

Projektarbeit
AG Vernetzte Systeme
Fachbereich Informatik
Technische Universität Kaiserslautern

**Messungen und Simulationen
des Datendurchsatzes
zwischen zwei MANET-Knoten
in unterschiedlichen Terrains**

Michael Bender
Juni 2005

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Projektarbeit eigenständig verfasst und von keinen anderen als den angegebenen Quellen Gebrauch gemacht habe.

Kaiserslautern, den 27.06.2005

Michael Bender

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Motivation.....	6
2. Grundlagen	7
2.1 Vereinfachende Annahmen über Simulationen.....	7
2.1.1 Axiom 0: Die Welt ist eben.....	7
2.1.2 Axiom 1: Das Sendegebiet eines Funkknotens ist kreisförmig & Axiom 2: Alle Funkknoten haben die gleiche Sendereichweite	7
2.1.3 Axiom 3: Wenn ich dich hören kann, kannst du auch mich hören (Symmetrie).....	8
2.1.4 Axiom 4: Wenn ich dich überhaupt hören kann, dann kann ich dich perfekt hören.....	8
2.1.5 Axiom 5: Die Signalstärke ist eine einfache Funktion der Entfernung.....	8
2.1.6 Folgen für diese Arbeit.....	9
2.2 Ungenauigkeiten und Glaubwürdigkeit von Simulationen.....	9
2.2.1 Ursache 1: Die Modellierung.....	9
2.2.2 Ursache 2: Die Daten.....	10
2.2.3 Ursache 3: Durchführung von Experiment und Simulation.....	11
2.2.4 Ergebnisse und Folgerungen	12
2.3 Der Simulator ns-2.....	12
2.3.1 Einleitung	12
2.3.2 Inhalt eines typischen Szenario-Skripts.....	13
2.3.3 Netzwerkknoten.....	13
2.3.4 Agenten.....	16
2.3.5 Topologie eines drahtlosen Netzes.....	16
2.3.6 Tracing der Simulation	18
2.4 Ausbreitungsmodelle in ns-2.....	20
2.4.1 Allgemeines	20
2.4.2 Das free-space-Modell.....	21
2.4.3 Das two-ray-ground-Modell	21
2.4.4 Das shadowing-Modell	22
2.4.5 Ricean Fading	24
2.5 Andere Faktoren.....	25
2.5.1 Bewegungsmodelle.....	25
2.5.2 Energieverbrauch.....	26
2.5.3 Modellierung der physikalischen Schicht.....	27
2.5.4 Andere Simulatoren für drahtlose Netzwerke	28
3. Bereits vorhandene Forschungsarbeiten.....	30
3.1 Allgemeine Bemerkungen.....	30
3.2 Simulation einfacher Umgebungen.....	30
3.3 Vergleich von Routingprotokollen durch Experiment und Simulation.....	31
4. Template für die Protokollierung der Experimente	32
5. Durchführung des Experiments.....	35
5.1 Beschreibung des geplanten Experiments.....	35
5.2 Verwendete Hardware und Software.....	35
5.3 Auswahl der Terrains.....	36
5.3.1 Wiese.....	36
5.3.2 Parkplatz.....	37
5.3.3 Wald.....	37
5.4 Vorgehensweise bei Durchführung der Messläufe.....	38
5.4.1 Messungen im Terrain Wiese.....	38
5.4.2 Messungen im Terrain Parkplatz.....	38

5.4.3 Messungen im Terrain Wald	39
5.4.4 Messungen im Terrain Unterholz	39
5.5 Beschreibung der aufgetretenen Probleme	40
5.5.1 Allgemeine Probleme mit Hard- und Software	40
5.5.2 Terrainspezifische Probleme	40
5.6 Abschließende Bemerkungen.....	41
6. Simulation und Methodik zur Erstellung eines Modells	42
6.1 Warum wurden Shadowing und Ricean Fading verwendet?	42
6.2 Vorgehensweise bei Iteration der Messergebnisse durch Simulation	42
6.2.1 Allgemeine Vorgehensweise	42
6.2.2 Die Simulationsphasen	44
6.3 Durchführung der Simulation	46
6.3.1 Beschreibung der verwendeten OTcl-Skripte.....	46
6.3.2 Bedienung der Software	48
7. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse.....	49
7.1 Ergebnisse der Simulation	49
7.1.1 Ergebnisse der ersten Simulationsphase.....	49
7.1.2 Ergebnisse der zweiten Simulationsphase	50
7.2 Vergleich Messung – Simulation	51
7.2.1 Terrain Wiese.....	51
7.2.2 Terrain Wald	52
7.2.3 Terrain Parkplatz.....	55
7.2.4 Terrain Unterholz.....	58
7.2.5 Unbrauchbare Messungen	62
7.3 Bewertung der Ergebnisse	65
8. Zusammenfassung und Ausblick	66
9. Quellenverzeichnis	68
Anhang A : Alle Mess- und Simulationskurven	72
A.1 Messkurven der ersten Serie.....	72
A.2 Messkurven der zweiten Serie	96
A.3 Simulationskurven der ersten Simulationsphase.....	120
A.4 Simulationskurven der zweiten Simulationsphase	125
Anhang B : Die für die Simulation verwendeten OTcl-Skripte.....	130
Anhang C : Ausgefüllte Templates für die Experimente.....	136
C.1 Template der ersten Serie von Messungen (Experiment 01).....	136
C.2 Template der zweiten Serie von Messungen (Experiment 01b).....	142
Anhang D : Tabelle Papers.....	150

1. Einleitung und Motivation

Mobilen Ad-Hoc-Netzwerken (MANETs) kommt heutzutage in der Forschung eine sehr große Bedeutung zu. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie keine bereits vorhandene Infrastruktur benötigen und selbstorganisierend sind. Jeder Knoten wird hier zum Router, es ist keine dedizierte Hardware für das Routing erforderlich. Derartige Netzwerke können relativ schnell aufgebaut und aufgrund ihrer Flexibilität vielseitig eingesetzt werden. Besonders in Kriegs- oder Katastrophengebieten, wo die Kommunikationsinfrastruktur (Leitungen, Sendemasten) nicht vorhanden oder unbrauchbar ist, bietet sich der Einsatz von MANETs an.

Die Überprüfung der hierfür benötigten Kommunikations- und Routing-Protokolle hinsichtlich ihrer korrekten Funktionalität und Performance unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen wird zum überwiegenden Teil durch Simulationen durchgeführt, da die reale Umsetzung der erforderlichen Tests eine enorme Anzahl an Hardware, Personen und Zeit erfordert und daher meist nicht durchzuführen ist.

Natürlich stellt sich hier die Frage, wie akkurat die Simulation die realen Bedingungen abzubilden vermag und wie aussagekräftig die gewonnenen Simulationsergebnisse für die Realität sind.

Diese Arbeit konzentriert sich hierbei auf das Verhalten von MANETs in unterschiedlichen Umgebungen. Es wird untersucht, inwiefern Datendurchsatz und Sendereichweite zwischen zwei WLAN-Knoten eines Ad-Hoc-Netzes von äußeren Bedingungen in unterschiedlichen Terrains (z.B. Bäume in der Sichtlinie) abhängig sind. Daraufhin sollen die gewonnenen Messergebnisse mit dem Netzwerksimulator ns-2 durch Variation der Simulationsparameter des verwendeten Signalausbreitungsmodells möglichst genau approximiert werden. Ziel dieser Messungen und Simulationen ist für jedes untersuchte Terrain die Bestimmung eines Parametersatzes, der als allgemeingültiges, oder besser gesagt statistisch abgesichertes Modell für die Simulation des Verhaltens von Ad-Hoc-Netzwerken in diesem Terrain dienen soll. Es soll geklärt werden, ob die Erstellung eines Modells mit einem solchen Anspruch mittels des verwendeten Simulators und des verwendeten Ausbreitungsmodells überhaupt möglich ist und welche Genauigkeit erreicht werden kann.

2. Grundlagen

2.1 Vereinfachende Annahmen über Simulationen

Simulationen mobiler Ad-Hoc-Netzwerke können – wie alle Arten von Simulationen überhaupt - die Realität nur eingeschränkt und vereinfacht darstellen. Dies ist bei der Erstellung von Simulationsmodellen nicht zu vermeiden, denn eine detailgetreue 1:1-Abbildung der Realität in einer Simulation wäre überaus komplex und daher – sofern überhaupt möglich – nur mit erheblichem technischem, finanziellem und zeitlichem Aufwand zu realisieren.

In den meisten Veröffentlichungen über MANETs werden die gewonnenen Ergebnisse und entwickelten Verfahren nur durch Simulationen untermauert bzw. bewertet. Allerdings basieren diese Simulationen oftmals auf Annahmen, die das Verhalten eines mobilen Ad-Hoc-Netzwerkes in der Realität zu stark vereinfachen. Beispielsweise führt die Annahme einer in allen Richtungen identischen Sendereichweite eines Knotens oder das Nichtberücksichtigen von Hindernissen zu völlig anderen Konnektivitätsgraphen als in der Realität, was bei einer Performancebewertung von Routingverfahren zu unrealistischen Ergebnissen führen würde.

Daher wird sogar von einer Glaubwürdigkeitskrise solcher Simulationsstudien gesprochen [PJR01]. Manche Benutzer und Entwickler von Simulationen behaupten sogar, dass stochastische Simulationen zur Leistungsbewertung dynamischer Systeme oftmals auf die falsche Weise eingesetzt werden. Die Autoren von [PJR01] befassen sich mit diesen Behauptungen und konzentrieren sich hierbei auf zwei Aspekte, die eine glaubwürdige Simulationsstudie ausmachen: die Verwendung geeigneter Zufallszahlengeneratoren und die angemessene Analyse der Simulationsdaten. Näheres zu diesen Aspekten ist in Kapitel 2.2 zu finden.

In [KNGLYE04] stellen die Autoren 6 Axiome vor, von denen bei der Erstellung eines Simulationsmodells oftmals ausgegangen wird, obwohl die Realität durch sie in vielen Fällen zu stark vereinfacht wird. Es wird anhand experimentell gewonnener Daten gezeigt, dass die Axiome bereits in einer einfachen Umgebung (zufällige Bewegungsmuster der Knoten, keine Hindernisse) im Allgemeinen nicht zutreffen. Somit wird ein erster Eindruck davon vermittelt, was bei der Erstellung eines geeigneten Simulationsmodells alles zu beachten ist und wie viele Unwägbarkeiten das reale Verhalten drahtloser Netzwerkknoten aufweist.

2.1.1 Axiom 0: Die Welt ist eben

Keine Daten sind erforderlich, um diese Annahme zu widerlegen. Das Vorhandensein von Hindernissen wie Geländeerhebungen, Bäumen oder Gebäuden und deren Einfluss auf die Ausbreitung der Signale wird in einem derartigen Modell genauso wenig berücksichtigt wie etwaige unterschiedliche Höhenlevels von Knoten, z.B. auf verschiedenen Stockwerken innerhalb eines Gebäudes.

2.1.2 Axiom 1: Das Sendegebiet eines Funkknotens ist kreisförmig & Axiom 2: Alle Funkknoten haben die gleiche Sendereichweite

Diese beiden Axiome wurden aufgrund ihrer Verwandtschaft von den Autoren zu einem einzigen Axiom zusammengefasst. Es lautet: „Der Erfolg einer Übertragung von einem Funkknoten zu einem Anderen hängt nur von der Entfernung zwischen den Knoten ab.“

Es ist sicherlich zutreffend, dass eine erfolgreiche Übertragung mit zunehmender Entfernung weniger wahrscheinlich wird, doch es gibt noch weitere Faktoren, die man diesbezüglich in Betracht ziehen muss:

- Nicht alle Knoten müssen identisch sein, Karten oder Antennen können variieren
- Antennen sind nicht völlig omnidirektional
- Hintergrundrauschen ändert sich mit Zeitpunkt und Ort
- Erhebungen und Hindernisse blockieren oder reflektieren Signale

Die Autoren zeigen experimentell, dass die Orientierung der Antennen ein wesentlicher Faktor für den Empfang der zwischen den Knoten gesendeten Beacons ist. Die Empfangswahrscheinlichkeit erreicht dann ihr Maximum, wenn sowohl die Antenne des Quellknotens dem Zielknoten als auch die Antenne des Zielknotens dem Quellknoten zugewandt ist. Außerdem ist zu beobachten, dass die Empfangswahrscheinlichkeit bei gleichen Entfernungen in verschiedenen Abschnitten des Testgeländes unterschiedlich ausfällt; diese Varianz könnte durch Hintergrundrauschen erklärbar sein.

2.1.3 Axiom 3: Wenn ich dich hören kann, kannst du auch mich hören (Symmetrie)

Dieses Annahme besagt: Falls eine Transmission zwischen zwei Knoten (von A nach B) erfolgreich verläuft, so muss auch eine unmittelbar folgende Antwort (von B nach A) ihr Ziel erreichen.

Zur experimentellen Überprüfung dieses Axioms verwenden die Autoren ein MANET, dessen Knoten alle drei Sekunden ein Broadcast-Beacon verschicken. Es wird überprüft, ob nach dem Empfang eines von Knoten A stammenden Beacons durch Knoten B auch das nächste Beacon von B durch A empfangen wird.

Die sich daraus ergebende „Wahrscheinlichkeit für den symmetrischen Beacon-Empfang“ ist der Quotient zwischen der Anzahl der gesendeten Beacons, auf die der Knoten eine „Antwort“ (wie oben beschrieben) erhielt und der Anzahl aller erfolgreich gesendeten Beacons. Sollte das Axiom zutreffen, so müsste dieser Wert für alle Knoten den Wert 1 annehmen; in der Realität aber wird dieser Wert bei fast keinem Knoten größer als 0.8.

2.1.4 Axiom 4: Wenn ich dich überhaupt hören kann, dann kann ich dich perfekt hören

Hier wird angenommen, dass die über der Entfernung zwischen zwei Knoten aufgetragene Verteilung der Empfangswahrscheinlichkeit eine Sprungfunktion ist. Diesseits einer Schwellendistanz (Sendereichweite) ist die Empfangswahrscheinlichkeit konstant 1, jenseits dieser Schwelle jedoch 0.

Im Versuch zu Axiom 1&2 wird die Empfangswahrscheinlichkeit auch in Abhängigkeit von der Entfernung der Knoten bestimmt und grafisch dargestellt. Hierbei ist zu beobachten, dass sie mit wachsender Entfernung kontinuierlich abnimmt, ein abrupter Sprung ist nicht zu erkennen.

2.1.5 Axiom 5: Die Signalstärke ist eine einfache Funktion der Entfernung

Diese Annahme geht davon aus, dass ein in Abhängigkeit von der Entfernung zweier Knoten aufgetragener Graph der Signalstärke durch eine einfache Funktion approximiert werden kann.

Für die durchschnittliche Signalstärke aller im Experiment gesendeter Beacons trifft dies zu, doch der Graph der Signalstärke eines beliebigen individuellen Beacons zeigt deutlich, dass die Korrelation zwischen Entfernung und Signalstärke recht schwach ist. Viele Faktoren wie

Hindernisse, Reflektion und Brechung sorgen für zu starke Schwankungen der Signalstärke, um sie durch eine einfache Funktion annähern zu können.

2.1.6 Folgen für diese Arbeit

Für diese Arbeit ist die Auswahl eines Simulationsmodells erforderlich, mit dessen Hilfe eine möglichst gute Annäherung an die realen Messergebnisse durch Simulationen erfolgen soll. Die Messungen sollen hierbei auch in unwegsameren Terrains wie Wald durchgeführt werden, wo zahlreiche Hindernisse und störende Einflüsse eine erschwerte Datenübertragung und unterschiedliche sowie indeterministische Messergebnisse erwarten lassen. Ein Simulationsmodell, das von den Axiomen ausgeht, dürfte sich daher als zu simpel erweisen und nur zu einer unzureichenden Simulation der Realität eignen. Ein Modell, dessen Verwendung zufrieden stellende Resultate liefern soll, muss komplexer sein und mehr äußere Begebenheiten berücksichtigen.

2.2 Ungenauigkeiten und Glaubwürdigkeit von Simulationen

In dieser Arbeit ist die Annäherung von experimentell gewonnenen Messergebnissen durch Simulationen vorgesehen. Exakte Simulationsergebnisse sind hierbei nicht zu erwarten, da jede Simulation die Realität mehr oder weniger vereinfacht darstellt. Simulationsmodelle dienen im Allgemeinen dem Zweck, das Verhalten von realen Prozessen oder Systemen vorherzusagen und zu bewerten, was ein relativ hohes Maß an Genauigkeit erforderlich macht. Es stellt sich die Frage, wie die gewünschte Genauigkeit einer Simulation erreicht werden kann. In [R99] befasst sich der Autor mit den drei Hauptursachen für ungenaue Simulationsergebnisse. Es werden Maßnahmen zur Eliminierung dieser Ungenauigkeiten und zur Erhöhung der Glaubwürdigkeit von Simulationen [PJR01] vorgeschlagen.

2.2.1 Ursache 1: Die Modellierung

Schon die Erstellung des Modells birgt einige Fehlerquellen. Der erste Schritt besteht darin, die Problemstellung richtig zu verstehen. Mangelndes Verständnis der Realität führt sehr wahrscheinlich zu der Entwicklung eines falschen Simulationsmodells. Vermeiden lässt sich ein solcher Fehler durch enge Zusammenarbeit und Kommunikation zwischen dem Entwickler des Modells und dem Auftraggeber, Verständnisfehler und Unklarheiten lassen sich so schon im Vorfeld beseitigen.

Auch bei hinreichendem Verständnis des Problems kann es zur Entwicklung eines falschen Modells kommen. Dies deutet auf ein inkorrektes konzeptionelles Modell hin; die Realität wurde also unzureichend oder fehlerhaft in eine softwareunabhängige Darstellung des Modells umgesetzt. Eine Validation ist daher erforderlich. Häufig vorkommende Beispiele für eine derartige unzureichende Modellierung sind Modelle, die alle oder zumindest einige der in Kapitel 2.1 genannten Axiome erfüllen, die realen Begebenheiten also zu stark vereinfachen. Nächster Schritt ist die Überführung des korrekten konzeptionellen Modells in ein Computermodell. Fehler bei der Implementierung können zu einem falschen Simulationsmodell führen, eine Verifikation des fertigen Modells soll derartige Fehler sichtbar machen.

Für diese Arbeit ist diese Ursache nicht relevant, da bereits vorhandene Simulationsmodelle von ns-2 verwendet werden sollen.

2.2.2 Ursache 2: Die Daten

Eine weitere Ursache für Ungenauigkeiten von Simulationen besteht möglicherweise darin, dass bereits die zu simulierenden Daten selbst Ungenauigkeiten aufweisen. Dies könnte ein Resultat unzureichender Methoden zur Datensammlung sein. Möglich ist auch, dass der Datensatz zu klein ist, um Rückschlüsse auf die gesamten Daten zuzulassen, oder dass die Daten nicht gesammelt werden können, da das reale System noch nicht existiert oder nicht genügend Zeit oder Geld vorhanden ist.

Mangelhafte Analyse der experimentell gewonnenen Daten kann ebenfalls zu Ungenauigkeiten führen. Hier ist neben mathematischen Fehlern vor allem die Wahl einer inkorrekten Wahrscheinlichkeitsverteilung, die das stochastische Verhalten des realen Systems nicht richtig wiedergibt, zu nennen.

Daher sollte man stets sichergehen, dass die zu simulierenden Daten wirklich akkurat sind. Wenn die Daten bereits gesammelt sein sollten, empfiehlt sich eine genauere Untersuchung der Datenquelle und der Umstände, unter denen sie gewonnen wurden (wie, wann, von wem...). Das Zeichnen von Graphen, die die Daten darstellen, ermöglicht das Auffinden von ungewöhnlichen Mustern oder Ausreißern. Dieser Aspekt ist für diese Arbeit insofern von Bedeutung, als dass störende Einflüsse und Probleme mit der Hardware oder Software zu solchen Anomalien bei den Messergebnissen führen können. Bei noch zu sammelnden Daten sollte man schon bei deren Sammlung sicherstellen, dass Fehler und Ungenauigkeiten ausbleiben oder zumindest sofort entdeckt werden. Hierzu könnte man die Daten mit denen einer vergleichbaren Quelle vergleichen. Datensätze sollten sorgfältig ausgewählt werden und einen vernünftigen Umfang haben. Für Daten, die nicht gesammelt werden können, besteht die Möglichkeit der Abschätzung, was jedoch zu großen Fehlern bei den Resultaten führen kann. Deswegen sollte eine *Sensitivitätsanalyse* durchgeführt werden, in deren Rahmen die geschätzten Daten variiert und die Wirkung dieser Veränderungen auf die Simulationsergebnisse beobachtet werden. Sollten sich die Ergebnisse als insensitiv gegenüber der Genauigkeit der Schätzungen erweisen, so können die geschätzten Daten verwendet werden. Andernfalls sind entweder genauere Schätzungen oder ein Bericht über die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse erforderlich. Durch diesen Bericht sind die Ungenauigkeiten der Daten bekannt, was eine Abschätzung der Risiken bei Verwendung der Daten ermöglicht. Letzte Möglichkeit ist die Reduktion des Rahmens der Simulationsstudie, so dass die ungenauen Daten nicht mehr benötigt werden. Die in dieser Arbeit durchzuführenden Simulationen basieren auf gemessenen Daten, es findet also keine Schätzung statt.

Für die Genauigkeit einer Simulation ist auch die Wahl geeigneter Zufallszahlen als Basis für das Simulationsmodell zu berücksichtigen. Gängige Praxis bei der Durchführung stochastischer Simulationen ist die Benutzung algorithmischer Generatoren für unabhängige und gleichverteilte Pseudozufallszahlen. Gängige Zyklen führen hierbei zu unerwünschten Korrelationen, da sie aufgrund ihrer Kürze dank der heutigen Rechenleistung schon in wenigen Minuten erzeugt werden können. Für komplexe Simulationen ist der Einsatz eines Zufallszahlengenerators mit weitaus größeren Zyklen erforderlich.

Stochastische Computersimulationen sind als statistische Experimente zu betrachten, was den Einsatz statistischer Methoden bei der Analyse der simulierten Daten erforderlich macht [PJR01]. Der statistische Fehler des Simulationsergebnisses wird üblicherweise durch das entsprechende Konfidenzintervall eines gegebenen Konfidenzniveaus angegeben. Mit zunehmender Anzahl an simulierten Daten verringert sich die Breite eines solchen Intervalls.

In Abschnitt 2.2.3 wird beschrieben, wie man mittels sequentieller Simulation den statistischen Fehler kontrollieren kann.

2.2.3 Ursache 3: Durchführung von Experiment und Simulation

Auch bei der Durchführung von Experimenten kann es zu Fehlern kommen, die zu ungenauen Simulationsresultaten führen. Viele Simulationsmodelle durchlaufen eine kurze transiente Phase, in der sich die Simulation noch nicht in einem stationären Zustand befindet. Erst wenn dieser erreicht ist, zeigen die simulierten Werte ihr übliches, charakteristisches Verhalten. Die transiente Phase sollte bei der Auswertung der Simulationsergebnisse ignoriert werden, um keinen systematischen Fehler zu erhalten. Beispielsweise kann man die Simulation für eine feste „Aufwärmphase“ laufen lassen, bevor man Resultate sammelt.

Zur Kontrolle über den statistischen Fehler (Konfidenzintervall, s. 2.2.2) des Experiments kann die *sequentielle Simulation* [PJR01] eingesetzt werden. Die Simulation folgt hierbei einer Reihe von aufeinander folgenden „Checkpoints“, bei deren Erreichen der momentane relative statistische Fehler abgeschätzt wird. Die Simulation wird angehalten, sobald der Fehler an einem solchen Checkpoint unter einen akzeptablen Grenzwert fällt, also hinreichend klein ist. Problematisch ist die Simulation des Verhaltens eines Netzwerkes im stationären Zustand, da ein solcher Zustand erst nach einer unendlich langen Zeitperiode erreicht werden kann, eine Simulation jedoch nur endlich lange dauert. Anstatt die transiente Phase der Simulation zu ignorieren ist es in manchen Fällen auch möglich, die Simulation einfach so lange laufen zu lassen, bis die in dieser Phase aufgetretenen Unregelmäßigkeiten vernachlässigbar werden, jedoch erfordert ein solcher Brute-Force-Ansatz die Verwendung von Zufallszahlengeneratoren mit sehr großen Zyklen. Außerdem sollte bedacht werden, dass das Sammeln einer ausreichend großen Datenbasis wichtiger ist als reine Simulationsdauer, da Simulationszeit, während der keine für das Experiment relevanten Daten gesammelt wurden, keinen Einfluss auf die statistische Genauigkeit hat. Es zählt vielmehr die Anzahl der aufgezeichneten Ereignisse. Ein zu frühes Beenden von stochastischen Simulationen wirkt sich negativ auf die Genauigkeit aus und kann zu irreführenden Ergebnissen führen. Bei Designern kommerzieller Simulationspakete ist die sequentielle Simulation leider nicht sehr beliebt, meist ist eine Analyse erst nach dem Ende der Simulation möglich.

Eine zu geringe Dauer von Messläufen bei der Durchführung der Messungen führt ebenfalls zu Ungenauigkeiten [R99], da sich das Verhalten eines Systems über eine längere Zeitdauer ändern kann und längere Messungen daher eine weitaus repräsentativere Datenbasis liefern. Statt längeren Messungen führt man bevorzugterweise mehrere einzelne Messläufe durch. Diese Läufe sind voneinander unabhängig, was die statistische Auswertung erleichtert. Bei einem längeren Lauf wird jedoch die Aufwärmphase nur einmal durchlaufen, was eine Zeitersparnis bedeuten kann.

Ein weiteres Problem besteht in der unzureichenden Suche nach dem Lösungsraum. Dies bedeutet, dass oftmals eine zu geringe Anzahl an Experimenten unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt wird. Fehlende Variation dieser Faktoren führt zu einer begrenzten Anzahl an unterschiedlichen Resultaten. Diese eingeschränkte Datenbasis kann dazu führen, dass bei der Simulation das Verhalten des Modells nicht vollständig verstanden wird oder sogar falsche Schlussfolgerungen gezogen werden. Die Anwendung dieser Erfahrungen kann bei folgenden Simulationen zu Ungenauigkeiten führen. Es ist also zu empfehlen, viele verschiedene Messläufe zu simulieren, um die Möglichkeiten und Grenzen des Simulationsmodells bestmöglich auszuloten.

Problematisch ist außerdem eine fehlende Sensitivitätsanalyse der Simulationsergebnisse, da in der realen Welt stets Unwägbarkeiten vorhanden sind und die gewonnene Lösung (Parameter) daher auf ihre Robustheit gegenüber Änderungen der Daten überprüft werden muss.

2.2.4 Ergebnisse und Folgerungen

Die meisten der in [PJR01] untersuchten Veröffentlichungen über durchgeführte Simulationsstudien enthalten keine Aussagen über die statistische Genauigkeit der Simulationsergebnisse. Zahlreiche Wiederholungen einer nicht-sequentiellen Simulation können dennoch zu Ergebnissen mit akzeptabel kleinen statistischen Fehlern führen; viele Papers liefern jedoch überhaupt keine oder nur wenige Informationen über die Bedingungen, unter denen die Simulationen durchgeführt wurden, und beeinträchtigen somit deren Wiederholbarkeit.

Um Ungenauigkeiten der Simulationsergebnisse zu vermeiden, ist es vor allem notwendig, so viele Experimente wie möglich durchzuführen und somit für eine breite Datenbasis zu sorgen, sowie die Sensitivität und Robustheit der Daten und Ergebnisse zu überprüfen [R99]. Allgemein gilt hier: je mehr, desto besser. Eine glaubwürdige Simulationsstudie erfordert außerdem die Entwicklung eines passenden Simulationsmodells und die Auswahl eines geeigneten Zufallszahlengenerators [PJR01]. Die Kontrolle der statistischen Fehler durch sequentielle Simulation empfiehlt sich. Wichtig ist auch die Wiederholbarkeit des Simulationsexperiments, diese sollte durch Angabe von Informationen über verwendete Zufallszahlen und die Art der Simulation (endlich oder stationärer Zustand) garantiert werden. Außerdem sind die Methoden zur Analyse der Simulationsdaten sowie die ermittelten statistischen Fehler aufzuführen.

Die Eliminierung der in diesem Kapitel angeführten Ursachen von Ungenauigkeiten erfordert sorgfältiges Experimentieren und somit sehr viel Zeit. Im Rahmen dieser Arbeit ist dies im erforderlichen Maße aus Zeitgründen nicht zu leisten; es kann also zu Ungenauigkeiten bei der Simulation der gewonnenen Messergebnisse kommen, vor allem bei den Messungen in hindernisreichen Terrains, wo mit indeterministischem Kommunikationsverhalten zwischen den WLAN-Knoten zu rechnen ist. Probleme durch zu kleine Zufallszahlenzyklen sind nicht zu erwarten, da die geplanten Simulationsläufe nur von kurzer Dauer sind.

