

Mobilität im „Future Internet“

Geräte- und Ressourcenmobilität:
Herausforderungen und Techniken im Überblick

Karin Anna Hummel · Andrea Hess
Harald Meyer

Die Bedeutung und die Konsequenzen von Mobilität im Internet

Weshalb ist Mobilität von Bedeutung für das Internet der Zukunft? Eine Antwort auf diese Frage ist, dass die Internetnutzung, bedingt durch sinkende Zugangskosten, steigende Bandbreiten und vielseitig verwendbare, smarte und durch Sensoren erweiterte Endgeräte, zunehmend mobil wird. Zusammen mit vielen, oft frei verfügbaren, nützlichen Anwendungen sind mobile Smartphones bereits sehr verbreitet, wie Apples iPhone-Serie oder die Android-basierte HTC-Serie. Diese Endgeräte unterstützen meist mehrere drahtlose Netzwerke, wie beispielsweise Wireless LAN (WLAN) IEEE 802.11, Bluetooth, GPRS und 3G-Netzwerke, und zukünftig wird auch die Unterstützung von Long Term Evolution (LTE) erwartet. Trendforscher sehen für die Zukunft einen weiteren Zuwachs an mobilen Endgeräten sowie ein Ansteigen an mobil genutzten Diensten, wie dem Zugriff auf Informationsseiten, E-Mail und Instant Messaging, bis hin zur ubiquitären Teilnahme an sozialen Netzwerken, Mobile Commerce und Unterhaltung (Musik, Videos, Spiele), wie im 12. Faktenbericht 2009 der TNS Infratest zusammengefasst wird [45]. Wurden im Jahr 2007 weltweit für mobiles Entertainment 10,7 Mrd. Euro umgesetzt, ist für 2012 ein Umsatz von 21,5 Mrd. Euro prognostiziert [45, S. 147]. Allerdings ist in manchen Sektoren kein langfristiges Wachstum zu erwarten, wie etwa für Mobile-TV Streaming, welches mit erfolgreicher Einführung der Digital-Video Broadcasting-Technologien DVB-T und DVB-H voraussichtlich an Bedeutung verlieren wird, während für mobile Spiele ein Zuwachs prognostiziert wird. Diese Entwicklungen legen nahe,

zukünftige Internetprotokolle unter dem Aspekt der mobilen Internetnutzung zu entwickeln und damit drahtgebundene und drahtlose Teile des Internet zu integrieren. Die hier betrachtete Form der Mobilität ist eine *physikalische Mobilität*, genauer eine Gerätemobilität. Gerätemobilität erfordert von Netzwerkprotokollen zusätzliche Mechanismen, um Verbindungen und Dienste in Bewegung zu unterstützen. Ein Teil des Artikels führt deshalb die Probleme der physikalischen Mobilität ein und gibt einen Überblick über existierende Lösungsansätze.

Mit der Nachfrage nach mobilen Diensten ist das zukünftige Internet auch mit einem Anwachsen der teilweise heterogenen und neuen Anforderungen der mobilen Benutzer an das drahtlose Zugriffsnetzwerk konfrontiert. Die Qualität der Netzwerke wird hinsichtlich der Robustheit, der Sicherheit und des Vertrauens in das Netzwerk sowie der Unterstützung hochqualitativer Multimediadienste bewertet werden. Zusätzlich sollen situations- und sensorbasierte Dienste in Echtzeit unterstützt werden. Der Schutz der Privatsphäre bei gleichzeitiger allgegenwärtiger Vernetzung ist ein weiterer, wichtiger Aspekt, insbesondere im Zusammenhang mit situationsbasierten, ortsgebundenen Diensten. Um diese Anforderungen bestmöglich unterstützen zu können, ist eine Form von Benutzerzentriertheit der Netzwerke und unterstützende, flexibel anpassbare Netzwerkinfrastruktur notwendig.

DOI 10.1007/s00287-010-0425-7
© Springer-Verlag 2010

Karin Anna Hummel · Andrea Hess · Harald Meyer
Institut für Distributed and Multimedia Systems,
Universität Wien,
Lenaugasse 2/8, 1080 Wien, Österreich
E-Mail: {karin.hummel, andrea.hess,
harald.meyer}@univie.ac.at

Zusammenfassung

Eine der Herausforderungen im „Future Internet“ ist durch die Mobilität der Benutzer aber auch durch die der Ressourcen gegeben. Während Benutzer zunehmend mit tragbaren Geräten auf Internetdienste zugreifen, wurden Internetprotokolle unter der Annahme stationärer Knoten entworfen. Im Artikel wird ein Überblick über Mechanismen zur Unterstützung von Gerätemobilität gegeben, die für eine mobilitätsfreundliche Architektur des Future Internet von Relevanz sind. Darunter fallen Mechanismen zur Verbesserung der Konnektivität und Tolerierung von Verbindungsunterbrechungen sowie Mechanismen zur effizienten Adressierung und für übergangsloses Handoff-Management. Zusätzlich wird das Konzept der Mobility-Awareness vorgestellt, das auf Basis aktueller Bewegung reaktive und proaktive Adaptierungen von Netzwerkprotokollen ermöglicht.

Die Mobilität von Netzwerkressourcen wird als zweite Form der Mobilität im Überblick diskutiert. Zusammen mit der Netzwerkvirtualisierung kann die Ressourcenmigration zur Flexibilisierung des Future Internet beitragen. Ressourcen wie virtuelle Links und virtuelle Router können zur Erreichung unterschiedlicher Ziele, wie zum Beispiel zur Verbesserung der Netzwerkqualität, Robustheit oder Energieeffizienz, migriert werden.

Gleichzeitig finden technische Veränderungen statt, die im zukünftigen Internet voraussichtlich eine relevante Rolle spielen werden. So ist sowohl für drahtlose als auch für drahtgebundene Netzwerke ein Anwachsen der Übertragungskapazitäten und der Anzahl der Netzanbieter zu erwarten (z. B. Mobilfunknetzwerke, WLAN Hot Spots, Wi-Max, freie WLAN-basierte Funknetzwerke). Um Netzwerkressourcen flexibel zu verwalten, konsolidieren und teilen zu können, wird das Konzept der *Netzwerkvirtualisierung* als ein Schlüsselkonzept im zukünftigen Internet gesehen. Virtualisierung wird generell als Technik verstanden, um vom physikalischen Netzwerk zu abstrahieren. Virtuelle Ressourcen, wie virtuelle Router oder virtuelle Links, können demnach migriert werden und wer-

den damit zu mobilen Ressourcen. Durch diese Technologie wird eine weitere Form der Mobilität eingeführt, die *logische Mobilität* oder Ressourcenmobilität. Das ist die zweite Antwort des Artikels auf die eingangs gestellte Frage, warum Mobilität für das Internet der Zukunft von Bedeutung ist. Auch die Ressourcenmobilität wird in einem Teil des Artikels diskutiert und es werden Techniken zur Realisierung der Migration im Überblick beschrieben.

Besonderheiten drahtloser Netzwerke

Mobile Internetnutzung erfolgt vorwiegend drahtlos. Allerdings sind auch bei stationärem Verhalten der Geräte das drahtlose, störungsanfällige Medium und das mobile Gerät selbst die Verursacher einiger Probleme. Zu den Problemen zählen geringere Bandbreite und höhere Datenverluste im Gegensatz zu drahtgebundenen Netzwerken, limitierte Energiequellen und häufige Verbindungsunterbrechungen.¹ Für die Unterstützung mobiler Dienste im zukünftigen Internet ist es demnach notwendig, Lösungen für diese Probleme zu bieten, um eine ausreichende Qualität der Dienste auch im drahtlosen Zugriffsnetzwerk zu gewährleisten.

Zu den Techniken zur Qualitätssteigerung in drahtlosen Netzwerken zählt das Multi-Homing, d. h. die gleichzeitige Verbindung von Endgeräten zu unterschiedlichen, drahtlosen Netzwerken. Multi-Homing kann insbesondere zusammen mit dem Konzept Multi-Path, d. h. der gleichzeitigen Verwendung mehrerer Übertragungspfade, zur flexiblen Steigerung von Servicequalität beitragen. Bei dieser Technik muss allerdings auch berücksichtigt werden, dass Übertragungen im drahtlosen Medium einander stören können. Eine weitere Möglichkeit der Reaktion auf schlechte Verbindungsqualität ist, Verzögerungen in Netzwerkprotokollen zu tolerieren. Um Ende-zu-Ende-Datenübertragung auch über drahtlose Multi-Hop-Netzwerke zu realisieren, wird oft nicht auf traditionelle Routingprotokolle zurückgegriffen, wie dem im Internet verwendeten Open Shortest Path First (OSPF) [35], sondern es werden insbesondere für Ad-hoc-Netzwerke neue, für die geringeren Bandbreiten und Zugriffscharakteristiken optimierte, Verfahren entwickelt. Zwei Protokolle, die sich in Freifunknetzen im Einsatz befinden, sind das Optimized Link State Routing (OLSR) Proto-

¹ Eine detaillierte Einführung in das Themengebiet „Mobile Computing“ ist in [40] zu finden.

Abstract

One of the challenges in the future Internet is posed by the mobility of users as well as the mobility of resources, both supported only partially in the current Internet. While Internet services are more and more accessed via portable devices, the networking protocols used have been designed for stationary network nodes. In this article, we give an overview of mechanisms supporting device mobility, such as mechanisms increasing device connectivity, tolerance of temporary connection losses, efficient addressing, and seamless handoff management. In a future mobility-friendly Internet architecture, these mechanisms should be considered. Additionally, we introduce the concept of mobility-awareness. Mobility-awareness is based on explicitly modeling user and device mobility and on using this information to optimize and proactively adapt networking protocols.

Migration of network resources is the second type of mobility discussed in this article. Together with network virtualization, resource mobility is a technique of interest to contribute to the flexibility of the future Internet. Resources such as virtual links or virtual routers can be moved for reasons of increasing network quality, robustness, and energy-efficiency in the network.

koll² [12] und das Better Approach to Mobile Ad-hoc Networking (BATMAN) Protokoll.³ Aktuelle Diskussionen stellen das Paradigma der Ende-zu-Ende-Datenübertragung – und damit auch die Grundannahme traditioneller Routingverfahren – für (mobile) Dienste im Internet der Zukunft selbst infrage [25]. Anstelle von Verbindungen (oder Routen) zwischen zwei Endgeräten soll der Zugriff auf Inhalte bestmöglich und mit neuen Techniken unterstützt werden. Netzwerke werden so zu inhaltezentrierten Netzwerken (Content-Centric Networking).

