

Neue Anwendungen in mobilen Ad-hoc-Netzen - Anforderungen und Realisierungsaspekte

Markus Augel, Falk Giemsa, Markus Zeller, Dr. Rudi Knorr,
Fraunhofer Einrichtung für Systeme der Kommunikationstechnik, München

Abstract

Drahtlose Ad-hoc-Netzwerke bilden die Basis für eine Vielzahl innovativer Anwendungen. Von Interesse ist dabei insbesondere eine flächendeckende multi-hop Ad-hoc-Vernetzung mit Forwardingfunktionalität, die jedoch mit den heute verfügbaren Funktechnologien nur ansatzweise realisiert ist. Nach einer Vorstellung des Stands der Technik und einiger nach Topologien klassifizierter Anwendungsszenarios wird auf Anforderungen - schwerpunktmäßig Routingprotokolle - und Realisierungsaspekte eingegangen. Abschließend wird ein bei Fraunhofer ESK entwickelter Bluetooth Forwarding Node vorgestellt, der auf zwei Funkmodulen basiert und so effiziente multi-hop-Kommunikation ermöglicht.

1 Einleitung

Ad-hoc-Netze ermöglichen eine komfortable drahtlose Vernetzung ohne großen Installations- und Konfigurationsaufwand. Eine flächendeckende drahtlose Ad-hoc-Vernetzung kann z.B. in Gebäuden als Grundlage für innovative Anwendungen dienen. Ad-hoc-Netze bilden die Basis für die Kommunikation zwischen verschiedensten mobilen Endgeräten, z.B. zwischen Personal Digital Assistants (PDAs), Notebooks, Webpads, Mobiltelefonen, Geräten aus dem Bereich Body Area Network, Geräten für die Home- und Office-Automation aber auch zwischen stationären Geräten wie PCs oder Druckern, die einfach und komfortabel in das Netz eingebunden werden können. Mit den gegenwärtig zur Verfügung stehenden Technologien Bluetooth, IEEE 802.11 und HiperLAN/2 sowie DECT und HomeRF ist eine flächendeckende Ad-hoc-Vernetzung prinzipiell nicht ausgeschlossen, jedoch bisher nur in Teilen realisiert. Aufgrund der begrenzten Reichweite der Funkübertragung - je nach verwendeter Technologie und in Abhängigkeit von äußeren Einflüssen bis zu max. 100 m - müssen zur flächendeckenden Versorgung mehrere Subfunknetze miteinander gekoppelt werden, was idealerweise ebenfalls nach dem Ad-hoc-Prinzip erfolgen sollte. Um in einem solchen Netz die Kommunikation zwischen räumlich weit voneinander entfernten Endgeräten zu realisieren, sind multi-hop-fähige Technologien erforderlich. Das Netz muß hierzu über sog. Forwarding Nodes verfügen, die in der Lage sind, Daten von einem Netzknoten (Node) entgegenzunehmen und diese an einen anderen weiterzuleiten (siehe **Bild 1**).

Zur Bestimmung eines geeigneten Weges zwischen Sender und Empfänger sind für Ad-hoc-Netze adapti-

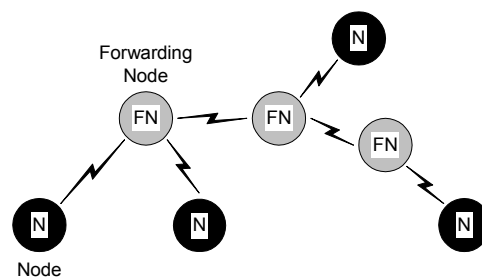


Bild 1 Multi-hop-Netz mit Forwarding Nodes

ve Routingprotokolle erforderlich, die mit der hohen Dynamik der Netze umgehen können. Bei der Wegewahl müssen darüber hinaus die Quality-of-Service-Anforderungen der im Netz eingesetzten Anwendungen berücksichtigt werden, d.h. die Qualität der Verbindung muß trotz wechselnder Zwischenstationen und dynamischer Pfade zwischen Sender und Empfänger über mehrere Hops aufrecht erhalten bleiben.

2 Stand der Technik

Zur Ad-hoc-Vernetzung stehen u.a. die Funkstandards Bluetooth, IEEE 802.11 und HiperLAN/2 zur Verfügung. Ihre gegenwärtigen Fähigkeiten bezüglich multi-hop-Vernetzung sind jedoch recht eingeschränkt.

Bluetooth sieht nicht nur die Kopplung von bis zu acht aktiven Geräten zu einem kleinen sog. Piconet (bestehend aus einem Master und maximal

sieben aktiven Slaves) vor, sondern auch die Kopplung mehrerer Piconets zu einem sog. Scatternet. In der aktuellen Spezifikation [1] werden jedoch keine Angaben über die genaue Funktionsweise, das Routing und die Selbstorganisation bezüglich Scatternets gemacht. Gegenwärtige Bluetooth-Produkte ermöglichen daher nur die direkte Kommunikation zwischen Slave und Master in einem Piconet.

