

Funkstandardintegration in Mobilen Ad Hoc Netzwerken

Matthias Vodel, Mirko Caspar, and Wolfram Hardt

Technische Universität Chemnitz, Germany
{vodel,mica,hardt}@informatik.tu-chemnitz.de
<http://www.tu-chemnitz.de>

Zusammenfassung *Ein wichtiger Aspekt auf dem Gebiet der Selbstorganisation in mobilen Ad Hoc Netzwerken ist die möglichst effiziente Vernetzung aller Knoten einer hochdynamischen Netzwerktopologie. Diese sollte die Netzlast möglichst gleichmäßig auf alle Netzelemente verteilen. Gleichzeitig ist eine solche Struktur robust gegen Störungen und partielle Ausfälle. Bisherige Forschungsansätze beschränken ihre Lösungen auf den Einsatz in einer homogenen Topologie auf Basis eines einheitlichen Funkstandards. Diese Arbeit beschäftigt sich mit einem Ansatz für die funkstandardübergreifenden Kommunikation in mobilen Ad Hoc Netzwerken. Die Wahl des genutzten Funkstandards soll dabei für die jeweilige Anwendung nicht sichtbar sein. Für die hardwareseitige Protokollkonvertierung kommt ein spezieller Hardwareblock zum Einsatz. Ein solcher "Interface Block" verbindet inkompatible Schnittstellen einzelner Module und ermöglicht somit eine kostengünstige, funkstandardunabhängige Kommunikation auf Basis des TCP/IP Protokollstacks. Das Konzept bietet weiterhin die Möglichkeit, bereits vorhandene Endgeräte mit standardisierten Funkmodulen in ein bestehendes Netzwerk zu integrieren*

Key words: Selbstorganisation, mobile Ad Hoc Netzwerke, Ambient Networking, Funkstandardintegration, Routing, Cognitive Radio

1 Einführung

Aufgrund unterschiedlichster Einsatzbereiche von Funknetzwerken im industriellen und privaten Umfeld wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Funkstandards für den drahtlosen Informationsaustausch entwickelt. Diese haben für die jeweiligen Anwendungsszenarien optimierte Eigenschaften in Hinsicht auf Reichweite, Datendurchsatz, Energieverbrauch und genutztem Frequenzband [1]. Im Zuge des technologischen Fortschritts trat die Vernetzung mobiler Endgeräte auf Basis solcher Funkstandards immer stärker in den Vordergrund. In Folge der nun entstandenen hochdynamischen Netzstrukturen wurden Möglichkeiten für eine störungsfreie und effiziente Datenübertragung gesucht. Aufgrund der hohen Netzynamik konnten klassische Verfahren für die Topologieverwaltung und das Routing nur noch begrenzt zum Einsatz kommen [7].

Eine grundlegend neue Idee im technischen Umfeld stellt hierbei die Selbstorganisation [6] dar. Ähnlich biologischen Systemen können sich Netzwerkknoten

nun völlig selbständig, ohne zentrale Kontrollinstanz und nur auf Basis lokaler Netzwerkinformationen Ad Hoc organisieren. Neben einer dezentralen Struktur und der damit verbundenen Ausfallsicherheit haben solche mobile Ad Hoc Netzwerke (MANETs) viele wichtige Vorteile wie beispielsweise eine hohe Skalierbarkeit oder eine gleichmäßige Lastverteilung auf alle Netzelemente. Wesentliche Anforderungen sind hierbei eine möglichst hohe Konnektivität, ein minimaler Energieverbrauch aufgrund der begrenzten Ressourcen jedes Knoten sowie die Nutzung optimaler Verbindungspfade für die Datenübertragung.

Bisherige Forschungen im Bereich Topologieaufbau und Kommunikation in mobilen Ad Hoc Netzwerken reduzieren ihre Lösungsansätze auf den Einsatz eines einheitlichen Funkstandards. Eine funkstandardübergreifende Kommunikation über die Grenzen der homogenen Netzstruktur hinweg ist nicht möglich.

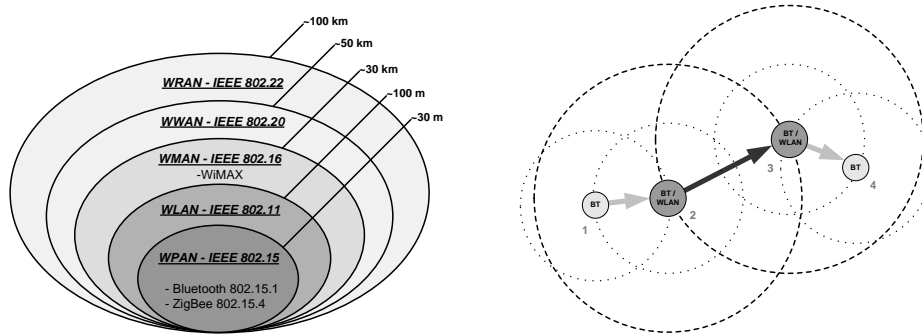


Abbildung 1. *links:* Unterschiedliche drahtlose Kommunikationsstandards nach IEEE 802.x mit optimierten Eigenschaften für die jeweiligen Anwendungsbereiche *rechts:* Kommunikation zweier Bluetooth Knoten mit Hilfe von zwei weiteren Multistandard-Knoten mit zusätzlicher WLAN Schnittstelle.

