

DISS. ETH NO. 18078

**From Theory to Practice:
Fundamental Properties and Services
of Mobile Ad Hoc Networks**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

PATRICK STUEDI

Dipl. Inf.-Ing., ETH Zürich

born 25.07.1974

citizen of
Zürich ZH

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Gustavo Alonso, examiner
Prof. Dr. Timothy Roscoe, co-examiner
Prof. Dr. Roger Wattenhofer, co-examiner
Dr. Antony Rowstron, co-examiner

2008

Abstract

Mobile Ad Hoc Networks (MANETs) by definition operate without pre-established infrastructure. On the one hand side, this can be seen as an advantage since it makes them usable in situations where an infrastructure is not available, such as, e.g., in settings of emergency response. On the other hand, the lack of infrastructure poses difficult challenges to protocol design and software architecture for such networks. One example is wireless media access. In contrast to traditional wireless networks where nodes communicate through base stations, there is no dedicated network component to control the media access of the nodes in MANETs. This makes scheduling wireless transmissions complicated and affects the overall throughput capacity of the network. Another example are application level services. Many advanced applications on MANETs require basic services such as, e.g., DNS, SIP and SLP to operate. These services, however, typically rely on centralized components for storing the required networking information, components that are not available in MANETS. In this thesis, we study several problems occurring in MANETs at different places in the network stack.

The first part studies fundamental properties of MANETs on the physical and data link layer, such as, e.g., capacity, connectivity, quality of service, etc. Understanding the behavior of those properties is important because they describe the limitations applications face in MANETs. Fundamental properties like connectivity and capacity have been in the focus of research over the past years. The novelty of the work presented in this thesis is that we use a formal model approach combined with Monte-Carlo methods. The approach chosen has a two-fold advantage: it is protocol independent and, at the same time, the computations are performed on a network model that is based on realistic physical properties. In the thesis we show how such an approach can be used to study the complex interactions between different interference and signal propagation models on the throughput capacity of a network.

The second part of the thesis studies ad hoc networks from a system perspective. Thereby our goal is to provide a networking infrastructure that transparently hides the complexity of the underlying ad hoc network to upper layers. We believe that the ability to run traditional Internet-based applications in ad hoc networks is the key for MANETs to become ubiquitous. This dissertation presents several network abstractions and services that support this goal. First, we present the design and implementation of a virtual network interface which allows to integrate nodes equipped with different media access technologies into one single IP based MANET. The virtual interface accounts for the fact that today's devices become more and more heterogeneous, particularly with respect to their wireless access technology. Second, we present the architecture of several fundamental networking services which allow Internet-based applications to run transparently in MANETs. Opening ad hoc networks for Internet applications such as chat or VoIP is an important step towards MANETs to be used in the everyday life. For each of the networking services, DNS, SIP and SLP, we show how they provide a smooth MANET-Internet phase transition. The core building block of those networking services is *MAND*, a distributed system for storing and searching key/value pairs. *MAND* is highly efficient as distribution

of both tuples and requests happens based on piggybacking onto routing messages that the MANET network uses anyway, thus causing no additional message traffic. The thesis evaluates MAND together with the services built on top. The evaluation is done on a 30 node testbed and on a deployment of 20 Nokia N800 handheld devices. As a last part of this thesis, we present a social networking application for ad hoc networks. *AdSocial* allows users within a MANET to discover each other and browse through other people's personal profile. *AdSocial* also integrates chat, VoIP and video. Similar to other networking services described in this thesis, *AdSocial* uses the *MAND* system to advertise user information, thus not imposing any additional traffic load.

Zusammenfassung

Mobile Ad Hoc Netzwerke (MANETs) operieren per definition ohne eine bestehende Infrastruktur. Dies kann zum einen als Vorteil angesehen werden da es erlaubt solche Netze in Situation einzusetzen wo keine Infrastruktur vorhanden ist, wie z.B. in Notfall Szenarien. Zum anderen fuehrt das Fehlen einer Infrastruktur aber auch zu Schwierigkeiten bezueglich Protokoll Design und Software Architektur. Ein Beispiel sind Medien Zugriffsverfahren. Im Unterschied zu traditionellen Funknetzen, wo die Kommunikation zwischen Geraeten (Knoten) ueber Basisstationen abgewickelt wird, gibt es in MANETs keine dedizierten Netzwerk Komponenten die den Zugriff auf das Funk Medium kontrollieren. Dies erschwert die Koordination von Datenuebertragungen zwischen verschiedenen Knoten erheblich und beeintraehtigt den Datendurchsatz. Ein anderes Beispiel sind Applikationen und Services in MANETs. Viele anspruchsvolle Applikationen basieren auf Services wie DNS (Domain Name Service), SIP (Session Initiation Protokoll) oder SLP (Service Location Protokoll). Diese Services wurden aber urspruenglich fuer das Internet entwickelt und erfordern gewisse zentrale Komponenten, welche in MANETs nicht verfuegbar sind. Diese Dissertation befasst sich mit Problemen in MANETs auf verschiedensten Netzwerk Schichten.