Herausforderung Gerätemobilität

Zusätzlich zu den Problemen der drahtlosen Übertragung stellt die Mobilität der Geräte, d. h. die

Ortsänderung über die Zeit, eine Herausforderung dar. Das Phänomen der Mobilität wurde in der Vergangenheit beim Protokollentwurf oft vernachlässigt, weil die Geräte stationäres oder nomadisches Verhalten aufwiesen. Deshalb ist im Vergleich zu Mobilfunknetzwerken die Mobilität im heutigen Internet schlechter unterstützt. Die Auswirkungen der Bewegung sind allerdings auf allen Netzwerkschichten erkennbar. So führt die Zunahme der Distanz zwischen Sender und Empfänger zu einer Abnahme der Signalstärke. Dieses Phänomen betrifft das Medium und die *physikalische Schicht* (nach OSI-Referenzmodell [51]). Zu geringe Signalstärke kann auf der *Sicherungsschicht* zu Paketverlusten und Fehlübertragungen inklusive wiederholter Übertragung mit resultierenden geringeren Datenraten führen. Viele infrastruktur-basierte Netzwerke, wie Mobilfunknetzwerke und der WLAN-Infrastrukturmodus im Ansatz, unterstützen den Wechsel zwischen Zugriffspunkten, um die Verbindung zu einem Netzwerk aufrechtzuerhalten (Handoff oder Handover genannt). Bewegung bedeutet auch eine Änderung der Topologie und damit auch Auswirkungen auf die *Netzwerkschicht*. Obwohl IP-Adressen logische Adressen darstellen, ist das Konzept der Adressierung in IP ein hierarchisches und das Beibehalten der Adresse nur innerhalb des Subnetzwerkes problemlos möglich. Für darüberliegende verbindungsorientierte Schichten bedingen Verbindungsverschlechterungen bis zu Verbindungsabbrüchen oft einen Zeitablauf in existierenden Sessions. Diese Sessions müssen dann wieder neu gestartet werden. Beispielprotokolle, die durch den zusätzlichen Overhead ineffizient arbeiten, sind TCP auf der *Transportschicht* bzw. auch Applikationsprotokolle, die zum Beispiel Benutzerauthentifizierungen beim Wiederaufbau einer Session verlangen.

Zur Illustration der Mobilität im Internet wird ein Beispiel von Wireless Mesh Networks (WMNs) vorgestellt. Ein WMN ist ein drahtloses Multi-Hop-Netzwerk, das eine Mesh-Topologie aufweist, im Gegensatz zu Mobile Ad-hoc Networks (MANETs) aber kaum Mobilität der Router unterstützen muss. Abbildung 1 zeigt zwei unterschiedliche WMNs als Zugriffsnetzwerke und mobile Endgeräte, die gleichzeitig zu mehreren Netzwerken Verbindungen aufbauen können und über diese Netzwerke adressierbar sind (Multi-Homing). Es wird sowohl physikalische, d. h. durch Bewegung des Gerätes

² Freifunk Netzwerk „FunkFeuer“: <http://www.funkfeuer.at/>.

³ Freifunk Netzwerk „Freifunk“: <http://freifunk.net/>; BATMAN Projekt: <http://www.open-mesh.net/>.

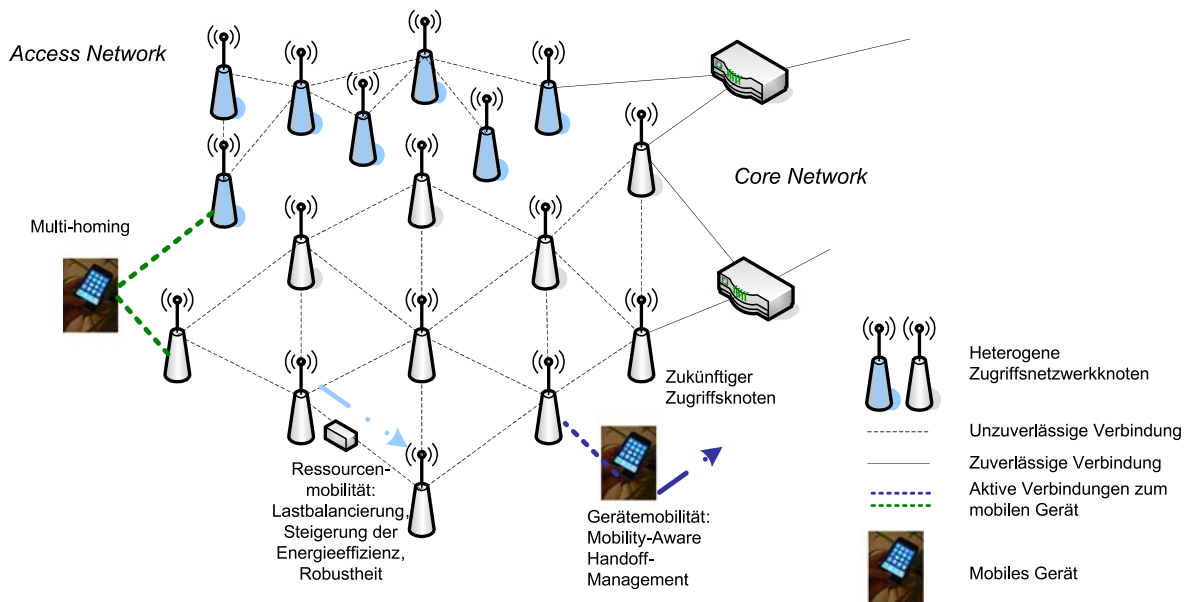


Abb. 1 Geräte- und Ressourcenmobilität in einem drahtlosen Mesh-Zugriffsnetzwerk

verursachte, Mobilität, als auch logische Mobilität (Ressourcenmobilität) dargestellt.

Entwurfsprinzipien einer mobilitätsfreundlichen Architektur des Future Internet

Aufgrund der unterschiedlichen Initiativen zur Entwicklung eines zukünftigen Internet ist noch nicht klar, wie die zukünftige Internetarchitektur aussehen wird. Diskutiert werden evolutionäre Ansätze sowie Clean-Slate-Ansätze, wie von Forschern der Stanford University⁴ vorgeschlagen. Unter den Projekten, in denen derzeit das *Future Internet* diskutiert wird, sind: AKARI⁵, G-Lab⁶, GENI⁷, 4WARD⁸, EURO-NF⁹.

Aus den Herausforderungen der Gerätemobilität und den Benutzeranforderungen, dem vorteilhaften Einsatz von Ressourcenmobilität und den neuen Trends in der Netzwerktechnologie lassen sich folgende Entwurfsprinzipien ableiten, auf die im weiteren Artikel Bezug genommen wird:

- Um das Netzwerk an die Bedürfnisse und Anforderungen der Benutzer anzupassen, ist eine Beschrei-

bung des Kontexts der Benutzer günstig, wie momentaner Ort, Preispräferenzen, Qualitätsanforderungen, bevorzugter Network Provider etc. Dieser Kontext kann sowohl Präferenzen und Profile beinhalten als auch Informationen, die durch Beobachtung des Benutzerverhaltens gewonnen werden, wie zum Beispiel der Wechsel der Location Area in Mobilfunknetzwerken. Netzwerkprotokolle können dann Adaptierungen auf Basis dieses Kontextwissens vornehmen (User-Awareness und Device-Awareness). Zur Unterstützung von Mobilität im Netzwerk werden die Beschreibung der Bewegung, zum Beispiel der momentane Aufenthaltsort, die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit sowie Bewegungsmuster verwendet. Allgemein werden *Mobilitätsmodelle* erstellt und verwendet, um die Bewegung in Ort und Zeit abzubilden und dem Netzwerk strukturierte Kenntnis der Gerätemobilität zur Verfügung zu stellen. Das Netzwerk kann auf Basis dieser Mobilitätsinformation Adaptierungen vornehmen. Dieses *Konzept der Mobility-Awareness* ist ein neueres Konzept, dessen Abhängigkeit von der Güte der Mobilitätsbeschreibung berücksichtigt werden muss. Abgeleitete Prädiktoren können nur mit einer gewissen Genauigkeit den zukünftigen Aufenthaltsort eines Gerätes oder mehrerer Geräte voraussagen.

- Um drahtgebundene und drahtlose Teile im zukünftigen Internet zu integrieren und gleichzeitig

⁴ <http://cleanslate.stanford.edu/>.

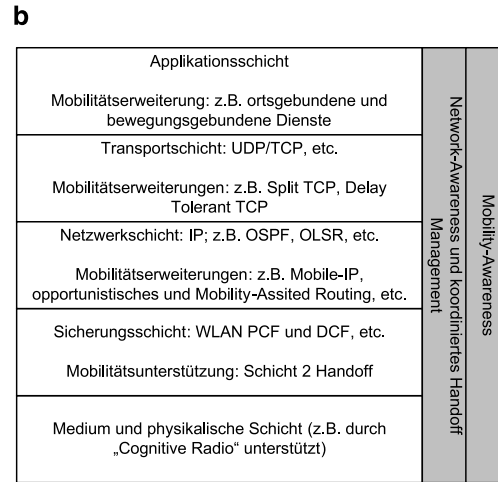
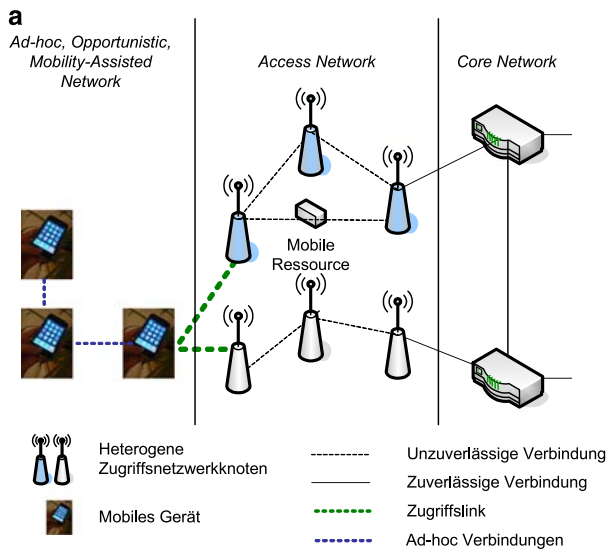
⁵ <http://akari-project.nict.go.jp/eng/index2.htm>.

⁶ <http://www.german-lab.de/>.

⁷ <http://www.geni.net/>.

⁸ <http://www.4ward-project.eu/>.

⁹ <http://www.euronf.org/>.



Cross-Layer Ansatz zur Unterstützung der Gerätemobilität.