IEEE 802.11 [2] ermöglicht, sowohl Ad-hoc- als auch Infrastruktur-Netze zu errichten. Im Ad-hoc-Modus kommunizieren alle Geräte über Punkt-zu-Punkt-Verbindungen direkt miteinander. Multi-hop-Kommunikation ist in dieser Betriebsart nicht möglich. Um eine Kommunikation über größere Entfernungen zu realisieren, können im Infrastrukturmodus mehrere solcher Subnetze über einen Backbone miteinander verbunden werden. Die Koordination der Kommunikation im Subnetz sowie die Kopplung zwischen Subnetz und Backbone werden dabei von einem sog. Access Point übernommen. Die Implementierung des Backbones ist nicht spezifiziert; er kann drahtgebunden oder drahtlos sein. Insbesondere ist es standardkonform, dafür ebenfalls 802.11 zu verwenden. Auf diese Weise können mit 802.11 drahtlose multi-hop-Netzwerke aufgebaut werden. Konkrete Realisierungsaspekte von Routing- und Handover-mechanismen werden im Standard jedoch nicht behandelt.

Mit HiperLAN/2 [3][4] können wie mit IEEE 802.11 sowohl Ad-hoc- als auch zellulare Infrastrukturnetze errichtet werden. Im Infrastrukturmodus wird die gesamte Kommunikation innerhalb einer Funkzelle ebenfalls über einen Access Point abgewickelt, der zusätzlich die Kommunikation zentral steuert. Mit HiperLAN/2 ist auch eine dezentrale Kommunikation ohne Access Point (Direct Link Communication) und somit Ad-hoc-Networking möglich. Mehrere HiperLAN/2-Geräte bilden dazu ein Subnetz, das einer Zelle in der Infrastrukturkonfiguration entspricht. In dieser Betriebsart wird unter den an der Kommunikation beteiligten Geräten dynamisch ein sog. Central Controller ausgewählt, der in gleicher Weise wie ein Access Point die Steuerung übernimmt. Die Daten werden jedoch nicht über diesen Controller, sondern direkt zwischen den Mobilstationen ausgetauscht. Die Koexistenz mehrerer solcher Subnetze ist möglich, wenn mehrere Central Controller bestimmt werden, die unterschiedliche Frequenzen verwenden. Eine mögliche Kopplung dieser Subnetze durch Forwarding Nodes und damit mutli-hop-Kommunikation auf HiperLAN/2-Ebene ist derzeit jedoch nicht vorgesehen.

Die ursprünglich zur reinen Sprachkommunikation entwickelte DECT-Technologie [6], die mit dem

Multimedia Access Profile (DMAP) [7] um Datenübertragungsfähigkeiten erweitert wurde, ist im weiteren Sinn ebenfalls zur Ad-hoc-Vernetzung fähig. DMAP-Basisstationen und DMAP-Endgeräte sind in der Lage, ad hoc miteinander zu kommunizieren. Kommt ein DMAP-fähiges Gerät in die Reichweite einer DMAP-Basisstation, kann nach der automatischen Authentifizierungs-Prozedur ohne Zutun des Benutzers automatisch eine Verbindung aufgebaut werden. Haupteinsatzgebiet von DECT ist jedoch die Schaffung eines zellularen Mobilfunknetzes für mobile Endgeräte. Multi-hop Kommunikation sowie Roaming und Handover werden von DECT unterstützt. Die Verbindung der Basisstationen untereinander ist jedoch drahtgebunden und widerspricht somit der "no new wires"-Philosophie.

Das SWAP-Protokoll der HomeRF Working Group [8] kombiniert Bestandteile aus IEEE 802.11 zur Datenübertragung und aus DECT zur Sprachkommunikation. Roaming sowie Multi-hop-Kommunikation sollen aber erst in einer zukünftigen Version realisiert werden.

3 Anwendungsszenarios

Nachfolgend werden einige Anwendungsszenarios für mögliche Topologien von Ad-hoc-Netzen vorgestellt. Zur Unterscheidung wird eine Klassifizierung anhand der Dynamik der Netze durchgeführt.

3.1 Stationäre Topologie

Bei Konferenzen oder Besprechungen stellen die Teilnehmer ihre Kommunikationsgeräte wie Personal Digital Assistants (PDAs) oder Notebooks auf. Während der Veranstaltung bleiben die Standorte der Geräte nahezu unverändert. Die Geräte können sich ad hoc miteinander und mit weiteren im Raum befindlichen stationären Geräten, wie z.B. Beamer oder Drucker gemäß vorgegebener AAA-Mechanismen (Authentication, Authorization and Accounting) vernetzen.

