

# Verlustraten im WLAN - Messungen beim RoboCup<sup>1</sup>

Edgar Nett, Stefan Schemmer, Martin Gergeleit

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Fakultät für Informatik, Institut für Verteilte Systeme  
Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg  
Email: {nett, schemmer, gergeleit}@ivs.cs.uni-magdeburg.de

**Abstract:** Der Einsatz von lizenz- und gebührenfreien IEEE 802.11 Funknetzen ist attraktiv für die verschiedensten mobilen Anwendung und wird z.Z. von vielen unterschiedlichen Anbietern unkoordiniert vorangetrieben. Dadurch entstehen oft gegenseitig Beeinflussungen und Störungen, die sich unmittelbar z.B. in einer erhöhten Verlustwahrscheinlichkeit für die übertragenen Pakete auswirkt. Eine reale Anwendungsumgebung, in der sich diese Effekte exemplarisch beobachten lassen und in der die entstehenden Störungen unmittelbare negative Auswirkungen haben, ist der RoboCup, der Wettbewerb „Fußball“ spielender Roboter. Dieses Papier beschreibt Methodik und Ergebnisse von Messungen bei einem realen RoboCup-Turnier und gibt in der Auswertung konkrete Größenordnungen für Störparameter an, mit denen Anwendungs- und Protokollentwickler unter realistischen Randbedingungen rechnen müssen.

## 1 Einleitung

Die flächendeckende Verfügbarkeit von Funknetzwerken ist eine der wesentlichsten Voraussetzungen für den mobilen und allgegenwärtigen Zugang zum Internet und seinen Ressourcen. Neben den öffentlichen 2G und in Zukunft 3G Mobilfunknetzen kommt dabei auch lokalen Funknetzen (WLANs) nach dem Standard IEEE 802.11 eine schnell wachsende Bedeutung zu. Die Möglichkeit, diese WLANs im 2,4-GHz-Band lizenz- und gebührenfrei zu betreiben, wird zunehmend von Unternehmen und Privatleuten, aber auch von den Mobilfunkunternehmen an sog. „Hot-Spots“ genutzt, um mobilen Endgeräten eine hohe Bandbreite kostengünstig zur Verfügung stellen zu können. Da die Infrastruktur der verschiedenen Betreiber relativ unkoordiniert errichtet wird, ist es nicht auszuschließen (und an vielen Orten sogar zu erwarten), dass die Netze sich untereinander stören werden. Analytische Modelle und Messungen, die Aussagen über das Maß der zu erwartenden Störungen machen, betrachteten bisher vor allem die gegenseitigen Störungen der verschiedenen, konkurrierenden Funktechnologien, z.B. von WLAN und Bluetooth [GNT01, HZ99, HRR01, Zyr99] und basierten dabei

---

<sup>1</sup> Diese Arbeit entstand im Rahmen des DFG-Projektes NE 837/2-1.

entweder auf idealisierten Umgebungsannahmen oder auf Beobachtungen in einer Laborumgebung. Das Hauptmanko dieser Ergebnisse ist dabei, dass sie zwar klare Tendenzen aufzeigen, es aber offen bleibt, inwieweit und in welcher Größenordnung sich die idealisierten Annahmen auf reale Anwendungsumfelder übertragen lassen.

Im Gegensatz dazu werden in diesem Papier Messreihen vorgestellt, die stichprobenartig in einer realen Umgebung aufgenommen wurden und damit Anhaltspunkte für die absoluten Größen der zu erwartenden Störungen, insbesondere der Verlustraten, liefern (die Verlustrate ist eine wesentliche Größe, die direkt in die Gesamtperformance der Kommunikation eingeht - insbesondere TCP leidet erheblich unter Verlustraten, die über denen eines heutigen drahtgebundenen Netzes liegen). Das beobachtete Anwendungsszenario war dabei der RoboCup. Auch bei diesem eigentlich als KI-Benchmark [Kit98] konzipiertem Wettbewerb „Fußball“-spielender Roboter-Teams hat sich die WLAN-Technologie als unverzichtbar für die erfolgreiche Kooperation der mobilen Roboter erwiesen und wurde deshalb bereits seit den ersten Implementierungen vor über 4 Jahren in den Teams eingesetzt. Diese Umgebung ist deshalb besonders interessant für die diesem Papier zugrundeliegende Fragestellung, weil hier einerseits auf engem Raum verschiedene WLANs relativ unkoordiniert nebeneinander betrieben werden und andererseits der Erfolg im Wettbewerb unter anderem auch von der Funktionsfähigkeit und der erreichten Dienstgüte der Funkkommunikation abhängt. Die Messungen wurden durchgeführt bei den GermanOpen 2002 in Paderborn ([www.robocup-german-open.de/](http://www.robocup-german-open.de/)), einem Wettbewerb, bei dem 12 Roboter-Teams gegeneinander antraten.