Abb. 2 Mobilitätsunterstützende Mechanismen am Beispiel eines Wireless Mesh Network: **a** Systemarchitektur der Infrastruktur und Ad-hoc-Komponenten, **b** eine mögliche Cross-Layer-Architektur, basierend auf Mobilitätserweiterungen von Protokollen im traditionellen Schichtenmodell

die Qualitätsanforderungen der Benutzer zu erfüllen, sind für das drahtlose Netzwerk oft zusätzliche Mechanismen zur Leistungs- und Dienstgütesteigerung nötig. Da sich die Leistung im drahtlosen Netzwerk häufig ändert, sind autonome und selbstadaptierende Mechanismen zu bevorzugen, die auf Kenntnissen über die aktuelle Netzwerkleistung basierende Adaptierungen vornehmen (das Netzwerk wird selbst Network-Aware). Werden nun Engpässe festgestellt, können zusätzliche Mechanismen zur Problemminderung zum Einsatz kommen. Ein Beispiel ist auch hier der Einsatz von Multi-Homing, um die Datenübertragungsraten für Multimediaendienste im drahtlosen Netzwerk durch die Verwendung voneinander unabhängiger, drahtloser Pfade zu steigern. Zusätzlich kann die Konnektivität durch die Integration drahtloser Ad-hoc-Verbindungen gesteigert werden. Geeignete Lösungsansätze für Gerätemobilität sollten in eine mobilitätsfreundliche Architektur integriert werden sowie passend und flexibel auswählbar sein. Im Artikel wird insbesondere auf die Adressierung mobiler Geräte und das Ausnutzen von Mobilität durch opportunistische Protokolle eingegangen.

- Die Integration drahtloser und drahtgebundener Netzwerke, die Benutzerzentriertheit und die

damit verbundene Heterogenität der Anforderungen an Netzwerke sowie der Wunsch nach geteilter, sicherer Verwendung physikalischer Ressourcen erfordern, dass Netzwerkressourcen flexibel eingesetzt werden können. *Netzwerkvirtualisierung*, eine Methode zur Abstraktion von physikalischen Netzwerkressourcen, kann hier zur Flexibilisierung eingesetzt werden. Durch *logische Mobilität* virtueller Ressourcen, d. h. deren bestmögliche Platzierung im virtuellen Netzwerk, soll die Qualität im Netzwerk verbessert werden. Für die *Ressourcenmobilität* ist die *Netzwerkvirtualisierung* eine unterstützende Technologie.

Da durch Bewegung verursachte Phänomene auf mehreren Schichten des heutigen Internet gleichzeitig bemerkbar sind, ist ein Cross-Layer-Ansatz zu bevorzugen, der es ermöglicht, Adaptierungen in Protokollschichten mit dem Wissen der anderen Protokollschichten vorzunehmen (Abb. 2b). Das Konzept der Mobility-Awareness kann koordiniert in mehreren Netzwerkschichten eingesetzt werden und sollte als übergreifendes Modul in eine Protokollarchitektur einfließen. Durch ein zusätzliches Overlay-Netzwerk könnte auf Basis der Nutzeranforderungen und des Mobilitätsverhal-

tens eine passende Konfiguration bzw. Auswahl der Netzwerkressourcen unterstützt werden. Im Projekt Spontaneous Virtual Networks (SpoVNet)¹⁰ werden Overlay-Netzwerke insbesondere zur Unterstützung von Mobilität verwendet [7]. Das Problem der Adressierung wird gelöst, indem Knoten-IDs von Netzwerkpositionsgebern getrennt werden, die transparent gewechselt werden können. In einer möglichen, nicht hierarchischen Architektur des Future Internet könnten die Protokolle zur Mobilitätsunterstützung (Abb. 2b) zusammen mit der Mobility-Awareness als ein Modul realisiert werden.

Modellierung physikalischer Mobilität

Um über Eigenschaften und Unterstützungsmöglichkeiten der Gerätemobilität sprechen zu können, sollen zuerst Modelle zur Beschreibung von Mobilität vorgestellt werden. Mobilitätsmodelle ermöglichen es, aus Ortsinformationen über die Zeit Bewegungseigenschaften abzuleiten und zu beschreiben. Diese expliziten Modelle können in Netzwerken im Echtzeitbetrieb sowie im Design und in der Analyse von Netzwerken verwendet werden. Anwendungsbeispiele für den Einsatz im Design und der Analyse sind die Forschung an Mobile Ad-hoc Networks (MANETs) und an Mobilfunknetzwerken. Mobilitätsmodelle können anhand ihrer Granularität als *mikroskopische* (Einzelbewegungen beschreibend) und als *makroskopische* (Charakteristiken eines Bereichs beschreibend, wie Signalisierungscharakteristiken und Abfragelast; vgl. das *City Area Model* in [34]) Modelle klassifiziert werden [5]. Zusätzlich können auch *Gruppenmodelle* zum Einsatz kommen, welche die Bewegung mehrerer Individuen beschreiben und damit auch soziale Relationen modellieren können.

Im Echtzeitbetrieb können Mobilitätsmodelle für reaktive Protokollentscheidungen und für die Vorhersage zukünftiger Positionen und proaktiver Protokollentscheidungen verwendet werden. Für kurze Zeiträume ist oft lineare Interpolation ausreichend, um Mobilitätsverhalten wie Richtung und Geschwindigkeit, fortzuschreiben. Allerdings können diese Beschreibungen zum Beispiel Muster im täglichen, menschlichen Verhalten nicht adäquat beschreiben. Eine bessere Methode ist die Beobachtung des Bewegungsverhaltens einer Gruppe oder

einer Einzelperson über einen längeren Zeitraum zur Identifizierung von Regelmäßigkeiten und die anschließende Entwicklung eines Prädiktors [2]. Es werden drei Arten von Mobilitätsmodellen unterschieden, die unterschiedlich gut geeignet sind für die realistische Mobilitätsmodellierung und -vorhersage: *einfache synthetische Basismodelle*, *Trace-Based-* und *studienbasierte Modelle* (Survey-Based Models). Je realitätsgetreuer die Modelle das Bewegungsverhalten abbilden, umso besser können sie für den Echtzeitbetrieb im Netzwerk aber auch als Bewegungsmodell für Simulationen verwendet werden.

Einfache synthetische Basismodelle. Die grundlegenden synthetischen Basismodelle sind das *Random Walk Model* und das *Random Waypoint Model*, die Bewegungsrichtung und Bewegungsgeschwindigkeit eines mobilen Nutzers zufallsbasiert bestimmen [9]. Hierbei wird nach konstantem Zeitintervall oder zurückgelegter Distanz eine neue Richtung und Geschwindigkeit aus vordefinierten Wertebereichen zufällig ausgewählt. Das *Random Waypoint Model* sieht zusätzlich Pausenzeiten zwischen den einzelnen Bewegungsschritten vor. In der simplen Form basieren die zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen nicht auf empirischen Untersuchungen und sind nicht realistisch. Um simple, zufallsbasierte Modelle an die Realität anzunähern, wird häufig versucht, die Mobilität durch geografische Einschränkungen, wie beispielsweise Stadtpläne, zu verfeinern. Ein Beispiel ist das *Restricted Random Waypoint Model* [8]. Eine weitere Art probabilistischer Mobilitätsmodelle sind *Markov-Modelle*, die zukünftige Bewegungszustände anhand vergangener Pfade und des aktuellen Zustands bestimmen [27]. Rein synthetische Mobilitätsmodelle sind für die Verwendung als Prädiktoren schlecht geeignet und werden häufig für die Untersuchung von Stabilitätsmerkmalen von Netzwerkprotokollen verwendet. Bemerkenswert ist, dass sich beispielsweise beim *Random-Waypoint-Modell* über die Zeit signifikante und unerwünschte Ungleichverteilungen der Knoten auf der Simulationsfläche ergeben. Dieses Phänomen wird in [6] beschrieben.

Trace-Based-Mobilitätsmodelle. Trace-Based-Mobilitätsmodelle beruhen entweder auf Geopositionen wie GPS-Daten oder auf Netzwerk-Logdaten,

¹⁰ SpoVNet Projekt: <http://www.spovnet.de/>.

die eine Untersuchung der Nutzermobilität innerhalb des Netzwerks ermöglichen [9, 22]. Logdaten des Netzwerks sind Aufzeichnungen darüber, in welchen Zeiträumen eine Verbindung zu einem bestimmten *Point of Attachment* (PoA) bestand. Meist basieren Bewegungsdaten, die für Mobilitätsanalysen herangezogen werden, auf Information über die Anbindung eines mobilen Gerätes zu Zugriffspunkten (Access Points, APs) in IEEE 802.11 WLANs oder zu Basisstationen in Mobilfunknetzwerken. In den vergangenen Jahren entstanden umfangreiche, online verfügbare Sammlungen von Traces wie beispielsweise die CRAWDDAD-Datenbank [13]. In [28] wird zum Beispiel ein Mobilitätsmodell vorgestellt, welches auf Netzwerkdatenauswertungen von VoIP-Telefonen (VoIP: Voice over IP) beruht. Auf Basis der extrahierten Bewegungscharakteristiken wurden statistische Verteilungen für Modellparameter, wie Geschwindigkeit und Pausenzeiten, ermittelt. Durch statistische Analysen der Mobilitätscharakteristiken in den Traces lassen sich quantitative Aussagen über Modellparameter ableiten [23, 28]. Typische Mobilitätscharakteristiken, die sich für die Mobilitätsvorhersage verwenden lassen, sind:

- räumliche Charakteristiken, wie zum Beispiel *Prevalence* (der Anteil der Zeit, in der ein Nutzer mit einem AP verbunden war und folglich an einem Ort nahe des APs verweilt hat) und der *Aktivitätsbereich* (der geografische Bereich aller besuchten APs) oder
- zeitliche Charakteristiken wie *Persistenz*, das ist die Dauer einer Verbindung zu einem AP, und *Pausenzeiten*.

Zudem können räumlich-zeitliche Punkte des Zusammentreffens zweier Nutzer oder regelmäßige Besuche desselben Orts betrachtet werden.

Zusätzlich zu den beschriebenen synthetischen Markov-Basismodellen existieren Markov-basierte Modelle, die für eine genauere Mobilitätsvorhersage geeignet sind. In [33] wird ein Semi-Markov-Modell für die zeitliche Ortsvorhersage beschrieben. Die Nutzermobilität wird in dieser Arbeit anhand eines Semi-Markov-Prozesses modelliert, wobei die Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix zur Beschreibung der Übergänge zwischen Orten und Aufenthaltsdauerempirisch aus Mobility-Traces extrahiert wurde. Markov-Modelle für Ortsvorhersagen verwenden oft nicht nur den letzten bekannten

Ort, sondern die k letztbesuchten Orte und werden dann k -order Markov-Models genannt.