Die Spanne der in einem solchen Szenario austauschbaren Daten reicht von Telefonnummern und E-Mail-Adressen bis hin zu umfangreichen Konferenz- und Präsentationsunterlagen oder auch Lehr- und Lernmaterialien in Schulen und Universitäten. Mit Hilfe eines Zugangspunktes können die Teilnehmer von Konferenzen nicht nur ad hoc Daten untereinander austauschen, sondern ebenso einfach auf das Internet zugreifen. Diese Anwendung ist z.B. für Schulen interessant, da ihr Einsatz ähnlich spontan wie das Herausnehmen und Aufschlagen eines Buches möglich ist. Ohne

langwierige Vorbereitung können Informationen aus dem Internet in den Unterricht miteinbezogen werden.

3.2 Infrastruktur für mobile Endgeräte

Inhouse-Informations- und Ortungssysteme können Kunden bzw. Besucher über drahtlose PDA-ähnliche Endgeräte mit gebäudebezogenen Informationen aller Art versorgen. Im Gebäude werden dazu an mehreren Stellen stationäre drahtlose Kommunikationsknoten angebracht, die sich ad hoc miteinander vernetzen und eine zellulare Infrastruktur bilden. Eine Änderung dieser Infrastruktur ist so bei Bedarf sehr leicht möglich. Die Kunden bzw. Besucher benutzen drahtlose Endgeräte mit berührungssensitiven Displays, um interaktiv zwischen verschiedenen Informationsangeboten zu wählen. Die Geräte können sich im Besitz der Personen befinden, ihnen beim Betreten des Gebäudes leihweise ausgehändigt werden oder sich z.B. auch an Einkaufswagen befinden. Mögliche Einsatzgebiete sind alle größeren Gebäudekomplexe wie Kaufhäuser, Ämter, Flughäfen oder Bahnhöfe, um z.B. Navigationsinformationen, Informationen über Warenstandorte, Angebote, Öffnungszeiten etc. anzuzeigen. Derartige Systeme sind auch zur Touristeninformation oder als Besucherleitsysteme in größeren Firmenkomplexen oder Museen denkbar.

3.3 Dynamische infrastrukturlose Topologie

Drahtlose Kommunikationsknoten können auch in Fahrzeuge integriert werden und neben der fahrzeuginternen Kommunikation zum gegenseitigen Datenaustausch zwischen den Fahrzeugen verwendet werden. Voraussetzung dafür ist, daß die *relative* Geschwindigkeit der Kommunikationsknoten untereinander nicht sehr hoch ist, was z.B. im Berufsverkehr oder insbesondere bei Kolonnenfahrten auf Autobahnen oft gegeben ist. Diese Einschränkung ist erforderlich, da Technologien für die Bildung drahtloser lokaler Netze weder für hohe relative Geschwindigkeiten konzipiert wurden noch dafür geeignet sind. Die Struktur eines Fahrzeugverbundes ist nur sporadischen Änderungen unterworfen; die Reihenfolge bleibt weitestgehend erhalten. Aufgrund des Ad-hoc-Charakters des Netzes können neue Fahrzeuge leicht eingebunden werden; ebenso leicht können Fahrzeuge das System verlassen. Die Anwendung eines solchen Systems ist zum einen die automatische Kommunikation

zwischen den Fahrzeugen ohne Eingriffe des Fahrers zur Koordination von Kolonnenfahrten. Die primäre Zielsetzung ist dabei die Steigerung der Verkehrssicherheit. Weiterhin dient es dem Austausch von fahrtbezogenen Informationen wie Stau- und Gefahrenwarnungen. Der Fahrer eines Fahrzeugs könnte über die Benutzerschnittstelle zum Bordcomputer vordefinierte Nachrichten absetzen, die an andere Fahrzeuge übermittelt und dort optisch oder akustisch angezeigt werden. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind die sprachbasierte Kommunikation zwischen den Fahrern zum Informationsaustausch sowie Multimediaspiele zwischen den Mitfahrern verschiedener Fahrzeuge.

3.4 Hochdynamische infrastrukturlose Topologie

Eine mobile Kommunikationszentrale, bestehend aus Headset und PDA-ähnlichem Endgerät mit integrierter Kamera, kann z.B. von entsprechend qualifizierten Arbeitern auf Baustellen genutzt werden. In einem solchen Szenario dient die Kommunikationszentrale vor allem der sprachbasierten Kommunikation der Arbeiter untereinander, um auch über größere Entfernungen schwierige Arbeiten miteinander koordinieren zu können. Wesentlicher Vorteil ist, daß durch den Einsatz von Headsets während der Kommunikation beide Hände zur Verfügung stehen. Mit in die Arbeitskleidung integrierbaren PDAs können die Arbeiter auf Baupläne und Arbeitsanweisungen zugreifen. Diese sind auf einem Server abgelegt, der sich z.B. in einem Bauwagen befinden kann. Mit der Kamera aufgenommene Bilder können für Rückfragen direkt an Vorgesetzte oder zu Dokumentationszwecken zusammen mit Notizen an den Server übertragen werden.