2.3 Der Simulator ns-2

2.3.1 Einleitung

Bei ns-2 handelt es sich um einen diskreten, ereignisgesteuerten Netzwerksimulator, der an der Universität Berkeley entwickelt wurde. Er unterstützt die Simulation von TCP, UDP, Routing- und Multicastprotokollen über drahtgebundene und drahtlose Netzwerke [ns]. Bei Interaktion mit realen Netzwerkkomponenten kann er in Echtzeit ablaufen, bei reinen Simulationen ist dies jedoch nicht erforderlich; die Geschwindigkeit der Simulation hängt dann nur von der verfügbaren Rechenleistung ab. Seine großen Vorteile liegen in der Modularität und Einfachheit. Die Datenübertragung zwischen den Netzwerkknoten wird durch die so genannten Agenten realisiert, die mit den gewünschten Knoten und Trafficgeneratoren verbunden werden. Die Möglichkeiten zur Simulation drahtloser Netzwerke sind im Kontext

dieser Arbeit von besonderem Interesse. Eine Vielfalt verschiedener physikalischer Modelle, Signalausbreitungs- und Bewegungsmodelle können für die Simulation verwendet werden. Netzwerktopologien und Bewegungsmuster von Knoten lassen sich festlegen. Simulationsszenarien werden durch die Erstellung von Skripten in der Sprache OTcl definiert, komplexere Aufgaben wie Routingverfahren, die nicht Gegenstand dieser Arbeit sind, bedürfen jedoch einer Implementierung in C++. Der Verlauf einer Simulation wird in Tracefiles geloggt, wo ausführliche Informationen über die gesendeten Datenpakete enthalten sind und zur weiteren Auswertung verwendet werden können. Eine Visualisierung der in den Tracefiles enthaltenen Daten ist mit Tools wie nam oder xgraph möglich.

Dieses Kapitel befasst sich mit Aspekten von ns-2, die für diese Arbeit von Bedeutung sind.

2.3.2 Inhalt eines typischen Szenario-Skripts

Die meisten OTcl-Skripte, die zur Festlegung eines Simulationsszenarios dienen, sind sehr ähnlich aufgebaut, da viele Schritte bei jeder Art von Simulation erforderlich sind. Ein Skript muss folgende Aufgaben ausführen [Br03]:

- Erstellung einer Simulatorinstanz
- Öffnen eines oder mehrerer Tracefiles zum Loggen des Simulationsverlaufs
- Konfiguration der Netzknoten: bei der Erstellung des Knotens festgelegte Parameter
- Erstellung der Knoten und Verbindungen, letztere entfallen bei drahtlosen Netzen
- Erstellung und Zuordnung der Agenten, vor allem der Trafficgeneratoren
- Zeitliche Festlegung der trafficbezogenen Ereignisse: z.B. Starten und Stoppen des Sendens eines CBR-Agenten
- Eine Abschlussfunktion, die die Tracefiles schließt und den Simulator beendet
- Angabe des Zeitpunktes, wann diese Abschlussfunktion ausgeführt werden soll
- Starten der Simulation durch den run-Befehl

2.3.3 Netzwerkknoten

2.3.3.1 Aufbau und Definition

Unicast Netzwerkknoten stellen in ns-2 ein zusammengesetztes Objekt dar, das aus einem *node entry object* und zwei Classifiern (Adressen-Auswerter) besteht [Br03]. Ankommende und lokal erzeugte Datenpakete erreichen zunächst das entry object. Von dort werden sie zum Address-Classifier gesendet und es wird geprüft ob die Pakete für den eigenen Knoten oder für einen anderen Netzwerkknoten bestimmt sind. Sollte Letzteres der Fall sein, so wird das Paket an tiefere Schichten weitergesendet. Ist ein Paket hingegen für den eigenen Knoten bestimmt, so muss der Port-Classifier entscheiden, an welchen zugehörigen Agenten dieses Paket übergeben werden soll.

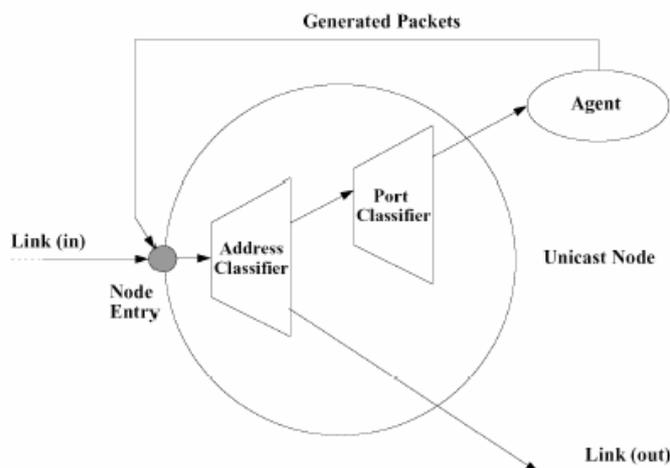


Abb. 2.1 : Aufbau eines Knotens in ns-2

Bevor die Definition eines Knotens möglich ist, muss der Simulator die gewünschte Konfiguration des Knotens erfahren. Dies geschieht mit dem Kommando *node-config*, dessen Aufruf beispielsweise folgendermaßen aussehen kann:

```
$ns_ node-config -addressType hierarchical \
  -adhocRouting AODV \
  -llType LL \
  -macType Mac/802_11 \
  -ifqType Queue/DropTail/PriQueue \
  -ifqLen 50 \
  -antType Antenna/OmniAntenna \
  -propType Propagation/TwoRayGround \
  -phyType Phy/WirelessPhy \
  -topologyInstance $topo \
  -channel Channel/WirelessChannel \
  -agentTrace ON \
  -routerTrace ON \
  -macTrace OFF \
  -movementTrace OFF
```

Diese Parameter legen die Eigenschaften der Knoten fest, wie z.B. Warteschlangentyp, Kanal, Routingalgorithmus oder Ausbreitungsmodell.

Die Erstellung eines Knotens erfolgt durch einen Aufruf der Simulatorinstanz (in diesem Beispiel *ns*) mit dem set-Kommando:

```
set n0 [$ns node]
```

Dieses Kommando erzeugt einen Knoten namens *n0* unter der Simulatorinstanz *ns* mit den durch *node-config* definierten Eigenschaften.

2.3.3.2 Drahtlose Knoten

Knoten eines drahtlosen Netzwerkes werden im OTcl wie bereits beschrieben definiert, jedoch weisen sie eine andere Struktur auf.

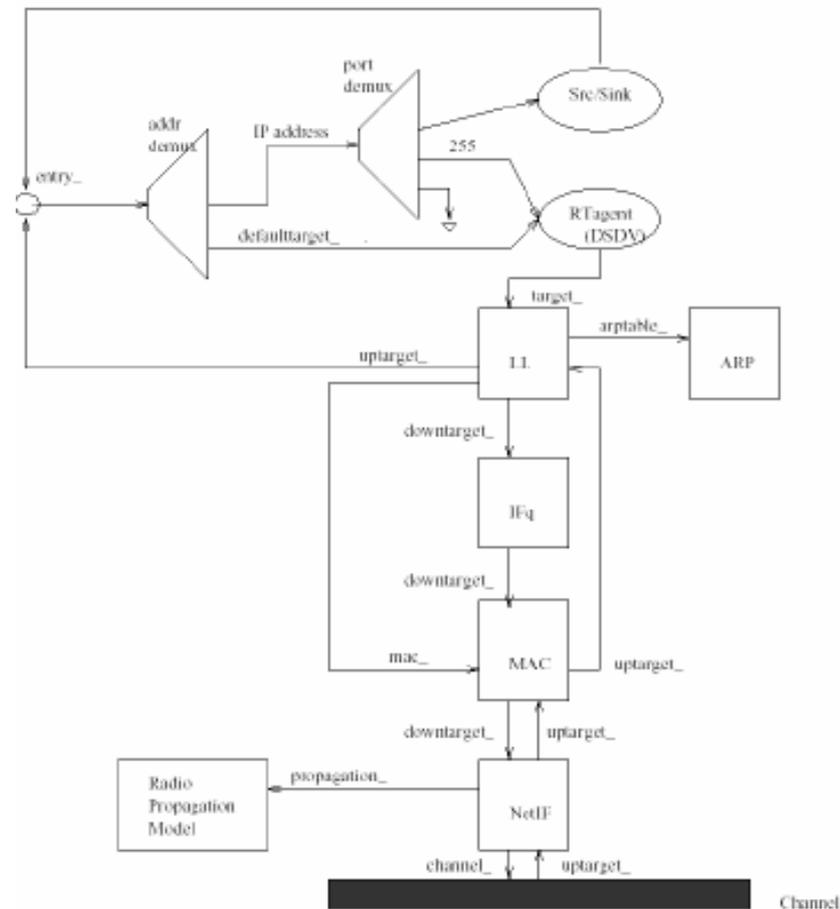


Abb. 2.2 : Aufbau eines drahtlosen Knotens

Der größte Unterschied zu drahtgebundenen Knoten besteht darin, dass drahtlose Knoten mittels eines Funkkanals (*Wireless Channel*) verbunden sind und nicht über herkömmliche Verbindungen. Außerdem sind sie innerhalb ihrer Topologie beweglich und nicht an einen festen Ort im Netzwerk gebunden.

Zusätzlich zu den bereits im vorigen Abschnitt beschriebenen Komponenten enthält ein mobiler Knoten, wie in Abb. 2.2 zu sehen, folgende Erweiterungen [Br03]:

- einen *Routing Agenten*, der für die Leitwegsuche und die Paketweiterleitung verantwortlich ist. Er erhält alle lokal erzeugten Datenpakete, sowie alle Datenpakete die nicht an einen Agenten des eigenen Knotens gerichtet sind. Solche Pakete werden an die unteren Schichten übergeben, um gemäß des eingesetzten Routingverfahrens weitergeleitet zu werden
- eine *Link Layer*, die die Netzwerkadressen mit Hilfe des ARP-Moduls in Hardwareadressen wandelt und die Pakete für den Transport auf dem Funkkanal vorbereitet.
- das von der Link-Layer benötigte *ARP-Modul*
- eine *Interface-Queue* die die zu sendenden Pakete zwischenspeichert
- eine *MAC-Schicht*, die den Zugriff auf den Funkkanal regelt
- ein *Netzwerkinterface*, welches Pakete zum Funkkanal sendet und von diesem empfängt.
- ein Ausbreitungsmodell (*radio propagation model*), welches die Signalstärke der Datenpakete am Empfänger anhand verschiedener von der Umgebung abhängiger

Parameter berechnet und festlegt, ob der fehlerfreie Empfang eines Paketes möglich ist.

- den *Funkkanal*, über den die Pakete verteilt werden

Die mobilen Knoten werden im Skript durch folgende Schleife erzeugt:

```
for { set j 0 } { $j < $opt(nn) } { incr j } {
  set node_($j) [ $ns_ node ]
  $node_($j) random-motion 0 ; # disable random motion
}
```

Der Wert von *nn* entspricht hierbei der Anzahl der mobilen Knoten im drahtlosen Netzwerk.

2.3.4 Agenten

Agenten [ns] sind Endpunkte, an denen Pakete erzeugt oder empfangen werden, und dienen zur Implementierung von Protokollen in verschiedenen Schichten. Der Simulator unterstützt eine große Anzahl an Protokollagenten, z. B. Agenten für UDP, IVS oder mannigfaltige Arten von TCP. Agenten sind notwendig, um eine Verbindung zwischen den Knoten zu erzeugen und die Datenübertragung zu ermöglichen. Jeder definierte Netzwerkknoten muss einem Agenten für einen Sender oder einen Empfänger zugewiesen werden. Als Sender vorgesehene Knoten bedürfen außerdem einer Zuweisung des zugehörigen Agenten zu einer ebenfalls zu definierenden Applikation (z. B. FTP) oder Datenquelle.

Folgendes Beispiel illustriert die Erzeugung von Agenten in einem OTcl-Skript:

```
set tcp [new Agent/TCP] ;           # create sender agent
$tcp set fid_ 2 ;                   # set IP-layer flow ID
set sink [new Agent/TCPSink] ;     # create receiver agent
$ns attach-agent $n0 $tcp ;        # put sender on node $n0
$ns attach-agent $n3 $sink ;       # put receiver on node $n3
$ns connect $tcp $sink ;           # establish TCP connection
set ftp [new Application/FTP] ;    # create an FTP source "application"
$ftp attach-agent $tcp ;            # associate FTP with the TCP sender
$ns at 1.2 "$ftp start" ;          # arrange for FTP to start at time 1.2 sec
```

Hier werden mittels des *set*-Befehls zwei TCP-Agenten erzeugt. Der Agent *tcp* stellt einen Sender für die Daten dar, der Agent *sink* hingegen den Empfänger. Durch die Verwendung von *attach-agent* werden die beiden Agenten in der Simulatorinstanz *ns* den Knoten *n0* und *n3* zugewiesen. Der *connect*-Befehl sorgt anschließend für den Aufbau einer Verbindung zwischen den Agenten und somit auch zwischen den ihnen zugewiesenen Knoten. In den beiden folgenden Zeilen wird eine FTP-Applikation, die zur Generierung von Traffic dienen soll, erzeugt und dem zum Sender gehörenden Agenten zugeordnet wird. Nun ist eine Datenübertragung zwischen beiden Knoten möglich. Sie beginnt mit dem Start der FTP-Anwendung in der letzten Zeile.

2.3.5 Topologie eines drahtlosen Netzes

Zur Erstellung eines Szenarios für die Simulation ist nach der Erzeugung der Knoten des zu simulierenden Netzes die Festlegung der Topologie erforderlich [ns]. Es muss vom Benutzer

angegeben werden, wo sich ein Knoten zu Beginn der Simulation befindet und auf welche Weise er sich bewegen soll.

Zuerst muss ein Topologieobjekt erzeugt werden, das die Bewegungen der mobilen Knoten überwacht. Dies geschieht in folgender Codezeile:

```
set topo [new Topography]
```

Danach wird die Größe des Areal, in der sich die Knoten befinden dürfen, festgelegt. Dies geschieht mit folgendem Befehl:

```
$stopo load _flatgrid 500 500
```

Das Topographie-Objekt erhält hierdurch die Koordinaten der Begrenzungen des Areal, das also eine Fläche der Größe 500x500 darstellt. Das Gebiet ist in eine Gitterstruktur der Auflösung 1 eingeteilt, andere Werte für diese Auflösung können als dritter Parameter des `load_flatgrid`-Kommandos angegeben werden.

Es folgt die Erzeugung eines God-Objektes:

```
create-god $val(nn)
```

God steht hier für *General Operations Director*. Dieses Objekt speichert Informationen über die Umgebung, das Netzwerk oder Knoten, die ein allwissender Beobachter haben würde, den einzelnen Teilnehmern der Simulation aber nicht bekannt sein sollte. Gespeichert werden beispielsweise die Gesamtzahl der mobilen Knoten und eine Tabelle mit der kürzesten Anzahl an Hops, um von einem Knoten zu einem anderen zu gelangen. Letztere Information wird üblicherweise vor Beginn der Simulation aus Dateien mit festgelegten Bewegungsmustern geladen, da eine Berechnung während der Simulation recht zeitaufwändig werden kann.

Nach der Definition und Erzeugung der Knoten (siehe Abschnitt 2.4.3) wird ihre Startposition festgelegt. Die angegebenen x- und y-Koordinaten müssen sich hierbei innerhalb der definierten Grenze von 500x500 befinden:

```
#  
# Provide initial (X,Y, for now Z=0) co-ordinates for node_(0) and node_(1)  
#  
$node_(0) set X_ 5.0  
$node_(0) set Y_ 2.0  
$node_(0) set Z_ 0.0  
  
$node_(1) set X_ 390.0  
$node_(1) set Y_ 385.0  
$node_(1) set Z_ 0.0
```

Die dritte Dimension wird vom Simulator nicht standardmäßig unterstützt, daher erhalten die Werte für die z-Koordinaten stets den Wert Null.

Es folgt ein Beispiel für die Erzeugung von Knotenbewegungen:

```
#  
# Node_(1) starts to move towards node_(0)  
#  
$ns_ at 50.0 "$node_(1) setdest 25.0 20.0 15.0"  
$ns_ at 10.0 "$node_(0) setdest 20.0 18.0 1.0"  
  
# Node_(1) then starts to move away from node_(0)  
$ns_ at 100.0 "$node_(1) setdest 490.0 480.0 15.0"
```

Die erste Codezeile bedeutet beispielsweise, dass der Knoten *node_(1)* 50 Sekunden nach Start der Simulation beginnt, sich mit einer Geschwindigkeit von 15 m/s in Richtung seines Ziels mit den Koordinaten (25/20) zu bewegen. Durch diese API lässt sich also die Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung der Knoten festlegen und verändern. Bei den Simulationen im Rahmen dieser Arbeit war dies nicht erforderlich, da die Knoten während der zu simulierenden Messläufe stationär waren.

Auch die Verwendung von Dateien mit vordefinierten Bewegungsmustern ist möglich:

```
set val(sc)      "../mobility/scene/scen-3-test"  
  
#  
# Define traffic model  
#  
puts "Loading scenario file..."  
source $val(sc)
```

Die Datei *scen-3-test* enthält Kommandos zur Festlegung von Bewegungsmustern in der oben beschriebenen Form.

Auch zufällig generierte Bewegungsmuster können eingesetzt werden; dies geschieht durch das Kommando *\$mobilenode start*.

2.3.6 Tracing der Simulation

2.3.6.1 Tracefiles für nam erstellen

Das Tool *nam* dient der Visualisierung der im OTcl-Skript erstellten Netzwerktopologie und des dynamischen Verhaltens des simulierten Netzes [nstut]. Hierzu muss der Ablauf der Simulation in einem Tracefile gespeichert werden, das von *nam* verarbeitet werden kann. Folgende Codeabschnitte dienen diesem Zweck:

```
set nf [open out.nam w]  
$ns namtrace-all $nf
```

In der ersten Zeile wird ein Handle namens *nf* für das gewünschte Tracefile *out.nam* erzeugt. Die zweite Zeile befiehlt dem Simulator, alle für *nam* relevanten Simulationsdaten in diese Datei zu schreiben.

```

proc finish {} {
    global ns nf
    $ns flush-trace
    close $nf
    exec nam out.nam &
    exit 0
}

```

Diese Prozedur schließt die Datei und ruft nam auf.

2.3.6.2 Tracefiles für xgraph erstellen

Das Tool xgraph wird in dieser Arbeit verwendet, um die simulierten Werte für den Datendurchsatz zwischen den Knoten in Form eines Graphes anzuzeigen. Die hierfür benötigten Daten werden während der Simulation in einem Tracefile gespeichert. Im folgenden Beispiel [nstat] geschieht dies für drei unterschiedliche Empfängerknoten.

```

set f0 [open out0.tr w]
set f1 [open out1.tr w]
set f2 [open out2.tr w]

```

Die Tracefiles werden geöffnet und ihren Handles zugewiesen.

```

proc finish {} {
    global f0 f1 f2
    #Close the output files
    close $f0
    close $f1
    close $f2
    #Call xgraph to display the results
    exec xgraph out0.tr out1.tr out2.tr -geometry 800x400 &
    exit 0
}

```

Die Prozedur *finish* schließt die Dateien und ruft xgraph auf, um die enthaltenen Simulationsergebnisse in grafischer Form anzuzeigen.

```

proc record {} {
    global sink0 sink1 sink2 f0 f1 f2
    #Get an instance of the simulator
    set ns [Simulator instance]
    #Set the time after which the procedure should be called again
    set time 0.5
    #How many bytes have been received by the traffic sinks?
    set bw0 [$sink0 set bytes_]
    set bw1 [$sink1 set bytes_]
    set bw2 [$sink2 set bytes_]
    #Get the current time
    set now [$ns now]
    #Calculate the bandwidth (in MBit/s) and write it to the files

```

```
puts $f0 "$now [expr $bw0/$time*8/1000000]"
puts $f1 "$now [expr $bw1/$time*8/1000000]"
puts $f2 "$now [expr $bw2/$time*8/1000000]"
#Reset the bytes_ values on the traffic sinks
$sink0 set bytes_ 0
$sink1 set bytes_ 0
$sink2 set bytes_ 0
#Re-schedule the procedure
$ns at [expr $now+$time] "record"
}
```

Die Prozedur *record*, die im Abstand der durch *set time* angegebenen Zeitspanne periodisch aufgerufen wird, erledigt die eigentliche Arbeit. Die Anzahl der empfangenen Bytes an den Senken wird ausgelesen und in den Variablen *bw1*, *bw2* und *bw3* gespeichert. Daraufhin werden diese Werte in die gewünschte Einheit MBit/s umgerechnet und in die zugehörigen Tracefiles geschrieben. Vor dem nächsten Aufruf der Prozedur muss man die Bytewerte noch auf Null zurücksetzen, da nur die momentane Datenrate gemessen werden soll und daher nur die Anzahl der seit dem letzten Prozeduraufruf angekommenen Bytes relevant ist.

2.4 Ausbreitungsmodelle in ns-2

2.4.1 Allgemeines

Ausbreitungsmodelle [ns] werden in ns-2 dazu verwendet, um die Signalstärke eines jeden Paketes beim Empfang zu berechnen. Auf der physikalischen Schicht eines mobilen Knotens ist hierbei ein Schwellwert definiert. Sollte die Signalstärke eines empfangenen Paketes unter dieser Schwelle liegen, so wird das Paket von der MAC-Schicht verworfen. Durch den Einsatz solcher Modelle ist es möglich, die Datenübertragung zwischen mobilen Knoten unter unterschiedlichen äußeren Bedingungen zu simulieren. Hierzu müssen die Modelle Parameter aufweisen, durch deren Manipulation man die Simulation an reale Gegebenheiten wie Hindernisse in der Sichtlinie anpassen kann.

In [KNGLYE04] teilen die Autoren die in allen untersuchten Veröffentlichungen verwendeten Modelle in drei verschiedene Kategorien ein: *Flat Earth*-Modelle, „einfache“ Modelle und „gute“ Modelle. Erstgenannte Modelle basieren auf der Entfernung von Knoten in der kartesischen x-y-Ebene; zwei Knoten können hier perfekt miteinander kommunizieren, wenn sie sich innerhalb der Sendereichweite des jeweils anderen Knotens befinden. Es wird also vorausgesetzt, dass Axiom 4 (siehe Kapitel 2.1) zutrifft; dieses Axiom konnte jedoch von den Autoren bereits experimentell widerlegt werden. *Flat Earth*-Modelle vereinfachen die Realität somit in einem zu großen Maße und sind für die Simulation der dynamischen Vorgänge in komplexen drahtlosen Netzwerken nicht gut geeignet.

Einfache Modelle sind größtenteils die Modelle aus ns-2, auf die in diesem Kapitel noch genauer eingegangen werden soll. Es handelt sich hierbei um das *free-space*-Modell, das *two-ray-ground*-Modell und das *shadowing*-Modell. Die Modellierung der Signalausbreitung ist hier wesentlich realistischer als bei *Flat Earth*-Modellen, beispielsweise werden Paketverzögerungen oder durch Interferenzen verursachte Verluste berücksichtigt. Die Signalstärke kann also nicht, wie zuvor, durch eine von der Entfernung abhängige Sprungfunktion beschrieben werden. Die Modelle werden jedoch als „einfach“ bezeichnet, da

sie immer noch von einigen der fragwürdigen Axiome ausgehen, die in Kapitel 2.1 beschrieben wurden.

Gute Modelle zeichnen sich dadurch aus, dass sie die Gegebenheiten des Terrains wie Bäume, Hügel oder Wände sehr detailliert modellieren. Die Erstellung solcher Modelle ist jedoch sehr aufwändig; beispielsweise müssen eine zahlreiche Parameter berücksichtigt und viele Daten über die Umgebung gesammelt werden. Eingesetzt werden sie vor allem bei der Simulation zellulärer Netze, z. B. in [ER00]; im MANET-Bereich finden sie selten Verwendung.

2.4.2 Das free-space-Modell

Das *free-space*-Ausbreitungsmodell geht von einer idealen Sichtlinie zwischen dem sendenden und dem empfangenden Knoten aus. Die Signalstärke ist nur von der Entfernung zwischen den Knoten abhängig (Axiom 5); sie fällt mit dem *Quadrat der Entfernung*. Einflüsse des Terrains oder Fading werden jedoch nicht modelliert, wodurch dieses Modell für komplexe Simulationen kaum besser geeignet ist als ein *Flat Earth*-Modell. Die Sendereichweite ist als kreisrundes Gebiet um den Sender dargestellt, da die Signalstärke in alle Richtungen gleichmäßig abnimmt.

Berechnet wird die Signalstärke am Empfänger durch folgende Gleichung nach Friis:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (2.1)$$

P_t ist hierbei die Stärke des übertragenen Signals am Sender. G_t und G_r sind die Antennengewinne des Senders und Empfängers. L ist der Systemverlust und λ die Wellenlänge. G_t , G_r und L werden bei ns-Simulationen üblicherweise auf den Wert 1 gesetzt.

Die Verwendung des Modells wird im OTcl-Skript durch das Kommando *node-config* festgelegt:

```
$ns_ node-config -propType Propagation/FreeSpace
```

2.4.3 Das two-ray-ground-Modell

Die direkte Sichtlinie zwischen zwei mobilen Knoten stellt nur selten die einzige Möglichkeit zur Signalausbreitung dar. Das *two-ray-ground*-Modell berücksichtigt neben dem direkten Pfad auch noch den Weg, den ein am Boden reflektiertes Signal nimmt.

Die Signalstärke am Empfänger wird mit folgender Formel berechnet:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L} \quad (2.2)$$

h_t und h_r sind hier die Höhen der Antennen von Sender und Empfänger, die anderen Größen entsprechen denen des *free-space*-Modells.

In obiger Gleichung zeigt sich ein schnellerer Energieverlust über ansteigende Entfernung als in Gleichung (2.1). Für kurze Distanzen liefert das Modell keine guten Resultate, was durch Oszillationen aufgrund der Interferenzen zwischen beiden Strahlen zurückzuführen ist. Daher ist es für typische MANET-Szenarios nicht besonders gut geeignet. Seine Stärke liegt vor allem in der Simulation der Signalstärke über Entfernungen von einigen Kilometern für zelluläre Mobilfunksysteme mit hohen Sendemasten (über 50 Meter). Für solche Szenarien sind die in diesem Modell nach wie vor vorhandenen Vereinfachungen (flaches Gebiet, kreisförmige Sendereichweite, keine Modellierung von Hindernissen) akzeptabel.

Die Distanz d_c , ab der eine Verwendung dieses Modells sinnvoll ist (*cross-over distance*), kann folgendermaßen berechnet werden:

$$d_c = (4\pi h_t h_r) / \lambda \quad (2.3)$$

Die Verwendung des Modells wird im OTcl-Skript durch das Kommando *node-config* festgelegt:

```
$ns_ node-config -propType Propagation/TwoRayGround
```

2.4.4 Das shadowing-Modell

Bei den beiden vorhergehenden Modellen wurde die Signalstärke als deterministische Funktion der Entfernung modelliert und die Kommunikationsreichweite durch einen idealen Kreis dargestellt. Das *shadowing*-Modell hingegen stellt die empfangene Signalstärke als Zufallsvariable dar. Dieser nichtdeterministische Effekt kommt in der Realität durch Mehrwegeausbreitung zustande und wird auch als *fading* bezeichnet. Auch störende Hindernisse sollen durch dieses Modell in der Simulation berücksichtigt werden.

Eine Schwäche des *shadowing*-Modells in ns-2 liegt darin, dass Korrelationen nicht berücksichtigt werden. Ein realer Shadowing-Effekt weist hingegen starke Korrelationen zwischen zwei Stellen auf, die räumlich nahe beieinander liegen [KNGLYE04].

Das Modell besteht aus zwei Teilen. Den ersten Teil bezeichnet man als *path-loss*-Modell; auch hier wird die mittlere Signalstärke über die Entfernung d berechnet, die in Gleichung (2.4) als $P_r(d)$ bezeichnet wird. Die Distanz d_0 dient als Referenz, $P_r(d)$ wird relativ zu $P_r(d_0)$ berechnet:

$$\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} = \left(\frac{d}{d_0} \right)^\beta \quad (2.4)$$

Der Parameter β heißt *path loss exponent*. Große Werte bedeuten mehr Hindernisse in der Sichtlinie von Sender und Empfänger und somit eine stärkere Verringerung der Signalstärke bei steigender Entfernung. Der Wert des Parameters wird durch Messungen und deren Simulation bestimmt. In Tabelle (2.1) sind typische Werte für den Exponenten in verschiedenen Terrains zu finden.

Umgebung	path loss exponent
Hindernisfreie Umgebung im Freien	2
Urbanes Terrain	2.7 bis 5
Freie Sichtlinie in Gebäude	1.6 bis 1.8
In Gebäude mit Hindernissen	4 bis 6

Tabelle 2.1 : Typische Werte für den Parameter β

Üblicherweise wird das *path-loss*-Modell in logarithmischer Form dargestellt, die relative Signalstärke hat dann die Einheit dB.

$$\left[\frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.5)$$

Der zweite Teil des *shadowing*-Modells stellt Varianzen der Signalstärke über eine feste Distanz dar. Das gesamte Modell wird durch folgende Formel beschrieben:

$$\left[\frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{dB} \quad (2.6)$$

Bei X_{dB} handelt es sich um eine gauss-verteilte Zufallsvariable mit dem Erwartungswert Null und der Standardabweichung σ_{dB} . Diese Standardabweichung stellt einen weiteren Parameter des Modells dar und wird als *shadowing deviation* bezeichnet. Tabelle (2.2) enthält einige typische Werte für σ_{dB} .

