreichweite.

Der Einfluss von Mobilität auf Ad-Hoc Netzwerke wurde bereits in umfangreichen Studien simulativ untersucht. Allerdings setzen diese Arbeiten in der Regel ein idealisiertes Funkmodell mit konstantem Radius voraus. Erfahrungen mit Feldtests von Ad-Hoc Netzwerken (siehe etwa [MFHF04]) zeigen allerdings deutlich, dass die Annahme einer konstanten Funkreichweite einer realistischen Bewertung eines Protokolls für mobile Ad-Hoc Netzwerke nicht gerecht wird. Das folgende Beispiel soll den Einfluss von Schwankungen der Übertragungreichweite auf die Leistungsfähigkeit eines Ad-Hoc Protokolls verdeutlichen. Betrachten wir ein Ad-Hoc Routing Protokoll, welches durch die Aussendung periodische Nachrichten (sog. beacons) Informationen über die Knoten in direkter Nachbarschaft erfährt. Durch temporäre Schwankungen der Übertragungreichweite kann es passieren, dass ein Knoten ein beacon von einem Nachbarn ausserhalb der eigentlichen Funkzelle erhält, der nicht für den folgenden Datentransfer genutzt werden kann. Daher ist die Netzwerksicht des beschriebenen Knotens ungenau, was unweigerlich zu falschen Routingentscheidungen führt. In dieser Arbeit zeigen wir nun anhand eines einfachen Modells für eine zeitabhängige Übertragungreichweite, dass diese Fluktuationen die Topologieänderungsrate ('Topological Change Rate', TCR) sowie die Linkstabilität in einem Grade beeinflussen können wie es die Mobilität der Netzknoten kann. Wir bewerten also nicht die direkten Auswirkung auf ein spezielles Protokoll, sondern die Auswirkungen auf die beiden vorgenannten Metriken, welche die Leistungsfähigkeit eines Ad-Hoc Netzwerkes beeinflussen [KSM03], [BNC02].

Das Modell für die Fluktuation der Übertragungreichweite wird durch einen GaussMarkov-Prozess erster Ordnung beschrieben. Im Gegensatz zu *fast fading* im μs -Bereich und *slow fading* oder *cell breathing* über Stunden und Tage betrachten wir Funkschwankungen im Bereich von Paketabständen. Eine detaillierte Beschreibung des Funkmodells befindet sich im nächsten Kapitel.

Die Auswirkung von Mobilität auf die entsprechenden Leistungskriterien werden basierend auf dem *random waypoint* (RWP) Bewegungsmodell untersucht. In diesem Modell berechnet ein mobiler Knoten zufällig einen Zielpunkt innerhalb der Gesamtfläche und bewegt sich dann mit gleichmässiger Geschwindigkeit auf diesen zu. Der Knoten kann im Zielpunkt pausieren, bevor der Vorgang wiederholt wird. Analysen des RWP

[BHPC04] zeigen unerwartete Eigenschaften des Modells, z.B. bzgl. der räumlichen Verteilung [Be01], [BRS03] und der Durchschnittsgeschwindigkeit [YLN03]. Letzteres beeinflusst aber nicht die Aussagekraft dieser Leistungsbewertung, da wir für diese Studie konstante Geschwindigkeiten ohne Pausen an den 'waypoints' einsetzen.

Die Notwendigkeit, Eigenschaften des Funkmodells im Ad-Hoc Protokolldesign zu berücksichtigen, ist bekannt, wie z.B. das Tutorial der MobiHoc'03 Konferenz zeigt [Co03]. Erste Protokolle beachten bereits Schwankungen der Übertragungreichweite. In [BFN01] wird ein robustes Ad-Hoc Routing Protokoll vorgeschlagen, welches bis zu 40% Fluktuationen toleriert. Die Rate zwischen minimalem und maximalem Sendebereich kann bis zum Faktor $\sqrt{2}$ schwanken, während die Paketzustellung in einem verbundenen Ad-Hoc Netzwerk garantiert ist. Der Netzwerk-Simulator WIPPET [KLM⁺00] bietet diverse Funkausbreitungsmodelle neben Mobilität zur Studie von Ad-Hoc Netzwerken. Auch der weit verbreitete ns2 Netzwerk-Simulator [ns2a] beinhaltet das 'shadowing' Ausbreitungsmodell [ns2b], welches aus zwei Teilen besteht: (i) Das 'path loss model', welches den Mittelwert der empfangenen Signalstärke für die spezifische Entfernung ermittelt. (ii) Der zweite Teil modelliert Schwankungen der Feldstärke mittels einer log-normalen Zufallsvariablen (Gaussche Verteilung in dB). Daher können Knoten, die sich am Rande der Zelle befinden, nur in Abhängigkeit des sich zeitlich verändernden Zellradius miteinander kommunizieren.