Einen möglichen Lösungsansatz für die Integration inkompatibler Funkstandards bietet diese Arbeit. Kapitel II gibt zunächst einen Überblick bisheriger Veröffentlichungen auf den Gebieten der Selbstorganisation und des Routings in mobilen Ad Hoc Netzwerken, Software Defined Radio (SDR) sowie der Schnittstellensynthese. Ein neuer Ansatz für die funkstandardübergreifende Kommunikation in MANETs wird in Abschnitt III vorgestellt. Zentrale Problembereiche sind hierbei die Selbstorganisation, die hardwareseitige Synthese inkompatibler Schnittstellen und das effiziente Routing in solch heterogenen Netztopologien. Auf aktuelle Ergebnisse wird in Abschnitt IV eingegangen. Abschließend wird die Arbeit in Abschnitt V zusammengefasst.

2 Stand der Forschung

Auf dem Gebiet der Selbstorganisation in MANETs existieren viele Ansätze für Optimierungen. Aufgrund des hohen Grades an Mobilität ist ein zentraler Aspekt

die Reduzierung des Energieverbrauchs, bspw. durch eine dynamische Anpassung der Sendeleistung in Abhängigkeit der aktuellen Netzstruktur [13]. Um die Energieaufnahme weiter zu verringern, wurden weitere Lösungsansätze auf der Ebene einer selektiven Vernetzung gefunden. Dabei nutzt jeder Knoten nicht mehr alle in seiner Umgebung erreichbaren Netzelemente für die Kommunikation, sondern beschränkt sich auf die gezielte Wahl bestimmter Kommunikationspartner aus dem Pool benachbarter Knoten. Wichtige Vertreter sind hierbei das LMST Verfahren (Local Minimum Spanning Tree [15]) oder das LINT-Verfahren (Local Information No Topologie [14]).

Einen Ansatz auf Basis evolutionärer Algorithmen bietet das EOSC-Verfahren (Evolutionary Optimization Selective Connectivity [4][5]), welches die Topologie beginnend von einer zufällig gewählten Ausgangssituation mittels Mutation und Selektion optimiert. Das Verfahren basiert auf der Grundlage der selektiven Vernetzung nach [11][12].

Aufbauend auf den optimierten Topologien können nun Daten zwischen beliebigen Knoten im Netzwerk übertragen werden. Für die effiziente paketorientierte Datenübermittlung kommen Routingalgorithmen zum Einsatz, welche die Pakete über einen möglichst optimalen Pfad zum Zielknoten leiten. Für den Einsatz in mobilen Ad Hoc Netzwerken kommen sowohl proaktive (z.B. "Optimized Link State Routing" - OLSR [8]) als auch reaktive Routingverfahren (z.B. "Ad-hoc On-demand Distance Vector" - AODV [9]) zum Einsatz. Auch hybride Algorithmen wie das "Zone Routing Protocol" (ZRP [10]) wurden entwickelt.

Eine Möglichkeit, verzögerungsfrei zwischen verschiedenen Funkstandards zu interagieren, beschreibt das Konzept von Software Defined Radio (SDR [17][18][19]). Hier wird ein Großteil der Signalverarbeitung durch Softwaremodule und programmierbare Digitalhardware realisiert. Somit können empfangene Daten in Echtzeit auf andere Protokolltypen konvertiert und weitergeleitet werden. Bestehende Systeme können durch den modularen Aufbau mit relativ wenig Aufwand um neue Standards erweitert werden. Die Möglichkeit, bereits existierende Hardware mit standardisierten Funkmodulen in eine auf SDR basierende Topologie zu integrieren, ist grundsätzlich gegeben. Aufgrund der benötigten Signalprozessoren und den eingesetzten Softwaremodulen ist eine sehr hohe Rechenleistung und ein großer Hardwareaufwand in den einzelnen Knoten nötig, was den Einsatz von SDR in mobilen Kleinstgeräten mit begrenzten Energieressourcen erschwert.