Im Folgenden wird zunächst das zugrundeliegende Messmodell beschrieben. In diesem Modell lässt sich als sinnvolle Größe für die Untersuchung der Zuverlässigkeit der WLANs die relative Häufigkeit von Neuübertragungen in den beobachteten Nachrichten herleiten. Aus den aufgezeichneten Messdaten lassen sich die Werte für diese Größe für unterschiedliche Störsituationen bestimmen. Durch die Analyse der vorgestellten Werte werden dann Rückschlüsse auf die wechselseitige Beeinflussung von WLANs gezogen. Am Ende des Artikels werden die Ergebnisse und ihre Bewertung kurz zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf kommende Arbeiten gegeben.

## 2 Messmodell

In den beobachteten RoboCup-Teams findet durchweg das Gros der Kommunikation in Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zwischen jeweils zwei Teammitgliedern statt. Speziell wird TCP für eine verbindungsorientierte Kommunikation zwischen verschiedenen Paaren von Teammitgliedern eingesetzt.

Teilt man eine solche Verbindung zwischen zwei Stationen konzeptionell oder tatsächlich in zwei unidirektionale Verbindungen auf, so kann man bei der Beobachtung einer einzelnen solchen Verbindung drei Stationen unterscheiden: Den Sender  $s_i$ , den Empfänger  $s_j$ , und die beobachtende Station  $s_o$ . Die Verbindung zwischen den Stationen  $s_i$  und  $s_j$  (bzw.  $s_i$  und  $s_o$ ) wird durch einen virtuellen Kanal  $c_{ij}$  (bzw.  $c_{io}$ ) modelliert. Um die Broadcast-Eigenschaft des Mediums zu modellieren wird davon ausgegangen, dass Station  $s_i$  jede Nachricht gleichzeitig auf den Kanälen  $c_{ij}$  und  $c_{io}$  sendet. Auf beiden Kanälen können Nachrichtenverluste auftreten, wobei es sein kann, dass eine Nachricht, die von  $s_j$  empfangen wird, von  $s_o$  nicht empfangen wird und umgekehrt. Die

Nachrichtenverluste treten zufällig mit einer Wahrscheinlichkeit  $p_{ij}$  auf Kanal  $c_{ij}$  und einer Wahrscheinlichkeit  $p_{io}$  auf Kanal  $c_{io}$  auf.



Abbildung 1: Die Kanäle des Messmodells.

Zum Tolerieren von Nachrichtenverlusten wird auf der Zugriffskontroll-Ebene zwischen den Stationen  $s_i$  und  $s_j$  ein Protokoll mit positiven Bestätigungen eingesetzt, so wie dies im IEEE 802.11 Standard spezifiziert ist [NMG01]. Dabei gehen wir in unserem Systemmodell von der vereinfachenden Annahme aus, dass die Anzahl der Neuübertragungen einer Nachricht nicht begrenzt ist. Auf diese Weise gilt, dass  $s_i$  eine Neuübertragung genau dann sendet, wenn auf dem Kanal  $c_{ij}$  eine Nachricht oder ihre Bestätigung verloren geht. Der Einfachheit halber werden eine Nachricht und ihre Bestätigung im Folgenden als eine Einheit mit einer gemeinsamen Verlustwahrscheinlichkeit  $p_{ij}$  betrachtet, so dass die Wahrscheinlichkeit, dass  $s_i$  eine Neuübertragung sendet gleich der Wahrscheinlichkeit  $p_{ij}$  ist.