Umgebung	shadowing deviation
Im Freien	4 bis 12
Bürogebäude, stark abgetrennte Räume	7
Bürogebäude, schwach abgetrennte Räume	9.6
Fabrik, freie Sichtlinie	3 bis 6
Fabrik, mit Hindernissen	6.8

Tabelle 2.2 : Typische Werte für den Parameter σ_{dB}

Das *shadowing*-Modell modelliert die Sendereichweite nicht nur in Form eines idealen Kreises. Die Empfangswahrscheinlichkeiten zwischen Knoten, deren Distanz sich am Rande der Sendereichweite bewegt, sind variabel.

Die Verwendung des Modells wird im OTel-Skript wiederum durch das Kommando *node-config* festgelegt:

```
#first set values of shadowing model
Propagation/Shadowing set pathlossExp_ 2.0 ;      # path loss exponent
Propagation/Shadowing set std_db_ 4.0 ;          # shadowing deviation (dB)
Propagation/Shadowing set dist0_ 1.0 ;          # reference distance (m)
Propagation/Shadowing set seed_ 0 ;             # seed for RNG
```

```
$ns_ node-config -propType Propagation/Shadowing
```

Die ersten beiden Codezeilen weisen den Parametern des Modells die gewünschten Werte zu.

2.4.5 Ricean Fading

Zusätzlich zu dem durch die Ausbreitungsmodelle dargestellten *Large-Scale-Fading*, dem Absinken der Signalstärke mit steigender Entfernung (*path loss*) weisen die Graphen, die die gemessene Signalstärke in einem drahtlosen Netzwerk darstellen, je nach Terrain mehr oder weniger große Schwankungen und Peaks auf. Diesen Effekt bezeichnet man als *Small-Scale-Fading*. Bei Vorhandensein einer dominanten Signalkomponente, wie z. B. einer Übertragung mit freier Sichtlinie, wird diese am Empfänger mit verschiedenen abgelenkten oder reflektierten Mehrwegesignalen überlagert. Die sich auf diese Weise ergebende Einhüllende kann mit der *Ricean-Verteilung* [ÖZSP04] beschrieben werden. Die Wahrscheinlichkeitsdichte dieser Verteilung lautet:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2+A^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right), r \geq 0 \quad (2.7)$$

Für $r < 0$ hat die Dichte den Wert 0. Der Parameter A bezeichnet die maximale Amplitude des dominanten Signals, σ^2 ist die Varianz der Mehrwegesignale. I_0 ist die modifizierte Besselfunktion erster Art nullter Ordnung. Sie ist folgendermaßen definiert:

$$I_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{(x/2)^k}{k!} \right]^2 \quad (2.8)$$

Zur Festlegung der Stärke des Ricean Fadings dient ein Parameter namens *Ricean K-Faktor*. Er ist definiert als das Verhältnis zwischen der Signalstärke des dominanten Signals und der Varianz der Mehrwegesignale, also durch $K = A^2/(2\sigma^2)$. In Dezibel-Schreibweise sieht die Definition folgendermaßen aus:

$$K(dB) = 10 \log \frac{A^2}{2\sigma^2} \quad (2.9)$$

Eine Verringerung des K-Faktors bewirkt also eine Erhöhung der Varianz der Mehrwegesignale und somit auch einen schwächeren Einfluss des dominanten Signals. Dies

führt zu stärkerem Small-Scale-Fading, also zu höheren Peaks in der Messkurve des empfangenen Gesamtsignals.

Sollte die Amplitude A (und somit auch der K -Faktor) den Wert Null haben, was gleichbedeutend mit einem Verschwinden des dominanten Signals ist, so entartet die Ricean-Verteilung zu einer *Rayleigh-Verteilung*.

Ein weiterer Parameter, der bei den Simulationen in dieser Arbeit berücksichtigt werden soll, ist die *Ricean Velocity* (MaxVelocity). Der Wert dieses Parameters entspricht der maximalen Geschwindigkeit aller Objekte in der Umgebung, zu diesen Objekten zählen die Netzwerkknoten, aber auch alle anderen Arten von Objekten. Zweck dieses Parameters ist die Bestimmung des Dopplerspektrums.

Die Verwendung von Ricean Fading in ns-2 geschieht durch folgenden OTcl-Code:

```
set val(prop)      Propagation/Ricean      ;# radio-propagation model

set prop_inst [$ns_ set propInstance_]
$prop_inst MaxVelocity 2.5;
$prop_inst RiceanK    6;
$prop_inst LoadRiceFile "rice_table.txt";
```

Die Datei *rice_table.txt* enthält Daten, die zur Berechnung der Einhüllenden erforderlich sind; sie muss nicht verändert werden.

2.5 Andere Faktoren

In diesem Kapitel geht es um einige Faktoren, die bei der Durchführung von Simulationen drahtloser Netzwerke von großer Bedeutung sein können, im Rahmen dieser Arbeit jedoch vernachlässigt werden konnten. Sie sollen hier kurz beschrieben werden.

2.5.1 Bewegungsmodelle

Drahtlose Netzwerke sind meistens nicht statisch; die mobilen Knoten befinden sich oftmals in ständiger Bewegung. Dieser Aspekt ist natürlich auch in der Simulation solcher Netzwerke zu berücksichtigen, die Bewegungen der Knoten sollten möglichst realitätsnah modelliert werden. Eine Möglichkeit besteht hierbei darin, die Bewegungsmuster der Knoten bereits vor Beginn der Simulation festzulegen und den Simulator diese statischen Muster verwenden zu lassen. Dies erfordert zwar weniger Rechenleistung während der Simulationsläufe, jedoch ist der Aufwand im Vorfeld umso größer, da man sich sinnvolle Bewegungsmuster ausdenken muss, die die Realität ausreichen widerspiegeln und somit aussagekräftige Ergebnisse liefern können.

Diese Schwierigkeiten ergeben sich nicht, wenn die Bewegungsmuster erst zur Laufzeit der Simulation berechnet werden. Zu diesem Zweck werden *Bewegungsmodelle* eingesetzt. Sehr häufig verwendet man das *random-waypoint*-Modell. Wie der Name bereits verrät, werden hier die Bewegungen zufällig generiert. Zu Anfang einer Simulation wird für jeden Knoten der Standort innerhalb des simulierten Areals zufällig festgelegt. Nach Beginn der Simulation wählt der Simulator für jeden Knoten ein zufälliges Ziel aus, auf das sich dann mit einer innerhalb vorher festgelegter Grenzen zufällig ausgewählten Geschwindigkeit zu bewegt wird. Die Geschwindigkeiten werden unter Verwendung einer statistischen Verteilung

festgelegt, beispielsweise können sie gleichverteilt sein. Für ebene und hindernisfreie Umgebungen eignet sich dieses Modell recht gut, in urbanen Terrains kann es aber zu unrealistischem Verhalten führen, da Knoten die Umgebung nicht berücksichtigen und sich somit einfach durch Gebäude bewegen anstatt einen Weg um diese Hindernisse zu suchen.

Realistischere Bewegungsmuster in solchen Terrains erzeugt das *city-motion*-Modell [GKL04]. Knoten, die auf dem Weg zu ihrem Ziel ein Gebäude erreichen, wählen mit einer Wahrscheinlichkeit von 80% ein neues Ziel und bleiben außerhalb des Gebäudes. Ansonsten behalten sie ihre Richtung bei und bewegen sich in das Gebäude. Innerhalb von Gebäuden zeigen sie ähnliches Verhalten. Knoten, die dort auf eine Wand treffen, wählen mit einer Wahrscheinlichkeit von 80% ein neues Ziel und bleiben im Gebäude. Andernfalls verlassen sie es. Die Bewegungsmuster sind hier recht realitätsnah, da die Knoten nicht ständig Gebäude betreten und wieder verlassen.

In [MHM] wird ein weiterer interessanter Ansatz präsentiert: ein Bewegungsmodell, das auf der Theorie sozialer Netzwerke basiert. Ziel ist die realitätsnahe Modellierung der Bewegungen „menschlicher Knoten“, wie z. B. Personen mit WLAN-Notebooks oder PDAs. Eine große Rolle spielt die Neigung von Menschen, miteinander gesellschaftlich zu verkehren, da dies einen starken Einfluss auf deren Bewegung hat. Wichtigster Aspekt ist hierbei die Bewegung in und zwischen Gruppen, deren Zusammensetzung stark von den Beziehungen zwischen den Leuten, die die Geräte tragen und somit das MANET bilden, abhängt. Erster Schritt in der Erstellung des Modells ist die Modellierung des Grades der sozialen Interaktion zwischen jeweils zwei Individuen; dies geschieht in Werten von 0 bis 1. Zu berücksichtigen ist hier, dass die Interaktionen auch mit örtlicher Nähe zwischen den Personen einhergehen. Die auf diese Weise festgelegten Interaktionen dienen zur Erstellung der Interaktionsmatrix M , in der Interaktionsgrad zwischen allen Individuen abgelesen werden kann. Die Matrix ist symmetrisch, alle Elemente der Diagonale haben den Wert 1 (Interaktionsgrad einer Person mit sich selbst). Aus den Elementen der Matrix kann der Geselligkeitsfaktor eines jeden Individuums berechnet werden. Danach werden die Personen in verschiedene Gruppen eingeteilt, Geselligkeitsfaktor und Interaktionsgrad stellen die Berechnungsgrundlage für diese Einteilung dar. Gruppen bewegen sich in Mustern, die mit dem *random-waypoint*-Modell erzeugt werden, gleiches gilt für Individuen innerhalb einer Gruppe. Die Zusammensetzung der Gruppen ist dynamisch; durch auf Geselligkeitsfaktoren oder Anziehungen von Gruppen basierende Berechnungen wird festgelegt, ob ein Individuum in der Gruppe verbleibt, sich einer anderen Gruppe anschließt oder sich alleine weiterbewegt.

2.5.2 Energieverbrauch

Ein weiterer Punkt, den man bei Simulationen von MANETs häufig in Betracht ziehen muss, ist die Modellierung des Energieverbrauchs der Netzwerkknoten. Verschiedene Faktoren [HBEI01] können hierbei berücksichtigt werden:

- Erfolgreich gesendete oder empfangene Pakete verursachen Energiekosten
- Berücksichtigung der Kosten auf MAC-Ebene (z. B. erfolglos gesendete oder empfangene Pakete, CTS/RTS)
- Verbrauchte Energie beim Abhören des Mediums, ohne zu senden oder zu empfangen (*idle-time*)
- Von der Übertragung unabhängige Kosten (Bildschirm, CPU, Laufwerke etc.)
- Batteriemodelle

Viele dieser Aspekte können oftmals vernachlässigt werden, z. B. werden übertragungsunabhängige Faktoren als feste Größe angesehen. Der erforderliche Detailgrad

eines Modells für den Energieverbrauch hängt also stark von dem Ziel der Simulationsstudie ab.

Als wichtiger Punkt hat sich in den von den Autoren in [HBEI01] untersuchten Simulationen allerdings die Berücksichtigung der *idle-time* herausgestellt. Die Simulation von vier verschiedenen Ad-Hoc-Routingprotokollen (AODV, DSR, DSDV und TORA) ergab, dass *on demand* Protokolle bei Verwendung eines einfachen Energiemodells wesentlich weniger Energie verbrauchen als die anderen Protokolle. Dies lässt sich damit erklären, dass solche reaktiven Protokolle nur dann Routen zwischen zwei Knoten berechnen, wenn diese auch angefordert werden. Proaktive Protokolle erstellen und aktualisieren jedoch ständig Routen, was zu einem höheren Energieverbrauch führt. Unter Verwendung eines Energiemodells, das die *idle-time* berücksichtigt, weisen die Knoten jedoch bei allen Protokollen einen ähnlich hohen Energieverbrauch auf, da sie nun ständig Energie verbrauchen und nicht nur beim Senden und Empfangen. Falsche Werte in der Simulation, die durch ein zu stark vereinfachtes Modell zustande kamen, können zu einem unrealistischen Verhalten der Protokolle führen. Durch die verminderte Sendeleistung oder den Ausfall eines Knotens in der Realität aufgrund mangelnder Energie sind unter Umständen mehrere Routen nicht mehr verfügbar; einfache Modelle, deren berechneter Energieverbrauch zu niedrig ist, berücksichtigen diesen Umstand möglicherweise nicht und führen so zu einem von der Realität abweichendem Verhalten des Routingverfahrens in der Simulation. Messungen des Energieverbrauchs unter verschiedenen MAC-Protokollen führten zu ähnlichen Ergebnissen; auch hier führt die Nichtberücksichtigung der *idle-time* beim qualitativen Vergleich der Protokolle zu falschen Schlussfolgerungen.

In dieser Arbeit muss der Energieverbrauch aufgrund der kurzen Dauer der vorgesehenen Messläufe nicht berücksichtigt werden.

2.5.3 Modellierung der physikalischen Schicht

Simulationen, die zur Bewertung von Geräten oder Protokollen in drahtlosen Netzwerken eingesetzt werden, konzentrieren sich oft nur auf die Darstellung der Vorgänge in den höheren Schichten und vernachlässigen die Details der Modellierung unterer Schichten. Es gibt jedoch bei der Modellierung der physikalischen Schicht einige Faktoren, die die Simulationsergebnisse deutlich beeinflussen können [TMB01]:

- Die Länge der *physical layer preamble* hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Verhalten höherer Protokolle. Im IEEE 802.11 Standard erfordert die Präambel eine feste Zeitdauer, was bei höheren Bitraten zu entsprechend höherem Overhead führt. Eine Berücksichtigung dieses Aspektes ist also entscheidend für die Berechnung der Übertragungsdauer von Signalen.
- Die Berechnung der Interferenzen und des Rauschens an jedem empfangenden Knoten stellt einen kritischen Faktor bei der Modellierung dar. Berechnet wird hierbei die Summe aller Signale auf dem Kanal, die nicht empfangen werden sollen, und des thermischen Rauschens. Die sich daraus ergebene Energie bildet die Grundlage für die SNR (*Signal-to-Noise-Ratio*), die die Wahrscheinlichkeit des erfolgreichen Empfangs eines Datenrahmens festlegt. Es werden üblicherweise zwei Signalempfangsmodelle verwendet: das SNR-Schwellen-basierte Modell, in dem nur Signale akzeptiert werden, deren SNR über einem Schwellwert liegt, und das BER-Modell (*Bit-Error-Rate*), das probabilistisch entscheidet, ob ein Rahmen erfolgreich empfangen wird.

- Ausbreitungsmodelle (*Fading* und *Path Loss*) werden in [TMB01] ebenfalls als wichtige Faktoren genannt, da sie die Eingabedaten der physikalischen Modelle bestimmen und somit großen Einfluss auf deren Verhalten und Leistung haben.

Von den Autoren durchgeführte Experimente zeigen, dass diese Faktoren in der Tat einen großen Einfluss auf das Verhalten der simulierten Protokolle haben. Simulationen eines MANET mit unterschiedlichen Größen (Anzahl der Knoten) und Bitraten unter Verwendung des Routingprotokolls DSDV ergaben beispielsweise einen Abfall der Paketübermittlungsrate von bis zu 7.2 %, wenn die in ns-2 voreingestellte Präambeldauer (96 Mikrosekunden) auf die im Standard festgelegte Dauer von 192 Mikrosekunden erhöht wird. Die aus dieser Erhöhung resultierende längere Transmissionsdauer führt zu Überläufen von Warteschlangen und somit zu einer erhöhten Anzahl an verworfenen Paketen. Nichtberücksichtigung der Präambel kann also zu erhöhten Durchsatzraten führen. Simulationen mit dem Routingprotokoll AODV zeigen bei Erhöhung der Präambellänge einen starken Abfall der Paketübermittlungsrate (teilweise um über 25%).

Die beschriebenen Effekte treten hauptsächlich in großen, dynamischen MANETs auf, bei den in dieser Arbeit durchgeführten Messungen konnten sie vernachlässigt werden.

2.5.4 Andere Simulatoren für drahtlose Netzwerke

Neben dem in dieser Arbeit verwendeten ns-2 gibt es noch andere Simulatoren, die in den verschiedenen Veröffentlichungen zum Einsatz kamen. Jeder dieser Simulatoren verwendet vergleichbare Komponenten wie Kollisionserkennung, Ausbreitungsmodelle oder MAC-Protokolle und hält sich auch an identische Standards. Die Modellierung und Implementierung der Komponenten kann jedoch bei verschiedenen Simulatoren unterschiedlich sein, gleiches gilt für Parameter und deren Initialwerte. Die Autoren von [CSS02] befassen sich mit der Frage, ob verschiedene Simulatoren bei identischem Szenario auch vergleichbare Ergebnisse liefern oder ob es zu Unterschieden kommt. Neben ns-2 wird hier das Verhalten der Simulatoren OPNET und GloMoSim untersucht.

Bei OPNET handelt es sich um einen leistungsfähigen Simulator, der alle Arten von drahtgebunden Netzwerken simulieren kann und auch eine Implementierung der MAC-Schicht gemäß 802.11 bietet. Obwohl der Simulator in erster Linie für Firmen gedacht ist, die eine Diagnose oder Neuorganisation ihrer Netzwerke vornehmen wollen, so kann man doch auch eigene Algorithmen implementieren. Erleichtert wird diese durch eine Vielzahl an bereits existierenden Komponenten und eine grafische Benutzeroberfläche. Der Nachteil von OPNET liegt darin, dass neue Features durch endliche Zustandsmaschinen, die schwierig zu erstellen und zu validieren sind, beschrieben werden müssen.

GloMoSim ist eine skalierbare Simulationsumgebung für drahtlose und drahtgebundene Netzwerke, die zu paralleler, ereignisdiskreter Simulation fähig ist. Der Aufbau ist in Schichten unterteilt, zu deren Interaktion Standard-APIs zum Einsatz kommen. Dies erlaubt eine schnelle Integration von Modellen. Als schwierig erwies sich die Verwendung einer Applikation, die die meisten OSI-Schichten überbrückt. Die Architektur von OPNET ist wesentlich flexibler.

Die in [CSS02] durchgeführten Simulationen dienen zur Untersuchung des Verhaltens eines Netzwerkes, in dem ein sehr einfacher Flooding-Algorithmus zum Einsatz kommt. Jeder Knoten leitet ein zum ersten Mal empfangenes Paket an alle Nachbarn weiter. Das Bewegungsmodell ist *random waypoint*, als Ausbreitungsmodell kommt *free-space* zum Einsatz.

Die Ergebnisse zeigen sehr unterschiedliches Verhalten der verschiedenen Simulatoren. Die simulierte Erfolgsrate (Verhältnis zwischen empfangenen und erwarteten Paketen) ist beispielsweise stark von der Sendereichweite abhängig. Unter OPNET und ns-2 liegt sie bei geringer Reichweite fast bei Null und erhöht sich erst bei steigender Reichweite; bei OPNET steigt die Erfolgsrate sehr schnell und erreicht schließlich fast 100%, während unter ns-2 nur etwa 45% erreicht werden. Die Simulationen der Größen Erfolgsrate, Overhead und Verzögerung in Abhängigkeit von der Maximalgeschwindigkeit eines Knotens führen zwar zu größtenteils konstanten Werten, die sich jedoch je nach Simulator sehr stark unterscheiden. OPNET simuliert z. B. eine wesentlich höhere Verzögerung als die anderen Simulatoren.

Auch hier zeigen die Simulationsergebnisse, dass abweichende Modellierungen des MAC-Protokolls und der physikalischen Schicht zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Oftmals werden diese Unterschiede gar nicht bemerkt, da die Verwendung mehrerer Simulatoren in Rahmen von umfangreichen Simulationsstudien zu zeitaufwändig ist. Weitere Gründe für die unterschiedlichen Ergebnisse liegen in der Implementierung der Protokolle, die mit unterschiedlichen Techniken vorgenommen und integriert werden müssen, sowie in möglichen Bugs in der Software.

3. Bereits vorhandene Forschungsarbeiten

3.1 Allgemeine Bemerkungen

Zu Beginn wurden alle angegebenen sowie gefundenen Veröffentlichungen, in deren Rahmen Simulationen drahtloser Netzwerke durchgeführt wurden, auf unterschiedliche Merkmale wie verwendete Szenariodaten, Simulatoren, Protokolle oder Ausbreitungsmodelle untersucht. Die Ergebnisse sind in Form einer Tabelle festgehalten, die in Anhang D zu finden ist. Ein großer Teil dieser Papers befasst sich mit der Untersuchung der Performance von Ad-Hoc-Routingprotokollen; hierzu wurde das Verhalten eines Netzwerks unter Verwendung verschiedener Protokolle simuliert und die erhaltenen Ergebnisse miteinander verglichen. Als Simulator kam meistens ns-2 zum Einsatz.

Bezüglich des Themas dieser Arbeit, in der es um den Vergleich zwischen Simulation und Realität geht, sind die untersuchten Veröffentlichungen jedoch kaum ergiebig. Dies liegt daran, dass die durchgeführten Simulationen meist nicht durch reale Experimente validiert wurden. Somit erhält der Leser keine Informationen darüber, wie nahe die Simulationsergebnisse an der Realität liegen. Der hauptsächliche Grund für diesen Mangel an Experimenten ist sicherlich der große Aufwand; eine erhebliche Menge an Ressourcen wie Zeit, Geld, Hardware oder Mitarbeiter wäre für eine vernünftige Durchführung komplexerer Versuche erforderlich. Der Nutzen der zu gewinnenden Ergebnisse ist offensichtlich nicht groß genug, um den Einsatz dieser Ressourcen zu rechtfertigen. Besonders gilt dies bei der Untersuchung von Routingprotokollen, wo die simulierten Netzwerke bis zu 200 Knoten haben können.

Eine weitere denkbare Ursache für den Mangel an experimenteller Validation könnte darin liegen, dass die Forschungsgemeinde sich das Bild von Simulationen als hinreichend genaue Abbildungen der Realität bewahren will. Computersimulationen sind - wie in vielen anderen Forschungsbereichen der Informatik - auch im Bereich der mobilen Ad-Hoc-Netzwerke ein nicht mehr wegzudenkendes Mittel zur Erforschung und Bewertung neuer Technologien und Verfahren. Würde man durch eine genauere Untersuchung feststellen, dass die von gängigen Netzwerksimulatoren gelieferten Ergebnisse nicht so nahe an der Realität liegen und somit auch nicht so aussagekräftig sind wie angenommen und erwünscht, so könnte dies in der Forschungsgemeinde zu einer Desillusionierung führen. Möglicherweise ist dies auch eine Erklärung für die in [PJR01] thematisierte Glaubwürdigkeitskrise von Simulationsstudien.

3.2 Simulation einfacher Umgebungen

In [HBEI01] ist die experimentelle Validation einer Simulation einer einfachen Umgebung zu finden. Es kommt ein einfaches, idealisiertes Ausbreitungsmodell zum Einsatz, das bei allen Funkknoten von einer identischen, sphärischen Signalausbreitung ausgeht. Eine Sendereichweite eines Knotens von 8.84 Metern wurde empirisch festgestellt, hierbei galten der sendende und messende Knoten bei 90% empfangenen Paketen als verbunden. Die experimentelle Überprüfung fand auf einem Parkplatz mit den Abmessungen 10m x 10m, in dessen Ecke der Sendeknoten platziert war, statt. Auf der ganzen Fläche wurde über ein Raster von Messpunkten mit Abständen von einem Meter die Konnektivität gemessen. Das Ergebnis fiel recht gut aus, bei 68 Messpunkten entsprach das gemessene Ergebnis der Simulation, nur 10 Punkte lieferten ein abweichendes Ergebnis. Dieses Experiment zeigt, dass einfache Modelle für die Simulation von Terrains begrenzter Größe mit freier Sichtlinie und ohne Hindernisse recht gut geeignet sind. Für diese Arbeit ist dieses Ergebnis jedoch nur von partieller Bedeutung, da auch Messungen in weitaus komplexeren Terrains mit zahlreichen Hindernissen und Störfaktoren vorgesehen sind.

3.3 Vergleich von Routingprotokollen durch Experiment und Simulation

In [GKND0] führen die Autoren einen Vergleich der Routingprotokolle APRL, AODV, ODMRP und STARA durch. Im Gegensatz zu vergleichbaren Veröffentlichungen, wo die Performance der Protokolle nur anhand von Simulationsergebnissen verglichen wird, wurden hier reale Experimente durchgeführt, die auf einem Sportplatz mit den Abmessungen 225m x 365m unter Verwendung von 33 Notebooks als Netzwerkknoten stattfanden. Für jedes Routingprotokoll dauerten die vorgenommenen Messungen 15 Minuten, wobei sich die Teilnehmer des Experiments mit den Notebooks in zufälligen Bahnen bewegten. Auch in geschlossenen Räumen wurden Messungen durchgeführt.

Für die Simulationsläufe wurde sorgfältig darauf geachtet, dass sie unter gleichen Bedingungen stattfinden wie die Experimente. Beispielsweise sorgten *aufgezeichnete GPS-Informationen* für ein originalgetreues Verhalten des simulierten Netzwerkes. Auch die verwendeten Routingparameter waren die gleichen wie im Experiment. Hierdurch sollte erreicht werden, dass das Verhalten des drahtlosen Kanals den Hauptunterschied zwischen den Experimenten und der Simulation darstellt. Der verwendete Simulator ist allerdings nicht der verbreitete ns-2 sondern SWAN, ein Simulator für drahtlose Ad-Hoc-Netze, der eine flexible Umgebung zur Simulation von Routingprotokollen in größeren Netzen bietet. Als Ausbreitungsmodelle kamen free-space, two-ray-ground und ein generisches Modell zum Einsatz. Die Paketübermittlungsrate diente als Vergleichsgröße für das Verhalten der Protokolle in realem Experiment und Simulation.

Das einfache generische Modell konnte die Leistung der Routingprotokolle in akzeptablem Maße vorhersagen. Die Verwendung unterschiedlicher Ausbreitungsmodelle führte jedoch teilweise zu äußerst unterschiedlichem Verhalten der Protokolle. Bei Vergleich zwischen AODV und ODMRP kann es beispielsweise zu falschen Schlussfolgerungen bezüglich der Leistung beider Protokolle kommen; ODMRP erreichte im realen Experiment eine wesentlich höhere Übermittlungsrate als AODV, in der Simulation unter Verwendung des two-ray-ground-Modells ist sie jedoch geringer. Die aus den Ausbreitungsmodellen resultierenden Ungenauigkeiten sind uneinheitlich und können somit das Ergebnis einer Vergleichsstudie stark verfälschen. Besonders bei dem free-space- und two-ray-ground-Modell lässt sich diesbezüglich eine große Anfälligkeit beobachten. Genauere Simulationsergebnisse sind wohl nur zu gewinnen, wenn man auf komplexere Modelle zurückgreifen kann.

Die Autoren zeigen hier, dass die gängigen Simulationsmodelle die Realität nicht mit vollkommener Genauigkeit beschreiben und die gewonnenen Ergebnisse der Simulation stark vom verwendeten Modell abhängig sein können. Diese Erkenntnis sollte auch bei den in dieser Arbeit durchzuführenden Simulationen berücksichtigt werden.

4. Template für die Protokollierung der Experimente

Die ausgefüllten Templates für die Experimente im Rahmen dieser Arbeit sind im Anhang C zu finden.

4.1 Allgemeines

Hier wird kurz beschrieben, was mit diesem Experiment gezeigt werden soll und wie die Durchführung aussehen soll. Zur späteren Identifikation erhält das Experiment außerdem einen Namen und eine eindeutige ID-Nummer. Auch Ort, Datum und Uhrzeit werden hier genannt.

4.2 Exakte Beschreibung

Hier finden sich genaue Informationen über Aufbau, Planung und benötigte Infrastruktur. Alle Informationen, die notwendig sind, um das Experiment zu reproduzieren, sollten hier festgehalten werden.

4.2.1 Aufbau

- Verwendete Hardware:
Beschreibung der verwendeten Hardwareplattformen und deren Infrastruktur (Art der Hardware, Anzahl, technische Daten, Leistungsmerkmale...)
- Verwendete Software:
Welche Software wird zur Durchführung des Experiments eingesetzt? Welche Parameter werden übergeben? Wie sieht die Softwareinfrastruktur aus? Die Funktionsweise der Software sollte kurz beschrieben werden. Auf welchem Betriebssystem lief sie und welche Treiber wurden eingesetzt?
- Geplante Durchführungsorte
Angaben über die geplanten Orte für die Durchführung des Experiments. Auch die Beschaffenheit des Terrains (flach/hügelig, Bäume, Gebäude...) wird beschrieben.

4.2.2 Anzahl Personen

Aufzählung der bei der Durchführung des Experiments beteiligten Personen und deren Aufgabenbereiche bzw. Funktionen.

4.2.3 Ablauf

Informationen über den geplanten konkreten Ablauf des Experiments. Beschreibung der Topologie des zu untersuchenden MANETs und der Bewegungsmuster der einzelnen Knoten.

4.2.4 Dauer des Experiments und Anzahl Wiederholungen

Hier wird beschrieben, wie lange die Messungen dauern sollen und wie viele Wiederholungen zur Gewinnung weiterer Messreihen geplant sind.