Eine weitere Möglichkeit für eine funkstandardübergreifende Kommunikation ist die Kopplung einzelner Funkmodule. Hierfür ist eine Synthese inkompatibler Schnittstellen notwendig [25][26]. Ein spezieller "Interface Block" (IFB [16]) analysiert hierfür eingehende Datenpakete und extrahiert die Nutzdaten. Anschließend werden diese Daten auf das gewünschte Protokoll adaptiert und entsprechend weitergeleitet (*Abbildung 2*). Aufgrund der IFB Makrostruktur ist eine modulare Erweiterbarkeit gewährleistet. Auf weitere Details wird in Abschnitt *III* eingegangen.

3 Konzept für eine Funkstandardübergreifende Kommunikation

Im folgenden Abschnitt wird ein Konzept vorgestellt, welches eine funkstandardübergreifende Kommunikation in mobilen Ad Hoc Netzwerken ermöglicht. Die entstandenen, heterogenen Netzwerktopologien können nun die Vorteile unterschiedlicher Funkstandards nutzen. Je nach Anforderung an den Verbindungskanal wählt jeder Knoten völlig autark das optimale Interface. Dabei kann das System an unterschiedliche Anforderungen und Einsatzbereiche adaptiert werden. Für den Nutzer auf Applikationsebene existiert in jedem Knoten nur eine logische Netzwerkschnittstelle. Komplexen Verwaltungsprozesse für die integrierten Funkmodule durch das Betriebssystem entfallen somit. Die Wahl der genutzten physischen Schnittstelle ist für den Nutzer und das Betriebssystem nicht sichtbar.

Durch die hardwareseitige Kopplung vorgefertigter Funkmodule können die konzeptionellen Nachteile aus dem Bereich "Software Defined Radio" umgangen werden. Eine energieeffiziente und vielseitig einsetzbare Möglichkeit der drahtlosen Kommunikation wird geschaffen.

3.1 Selbstorganisation / Netzwerkaufbau

Basis für jede Kommunikation ist ein mobiles Ad Hoc Netzwerk mit bidirektionalen Verbindungen zwischen einzelnen Elementen. Der Aufbau und die Pflege der Topologie soll mit Hilfe der Selbstorganisation dezentral und ohne zentrale Kontrollinstanzen erfolgen. Eine gängige und zutreffende Definition für den Begriff Selbstorganisation lautet [24]:

"Self-organisation is a dynamical and adaptive process where systems acquire and maintain structure themselves, without external control."

Das System muss also in der Lage sein, ohne manuelle Eingriffe seine Konfiguration entsprechend der Bedingungen seiner Umwelt dynamisch anzupassen. Die daraus folgende Netzstruktur muss den Anforderungen des Nutzers entsprechen und eine optimale Grundlage für die Kommunikation bieten. Dabei müssen spezifische Eigenschaften und Beschränkungen der jeweiligen Funktechnologien berücksichtigt werden. Die Bildung der Netzwerktopologie erfolgt auf Ebene des Medienzugriffs (OSI Layer 2) und ist für den Nutzer nicht sichtbar. Für die Erstellung und Optimierung der Topologien steht eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze zur Verfügung, die zum Teil bereits in *Abschnitt II* kurz vorgestellt wurden. Eine Klassifizierung auf dem Gebiet der Selbstorganisation in mobilen Ad Hoc Netzwerken ist unter [20] zu finden.

Für die verfügbaren Funkstandards muss eine Topologiekontrolle zur Verfügung gestellt werden, da jeweils unterschiedliche Verbindungsstrategien zum Einsatz kommen. Die anzuwendenden Algorithmen für die Verbindungskontrolle sind in einer "Link Controller Unit" (LCU - siehe Abbildung 2) hinterlegt. Mit Hilfe eines internen Verbindungs-Caches und der eingehenden Paketinformationen hat

die LCU Zugriff auf alle nötigen Informationen um in Abhängigkeit funktionaler Anforderungen an der den Kommunikationskanal intelligente Entscheidungen über die Wahl des zu nutzenden Interface zu treffen. Auf Änderungen in der Umwelt kann das System somit adaptiv reagieren. Die wesentliche Intelligenz für den Aufbau und die Pflege einer hinreichend effizienten Kommunikationsstruktur wird durch die LCU realisiert.

3.2 Protokollkonvertierung

Für die Umsetzung einer funkstandardunabhängigen Kommunikation sollen verfügbare, standardisierte Funkmodule auf einer hardwarenahen Schicht logisch verbunden werden. Das wesentliche Problem eines solchen Ansatzes stellt die Protokollkonvertierung dar. Die jeweiligen Protokollstacks sind komplex und werden teils in Hardware und teils in Software durch entsprechende Treiber realisiert.