Die Frage ist nun, ob angesichts der Unzuverlässigkeit des Beobachtungskanals die aufgezeichneten Daten einen Rückschluss auf das Verhalten des Kanals  $c_{ij}$  zulassen. Speziell interessieren wir uns für eine Möglichkeit, die Verlustwahrscheinlichkeit  $p_{ij}$  sinnvoll zu schätzen. Als Schätzer verwenden wir die relative Häufigkeit der Neuübertragungen in den empfangenen Punkt-zu-Punkt-Nachrichten, die sog. Neuübertragungsrate. Diese Größe kann in unserem Modell interpretiert werden, wenn man die empfangenen Punkt-zu-Punkt-Nachrichten durch eine Folge von identisch und unabhängig verteilten Zufallsvariablen  $\{X_1, \dots, X_k\}$  modelliert, wobei  $X_l := 1$ , wenn es sich bei der Nachricht um eine Neuübertragung handelt und  $X_l := 0$  sonst. Die Wahrscheinlichkeit  $P(X_l = 1)$  ist gleich  $P(\text{neu}(m) | \text{beo}(m))$ , wobei  $\text{beo}(m)$  das Ereignis bezeichnet, dass eine von  $s_i$  gesendete Nachricht  $m$  von  $s_o$  beobachtet wird und  $\text{neu}(m)$  das Ereignis, dass es sich bei einer von  $s_i$  gesendeten Nachricht  $m$  um eine Neuübertragung handelt.  $P(\text{neu}(m) | \text{beo}(m))$  ist also die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei einer Nachricht um eine Neuübertragung handelt, gegeben, dass sie beobachtet wurde. Die Anzahl  $n$  der beobachteten Neuübertragungen lässt sich dann wie folgt ausdrücken

$$n = \sum_{l=1}^k X_l$$

und es ergibt sich somit, dass die Verlustrate  $n/k$  das arithmetische Mittel der  $X_l$  ist. Daraus folgt, dass die Neuübertragungsrate ein erwartungstreuer Schätzer für  $E(X_l) =$

$P(\text{neu}(m) | \text{beo}(m))$  ist. Diese bedingte Wahrscheinlichkeit kann wie folgt berechnet werden

$$\begin{aligned} P(\text{neu}(m) | \text{beo}(m)) &= \frac{P(\text{beo}(m) \wedge \text{neu}(m))}{P(\text{beo}(m))} \\ &= \frac{P(\text{beo}(m) \wedge \text{neu}(m))}{P(\text{beo}(m) | \text{neu}(m))P(\text{neu}(m)) + P(\text{beo}(m) | \neg \text{neu}(m))P(\neg \text{neu}(m))} \end{aligned}$$

Unter der Annahme, dass die Wahrscheinlichkeit, dass eine Nachricht beobachtet wird, unabhängig davon ist, ob es sich um eine Neuübertragung handelt, dass also  $P(\text{beo}(m) | \text{neu}(m)) = P(\text{beo}(m) | \neg \text{neu}(m))$  folgt weiter

$$\begin{aligned} P(\text{neu}(m) | \text{beo}(m)) &= \frac{P(\text{beo}(m) \wedge \text{neu}(m))}{P(\text{beo}(m) | \text{neu}(m))P(\text{neu}(m)) + P(\text{beo}(m) | \text{neu}(m))(1-P(\text{neu}(m)))} \\ &= \frac{P(\text{beo}(m) \wedge \text{neu}(m))}{P(\text{beo}(m) | \text{neu}(m))} = P(\text{neu}(m)) = p_{ij} \end{aligned}$$

Es ergibt sich also, dass  $p_{ij} = P(\text{beo}(m) | \text{neu}(m))$  und damit, dass die Neuübertragungsrate ein erwartungstreuer Schätzer für  $p_{ij}$  ist, selbst dann, wenn der Beobachtungskanal  $c_{io}$  unzuverlässig ist.

### 3 Ergebnisse

Während der RoboCup German Open 2002 wurde während fünf Partien mit einer und teilweise auch mit zwei Messstationen der Verkehr auf den WLANs aufgezeichnet. Dabei zeichnete eine Messstation zu jedem Zeitpunkt die Nachrichten genau eines Kanals, und damit im Wesentlichen die Nachrichten eines Teams, auf. Für die Messungen wurde das Tool AiroPeek™ verwendet, das es erlaubt, alle Pakete in einem Kanal eines WLAN aufzuzeichnen, beispielsweise auch die Kontrollpakete der untersten Ebene und Pakete mit Prüfsummenfehlern. Während der Partien wurden insgesamt 1.740.276 Pakete aufgezeichnet, so dass für die Auswertungen eine große Datenbasis zur Verfügung stand. Im folgenden werden die aus den aufgezeichneten Paketen bestimmten Neuübertragungsraten vorgestellt und analysiert.

