

A MAC PROTOCOL FOR FULL  
EXPLOITATION OF DIRECTIONAL  
ANTENNAS IN AD-HOC WIRELESS  
NETWORKS

AD HOC NETWORK SEMINAR

VON

DOMINIK ERB

BASIEREND AUF EINER ARBEIT VON THANASIS KORAKIS, GENTIAN

JAKLLARI UND LEANDROS TASSIULAS



RECHNERNETZE UND TELEMATIK  
INSTITUT FÜR INFORMATIK  
UNIVERSITÄT FREIBURG

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   | <b>2</b>  |
| 1.1      | Motivation . . . . .  | 2         |
| 1.2      | MAC . . . . .   | 3         |
| 1.3      | CSMA/CA . . . . .   | 3         |
| 1.4      | RTS/CTS . . . . .   | 3         |
| 1.5      | NAV . . . . .   | 4         |
| 1.6      | Der IEEE 802.11 Standard . . . . .                                  | 4         |
| <b>2</b> | <b>Direktionale Übertragungen und Antennen in AD-hoc Netzwerken</b> | <b>4</b>  |
| 2.1      | Vorteile einer direktionalen Übertragung . . . . .                  | 5         |
| 2.2      | Probleme von gerichteten Übertragungen . . . . .                    | 5         |
| 2.2.1    | Hidden Terminal Problem . . . . .                                   | 6         |
| 2.2.2    | Taubheit (Deafness) . . . . .                                       | 6         |
| 2.2.3    | Positionsbestimmung der Nachbarn . . . . .                          | 6         |
| <b>3</b> | <b>Das vorgestellte Protokoll</b>                                   | <b>7</b>  |
| 3.1      | Zyklisches direktionales RTS bzw. CTS . . . . .                     | 7         |
| 3.2      | Die Position der Nachbarn . . . . .                                 | 8         |
| 3.2.1    | Die Location Table . . . . .  | 9         |
| 3.2.2    | Direktionales NAV (D-NAV) . . . . .                                 | 9         |
| 3.3      | Simulation . . . . .  | 10        |
| <b>4</b> | <b>Conclusion</b>   | <b>10</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>   | <b>11</b> |
|          | <b>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis</b>                          | <b>12</b> |

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit, welche auf einem Paper von Thanasis Korakis, Gentian Jakllari und Leandros Tassiulas basiert [6], wird ein neues MAC Protokoll speziell für direktionale Antennen in Ad-Hoc Netzwerken vorgestellt. Dieses Protokoll, welches zu Teilen auf dem IEEE 802.11 Standard basiert, versucht hierbei mit neuen Ansätzen und Prinzipien direktionale Übertragungen zu optimieren und so alle Vorteile, welche diese Übertragungsart für Ad-Hoc Netzwerke bietet, auszunutzen. So kann mit Hilfe dieses MAC Protokolls nicht nur die Reichweite drastisch gesteigert werden, sondern durch gleichzeitige Übertragungen die Netzwerkkapazität insgesamt gesteigert werden. Hierfür nutzt es neue Ansätze wie die zyklische Übertragung von RTS Paketen und versucht die bei direktionalen Übertragungen auftretenden Probleme wie die Lokalisierung von Nachbarn oder das Hidden-Terminal-Problem zu lösen. Aufgrund dieser neuen Ansätze benötigt das Protokoll keinerlei Informationen über die Position von Nachbarn, schützt bereits bestehende Übertragungen und kann so bei Tests gegenüber anderen direktionalen und omnidirektionalen MAC Protokollen den Durchsatz erheblich steigern. Diese vielen Vorteile zusammen mit der Möglichkeit einer einfachen Implementierung machen das MAC Protokoll zu einer guten Alternative zu vorhandenen Standards.