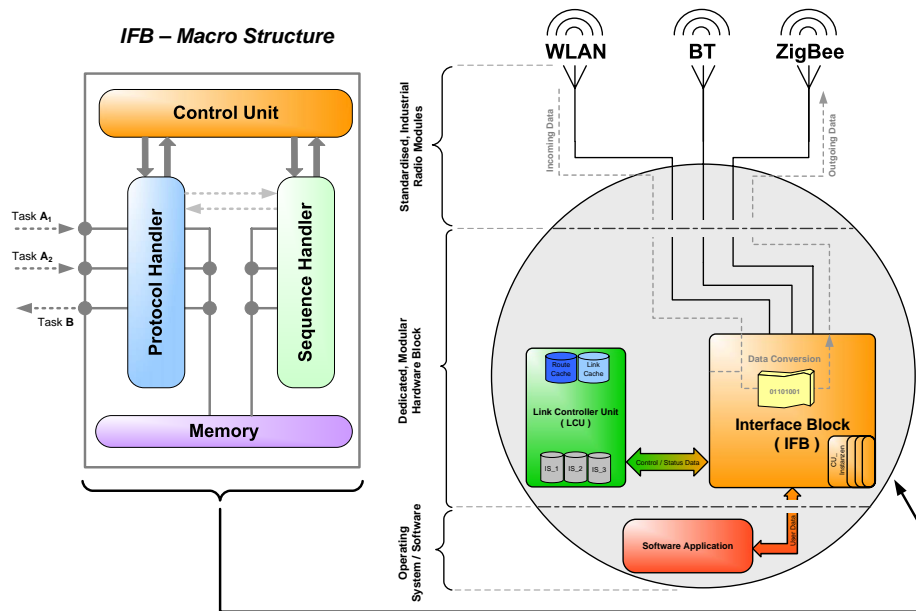


Abbildung 2. Beispielhafte Struktur eines Knotens für die funkstandardübergreifende Kommunikation. Hier abgebildet mit drei integrierten Funkstandards (Wireless LAN, Bluetooth und ZigBee). Der Aufbau und die Pflege der Topologie wird von der "Link Controller Unit" (LCU) übernommen. Softwareapplikationen kommunizieren mit der Umgebung ausschließlich über eine vordefinierte Schnittstelle des IFB's. Die IFB Makrostruktur mit den 3 zentralen Komponenten - Control Unit, Protocol Handler und Sequence Handler verbindet die inkompatiblen Funkstandards.

Es müssen nun Möglichkeiten gefunden werden, Funkmodule unterschiedlicher Standards auf einer Ebene zu kombinieren. Eine vielversprechende Möglich-

keit für die Synthese mehrerer inkompatibler Schnittstellen stellt der Einsatz eines Interface Blockes dar (siehe *Abschnitt II*). Ein solcher Hardwareblock stellt das Bindeglied der einzelnen Funkmodule dar und verfügt über eine Schnittstelle für die darüber liegende Softwareapplikation. Eingehende Datenpakete werden analysiert und entsprechend behandelt. Extrahierte Paketinformationen, welche für das Routing von Relevanz sind, werden in einer internen Routencache für die LCU bereitgestellt. Somit kann eine funkstandardübergreifende Kommunikation transparent (also nicht sichtbar) für die darüber liegenden Applikationen realisiert werden. Diese verwenden für die Kommunikation nur ein definiertes Interface, welches der IFB zur Verfügung stellt.

Durch die realisierte Interoperation mehrerer Funkstandards ist weiterhin eine Einbindung herkömmlicher Kommunikationsgeräte (Mobiltelefone, Laptops, etc.) mit standardisierten Funkadaptern in ein bestehendes Netzwerk möglich. Voraussetzung hierfür ist eine bereits vorhandene Netzwerktopologie mit hinreichend vielen Knoten, welche als funkstandardübergreifende Gateways fungieren können. Knoten in Reichweite, welche über die Möglichkeit verfügen, mehrere Funkstandards zu verbinden, ermöglichen dann bei Bedarf eine Kommunikation.