In Tabelle 1 sind die gemessenen Neuübertragungsraten dargestellt. Sie bestimmen sich als Quotient aus der Anzahl der beobachteten Neuübertragungen und der Anzahl aller beobachteten Punkt-zu-Punkt-Nachrichten (inkl. Neuübertragungen), wobei Nachrichten mit einer fehlerhaften Prüfsumme nicht berücksichtigt wurden. Das heißt, dass die hier dargestellten Neuübertragungsraten über alle Punkt-zu-Punkt-Verbindungen eines Teams kumuliert sind, so dass sie die Gesamtübertragungssituation innerhalb des Teams beschreiben. Neuübertragungen sind als solche durch ein spezielles Bit im IEEE Nachrichtenkopf zu erkennen. Zu jeder beobachteten Partie des Turniers wurden mehrere Messungen durchgeführt. Auf der rechten Seite der Tabelle ist jeweils die identifizierte Hauptstörquelle für die jeweilige Partie aufgeführt. Wie sich zeigt, konnten in den unterschiedlichen Partien verschiedene Störungssituationen beobachtet werden.

Messung	Punkt-zu-Punkt Nachrichten	Neuübertragungen	Neuübertragungsrate [%]	Identifizierte Hauptstörquelle
1	38.958	4.037	10,36	WLAN FHSS
2	35.897	3.003	8,37	
3	33.602	431	1,28	WLAN DSSS Abstand 2 Kanäle
4	26.884	207	0,77	
5	7.823	2.786	35,61	WLAN FHSS + DSSS (Abstand 0 Kanäle, hohe Last)
6	2.552	108	4,23	
7	7.164	386	5,39	
8	63.071	1.546	2,45	
9	520	27	5,19	
10	59.543	1.616	2,71	
11	72.562	1.950	2,69	
12	53.638	1.557	2,90	
13	23.029	504	2,19	
14	24.266	276	1,14	
15	24.715	466	1,89	
16	27.048	597	2,21	
17	30.716	671	2,18	
18	20.790	311	1,50	
19	26.531	446	1,68	
20	54.606	1.813	3,32	WLAN FHSS <sup>1</sup>
21	24.964	549	2,20	
22	36.321	823	2,27	
23	11.155	348	3,12	
24	9.483	205	2,16	
Summe	715.838	24.663	3,45	

Tabelle 1: Verlustraten (<sup>1</sup>die selbe Situation wie Messungen 8-19, jedoch von einer zweiten Beobachtungsstation aufgezeichnet).

Die im Gesamtmittel festgestellte Neuübertragungsrate (und damit Verlustwahrscheinlichkeit) von 3,45% ist erheblich höher als die auf drahtgebundenen Medien üblicherweise beobachteten Verlustwahrscheinlichkeiten. Protokolle, die für die kleineren Verlustwahrscheinlichkeiten drahtgebundener Medien optimiert sind, können in einer solchen Umgebung nicht mehr effizient eingesetzt werden. TCP etwa geht davon aus, dass Nachrichtenverluste nicht auf dem Medium auftreten, sondern i. Allg. durch Überläufe in den Routern verursacht werden. Im den beobachteten Szenarien ist aber sicherlich die umgekehrte Annahme die zutreffende.

Des Weiteren kann man feststellen, dass die beobachteten Verlustwahrscheinlichkeiten sich in den unterschiedlichen Situationen deutlich unterscheiden können. Relativ gering sind die Verlustwahrscheinlichkeiten, wenn zwei WLAN mit DSSS (direct-sequence

spread spectrum) Übertragungstechnologie [NMG01] mit mehreren Kanälen Abstand betrieben werden (Messungen 3 und 4). Eine kleiner Verlustwahrscheinlichkeit wäre sicherlich noch denkbar, wenn man einen Abstand von drei oder mehr Kanälen einhält und somit eine vollständige Trennung der verwendeten Frequenzbänder erreicht. Höhere Verlustraten ergeben sich, bei Störungen durch ein WLAN mit FHSS (frequency-hopping spread spectrum) Technologie (Messungen 1-2 und 8-24). Da ein FHSS-WLAN jeden Teil des Frequenzbandes regelmäßig für kurze Zeit verwendet, ergibt sich zwangsläufig eine wechselseitige Störung, wobei die Störung für das DSSS-WLAN vor allem auch deshalb so erheblich ist, weil das FHSS-WLAN im gerade verwendeten Frequenzbereich mit einer erheblich höheren Leistung sendet als das DSSS-WLAN.