## 1 Einleitung

Schnurlose Ad-Hoc Netzwerke gewinnen derzeit in vielen Bereichen immer mehr an Bedeutung. Dies betrifft hierbei nicht nur gewerbliche und militärische Anwendungsgebiete, sondern gerade auch Umgebungen, wo ein Client - Server basierendes Infrastrukturnetzwerk preislich nicht erschwinglich oder ganz unmöglich ist. Je nach Anforderung hat der Anwender bei solchen AD-Hoc Netzwerken verschiedene Möglichkeiten. So sind sowohl AD-Hoc Netzwerke mit omnidirektionalen Antennen als auch Netzwerke mit direktionalen Antennen möglich. Omnidirektionale Antennen stellen hierbei den derzeitigen Standard dar [7], wodurch Entwickler meist MAC-Protokolle auf diesen omnidirektionalen Übertragungsmodus anpassen und so die vielen Vorteile, welche direktionale Übertragungen bieten unberücksichtigt lassen. In dieser Arbeit, welche auf einem Paper von Thanasis Korakis, Gentian Jakllari und Leandros Tassiulas basiert [6], möchte ich ein MAC-Protokoll vorstellen, welches gerade diese vielen Vorteile zu nutzen versucht.

### 1.1 Motivation

Der große Unterschied zwischen einer omnidirektionalen und einer direktionalen Übertragung liegt vor allem darin, dass bei der direktionalen Übertragung die Antenne ein Signal lediglich in eine bestimmte Richtung und nicht wie bei einer omnidirektionalen Übertragung in alle Richtungen versendet.

Durch diese gerichtete Übertragung kann hierbei wie in Abbildung 1 zu sehen, nicht nur die Reichweite erheblich vergrößert, sondern durch das Begünstigen von gleichzeitigen störungsfreien Übertragungen die Netzwerkkapazität allgemein gesteigert werden. Bevor ich aber nun auf die verschiedenen Vorteile als auch Probleme gerichteter Übertragungen genauer eingehe, möchte ich zunächst einmal einige Begriffe und einen derzeitigen Standard (IEEE 802.11) genauer erläutern.

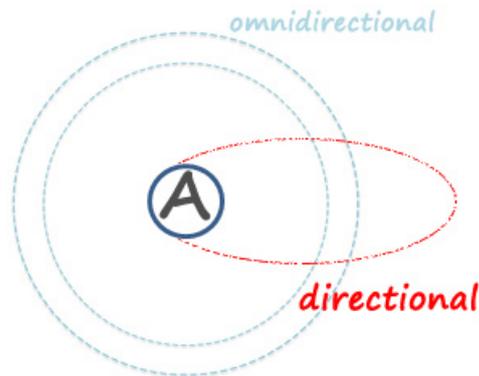


Abbildung 1: Omnidirektional und direktional im Vergleich

## 1.2 MAC

**Medium Access Control** oder auch teilweise **Media Access Control** ist neben der **Logical Link Control (LLC)** eine von der **IEEE** entworfene Erweiterung der zweiten Schicht des **Osi Modells**, der so genannten **Sicherungsschicht** [1]. Sie stellt hierbei **Adressierungs- und Übertragungskontrollmechanismen** zur Verfügung, die den gemeinsamen Zugriff mehrerer **Netzwerknodes** auf ein **physikalisches Übertragungsmedium** regeln. Benötigt wird dies, weil ein gemeinsames Medium nicht von mehreren **Nodes** gleichzeitig ohne **Datenkollisionen** verwendet werden kann und es somit zu **Kommunikationsstörungen** kommt. Je nach Umsetzung der **MAC** kann hierbei der Zugriff kontrolliert oder konkurrierend (**CSMA/CA**) stattfinden. Der Unterschied besteht vor allem darin, dass bei einem kontrollierten Zugriff bereits vom Protokoll selbst **Kollisionen** verhindert werden, während bei einem konkurrierenden Zugriff dies durch zusätzliche Regeln wie **RTS/CTS** geregelt werden muss.