4.2.5 Checkliste

In dieser Liste sind alle durchzuführenden Messläufe aufgeführt. Es soll zur besseren Übersicht für die durchführenden Personen jede bereit durchgeführte Messreihe abgehakt und somit als „erledigt“ markiert werden.

4.2.6 Mögliche äußere Einflüsse und Fehlerquellen

Beschreibung von Fehlerquellen und äußeren Einflüssen, die bei der Durchführung des Experiments zu erwarten sind. Beispiel hierfür wären Bäume, Gebäude, Personen, Fahrzeuge oder auch Interferenzen von anderen WLANs.

4.3 Durchführung

Es wird der Verlauf der Experimentdurchführung beschrieben, insbesondere die dabei aufgetretenen Fehler und Probleme.

4.3.1 Ort & Zeit

An welchem Ort und um welche Uhrzeit wurde das Experiment durchgeführt? Abweichungen von weiter oben gemachten Angaben sind möglich, da unvorhergesehene Ereignisse die Durchführung in der ursprünglich geplanten Form verhindern können.

4.3.2 Dauer

Wie lange dauerte die Durchführung des Experiments? Auch hier kann es durch auftretende Probleme zu Abweichungen von der geplanten Dauer kommen.

4.3.3 Wetterverhältnisse

Beschreibung der Wetterverhältnisse bei outdoor-Experimenten (sonnig, bewölkt, Nebel, Schnee etc.). Ist die Funktion der verwendeten Hardware hierdurch beeinträchtigt?

4.3.4 Äußere Einflüsse und Fehlerquellen

Beschreibung von externen Einflüssen, die bei der Durchführung des Experiments zu Fehlern oder Problemen führten (z.B. Fahrzeuge oder Personen). Wurden sonstige Besonderheiten beobachtet?

4.3.5. Probleme mit Software / Hardware

Gab es Probleme, die auf die verwendete Software zurückzuführen sind (z.B. Abstürze Betriebssystem, Überlauffehler, Fehler bei Trafficgenerierung)? Traten Hardwarefehler auf (z.B. versagende WLAN-Karten)? Konnten die auftretenden Probleme gelöst werden? Wenn ja: wie?

4.3.6 Benennung der Logfiles

Name und Speicherort der Logfiles, in denen die gewonnenen Messergebnisse gespeichert sind.

4.4. Gemessene Größen

Erfassung der im Experiment gemessenen Größen.

Beispiele für messbare Größen:

- # empfangene Pakete
- Packet delivery ratio, Success rate, Paketverlustrate
- Latenzzeit/End-to-end-delay
- Durchsatz
- Signalstärke
- Overhead
- # Hops

- # unterbrochene Verbindungen
- Bitfehlerrate
- Energieverbrauch / Laufzeit

4.5. Ansprechpartner

Benennung einer oder mehrerer Person(en) zur Klärung auftretender Fragen.

5. Durchführung des Experiments

5.1 Beschreibung des geplanten Experiments

Ziel dieses Experiments ist die Erstellung eines Modells für den Simulator ns-2 zur Simulation der Datenübertragung zwischen zwei stationären Knoten eines Ad-Hoc-Netzwerkes in unterschiedlichen Outdoor-Umgebungen (Terrains). Es soll beobachtet werden, wie sich unterschiedliche Terrains und unterschiedliche Entfernungen zwischen den beiden als Knoten fungierenden Notebooks auf den gemessenen Datendurchsatz auswirken.

Für die Messungen sind drei verschiedene Terrains vorgesehen:

- **Wiese:** In diesem Terrain soll eine freie Sichtlinie zwischen den Knoten gegeben sein, die von keinen Hindernissen gestört wird. Unter diesen für die Funkverbindung optimalen Bedingungen sind auch über größere Entfernungen zwischen beiden Knoten noch sehr gute Durchsatzwerte zu erwarten.
- **Wald:** Hier sollen die Messungen in einem Waldgebiet stattfinden, wo eine freie Sichtlinie aufgrund multipler Hindernisse (vor allem Bäume und Unterholz) nicht mehr gegeben ist.
- **Parkplatz:** Auch hier ist keine freie Sichtlinie vorhanden, Hindernisse wie parkende Fahrzeuge und Personen behindern die Datenübertragung. Somit ist zu erwarten, dass der Datendurchsatz bereits über geringe Entfernungen messbar abnimmt.

In jedem Terrain sollen Messungen für drei unterschiedliche Bitraten durchgeführt werden: 2, 5.5 und 11 MBit/s. Hiermit wird untersucht, welchen Einfluss das Terrain bei verschiedenen maximalen Bitraten hat. Zu erwarten ist, dass bei höheren Bitraten der Datendurchsatz bereits bei geringeren Entfernungen einbricht.

Für jedes Terrain und jede Bitrate sollen die Messungen über drei verschiedene Abstände zwischen beiden Knoten stattfinden:

- **Entfernung 1:** Die gemessene Durchsatzrate liegt im Bereich zwischen 90% und 100% der maximalen Bitrate. Die Datenübertragung ist also über diese Distanz kaum beeinträchtigt.
- **Entfernung 2:** Abfall auf ca. 40% bis 60%
- **Entfernung 3:** Abfall auf ca. 10% bis 20%, diese Entfernung soll der maximalen Sendereichweite nahe kommen

Für alle Kombinationen aus Terrain, maximaler Bitrate und Distanz sind zwei Messläufe von fünf Minuten Dauer geplant.

Nach der ersten Simulationsphase, die sich an diese Messungen anschließt, wird eine erneute Serie von Messungen mit anderen Abständen zwischen den Knoten und an anderen Orten vorgenommen, um die in der ersten Simulationsphase gewonnen Ergebnisse zu verifizieren und gegebenenfalls zu korrigieren. Zu erwarten ist hier, dass aufgrund der vielfältigen Varianzen bei den äußeren Bedingungen die Messergebnisse von denen in der ersten Messung abweichen. Die Dauer eines Messlaufes wird auf maximal zwei Minuten beschränkt.

5.2 Verwendete Hardware und Software

Als Netzwerkknoten werden zwei mit *Netgear*-WLAN-Karten ausgerüstete Dell-Notebooks der AG Vernetzte Systeme eingesetzt. Ein Notebook nimmt bei der Kommunikation die Rolle

des Clients ein, hier werden die gesendeten Datenpakete von einem Trafficgenerator erzeugt, wobei die gewünschte Bitrate als Parameter anzugeben ist. Hierzu ist für jede verwendete Bitrate ein eigenes Skript vorhanden. Als Protokoll zur Datenübertragung wird UDP verwendet, das Senden der Pakete geschieht im Broadcast-Modus. Während den verschiedenen Messläufen in einem Terrain soll der Client stets stationär bleiben. Das andere Notebook nimmt die Funktion eines Servers ein, der mittels der Software Packetsim ständig den aktuellen Datendurchsatz misst und diese Messergebnisse in einem Logfile abspeichert. Die unterschiedlichen Entfernungen zwischen den Knoten erreicht man durch Variation des Abstandes des Servers vom stationären Client.

Bei der zweiten Serie von Messungen, die zur Verifikation der vorherigen Messergebnisse dient und im Anhang als „Experiment 01b“ bezeichnet wird, kommt auf dem Server-Notebook zur Messung des Datendurchsatzes nun die Windows-Software *Airokeek* zum Einsatz. Der Vorteil dieser Software liegt neben der dank der grafischen Benutzeroberfläche wesentlich komfortableren Bedienung vor allem darin, dass man viele Zusatzinformationen über die empfangenen Datenpakete erhält. Besonders wichtig ist die Information über die Quelle des Paketes, denn so ist auf einfache Weise feststellbar, ob andere WLANs einen störenden Einfluss auf die Datenübertragung einüben und das Messergebnis verfälschen. Die Software verfügt über zahlreiche Paketfilter, mit denen sich z. B. solche Fremdpakete aus der Messung ausblenden lassen. Die Anzeige des gemessenen Datendurchsatzes erfolgte im Gegensatz zur in der ersten Versuchsreihe verwendeten Software in der Einheit Bytes/s, was bei den späteren Simulationsläufen keinen direkten Vergleich mit den simulierten Ergebnissen zuließ, sondern Umrechnungen erforderlich machte.

Das stationäre Client-Notebook war bei der zweiten Serie (Experiment 01b) zunächst mit einem *Prism2*-basierten WLAN-Adapter ausgerüstet. Dies führte jedoch zu einer wesentlich geringeren Übertragungsrate als zuvor, selbst als Client und Server direkt benachbart waren. Zurückzuführen ist dieses Verhalten vermutlich auf die Treibersoftware oder die Firmware der Prism2-Karte. Da es mit dieser Karte außerdem zu häufigen Zusammenbrüchen der Verbindung kam, wurde nach einigen Messreihen wieder die gewohnte Netgear-Karte im Client eingesetzt, was zu den gewohnten höheren Übertragungsraten führte. In der Simulationsphase ist daher zu bedenken, dass die Messergebnisse nicht direkt vergleichbar sind; die je nach Adapter unterschiedlichen Durchsatzraten müssen berücksichtigt werden.

5.3 Auswahl der Terrains

5.3.1 Wiese

Dieses Terrain soll optimale Bedingungen für die Datenübertragung bieten. Hierzu gehört vor allem eine freie Sichtlinie zwischen den Notebooks, die durch keinerlei Hindernisse gestört wird. Außerdem sollten auch möglichst wenige andere große Objekte wie Bäume oder Gebäude in der Nähe sein, da diese zu unerwünschten Reflexionen führen könnten. Ein derartiges Areal auf dem Universitätscampus zu finden, ist aufgrund der zahlreichen Gebäude und der großzügigen Bepflanzung nicht einfach. Die Wahl fiel in der ersten Serie von Messreihen auf ein Wiesenstück auf dem Universitätsgelände. Jedoch sind die Bedingungen aufgrund der Nähe der Universitätsgebäude und anderer störender Objekte wie einem Viadukt oder dem anliegenden Waldrand nicht optimal. Zudem ist die maximale Entfernung zwischen den Notebooks hier auf etwa 100m begrenzt, da bei größeren Abständen keine freie Sichtlinie mehr gegeben wäre. Für Messungen mit einer Übertragungsrate von 2 MBit/s sind jedoch solche größeren Abstände nötig, da nur dann erkennbare Einbrüche des Datendurchsatzes zu erwarten sind. Für die zweite Serie wurde daher der universitätseigene Sportplatz als Ort der Messungen ausgewählt. Der Vorteil dieser Örtlichkeit liegt zum einen in den möglichen

größeren Abständen zwischen den Knoten (bis ca. 150m) und zum anderen in dem Fehlen von Hindernissen und anderen störenden Objekten, die eine freie Sichtlinie verhindern oder für Reflexionen, Interferenzen und Ähnliches sorgen könnten. Messungen sollten hier nach Möglichkeit zu Tageszeiten stattfinden, an denen der Sportplatz nicht in Benutzung ist bzw. nicht stark frequentiert ist, da Sport treibende Personen einen möglichen Störungsfaktor darstellen.

5.3.2 Parkplatz

Durch die Messungen auf dem Terrain Parkplatz soll untersucht werden, wie stark die Übertragung zwischen den Notebooks durch störende Faktoren wie parkende und fahrende Fahrzeuge oder ein- und aussteigende Personen beeinträchtigt wird. Eine freie Sichtlinie zwischen den beiden Knoten ist hier nicht gegeben, da diese von parkenden Fahrzeugen versperrt wird, welche außerdem für vielfache Reflexionen sorgen. Alle Messreihen für dieses Terrain wurden auf dem größeren der beiden Parkplätze hinter Gebäude 46 durchgeführt, da nur hier die für die Messungen mit 2MBit/s erforderlichen Abstände zwischen den Knoten (bis zu 80m) zu erreichen waren. Während der Messreihen war der Parkplatz stets gut mit parkenden Fahrzeugen besetzt, was im Hinblick auf die Vorgaben für das Experiment wünschenswert war, da bei einem leeren oder spärlich belegten Parkplatz zu wenige störende Einflüsse vorhanden wären und die Bedingungen denen des Terrains Wiese zu ähnlich wären.

5.3.3 Wald

Nun soll betrachtet werden, wie sich der Datendurchsatz zwischen den beiden Notebooks in einem Waldgebiet verhält. Auch in diesem Terrain ist aufgrund vieler Hindernisse, insbesondere Bäumen und Unterholz, keine freie Sichtlinie gegeben. Ähnlich wie im Terrain Parkplatz ist auch hier mit starken Einbrüchen des Datendurchsatzes bereits auf kurze Distanz sowie mit stark variierenden Messergebnissen zu rechnen. Für die erste Serie von Messungen wurde ein Waldstück nahe des Universitätscampus gewählt, wo Bäume zwar nicht in übermäßig großer Zahl vorhanden waren, auf dessen Boden aber umgestürzte Baumstämme und Unterholz für eine ausreichende Behinderung der Sichtlinie sorgen, da beide Notebooks sich auf Bodenniveau befanden. Die Messungen der zweiten Serie fanden zunächst in einem anderen Waldstück statt, das sich von vorherigem aufgrund der etwas höheren Anzahl von Bäumen und des Fehlens von Unterholz grundlegend unterscheidet und dessen Boden lediglich mit Laub bedeckt ist. Zudem befanden sich die Notebooks dieses Mal auf höherem Niveau (Client auf Baumstumpf, Server auf Brusthöhe). Unter diesen Bedingungen ergaben sich Messwerte, die sich von denen der ersten Serie deutlich unterscheiden. Der Datendurchsatz ist hier auch bei größeren Entfernungen wesentlich höher und stabiler als im Waldstück aus der ersten Serie, obwohl auch hier wegen der zahlreichen Bäume keine freie Sichtlinie gegeben ist. Das Fehlen anderer Hindernisse wirkt sich auf die Datenübertragung eindeutig positiv aus. Als Folge dieser Messergebnisse wurde die Aufteilung des Terrains in zwei separate Terrains beschlossen. Das erste trägt weiterhin den Namen „Wald“ und bezeichnet das bereits erwähnte Waldstück aus Serie zwei, in dem ausschließlich Bäume Hindernisse darstellen. Das andere neue Terrain erhält den Namen „Unterholz“, hierfür wurde ein Waldstück gewählt, in dem es zahlreiche Hindernisse wie umgestürzte Baumstämme, Hecken und Geäst gibt. Die Notebooks sollen sich hier auf Bodenniveau befinden, damit die Datenübertragung möglichst stark durch die vorhandenen Hindernisse beeinträchtigt wird. Die Auswahl eines passenden Gebietes für dieses Terrain ist insofern problematisch, als dass das Unterholz nicht zu dicht sein darf, da das Gelände sonst nur schwer begehbar ist. Als gut geeignet hat sich ein Waldstück erwiesen, in dem es inmitten des ganzen Unterholzes eine von Hindernissen freie, gut begehbare Zone von 50 Metern Länge gibt. Auf dieser Zone kann die zurückzulegende Entfernung problemlos abgesprochen werden und das Server-Notebook anschließend an einer geeigneten Stelle im angrenzenden Unterholz platziert werden.

5.4 Vorgehensweise bei Durchführung der Messläufe

Dieser Abschnitt geht genauer auf die Vorgehensweise ein, mit der die verschiedenen Messläufe durchgeführt wurden. Prinzipiell war die Vorgehensweise stets identisch, doch gab es einige terrainspezifische Details bei der Durchführung, auf die bei jedem Messlauf geachtet wurde. Hiermit sollte gewährleistet werden, dass die Messungen unter ähnlichen, reproduzierbaren Bedingungen stattfinden und deren Ergebnisse somit vergleichbar sind.

5.4.1 Messungen im Terrain Wiese

Die Messungen der ersten Serie fanden auf der Wiesenfläche hinter Gebäude 48 statt. Um hier freie Sichtlinie zu gewährleisten, darf das Client-Notebook sich nicht auf Bodenniveau befinden, da das Gelände nicht eben, sondern leicht hügelig ist. Nach dem Start der notwendigen Software auf beiden Notebooks für eine Übertragungsrate von 11 MBit/s wurde nun von der Position des Clients ausgehend damit begonnen, die Entfernung zwischen Server und Client abzuschreiten. Eine Schrittlänge entspricht hierbei einem Meter, was natürlich dazu führen kann, dass die auf diese Weise abgeschätzten Entfernungen etwas ungenau sein können. Bei ca. 30 Metern war aufgrund der vom Server ausgegebenen Werte ein leichtes Abfallen des Datendurchsatzes erkennbar, woraufhin über diese Entfernung die ersten beiden Messläufe zu je fünf Minuten durchgeführt wurden. Bereits bei ca. 37 Metern ergab sich ein plötzlicher Abfall auf die halbe Durchsatzrate, was aber nicht plausibel ist und daher als Anomalie gelten muss. Als dritte Entfernung, wo die Sendereichweite an ihre Grenzen stößt, wurde 84 Meter gewählt. In gleicher Art und Weise wurde bei den Messungen für 5.5 MBit/s vorgegangen, es ergaben sich Entfernungen von ungefähr 40, 60 und 95 Metern. Messläufe für 2 MBit/s wurden nicht durchgeführt, da das Gebiet keine ausreichend großen Entfernungen zwischen Server und Client mit freier Sichtlinie zulässt.

Die Messungen der zweiten Serie (Experiment 01b) wurden anfangs ebenfalls auf diesem Terrain durchgeführt, hierbei kam erstmals die neue Software AiropEEK zum Einsatz. Wegen *störenden Fremdpaketen* und anderen Problemen sind die erhaltenen Messergebnisse jedoch nur bedingt brauchbar, zumal auch die Örtlichkeit aufgrund der äußeren Bedingungen nicht optimal ist. Messungen für 5.5 MBit/s wurden hier aus Zeitgründen nicht durchgeführt.

Für die Messläufe auf dem Sportplatz wurde bei beiden Bitraten (2 und 11 MBit/s) einfach ein festes Raster von Entfernungen ausgewählt: 50, 75, 100 und 150 Meter. Letzterer Wert stellt hierbei die größte an diesem Ort mögliche Entfernung dar; aus Zeitgründen wurde hier nur bei 2 MBit/s eine Messung durchgeführt. Auch hier war der Client nicht auf Bodenniveau, hierfür sorgte ein assistierender Mitarbeiter, der das Notebook während der Messläufe in den Händen hielt. Fremdpakete und andere Störfaktoren waren keine zu bemerken. Bei 2 MBit/s war die Verbindung außerordentlich stabil, auch über die Maximalentfernung von 150 Metern gab es keine Einbrüche des Datendurchsatzes; eine höhere Entfernung zwischen den Notebooks, die wohl zu einer Verringerung des Durchsatzes geführt hätte, war nicht möglich.

5.4.2 Messungen im Terrain Parkplatz

Alle Messungen für dieses Terrain fanden auf dem großen Parkplatz hinter Gebäude 46 statt. Der Abstand zwischen beiden Notebooks wurde in längsseitiger Richtung variiert, da nur dann hinreichend große Entfernungen möglich sind und zudem die Fortbewegung zwischen den parkenden Fahrzeugen weitaus einfacher ist. Bei der Auswahl der Strecke für die Durchführung der Messläufe sollte man darauf achten, dass eine große Anzahl an parkenden Fahrzeugen für eine auszeichnende Behinderung der freien Sichtlinie sorgt. Der Client wurde am Rand des Parkplatzes hinter einem parkenden Fahrzeug platziert, wo er von vorbeikommenden Personen nicht so leicht entdeckt werden kann. Somit befand er sich fast auf Bodenniveau. Der Server wurde während der Messungen stets in den Händen behalten.

Die Entfernungen zwischen den Notebooks können auf dem Parkplatz ziemlich genau abgeschätzt werden, da man die eingezeichneten Parkboxen als Referenz benutzen kann. Die Länge einer Parkbox (eine Fahrzeuglänge) beträgt vier Meter, der Abstand zwischen zwei Parkboxreihen sechs Meter. Die bei 2 MBit/s gewählten Entfernungen betragen 32, 60 und 84 Meter, bei 5.5 MBit/s 18, 40 und 58 Meter, bei 11 MBit/s 18, 38 und 60 Meter. Die Messläufe dauerten aus Zeitgründen jeweils eine Minute. Auch bei Experiment 01b wurden in etwa diese Distanzen verwendet, die Dauer der Messläufe wurde auf zwei Minuten beschränkt. Bei 2 MBit/s war die Sendereichweite seltsamerweise nicht mehr ganz so hoch, bei 84 Metern konnte kein einziges Paket mehr ohne CRC-Fehler empfangen werden.

5.4.3 Messungen im Terrain Wald

Die Messungen der zweiten Serie für dieses Terrain fanden in einem Waldstück statt, in dem zahlreiche Bäume das Haupthindernis für eine freie Sichtlinie zwischen den Notebooks darstellen und wo es nur wenig Unterholz gibt. Dadurch gestaltet sich auch die Fortbewegung im Terrain noch relativ einfach; nur manchmal zwingt vereinzeltes Geäst zu Umwegen. Der Client befand sich nicht auf Bodenniveau, sondern auf einen Baumstumpf; der Server wurde in der Hand behalten. Die bei 2 MBit/s gewählten Entfernungen betragen 45, 60 und 90 Meter, bei 11 MBit/s 20, 35, 45, 65 und 80 Meter. Die Messläufe dauerten jeweils zwei Minuten.

5.4.4 Messungen im Terrain Unterholz

Für die Messungen in diesem Terrain ist ein Waldstück erforderlich, auf dessen Boden zahlreiches Geäst und Unterholz zu finden ist. Die Notebooks waren beide auf Bodenniveau platziert, damit die freie Sichtlinie von den vorhandenen Hindernissen möglichst stark beeinträchtigt ist. Daher wurde bei der Platzierung der Notebooks auch darauf geachtet, dass sie von Unterholz umgeben sind und nicht in freiem Gelände stehen. Die in der zweiten Serie bei 2 MBit/s gewählten Entfernungen betragen 20, 35 und 50 Meter, bei 11 MBit/s 10, 21 und 30 Meter. Die Wahl dieser Entfernungen gründete sich auf die Erfahrungen aus den Messungen in Experiment 01. Die Messläufe dauerten jeweils zwei Minuten. Das Abschreiten dieser Entfernungen erwies sich aufgrund des unwegsamen Geländes als problematisch, das in Abschnitt 5.3.3 beschriebene Waldstück mit der frei begehbaren Zone stellte eine Lösung für dieses Problem dar.

Die Messwerte weisen bei gleichem Abstand in diesem Terrain die größten Schwankungen auf. Teilweise führte sogar eine andere Platzierung an der gleichen Stelle zu erheblichen Veränderungen des Datendurchsatzes, je nachdem, wie stark der Server durch das Unterholz abgeschirmt war. Daher musste ein wenig mit der Platzierung des Servers experimentiert werden, damit die gewonnenen Ergebnisse einigermaßen im Einklang mit früheren Messungen sind. Somit sind auch die Axiome 1 und 2 aus Kapitel 2 widerlegt.

Die mit „Wald“ benannten Messungen aus der ersten Serie (Experiment 01) wurden unter ähnlichen Bedingungen durchgeführt – die Dichte des Unterholzes war jedoch nicht ganz so hoch - und lieferten auch vergleichbare Ergebnisse. Die bei 2 MBit/s gewählten Entfernungen betragen 20, 35 und 51 Meter, bei 5.5 MBit/s 14, 36 und 52 Meter, bei 11 MBit/s 11, 15 und 29 Meter. Die Messläufe dauerten jeweils fünf Minuten. Die Messungen für 2 MBit/s fanden in einem anderen Waldstück statt, wo die Dichte von Bäumen und Unterholz etwas höher ist. Dies könnte erklären, warum die für 2 MBit/s gewonnenen Entfernungen nicht wesentlich höher sind als bei 5.5 MBit/s.

5.5 Beschreibung der aufgetretenen Probleme

5.5.1 Allgemeine Probleme mit Hard- und Software

Größtes Problem waren am ersten Tag vom Experiment 01, in dem Netgear-WLAN-Karten und der Trafficgenerator Packetsim zum Einsatz kamen, bei den Messungen im Waldgebiet die ständigen Verbindungsausfälle zwischen den Notebooks, die sogar zum Abbruch ganzer Messläufe führten. Solche Ausfälle traten während eines fünfminütigen Messlaufes durchschnittlich zwei- bis dreimal auf. Nur durch einen Neustart der Software auf dem Client-Notebook war es möglich, die Verbindung wiederherzustellen. Daher war es erforderlich, während jedem Messlauf zwischen den Notebooks zu pendeln und die Software bei einem Verbindungsausfall manuell neu zu starten, was Messungen über größere Entfernungen nur sehr schwer durchführbar machte. Gelöst werden konnte dieses Problem, indem man im Hintergrund ständig einen Pingprozess laufen ließ und somit ständig für Traffic zwischen den Notebooks sorgte. Die Verbindungsausfälle traten dann zwar immer noch auf, jedoch wurde die Verbindung nach kurzer Zeit wieder hergestellt. Daher kann man auf den meisten Graphen, welche die in der ersten Serie gewonnenen Messergebnisse darstellen, kurzzeitige völlige Einbrüche des Datendurchsatzes beobachten. Diese wurden bei der späteren Simulation ignoriert, da deren Ursache lediglich in einem Hardware- oder Treiberproblem liegt. Ansonsten kam es während der ersten Serie lediglich zu einigen Systemabstürzen des Clients beim Starten des Skriptes für 5.5 MBit/s.

Bei der zweiten Serie von Messungen führte der im Client verwendete Prism2-WLAN-Adapter zu Problemen. Aufgrund der anderen Treibersoftware und Firmware war der maximale Datendurchsatz (Durchsatz zwischen den direkt benachbarten Notebooks) wesentlich niedlicher als zuvor mit der Netgear-Karte im Client; diesen Aspekt galt es bei der Simulation zu berücksichtigen. Bei der Übertragungsrate 5.5 MBit/s traten bald ernste Probleme auf, es kamen trotz korrekt gestarteter Software auf dem Client keinerlei Datenpakete mehr zum Server durch. Aus diesem Grund wurden die geplanten Messungen für 5.5 MBit/s komplett gestrichen. In den folgenden Messläufen kam es auch bei 2 und 11 MBit/s zu Verbindungsausfällen, die ähnlich wie in der ersten Serie ständige Neustarts der Software auf dem Client erforderlich machte. Darüber hinaus ergaben sich vor allem im Terrain Unterholz eigenartige Messergebnisse, die mit den bisherigen Messungen nicht in Einklang zu bringen sind. Der Durchsatz war für 11 MBit/s beispielsweise unerwartet hoch und für 2 MBit/s unerwartet niedrig. Angesichts dieser zahlreichen Probleme wurde beschlossen, den Client wieder mit dem gewohnten Netgear-WLAN-Adapter auszurüsten. Der maximale Durchsatz erreichte daraufhin wieder die gewohnten Werte, und es traten keinerlei Verbindungszusammenbrüche mehr auf. Bei der Simulation soll den Messergebnissen, die unter Verwendung der Netgear-Karten gewonnen wurden, die vorwiegende Aufmerksamkeit gelten. Die Prism-Messergebnisse werden nicht berücksichtigt, wenn sie im Widerspruch zu den anderen Messungen stehen, da aufgrund der technischen Probleme keine Vergleichbarkeit zu den anderen Ergebnissen gegeben ist.

5.5.2 Terrainspezifische Probleme

In diesem Abschnitt geht es um Probleme bei der Durchführung der Messungen, die aufgrund von Gegebenheiten und äußerer Einflüsse des Terrains entstanden.

Bei den Messungen auf der Wiese hinter Gebäude 48 beeinflussten neben den vorhandenen störenden Objekten (Gebäude, Bäume, Viadukt) vor allem zahlreiche *Fremdpakete* aus dem nahe liegenden *ESA* die Messwerte. Auf dem Sportplatz fehlen derlei störende Faktoren, wodurch es bei den Messungen dort auch über große Entfernungen keinen Einbruch des Durchsatzes gab. Weitere Messungen auf diesem Gelände, bei denen sich der Client im

Gegensatz zu vorher auf Bodenniveau befand, lieferten jedoch verblüffend andere Ergebnisse, schon bei einer Distanz von 100 Metern wird hier trotz freier Sichtlinie kein einziges gültiges Datenpaket mehr empfangen. Dieser Umstand weist darauf hin, dass Axiom 0 aus Kapitel 2.1 (die Welt ist flach) nicht zutrifft; die unterschiedlichen Höhengniveaus der Knoten, die die abweichenden Messergebnisse verursachen, werden von Flat Earth-Modellen nicht berücksichtigt.

Auf dem Parkplatz gab es bis auf einige Fremdpakete, die wahrscheinlich aus universitätsinternen WLANs stammen, keine weiteren störenden Einflüsse.

Bei den Messungen für die Terrains Wald und Unterholz bestand das größte Problem in der Fortbewegung durch das Gelände; sie wird durch viele Hindernisse wie Hecken, Geäst oder Baumstämme erschwert. Dies erschwert das Abschreiten der Entfernungen, die daher nur ungenau bestimmt werden konnten. Fremdpakete gab es nur wenige.

5.6 Abschließende Bemerkungen

Die Durchführung der Messungen hat sich als wesentlich schwieriger und zeitaufwändiger als erwartet herausgestellt. Hauptgrund hierfür waren die Schwierigkeiten mit der Hardware. Zahlreiche Verbindungsausfälle (vor allem mit der Prism2-Karte) erschwerten die Durchführung der Messläufe erheblich oder verhinderten sie sogar. Die Messungen mit 5.5 MBit/s wurden aus diesem Grund gestrichen. Die teilweise unbrauchbaren Messergebnisse, die mit dieser Karte gewonnen wurden, erforderten weitere Messungen, um für die späteren Simulationen eine einigermaßen vernünftige Datenbasis zu erhalten.