Im folgenden wird eine erweiterte Version des Modells aus [PCBH03] eingesetzt. In dieser ursprünglichen Arbeit wurde der Einfluss von Mobilität auf die TCR Metrik für konstante Funkradien analytisch und simulativ untersucht. Dieses Modell wird nun mittels Schwankungen der Übertragungreichweite erweitert, für den Vergleich der Einflüsse von Mobilität und Fluktuationen der Übertragungreichweite.

Die Simulationsergebnisse unserer Arbeit zeigen quantitativ den starken Einfluss von Fluktuationen der Funkreichweite auf die Ad-Hoc Netzwerkleistung für spezifische Szenarien, im Vergleich zu den Mobilitätsaspekten. Folglich ist die abschliessende Empfehlung, beide Parameter gleichermassen im Protokolldesign und entsprechenden Modellen der Simulation und Analyse für Ad-Hoc Netze zu berücksichtigen.

Das folgende Kapitel 2 beschreibt das zur Simulation eingesetzte Modell der Schwankungen der Übertragungreichweite, erläutert die Simulationsumgebung und definiert die Leistungsmetriken TCR und Linkstabilität. Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt im Kapitel 3, bevor Kapitel 4 die Ergebnisse zusammenfasst und einen Ausblick auf die Weiterführung der Arbeit gibt.

2 Modellierung und Simulationsumgebung

Zur Evaluierung wird ein eigener, diskreter Simulator eingesetzt, welcher in C implementiert ist. Das Simulationsszenario betrachtet eine kreisförmige Gesamtfläche mit Radius $R=1000\text{m}$, in der sich zwei Knoten befinden, die mit einer drahtlosen Schnittstelle ausgestattet sind. Entsprechend des zu untersuchenden Szenarios, befindet sich der Beobachter-Knoten statisch in der Mitte der Fläche, während sich der Mobile-Knoten

entsprechend dem Random Waypoint Mobilitätsschema (siehe Einleitung) bewegt oder aber die Knoten werden statisch entlang einer Geraden in unterschiedlichen Abständen positioniert. Die Konnektivität wird in diskreten Zeitintervallen von 100ms überprüft. Die Form der Funkzellen wird vereinfachend als kreisförmig angenommen. Schwankungen der Übertragungsreichweite werden durch Änderungen des Radius zwischen r' und r'' entsprechend einer Normalverteilung simuliert, wie in Abbildung 1 dargestellt.

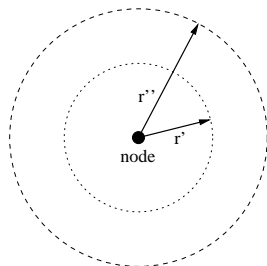


Abbildung 1: Schwankungen der Übertragungsreichweite durch Radiusvariation modelliert

Dem Modell liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Knoten innerhalb einer Distanz d kleiner als die minimale Übertragungsreichweite r' : $d \leq r'$ können direkt miteinander kommunizieren.
- Knoten ausserhalb der Distanz d grösser als die maximale Übertragungsreichweite r'' : $d > r''$ können nicht direkt miteinander kommunizieren.
- Knoten in einer Distanz d zwischen r' und r'' : $r' < d \leq r''$ können probabilistisch in Abhängigkeit der Zeit t kommunizieren.

Das Modell betrachtet ausschliesslich bi-direktionale Kommunikationsmöglichkeiten.