4 Anforderungen

Zur Realisierung von drahtlosen multi-hop-fähigen Ad-hoc-Netzen (vgl. Abschnitt 3) sind vielfältige Mechanismen erforderlich, die eine vollständige Selbstorganisation der Netze sicherstellen und keinerlei administrative Eingriffe des Anwenders oder eines Technikers erfordern. Hierzu zählen zum einen Verfahren zur Unterstützung der Mobilität der Stationen. Unabhängig von Aufenthaltsort und Bewegungsart der Geräte muß die Kommunikation zwischen den Endgeräten mit garantierter Qualität auch über mehrere wechselnde Zwischenknoten möglich sein. Dazu sind Mechanismen wie QoS-basiertes Routing, geeignete Topologieerfas-

sungs- und Handoverprozeduren erforderlich. Zusätzlich sollte in einem derartigen Netz die Nutzung der Dienste durch die Anwendungen ebenfalls vollständig automatisiert ablaufen. Sobald ein neues Gerät in ein Ad-hoc-Netz eintritt, sollte sowohl dieses auf alle im Netz angebotenen Dienste zugreifen können, als auch alle anderen Geräte die Dienste des neuen Netzknotens nutzen können, sofern diese dazu autorisiert sind. Nachfolgend werden Anforderungen definiert, die ein für Ad-hoc-Netze geeignetes Routingprotokoll erfüllen sollte.

4.1 Anforderungen an Routingprotokolle für Ad-hoc-Netze

Ein Routingalgorithmus für Ad-hoc-Netze sollte einfach und robust sein, mit einem Minimum an Topologieinformationen auskommen und wenig Ressourcen (Bandbreite und Rechenzeit) benötigen. Es ist nicht erforderlich, daß der Algorithmus für alle Verbindungen die optimalen Pfade ermittelt. Wichtiger ist eine schnelle und effiziente Bestimmung von Pfaden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit die QoS-Anforderungen der Anwendungen (Datenrate, Delay, Jitter, Bit-Fehlerrate, Paket-Fehlerrate) erfüllen können.

In die Bestimmung des Weges sollten möglichst wenige Knoten eingebunden werden; die Kommunikation zur Wegedefinition sollte mit Rücksicht auf die meist batteriebetriebenen Geräte auf ein Minimum beschränkt werden. Broadcasts sollten weitestgehend vermieden werden, da sie in Ad-hoc-Netzen hochgradig unzuverlässig sind. Multicasts in einem lokal begrenzten Bereich des Netzes mit stabiler Topologie sind akzeptabel. Derartige Stabilisierungen der Topologie sollten vom Routingprotokoll identifiziert werden können, d.h. stationäre Links sollten erkannt und bevorzugt verwendet werden.

Zwischen der Aktualität der Routinginformationen und dem mit ihrer Ermittlung verbundenen Aufwand besteht ein Zielkonflikt. Einerseits sollten Topologieänderungen schnell identifiziert und die Routingpfade, insbesondere die von aktiven Verbindungen, angepaßt werden. Veraltete Informationen, die keinen Bezug zur aktuellen Topologie haben, müssen schnell entdeckt und aktualisiert oder gelöscht werden. Es muß vermieden werden, daß als nächste Zwischenstation ein Gerät bestimmt wird, das sich außer Reichweite bzw. gar nicht mehr im Netz befindet. Diese Anforderungen werden von sog. proaktiven Routingprotokollen erfüllt. Andererseits sollte aber nicht jede minimale Topologieänderung sofort eine netzweite Veränderung des Routings bewirken. Insbesondere in

hochdynamischen Topologien können temporäre Änderungen auftreten, die sofort wieder kompensiert werden, z.B. kann eine Person mit einem mobilen Endgerät auf- und abgehen. In solchen Fällen können sog. reaktive Protokolle die Anforderungen besser erfüllen.

4.2 Proaktive und reaktive Routingprotokolle

Proaktive Routingprotokolle wie OSPF (Open Shortest Path First) oder DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) versuchen, alle möglichen Pfade in einem Netz, unabhängig von aktiven Kommunikationsverbindungen, kontinuierlich zu erfassen und aktuell zu halten. Beim DSDV Protokoll [8], einer schleifenfreien Weiterentwicklung des verteilten Bellmann-Ford-Algorithmus [9], verwaltet jeder Netzknoten eine eigene Routingtabelle mit der Liste aller aktuell erreichbaren Netzknoten. Zur Aktualisierung der Tabellen tauschen alle Netzknoten als kooperierende Router periodisch Nachrichten aus. Für viele Anwendungen in Ad-hoc-Netzen sind jedoch Protokolle vorteilhafter, die Wege nur bei Bedarf, also reaktiv (on demand) bestimmen. Reaktive Protokolle wie AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) und DSR (Dynamic Source Routing) ermitteln den Pfad zwischen Sender und Empfänger nur im Bedarfsfall, d.h. falls wirklich Daten übertragen werden sollen. Das DSR Protokoll vermeidet proaktive Aktualisierungen durch die Mechanismen Route Discovery und Route Maintenance, bezieht aber ebenfalls jeden Netzknoten als Router in den Algorithmus mit ein. Dieser Ansatz ist jedoch ungünstig, wenn außer vollwertigen PCs auch PDAs, Headsets und weitere batteriebetriebene Kleinstkomponenten mit eingeschränkten Systemressourcen Netzteilnehmer sein können.