Ursprünglich waren pro Szenario und Entfernung drei statt zwei Messläufe vorgesehen, außerdem sollten alle Messläufe nicht nur mit UDP, sondern auch auf der MAC-Ebene durchgeführt werden. Dies hätte jedoch zu einer sehr großen Anzahl an Messreihen geführt, die in angemessener Zeit kaum zu bewältigen gewesen wären, vor allem im Hinblick auf die erwähnten Schwierigkeiten. Die vorgenommenen Streichungen von Messläufen haben sich als sinnvoll erwiesen, auch die verbleibenden Messungen können hinreichend aussagekräftige Daten liefern. Um das Verhalten bei unterschiedlichen Datenraten zu untersuchen, reichen beispielsweise die beiden sehr unterschiedlichen Raten von 2 und 11 MBit/s aus, Messungen mit 5.5 MBit/s sind nicht unbedingt erforderlich.

Nicht geplant war die Aufteilung des Terrains Wald aus Experiment 01 in zwei Unterterrains Wald und Unterholz für Experiment 01b. Das stabile Übertragungsverhalten auch über größere Entfernungen im „normalen“ Wald war so nicht erwartet, der Einfluss der die Sichtlinie behindernden Bäume wurde als stärker eingeschätzt.

6. Simulation und Methodik zur Erstellung eines Modells

6.1 Warum wurden Shadowing und Ricean Fading verwendet?

Das Shadowing-Ausbreitungsmodell wurde aufgrund der indeterministischen Natur der zu simulierenden Terrains als Modell für das Large-Scale-Fading ausgewählt. Bei den anderen gängigen Ausbreitungsmodellen (*free-space* und *two-ray-ground*) ist die Signalstärke als deterministische Funktion der Distanz definiert. Die simulierte Sendereichweite stellt sich bei diesen Modellen somit als idealer Kreis dar. In der Realität sieht dieses Verhalten der Signalstärke und somit auch des gemessenen Datendurchsatzes meistens anders aus, insbesondere in Terrains Parkplatz und Unterholz, wo mannigfaltige Hindernisse die Datenübertragung zwischen den Netzwerkknoten behindern. Die hier gewonnenen Messergebnisse sind aufgrund dieser störenden Einflüsse nicht vorhersehbar; es können deutliche Schwankungen des gemessenen Datendurchsatzes auftreten, auch wenn die Distanz zum sendenden Knoten konstant bleibt. Diesem Umstand wird im *shadowing*-Modell dadurch Rechnung getragen, dass eine gauss-verteilte Zufallsvariable die simulierte Signalstärke beeinflusst. Aufgrund dieser Komponente scheint dieses Modell am besten geeignet für die in dieser Arbeit durchzuführenden Simulationen.

Bei den Kurven, die die gewonnenen Messergebnisse darstellen, ist neben größeren Schwankungen und einzelnen Peaks jedoch auch ein Rauschen der Messkurve über die gesamte Dauer des Messlaufes festzustellen, das so genannte Small-Scale-Fading. Bei Terrains mit freier Sichtlinie (Wiese) ist dieses Rauschen relativ schwach, bei anderen Terrains mit Hindernissen jedoch im Allgemeinen wesentlich stärker, was sich in größeren Amplituden und zahlreicheren Peaks zeigt. Zur Realisierung dieses Rauschens in der Simulation wird *Ricean Fading* eingesetzt.

6.2 Vorgehensweise bei Iteration der Messergebnisse durch Simulation

6.2.1 Allgemeine Vorgehensweise

Ziel der Simulation ist die Annäherung der Graphen, die den simulierten Datendurchsatz darstellen, an die in den Experimenten gewonnenen Messwerte durch iterative Manipulation und Anpassung der Simulationsparameter. Es soll für jedes Szenario, d.h. für jede Kombination aus Bitrate und Terrain, ein Parametertupel gefunden werden, so dass für alle Entfernungen die jeweiligen Messkurven mit diesem Tupel möglichst genau durch das Simulationsergebnis angenähert werden.

Der erste Schritt bei der Iteration der Parameter bestand darin, sich die praktischen Auswirkungen der Manipulation jedes Parameters klarzumachen. Dies geschah auf empirische Weise: jeder Parameter wurde separat verändert, und anschließend wurde das folgende Simulationsergebnis mit dem vor der Änderung erhaltenen Ergebnis verglichen. Die sich aus diesen Beobachtungen ergebenden Folgerungen bezüglich des Einflusses der einzelnen Parameter bildeten die Grundlage für die Vorgehensweise bei der Durchführung der Simulation. Folgende Beobachtungen konnten gemacht werden:

- *Path Loss Exponent*: Die Erhöhung dieses Parameters führt zu einer Verringerung des Durchsatzniveaus. Er legt also fest, wie stark der Datendurchsatz mit steigender Entfernung einbricht.

- *Shadowing Deviation*: Die Manipulation dieses Parameters bewirkt sowohl eine Änderung der Amplitude (Höhe der Peaks) als auch eine Änderung des Durchsatzniveaus. Aus praktischen Gründen wurde dieser Parameter in fast allen Simulationsläufen konstant gehalten.
- *Ricean K-Factor*: Eine Verringerung des K-Faktors verstärkt das Small-Scale-Fading des simulierten Graphen (höhere Amplitude/stärkere Peaks). Diese Verstärkung scheint sich gleichmäßig auf alle Bereiche des Graphen (also jeden Zeitpunkt) auszuwirken.
- *Ricean Velocity*: Die Verringerung der Ricean Velocity führt hauptsächlich zur Verstärkung einzelner (der stärksten) Peaks. Eine Manipulation dieses Parameters ist also dann nützlich, wenn es einzelne, extreme Spitzen zu simulieren gilt, ohne aber gleichzeitig die Amplituden anderer Peaks in gleichem Maße zu erhöhen.

Unter diesen oben genannten Prämissen fand die iterative Annäherung an die Messwerte durch Simulation statt. Zuerst galt es, durch Veränderung des Parameters *Path Loss Exponent* das Durchsatzniveau von gemessenem und simuliertem Graphen einander anzugleichen. Als Richtwert für das zu erreichende Niveau wurde der durchschnittliche Durchsatz der Messkurve abgeschätzt. In der Regel handelte es sich dabei um das ungefähre arithmetische Mittel, bei dessen Abschätzung aber keine im Graph sichtbaren extremen Einbrüche oder Verbindungsausfälle berücksichtigt wurden. Als initialer Wert wurde 2 gewählt, der in der Dokumentation [ns] angegebene Wert für Terrains mit freier Sichtlinie.

Die Manipulation des Parameters *Shadowing Deviation* führte neben einer Änderung des Fadings auch zur unerwünschten Veränderung des Durchsatzniveaus. Dies hat zur Folge, dass jede Änderung dieses Parameters eine neuerliche, korrigierende Änderung von *Path Loss Exponent* nach sich zieht. Daher wurde *Shadowing Deviation* während der Durchführung der Simulationen nach Möglichkeit konstant auf dem Wert 7 gehalten und nur verändert, wenn die Manipulation der anderen Parameter kein zufrieden stellendes Ergebnis lieferte. Der initiale Wert 7 für diesen Parameter wurde ausgewählt, da die üblichen Werte für diesen Parameter zwischen 4 und 12 liegen [ns] und der Initialwert somit den ungefähren Mittelwert darstellt.

Nach erfolgter Anpassung des Durchsatzniveaus galt die Aufmerksamkeit der Stärke des Small-Scale-Fadings (des Rauschens) und somit der durchschnittlichen Amplitude der Peaks. Es wurde hierfür aus dem Messgraphen abgelesen, in welchem Wertebereich sich der größte Teil der Kurve befindet. Im üblichen Falle eines einigermaßen konstanten Durchsatzniveaus stellt sich dieser Wertebereich je nach Stärke des Rauschens als mehr oder weniger großer Schlauch um den durchschnittlichen Datendurchsatz dar. Der Parameter *Ricean K-Factor* wurde so lange verändert, bis zwischen den Amplituden der gemessenen und simulierten Kurven eine zufrieden stellende Übereinstimmung erreicht ist. Hier konnte bei den meisten Kurven keine optimale Übereinstimmung erreicht werden, da die Amplituden je nach Entfernung unterschiedlich ausfallen konnten, ein Parametertupel allerdings für alle Entfernungen in einem Szenario bestimmt werden muss. Zuletzt wurde noch versucht, vereinzelt auftretende, starke Peaks der Messkurve zu simulieren. Dies sollte durch Variation des Parameters *Ricean Velocity*, dessen initialer Wert zu Beginn der Iteration auf 2.5 festgelegt wurde, erreicht werden. Erfolgreich war dies jedoch nur in begrenztem Maße, extrem starke Peaks haben sich als nicht simulierbar herausgestellt, sie sind in den simulierten Graphen zwar meist auch vorhanden, aber weniger stark ausgeprägt. Auch eine Veränderung von *Shadowing Deviation* führte diesbezüglich zu keinen nennenswerten Verbesserungen.

Eine exakte Simulation aller durchgeführten Messläufe war aufgrund der zahlreichen Varianzen bei Terrain, Störeinflüssen und auch Hardware natürlich nicht möglich. Auch bei identischen Szenarios auf gleiche Entfernung sind die Messkurven oft nicht identisch, es sind zum Beispiel unterschiedliche Durchsatzniveaus und Amplituden oder mehr bzw. weniger extreme Peaks zu beobachten. Letztere sind - wie bereits erwähnt - nicht simulierbar; gleiches gilt für Unregelmäßigkeiten des Durchsatzniveaus wie beispielsweise starke Einbrüche des Durchsatzniveaus bereits auf geringe Entfernung, da eine Veränderung von *Path Loss Exponent* zum gleichmäßigen Anstieg bzw. Abfall bei allen Entfernungen führt.

Bei der Durchführung der Simulation waren im Falle solcher Abweichungen daher Kompromisse erforderlich. Es wurde meist versucht, bezüglich der durch die Simulation zu erreichenden Eigenschaften des Graphen (Durchsatzniveau, Amplitude etc.) eine „goldene Mitte“ zu finden, so dass alle Messkurven eines Szenarios möglichst gut durch die simulierte Kurve angenähert werden. In der Regel wurde hierzu der ungefähre Mittelwert von Durchsatzniveaus und Amplituden der Messgraphen abgeschätzt und als Richtwert für die Simulation verwendet. Für die Terrains Parkplatz und Unterholz war diese Abschätzung bei vielen Messkurven aufgrund der starken Schwankungen nicht mit der gleichen Genauigkeit wie in den anderen Terrains möglich. Messkurven, bei denen die Abweichungen von Durchsatzniveau und Amplitude zu anderen Messreihen trotz gleichen Szenarios und gleicher Entfernung zu stark sind („Ausreißer“), wurden zu einer „Anomalie“ erklärt und bei der Simulation nicht oder nur am Rande berücksichtigt. In diese Kategorie gehören vor allem Messreihen, mit implausiblen, im völligen Widerspruch zu anderen Messreihen stehenden Messwerten, die wahrscheinlich auf störende Einflüsse oder technische Probleme zurückzuführen sind. Es handelt sich bei diesen Anomalien im Wesentlichen um die mit dem Prism2-basierten WLAN-Adapter durchgeführten Messungen aus Experiment 01b, deren Anteil an allen in dieser Serie durchgeführten Messungen etwa bei einem Drittel liegt.

6.2.2 Die Simulationsphasen

Dieser Abschnitt geht im Detail auf die zwei Simulationsphasen ein. Die erste Simulationsphase fand nach Experiment 01 statt und hatte die dort gewonnenen Messdaten als Basis. Die zweite Phase folgte auf Experiment 01b, hierbei wurden alle vorhandenen Messdaten mit einbezogen. Es wird genauer auf notwendige Kompromisse bei der Simulation und auf Besonderheiten und Anomalien der Messwerte, die bei der Simulation berücksichtigt werden mussten, eingegangen.

6.2.2.1 Die erste Simulationsphase

Die Simulation der in Experiment 01 gewonnenen Messdaten bereitete keine großen Probleme, da es bei fast allen Messungen zu keinen Anomalien kam. Die Achsen der geglätteten Messkurven und der mit xgraph geplotteten Simulationskurven sind mit ähnlichen Einheiten (MBit/s bzw. Bit/s) beschriftet. Die durch die Simulation zu erreichenden Durchsatzniveaus und Amplituden konnten daher direkt aus den Messkurven abgelesen werden. Pro Szenario (Bitrate und Terrain) und Entfernung waren lediglich zwei Messläufe zu berücksichtigen. Da diese Messläufe zeitlich direkt hintereinander und daher unter weitestgehend identischen Bedingungen stattfanden, unterscheiden sich die jeweiligen zugehörigen Messkurven nicht stark voneinander. Durchsatzniveau und Amplitude sind größtenteils identisch, die Unterschiede der Kurven liegen größtenteils in der Häufigkeit und Höhe einzelner Peaks und in bei der Simulation nicht berücksichtigten Anomalien wie Einbrüche durch Verbindungsausfälle. Als Referenz für die Simulation wurde daher von den beiden Messkurven diejenige ausgewählt, die eine regelmäßige Gestalt, d.h. meist konstantes Durchsatzniveau und weniger starkes Rauschen, aufweisen konnte.

Die größten Probleme ergaben sich bei der Simulation der Ergebnisse mit 11 MBit/s im Terrain Wiese. Während bei einer Entfernung von 33 Metern kein Sinken des Durchsatzniveaus und nur schwaches Rauschen zu beobachten waren, fiel der Durchsatz bei 37 plötzlich auf weniger als die Hälfte ab und zeigte starke Schwankungen. Dieses anomale Verhalten, das wahrscheinlich auf störende äußere Einflüsse (möglicherweise Reflexionen) zurückzuführen ist, kann mit dem Shadowing-Modell nicht einmal annähernd simuliert werden. Die Durchsatzniveaus der simulierten Kurven unterscheiden sich nur um etwa 0.5 MBit/s; bei 33 Metern ist es zu gering, bei 37 jedoch zu hoch, dies stellt jedoch die bestmögliche Annäherung an beide Kurven dar.

Die größte Entfernung eines Szenarios wurde im Verlauf der Messungen unter der Prämisse ausgewählt, die maximale Sendereichweite anzunähern. Daher ist das Durchsatzniveau bei dieser Entfernung oft sehr gering, oftmals konnte der Server nur noch wenige Pakete empfangen. Bei Terrains mit vielen Hindernissen (Wald, Parkplatz) weist die Messkurve bei maximaler Distanz zudem oftmals relativ starke Schwankungen und Einzelpeaks auf. Im Verlauf der Simulation hat sich gezeigt, dass diese niedrigen Durchsatzniveaus nicht ganz zu erreichen sind, da die hierfür erforderlichen hohen Werte von *Path Loss Exponent* auch zu einer zu starken Absenkung des Durchsatzes bei den anderen Entfernungen führt. Auch die starken Einzelpeaks waren nicht in ihrem vollen Ausmaß simulierbar, da das Rauschen bei den anderen Entfernungen sonst zu stark geworden wäre.

Auf qualitative Vergleiche der Messungen mit den Simulationsergebnissen wird in Kapitel 7 genauer eingegangen.

6.2.2.2 Die zweite Simulationsphase

Die zweite Simulationsphase fand nach Experiment 01b statt. Hierbei sollten nun sowohl die Messkurven aus Experiment 01 als auch diejenigen aus Experiment 01b möglichst gut durch die Simulationskurven angenähert werden. Die Messergebnisse, die in der ersten Serie im Terrain Wald gewonnen wurden, wurden mit denen aus dem Terrain Unterholz der zweiten Serie verglichen, da sie unter sehr ähnlichen äußeren Bedingungen zustande kamen. Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Iteration der Simulationsparameter war analog zu der ersten Simulationsphase, als Initialwerte wurden die dort gewonnenen Parameter verwendet, sofern sie für das jeweilige Szenario vorhanden waren. Die nun für die Messung und Erstellung der Graphen verwendete Software Airopeek misst den Datendurchsatz in einer anderen Einheit (Bytes/s) als sie bei der Ausgabe der Simulationsgraphen durch xgraph zum Einsatz kommt. Ein direktes Ablesen der für den Simulationsgraphen erwünschten Größen wie Durchsatzniveau und Amplitude war diesmal nicht möglich.

Im Gegensatz zur ersten Phase gestaltete sich die Simulation als schwierig, da für die meisten Szenarios mehrere, sich unter Umständen stark unterscheidende Messkurven vorhanden waren. Diese Unterschiede sind auf zahlreiche Varianzen in Gebiet und Hardware zurückzuführen.

Die größten Schwierigkeiten wurden durch den zu Anfang der zweiten Serie im Client-Notebook eingesetzten Prism2-WLAN-Adapter verursacht. Das erste Problem lag in dem im Vergleich zu den anderen Messungen wesentlich niedrigeren maximalen Durchsatzes (Durchsatz bei zwei direkt benachbarten Notebooks). Die mit dieser Karte gewonnenen Messwerte waren mit anderen Werten somit nicht mehr vergleichbar. Daher wurden die für die Simulationskurve erwünschten Größen wie Durchsatzniveau oder Amplitude aus den Messgraphen bestimmt, indem die Werte relativ zum jeweiligen Maximalwert des Messlaufes

abgeschätzt wurden. Dadurch war auch keine Umrechnung der unterschiedlichen Einheiten von Airopeek und xgraph mehr erforderlich.

Doch auch unabhängig vom unterschiedlichen Durchsatz lieferten die Messungen mit der Prism2-Karte Ergebnisse, die sich von denen anderer Messungen sehr stark unterscheiden. Die erhaltenen Durchsatzniveaus waren wesentlich geringer und zudem wiesen die gemessenen Kurven teilweise äußerst starke Schwankungen und Peaks auf, die bei anderen Messungen im gleichen Szenario nicht zu beobachten waren. Aufgrund dieser Schwierigkeiten haben sich die Prism2-Ergebnisse als weitestgehend unbrauchbar erwiesen und wurden daher für die Simulation nur dann beachtet, wenn sie nicht im Widerspruch zu andern Messergebnissen stehen.

Doch auch die mit dem Netgear-WLAN-Adapter gewonnenen Ergebnisse der zweiten Serie sind teilweise widersprüchlich zueinander. Besonders stark betroffen sind hiervon die Terrains Unterholz und Parkplatz. Schwankungen der Graphen und Durchsatzniveaus unterscheiden sich trotz gleichen Szenarios und gleicher Entfernung bisweilen erheblich, teilweise treten diese Unterschiede sogar innerhalb des gleichen Messlaufes auf. Die zahlreichen Hindernisse in diesen Terrains erschweren die Datenübertragung erheblich und ließen derartige indeterministische Messergebnisse somit schon im Vorfeld erwarten.

Diese unterschiedlichen Kurvenverläufe bei der Simulation unter einen Hut zu bringen erwies sich als äußerst kompliziert; es mussten viele Kompromisse eingegangen und zahlreiche Ungereimtheiten ignoriert werden. Besonderer Focus lag auf den Gemeinsamkeiten zwischen den Messkurven eines Szenarios. Genauere Details hierzu sind in Kapitel 7 zu finden, das sich mit dem qualitativen Vergleich der Messungen untereinander und mit den Simulationsergebnissen beschäftigt.

6.3 Durchführung der Simulation

6.3.1 Beschreibung der verwendeten OTcl-Skripte

Das zu simulierende Netzwerk wird im Simulator ns-2 unter Verwendung von Skripten in der Sprache OTcl definiert. Festgelegt werden in einem solchen Skript unter anderem die Topologie des Netzwerkes (Anzahl der Knoten und deren Positionen) und technische Details (Paketgrößen, Übertragungsprotokolle, Routingprotokolle etc.).

6.3.1.1 simple-wireless-common.tcl

Für die Definition des Netzwerkes für die durchzuführenden Simulationen wurde eine modifizierte Version des Skriptes simple-wireless-common.tcl eingesetzt. In diesem Skript wird ein aus zwei Knoten bestehendes drahtloses Netzwerk definiert, das als Übertragungsprotokoll UDP verwendet. In diesem Abschnitt werden die für diese Simulationen wichtigen Modifikationen beschrieben.

- In folgender Zeile wird festgelegt, dass ns-2 ein drahtloses Netzwerk simulieren soll:
`ss`
`set val(chan) Channel/WirelessChannel ;# channel type`

- Eine Kombination aus Shadowing und Ricean Fading wird als Ausbreitungsmodell festgelegt:

```
set val(prop)      Propagation/Shadowing/Ricean ;# radio-propagation model
```

- In diesem Codeabschnitt werden die Parameter für das Shadowing-Ausbreitungsmodell festgelegt. Für die Simulation sollen nur die ersten beiden Parameter (*Path Loss Exponent* und *Shadowing Deviation*) modifiziert werden.

```
#first set values of shadowing model
Propagation/Shadowing/Ricean set pathlossExp_ 3.1 ;# path loss exponent
Propagation/Shadowing/Ricean set std_db_ 7 ;# shadowing deviation (dB)
Propagation/Shadowing/Ricean set dist0_ 1.0 ;# reference distance (m)
Propagation/Shadowing/Ricean set seed_ 0 ;# seed for RNG
```

- Hier werden die Namen der Dateien festgelegt, in denen die Ergebnisse der Simulation gespeichert werden sollen. Die Variable *file_prefix* erhält ihren Wert in den externen, szenariospezifischen Skripten, die im nächsten Abschnitt beschrieben werden. Von Interesse ist nur die Datei *\$file_prefix.throughput.tr*, in der die simulierten Werte für den Datendurchsatz zu finden sind.

```
#
# Initialize Global Variables
#
set ns_          [new Simulator]
set tracefd      [open simple.tr w]
set f1           [open $file_prefix.throughput.tr w]
set f2           [open $file_prefix.rcvd_bytes.tr w]
set f3           [open $file_prefix.lost_bytes.tr w]
```

- Die Parameter für das Ricean Fading werden durch Variablen aus den externen Skripten festgelegt.

```
set prop_inst [$ns_ set propInstance_]
$prop_inst MaxVelocity $ric_vel;
$prop_inst RiceanK     $ric_k;
$prop_inst LoadRiceFile $ric_txt;
```

6.3.1.2 Szenariospezifische Skripte

Für jede Kombination aus Bitrate, Terrain und Entfernung wird ein solches Skript erstellt. Die hier beschriebenen Codezeilen entstammen dem Skript für die Simulation mit 11 MBit/s im Terrain Wiese über eine Distanz von 84 Metern.

- Diese Zeilen legen die Bitrate fest (hier: 11 MBit/s)

```
set bandwidth 11e6
set cbr_rate 11000000
```

- Die reale Dauer des zu simulierenden Messlaufes in der Einheit Sekunden und das Präfix für die Namen der Ausgabedateien werden festgelegt.

```
set end_time 300
set file_prefix 11MBit-wiese-84m
```

- Hier werden die jeweiligen Positionen beider Knoten auf dem definierten Gebiet angegeben. Hieraus ergibt sich die Entfernung zwischen den Knoten, eine Koordinateneinheit entspricht hierbei einem Meter.

```
set pos_x(0) 10.0
set pos_y(0) 10.0
set pos_z(0) 0.0
```

```
set pos_x(1) 94.0
set pos_y(1) 10.0
set pos_z(1) 0.0
```

- In der Datei *rice_table.txt* sind die für das Ricean Fading erforderlichen Zufallszahlen enthalten. Den beiden Parametern Ricean Velocity und Ricean K-Factor werden Werten zugewiesen.

```
set ric_txt rice_table.txt
set ric_vel 2
set ric_k 8
```

- Diese Zeile sorgt dafür, dass bei der Ausführung des Skripts auch das Skript *simple-wireless-common.tcl* ausgeführt wird. Es ist reicht für einen Simulationslauf also aus, ns-2 nur mit dem szenariospezifischem Skript auszuführen.

```
source simple-wireless-common.tcl
```

6.3.2 Bedienung der Software

Ein Simulationslauf wird gestartet, indem der Simulator in der Unix-Konsole aufgerufen wird. Als Parameter wird der Dateiname des szenariospezifischen Skriptes für die gewünschte Kombination aus Bitrate, Terrain und Entfernung. Beispiel: *ns 2MBit-wiese-147m.tcl*. Die Dauer eines Laufes hängt von der im Skript gewählten zu simulierenden Zeitspanne ab. Die Simulation eines fünfminütigen Messlaufes beanspruchte etwa 20 Sekunden, kürzere Messläufe konnten entsprechend schneller simuliert werden.

Der simulierten Werte des Datendurchsatzes sind in der Datei mit dem entsprechenden Präfix und dem Suffix *throughput.tr* abgespeichert. Eine graphische Darstellung dieser Werte liefert das Programm *xgraph*, wenn das *.tr*-File als Aufrufparameter angegeben wird. Für obiges Beispiel lautet der Programmaufruf also: *xgraph 2MBit-wiese-147m.throughput.tr*. *xgraph* bietet die Möglichkeit, den dargestellten Graphen zum Zwecke der späteren Verwendung beispielsweise als Postscript-Datei zu exportieren.

7. Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

7.1 Ergebnisse der Simulation

7.1.1 Ergebnisse der ersten Simulationsphase

Die erste Simulationsphase fand nach Experiment 01 statt und hatte die Simulation der in besagter Serie gewonnenen Messkurven zum Ziel. Die Iteration der Simulationsparameter lieferte folgende Ergebnisse:

Szenario	Ricean Velocity	Ricean K-Faktor	Path Loss Exponent	Shadowing Deviation
11 MBit/s – Wiese	2	9	3.1	7
11 MBit/s – Wald	2	4	4.4	7
11 MBit/s – Parkplatz	1.2	0.2	3.1	7
5.5 MBit/s – Wiese	1	2.5	2.6	7
5.5 MBit/s – Wald	2.5	5	3.2	8.5
5.5 MBit/s – Parkplatz	1	0.5	3	7
2 MBit/s – Wald	2.5	6	3.47	7
2 MBit/s – Parkplatz	1.5	1.85	3	7

Tabelle 7.1 : Ergebnisse der ersten Simulationsphase

Die Werte für den Parameter *Path Loss Exponent* entsprechen im Großen und Ganzen den erwarteten Werten für die unterschiedlichen Terrains. Die größten Werte nimmt der Parameter im Terrain Wald an, was durch die zahlreichen Hindernisse, die die freie Sichtlinie zwischen den Notebooks behindern zu erklären ist. Der stärkste Abfall des Durchsatzes über wachsende Entfernung findet hier erwartungsgemäß bei der höchsten Übertragungsrate von 11 MBit/s statt. Bei 2 MBit/s ist der Wert überraschenderweise höher als bei 5.5 MBit/s; dies lässt sich damit begründen, dass die Messungen für 2 MBit/s in einem anderen Waldstück und somit auch unter anderen Bedingungen stattfanden. Im Terrain Parkplatz ist der Wert konstant und geringer als im Wald; die hier vorhandenen Hindernisse beeinträchtigen die Datenübertragung also nicht im gleichen Maße. Die Simulation der Messungen im Terrain Wiese ergaben aufgrund der im Gelände vorhanden störenden Einflüsse und aufgetretenen Anomalien (vor allem der plötzliche Einbruch des Datendurchsatzes bei 37 Metern) jedoch höhere Werte als erwartet.

Die erhaltenen Ergebnisse für den Parameter *Ricean K-Faktor* sind nicht ganz so konsistent. Im Terrain Wiese spiegelt der Wert bei 11 MBit/s das aufgrund der freien Sichtlinie nur schwache Fading wieder; bei 5.5 MBit/s ist das Rauschen jedoch relativ stark, was zu einem unerwartet geringen Wert führte. Im Terrain Wald nimmt der Parameter für alle Bitraten ähnliche Werte an, die jedoch überraschend hoch ausfallen, da das Rauschen der Messkurven in diesem Terrain trotz der zahlreichen Hindernisse recht gering ausfällt. Die Messungen im Terrain Parkplatz führten zu starken Schwankungen, dies spiegelt sich in geringen Werten für den *Ricean K-Faktor* wieder. Nur der Wert für 2 MBit/s fällt hier aus der Reihe, ist jedoch immer noch geringer als bei den anderen Terrains.

Die Werte für den Parameter *Ricean Velocity* liegen alle im Bereich zwischen 1 und 2.5; größere Abweichungen vom Defaultwert 2 waren nicht erforderlich. Bei starken Einzelpeaks führte auch eine Verringerung des Parameters auf kleinere Werte als 1 zu keiner Verstärkung mehr, zudem traten sie nicht häufig auf.

Eine Änderung von *Shadowing Deviation* wurde lediglich bei 5.5 MBit/s im Terrain Wald vorgenommen. Nur so konnten die Messkurven einigermaßen angenähert werden, da die

Messwerte bei der höchsten Entfernung starkes Rauschen aufweisen, bei den anderen Entfernungen jedoch nur geringes Rauschen.