Studienbasierte Mobilitätsmodelle. Die Gruppe der studienbasierten Modelle umfasst heuristische Mobilitätsmodelle, die auf dem Wissen über ein übliches Real-Life-Mobilitätsverhalten, das aus einzelnen Studien, wie zum Beispiel Zeitverwendungsstudien und Verkehrsstromanalysen, abgeleitet wurde, beruhen [22]. Ein bekanntes Beispiel für diese Modellkategorie ist das *Working Day Model*, das sich aus drei Submodellen für Heim-, Büro- und Abendaktivität zusammensetzt. Diese Submodelle bilden die Mobilität für die einzelnen Abschnitte eines Tages ab, während ein Transportmodell die Nutzerbewegung von einem Ziel zum Nächsten entlang des kürzesten Weges auf einem Stadtplan zu Fuß, mit dem Auto oder mit einem öffentlichen Verkehrsmittel modelliert [16]. Dieses Modell kann verwendet werden, um bei noch geringem Vorhandensein von Beobachtungswerten grobe Voraussagen zu liefern; für präzise Prädiktoren ist es weniger gut geeignet.

Lösungsansätze für Gerätemobilität im zukünftigen Internet

Welche Mechanismen stehen im heutigen Internet zur Unterstützung von Mobilität zur Verfügung? Dazu muss zuerst bemerkt werden, dass Internetprotokolle primär zur Ende-zu-Ende-Verbindung stationärer Rechner konzipiert wurden und dementsprechend schlecht geeignet sind, die Herausforderungen der Mobilität zu lösen. Hinzu kommt, dass manche Annahmen über die Kommunikation und den Nachrichtenverkehr nicht mehr die Anforderungen der Nutzer widerspiegeln. Neue Verkehrsformen, wie inhaltszentrierter Informationsfluss oder die ortsbasierte Informationsbereitstellung für eine Gruppe mobiler Nutzer, werden nicht effizient unterstützt. Andererseits ist insbesondere die mobile, ortsgebundene Informationsweitergabe oft keine 1:1-Kommunikationsbeziehung, sondern vielmehr das Abrufen zeitlich und örtlich relevanter Information. Damit ändern sich die benötigten Routingprotokolle. Auch die Forderung, permanent verbunden zu sein, kann in mobilen Situationen teilweise aufgeweicht werden, wenn nur zu bestimmten Zeitpunkten situierte Information abgerufen werden soll.

Abbildung 2 gibt einen Überblick über die vorgestellten Mechanismen. In Abb. 2a wird beispielhaft eine mögliche Systemarchitektur skizziert, die ein Ad-hoc-Netzwerk, ein drahtloses Multi-Hop-Mesh-Zugriffsnetzwerk¹¹ und ein drahtgebundenes Core Network umfasst. Abbildung 2b zeigt, wie die vorgestellten Ansätze in einem traditionellen Schichtenmodell abgebildet werden können. Unter der Verwendung von Netzwerkvirtualisierung können Router und Links zu *virtuellen Ressourcen* abstrahiert werden. Damit wird es möglich, mit einer gemeinsamen Hardware unterschiedliche Routingprotokolle isoliert zu unterstützen und so die Integration der Protokolle für das Ad-hoc-Netzwerk, das Zugriffsnetzwerk und das Core Network zu erleichtern. Die Ausprägung jedes Netzwerkteils der Hybridarchitektur hängt von der Verfügbarkeit der Netzwerkressourcen und den Benutzerpräferenzen ab. So ist es etwa aus Sicht der Performanz sinnvoller, direkt das Access-Netzwerk zu benutzen und über möglichst wenige Hops eine Verbindung zum Core Network zu realisieren. Ist aber ein mobiles Gerät außerhalb Reichweite, dann kann ein zusätzlicher Hop über ein Ad-hoc-Netzwerk eine Verbindung ermöglichen.

Lösungsansätze für Verbindungsunterbrechungen und Verzögerungen

Verbindungsunterbrechungen treten auf, wenn das drahtlose Medium nicht ausreichend Kapazität zur Verfügung stellen kann, die Distanz oder andere räumliche Hindernisse das Signal abschwächen und als Konsequenz Protokollzeitüberschreitungen auftreten. Mobilitätsbedingte Verbindungsunterbrechungen sind meist temporäre Phänomene, wenn das Netzwerk nicht ganz verlassen wird. Falls Verzögerungen von Applikationen und Netzwerkprotokollen noch toleriert werden und keine Verbindungsabbrüche auftreten, so kommt es trotzdem aufgrund von Zeitüberschreitungen zusammen mit erneutem Senden von Nachrichten auf unteren Schichten zu reduzierter Bandbreite und zu Leistungseinbußen. Insbesondere für Audio/Video-Anwendungen wie Voice over IP (VoIP), Videotelefonie oder Video-Streaming führt schlechte Netzwerkqualität zur Verringerung der Erlebnisqualität für den Nutzer bis hin zur Ablehnung von Diensten.

¹¹ Wenn nur der Link zum mobilen Gerät drahtlos ist, dann wäre die Situation traditioneller WLAN Hot-Spots gegeben.

Insbesondere TCP wurde für die Nutzung in Netzwerken optimiert, in denen Paketverluste auf eine Stausituation hindeuten und deshalb ein verlangsamtes Senden als Reaktion sinnvoll ist. Diese Maßnahme ist jedoch kein adäquates Mittel, um auf Paketverlust am drahtlosen, störungsanfälligen Medium zu reagieren. Eine vorteilhafte Strategie ist meist, die verlorengegangenen Pakete rasch wiederholt zu senden. Eine Möglichkeit ist, die TCP-Verbindung in einen drahtlosen Teil, der schnelles Wiedersenden ermöglicht, und einen drahtgebundenen, unveränderten Teil zu teilen. *Split-TCP* [31] ist ein Verfahren, das so vorgeht, aber den Nachteil hat, in der simplen Form die Ende-zu-Ende-Semantik zu zerstören. Temporäre Verbindungsunterbrechungen können auf Transportschicht durch verzögerungstolerante Erweiterungen zu TCP [17] oder mit verzögerungstoleranten Diensten auf höherer Ebene verringert werden. Eine andere Möglichkeit ist, die Ende-zu-Ende-Verbindung bewusst aufzugeben. *Delay Tolerant Networks* (DTNs) bieten die Möglichkeit, Informationen ohne Ende-zu-Ende-Verbindung zu übermitteln. Die Grundidee hierbei ist, dass Daten auf Knoten so lange zwischengespeichert werden, bis das Ziel erreichbar ist.

Häufig kommen einfache oder komplexe Proxy-Lösungen zum Einsatz, um Zwischenspeicherung für mobile Knoten zu ermöglichen. In [50] wird ein *Ad Hoc Storage Overlay System* (ASOS) präsentiert, welches zur Zwischenspeicherung von Datenströmen zu gerade nicht erreichbaren Knoten dient. Die Daten werden basierend auf einem Peer-to-Peer Overlay verteilt gespeichert. Dies hat den Vorteil, dass der Speicher-Overhead im Netzwerk aufgeteilt werden kann und das System toleranter gegen Knotenausfälle wird. Ein umfassendes Konzept für mobilen Internetzugang unter Berücksichtigung von vorübergehenden Verbindungsabbrüchen wird im CHIANTI-Projekt vorgeschlagen [38]. Ein CHIANTI-Proxy ist optional zwischen dem mobilen Client und dem Internet eingebunden und dient dazu, den Verbindungsstatus vor dem Verbindungsabbruch auf dem Client wieder herzustellen. Ein realitätsnahes Beispiel wäre ein Download, der durch ein Funkloch unterbrochen wird und bei Eintreffen in einen CHIANTI-Abdeckungsbereich wieder fortgesetzt wird. Das Framework bietet zusätzlich die Möglichkeit, applikationsspezifische Abläufe bei Verbindungsabbrüchen zu implementieren.

Handoff und Adressierung

Gerätemobilität hat zur Folge, dass ein mobiles Endgerät den Sendebereich eines Zugriffspunkts (oder, allgemein, eines Kommunikationspartners) verlassen kann. Um Verbindungen trotz Bewegung zu unterstützen, bieten drahtlose Netzwerke wie GSM/GPRS, UMTS und WLAN (Extended Service Set) Handoff-Mechanismen an. Für das Internet der Gegenwart hat eine neue Verbindungsaufnahme eines mobilen Gerätes in einer Domäne auch eine IP-Adressänderung zur Folge. Um manuelle IP-Adresskonfigurationen zu vermeiden, wird das Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) [15] häufig eingesetzt, um (mobilen) Endgeräten eine IP-Adresse für eine gewisse Zeit zuzuweisen. Potenziell kann Mobilität auch durch Mobile-IP [39] oder Cellular IP [46] und Fast Handoff [1] unterstützt werden, im gegenwärtigen Internet und in Zugriffnetzwerken finden diese Protokolle jedoch selten Anwendung.

Das Prinzip der Mobilitätsunterstützung mobiler Geräte verwendet eine Art von Ankerpunkten in festen Teilen des Infrastrukturnetzwerks, die es ermöglichen, mobile Geräte zu erreichen und zu adressieren. Diese Ankerpunkte sind über den Aufenthaltsort des mobilen Gerätes im Netzwerk informiert. In Mobilfunknetzwerken ist das Prinzip besonders gut erkennbar. Hier werden zentrale Basisregister verwendet (z. B. das Home Location Register, HLR, in GSM), um Information über den (logischen) Aufenthaltsort des Gerätes zu speichern, wie zum Beispiel die Location Area. Mobile-IP verfolgt ein ähnliches Prinzip. Hier wird ein stationärer Home Agent verwendet, um existierende Verbindungen aufrechterhalten zu können, obwohl sich die IP-Adresse des mobilen Gerätes ändert. Im Wesentlichen werden alle Pakete an eine Home Address, verwaltet durch den Home Agent, gesendet, der über die momentane Erreichbarkeit des mobilen Gerätes (IP-Adresse) informiert ist, Pakete einbettet und an das mobile Gerät weiterleitet. Um Pakete zu erhalten, muss das mobile Endgerät zuvor die neue Adresse registrieren. Diese Adresse, die Care-of-Address (CoA), kann selbst die Adresse eines Rechners in der Zieldomäne sein (Foreign Agent CoA), der die Aufgabe der Paketweiterleitung an das mobile Gerät wahrnimmt, oder sie kann eine Adresse sein, unter der das mobile Gerät im Fremdnetz erreichbar ist (Co-located CoA, durch DHCP zugewiesen). Herausforderungen sind vor allem das Entstehen

ineffizienter Routen, Tunneling-Overhead bei den involvierten Agenten (Tunneling ist das Einbetten des ursprünglichen IP-Paketes in ein Mobile-IP-Paket mit hinzugefügter neuer Destinationsadresse im Header der Nachricht), Overhead beim Handoff und Sicherheitsprobleme.