Die Zeitabhängigkeit wird durch einen Gauss-Markov-Prozess erster Ordnung mit Mittelwert $\mu=0$ und die Standardabweichung $\sigma=1$ wie folgt modelliert:

$$r_0 \approx N(0, 1)$$

$$r_{i+1} = \alpha * r_i + \sqrt{(1 - \alpha^2)} * e \quad \text{with} \quad e \approx N(0, 1)$$

Um eine deutliche zeitliche Abhängigkeit zu modellieren, wird der Faktor α auf den Wert 0.95 gesetzt. Die äquidistante Zeiteinteilung i setzen wir auf 0.5, 1 und 2 Sekunden. Die Parameter werden in der Simulation an ein typisches Funkszenario mit einem mittleren Funkradius von $\mu=250\text{m}$ und Standardabweichung bis maximal $\sigma=\pm 50\text{m}$ angepasst.

Die minimale und maximale Abweichung des Radius wird auf $3 * \sigma$, d.h. Mittelwert $\pm 150\text{m}$, begrenzt, wodurch statistisch sichergestellt ist, dass 99.73% der Werte innerhalb dieser Grenzen liegen (3σ -Regel). Die resultierenden Schwankungen sind exemplarisch in Abbildung 2 gezeigt, wobei (a) exemplarisch die Werte über die Zeit widerspiegelt, während (b) das Histogramm der Verteilung darstellt.

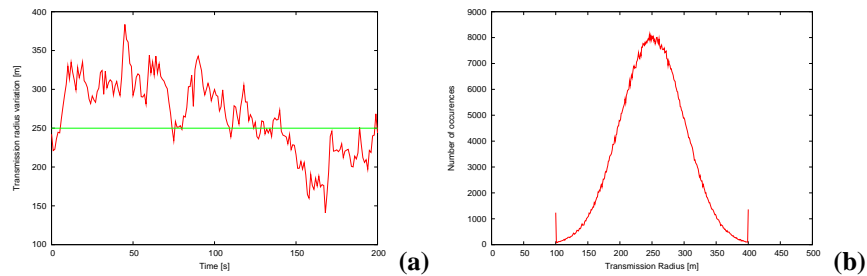


Abbildung 2: Schwankungen der Übertragungsreichweite
 (a) Werte über der Zeit, (b) Histogramm

Die beiden untersuchten Leistungsmerkmale Topologieänderungsrate und Linkstabilität basieren auf dem Begriff ‘Link’, welcher im Umfeld der drahtlosen Ad-Hoc Netzwerke wie folgt definiert werden kann. Ein Link besteht, wenn sich zwei Knoten räumlich innerhalb der Funkzelle ihres jeweiligen Nachbarn befinden, also eine direkte Kommunikation möglich ist. Die TCR beschreibt die Anzahl der Link-Änderungen pro Zeiteinheit aus der Sicht eines Knoten. Linkstabilität ist definiert als die durchschnittliche Dauer einer ‘ununterbrochenen’ Funkverbindung.

3 Simulationsergebnisse

Dieses Kapitel erläutert mittels der Simulationsergebnisse den Einfluss von reiner Mobilität, von Schwankungen der Funkreichweite und von der Kombination beider Faktoren auf die Netzwerk-Leistungsmerkmale TCR und Linkstabilität.

Topologieänderungsrate

Der Einfluss von Mobilität auf die TCR bei konstantem Radius, wie in Abb. 3 gezeigt, wurde bereits in [PCBH03] untersucht. In diesem Szenario befindet sich der Beobachter statisch in der Mitte, während der mobile Knoten sich entsprechend dem RWP Mobilitätsmodell durch die Gesamtfläche bewegt. Für stetig steigende Funkradien r bezogen auf die gesamte Systemfläche R , ist die TCR für eine Geschwindigkeit von 1m/s aufgetragen. Die TCR ist linear in der Geschwindigkeit. Dieses Ergebnis zeigt den Einfluss reiner Mobilität auf die Metrik TCR und wird in der weiteren Evaluierung zum Vergleich herangezogen.