Proaktive Ansätze sind eher für stationäre bzw. leicht dynamische Netze geeignet. Sie haben den Vorteil, daß eine Route unabhängig vom Bestimmungsort bei Bedarf für eine Anwendung sofort zur Verfügung steht und aus der Routingtabelle entnommen werden kann. In dynamischen Topologien erzeugen proaktive Protokolle jedoch viel Overhead, da die Routinginformationen häufig aktualisiert werden müssen. Mit der Dynamik des Netzes steigt die Wahrscheinlichkeit, daß die Routinginformationen veraltet sind, bevor sie von einer Anwendung genutzt werden.

Reaktive Ansätze hingegen benötigen im Prinzip weniger Ressourcen. Sie haben jedoch den Nachteil, daß durch die Ermittlung des Weges vor Beginn der eigentlichen Kommunikation deutliche Verzögerungen entstehen können. Reaktive An-

sätze sind eher für dynamische Topologien geeignet. Mit ihnen kann in solchen Topologien verhindert werden, daß Routinginformationen ermittelt werden, die nicht benötigt werden bzw. die vor ihrer Nutzung veraltet sind. Bei hochdynamischen Topologien verursachen reaktive Ansätze aber ebenfalls ein erhebliches Verkehrsaufkommen, da die ermittelten Routinginformationen schnell veraltet sind und die Routen neu ermittelt werden müssen. In diesem Fall erscheint es daher sinnvoll, proaktive und reaktive Ansätze miteinander zu kombinieren. Lokale Topologieänderungen können proaktiv lokal erfaßt werden. Im Bedarfsfall, wenn vor einer Verbindung ein Sender eine Route ermitteln möchte, können diese Informationen dann reaktiv verwendet werden.

Das Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) Routing Protokoll [8] kombiniert zwar die Vorteile von DSR und DSDV, eignet sich aber aufgrund seines zur Routenbestimmung verwendeten netzglobalen Broadcastmechanismus nur für jene Anwendungen, die nicht auf PDA-ähnlichen Geräten betrieben werden. In Szenarios mit Netzkomponenten unterschiedlichster Komplexität muß gewährleistet werden, daß möglichst wenige Netzknoten an der Kommunikation zur Routenbestimmung teilnehmen. Sonst besteht die Gefahr, daß Geräte ohne externe Stromversorgung frühzeitig ausfallen. Aktuelle Entwicklungen wie das On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMRP) [14] versuchen die besonderen Anforderungen für Funknetze mit stark beschränkter Bandbreite, häufigen Topologiewechsels und Komponenten mit begrenzten Energiereserven zu erfüllen. Allerdings ist hier der Zielkonflikt zwischen den reaktiven und proaktiven Eigenschaften des Protokolls aufgrund einer großen Anzahl von Multicastübertragungen noch nicht zufriedenstellend gelöst.

Ein geeigneter Routingalgorithmus sollte Bestandteile aus proaktiven und reaktiven Ansätzen kombinieren und dabei einen begrenzten Multicastmechanismus verwenden, der eine differenzierte Behandlung der Netzkomponenten erlaubt und so im Idealfall an der Kommunikation unbeteiligte Netzknoten nicht in die Routenbestimmung mit einbezieht.

5 Realisierungsaspekte

5.1 IP-Routing in Bluetooth-Netzen

Aufgrund der Verbreitung von IP und der Vielzahl darauf aufbauender Applikationen ist die IP-basierte multi-hop Kommunikation von Netzknoten in Ad-hoc-Netzen untereinander und mit beliebigen anderen IP-fähigen Endgeräten ein an-

strebenswertes Ziel. IP bietet alle benötigten Routingmechanismen wie Zugriffe auf Routingtabellen und Optionen wie Source Routing und Record Route, die von einem adaptiven Routingprotokoll genutzt werden können (vgl. Abschnitt 4.1). Die speziell zur Ad-hoc-Vernetzung entwickelte Technologie Bluetooth ist ausdrücklich so angelegt, daß die erforderlichen Chips Massenartikel werden und zu entsprechend günstigen Preisen erhältlich sein werden. Bluetooth-Unterstützung wird in naher Zukunft in sehr vielen elektronischen Geräten zu finden sein, wodurch eine hohe und weiter ausbaufähige Marktdurchdringung erreicht wird. Die genauere Betrachtung der Bluetooth-Technologie als Grundlage für neue Anwendungen erscheint somit sinnvoll.

Voraussetzung für einen Routingmechanismus auf IP-Ebene ist die effiziente Unterstützung von IP over Bluetooth. Die Grundanforderungen an ein solches Protokoll ergeben sich durch RFCs, die das neue Protokoll unterstützen muß (mandatory) bzw. unterstützen sollte (recommended). Darunter fallen elementare RFCs wie RFC 791 (IP) und RFC 792 (ICMP), aber auch optionale Standards wie RFC 2131 (DHCP).