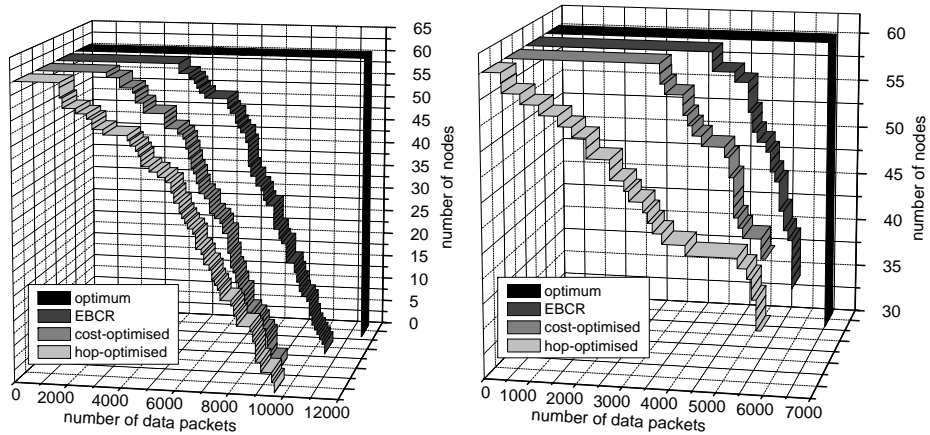
Abbildung 2 zeigt den funktionalen Aufbau eines solchen Knotens. Die Darstellung zeigt ein System mit drei verfügbaren Funkstandards. Das Konzept erlaubt eine modulare Erweiterung mit zusätzlichen Schnittstellen. Dabei können unterschiedliche Methoden auf dem Bereich der dynamischen Rekonfigurierung zum Einsatz kommen [21][22][23]. Die Anzahl der eingesetzten Module kann in jedem Knoten variabel gewählt werden. Je nach verfügbarer Hardware muss der IFB in der Lage sein, die Daten aller n angeschlossenen Module möglichst verzögerungsfrei zu konvertieren. Die benötigte Datentransferrate des Interface Blocks am Beispiel des dargestellten Knotens in *Abbildung 2* (R_{total} , Anzahl Funkmodule $n = 3$, Korrekturfaktor α) errechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 R_{BT} &= R_1 = 2.1 \text{ Mbit/s (Bluetooth 2.0+EDR)} \\
 R_{WLAN} &= R_2 = 54 \text{ Mbit/s (IEEE 802.11g)} \\
 R_{ZigBee} &= R_3 = 0.25 \text{ Mbit/s (IEEE 802.15.4)} \\
 R_{total} &= \left(\sum_{i=1}^3 R_i \right) + \alpha \\
 R_{total} &= 56.35 \text{ Mbit/s} + \alpha \\
 R_{IFB \text{ intern}} &\geq 56.35 \text{ Mbit/s}
 \end{aligned}$$

3.3 Routing / Forwarding

Für die Realisierung einer Multihop Kommunikation muss ein geeignetes Kommunikationsprotokoll zum Einsatz kommen. Durch die Verwendung des TCP/IP Protokollstacks stehen unterschiedlichste Ansätze zur Verfügung (siehe *Abschnitt II*), um einen effizienten Datentransfer mit geringen Latenzzeiten und einer geringen Anzahl Hops pro Pfad zu realisieren. Aufgrund der primären Anwendung

in mobilen Kleinstgeräten, welche über stark begrenzte Energieressourcen und meist geringe Rechenleistung verfügen, ist die Wahl des Routingverfahrens von großer Bedeutung. Um den Aufwand für die Speicherung und Verwaltung von Routinginformationen in den Endgeräten so gering wie möglich zu halten, wird ein reaktives Routing (siehe *Abschnitt II*) bevorzugt, welches erst zum Zeitpunkt der Verbindungsanfrage eine gültige und möglichst optimale Route zum Zielknoten findet. Dem konzeptionellen Nachteil höherer Latenzzeiten bei einem Verbindungsaufbau wird durch einen adaptiven Routencache entgegen gewirkt.



(a) Testreihe 1 - maximale Laufzeit einer zufälligen Topologie mit 60 Knoten. Die schwarze Linie im Hintergrund stellt das theoretische Optimum dar. Anteil Multistandard-Knoten (2 Funkmodule): 50%. Nachrichtengröße: 100 Datenpakete.
 (b) Testreihe 2 - statisches Multihop Punkt-zu-Punkt Szenario. Die schwarze Linie entspricht dem theoretischen Optimum. Topologie: zufällig Verteilung, 60 Knoten. Anteil Multistandard-Knoten (2 Funkmodule): 50%. Nachrichtengröße: 100 Datenpakete.

Abbildung 3. Testergebnisse des EBCR Ansatzes

Die Wahl des genutzten Verfahrens ist dabei von entscheidender Relevanz für eine ressourcensparende und verzögerungsfreie Kommunikation. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Konzeptes das "Energy Balanced Cooperative Routing" (EBCR [3]) entwickelt und umgesetzt, welches die Vorteile eines modernen, reaktiven Routingprotokolls für MANETs mit den ressourcensparenden Routingmethoden aus dem Bereich der drahtlosen Sensornetze vereint. EBCR berechnet auf der Basis funktionaler Verbindungsanforderungen, wie beispielsweise der benötigten Bandbreite oder maximaler Latenzzeiten, eine optimale Route zum Zielknoten. Die Entscheidungen werden somit auf Basis dynamischer Kostenvektoren getroffen. Lokale Knoteninformationen, wie beispielsweise die aktuell verfügbaren Energieressourcen, werden ebenfalls in die Berechnun-