Nach der Untersuchung des Mobilitätseinflusses, wird nun der Einfluss von Schwankungen des Funkradius auf die TCR in einem statischen Szenario betrachtet. Dazu werden

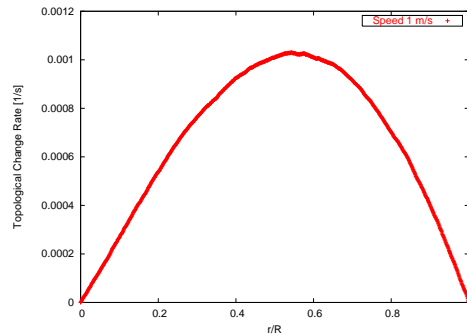


Abbildung 3: Änderungsrate der Topologie bei konstantem Funkradius und Geschwindigkeit $v=1\text{m/s}$

die beiden Knoten statisch entlang einer Geraden positioniert und in 1m Schritten jeweils ein Simulationslauf durchgeführt. Abbildung 4 zeigt die Änderungsrate der Topologie für Schwankungen der Übertragungsreichweite mit der Standardabweichung $\sigma=50\text{m}$ und eine Änderungsperiode von 0.5 Sekunden. Topologieänderungen treten natürlich nur an den Grenzen der Funkzelle auf, wo die Möglichkeit des Datenaustausches probabilistisch von den zeitlichen Fluktuationen der Funkreichweite abhängt. In diesem Bereich zeigt sich ein signifikanter Einfluss der Schwankungen der Übertragungsreichweite auf die TCR Metrik.

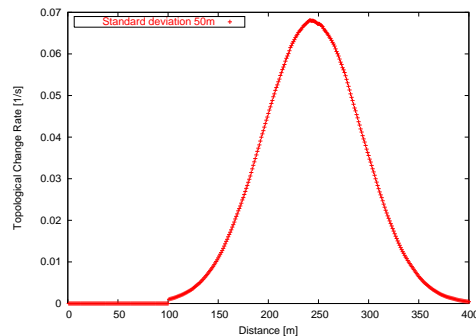


Abbildung 4: Änderungsrate der Topologie bei Schwankungen der Funkreichweite im statischen Szenario

Da sich der Einfluss von reiner Mobilität und Schwankungen der Funkreichweite in den isolierten Szenarien aufgrund unterschiedlicher Eingangsparameter nicht direkt vergleichen lassen (z.B. Abhängigkeit der maximalen TCR Werte von Geschwindigkeit oder Änderungsperiode der Schwankungen), wird im folgenden die Kombination beider Faktoren untersucht. Während sich der mobile Knoten wie zuvor entsprechend dem RWP bewegt, ändern sich die Funkreichweiten beider Knoten entsprechend dem in Kapitel 2 beschriebenen Modell. Abbildung 5 beschreibt die Topologieänderungsrate über unterschiedlichen Standardabweichungen für die Änderungsperioden 0.5, 1 und 2 Sekunden

bei konstanter Geschwindigkeit $v=1\text{m/s}$. Der mittlere Funkradius ist auf $r=250\text{m}$ festgelegt, wodurch im Ursprung des Graphen (standard Abweichung $\sigma=0$) ein Bezug zur vorherigen Mobilitätsanalyse besteht: der TCR Wert im Ursprung entspricht dem TCR Wert in der Simulation mit konstanter Funkreichweite für das Verhältnis $r/R=0.25$. Mit Zunahme der Standardabweichung steigt die Topologieänderungsrate linear an, wobei die Steigung signifikant von der Änderungsperiode abhängt. Die TCR ist weiterhin linear in der Geschwindigkeit, was weitere Simulationen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten belegen. Es zeichnet sich für die TCR Metrik deutlich ab, dass der Einfluss von Schwankungen der Funkzellengröße im Vergleich zur Mobilität eine wichtige, nicht zu vernachlässigende Bedeutung hat.

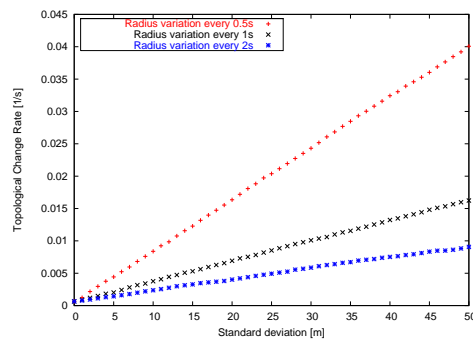


Abbildung 5: TCR bei variablen Funkradius und fester Geschwindigkeit (1m/s)

Linkstabilität

Im Folgenden wird das zweite Netzwerk-Leistungsmerkmal, die Linkstabilität, untersucht. Die Ergebnisse zeigen entsprechend unserer Definition der Linkstabilität in Kapitel 2, die durchschnittliche Dauer einer ununterbrochenen Verbindung.