Nicht jedes Bluetooth-Endgerät muß den gesamten Protokollstapel implementieren. Vielmehr wird durch mehrere sog. Profiles die für bestimmte Anwendungsfälle verbindliche Untermenge der Spezifikation festgelegt. Zur Intra-Piconet IP-Kommunikation dienen das LAN Access Profile [1] und das noch in der Entwicklung befindliche PAN Profile [10]. Profiles zur *Inter-Piconet* Kommunikation existieren zur Zeit nicht.

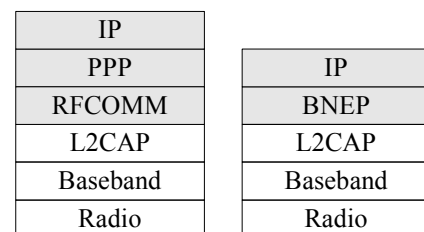


Bild 2 IP im Bluetooth LAN Access Profile (links) und im Bluetooth PAN Profile (rechts)

Das LAN Access Profile sieht die Übertragung von IP over PPP over RFCOMM over L2CAP vor (siehe **Bild 2**), d.h. IP wird in PPP-Pakete gekapselt, die über eine emulierte serielle Schnittstelle übertragen werden. Diese Art der Kommunikation ist nur für den Datenaustausch zwischen dem Master und den Slaves bestimmt. Die IP-Kommunikation zwischen mehreren Slaves über den Master könnte zwar durch Kombination mehrerer dieser Punkt-zu-Punkt-Verbindungen realisiert werden, was je-

doch mit einem erheblichen Overhead verbunden wäre. Der Master müßte in diesem Fall als IP-Router eingerichtet werden. Eine so realisierte IP-Kommunikation zwischen Slaves ist nicht effizient. Der Internet Draft 6overBT [13] beschreibt den direkten Transport von IPv6-Datagrammen als Payload in L2CAP-Paketen ohne zusätzlichen Overhead. Allerdings beschränkt sich dieser Lösungsansatz ausschließlich auf Version 6 des IP-Protokolls und verhindert aufgrund der bisher sehr geringen Verbreitung von IPv6 eine schnelle und breite Umsetzung neuer Anwendungen in IPv4-basierten Netzwerken.

Das noch nicht veröffentlichte PAN Profile [10] definiert ebenfalls eine effizientere Unterstützung von IP-Kommunikation im Piconet. Es sieht die Kapselung von IP-Paketen in BNEP (Bluetooth Network Encapsulation Protocol) und die anschließende Übertragung über L2CAP vor (siehe **Bild 2**). BNEP stellt Protokollen höherer Schichten, insbesondere IP, eine mit Ethernet vergleichbare Basis zur Verfügung, d.h. eine für Ethernet-Pakete bestimmte Payload kann ohne jegliche Modifikation über BNEP übertragen werden. Das PAN Profile unterscheidet zwischen den drei Geräterollen GN, NAP und PANU. Der Group Ad-hoc Node (GN) ermöglicht Teilnehmern des Piconets IP-basierte Intra-Piconet Kommunikation. Er führt ein Forwarding der Pakete zwischen den mit ihm verbundenen Geräten in Anlehnung an IEEE 802.1D (MAC Bridging) durch. Der Network Access Point (NAP) ermöglicht den Mitgliedern des PANs die Kommunikation mit einem Fremdnetz (Interworking). Als PAN User (PANU) wird ein Bluetooth-Gerät bezeichnet, das als Client die Dienste des GN oder des NAP nutzt. Ein GN bzw. NAP, der Verbindungen zu mehreren PANUs unterhält, *muß* der Master des Piconets sein. Die Ausbreitung des PANs beschränkt sich in der ersten Phase des Profiles auf ein einzelnes Piconet. Allerdings können schon jetzt mit den Hilfsmitteln BNEP, NAP und GN Szenarios mit IP-basierter Inter-Piconet Kommunikation realisiert werden. Die zu überwindende Hürde stellt die Kommunikation zwischen den einzelnen NAPs dar, die zur Zeit über einen Backbone miteinander gekoppelt werden könnten, aber noch nicht direkt über Bluetooth. Erweiterungen des PAN Profiles und des BNEPs auf Scatternets sollen in einer zweiten Phase folgen.

Aufgrund der unzureichenden Scatternet-Spezifikation sehen derzeit viele Inter-Piconet-Lösungsansätze proprietäre Gateway-Hierarchien [11] zur Kopplung der einzelnen Piconets vor. Unter den über einen Backbone verbundenen Gateways befindet sich bei zentralen Ansätzen ein zusätzlicher Master-Gateway, der für das netzweite Routing verantwortlich ist. Der Einsatz eines draht-

drahtgebundenen Backbones kann als stationäre Infrastruktur sinnvoll sein, steht jedoch im Widerspruch zur Flexibilität drahtloser Ad-hoc-Netze.