## 1.3 CSMA/CA

**Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance** bezeichnet ein Prinzip zur **Kollisionsvermeidung** bei dem gleichzeitig mehrere **Nodes** auf den selben Übertragungskanal zugreifen. Möchte nun ein Teilnehmer Daten nach **CSMA/CA** versenden, hört dieser für eine gewisse Zeit ob der Übertragungskanal frei ist. Nach Ablauf dieser als **DFTS** bezeichneten Zeit beginnt der **Node** die **Datenübertragung (Data)** an den Empfänger. Hat der Empfänger das Paket vollständig erhalten, übermittelt dieser ein **Bestätigungspaket (Ack)** an den **Sender** und die **Datenübertragung** ist abgeschlossen. Beide Pakete enthalten hierbei auch Informationen über die Dauer der Übertragung.

## 1.4 RTS/CTS

**Ready to Send / Clear to Send** ist ein für drahtlose Netzwerke optionaler Mechanismus um **Kollisionen** noch besser zu vermeiden [5]. Hierbei übermittelt ein

Sender vor jeder Übertragung ein RTS Paket, in dem er für alle Netzwerknodes angibt, wie lange er den Kanal belegen möchte. Der Empfänger übermittelt daraufhin ein CTS Paket, in dem die Belegungsdauer noch einmal angegeben ist und so alle anderen Nodes von der anstehenden Übertragung erfahren. Zusammen mit CSMA/CA ergibt sich somit ein "4 Teiliger Handschlag"(RTS-CTS-Data-Ack) welcher zur Kollisionsvermeidung genutzt wird. Dieses Verfahren eignet sich besonders um das Hidden Terminal Problem teilweise zu lösen, welches in 2.2.1 genauer beschrieben wird.

## 1.5 NAV

Der Network Allocation Vector ist ein Vektor in dem jeder Netzwerknode die Dauer einer anstehenden Übertragung speichert. Nur bei einem NAV von Null, wie er auch bei der Initialisierung des Netzwerks ist, kann ein Node eine neue Übertragung starten. Versendet nun ein Node ein RTS, CTS, Data bzw. Ack Paket, so speichern alle anderen nicht an der Datenübertragung beteiligten Nodes die in diesen Paketen enthaltene Information über die Dauer der Übertragung in ihrem NAV und starten einen Countdown. Bis ein neuer NAV-Wert von Null erreicht und somit eine Übertragung möglich ist, warten nun diese Nodes lediglich auf neue Informationen über die Dauer der Übertragung und Updaten ihr NAV entsprechend

## 1.6 Der IEEE 802.11 Standard

Der IEEE 802.11 Standard bezeichnet eine von der IEEE in der ersten Version im Jahre 1997 herausgegebene Norm für die Kommunikation in Funknetzwerken[7],[5]. Die Kommunikation zwischen Nodes kann hierbei sowohl im AD-Hoc, als auch im Infrastrukturmodus erfolgen. Ausgelegt ist der 802.11 Standard hierbei auf omnidirektionale Übertragungen und der Medienzugriff erfolgt konkurrierend mit CSMA/CA und optionalem RTS/CTS. Seit 1997 gibt es zahlreiche Erweiterungen wie 802.11a-802.11n (802.11g ist derzeit am weitesten verbreitet) um z.B. die Reichweite oder Übertragungsleistung zu erhöhen.

## 2 Direktionale Übertragungen und Antennen in AD-hoc Netzwerken

Für eine direktionale Übertragung benötigt man zunächst einmal eine direktionale Antenne. Diese besteht im Gegensatz zu den in omnidirektionalen Übertragungen verwendeten Antennen aus einem kompletten Array von Antennen, dem so genannten „Array of Elements“. Je mehr Elemente nun eine direktionale Antenne besitzt umso stärker wird ein Signal in eine bestimmte Richtung. Typischerweise gibt es Antennen mit einem (omnidirektional), 2, 4, 8, 16, usw. Elementen.