Aufgrund der Ineffizienz von Mobile-IP wurden insbesondere für IPv6 bereits Erweiterungen eingeführt. So wird in Mobile-IPv6 zur Optimierung vorgeschlagen, das Binding des mobilen Gerätes an die Care-of-Address im Cache jedes IPv6-Knoten zu halten, um die Pakete direkt an die Care-of-Address zu senden, anstatt über den Home Agent einen Tunnel aufzubauen [26]. Ein Nachteil der Routenoptimierung ist ein potenziell höheres Sicherheitsrisiko und das Risiko des Schutzes der Privatsphäre, da jeder Router den logischen Aufenthaltsort des mobilen Gerätes kennt. Eine hierarchische Erweiterung wird im RFC 4140 diskutiert, die zusätzlich die Rolle des *Mobile Anchor Point* (MAP) definiert. Dieser wird zwischen Home Agent und dem mobilen Knoten gesetzt und übernimmt die Aktualisierung der Adresse, wenn sich das mobile Gerät innerhalb der MAP-Domäne bewegt. Dadurch wird der Overhead reduziert, da nicht bei jedem Domänenwechsel der Home Agent kontaktiert werden muss. Eine weitere Technik, das Fast Handover für Mobile-IPv6 (FMIPv6 [30]), erlaubt es, die Daten über den alten Access Router zu tunneln, wenn ein mobiles Gerät die Domäne wechselt, und auch schon vor einem Wechsel in eine neue Domäne die zukünftige Care-of-Address proaktiv bekanntzugeben. Dazu wird Information über die Bindung zu einem Zugriffspunkt auf der Sicherungsschicht verwendet. Somit kann die Kommunikation mit dem mobilen Gerät schneller wiederaufgenommen werden. Einen Vorteil bietet der Einsatz des neuen Ansatzes Proxy Mobile IPv6 [21], da das Mobilitätsmanagement des Endgerätes transparent für das Gerät vom Netzwerk realisiert wird und am Endgerät selbst keine zusätzlichen Installationen notwendig sind (Network-based Mobility Management).

Das Konzept Mobility-Awareness

Das Konzept der Mobility-Awareness geht von der Annahme aus, dass es für Netzwerkprotokolle zur Unterstützung von Gerätemobilität von Vorteil ist, Information über die Mobilität zu verwenden und damit reaktive, aber auch proaktive Adaptierungen von Netzwerkprotokollen unterschiedlicher

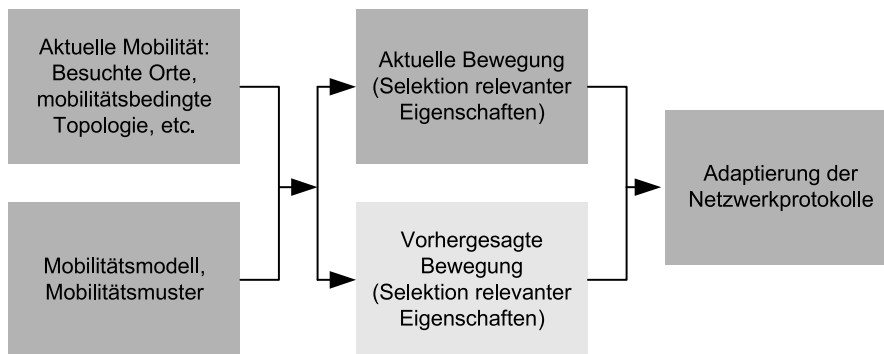


Abb. 3 Prinzip der Mobility-Awareness zur Adaptierung von Netzwerkprotokollen

Netzwerkebenen vorzunehmen. Mobilität, d. h. das Bewegungsverhalten, ist hier eine Kontextinformation für Netzwerkprotokolle und kann zur Erklärung der aktuellen Situation verwendet werden. Vorhersagen über wahrscheinliche, zukünftige Orte, Geschwindigkeiten oder geschätzte Aufenthaltsdauern können zusätzlich für proaktive Adaptierungen verwendet werden. Prognosen sind allerdings nur dann überhaupt möglich, wenn regelmäßiges Mobilitätsverhalten vorliegt und dies durch Mobilitätsmuster oder realistische Mobilitätsmodelle beschrieben ist.

Zum Beispiel ist die Beobachtung der Mobilität eines Benutzers nützlich für zeitgerechtes Handoff zum nächsten Zugriffspunkt eines Netzwerks, noch bevor die Verbindungsqualität zum aktuellen Zugriffspunkt unter eine akzeptable Grenze sinkt. In ähnlicher Weise kann das Wissen über Nutzermobilität für Ressourcenreservierungen an den zukünftigen Positionen der mobilen Person und damit des mobilen Gerätes genutzt werden. Abbildung 3 fasst das Prinzip zusammen: Auf Basis aktueller Informationen über Mobilität, wie die letzten Aufenthaltsorte des mobilen Gerätes, und einem bekannten Mobilitätsmodell werden relevante Eigenschaften selektiert und ausgewertet, die dann zur Adaptierung von Netzwerkprotokollen führen. Wenn eine Vorhersage verwendet wird, können proaktive Adaptierungen implementiert werden, die jedoch von der Güte der Vorhersage abhängen.

Ein Beispiel, wie Mobility-Awareness genutzt werden kann, um reaktive Adaptierungen vorzunehmen, ist die schnellere Ursachenanalyse, ob Störungen am drahtlosen Medium oder die Bewegung eines Endgerätes der Grund für eine Qualitätsverschlechterung auf der Sicherungsschicht sind. Sollte die Bewegung als Ursache erkannt werden, könnte zum – in Richtung der Bewegung – nächsten

Zugriffspunkt gewechselt werden. Für Transportprotokolle wie TCP kann Mobility-Awareness zur Adaptierung der Zeittoleranzen und bis zum Wechsel zu verzögerungstoleranten Varianten führen. In Netzwerken, in denen die Router mobil sind, wird häufig die Bewegungsgeschwindigkeit und die Bewegungsrichtung des Zielknotens und des aktuellen Quellknotens sowie der benachbarten Knoten als potenzielle Knoten zur Weiterleitung der Pakete in die Routingentscheidung miteinbezogen. In diesen reaktiven Verfahren wird dann der Knoten zur Weiterleitung verwendet, der sich dem Zielknoten nähert. In [42] wird zum Beispiel die Metrik *Link Expiration Time* für die Bewertung einer Verbindung zweier Knoten vorgeschlagen, die mithilfe von Parametern wie Bewegungsgeschwindigkeit, Bewegungsrichtung (abgeleitet von GPS-Informationen) und Übertragungreichweite vorhersagt, wann eine Verbindung voraussichtlich nicht mehr zur Verfügung stehen wird.

Proaktive Adaptierung bedeutet, dass die Adaptierung schon initiiert wird, bevor Fehler oder signifikante Verschlechterungen beobachtet werden. Damit kann eine Verzögerungsminimierung beim Mobilitätsmanagement erreicht werden. Ein Beispiel ist die proaktive Initiierung von Handoff-Mechanismen zwischen WLAN-Zugriffspunkten durch akkurate Vorhersage der in nächster Zukunft besuchten Zugriffspunkte (diese Technik könnte als Zusatz zu FMIPv6 verwendet werden). Auf der Netzwerkschicht kann die Information über die nächsten Fremdnetzwerke zum Beispiel von Mobile-IP für die schnellere Bekanntgabe einer neuen CoA verwendet werden. Auf Applikationsebene können zum Beispiel Caching und Replikationsverfahren dafür sorgen, dass Daten zeitgerecht vor einem Verbindungsabbruch auf das mobile Gerät kopiert werden. Der *Predictive Mobility and Location-Aware Rou-*

ting (PMLAR) Algorithmus selektiert den nächsten Knoten zur Weiterleitung beispielsweise anhand der vorhergesagten Bewegungstrajektorie des Zielknotens [18]. Die zukünftige Trajektorie wird mithilfe eines Mobilitätsmodells bestimmt, das Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung des Zielknotens, basierend auf vergangenen und aktuellen Bewegungszuständen, ermittelt. Je nachdem, ob sich ein Knoten entlang einer Verbindungslinie zum Zielknoten und mit passender Geschwindigkeit bewegt, wird der Knoten für die Weiterleitung ausgewählt. Der Lösungsansatz beinhaltet auch einen proaktiven Route-Maintenance-Mechanismus, der laufend überprüft, ob sich der Zielknoten noch in seiner vorhergesagten Zone befindet.

Obwohl es bereits erste Ansätze gibt, Mobility-Awareness für Optimierung in mobilen Netzwerken zu nutzen, sind insbesondere bezüglich der Kosten und des Nutzens dieses Mechanismus und bezüglich der erzielbaren Genauigkeiten der Vorhersagen noch weitere Forschungsarbeiten nötig. Eine Untersuchung der Auswirkung von Mobilität auf Location Area Updates und Paging wird in [10] beschrieben. Das nächste Beispiel bezieht sich auf mobile Ad-hoc-Netzwerke. In mobilen Ad-hoc-Netzwerken ist jeder mobile Knoten auch zeitgleich ein Router und Topologieänderungen haben signifikante Auswirkungen auf das Routing. In [41] wird ein adaptives Routing vorgestellt, das auf Basis einer Mobilitätsmetrik Routingentscheidungen verändert. Die Mobilitätsmetrik betrachtet die Nachbarschaftsbeziehungen der Knoten zu den um einen Hop entfernten Nachbarn zur Bestimmung der Netzwerkdynamik, um stabile und zuverlässige Routen zu finden. Im Bereich der Datendissemination wurde von den Autoren dieses Artikels der Einsatz von Mobilitätsvorhersage von Endgeräten zur Datenreplikation unter stationären Datenservern untersucht [19]. Die mobilen Endgeräte sollten mit möglichst wenigen Hops im Netz der Datenserver auf Information zugreifen. Dazu wurde auf Basis der Mobilitätsvorhersage Replikation und Migration von Daten angestoßen. Die Untersuchung wurde auf Basis von Simulation der Datenserver durchgeführt, wobei GPS-Daten einer Taxiflotte für die Mobilitätsemulation und die Erstellung des realistischen Mobilitätsmodells verwendet wurden.

Integration opportunistischer Netzwerke

In Gebieten mit gering ausgebauter Infrastruktur an drahtlosen Zugriffspunkten ist es möglich,

zusätzlich Ad-hoc-Verbindungen zu verwenden, um eine Verbindung zum Internet herzustellen. In diesem Szenario ist nur eine Untermenge der Geräte direkt mit dem Internet verbunden, beispielsweise über UMTS-Stationen, Satelliten oder DSL-Modems. Anfragen werden über die mobilen Geräte hin zu den mobilen Zugriffspunkten weitergeleitet. Jedes Gerät agiert nicht nur als Client, sondern kann auch als Router arbeiten. Klassische Routing- und Datenverteilungsverfahren für kabelgebundene Netzwerke können in dieser mobilen Infrastruktur allerdings nicht direkt übernommen werden, da mobile Geräte oft stark limitierte Energiequellen und beschränkte Ressourcen wie Speicherplatz und Rechenleistung haben, was sie zu unzuverlässigen Routern macht. Diese Dynamik und die Mobilität der Geräte selbst erfordern neue Verfahren zum Transport von Daten, da sich Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Knoten ändern und es zur Netzwerkpartitionierung kommen kann, d. h. die Verbindung zu Teilen des Netzwerks ist unterbrochen. Auftretende Netzwerkverbindungen werden demnach als Gelegenheiten betrachtet, Daten zu transferieren. Ansätze, die diesem Prinzip folgen, sind Verfahren aus dem Bereich des *Opportunistic Networking* und speziell des *Mobility-Assisted Networking*. Ziel dieser Verfahren ist es, die Konnektivität zu erhöhen und eine größere Abdeckung zu erreichen. Auf diese Art kann zum Beispiel die Reichweite eines Mobilfunknetzwerkes vergrößert werden. Der Einsatz von opportunistischen Netzwerken wird hauptsächlich bei der nicht zeitkritischen Übertragung großer Datenmengen gesehen.