5.2 Bluetooth-Forwarding Node

Ziel eines Projektes bei der Fraunhofer Einrichtung für Systeme der Kommunikationstechnik (ESK) ist es, mit den gegenwärtig zur Verfügung stehenden Protokollen prototypisch sowohl Piconet-interne Kommunikation zwischen Slaves als auch Piconet-übergreifende Kommunikation zwischen Bluetooth-Endgeräten zu realisieren. Eine RFCOMM-basierte Lösung zur Slave-Slave-Kommunikation schied aufgrund des damit verbundenen Protokoll-Overheads aus; ebenso wurde von einer BNEP-basierten Lösung Abstand genommen, da die zugehörige Spezifikation sich noch im Entwicklungsstadium befindet (vgl. Abschnitt 5.1). Eine Erweiterung der L2CAP-Schicht, wie sie auch in [12] u.a. beschrieben wird, ist eine effiziente Möglichkeit, die gewünschte Funktionalität zu erhalten. Der Nachteil, daß nur entsprechend proprietär erweiterte Bluetooth-Geräte die Funktionalität nutzen können, wurde zugunsten der schnellen Umsetzbarkeit in Kauf genommen.

Der standardkonforme L2CAP-Header sieht nur ein Adreßfeld vor. Falls die Kommunikation nur zwischen dem Master und den Slaves in einem Piconet stattfindet, reicht dies aus. Der Inhalt des Adreßfeldes wird je nach Kommunikationsrichtung als Source oder Destination Address interpretiert; Sender und Empfänger sind eindeutig identifiziert. Einem Slave ist es jedoch nicht möglich, ein Paket direkt an einen anderen Empfänger als seinen Master zu adressieren. Um diese Einschränkung zu umgehen, wurde in den L2CAP-Header ein proprietäres zweites Adreßfeld eingefügt. Ein Master, der ein solches Paket erhält, wurde in die Lage versetzt, anhand der zusätzlichen Information den korrekten Adressaten zu erkennen und ein Forwarding des Paketes durchzuführen. Dadurch ist eine im Vergleich zur RFCOMM-Lösung effizientere Intra-Piconet Slave-Slave-Kommunikation möglich.

Wie in Abschnitt 2 bereits angedeutet wurde, ist die Funktionalität von Bluetooth bezüglich der Kopplung von mehreren Piconets recht eingeschränkt. Zur Bildung eines Scatternets können Bluetooth-Geräte - genauer Bluetooth-Funkmodule - basierend auf Zeitmultiplexing Mitglieder mehrerer Piconets sein. Diese Art der Kopplung stellt jedoch aufgrund des damit verbundenen geringen Durchsatzes einen Flaschenhals dar. Zur Erhöhung des Durchsatzes wurde bei Fraunhofer ESK ein Forwarding Node mit zwei

Funkmodulen entwickelt, die dauerhaft Mitglieder jeweils eines Piconets sein können. Praktische Versuche bestätigen erwartungsgemäß, daß eine derartige Piconetkopplung keinen Flaschenhals darstellt. Kommunizieren zwei Geräte über den Forwarding Node miteinander, entspricht die Datenrate dieser Verbindung in etwa der einer direkten Kommunikationsverbindung innerhalb eines Piconets und ist somit doppelt so hoch wie jene, die bei einer Scatternetkopplung mit einem Funkmodul zu erwarten ist.

Durch die Kombination der beiden beschriebenen Entwicklungen ist es möglich, ein flächendeckendes Bluetooth-Netz zu schaffen, in dem multi-hop Kommunikationsverbindungen Piconet-übergreifend zwischen räumlich weit voneinander entfernten Endgeräten möglich sind. Dieses Netz bildet in Kombination mit geeigneten Routingprotokollen (vgl. Abschnitt 4.2) die Grundlage für die in Abschnitt 3 beschriebenen Anwendungen. Nachteil dieser Lösung ist jedoch die fehlende Kompatibilität zu bestehenden Produkten. Die Zukunft der effizienten Intra-Piconet-Kommunikation liegt nicht in einer L2CAP-Erweiterung sondern bei BNEP. Der Einsatz von zwei Funkmodulen statt einem zur Kopplung von Piconets und somit zur effizienten Inter-Piconetkommunikation ist eine sinnvolle Alternative und Ergänzung zur spezifikationskonformen Kopplung von Piconets durch ein Funkmodul. Es können Produkte mit zwei Funkmodulen geschaffen werden, die effiziente multi-hop-Kommunikation ermöglichen und diese anderen Geräten als Dienst zur Verfügung stellen.