gen einbezogen. Die evaluierten Anwendungsszenarien in [3] verdeutlichen die Vorteile von EBCR gegenüber klassischen Routingansätzen im Bereich mobiler Ad Hoc Netzwerke. Die in *Abbildung 3* dargestellten Diagramme vergleichen zum einen die Gesamtlaufzeit einer zufällig gewählten Topologie. Dabei wird das Netzwerk unter Verwendung des jeweiligen Routingverfahrens mit Nutzdaten geflutet bis alle Knoten die verfügbaren Energieressourcen verbraucht haben. Zum anderen wurden statische Testreihen durchgeführt, bei dem eine Übermittlung von Datenpaketen zwischen zwei fest definierten Knoten so lang wie nur möglich aufrecht erhalten werden sollte. Dabei waren zwei wesentliche Parameter von Bedeutung. Zum einen die Anzahl und die zeitliche Verteilung "gestorbener" Knoten während der Datenübermittlung sowie die Anzahl übertragender Datenpakete bis zum Zusammenbruch der letzten Multihop-Verbindung zwischen den Knoten aufgrund verbrauchter Energieressourcen.

4 Aktuelle Ergebnisse

Grundlage für die Testreihen des EBCR ist eine speziell entwickelte Simulationsumgebung, welche den vollen Funktionsumfang des Konzeptes nachbilden kann. Neben den Ergebnissen für das entworfene Routingkonzept wurde auf der Basis dieses Simulators auch die Effizienz des vorgestellten Konzeptes verifiziert [2]. Hierbei lag der Schwerpunkt auf der Verbesserung der Erreichbarkeit und auf der Steigerung der Kosteneffizienz gegenüber homogenen Netzstrukturen sowie alternativer Ansätze für die Funkstandardintegration (siehe SDR - *Abschnitt II*).

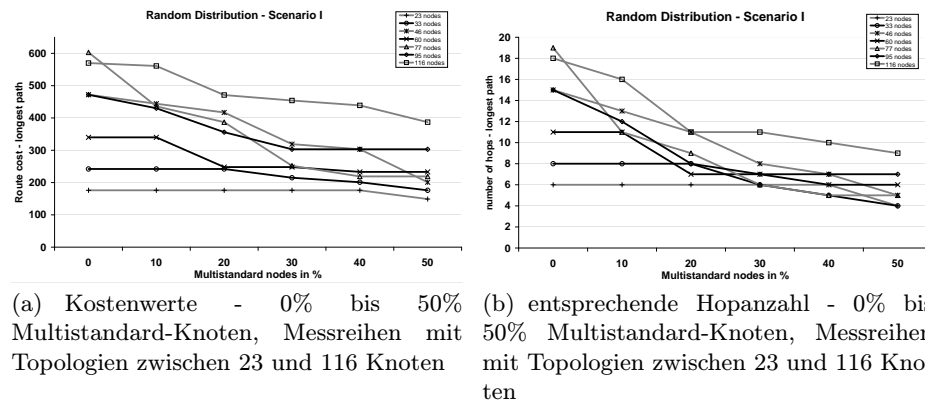


Abbildung 4. Effizienzanalyse des vorgestellten Ansatzes

Ausgangssituation waren sowohl zufällig als auch gleichförmig angeordnete Knotentopologien unterschiedlicher Größenordnungen mit ausschließlich einem verfügbaren Funkmodul. Anschließend wurde nun der prozentuale Anteil existierender Multistandard-Knoten in der Topologie sukzessiv erhöht. Die so modifi-

zierten Knoten verfügen nun über zwei dedizierte Funkmodule mit spezifischen Eigenschaften für die Nah- und Fernbereichskommunikation. Die Eigenschaften dieser Module wurden durch abstrakte Kostenwerte repräsentiert, wodurch jede mögliche Route durch entsprechende Kostenvektoren dargestellt werden konnte. Ziel war die Minimierung der Kommunikationskosten durch die intelligente Nutzung der verfügbaren Funktechnologien. Für das Routing kam der EBCR-Ansatz in einer vereinfachten Version zum Einsatz. Dabei wurden für diese Testreihen lokale Statusinformationen über den Ladestand der Knoten vernachlässigt. Die in *Abbildung 4* dargestellten Diagramme zeigen ausgewählte Ergebnisse für Testreihen mit zufälliger Knotenverteilung. Trotz zusätzlicher Kosten für die Protokollkonvertierung können die Gesamtkosten für die Kommunikation und die benötigte Anzahl Hops schon ab einer Einstreuung von 20% Multistandard-Knoten deutlich reduziert werden. Die Testergebnisse ergaben Verbesserungen von bis zu 35% und durchschnittlich 20% [2].

Im Rahmen des Projektes entstand ein erster Prototyp, welcher auf Basis dieses Konzeptes die Netzstrukturen von drei Funkstandards integriert (siehe *Abbildung 5*). Die Plattform realisiert somit ein Gateway für die funkstandardübergreifende Übertragung von Informationen mittels TCP/IP. Die Kompatibilität zu standardisierten Endgeräten ist ebenfalls gewährleistet und das System ermöglicht somit den Zugriff durch beliebige Applikationen.