Der erste Teil dieser Dissertation befasst sich mit fundamentalen Eigenschaften im Bereich der physikalischen Schicht. Eigenschaften wie Netzwerk Zusammenhaengigkeit oder Netzwerk Durchsatz sind entscheidende Kriterien hinsichtlich der Frage welche Klasse von Applikationen fuer MANETs ueberhaupt relevant sind. In den vergangenen Jahren rueckten fundamentale Eigenschaften wie 'Netzwerk Durchsatz' verstaerkt ins Blickfeld von Forschung. Die Neuartigkeit der durch diese Dissertation praesentierten Arbeit liegt im verwendeten Ansatz, einer Kombination von formalen Modellen mit Monte-Carlo Methoden. Dieser Ansatz hat zwei wesentliche Vorteile. Er ist unanbhaengig von konkreten Netzwerk Protokollen und gleichzeitig basieren die Berechnungen auf einem Netzwerk Modell mit realistischen physikalischen Eigenschaften. Die vorliegende Arbeit zeigt auf, wie ein solcher Ansatz verwendet werden kann um komplexe Zusammenhaenge zwischen verschiedensten Inteferenz und Signalausbreitungs Modellen zu untersuchen.

Der zweite Teil dieser Dissertation studiert Ad Hoc Netzwerke von einer System Perspektive. Das verfolgte Ziel ist es, eine Netzwerk Infrastruktur zu entwickeln, welche die Komplexitaet des unterliegenden ad hoc Netzwerkes versteckt vor hoeher liegenden Services und Applikationen. Wir sind ueberzeugt, dass die Faehigkeit existierende Netzwerk Applikationen ohne Veraenderung nahtlos in ad hoc Netzwerken betreiben zu koennen der Schluessel ist um ad hoc Netzwerke einer breiteren Masse zugaenglich zu machen. Die vorliegende Doktorarbeit presentiert verschiedene Netzwerk Abstraktionen und Dienste welche diese Ueberlegung umsetzen. Zuerst stellt die Arbeit in virtuelles Netzwerk Interface vor welches es ermoeglicht Knoten mit verschiedensten Medienzugriffsverfahren in ein einheitliches IP basiertes ad hoc Netzwerk zu integrieren. Das virtuelle Interface koennte einen wichtigen Baustein in zukuenftigen heterogenen Netzwerken darstellen wo die einzelnen Geraete mit verschiedensten Funk Technologien ausgeruested sind. Als naechstes presentiert die vorliegende Arbeit die Software Architektur von verschiedensten fundamentalen Netzwerk Diensten

welche es ermöglichen klassische Internet-basierte Applikation transparent und ohne Veränderung in ad hoc Netzwerken zu betreiben. Die Möglichkeit existierende Applikationen wie Chat oder VoIP in ad hoc Netzwerken zu verwenden, spontan und ohne jegliche System Änderungen, stellt einen wichtigen Schritt dar hinsichtlich dem Gebrauch von Ad Hoc Netzen im täglichen Leben von Nutzern. Für jeden in dieser Arbeit präsentierten Netzwerk Dienst, DNS, SLP, SIP, wird aufgezeigt inwiefern und für welche Art von Applikationen der Dienst einen nahtlosen MANET/Internet Übergang darstellt. Den wichtigsten Baustein im Design dieser Dienste stellt *MAND* dar, eine neuartige Infrastruktur zum verteilen, speichern und suchen von Schlüssel/Wert Paaren (Tuples) in MANETs. *MAND* ist message effizient da Tuples einzig und allein per *Huckepack* angehängt an bestehende Routing Pakete im Netzwerk verteilt werden. In der Dissertation wird *MAND* zusammen mit den darauf aufbauenden Services evaluiert. Die Evaluation findet auf einem Testbed von 30 Knoten und per Simulation statt. Zusätzlich wurden alle in dieser Dissertation entwickelten Services und Applikation auf einem Netzwerk von 20 Nokia Handheld Geräten eingesetzt. Im letzten Teil dieser Dissertation stellen wir eine neuartige Applikation für 'social networking' in ad hoc Netzwerken vor. *AdSocial* ermöglicht das gegenseitige Auffinden von Nutzern mit ähnlichen Interessen in Ad Hoc Netzen und das durchsuchen von persönlichen Profilen. Zusätzlich integriert *AdSocial* verschiedenste Applikationen wie Chat, VoIP oder Video. Ähnlich wie die vorgängig präsentierten Netzwerk Dienste verwendet auch *AdSocial* das *MAND* System um Informationen der Nutzer effizient und ohne Packet overhead im Netzwerk verfügbar zu machen.