Die in der ersten Simulationsphase gewonnenen Ergebnisse sind größtenteils konsistent zueinander und entsprechen den Erwartungen. Ein genauerer Vergleich von Messkurven und simulierten Kurven wird hier nicht vorgenommen, da es sich nur um vorläufige Simulationsergebnisse handelt. Die Mess- und Simulationskurven sind in Anhang x zu finden. Weitere Messungen unter abweichenden äußeren Bedingungen könnten zu anderen Messergebnissen führen und eine entsprechende Anpassung der Simulationsergebnisse erforderlich machen.

7.1.2 Ergebnisse der zweiten Simulationsphase

Die zweite Simulationsphase wurde nach Experiment 01b durchgeführt. Ziel war nun die bestmögliche Annäherung an die in beiden Serien gewonnenen Messkurven durch die Simulationskurven. Als Anfangswerte für die Parameter wurden – sofern vorhanden – die in der ersten Simulationsphase bestimmten Werte verwendet. Die Übertragungsrate 5.5 MBit/s wurde bei den Messungen aufgrund technischer Probleme gestrichen. Die Iteration der Simulationsparameter lieferte folgende Ergebnisse:

Szenario	Ricean Velocity	Ricean K-Factor	Path Loss Exponent	Shadowing Deviation
11 MBit/s – Parkplatz	1.2	0.1	3.7	7
11 MBit/s – Wald	2	4	2.9	7
11 MBit/s – Wiese	5	8	2	7
11 MBit/s – Unterholz	0.5	2	4.7	7
2 MBit/s – Parkplatz	0.4	1.75	3.3	7
2 MBit/s – Wald	2	3	2.6	7
2 MBit/s – Wiese	4	7	2	7
2 MBit/s – Unterholz	2	0.8	3.8	7

Tabelle 7.2 : Ergebnisse der zweiten Simulationsphase

Die in der Simulation erhaltenen Parameterwerte für das Terrain Wiese entsprechen voll und ganz den Erwartungen. Der *Path Loss Exponent* erhält bei 2 MBit/s den Wert 2, den in der Literatur [ns] angegebenen Wert für freie Sichtlinie, da auch über große Entfernung kein nennenswerter Abfall des Datendurchsatzes zu beobachten ist. Das minimale Rauschen spiegelt sich in hohen Werten für den *Ricean K-Faktor* wieder. Bei größeren Entfernungen ist das Rauschen der simulierten Kurven allerdings etwas zu hoch; auch durch eine Erhöhung von *Ricean Velocity* konnte diesen Effekt nicht restlos beseitigen.

Die Messungen im Terrain Wald lieferten ebenfalls schlüssige Messergebnisse, die relativ einfach zu simulieren waren. Der Datendurchsatz ist hier trotz der die Sichtlinie behindernden Bäume auch über große Entfernungen recht stabil und zeigt nur moderate Schwankungen. Dies zeigt sich in den erhaltenen Werten für die Simulationsparameter. Nur bei der höchsten Entfernung sind die Messkurven unterschiedlich und weisen teilweise stärkeres Rauschen auf. Im Terrain Parkplatz weisen die erhaltenen Parameterwerte auf größere Schwierigkeiten bei der Datenübertragung als bei Experiment 01 hin. So fällt der Datendurchsatz über gleiche Entfernung stärker ab, weshalb der *Path Loss Exponent* bei beiden Bitraten höher gewählt werden musste. Verschiedene Messläufe weisen bei gleicher Entfernung teilweise äußerst unterschiedliche Durchsatzniveaus auf, was die Simulation erheblich erschwert. Dies gilt in gleichem Maße für das Rauschen der Messkurven. Bei 11 MBit/s sind die gewonnenen Simulationsergebnisse im Einklang mit denen der ersten Simulationsphase; bei 2 MBit/s ist jedoch der *Ricean K-Faktor* höher und die *Ricean Velocity* niedriger, da die Messkurven bei dieser Bitrate eine Neigung zu zahlreichen, extremen Einzelpeaks zeigen. Aufgrund dieser

Abweichungen der Messkurven zueinander ist eine exakte Simulation kaum möglich, die erhaltenen Simulationsergebnisse können nur grobe Annäherungen an die Wirklichkeit darstellen. Die unter Verwendung des Prism2-WLAN-Adapters gewonnenen Messergebnisse mussten hier ignoriert werden, da sie von den anderen Messergebnissen zu sehr abweichen und daher die Simulationsergebnisse negativ beeinträchtigen würden.

Im Terrain Unterholz (vergleichbar mit Terrain Wald aus Experiment 01) ist der Wert von *Ricean K-Faktor* erwartungsgemäß am höchsten, da das reichlich vorhandene Unterholz die Datenübertragung sehr stark behindert. Genau wie im Terrain Parkplatz sorgen auch hier die je nach Messlauf stark voneinander abweichenden Messkurven für große Schwierigkeiten bei der Simulation. Die erhaltenen Simulationskurven stellen also auch hier nur eine äußerst ungenaue Annäherung an die Messergebnisse dar.

7.2 Vergleich Messung – Simulation

In diesem Abschnitt sollen einige Messkurven mit den zugehörigen Simulationskurven verglichen werden. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf den Kurven für die Terrains Parkplatz und Wald aus der zweiten Serie von Messungen, da sich die Simulation dieser Messergebnisse aufgrund zahlreicher Varianzen als äußerst schwierig erwiesen hat. Eine vollständige Sammlung aller Kurven ist in Anhang A zu finden.

Die Einheit des Durchsatzes der Simulationskurven ist MBit/s. Die Messungen wurden, sofern nicht anders angegeben, unter Verwendung der Netgear-Karten durchgeführt.

7.2.1 Terrain Wiese

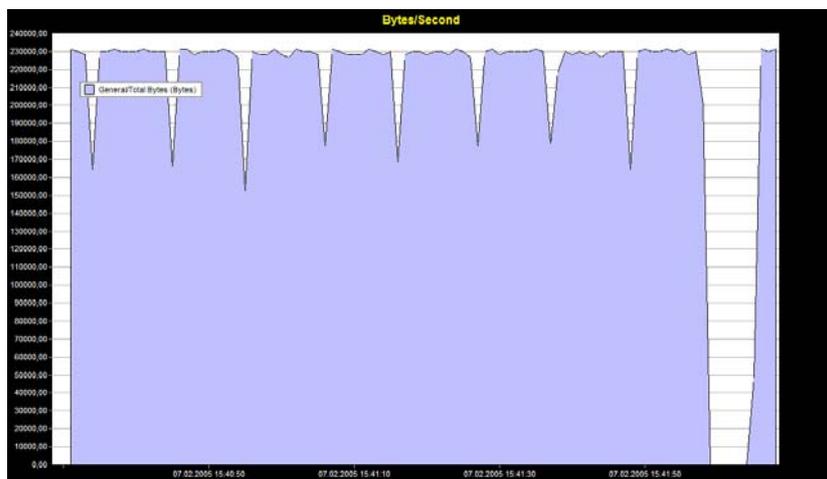


Abb. 7.1 : Messkurve 2MBit/s Wiese 100 Meter mit Prism2-Karte

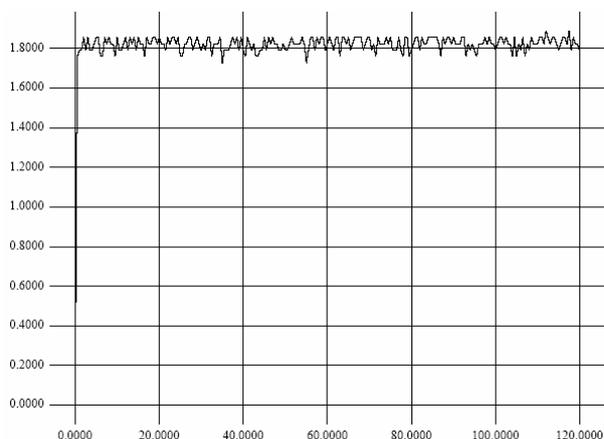


Abb. 7.2 : Simulationskurve 2MBit/s Wiese 100 Meter

Hier sind die Kurven für 2 MBit/s über eine Entfernung von 100 Metern zu sehen.

Wie bei allen Messungen in Experiment 01b mit dieser Bitrate ist hier bis auf einen kurzen völligen Zusammenbruch der Verbindung und mehreren leichteren hardwarebedingten Einbrüchen kein Abfall des Durchsatzniveaus erkennbar. Das Rauschen der Simulationskurve ist nur geringfügig stärker als in der Messkurve.

Die Simulation der Messwerte dieses Terrains war ohne Probleme durchführbar.

7.2.2 Terrain Wald

7.2.2.1 Szenario 11 MBit/s Wald bei 65 Metern

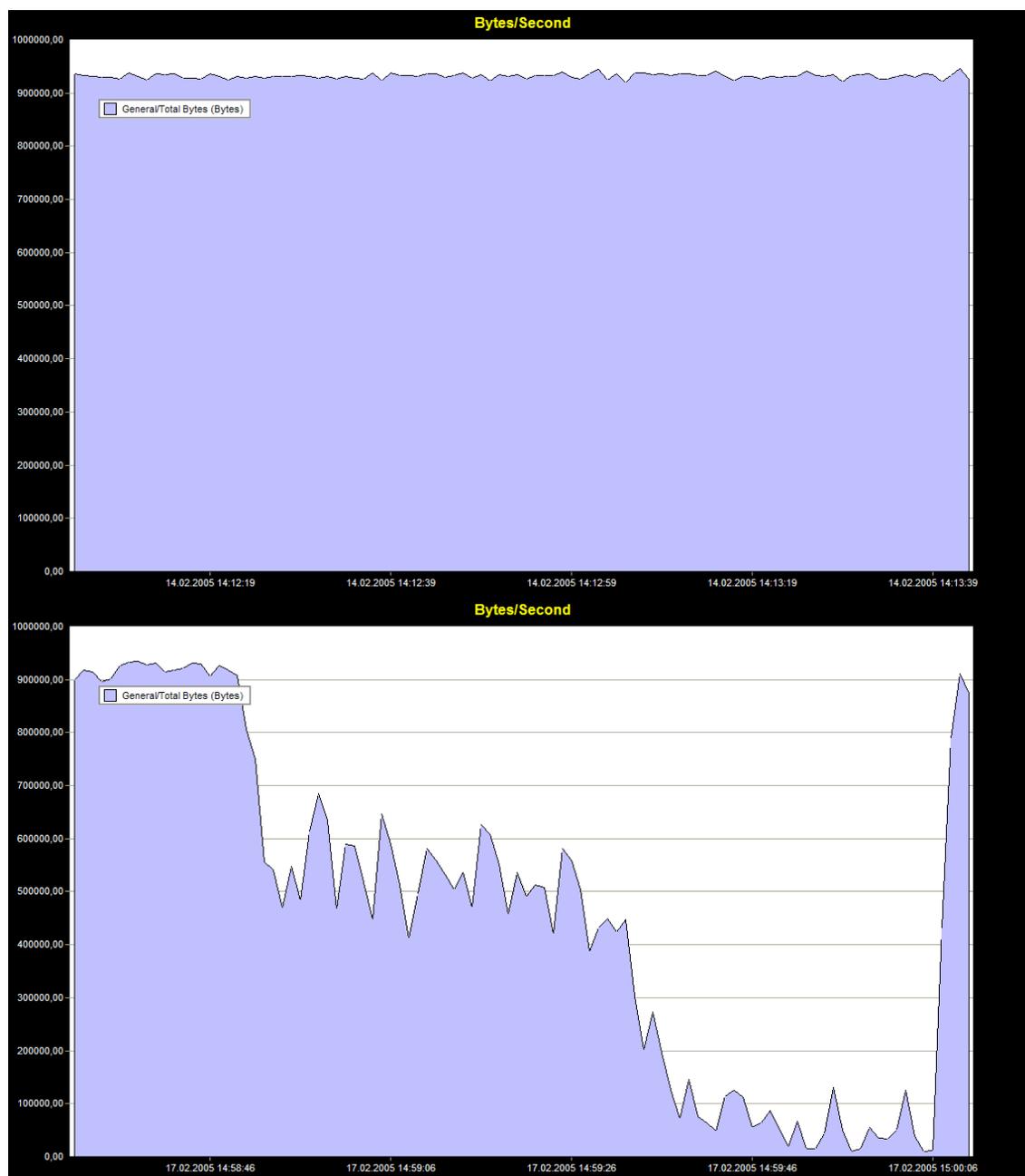


Abb. 7.3 : Messkurven 11MBit/s Wald 65 Meter

Die Messkurven zeigen hier ein inkonsistentes Verhalten. Die erste Kurve zeigt uns ein auch über diese hohe Entfernung konstantes Durchsatzniveau und kein nennenswertes Rauschen. Bei der zweiten Messung fällt der Durchsatz jedoch schon kurz nach Beginn auf den halben Wert ab, wobei er dann stärkeres Rauschen zeigt, und einige Zeit später sogar auf minimales Niveau. Hier war bei der Simulation ein Kompromiss erforderlich: es wurde ein Mittelwert zwischen dem maximalen Durchsatzniveau (erste Messkurve) und dem halben Durchsatzniveau (ungefährer Mittelwert der zweiten Messkurve) gewählt. Das Durchsatzniveau der simulierten Kurve liegt somit bei ca. 75% des Maximalen Durchsatzes, welcher etwa 7.700 MBit/s beträgt.

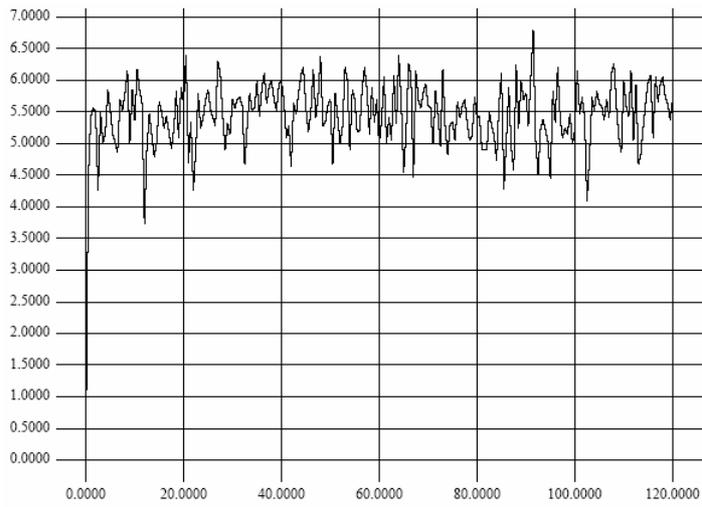


Abb. 7.4 : Simulationskurve 11MBit/s Wald 65 Meter

7.2.2.2 Szenario 11 MBit/s Wald bei 80 Metern

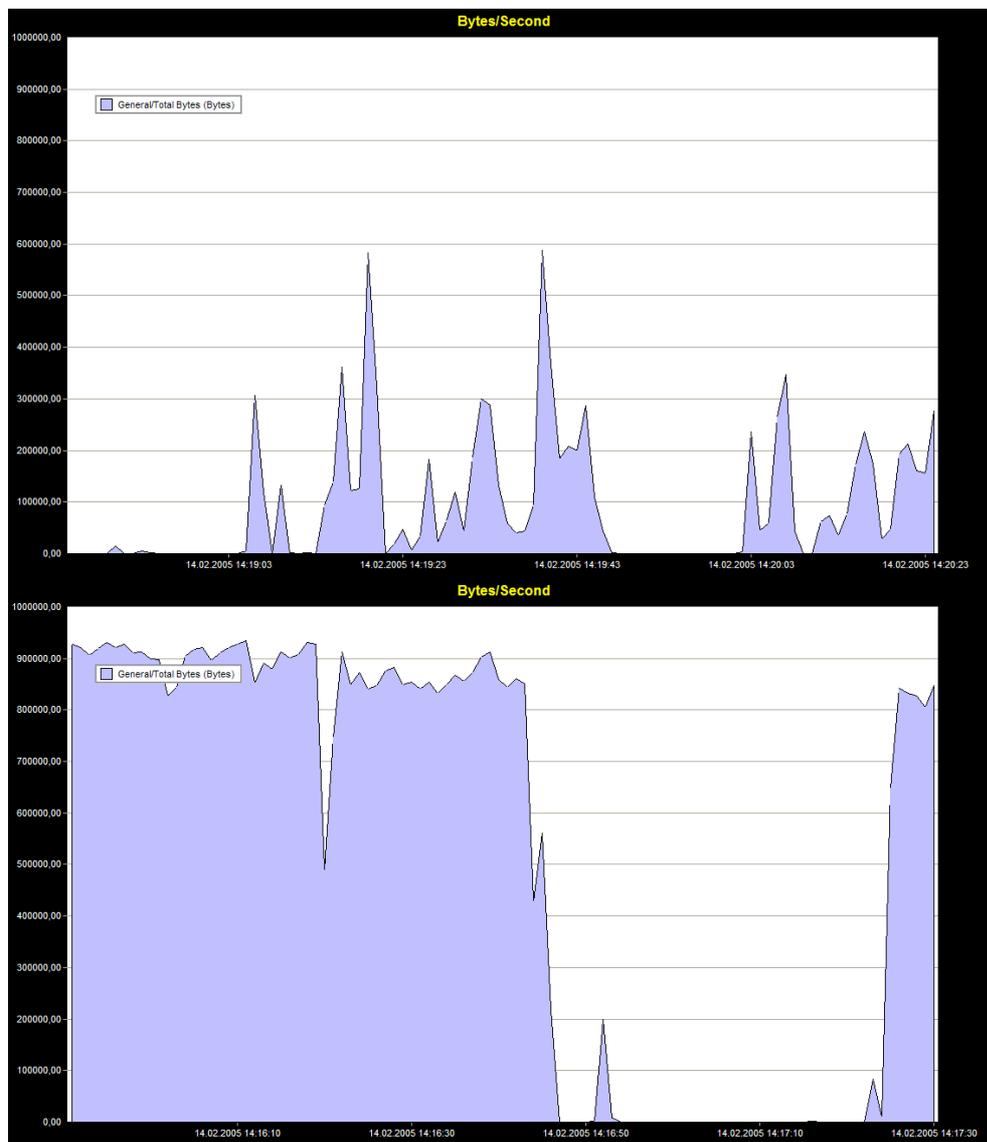


Abb. 7.5 : Erste beide Messkurven 11 MBit/s Wald 80 Meter

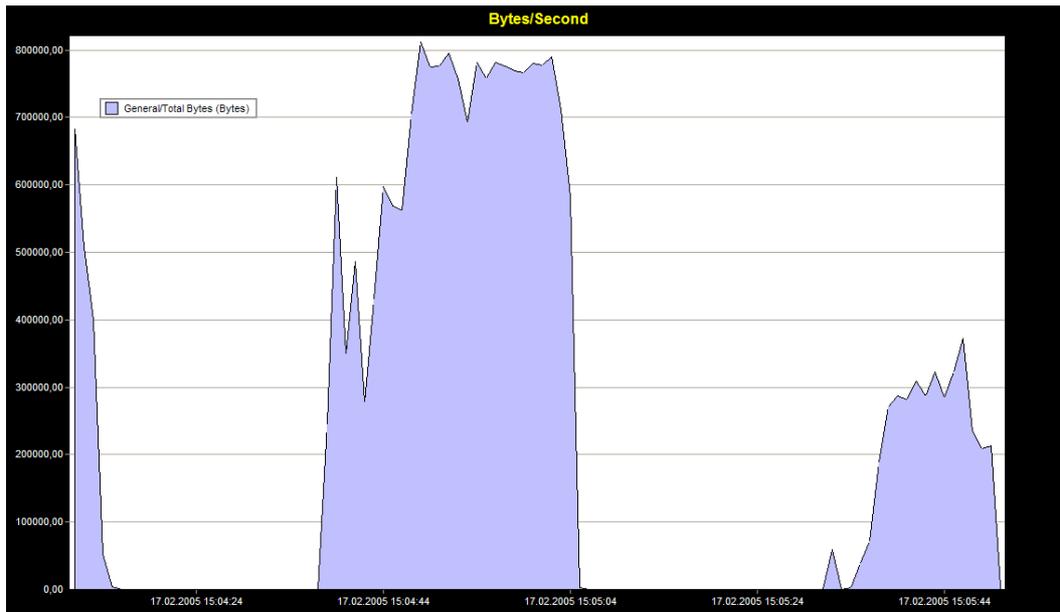


Abb. 7.6 : Dritte Messkurve 11 MBit/s Wald 80 Meter

Auch hier zeigen die Messkurven kein konsistentes Verhalten und erschweren somit die Simulation. In der ersten Messreihe können auf diese Entfernung fast keine Datenpakete mehr empfangen werden, nur vereinzelte stärkere Peaks sind in der Messkurve zu beobachten. In der zweiten Messkurve befindet sich das Durchsatzniveau in der Nähe des maximal möglichen Durchsatzes, abgesehen von einer längeren Phase, in der die Verbindung während der Messung fast völlig verloren ging. Die dritte Messkurve weist nur eine vereinzelte Phase auf, in der ein höherer Durchsatz erreicht wird, ansonsten liegt das Durchsatzniveau meist bei Null. Die großen Unterschiede auch innerhalb einer Messreihe machen wiederum einen Kompromiss bei der Simulation erforderlich. Der hohe Durchsatz der ersten Messreihe und der niedrige Durchsatz der zweiten Messreihe führen wiederum zu einer Mittelwertbildung; das Durchsatzniveau der simulierten Kurve liegt in etwa bei der Hälfte des Maximums. Auch der Mittelwert der beiden Durchsatzniveaus der dritten Messkurve liegt ungefähr in diesem Bereich. Die mäßige Stärke des Rauschens in der Simulationskurve stellt einen Kompromiss aus erster Messung (kaum Rauschen) und zweiter Messung (viele stärkere Peaks) dar.

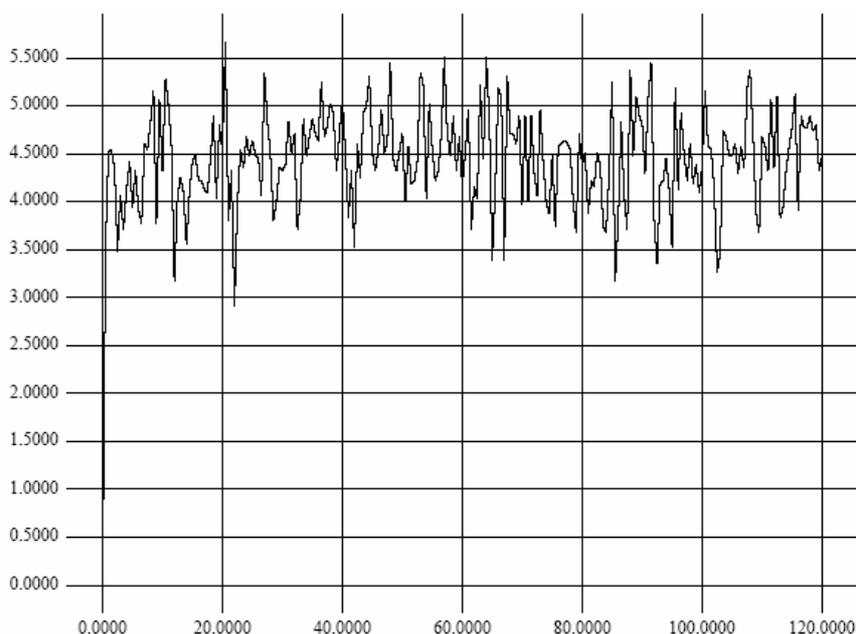


Abb. 7.7 : Simulationskurve 11 MBit/s Wald 80 Meter

7.2.3 Terrain Parkplatz

7.2.3.1 Szenario 2 MBit/s Parkplatz bei 46 Metern

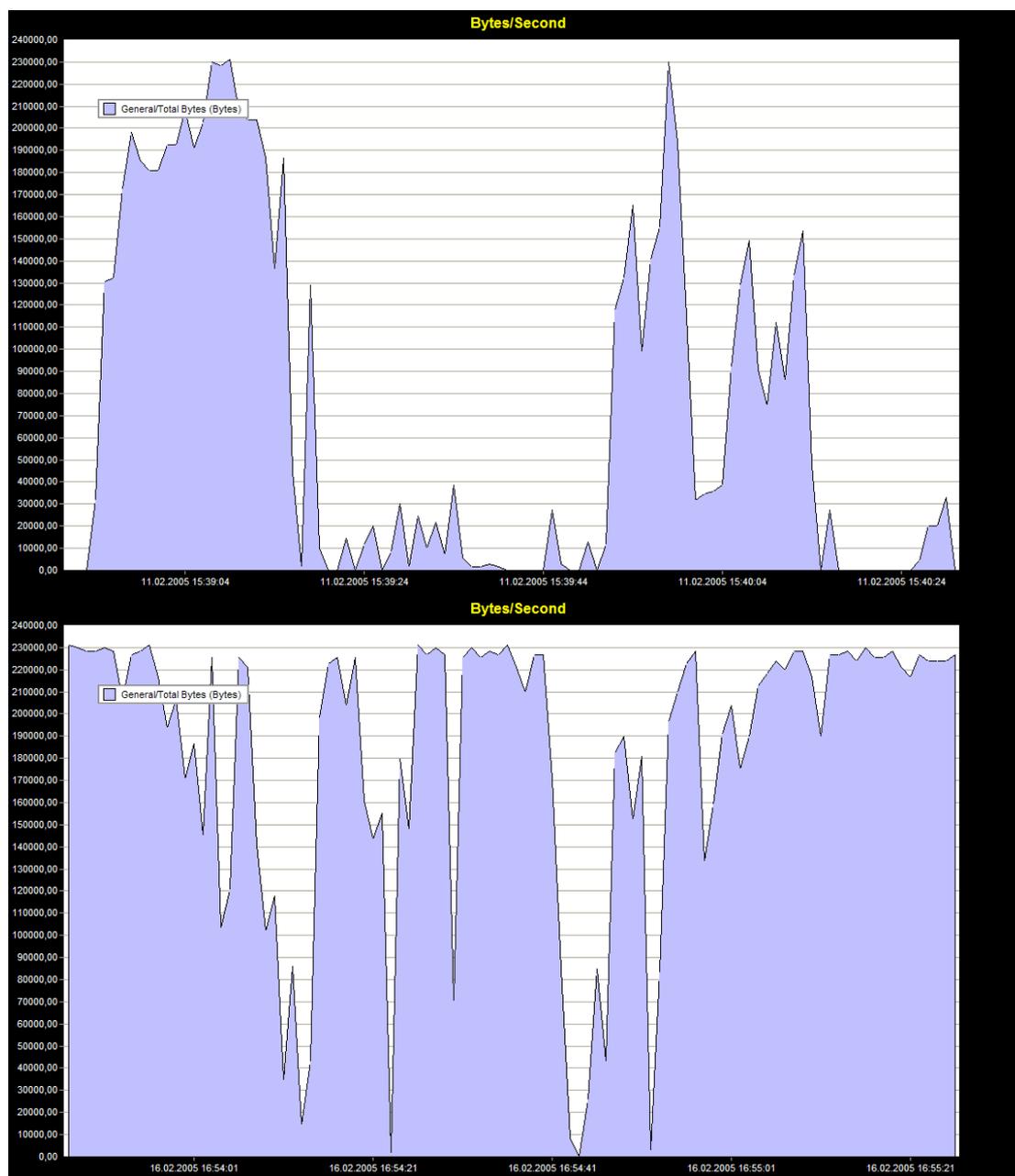


Abb. 7.8 : Messkurven 2 MBit/s Parkplatz 46 Meter

Diese beiden Messkurven unterscheiden sich erheblich voneinander. In der ersten Kurve ist das Durchsatzniveau fast bei Null, bis auf einzelne Phasen/Peaks, wo der Durchsatz dann aber recht hoch ist. Die zweite Kurve weist einen Durchsatz auf maximalem Niveau auf, aber auch zahlreiche sehr starke Einschnitte. Das Durchsatzniveau der Simulationskurve stellt hier wiederum einen Kompromiss (Mittelwert) zwischen beiden Messkurven dar und ist auch konsistent zu den in der ersten Serie gewonnenen Ergebnissen, da es etwa in der Mitte zwischen den dortigen Niveaus für 32 und 60 Meter liegt. Die beobachteten Schwankungen in den Messkurven wurden durch zahlreiche starke Peaks simuliert.