Unter Opportunistic Networking versteht man das Ausnutzen zufälliger oder von der Umgebung vorgegebener Kommunikation einzelner Geräte. Benutzer stellen Teile ihres Gerätes, etwa einen bestimmten Prozentsatz der Ressourcen (CPU, Speicher), für Netzwerkaufgaben zur Verfügung. Häufig erfolgt diese Bereitstellung altruistisch und kooperativ, d. h. ohne Gegenleistung zu erwarten. In diesem Sinn sind auch Mobile Ad-hoc Networks (MANETs) eine Art opportunistischer Netzwerke. MANETs operieren ohne fixe Infrastruktur, die sich aus mobilen Geräten dynamisch über Ad-hoc-Verbindungen formieren. Für MANETs wurde eine Vielzahl an Verfahren zur Informationsverteilung und zum Routing entwickelt. Die Informationsverteilung knüpft an das Konzept des Content-centric Networking an,

während Routing klassisch das herausfordernde Ende-zu-Ende-Versenden von Paketen in MANETs adressiert.

Informationsverteilung im opportunistischen Netzwerk. Das primäre Ziel von Informationsverteilung ist die Verteilung von Daten im gesamten Netzwerk (Broadcast), oder in Teilen des Netzwerks (Multicast, Geocast [29]) bei möglichst geringer Ressourcenbelastung. Broadcast-Verfahren versuchen, das sogenannte *Broadcasting Storm Problem* [37, 43, 49] zu verringern, indem nur ausgezeichnete Knoten Pakete weiterleiten. Weitere Verfahren zur vollständigen Informationsverteilung basieren auf epidemiologischen Ansätzen und auf Gossiping [14]. Das Prinzip von epidemiologischen Ansätzen ist oft der paarweise Informationsabgleich zwischen zwei Knoten. Beim Gossiping wird Information im Gegensatz dazu nur unidirektional zu einer Untermenge der Nachbarn gesendet.

Routing im MANET. Generell kann zwischen proaktiven (z. B. Destination-Sequenced Distance-Vector, DSDV, OLSR), reaktiven (z. B. Ad hoc On-demand Distance Vector, AODV), und hybriden (z. B. Zone Routing Protocol, ZRP) Routingverfahren unterschieden werden. Proaktive Verfahren halten und warten Routeninformation unabhängig davon, ob die Routen benötigt werden. Reaktive Verfahren erzeugen Routen erst, wenn sie benötigt werden und haben dadurch einen geringeren Overhead als proaktive Verfahren. Sie weisen jedoch höhere Verzögerungen auf. Ein Überblick über die genannten Routingverfahren in MANETs wird in [40] gegeben.

Der Erfolg von MANETs in der Praxis ist sehr beschränkt, da viele für MANETs entwickelte Algorithmen dichte Netzwerke benötigen, die oft nicht vorhanden sind. Mögliche Szenarien mit Potenzial für Ad-hoc-Netzwerke sind Notfallsituationen, in denen Infrastrukturnetzwerke nicht zur Verfügung stehen, oder die Integration in eine Hybridarchitektur aus Ad-hoc- und Infrastrukturelementen.

Mobilität als Lösungsansatz zur Erhöhung der Konnektivität

Mobility-Assisted Computing nutzt die Mobilität der Nutzer und ihrer Geräte, um Problemen

wie Netzwerkpartitionierung und zu geringe Knotendichte entgegenzuwirken. Dabei kann sowohl die Mobilität von Fahrzeugen und öffentlichen Verkehrsmitteln, die durch die Verkehrsrouteninformation gut modellierbar ist, als auch die Mobilität von Nutzern und sozialen Gruppen herangezogen werden.

Soziale Gruppen und Interaktionen der Gruppenmitglieder können als Basis für Datendissemination verwendet werden und werden oft als *Mobile Encounter Networks* [32] modelliert. Mobile Encounter Networks entstehen, wenn Benutzer einander begegnen und in dieser Zeit gegenseitig Daten ausgetauscht werden. Dieser lokale Datenaustausch, kombiniert mit der Mobilität der Geräte, führt zu einer – wenn auch verzögerten – Datenausbreitung im Netzwerk. Mögliche Anwendungsbereiche dieser Netzwerke werden in [47] beschrieben. Pocket Switched Networks wurden als DTNs eingeführt [24], nutzen aber Mobilität. In Pocket Switched Networks können Daten durch Bewegung der mobilen Geräte (auf einen Kommunikationspartner zu) ausgetauscht und weitergeleitet werden. Bewegungsmuster haben hier großen Einfluss auf die erfolgreiche Datenweitergabe. So kann es innerhalb von sozialen Gruppen zu häufigeren Kontaktaufnahmen unter den Mitgliedern kommen als zwischen Mitgliedern unterschiedlicher Gruppen. Zusätzlich sind manche Individuen aktiver als andere und haben somit häufiger Kontakt.

Insbesondere wenn die Mobilität der Individuen es begünstigt, kann geografisches Routing, d. h., Routing der Daten zu einer bestimmten geografischen Position [20], verwendet werden. Jeder Knoten speichert die Zeit und die Position des Zusammentreffens mit einem anderen Knoten. Es wird davon ausgegangen, dass zum Startzeitpunkt jeder Knoten mit jedem anderen Knoten zumindest einmal in Kontakt war. In jedem Datenpaket wird neben der Zielposition die gespeicherte Zielposition des bisher besten Knotens und dessen Zeitstempel gespeichert. Eine Zielposition in einem Knoten ist „besser“, wenn der zugehörige Zeitstempel aktueller ist. Das Paket wird nun anhand der gespeicherten Zielposition weitergeleitet und wandert immer näher zur Zielposition, bis es diese schließlich erreicht. In Abb. 4 wird das Prinzip der Mobility-Assisted-Dissemination anhand eines einfachen Beispiels skizziert. Die grau schattierte Linie zeigt den Be-

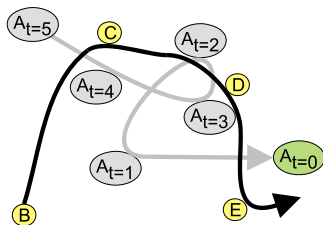


Abb. 4 Beispiel einer Mobility-Assisted-Dissemination [20]

wegungspfad von Knoten A über fünf vergangene Zeiteinheiten (Start bei $t = 5$, aktuelle Zeit ist $t = 0$). Die anderen Knoten sind in diesem Beispiel stationär. Knoten B möchte Daten zu Knoten A senden, hat aber nur eine relative, „alte“ Position von A gespeichert (z. B. vor vier Zeiteinheiten ($t = 4$)). B sendet die Daten in Richtung der Position von A (zum Zeitpunkt $t = 4$). Knoten C hat „jüngere“ Positionsinformation und leitet nach Empfang der Daten von B dieselben weiter, z. B. an D oder E. Unter bestimmten Mobilitäts- und Dichteannahmen können die Daten ihren Zielknoten erreichen [20].

Ressourcenmobilität

Mobilität tritt auch im heutigen Internet bereits nicht nur als Gerätemobilität, sondern als Mobilität von Ressourcen (Daten, Code) auf. Ein Beispiel sind über Webseiten ladbare Java Applets, d. h. mobiler Java Code, der von einem Webserver zu einem Client migriert und dort ausgeführt wird. Ein zukünftiger Einsatz der Migration von Netzwerkressourcen wird durch die fortschreitende Flexibilisierung des Internet möglich. Ziel ist es hier, die Netzwerkqualität nach definierbaren Kriterien zu verbessern und Netzwerkressourcen besser zu nutzen. Ressourcenmobilität dient in diesem Kontext zur Optimierung und ermöglicht zum Beispiel Lastaufteilung, energieeffizientes Verhalten und flexible Behebung von Netzwerkfehlern. Energieeffizienz durch Konsolidierung von Netzwerkressourcen ist eines der Ziele, das durch Ressourcenmobilität erreicht werden kann, um möglichst viele Netzwerkressourcen im Low-Power-Modus betreiben zu können, während andere Netzwerkkomponenten die Arbeitslast übernehmen.

Eine Basistechnologie für Ressourcenmobilität ist die *Netzwerkvirtualisierung*. Knoten und Links werden dadurch zu virtuellen Knoten und virtuellen Links, die migriert werden können. Es wird einfacher, auf Ausfälle einer virtuellen Res-

source wie zum Beispiel einer virtuellen Verbindung durch Migration der virtuellen Verbindung zu reagieren. Allerdings bewirkt die Migration auch eine Änderung in den physikalischen Ressourcen und vermehrten Overhead. Eine weitere Basistechnologie ist die autonome, selbstorganisierende *Adaptierung* des Netzwerks, um eine geeignete Platzierung der mobilen Ressourcen nach Optimierungskriterien zu erzielen. Ressourcenmigration schließt an den Forschungstrend der Active Networks an, der in den späten 1990er-Jahren das Konzept des Mobile Code benutzt hat, um Netzwerkkomponenten wie z. B. Router programmierbar und adaptierbar zu gestalten [44].

Netzwerkvirtualisierung

Netzwerkvirtualisierung bietet als Virtualisierungstechnik eine Abstraktion von physikalischen Netzwerkressourcen. Virtualisierung kann in einer ersten Betrachtung dazu verwendet werden, mehrere virtuelle Ressourcen auf einer physikalischen Ressource laufen zu lassen. Diese Betrachtung ist analog zum Konzept der Servervirtualisierung [3]. Hardware kann gemeinsam von mehreren virtuellen Einheiten genutzt werden, die isoliert voneinander ausgeführt werden. Diese Technik bewirkt eine Flexibilisierung und hat das Potenzial, eine bessere Ausnutzung der physikalischen Ressourcen zu erzielen. Virtualisierung ist aber auch eine Technik, um mehrere physikalische Netzwerkressourcen zu einer virtuellen Ressource zusammenzufassen. Beispiele für die erste Form sind die gleichzeitige Unterstützung mehrerer Routingprotokolle auf einer Hardware, während die Zusammenfassung von multiplen Pfaden (Multi-Path) zu einem einzigen, besser verfügbaren Pfad ein Beispiel für die zweite Anwendung des Begriffs der Virtualisierung ist.