6 Ausblick

Die in Abschnitt 2 beschriebenen Szenarios setzen skalierbare Ad-hoc-Netze voraus, die multi-hop Kommunikation zwischen zwei oder mehreren drahtlos verbundenen Endgeräten ermöglichen. Entsprechende Erweiterungen vorausgesetzt, wie z.B. die Einführung des neuen Bluetooth PAN Profiles, ist dies mit aktuellen Technologien umsetzbar. Um die Akzeptanz bei den potentiellen Kunden zu erhöhen, sollten Erweiterungen der Funktechnologien jedoch auf ein Minimum beschränkt bleiben, insbesondere um die Kompatibilität zu bereits vorhandenen Endgeräten zu wahren. Der breite Durchbruch von Bluetooth als grundlegende Technologie für die zuvor beschriebenen Anwendungen erscheint wahrscheinlich. Wesentlicher Vorteil von Bluetooth sind die zu erwartenden geringen Hardwarekosten. Zu beachten ist dabei, daß es sich bei den Preisen der derzeit erhältlichen Bluetooth-Produkte um Markteinführungspreise handelt; ein weiterer Preisverfall ist zu erwarten.

Von Nachteil ist dabei jedoch die derzeitige geringe Bruttodatenrate von 1 Mbit/s. Andere höherbitratige - aber auch teurere - Ad-hoc-Technologien wie IEEE 802.11 und HiperLAN/2 werden jedoch nicht mehr als Konkurrenten sondern als Ergänzung zu Bluetooth angesehen. Dabei sind insbesondere hierarchische Netze, die im Backbone ebenfalls eine Ad-hoc-Technologie verwenden, von Interesse. Es bietet sich an, Netze zu schaffen, die auf unterster Ebene eine einfache und preisgünstige Ad-hoc-Technologie wie Bluetooth und im Backbone eine höherbitratige Ad-hoc-Technologie wie IEEE 802.11 oder HiperLAN/2 einsetzen.

Den wenigen Erweiterungen der Funktechnologien zur Umsetzung von multi-hop-Kommunikation muß mit innovativen Routing- und Handovermechanismen begegnet werden, um möglichst vielen Netzteilnehmern unterschiedlichster Mobilitätsklassen den Zugang zu Ad-hoc-Netzen zu gewährleisten und somit das Erfolgspotential neuer Anwendungen in mobilen Funknetzen zu steigern. Es sind Handovermechanismen erforderlich, die auch für einfache Mobilknoten wie Headsets einen Wechsel des Subnetzes zulassen und somit die aktuellen Mobilitätsgrenzen überwinden. Die Handover-Entscheidung kann nicht immer vom Mobilknoten gefällt werden, sondern muß oft ausgewählten Netzknoten übertragen werden.

Aufgrund der Verbreitung von IP ist zu erwarten, daß IP-basiertes Routing auch in drahtlosen multi-hop Netzen zum Standard werden wird. Um die mit IP gegebenen Routingmechanismen als Ausgangspunkt für neue Anwendungen in Ad-hoc-Netzen nutzen zu können, sind spezialisierte Routingverfahren erforderlich, die nur routingrelevante Netzknoten mit ausreichender Rechenleistung und Energieversorgung in die Routenbestimmung einbeziehen. Darüber hinaus ist die Berücksichtigung der QoS-Anforderungen der Anwendungen in die Routenbestimmung von hoher Bedeutung. Insbesondere in hochdynamischen Topologien ist die Aufrechterhaltung der Dienstqualität trotz ständig wechselnder Zwischenstationen eine anspruchsvolle Aufgabe.

7 Literatur

- [1] Bluetooth SIG, Specification of the Bluetooth System, Version 1.1, 2001.
- [2] IEEE, Std 802.11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 1999.
- [3] ETSI, TR 101 683 V1.1.1, Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; System Overview, 2000.

- [4] Johnsson, M., HiperLAN/2 - The Broadband Radio Transmission Technology Operating in the 5 GHz Frequency Band, HiperLAN/2 Global Forum, 1999.
- [5] Perkins, Ad hoc Networking, Addison-Wesley, 2001.
- [6] DECT Forum. DECT – The standard explained. 1997.
- [7] ETSI EN 301 650 V1.1.1, Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT); DECT Multimedia Access Profile (DMAP); Application Specific Access Profile (ASAP), 2000.
- [8] HomeRF Working Group. Technical Summary of the SWAP Specification. 1998.
- [9] Bertsekas, Gallager, Data Networks, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987, 297-333.
- [10] Van Valkenburg, Fleming, Bluetooth SIG PAN Profile and BNEP protocol design considerations, Internet Draft, Juli 2001, work in progress.
- [11] Mc Daid, Bluetooth Mobility and Roaming, Bluetooth articles, www.palowireless.com.
- [12] Atwal, Akers, Transmission of IP Packets over Bluetooth Networks, Internet Draft, February 2001, work in progress.
- [13] Hansmann, Frank, Göppfarth, Müller, Transmission of native IPv6 over Bluetooth (6overBT), Internet Draft, Juli 2001, work in progress.
- [14] Lee, Su, Gerla, On-Demand Multicast Routing Protocol in Multihop Wireless Networks, UCLA, 2001.