Für das vorgestellte Protokoll ist es hierbei lediglich wichtig, dass mit den Antennen der komplette Bereich um einen Sender abgedeckt wird, jede Antenne immer für einen bestimmten Bereich zuständig ist und bei überlappenden Bereichen immer die Antenne mit dem stärksten Signal verwendet wird. Für eine Übertragung in einen bestimmten Bereich wird nun das Signal von einer

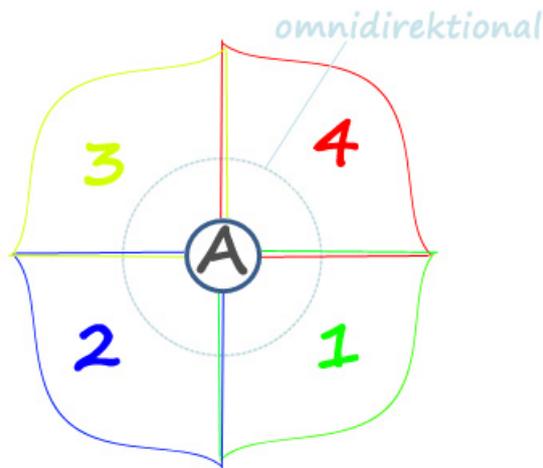


Abbildung 2: directionale Antenne mit 4 Elementen

bestimmten Antenne versendet, während ein Empfänger auf die Datenübertragung wartet.

## 2.1 Vorteile einer directionalen Übertragung

Trotz allem benötigt der Einsatz von directionalen Antennen neue Ansätze im Bereich eines MAC Protokolls um die Vorteile von directionalen Übertragungen ausschöpfen zu können. Einer der beiden größten Vorteile einer directionalen Übertragung ist die Reichweitenvergrößerung. So kann gegenüber einer herkömmlichen omnidirectionalen Übertragung die Reichweite durch das Ausrichten in eine bestimmte Richtung oder einer höheren Anzahl an Arrayelementen drastisch gesteigert und so auch teilweise die Sendeleistung vergrößert werden. Auch ist es möglich, dass Nachbarn so plötzlich Daten empfangen, bei denen vorher überhaupt keine direkte Kommunikation möglich war. Der andere große Vorteil liegt in der räumlichen Wiederverwendbarkeit. So können im Vergleich zu einer omnidirectionalen Übertragung, wie in Abbildung 3 zu sehen, mehrere kollisionsfreie Übertragungen gleichzeitig stattfinden.

Diese beiden großen Vorteile führen dann schlussendlich dazu, dass nicht nur die Übertragungsgeschwindigkeit bei einzelnen Übertragungen, sondern auch die Netzwerkkapazität insgesamt gesteigert werden kann

## 2.2 Probleme von gerichteten Übertragungen

Auf der anderen Seite müssen einige schwerwiegende Probleme die speziell bei directionalen Übertragungen auftreten bei der Planung eines neuen MAC Protokolls berücksichtigt werden.

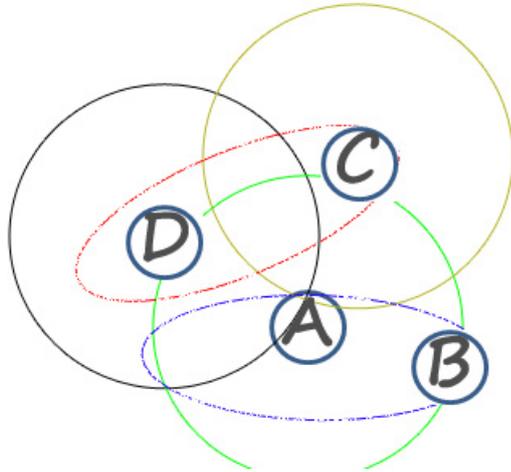


Abbildung 3: Mehrere kollisionfreie Übertragungen im Vergleich

### 2.2.1 Hidden Terminal Problem

Eines der größten dieser Probleme stellt das Hidden Terminal Problem dar [4]. Das typische Ausgangsproblem ist hierbei wie in Abbildung 4 zu sehen, dass ein Node außerhalb der Reichweite des sendenden Nodes liegt und somit nichts von einer anstehenden Übertragung erfährt. Dieses Problem kann sowohl bei directionalen, als auch bei omnidirektionalen Übertragungen auftreten, wird aber durch die gerichteten Übertragungen noch weiter verstärkt. Sendet so z.B. wie unten dargestellt A lediglich ein directionales RTS an B, so erfährt C nichts von der anstehenden Übertragung und stellt somit einen versteckten Node für A dar. Da C zusätzlich außerhalb der Reichweite von B liegt, erfährt es auch nichts von dessen directionalen CTS. Dies kann dazu führen, dass zusätzlich auch C zu senden beginnt und keine von beiden Nachrichten korrekt empfangen werden kann.