Die Auswirkungen von Mobilität mit konstantem Funkzellenradius auf die Linkstabilität werden in Abbildung 6 für die Geschwindigkeiten 1, 5, 10 und 35m/s dargestellt. In diesem Szenario befindet sich der Beobachtungsknoten wieder statisch im Zentrum der Gesamtfläche, während der mobile Knoten dem RWP folgend unterwegs ist. Die prozentual zur Gesamtzeit aufgetragene Linkstabilität steigt mit Zunahme des Funkzellenradius r , welcher ebenfalls bezogen auf die Gesamtfläche r/R aufgetragen ist, da die Wahrscheinlichkeit einer möglichen Kommunikation mit zunehmender Funkzellengröße wächst. Kleine Geschwindigkeiten verzeichnen naturgemäß eine grössere Steigung, da die Aufenthaltsdauer innerhalb der Funkreichweite länger ist. Die Darstellung auf der x-Achse ist, zur besseren Lesbarkeit, auf $r/R=0.8$ beschränkt.

Der Einfluss von Schwankungen der Übertragungreichweite auf die Linkstabilität ohne Mobilität erfordert wieder die statische Positionierung der Knoten entlang der x-Achse. Im

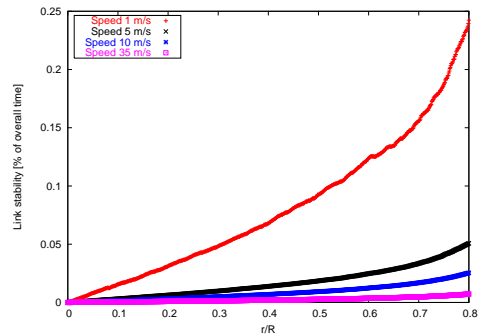


Abbildung 6: Linkstabilität bei konstantem Funkradius für unterschiedliche Geschwindigkeiten

Falle einer konstanten Übertragungsreichweite besteht Konnektivität (d.h. 100% Linkstabilität) bis zum Erreichen des Funkzellenradius, wo die Verbindung abrupt abbricht. Betrachtet man hingegen Fluktuationen der Funkzelle, so ergibt sich ein exponentieller Abfall der Linkstabilität, wie in Abbildung 7 dargestellt. Da diese Betrachtung die durchschnittliche Dauer eines ununterbrochenen Links widerspiegelt, ergibt sich zunächst bei 206m ein senkrechter Abfall der Kurve von 100% auf unter 50% Linkstabilität, da sich an dieser Stelle zum ersten Mal eine Unterbrechung des vorher durchgängigen einzelnen Links ergibt. Mit zunehmender Durchmischung der Topologiezustände findet der Graph zu einer exponentiellen Abnahme.

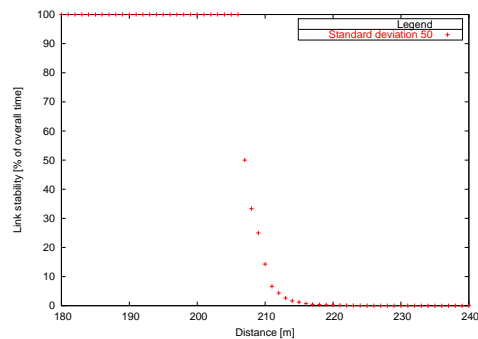


Abbildung 7: Linkstabilität bei Schwankungen der Funkreichweite im statischen Szenario

In Abbildung 8 wird der Einfluss von Mobilität und Schwankungen des Funkradius auf die Linkstabilität über die Standardabweichung σ und für die Geschwindigkeit $v=1\text{m/s}$ untersucht. Wiederum findet das Szenario mit statischem Beobachter in Zentrum, dem RWP folgenden mobilen Knoten und Fluktuationen des Funkradius beider Knoten Anwendung. Ausgehend von einem konstanten Funkradius, dargestellt durch den Ursprung in $\sigma=0$, repräsentiert der exponentielle Abfall der Kurven den Einfluss von Variationen der

Übertragungsweite, der auch für die zweite Metrik, die Linkstabilität, signifikant ist.