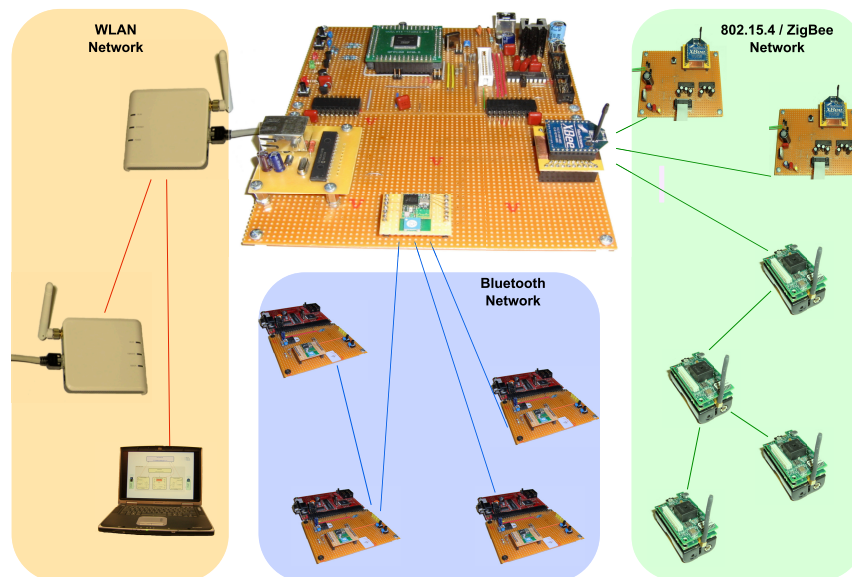


Abbildung 5. Realisierung eines ersten Prototyps mit drei Slots für die Funkstandards WLAN - IEEE 802.11b/g, Zigbee - IEEE 802.15.4, Bluetooth - IEEE 802.15.1

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Konzept eröffnet völlig neue Ansätze für eine energieeffiziente Kommunikation in hochdynamischen Netzwerktopologien. Es bietet eine kosteneffiziente Lösung für die Funkstandardintegration in zukünftigen heterogenen Netzstrukturen mit bereits verfügbaren Technologien. Ein Netzwerk ist nun nicht mehr von den Eigenschaften des verwendeten Funkstandards abhängig. Die Wahl des Verbindungskanals kann nun auf Basis der funktionalen Anforderungen für die Kommunikation getroffen werden. Die Nutzung der zur Verfügung stehenden Energieressourcen kann so signifikant verbessert werden.

Für den Einsatz in bereits vorhandenen Topologien wurde das entwickelte EBCR (*Abschnitt III*) vorgestellt, mit dessen Hilfe ein hocheffizientes und adaptives Routing in heterogenen Systemen ermöglicht wird. Erste Simulationen (*Abschnitt IV*) bestätigten die Vorteile von EBCR und des Konzeptes. Die theoretischen und simulierten Ergebnisse konnten mit Hilfe des realisierten Prototyps (*Abschnitt IV*) verifiziert werden.

Weiterführende Arbeiten untersuchen nun offene Detailpunkte, wie beispielsweise die Minimierung von Interferenzen auf dem Übertragungsmedium Luft mit den daraus folgenden Problemen auf der Medienzugriffsebene. Effiziente Konzepte für die einfache Erweiterbarkeit mit neuen Technologien werden analysiert und evaluiert. Ein weiterer Kernpunkt weiterführender Arbeiten beschäftigt sich mit "Self-X" Eigenschaften des Konzeptes, speziell mit der LCU, mit deren Hilfe eine hinreichend stabile und adaptive Topologieverwaltung bereitgestellt werden muss.

Literatur

1. T. Cooklev. *Wireless Communication Standards - A Study of IEEE 802.11., 802.15., and 802.16.*. ISBN 0-7381-4066-X, IEEE Press, New York, USA, 2004.
2. M. Vodel, M. Caspar, W. Hardt. *Performance Analysis of Radio Standard Spanning Communication in Mobile Ad Hoc Networks*. Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), Sydney, Australia, October 2007.
3. M. Vodel, M. Caspar, W. Hardt. *Energy-Balanced Cooperative Routing Approach for Radio Standard Spanning Mobile Ad Hoc Networks*. Proceedings of the 6th International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS), Brasilia, Brazil, December 2007.
4. M. Borschbach, M. Vodel, Wolfram-M. Lippe. *Evolutionary Optimized Ad Hoc Connectivity*. In Proc. of IASTED Int. Conf. on Communication and Computer Networks CCN 2006, ISBN 0-88986-630-9, Lima, Peru, 2006.
5. M. Borschbach, M. Vodel. *An Evolutionary Solution for Cross Layer Ad Hoc Connectivity Selection*. In Proc. of ACM & IEEE Fifth Annual Communications Networks and Services Research Conference CNSR 2007, pp. 381-388, 2007.
6. H. V. Foerster. *On self-organizing systems and their environments, in Self-Organizing Systems*, M.C.Yovitts, S.Cameron, Eds. Pergamon Press, pp.31-50, 1960.
7. E.M. Royer, C.-K. Toh. *A review of current routing protocols for ad hoc mobile wirelessnetworks*. Personal Communications, IEEE, Vol. 6(2), pp. 46-55, April 1999.