### 2.2.2 Taubheit (Deafness)

Das Problem der Taubheit, welches genauer in [2] erläutert wird, tritt immer dann auf, wenn ein Teilnehmer eine Übertragung beginnen möchte und der Empfänger die Übertragung überhört, weil dieser z.B. gerade Daten von einem anderen Nodes empfängt. So kann es sein, dass wie in der Abbildung 5 zu sehen, C Daten an A senden möchte, dieser aber gerade Daten von B directionale empfängt und so nichts von der anstehenden Übertragung erfährt. Dies kann gerade dann zu einem schwerwiegenden Problem werden, wenn B mehrere Pakete an A senden möchte und C immer wieder versucht die eigenen Daten an A zu übermitteln

### 2.2.3 Positionsbestimmung der Nachbarn

Dieses letzte große Problem entsteht rein aus der Tatsache, dass bei directionalen Übertragungen ein Signal nicht in alle Richtungen gleichzeitig, sondern

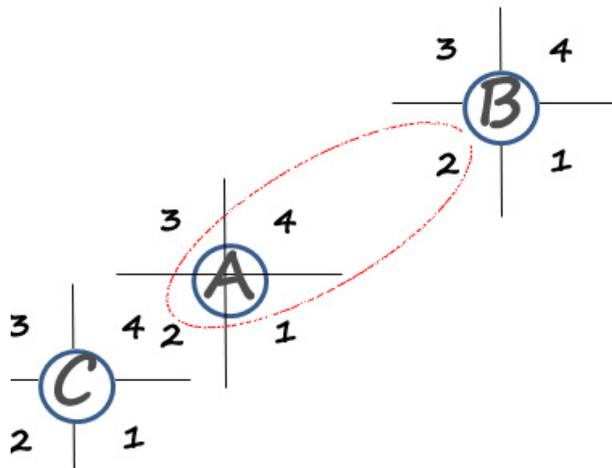


Abbildung 4: Beispiel mit 4 Arrayelementen

in eine Richtung gerichtet ist. Für erfolgreiche Übertragungen muss somit jeder Node wissen, mit welchem Antennenelement es einen bestimmten Nachbarn erreichen bzw. von diesem Daten empfangen kann.

### 3 Das vorgestellte Protokoll

Neben dem nachfolgend vorgestellten Protokoll gibt es auch weitere Protokolle wie z.B. D-MAC [3] oder verschiedene Ansätze wie in [9] genauer beschrieben, die für direktionale Übertragungen ausgelegt sind oder diese zusätzlich unterstützen. Die meisten dieser Protokolle besitzen allerdings den Nachteil, dass sie neben direktionalen Datenübertragungen z.B. RTS/CTS omnidirektional [8] übermitteln und so große Vorteile einer direktionalen Übertragung wie die erweiterte Reichweite nicht nutzen können. Um diese nicht gewünschten Nachteile zu vermeiden, muss ein Protokoll somit folgende Prinzipien befolgen:

1. es dürfen nur direktionale Übertragungen stattfinden
2. Nachbarn müssen über anstehende Übertragungen informiert werden
3. Nachrichten dürfen nicht überhört werden
4. die Position aller Nachbarn muss immer bekannt sein

Nachfolgend werde ich nun genauer auf das vorgestellte Protokoll, welches alle diese Prinzipien befolgt eingehen. Es basiert hierbei auf dem IEEE 802.11 Protokoll, nutzt aber lediglich direktionale Übertragungen. Außerdem informiert es seine Nachbarn über anstehende Übertragungen und verwaltet deren Positionen auf einfache Weise.