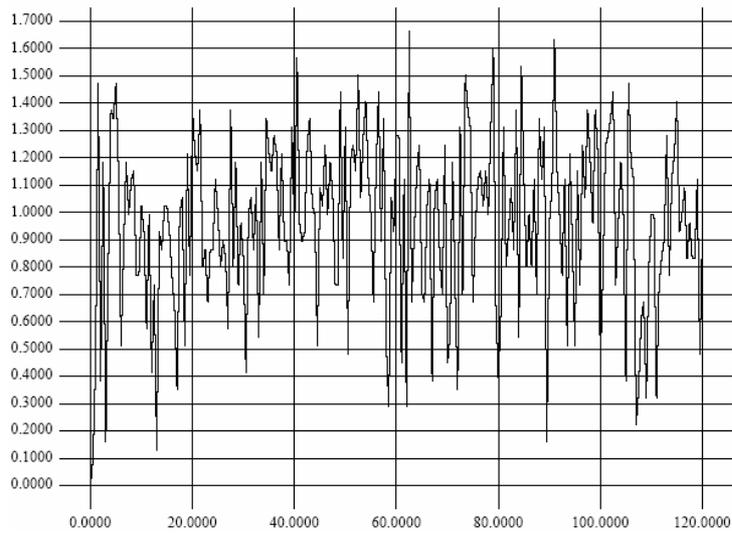


Abb. 7.9 : Simulationskurve 2 MBit/s Parkplatz 46 Meter

7.2.3.2 Szenario 2 MBit/s Parkplatz bei 66 Metern

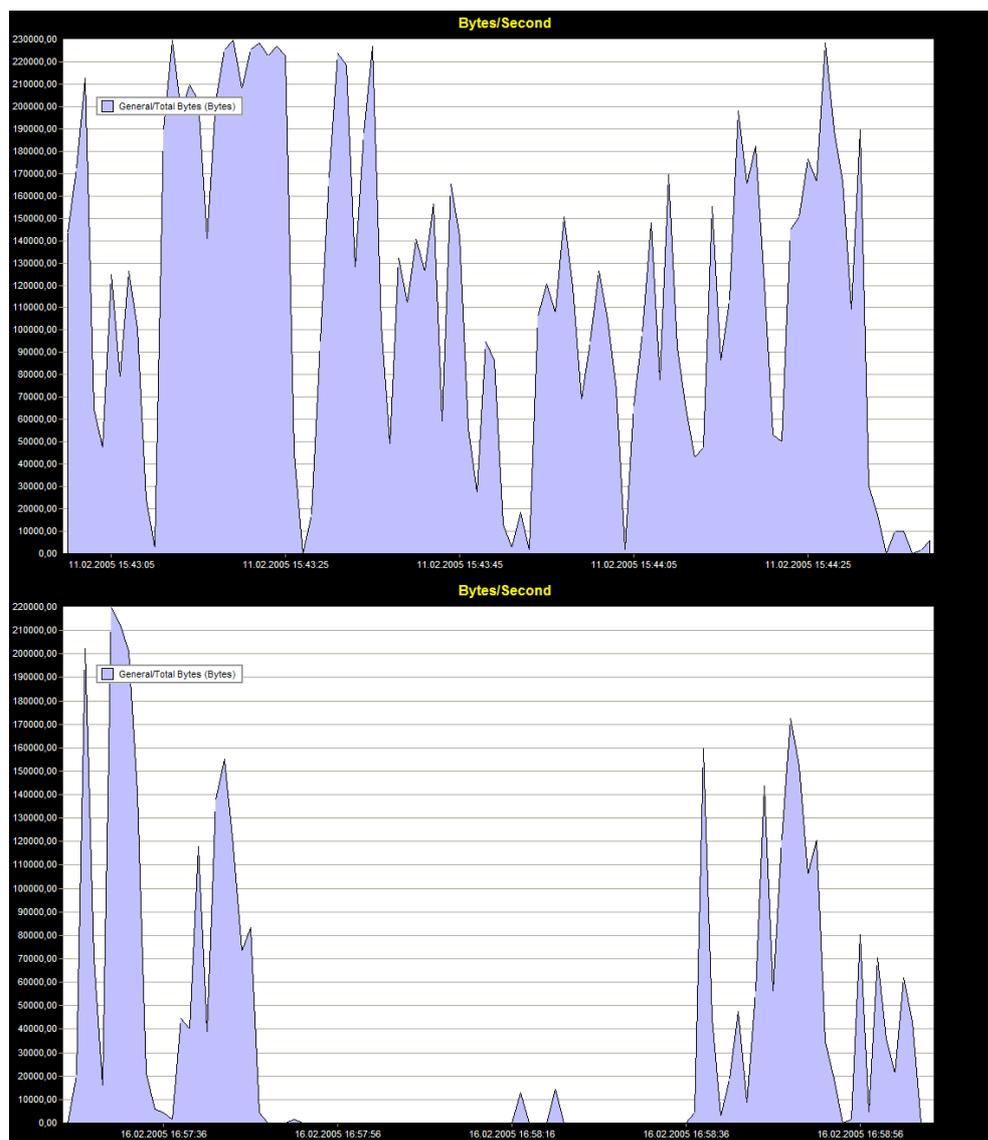


Abb. 7.10 : Messkurven 2 MBit/s Parkplatz 66 Meter

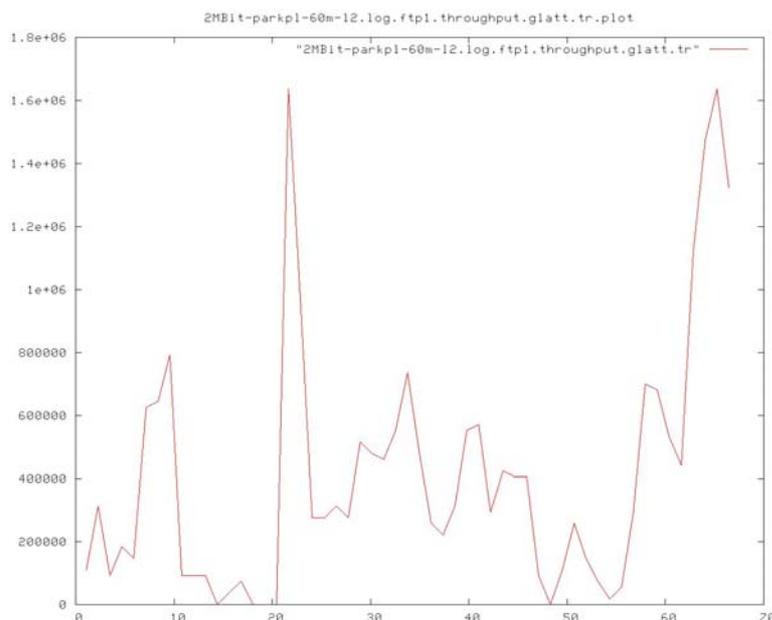


Abb. 7.11 : Messkurve 2 MBit/s Parkplatz 60 Meter aus Experiment 01 (Bit/s)

Die beiden Messkurven aus Experiment 01b weisen beide sehr starke Peaks (bis zum Maximaldurchsatz) auf. Das Durchsatzniveau ist bei der zweiten Kurve sehr gering. Bei der ersten Kurve ist es deutlich höher, aber aufgrund der starken Schwankungen kaum bestimmbar; es wurde grob auf ca. die Hälfte des Maximaldurchsatzes abgeschätzt. Das Durchsatzniveau der Simulationskurve liegt bei etwa einem Drittel des Maximums, was auch mit der in Experiment 01 erhaltenen Messkurve konsistent ist. Bei den simulierten Peaks konnte nicht die gleiche Stärke wie in den Messkurven erreicht werden, da bei entsprechender Erhöhung der entsprechenden Parameter die Peaks der Simulationskurve bei 32 Metern zu stark geworden wären.

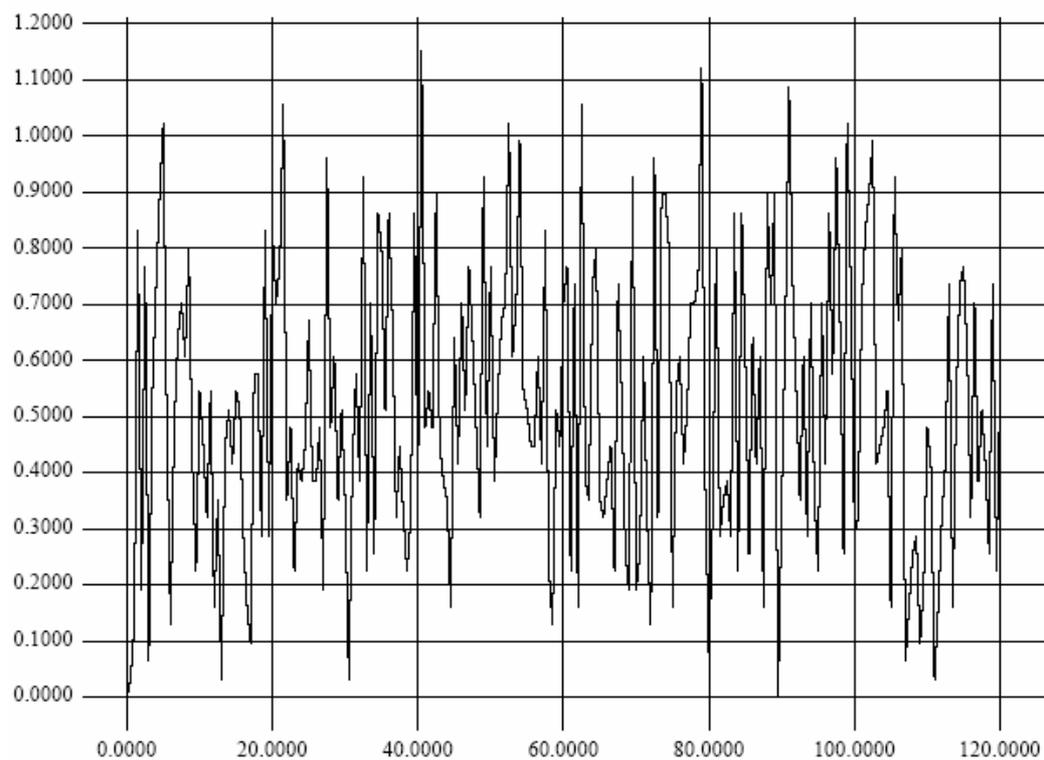


Abb. 7.12 : Simulationskurve 2 MBit/s Parkplatz 66 Meter

7.2.4 Terrain Unterholz

7.2.4.1 Szenario 2 MBit/s Unterholz bei 20 Metern

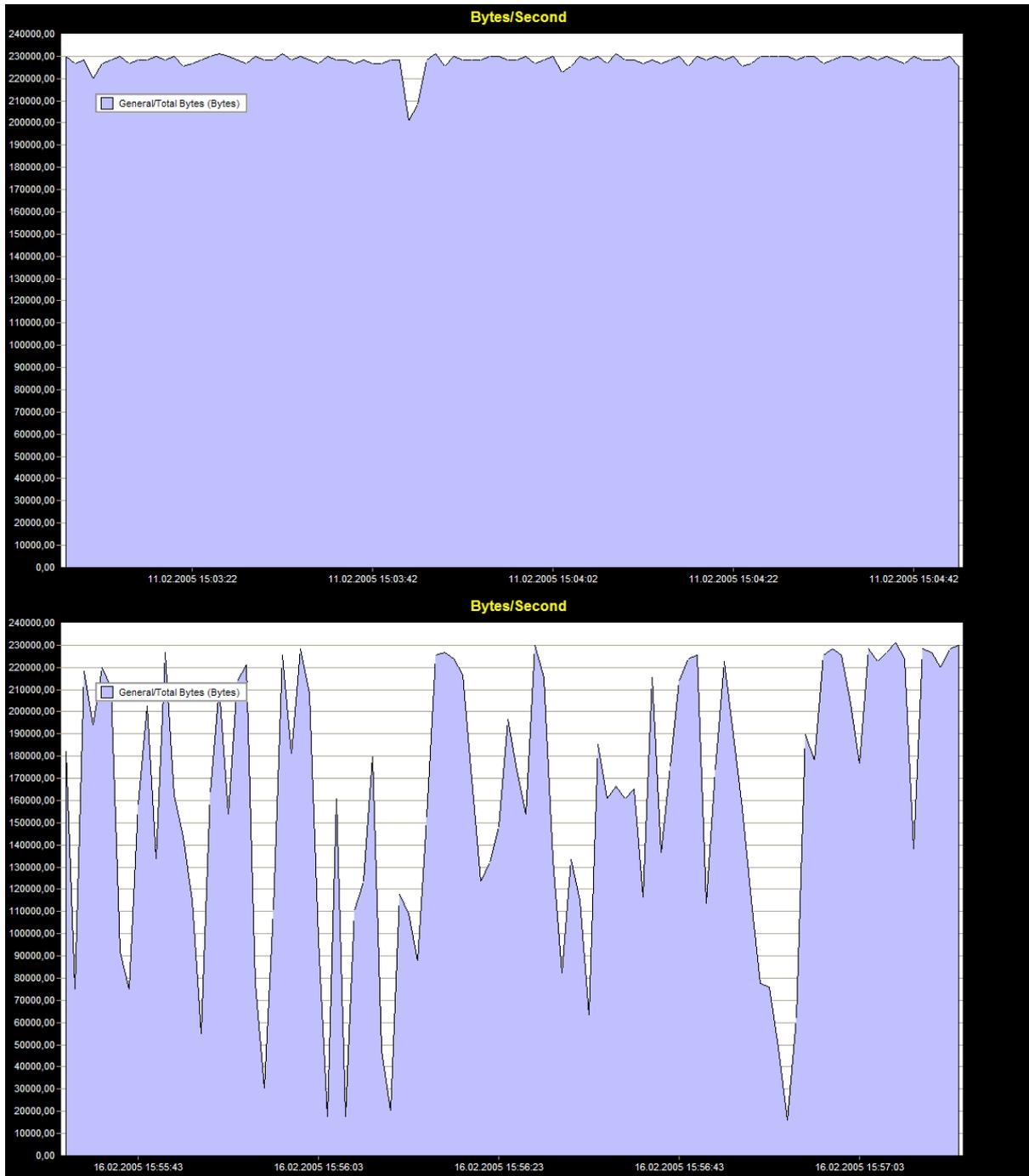


Abb. 7.13 : Messkurven 2 MBit/s Unterholz 20 Meter

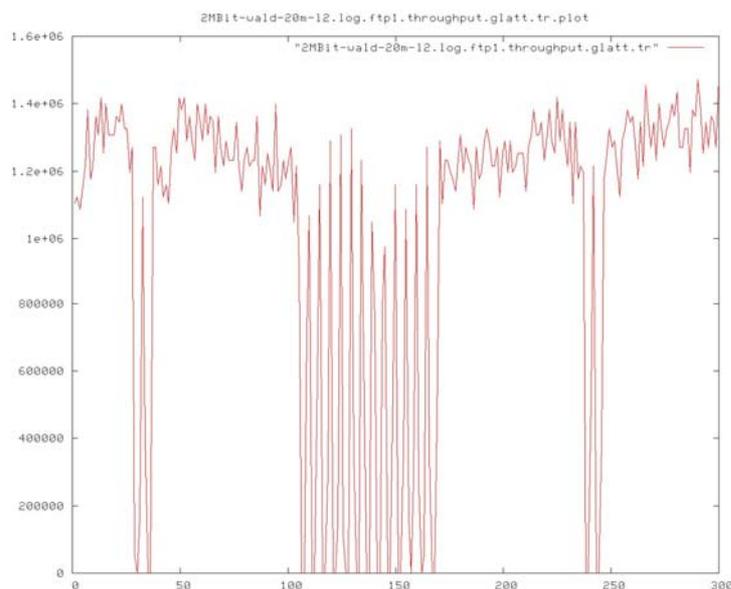


Abb. 7.14 : Messkurve 2 MBit/s Wald 20 Meter aus Experiment 01 (Bit/s)

Die Messungen im Terrain Unterholz ergaben hier recht unterschiedliche Ergebnisse bei gleichen äußeren Bedingungen und gleicher Entfernung zwischen den Notebooks. Die abgebildeten Messgraphen sind ein gutes Beispiel für die indeterministische Natur des Kommunikationsverhaltens in hindernisreichen Terrains und die demzufolge nur unzureichenden Möglichkeiten zur Simulation. Während die erste Messkurve aus Experiment 01b fast keine Schwankungen aufweist, sind diese bei der zweiten Messkurve sehr stark. Das Durchsatzniveau der ersten Kurve entspricht dem maximalen Durchsatz; das der zweiten Kurve ist aufgrund der Schwankungen nur sehr schwer zu bestimmen, auf alle Fälle aber wesentlich geringer (grob geschätzt zwei Drittel des Maximums). Das Durchsatzniveau der simulierten Kurve liegt bei ca. drei Viertel des maximalen Durchsatzes, was einen vernünftigen Kompromiss zwischen den drei abgebildeten Messkurven darstellt. Die Stärke des Rauschens orientiert sich an dem Messgraphen aus Experiment 01, dessen phasenweise starke Schwankungen auf hardwarebedingte Verbindungsausfälle zurückzuführen sind und daher bei der Simulation nicht weiter berücksichtigt werden, und liegt somit zwischen den in den anderen Messgraphen zu beobachtenden Extremen.

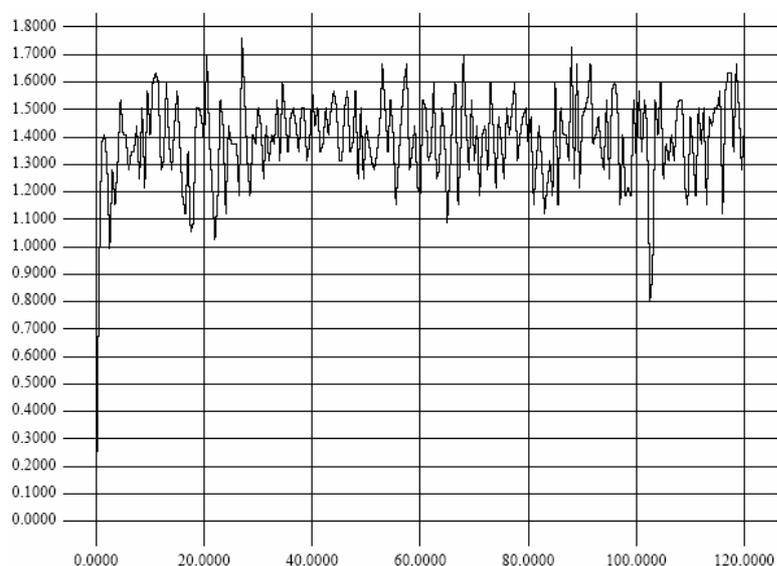


Abb. 7.15 : Simulationskurve 2 MBit/s Unterholz 20 Meter

7.2.4.2 Szenario 2 MBit/s Unterholz bei 50 Metern

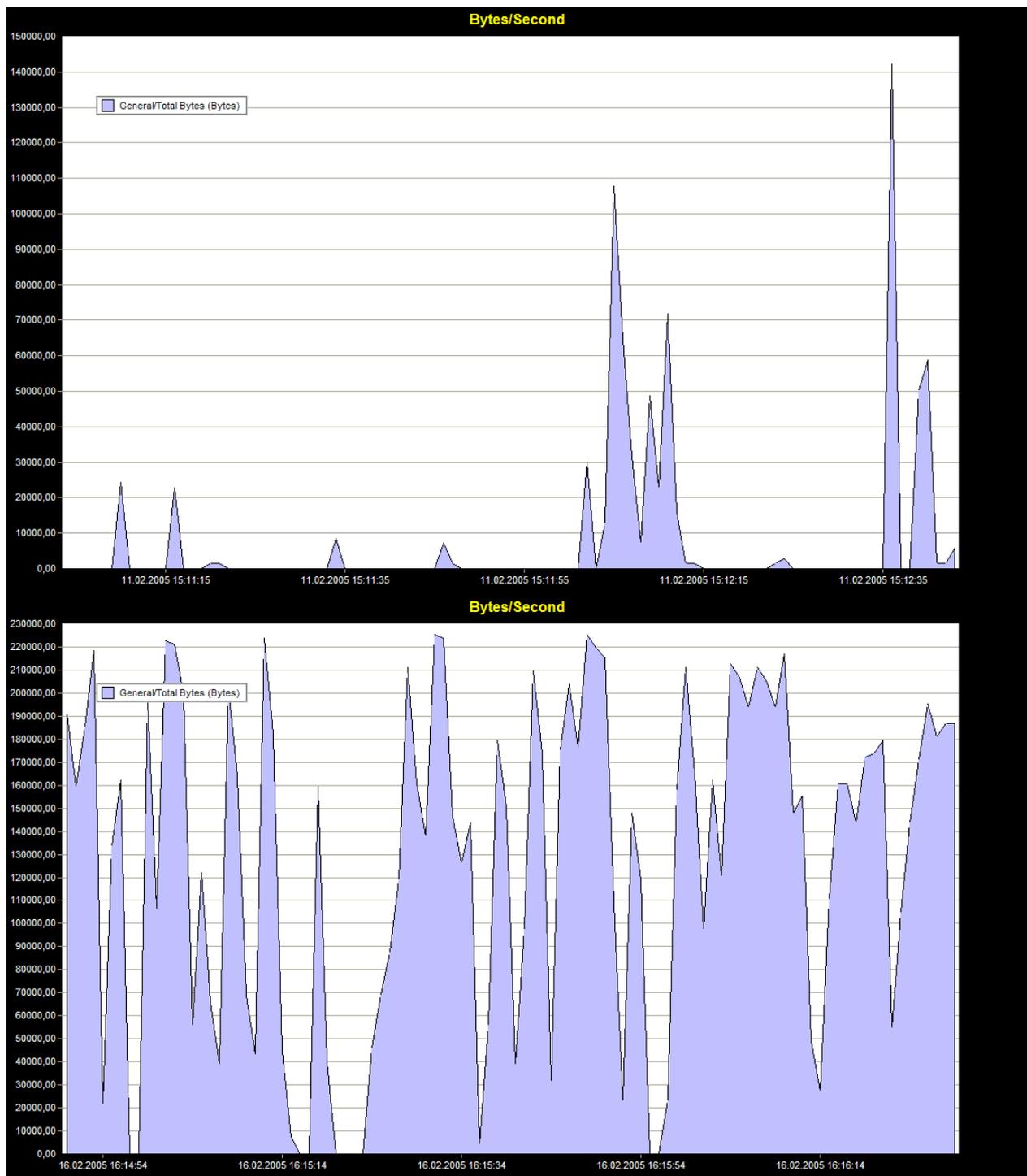


Abb. 7.16 : Messkurven 2 MBit/s Unterholz 50 Meter

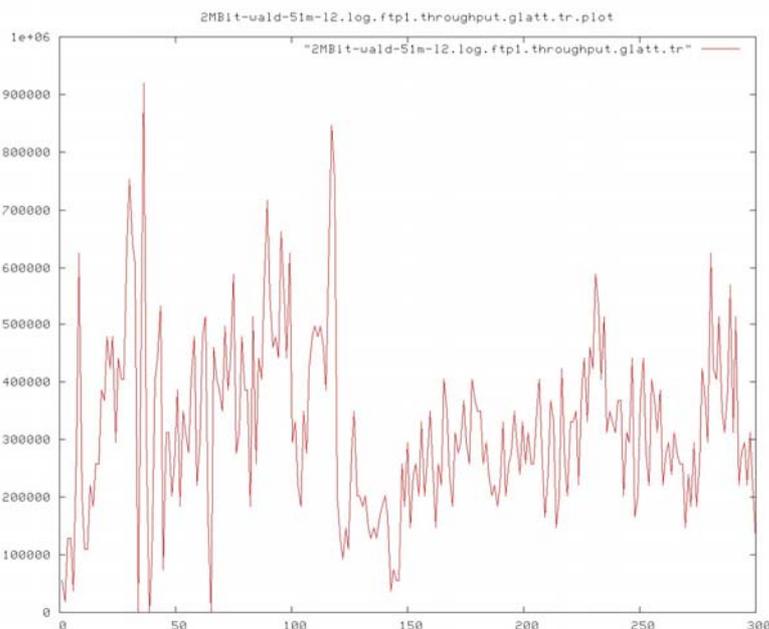


Abb. 7.17 : Messkurve 2 MBit/s Wald 51 Meter aus Experiment 01 (Bit/s)

Die erste Messkurve zeigt bis auf wenige Einzelpeaks ein Durchsatzniveau von fast Null, es wurden in der Messung kaum noch Pakete empfangen. Die zweite Kurve weist jedoch starke Schwankungen auf, deren Amplitude teilweise sogar das Maximum erreicht. Ihr Durchsatzniveau ist kaum abschätzbar, es dürfte grob geschätzt etwas weniger als die Hälfte des maximalen Durchsatzes betragen. Die Simulationskurve entspricht in ihrem Durchsatzniveau (ein Sechstel des Maximums) etwa der Kurve aus Experiment 01; der geringfügig geringere Wert kommt im Hinblick auf den niedrigen Durchsatz in der ersten Messkurve zustande. Der höhere Durchsatz der zweiten Messkurve konnte hier nur unzureichend berücksichtigt werden, da eine zur Anhebung des simulierten Durchsatzniveaus erforderliche Manipulation des Parameters *Path Loss Exponent* auch eine unerwünschte Erhöhung des Durchsatzes bei der Entfernung von 20 Metern verursachen würde. Die Schwankungen bzw. Peaks der Messkurven waren mit dem gegebenen Modell nicht in ihrem vollen Ausmaß zu simulieren; weitere Verringerung der entsprechenden Parameter führte zu keinen besseren Ergebnissen mehr.

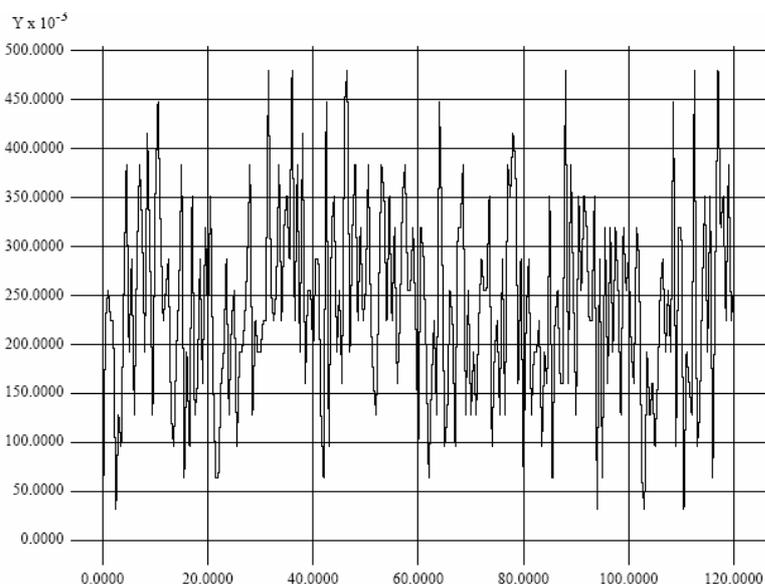


Abb. 7.18 : Simulationskurve 2 MBit/s Unterholz 50 Meter

7.2.5 Unbrauchbare Messungen

Messergebnisse, die in Experiment 01b unter Verwendung eines Prism2-WLAN-Adapters gewonnen wurden, wurden bei der Durchführung der Simulationen in der zweiten Simulationsphase nur am Rande berücksichtigt, wie bereits in Kapitel 6 erwähnt. Aufgrund technischer Schwierigkeiten mit Treibersoftware und Firmware dieser Karte sind die erhaltenen Messergebnisse oftmals implausibel und stehen im Widerspruch zu anderen Ergebnissen. Hierfür sollen nun einige Beispiele aufgeführt werden.