Allgemein werden Netzwerkkomponenten, hauptsächlich aber Links und Router, virtualisiert und bilden so *virtuelle Netzwerke* [11]. Diese Netzwerke sind *Overlays*, d. h. Aufsätze auf das physikalische Netzwerk mit eigener Topologie, gegeben durch die virtuellen Links und virtuellen Knoten (Router). Projekte wie PlanetLab¹² oder VINI¹³ setzen Netzwerkvirtualisierung erfolgreich ein und CISCO brachte bereits erste logische Router auf

¹² <http://www.planet-lab.org/>.

¹³ <http://www.vini-veritas.net/>.

den Markt. Diese Entwicklungen lassen eine weitere Verbreitung der Virtualisierungstechnologie vermuten. PlanetLab verwendet die Virtualisierung von Netzwerkressourcen zum flexiblen Einsatz einer weltumspannenden Netzwerkinfrastruktur für Forschung und Entwicklung. VINI verwendet die Infrastruktur von PlanetLab, um ein Overlay-Netzwerk für Softwarerouter zu erstellen und zu betreiben. Die Kombination von Context-Awareness und Virtualisierung erlaubt es, virtuelle Netzwerke nach unterschiedlichen Kriterien zu erstellen, um so bestmögliche Unterstützung für den Nutzer zu gewährleisten. Da Mobilität als ein Kontextparameter gesehen werden kann, ist es auch vorstellbar, dass unterschiedliche virtuelle Netzwerke entsprechend des vorliegenden Mobilitätsverhaltens (z. B. unterschiedliche Geschwindigkeiten der Fortbewegung) für optimales Mobilitätsmanagement ausgewählt werden.

Migration von Ressourcen

Mobilität von Software hat eine lange Tradition, z. B. in Form der bereits genannten Java Applets oder auch in Form von *Mobilen Agenten* [48]. Mobile Agenten sind mobiler Code, der autonom agiert und die Fähigkeit zur Migration besitzt. Diesen Technologien liegt eine virtuelle Maschine [36] oder Agentenplattform zugrunde, mittels derer migrierter Code auf unterschiedlichen Host-Rechnern ausgeführt werden kann. Man unterscheidet in der Agententerminologie zwischen *schwacher Mobilität* (Weak Mobility) und *starker Mobilität* (Strong Mobility). Während bei schwacher Mobilität die Software ohne aktuellen Status migriert wird, wird bei starker Mobilität der Zustand der Programmausführung gespeichert, um dann an dieser Stelle am neuen Host weiterlaufen zu können. Beide Klassen sind auch für die Migration von Netzwerkressourcen relevant und einsetzbar.

Die Migration von Ressourcen, wie etwa von virtuellen Routern, hat den Zweck, das Netzwerkmanagement zu verbessern und Optimierung zu ermöglichen. Dazu ist zum einen Information über den Netzwerkzustand und den Netzwerkkontext nötig und zum anderen eine schnell reagierende Adaptierung des Netzwerks. Context-Awareness ist eine Technik, die im Bereich Pervasive Computing unter diesem Begriff bereits seit über zehn Jahren verwendet wird. Für die Forschung am Future Internet wurde dieser Ansatz in den vergangenen

Jahren interessant, wie die EU-Projekte SENSEI¹⁴ und C-CAST¹⁵ zeigen. Autonome Koordinierung der Netzwerkadaptierung durch Migration kann zu einem effizienten Netzwerkmanagement führen, birgt aber auch die Gefahr, dass sich durch die Kontrollschleifen im selbstorganisierenden System Oszillationen ergeben.

Im verwendeten Beispielnetzwerk (Abb. 1), einem Wireless Mesh Network, können aufgrund der Mesh-Topologie sehr gut unterschiedliche, virtuelle Netzwerke parallel aufgebaut werden. Basierend auf einem Optimierungskriterium wie dem minimalen Energieverbrauch unter der Bedingung einer akzeptablen Verzögerungszeit im Netzwerk, können virtuelle Router migriert werden, sodass es möglich ist, die Hardware hinsichtlich des Optimierungskriteriums bestmöglich auszulasten. Mit dem alternativen Ziel, die Robustheit zu erhöhen, können virtuelle Verbindungen und Pfade zum Beispiel zur Fehlerminimierung migriert werden oder es können Redundanzen im Netzwerk geschaffen und flexibel verwendet werden (wie z. B. für Multi-Homing).

Ressourcenmobilität zur Unterstützung von Gerätemobilität

Wenn Ressourcen der Bewegung eines Benutzers folgen, können existierende Assoziationen beibehalten werden, wie z. B. bestehende Authentifizierungen. Auch netzwerkbasierte Mobilitätsunterstützung, wie sie bei Proxy Mobile IPv6 [21] vorgeschlagen wird, kann um Ressourcenmobilität erweitert werden. Unterstützt von Netzwerkvirtualisierung, kann ein virtualisierter Proxy im virtuellen Netzwerk, zum Beispiel im Prinzip der Gerätebewegung bestmöglich folgend, migrieren und für das mobile Endgerät transparent die Änderungen der IP-Adresse weiterreichen. Im Detail sind die Kosten und der Nutzen dieser Erweiterung zu evaluieren. Eine Proxy-Lösung für Benutzer- und Gerätemobilität wurde auf Basis Mobiler Agenten in [4] vorgeschlagen. Mobile Agenten kapseln den Dienst und die Benutzerdaten, was eine konzeptuell gute Lösung darstellt. Mobile Agenten agieren in einer virtuellen Infrastruktur und sind somit der Ressourcenmobilität in virtuellen Netzwerken konzeptuell ähnlich.

Unterstützt durch die Kenntnis der Mobilität, können Daten – und prinzipiell virtuelle Ressour-

¹⁴ <http://www.sensei-project.eu/>.

¹⁵ <http://www.ict-ccast.eu/>.

cen – *reaktiv*, also der Bewegung folgend, oder *proaktiv*, der Bewegung vorausgehend, migriert werden. Wie schon im Zuge der Mobility-Awareness besprochen, wurde in [19] eine Methode zur proaktiven Datenmigration und -replikation vorgestellt und mit der reaktiven Variante des Verfahrens verglichen. Eine erste Evaluierung der Datenmigrationsverfahren unter der Verwendung realer Mobilitätsdaten, nämlich der GPS-Traces einer Taxisflotte, zeigte, dass das proaktive Verfahren mit Mobilitätsvorhersage eine bessere, d. h. nähere Positionierung der Daten hinsichtlich des nächsten Zugriffs ermöglichte. Dieses Ergebnis ist nicht generalisierbar, motiviert aber die Untersuchung, ob Mobilitätsvorhersage auch für Ressourcenmobilität zur Unterstützung von Gerätemobilität von Vorteil sein kann.

Diskussion und Conclusio

Aus den diskutierten Mechanismen und Problemen lässt sich ableiten, dass die Gerätemobilität auch eine Herausforderung an eine zukünftige Internetarchitektur darstellt. Unterstützung bieten die vorgestellten Techniken, die auf Ankerpunkten für das Mobilitätsmanagement und einer Sonderbehandlung der drahtlosen Teile einer Verbindung basieren. Vor allem die fehlende Integration der Techniken im heutigen Internet und die nur ansatzweise vorhandenen, schichtenübergreifenden Mechanismen erfordern weitere innovative Ansätze. Im vorliegenden Artikel wurden traditionelle Techniken und deren aktuelle Erweiterungen zur Mobilitätsunterstützung im Überblick behandelt. Darüber hinausgehend wurden die Technik der *Mobility-Awareness* zur Erkennung und Verwendung relevanter Bewegungseigenschaften, basierend auf der *Mobilitätsmodellierung*, und Techniken zur Erhöhung der Konnektivität aus dem Bereich der *opportunistischen und verzögerungstoleranten Netzwerke* beschrieben. Diese Technologien haben großes Potenzial, zur Lösung von Problemen mobiler, drahtloser Netzwerke beizutragen, d. h. zum Beispiel die Konnektivität zu erhöhen, Verzögerungstoleranz einzuführen und Proaktivität der Netzwerkprotokolle zu ermöglichen. Es ist wichtig, festzuhalten, dass Mechanismen, die auf Mobilitätsvorhersage beruhen, von der Möglichkeit und der Güte der Vorhersage abhängig sind.

Die in den vergangenen Jahrzehnten forcierte Forschung an Mobile Ad-hoc Networks (MANETs)

oder, neuer, an opportunistischen Netzwerken und Delay Tolerant Networks (DTNs) findet nur schwer Anwendung in der Praxis. MANETs erfordern zum Beispiel eine gewisse Knotendichte und auch die Bereitschaft der Gerätebesitzer, ihr Gerät für ein Multi-Hop-Netzwerk zur Verfügung zu stellen und damit CPU, Speicher, Batterie und Bandbreite zu teilen. Diese Voraussetzungen sind oft nicht gegeben. Opportunistische Netzwerke und ihre signifikanten Verzögerungen sind nur dann sinnvoll, wenn die Konnektivität nicht durch andere, zuverlässigere Netzwerke gegeben ist, wie zum Beispiel durch drahtlose Zugriffspunkte. Beispiele von Situationen, in denen opportunistische Netzwerke nützlich sind, sind Notfallsituationen und Datendissemination in einem lokalen Bereich, Vernetzung von abgeschiedenen, ländlichen Gebieten oder technologisch (noch) unterversorgten Ländern, in denen eine Internetverbindung nicht überall oder nicht kostengünstig gegeben ist. Genau hier können die vorgestellten Technologien einen Beitrag leisten und – bei entsprechender Integration in einer zukünftigen Internetarchitektur – die Konnektivität im Internet erhöhen.

Ein Vorteil der Beschäftigung mit Technologien aus den Ad-hoc-Netzwerken ist, dass die Kenntnis dieser Konzepte zum Überdenken von Annahmen im Netzwerkbereich führt. Ein Beispiel ist die Forderung nach allgegenwärtiger Verbundenheit. Ein alternativer Ansatz wäre – auch aus Gründen der Ressourcenschonung (Batterielebensdauer) – Verbindungen generell als temporär zu modellieren, bewusst abzubrechen, falls sie (über einen längeren Zeitraum) nicht benötigt werden und Technologien zu entwickeln, die einen schnellen Wiederaufbau ermöglichen. Ein bereits erfolgreiches Beispiel für die Anwendung von Ad-hoc-Netzwerktechnologien sind freie Stadtfunknetzwerke, wie sie in Athen, Berlin, Wien etc. existieren. Der dezentralen Organisation der Gemeinschaft die diese Freifunknetzwerke betreibt folgend, ist auch das Netzwerk als Wireless Mesh Network dezentral und ad hoc organisiert. Aufgrund der geringen Mobilität der Router ist die Dynamik in diesen Netzwerken bewältigbar und freie Funknetzwerke können in Städten erfolgreich Internetzugang zur Verfügung stellen.