#### 3.1 Zyklisches direktionales RTS bzw. CTS

Wie der IEEE 802.11 Standard nutzt auch das vorgestellte Protokoll RTS/CTS um Kollisionen zu vermeiden und so das Hidden Terminal Problem zu verklei-

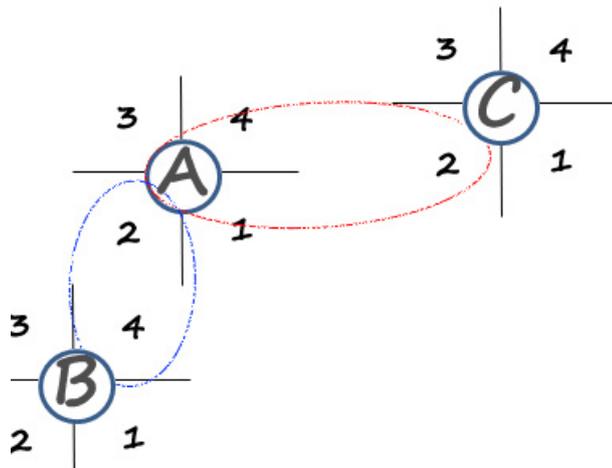


Abbildung 5: Beispiel für Taubheit

nern. Hiefür nutzt es ein Schema, dass sowohl alle Nachbarn informiert als auch die oben beschriebenen Prinzipien beachtet. Bei diesem Schema, wird das RTS Signal nacheinander von allen Elementen des Arrays in zyklischer Reihenfolge direktional übermittelt während alle anderen Nodes omnidirektional auf Übertragungen warten. Bei 4 Elementen würde somit ein Node nacheinander von 1 bis 4 in alle Richtungen ein RTS Paket übermitteln in dem wie auch später bei einem CTS, Data bzw. Ack Paket unter anderem die Dauer des beabsichtigten „4 teiligen Handschlags“ und die Antenne mit der das Paket versendet wurde angegeben ist und danach omnidirektional auf eine Antwort warten. Alle anderen Nodes empfangen omnidirektional das übermittelte RTS Paket und entscheiden dann nach einem später angegebenen Algorithmus, ob die anstehende Übertragung eigene Übertragungen beeinflusst und sie somit diese Übertragungen verschieben müssen, sie selbst der Empfänger sind und nach Beendigung des RTS Signals ein CTS Signal übermitteln oder nicht von der anstehenden Übertragung beeinflusst werden. Antwortet nun der Empfänger der Nachricht innerhalb einer vorgegebenen Zeit mit einem direktionalen CTS Paket, so beginnt der Sender mit der direktionalen Übertragung des „Data“ und „Ack“ Pakets. Wichtig ist hierbei, dass mit Hilfe der zyklischen Übertragung des RTS Pakets sowohl Sender als auch Empfänger nichts über die gegenseitigen Positionen wissen müssen, da das zyklische RTS alle Nodes im Umkreis erreicht. Außerdem erfährt der Empfänger mit welcher Antenne der Sender ihn erreicht und kann sein CTS mit der entsprechenden Antenne in die gleiche Richtung zurücksenden.

### 3.2 Die Position der Nachbarn

Die Schwierigkeit bei direktionalen Übertragungen liegt gerade in der Positionsbestimmung. Mit Hilfe des zyklischen RTS und des direktionalen CTS erfahren nun aber alle Nachbarn die Position des sendenden Nodes, und der Sender zusätzlich die Position des Empfängers. Nach der Übertragung wissen somit sowohl Sender als auch Empfänger die entsprechende Antenne mit der sie erreicht wurden, die Antenne mit der ein Sender ein Paket übermittelt hat und somit ge-

nau die Position des entsprechenden Nachbarn. Die so erhaltenen Informationen speichert nun jeder Node in einer sogenannten „Location Table“

### 3.2.1 Die Location Table

Mit Hilfe der „Location Table“ verwaltet jeder Node eine Tabelle, mit einem Eintrag pro Nachbar mit dem je kommuniziert wurde. Diese zu Beginn leere Tabelle wird nun bei jeder empfangenen Information aktualisiert um so immer die aktuelle Position eines bestimmten Nachbarn zu kennen. Jeder Eintrag besteht hierbei aus den folgenden Informationen:

- dem Node selbst
- dem Nachbarn von dem ein Node ein Paket empfangen hat
- die Antenne mit welcher die Information empfangen wurde
- die Antenne mit welcher der Nachbar das Paket versendete

Auf diese Weise verwaltet jeder Node Antennenpaare, wie in Tabelle 1 dargestellt, die zu bestimmten direktionalen Übertragungen gehören.

| Ich selbst | Nachbar | Meine Antenne | Antenne des Nachbarn |
|------------|---------|---------------|----------------------|
| A          | B       | 4             | 2                    |
| A          | C       | 2             | 4                    |

Tabelle 1: *Location Table* von Node A aus Abbildung 4

### 3.2.2 Direktionales NAV (D-NAV)

Das letzte Problem liegt nun in der Entscheidung der verschiedenen Nodes, ob eine eigene Übertragung eine andere Übertragung stören könnte. Um nun dieses Problem zu lösen, verwendet das Protokoll eine abgewandelte Version des in Kapitel 1.5 vorgestellten NAVs angewandt auf direktionale Übertragungen. So übermittelt ein Node, wie bereits in Kapitel 3.1 erläutert, vor jeder Übertragung ein zyklisches RTS Paket um alle Nachbarn von der anstehenden Übertragung zu informieren. Dieses Paket enthält sowohl Informationen über die Länge der anstehenden Übertragung, als auch die vom Sender verwendete Antenne, wodurch alle anderen Nodes Übertragungen in dessen Richtung für die angegebene Zeit aufschieben können. Damit Kollisionen nun aber nicht nur beim Sender, sondern auch beim Empfänger eines Pakets verhindert werden, müssen die übermittelten Informationen erweitert werden. Hierfür kommt die Location Table ins Spiel. Sendet nun z.B. A ein Paket an B, so wird er nicht nur die Übertragungsdauer und seine eigene Antenne, sondern zusätzlich, falls bekannt, bei jedem Paket den Empfänger und die entsprechende Antenne mit der dieser Pakete von A empfängt übermitteln. Somit würde bei einer anstehenden Übertragung von A an B und der in Tabelle 1 angegebenen Location Table A ein RTS Paket welches neben der Dauer zusätzlich die Informationen **A,B,4,2** enthält übermitteln. Auf diese Weise kann nun gewährleistet werden, dass alle Nachbarn über die anstehende Übertragung informiert werden, alle Übertragungen in die entsprechenden Richtungen verschieben und so keine Kollisionen auftreten.

Bsp.: Bei einer anstehenden Übertragung zwischen C und B aus Abbildung 4 und bekannter Location Table würde somit C ein zyklisches RTS mit den Informationen C,B,4,2 übermitteln. A würde nun mit Hilfe seiner Location Table feststellen, dass es bei Übertragungen mit Antenne 4 B und mit Antenne 2 C stören würde (vgl. Tabelle 1) und somit alle anfallenden Übertragungen in diese beiden Richtungen für die im RTS Paket angegebene Zeit verschieben.

Einige letzte Details die hierbei bei der Implementierung helfen können, werden in Paper [6] Kapitel 4.4 dargestellt. Nach dieser letzten Hürde kann nun das vorgestellte MAC Protokoll umgesetzt und mit anderen omnidirektionalen und direktionalen Protokollen verglichen werden.