Die mit Abstand größte Verlustwahrscheinlichkeit ergibt sich aber in einer Situation, in der auf zwei DSSS-WLAN in unmittelbar benachbarten Kanälen Daten übertragen werden (Messungen 5). In dem hier beobachteten Fall wird auf dem störenden Kanal mit einer Bandbreite von etwa 52147 Byte/sec übertragen. Dies lastet zwar den drahtlosen Kanal noch lange nicht aus, es handelt sich aber um einen im Vergleich zu den ansonsten beobachteten Störgrößen sehr hohen Wert. Dass wir in einem solchen Fall eine Verlustwahrscheinlichkeit von mehr als 35% beobachten, zeigt die Probleme, die sich bei einem unkoordinierten Einsatz mehrerer WLAN in einer gemeinsamen Umgebung ergeben. In einer solchen Situation ist der auf beiden Kanälen erreichbare Nutzdurchsatz nur noch minimal.

#### **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Der schnelle Aufbau einer Infrastruktur aus vielen WLANs verspricht den allgegenwärtigen Zugang zum Internet und dies mit hohen Bandbreiten, die auch tatsächlich die Nutzung seiner vielfältigen Möglichkeiten erlaubt. Der unkoordinierte Einsatz von WLANs birgt allerdings das Risiko, dass gerade das Ziel, hohe Bandbreiten zur Verfügung zu stellen, durch wechselseitige Störungen konterkariert wird. Unsere Messungen in einer Anwendungsumgebung, in der mehrere WLANs gleichzeitig zum Einsatz kommen, haben gezeigt, dass (1) auf den WLANs selbst unter günstigen Bedingungen Verlustraten auftreten, welche diejenigen von drahtgebundenen LANs deutlich übersteigen und (2) dass diese Verlustraten durch einen unkoordinierten Einsatz der WLANs noch deutlich gesteigert werden. Beispiele hierfür sind der gemeinsame Einsatz schlecht kompatibler Technologien wie FHSS und DSSS oder der Betrieb von zwei DSSS-WLANs in benachbarten Kanälen.

In Umgebungen, in denen die beschriebenen Arten von Störungen auftreten, können Protokolle, die für drahtlose Netze entwickelt wurden, nicht mehr effizient eingesetzt werden. Es müssen Protokolle entwickelt werden, die speziell in ihren Fehlertoleranzmechanismen auf den beobachteten Fehlermodellen beruhen. Für den beobachteten Anwendungskontext RoboCup sind hierbei besonders Gruppenkommunikationsprotokolle von Interesse. Ein solches Protokoll wurde von uns entwickelt und in einer Laborumgebung auf seine Einsetzbarkeit getestet [MSN20]. Um die Parameter dieses Protokolls für die realen Bedingungen zu optimieren und sein Fehlermodell zu verfeinern, werden die aufgezeichneten Stichproben weiter analysiert. Dabei wird es z.B. darum gehen zu untersuchen, inwieweit der Kommunikationskanal durch ein Modell mit

Folgen von Nachrichtenverlusten (Bursts) noch genauer beschrieben werden kann und was ggf. die zu erwarteten Längen solcher Bursts sind.

## Literaturverzeichnis

- [GNT01] M. Gergeleit, E. Nett, S. Trikaliotis. Messung der gegenseitigen Störungen von Funk-Netzwerken, Die Jahrestagung der GI in Wien: Informatik 2001, 25. bis 28. Sep. 2001.
- [HZ99] J. C. Haartsen, S. Zubes, "Bluetooth voice and data performance in 802.11 DS WLAN environment", Ericsson, Mai 1999.
- [HRR01] M. Hännikäinen, T. Rantanen, J. Ruotsalainen, M. Niemi, T. Hämäläinen, and J. Saarinen, "Coexistence of Bluetooth and Wireless LANs", Proc. IEEE Int. Conf. On Telecommunications, Bucharest, Romania, June 2001.
- [Kit98] H. Kitano, "Research program of RoboCup", Applied Artificial Intelligence, 12(2-3) 117-126, March-May 1998.
- [MSN20] M. Mock, S. Schemmer, E. Nett, "Evaluating a Wireless Real-Time Communication Protocol on Windows NT and WaveLAN". In: Proceedings of WFCS'2000 3rd IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, Porto, Portugal, September, 2000.
- [NMG01] E. Nett, M. Mock, M. Gergeleit: Das drahtlose Ethernet. Der IEEE 802.11 Standard: Grundlagen und Anwendung, Addison-Wesley. Februar 2001.
- [Zyr99] J. Zyren, "Reliability of WLANs in Bluetooth Environment", Harris Semiconductor, June 1999.