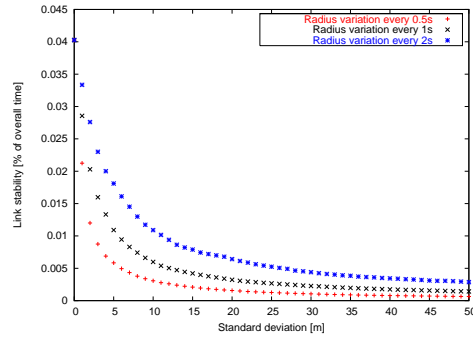


Abbildung 8: Linkstabilität bei variablen Funkradius über der Standardabweichung σ für Geschwindigkeit $v=1\text{m/s}$

4 Zusammenfassung und Ausblick

Unsere Studie vergleicht simulativ den Einfluss von Mobilität und von Schwankungen der Funkreichweite sowie der Kombination beider Faktoren auf die Netzwerk-Leistungsmerkmale TCR und Linkstabilität, welche sich auf die Leistungsfähigkeit von Ad-Hoc Netzwerkprotokollen auswirken. Das eingesetzte einfache Funkmodell basiert auf einem Gauss-Markov-Prozess erster Ordnung und dient als Beispiel-Szenario, vergleichbar etwa zu RWP als Mobilitätsmodell. Die Ergebnisse zeigen quantitativ, dass der Einfluss von Variationen der Funkzellengröße zusätzlich zur Mobilität für das untersuchte Szenario erheblich ist. Daher sollten Fluktuationen der Funkreichweite im Entwurf von Ad-Hoc Protokollen und Simulationsmodelle gleichermassen wie Mobilität berücksichtigt werden.

Als weiterführende Arbeiten sind Untersuchungen zu nennen, inwieweit ein realistischeres Modell für die Fluktuationen die Auswirkungen auf die Leistungsmerkmale verändert, sowie die Untersuchung der direkten Auswirkungen von Schwankungen der Übertragungsreichweite auf Ad-Hoc Netzwerkprotokolle. Unterstützt und verifiziert wird die Entwicklung so eines Modells durch Feldtest-Messungen.

Literatur

- [Be01] Bettstetter, C.: Mobility in wireless networks: Categorization, smooth movement and border effects. *ACM MC2R*. 5(3). 2001.
- [BFN01] Barriere, L., Fraigniaud, P., und Narayan, L.: Robust position-based routing in wireless ad hoc networks with unstable transmission ranges. In: *Proc. 5th International Work-*

shop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications.
Rome, Italy. 2001.

- [BHPC04] Bettstetter, C., Hartenstein, H., und Perez-Costa, X.: Stochastic properties of the random waypoint mobility model. *ACM/Kluwer Wireless Networks, Special Issue on Modelling and Analysis of Mobile Networks*. 10(5). September 2004. to be published.
- [BNC02] Boleng, J., Navadi, W., und Camp, T.: Metrics to enable adaptive protocols for mobile ad hoc networks. In: *Proc. ICWN*. 2002.
- [BRS03] Bettstetter, C., Resta, G., und Santi, P.: The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks. *IEEE Trans. Mobile Comp.* 2(3). 2003.
- [Co03] Constantinou, C.: Radiowave channel modelling for radio networks. In: *Tutorial MobiHoc*. 2003.
- [KLM⁺00] Kelly, O., Lai, J., Mandayam, N., Ogielski, A., Panchal, J., und Yates, R.: Scalable parallel simulations of wireless networks with wippet: Modelling of radio propagation, mobility and protocols. In: *Proc. Mobile Networks and Applications*. 2000.
- [KSM03] Kwak, B.-J., Song, N., und Miller, L.: A mobility measure for mobile ad-hoc networks. *IEEE Communication Letters*. 2003.
- [MFHF04] Möske, M., Füßler, H., Hartenstein, H., und Franz, W.: Performance measurements of a vehicular ad hoc network. In: *Proc. IEEE VTC Spring*. May 2004.
- [ns2a] Discrete event simulator targeted at networking research ns2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [ns2b] Ns2 documentation, chapter 18.3. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>.
- [PCBH03] Perez-Costa, X., Bettstetter, C., und Hartenstein, H.: Mobicom poster: Towards a mobility metric for reproducible and comparable results in ad hoc network research. *ACM MC2R*. 7(4). October 2003.
- [YLN03] Yoon, J., Liu, M., und Noble, B.: Random waypoint considered harmful. In: *Proc. IEEE Infocom*. 2003.