Ressourcenmobilität ist eine weitere Form, wie Mobilität im zukünftigen Internet vermutlich auftreten wird. Durch die voranschreitende

Netzwerkvirtualisierung ist die Migration von Netzwerkressourcen im zukünftigen Internet voraussichtlich gut unterstützt, es fehlen aber noch umfassende Studien über den Overhead, der durch die Migration anfallen wird. Konzeptionell ist Ressourcenmobilität in der Erzielung einer schnellen, flexiblen Behebung von Netzwerkfehlern, ausgewogener Lastverteilung und energieeffizientem Verhalten eine Schlüsseltechnologie. Im heutigen Internet nicht vorhanden und auch in der Forschung noch wenig reflektiert ist die Integration von Ressourcen- und Gerätemobilität, die aber in einem zukünftigen Internet den Umgang mit Mobilität vereinheitlichen könnte.

Literatur

- Amir Y, Danilov C, Hilsdale M, Musaloiu-Elefteri R, Rivera N (2006) Fast Handoff for Seamless Wireless Mesh Networks. MOBISYS 2006: 4th Int Conference on Mobile Systems, Applications and Services. ACM, New York, pp 83–95
- Ashbrook D, Starner T (2003) Using GPS to Learn Significant Locations and Predict Movement Across Multiple Users. *Pers Ubiquitous Comput* 7(5):275–286
- Baun C, Kunze M, Ludwig T (2009) Servervirtualisierung. *Informatik-Spektrum* 32(3):197–205
- Bellavista P, Corradi A, Stefanelli C (2000) A Mobile Agent Infrastructure for Terminal, User, and Resource Mobility. NOMS 2000: Network Operations and Management Symposium. IEEE, pp 877–890
- Bettstetter C (2001) Mobility Modeling in Wireless Networks: Categorization, Smooth Movement, and Border Effects. *ACM SIGMOBILE Mob Comput Commun Rev* 5(3):55–66
- Bettstetter C, Resta G, Santi P (2003) The Node Distribution of the Random Waypoint Mobility Model for Wireless Ad Hoc Networks. *IEEE Trans Mob Comput* 2(3):257–269
- Bless R, Hübsch C, Mies S, Waldhorst OP (2008) The Underlay Abstraction in the Spontaneous Virtual Networks (SpovNet) Architecture. NGI 2008: Next Generation Internet Networks. IEEE, pp 115–122
- Le Boudec J, Vojnovic M (2006) The Random Trip Model: Stability, Stationary Regime, and Perfect Simulation. *IEEE/ACM Trans Netw* 14(6):1153–1166
- Camp T, Boleng J, Davies V (2002) A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research. *Wirel Commun Mob Comput* 2(5):483–502
- Cayirci E, Akademileri H, Levent Y, Akyildiz IF (2002) User Mobility Pattern Scheme for Location Update and Paging in Wireless Systems. *IEEE Trans Mob Comput* 1(3):236–247
- Chowdhury NMMK, Boutaba R (2008) A Survey of Network Virtualization. Technical Report CS-2008-25, University of Waterloo
- Clausen T, Jacquet P (eds) (2003) Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626
- CRAWDAD (2009) A Community Resource for Archiving Wireless Data at Dartmouth. <http://crawdad.cs.dartmouth.edu/> (abgerufen am 30 Okt 2009)
- Demers A, Greene D, Hauser C, Irish W, Larson J, Shenker S, Sturgis H, Swinehart D, Terry D (1987) Epidemic Algorithms for Replicated Database Maintenance. PODC 1987: 6th Annual Symposium on Principles of Distributed Computing. ACM, New York, pp 1–12
- Droms R (1997) Dynamic Host Configuration Protocol, RFC 2131
- Ekman F, Keränen A, Karvo J, Ott J (2008) Working Day Movement Model. MOBILITYMODELS 2008: 1st ACM SIGMOBILE Workshop on Mobility Models. ACM, New York, pp 33–40
- Farrell S, Cahill V, Geraghty D, Humphreys I, McDonald P (2006) When TCP Breaks: Delay- and Disruption-Tolerant Networking. *IEEE Internet Comput* 10(4):72–78
- Feng K-T, Hsu C-H, Lu T-E (2008) Velocity-assisted Predictive Mobility and Location-aware Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks. *IEEE Trans Veh Technol* 57(1):448–464
- Gossa J, Janecek AG, Hummel KA, Gansterer WN, Pierson J-M (2008) Proactive Replica Placement Using Mobility Prediction. MDMW 2008: 9th International Conference on Mobile Data Management Workshops. IEEE Computer Society, Washington, pp 182–189
- Grossglauser M, Vetterli M (2003) Locating Nodes with EASE: Last Encounter Routing in Ad Hoc Networks through Mobility Diffusion. INFOCOM 2003: 22nd Joint Conference of the Computer and Communications Societies, pp 1954–1964
- Gundavelli S, Leung K, Devarapalli V, Chowdhury K, Patil B (2008) Proxy Mobile IPv6. RFC 5213
- Härrilä J, Filali F, Bonnet C (2009) Mobility Models for Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey and Taxonomy. *IEEE Commun Surv Tutor* 11(4):19–41
- Hsu W-J, Spyropoulos T, Psounis K, Helmy A (2007) Modeling Time-Variant User Mobility in Wireless Mobile Networks. INFOCOM 2007: 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE, pp 758–766
- Hui P, Chaintreau A, Scott J, Gass R, Crowcroft J, Diot C (2005) Pocket Switched Networks and Human Mobility in Conference Environments. WDTN 2005: ACM SIGCOMM Workshop on Delay Tolerant Networks. ACM, New York, pp 224–251
- Jacobson V, Smetters DK, Thornton JD, Plass MF, Briggs N, Braynard R (2009) Networking Named Content. CONEXT 2009: 5th ACM International Conference on emerging Networking Experiments and Technologies. ACM, New York, pp 1–12
- Johnson D, Perkins C, Arkko J (2004) Mobility Support in IPv6. RFC 3775
- Katsaros D, Manolopoulos Y (2009) Prediction in Wireless Networks by Markov Chains. *IEEE Wirel Commun* 16(2):56–64
- Kim M, Kotz D, Kim S (2006) Extracting a Mobility Model from Real User Traces. INFOCOM 2006: 25th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE, pp 1–13
- Ko Y, Vaidya N (2009) Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks: Location-Based Multicast Algorithms. WMCSA 1999: 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. IEEE, pp 101–110
- Kodli R (ed) (2009) Mobile IPv6 Fast Handovers. RFC 5568
- Kopparty S, Krishnamurthy SV, Faloutsos M, Tripati SK (2002) Split TCP for Mobile Ad Hoc Networks. GLOBECOM 2002: Global Telecommunications Conference. IEEE, pp 138–142
- Kurhinen J, Korhonen V, Vapa M, Weber M (2006) Modelling Mobile Encounter Networks. PIMRC 2006: 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. IEEE, pp 1–4
- Lee J-K, Hou J-C (2006) Modeling Steady-State and Transient Behaviors of User Mobility: Formulation, Analysis, and Application. MOBIHOC 2006: 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. ACM, New York, pp 85–96
- Markoulidakis JG, Lyberopoulos GL, Tsirkas DE, Sykas ED (1997) Mobility Modeling in Third-generation Mobile Telecommunications Systems. *IEEE Pers Commun* 4(4):41–56
- Moy J (1998) OSPF Version 2. RFC 2328
- Nelson M, Lim B-H, Hutchins G (2005) Fast Transparent Migration for Virtual Machines. USENIX Annual Technical Conference. http://www.vmware.com/pdf/usenix_vmotion.pdf (abgerufen am 9. Nov 2009)
- Ni S, Tseng Y, Chen Y, Sheu J (2009) The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network. MOBICOM 2009: 5th International Conference on Mobile Computing and Networks. ACM, New York, pp 151–162
- Ott J, Seifert N, Carroll C, Wallbridge N, Kutscher D, Bergmann O (2009) The CHIANTI Architecture for Robust Mobile Internet Access. WoWMoM 2009: 10th International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, pp 1–9
- Perkins C (2002) IP Mobility Support for IPv4. RFC 3344
- Roth J (2005) Mobile Computing: Grundlagen, Technik, Konzepte, 2. Aufl. dpunkt Verlag, Heidelberg
- Stanze O, Zitterbart M, Koch C (2006) Mobility Adaptive Self-parameterization of Routing Protocols for Mobile Adhoc Networks. WCNC 2006: IEEE Wireless Communications and Networking Conference. IEEE, pp 276–281
- Su W, Lee S-J, Gerla M (2001) Mobility Prediction and Routing in Ad Hoc Wireless Networks. *Int J Netw Manag* 11(1):3–30
- Sun M, Feng W, Lai T (2001) Location Aided Broadcast in Wireless Ad Hoc Networks. GLOBECOM 2001: Global Telecommunication Conference. IEEE, pp 2842–2846
- Tennenhouse D, Smith JM, Sincoskie WD, Wetherall D, Minden GJ (1997) A Survey on Active Network Research. *IEEE Commun Mag* 35(1):80–86
- TNS Infratest (2009) 12. Monitoring Faktenbericht 2009. http://www.tns-infratest.com/bmwi/download_pdf.asp?dfile=BMWi_12_Faktenbericht_2009.pdf, letzter Zugriff 13.12.2009
- Valkó AG (1999) Cellular IP: A New Approach to Internet Host Mobility. *SIGCOMM Comp Commun Rev* 29:50–65
- Volovikov O, Kotilainen N, Juonoja T, Vapa M, Weber M, Vuori J (2008) Mobile Encounter Networks and Their Applications. CCNC 2008: 5th IEEE Consumer Communication and Networking Conference. IEEE, pp 1176–1180
- White JE (1997) Mobile Agents. In: Bradshaw JM (ed) Software Agents. MIT Press, Cambridge, pp 437–472

49. Williams B, Camp T (2002) Comparison of Broadcasting Techniques for Mobile Ad Hoc Networks. MOBIHOC 2002: 3rd International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. ACM, New York, pp 194–205
50. Yang G, Chen L, Sun T, Zhou B, Gerla M (2006) Ad-hoc Storage Overlay System (ASOS): A Delay-Tolerant Approach in MANETs. MASS 2006: IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems. IEEE Computer Society, Washington, pp 296–305
51. Zimmermann H (1980) OSI Reference Model – The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection. IEEE Trans Commun COM 28(4): 425–432