### 3.3 Simulation

Hierfür wurden in [6] verschiedene Szenarien auf Grundlage einer Event Driven Simulation getestet. So wurde es unter anderem mit D-MAC [3], einem Protokoll welches direktionale RTS / CTS Übertragungen nutzt verglichen. Betrachtet man nun noch einmal das in Abbildung 4 dargestellte Beispiel und geht zusätzlich davon aus, dass gleichzeitig A zu B und C zu A übertragen möchte. In dem so entstandenen Szenario wird es also je nach Protokoll zwangsläufig zu Überlagerungen der Signale bei A kommen. Die Ergebnisse bei Anwendung auf beide Protokolle werden in Tabelle 2 dargestellt. Dieses Ergebnis macht hierbei nicht nur deutlich, dass bei hoher Last das vorgestellte Protokoll einen fast doppelt so hohen Durchsatz besitzt, sondern zusätzlich noch das im Gegensatz zum vorgestellten MAC Protokoll Node A bei D-Mac gegenüber Node B bevorzugt wird.

| Durchsatz (%) bei hoher Last | D-MAC        | vorgestellte Protokoll |
|------------------------------|--------------|------------------------|
| Node A                       | 33,34        | 40,21                  |
| Node C                       | 15,57        | 39,89                  |
| <b>Gesamt</b>                | <b>48,91</b> | <b>80,1</b>            |

Tabelle 2: Testergebnisse zu Abbildung 4, bei mehreren gleichzeitigen Übertragungen

## 4 Conclusion

In dieser Arbeit wurde ein neues MAC Protokoll speziell für direktionale Übertragungen vorgestellt. Dieses Protokoll erlaubt nur direktionale Übertragungen und basiert zu Teilen auf dem IEEE 802.11 Standard. Mit Hilfe einiger neuer Ansätze konnte hierbei nicht nur die Netzwerkkapazität beträchtlich gesteigert, sondern auch typische Probleme die bei direktionalen Übertragungen auftreten, wie das Hidden-Terminal-Problem, behoben werden. Hierfür benötigt es keine Informationen über die Position von Nachbarn und steigert in einigen Szenarien gegenüber anderen speziellen Protokollen den Durchsatz bei hoher Last beträchtlich.

## Literatur

- [1] Y. bae Ko and N. H. Vaidya. Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks. In *In Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pages 13–21, 1999.
- [2] R. R. Choudhury and N. H. Vaidya. Deafness: A mac problem in ad hoc networks when using directional antennas. *Network Protocols, IEEE International Conference on*, 0:283–292, 2004.
- [3] R. R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan, and N. H. Vaidya. Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks. In *MobiCom '02: Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 59–70, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [4] C. L. Fullmer and J. J. Garcia-Luna-Aceves. Solutions to hidden terminal problems in wireless networks. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 27(4):39–49, 1997.
- [5] S. B. Kaixin Xu, Mario Gerla. How effective is the ieee 802.11 rts/cts handshake in ad hoc networks? In *GLOBECOM '02. IEEE, Vol. 1 (2002)*, pp. 72-76 vol.1., pages 72–76, 2002.
- [6] T. Korakis, G. Jakllari, and L. Tassiulas. A mac protocol for full exploitation of directional antennas in ad-hoc wireless networks. In *MobiHoc '03: Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 98–107, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [7] B. O'Hara and A. Petrick. *The IEEE 802.11 Handbook: A Designer's Companion*. Standards Information Network IEEE Press, 1999.
- [8] M. Takai, J. Martin, R. Bagrodia, and A. Ren. Directional virtual carrier sensing for directional antennas in mobile ad hoc networks. In *MobiHoc '02: Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 183–193, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [9] V. S. Y.B. Ko and N. Vaidya. Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks. In *Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, volume 1(3):13–21, Mar. 26–30 2000.

## Abbildungsverzeichnis

|   |  |   |
|---|--|---|
| 1 | Omnidirektional und direktional im Vergleich . . . . .       | 3 |
| 2 | direktionale Antenne mit 4 Elementen . . . . .               | 5 |
| 3 | Mehrere kollisionsfreie Übertragungen im Vergleich . . . . . | 6 |
| 4 | Beispiel mit 4 Arrayelementen . . . . .                      | 7 |
| 5 | Beispiel für Taubheit . . . . .                              | 8 |

## Tabellenverzeichnis

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | <i>Locatin Table</i> von Node A aus Abbildung 4 . . . . .                          | 9  |
| 2 | Testergebnisse zu Abbildung 4, bei mehreren gleichzeitigen Übertragungen . . . . . | 10 |