8. T. Clausen, P. Jacquet, A., Laouiti, P. Muhlethaler, a. Qayyum et L. Viennot. *Optimized Link State Routing Protocol* IEEE INMIC . Pakistan, 2001.
9. Ian D. Chakeres and Elizabeth M. Belding-Royer. *AODV Routing Protocol Implementation Design*. Proceedings of the International Workshop on Wireless Ad Hoc Networking (WWAN), Tokyo, Japan, March 2004.
10. Zygmunt J. Haas, Marc R. Pearlman. *The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks*. INTERNET-DRAFT, IETF MANET Working Group, Nov. 1997.
11. M. Borschbach, A. Stolze, W. Lippe. *Optimized connectivity for ad hoc networks*. In Proc. of the second IASTED Int. Conf. on Wireless and Optical Communications (WOC), pages 681-688, 2002.
12. M. Borschbach. *A new approach for modelling local selective connectivity and maintaining isolated regions in ad hoc networks*. Int. J. of Wireless and Optical Communication (IJWOC), 3(1):23-48, 2006.
13. C. Toh. *Topology Control in Wireless Sensor Networks*. J. Wiley & Sons, 2005.
14. R. Ramanathan, R. Rosales-Hain. *Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment*. In Proc. of the nineteenth Int. Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), pages 404-413, 2002.
15. N. Li, J. Hou, L. Sha. *Design and analysis of an mstbased topology control algorithm*. Int. J. of INFOCOM, 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 3:1702-1712, 2003.
16. S. Ihmor. *Modeling and Automated Synthesis of Reconfigurable Interfaces*. Dissertation, Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Entwurf Paralleler Systeme, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 205, January 2006.
17. M. N. O. Sadiku, C. M. Akujuobi. *Software-defined radio: a brief overview*. IEEE Potentials Magazine, pages 14-15, October - November 2004.
18. J. Mitola II, Z. Zvonar. *Software Radio Technologies*. New York: IEEE Press, 2001.
19. J. Mitola II. *Software Radio Architecture: Object-oriented Approaches to Wireless System*. New York: John Wiley & Sons, 2000.
20. F. Dressler. *Self-Organization in Ad Hoc Networks: Overview and Classification*. University of Erlangen, Dept. of Computer Science 7, Technical Report, Feb. 2006.
21. A. Meisel, M. Visarius, W. Hardt, S. Ihmor. *Self-Reconfiguration of Communication Interfaces*. In Proceedings of the 15th IEEE International Workshop on Rapid System Prototyping, page 144-150, IEEE Computer Society, ISBN: 0-7695-2159-2, Geneva, Switzerland, June 2004.
22. S. Ihmor, M. Flade, W. Hardt. *Rekonfigurierbare Schnittstellen - volume 1 of Wissenschaftliche Schriftenreihe: Eingebettete, selbstorganisierende Systeme*. ISBN: 3-398863-37-4, TUDpress, Dresden, Germany, November 2005.
23. S. Ihmor, W. Hardt. *Runtime Reconfigurable Interfaces - The RTR-IFB Approach*. In Proceedings of the 11th Reconfigurable Architectures Workshop (RAW'04) , IEEE Computer Society, Santa Fe, USA, April 2004.
24. T. D. Wolf, T. Holvoet. *Emergence Versus Self-Organisation: Different Concepts but Promising When Combined*. S. Brueckner et al. (Eds.): ESOA 2004, pp. 1-15, 2005.
25. W. Hardt, Stefan Ihmor. *Schnittstellensynthese - volume 2 of Wissenschaftliche Schriftenreihe: Eingebettete, selbstorganisierende Systeme*. ISBN: 3-398863-63-3, TUDpress, Dresden, Germany, July 2006.
26. W. Hardt, T. Lehmann, M. Visarius. *Towards a Design Methodology Capturing Interface Synthesis*. In Monjau, Dieter, editor, 4. GI/ITG/GMM Workshop: Methoden und Beschreibungssprachen zur Modellierung und Verifikation von Schaltungen und Systemen, volume 1, page 93-97, ISBN: 3-00-007439-2, Meißen, Germany, February 2001.