7.2.5.1 Szenario 2 MBit/s Unterholz bei 35 Metern

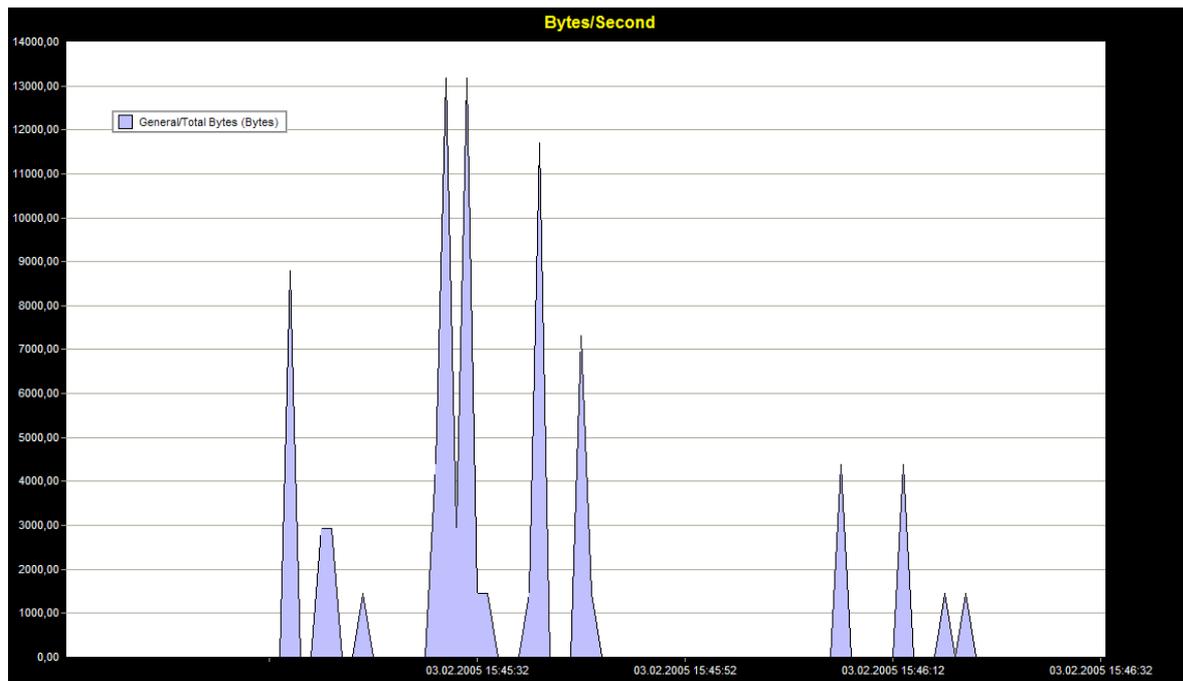


Abb. 7.19 : Messkurve 2 MBit/s 35 Meter Unterholz mit Prism2-Karte

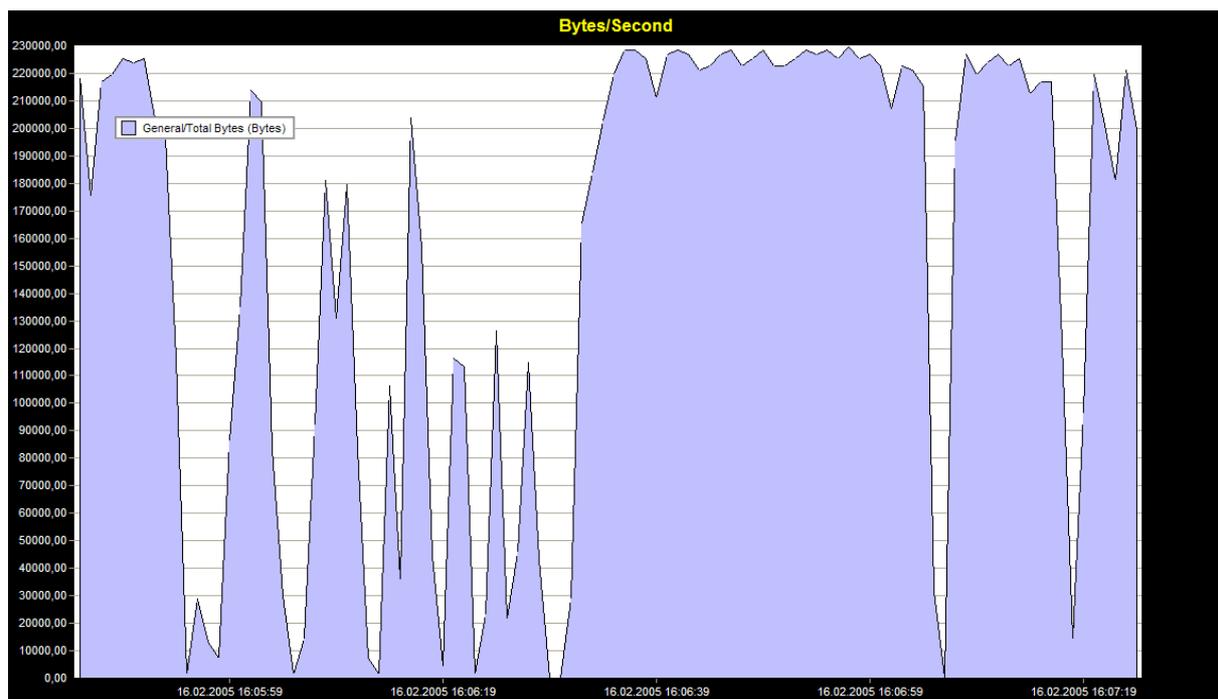


Abb. 7.20 : Erste Messkurve 2 MBit/s 35 Meter Unterholz mit Netgear -Karte

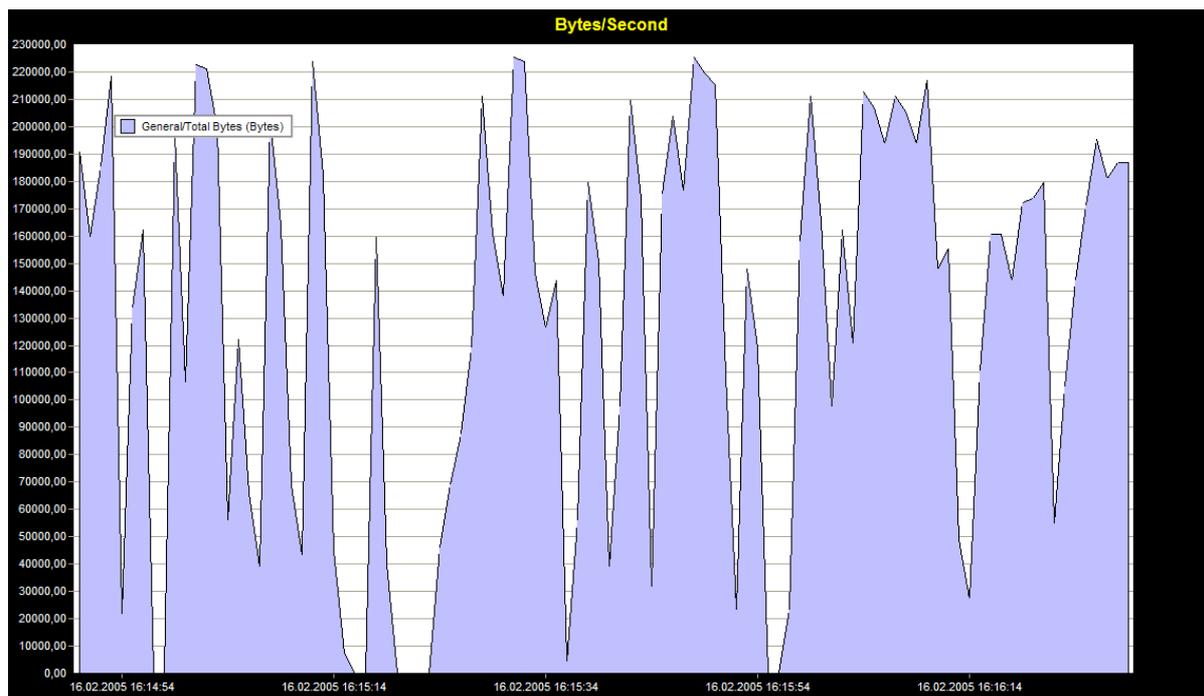


Abb. 7.21 : Zweite Messkurve 2 MBit/s 35 Meter Unterholz mit Netgear-Karte

Diese Messungen illustrieren die Probleme, die sich bei den Messungen mit der Prism2-Karte ergaben, auf anschauliche Weise. Die anderen beiden Messkurven weisen zwar terrainbedingt sehr große Schwankungen auf, erreichen aber beide den maximalen Durchsatz, die erste Kurve sogar für eine längere Zeitdauer. Bei Verwendung der Prism2-Karte konnten jedoch trotz sehr ähnlicher äußerer Bedingungen fast keine durchkommenden Pakete gemessen werden, die zugehörige Messkurve hat ein Durchsatzniveau von annähernd Null und weist nur wenige, schwache Peaks auf. Bei der Simulation wurde dieser Messlauf aufgrund dieser erheblichen Abweichung nicht berücksichtigt.

7.2.5.2 Szenario 11 MBit/s Unterholz bei 30 Metern

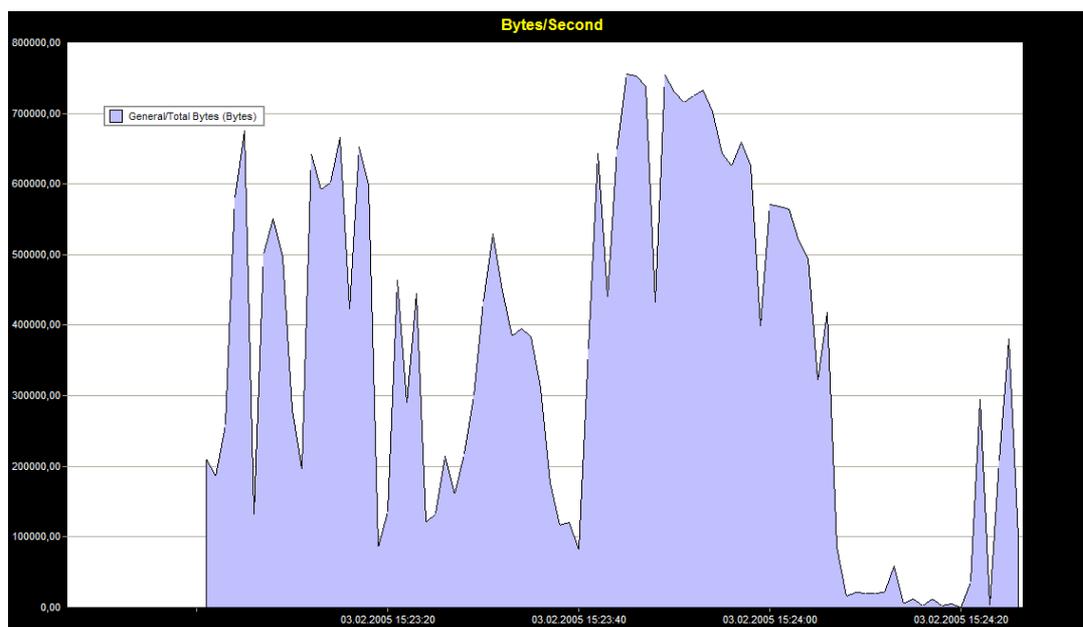


Abb. 7.22 : Messkurve 11 MBit/s 30 Meter mit Prism2-Karte

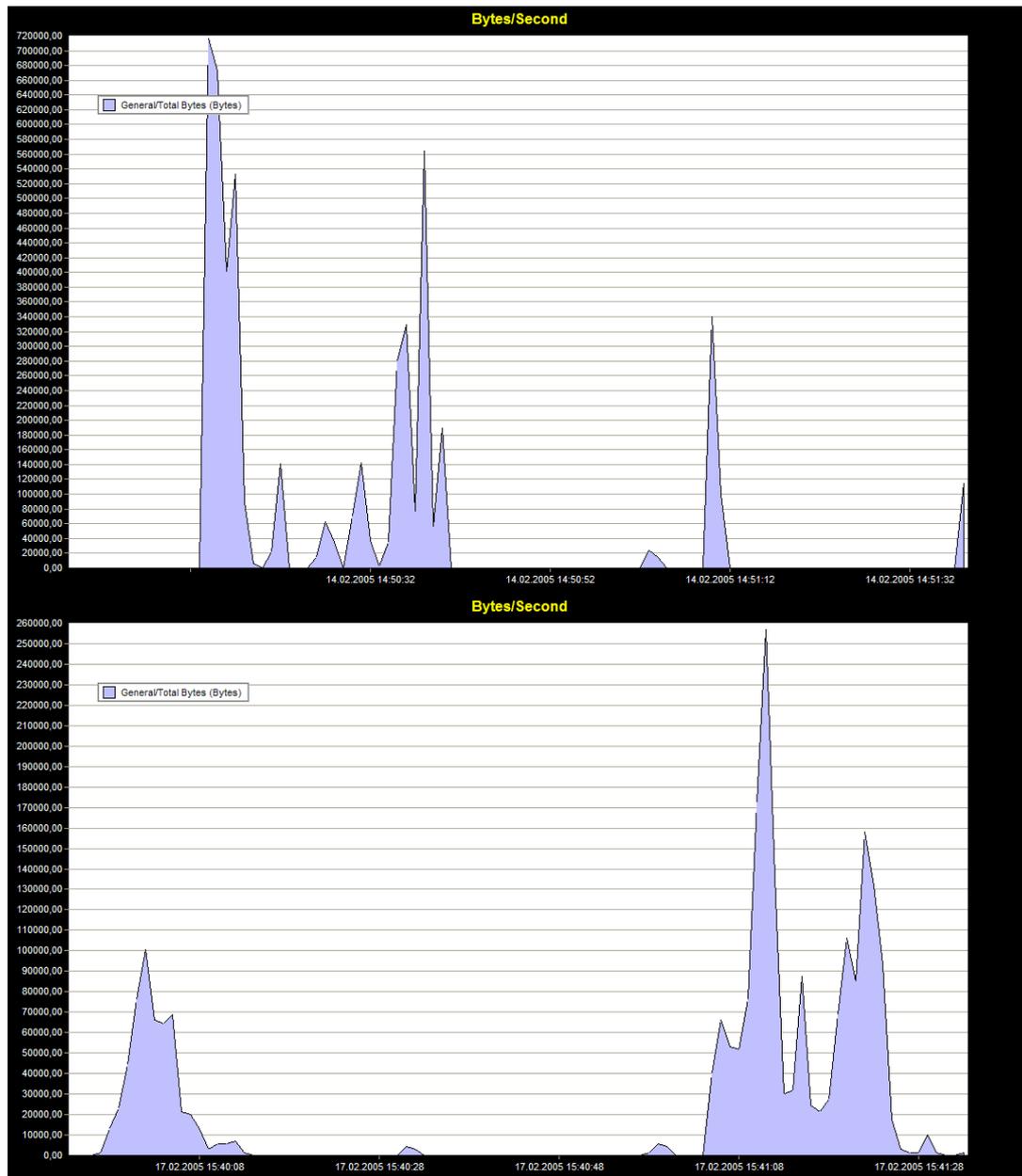


Abb. 7.23 : Messkurven 11 MBit/s Unterholz 30 Meter

In diesem Szenario sind die Durchsatzniveaus bei den Messungen über Entfernungen von 21 und 30 Metern unter Verwendung der Prism2-Karte erheblich höher als mit der Netgear-Karte, wo die Sendereichweite bei 30 Metern an ihre Grenze kommt und das Durchsatzniveau fast bei Null liegt.

Bei der Übertragungsrates 2 MBit/s ist ein Trend zum entgegen gesetzten Verhalten festzustellen, die mit Prism2 gemessenen Durchsatzniveaus sind hier zu gering (siehe Abschnitt 7.2.5.1 und Anhang A).

Diese merkwürdigen Ergebnisse, die mit Prism2 gewonnen wurden, lassen auf technische Probleme schließen, die die Vergleichbarkeit zu anderen Ergebnissen beeinträchtigen, und wurden daher in der Simulation nur am Rande berücksichtigt.

7.3 Bewertung der Ergebnisse

Ziel dieser Arbeit war die Simulation verschiedener Messungen des Datendurchsatzes in unterschiedlichen Szenarios (Terrain und Übertragungsrate) und für jedes dieser Szenarios die Bestimmung eines Parametertupels, das als „allgemeingültiges“ (statistisch abgesichertes) und bei solchen Simulationen universell einsetzbares Modell dienen soll.

In den Terrains Wiese und Wald konnte dieses Ziel einigermaßen erreicht werden, da die in diesen Terrains durchgeführten Messungen größtenteils zueinander konsistente Ergebnisse lieferten, wodurch die Durchführung der Simulationen unproblematisch war. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass sich die zugehörigen Simulationsergebnisse auf *keine große Datenbasis* stützen. Für das Terrain Wiese wurde in Experiment 01b beispielsweise nur eine Messreihe durchgeführt, allerdings lässt das äußerst stabile Verhalten des gemessenen Datendurchsatzes aufgrund der optimalen Bedingungen in weiteren Messreihen ähnliche Ergebnisse erwarten. Die Messungen aus Experiment 01 für dieses Terrain wurden in der zweiten Simulationsphase nicht berücksichtigt, da die Bedingungen auf dem dort benutzten Gelände so stark von denen des Sportplatzes abweichen, dass eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse nicht mehr gewährleistet ist. Im Terrain Wald wurden nur im Zuge von Experiment 01b Messungen durchgeführt; die durchschnittliche Anzahl an Messläufen pro Bitrate und Entfernung liegt bei drei, was eine vernünftige Datenbasis darstellen sollte, zumal die mit der Prism2-Karte gewonnen Ergebnisse ebenfalls recht stabil sind und somit für die Simulation berücksichtigt werden konnten.

Bei den Terrains Parkplatz und Unterholz sorgten hingegen, wie in Abschnitt 7.2 beschrieben große Varianzen zwischen unterschiedlichen Messreihen für große Schwierigkeiten bei der Durchführung der Simulationen und zwangen zu Kompromissen bei der Festlegung der Parameter. Erschwerend kamen die Ergebnisse der Prism2-Karte hinzu, die für die Simulation größtenteils unbrauchbar waren. Im Hinblick auf die für diese Terrains typischen Varianzen ist die vorhandene Datenbasis somit zu gering, um allgemeingültige Aussagen über das Übertragungsverhalten treffen zu können. Eine ausreichende Datenbasis würde eine um ein Vielfaches größere Anzahl an Messungen erfordern, was jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Die in der Simulation erhaltenen Ergebnisse sind also nur als ungefähre Richtwerte zu verstehen; die Simulation mit diesen Parametern führt zwar zu einer bestmöglichen Annäherung an die in dieser Arbeit gewonnenen Messergebnisse, bei anderen Messungen in vergleichbarem Gelände muss dies jedoch nicht zwangsläufig der Fall sein. Messungen in anderen Waldstücken oder auf anderen Parkplätzen hätten möglicherweise zu anderen Simulationsparametern geführt. Ein Modell, das die Bezeichnung „allgemeingültig“ einigermaßen verdient, müsste anstatt mit einzelnen Zahlenwerten mit Intervallen für die Werte der Simulationsparameter beschrieben werden. Weitere Messungen in den beiden Terrains könnten genauere Ergebnisse liefern, die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse eignen sich hierbei als Ausgangsbasis.

Die in Kapitel 2.1 aufgezählten vereinfachenden Annahmen, die in Form von sechs Axiomen formuliert sind, konnten durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimente weitestgehend widerlegt werden. Axiom 1 und 2 („Der Erfolg einer Übertragung von einem Funkknoten zu einem Anderen hängt nur von der Entfernung zwischen den Knoten ab.“) sowie Axiom 5 („Signalstärke ist eine einfache Funktion der Entfernung“) erweisen sich im Hinblick auf die in Abschnitt 7.2 gezeigten Messkurven, die trotz gleichen Szenarios und gleicher Entfernung sehr unterschiedliche Gestalt haben als falsch. Auch Axiom 4 („Wenn ich dich überhaupt hören kann, dann kann ich dich perfekt hören“) trifft offensichtlich nicht zu; der Datendurchsatz und somit auch die Signalstärke nahmen bei zunehmender Entfernung kontinuierlich ab, können also nicht durch eine Sprungfunktion beschrieben werden.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn dieser Arbeit, die das Finden von Parametertupeln als Modell zur Simulation der Datenübertragung zwischen zwei drahtlosen Netzwerkknoten in unterschiedlichen Terrains zum Ziel hat, wurde auf die Probleme bei der Simulation drahtloser Netzwerke eingegangen und die Glaubwürdigkeit von Simulationsergebnissen genauer beleuchtet. Viele in der Praxis verwendete Simulationsmodelle gehen von einfachen Annahmen aus, die zwar die Implementierung der Modelle und die Durchführung der Simulationen erleichtern, die realen Gegebenheiten jedoch übermäßig vereinfachen und daher nur ungenaue, wenig aussagekräftige Ergebnisse liefern. Diese Annahmen wurden in Form von sechs Axiomen dargestellt. Die Axiome konnten anhand der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen weitestgehend widerlegt werden. Darauf wurde näher auf den verwendeten Simulator ns-2 eingegangen, der Schwerpunkt lag hier auf den gebräuchlichen Signalausbreitungsmodellen. Erwähnung fanden auch andere Faktoren, die für die Simulation drahtloser Netzwerke ebenfalls von Bedeutung sein können, in dieser Arbeit aber vernachlässigt werden konnten.

Die Literaturrecherche lieferte nur wenige für diese Arbeit verwertbare Informationen. Die meisten Veröffentlichungen, in deren Rahmen Simulationen drahtloser Netzwerke durchgeführt werden, befassen sich mit Performancevergleichen verschiedener Routingprotokolle. Diese werden jedoch fast ausschließlich auf der Basis von Simulationsergebnissen vorgenommen, eine experimentelle Überprüfung findet in der Regel nicht statt.

Die Messungen wurden in zwei Serien und insgesamt vier Terrains durchgeführt. Simuliert wurden diese Messergebnisse in zwei Simulationsphasen, wobei die Simulationskurven durch Manipulation der Parameter den Messergebnissen möglichst genau angenähert werden sollten. Als Ausbreitungsmodell fiel die Wahl aufgrund der indeterministischen Natur der zu simulierenden Terrains auf das Shadowing-Modell. Das Rauschen (Small-Scale-Fading) der Messkurven wurde durch Ricean Fading simuliert.

Für die Terrains Wald und Wiese konnte das Ziel der Arbeit, das Bestimmen eines „allgemeingültigen“ (statistisch abgesicherten) Modells zumindest partiell erreicht werden, zueinander konsistente Messergebnisse mit moderatem Rauschen sorgen für eine problemlose Durchführung der Simulationen. Das erhaltene Modell sollte durch weitere Messungen verifiziert werden.

Die Messergebnisse in den Terrains Parkplatz und Unterholz weisen hingegen sehr große Varianzen auf, was auf terrainbedingte Eigenarten (Hindernisse, Reflexionen usw.) zurückzuführen ist. Simulationen waren hier schwierig durchführbar, zahlreiche Kompromisse waren bei der Wahl der Parameter erforderlich. Die im Rahmen der Messungen gewonnene Datenbasis reicht hier nicht aus, um ein allgemeingültiges Modell zu finden; die erhaltenen Simulationsergebnisse stellen nur ungenaue Annäherungen dar.

Für weitere Untersuchungen, die sich der Thematik dieser Arbeit widmen, sei vor allem die Durchführung einer weitaus größeren Anzahl an Messreihen empfohlen als es im Rahmen dieser Arbeit möglich war. Das Verhalten des Datendurchsatzes ist besonders in den Terrains Unterholz und Parkplatz derart indeterministisch, dass eine sehr breite Datenbasis an Messergebnissen erforderlich ist, um ein Modell zu erhalten, das die Bezeichnung „statistisch abgesichert“ verdient. Die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse können hierbei als Ausgangsbasis für weitere Messungen und Simulationen dienen.

Eine weitere Herangehensweise bestünde beispielsweise darin, die Messungen nicht für unterschiedliche Terrains sondern für unterschiedliche Qualitätsstufen durchzuführen. Die Messreihen werden hier an unterschiedlichen, nicht vorher festgelegten Orten durchgeführt. Die Messergebnisse werden daraufhin je nach Höhe des Durchsatzniveaus und Stärke der Schwankungen in unterschiedliche Qualitätsstufen (z. B. Gut; Mittel, Schlecht) eingeteilt. Das Ziel der Simulationsläufe bestünde dann darin, passende Parametertupel für jede Qualitätsstufe zu finden. Erst danach werden die Terrains betrachtet, in denen die Messungen stattfanden. Für jedes Terrain wird festgestellt, wie groß der jeweilige Anteil der verschiedenen Qualitätsstufen an der Gesamtzahl der in diesem Terrain durchgeführten Messreihen ist. Die Simulationsparameter könnte man als den entsprechend der Anteile gewichteten Mittelwert zwischen den Parametern der Qualitätsstufen berechnen. Der Vorteil dieses Ansatzes läge in der Eliminierung von Varianzen zwischen einzelnen Messreihen durch die Einteilung in gleiche Qualitätsstufen. Auch hier ist jedoch eine große Datenbasis an Messergebnissen erforderlich, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten; wenn nur wenige Messungen in einem Terrain durchgeführt werden, können die Anteile der verschiedenen Qualitätsstufen völlig anders aussehen als bei einer größeren Anzahl von Messreihen.

Zu genaueren Simulationsergebnissen in den problematischen Terrains Unterholz und Parkplatz könnte die Verwendung komplexerer Ausbreitungsmodelle führen, z. B. Modelle zur Darstellung der Signalstärke in urbanen Regionen [GKL04]. Solche Modelle erfordern jedoch komplexe Berechnungen und führen somit zu übermäßig langen Simulationsläufen. Die Wahl des Modells stellt also stets einen Kompromiss zwischen Detailgrad und Geschwindigkeit dar.

9. Quellenverzeichnis

- [AJRN00] Ismail Ari, Neelu Jethani, Aniruddha Rangnekar, Sushma Natajaran
Performance Analysis and Comparison of Ad-Hoc Routing Protocols
<http://www.soe.ucsc.edu/~ari/adhoc-mobile-691t-umbc.pdf>
- [BMDHJ98] Josh Broch, David A. Maltz, David B. Johnson, Yih-Chun-Hu,
Jorjeta Jetcheva
A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network
Routing Protocols
<http://www.ics.uci.edu/~atm/adhoc/paper-collection/johnson-performance-comparison-mobicom98.pdf>
- [Br03] Marco Brand, Simulation und Bewertung von Routingverfahren in Ad-Hoc-
Netzen mit ns-2
Diplomarbeit, AG Vernetzte Systeme, Technische Universität Kaiserslautern
- [BT99] Rajive Bagrodia, Mineo Takai
Position Paper on Validation of Network simulation models
<http://pcl.cs.ucla.edu/papers/files/nist99.pdf>
- [CSS02] David Cavin, Yoav Sasson, André Schiper
On the Accuracy of MANET Simulators
<http://lsewww.epfl.ch/Documents/acrobat/CSA02b.pdf>
- [DD04] Jean-Michel Dricot, Philippe De Doncker
High-accuracy physical layer model for wireless network simulations in NS-2
<http://cs.ulb.ac.be/publications/P-04-05.pdf>
- [ER00] Moncef Elaoud and Parameswaran Ramanathan.
Adaptive allocation of CDMA resources for network-level QoS assurances
http://www.ece.wisc.edu/~wander/papers/adapt_cdma.pdf.gz
- [GKL04] Ingo Gruber, Oliver Knauf, Hui Li
Performance of Ad Hoc Routing Protocols in Urban Environments
<http://research.ac.upc.edu/EW2004/papers/6.pdf>
- [GKND04] Robert S. Gray, David Kotz, Calvin Newport, Nikita Dubrovsky,
Aaron Fiske, Jason Liu, Christopher Masone, Susan McGrath, Yougu Yuan
Outdoor Experimental Comparison of Four Ad Hoc Routing Algorithms
Dartmouth College Computer Science Technical Report TE2004-511
<http://cmc.cs.dartmouth.edu/cmc/papers/gray:compare-tr.pdf>
- [HBEI01] John Heidemann, Nirupama Bulusu, Jeremy Elson, Chalermek
Intanagonwiwat, Kun-chan Lan, Ya Xu, Wie Ye, Deborah Estrin
Ramesh Govindan
Effects of Detail in Wireless Network Simulation
<http://www.isi.edu/~johnh/PAPERS/Heidemann00d.pdf>

- [KNGLYE04] David Kotz, Calvin Newport, Robert S. Gray, Jason Liu, Yougou Yuan, Chip Elliott
Experimental evaluation of wireless simulation assumptions
Dartmouth Computer Science Technical Report TE2004-507
<http://cmc.cs.dartmouth.edu/cmc/papers/kotz:axioms-tr2.pdf>
- [MHM04] Mirco Musolesi, Stephen Hailes, Cecilia Mascolo
An Ad Hoc Mobility Model Founded on Social Network Theory
<http://www.cs.ucl.ac.uk/staff/m.musolesi/papers/mswim04.pdf>
- [MM01] Jeff McDougall, Scott Miller
Sensitivity of wireless Network Simulations to a Two-State Markov Model Channel Approximation
<http://wcl3.tamu.edu/publ/papers/McDMil03.pdf>
- [MR04] Maneesh Varshney, Rajive Bagrodia
Detailed Models for Sensor Network Simulations and their Impact on Network Performance
<http://pcl.cs.ucla.edu/papers/files/mswim04-varshney.pdf>
- [ns] Dokumentation ns-2
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>
- [nstut] ns-2 Tutorial (Marc Greis)
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/tutorial/index.html>
- [ÖZSP04] Erik Östlin, Hans-Jürgen Zepernick, Hajime Suzuki, André Pollok
Analysis of Correlation Between Ricean K-Factor and Vegetation Density Surrounding a CDMA Mobile Terminal
<http://eleit.stlib.gd.cn/jszc/Ieee%20new/0504wireless/05042507.pdf>
- [PJR01] K. Pawlikowski, H.-D. Joshua Jeong, J.-S. Ruth Lee
On Credibility of Simulation Studies of Telecommunication Networks
<http://www.cosc.canterbury.ac.nz/krys.pawlikowski/publications/credibility.0101.pdf>
- [QK03] Liang Qin, Thomas Kunz
On-demand Routing in MANETs: The Impact of a Realistic Physical Layer Model
In Proceedings of the 2nd International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless (ADHOC-NOW), Springer Lectere Notes in Computer Science 2865, October 2003
- [R99] Stewart Robinson
Three Sources of Simulation Inaccuracy (And How to Overcome Them)
<http://www.informs-sim.org/wsc99papers/246.PDF>

- [RL02] Soumya Roy, J.J. Garcia-Luna-Aceves
Node-Centric Hybrid Routing for Ad-Hoc Wireless Extensions of The Internet
<http://www.cse.ucsc.edu/research/ccrg/publications/soumya.globecom02.pdf>
- [TBLG99] Mineo Takai, Rajive Bagrodia, Addison Lee, Mario Gerla
Impact of Channel Models on Simulation of Large Scale Wireless Networks
<http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/8276/http:zSzzSzwww.cs.ucla.edu/zSzNRLzSzwirelesszSzPAPERzSzmineo-mswim99.pdf/takai99impact.pdf>
- [TMB01] Mineo Takai, Jay Martin, Rajive Bagrodia
Effects of Wireless Physical Layer Modeling in Mobile Ad Hoc Networks
<http://www.gta.ufjf.br/~eric/tese/artigos/mobihoc.pdf>

Anhang A : Alle Mess- und Simulationskurven

A.1 Messkurven der ersten Serie

Anmerkung: Der Datendurchsatz ist in der Einheit Bit/s aufgetragen.

A.1.1 Terrain Parkplatz

A.1.1.1 11 MBit/s

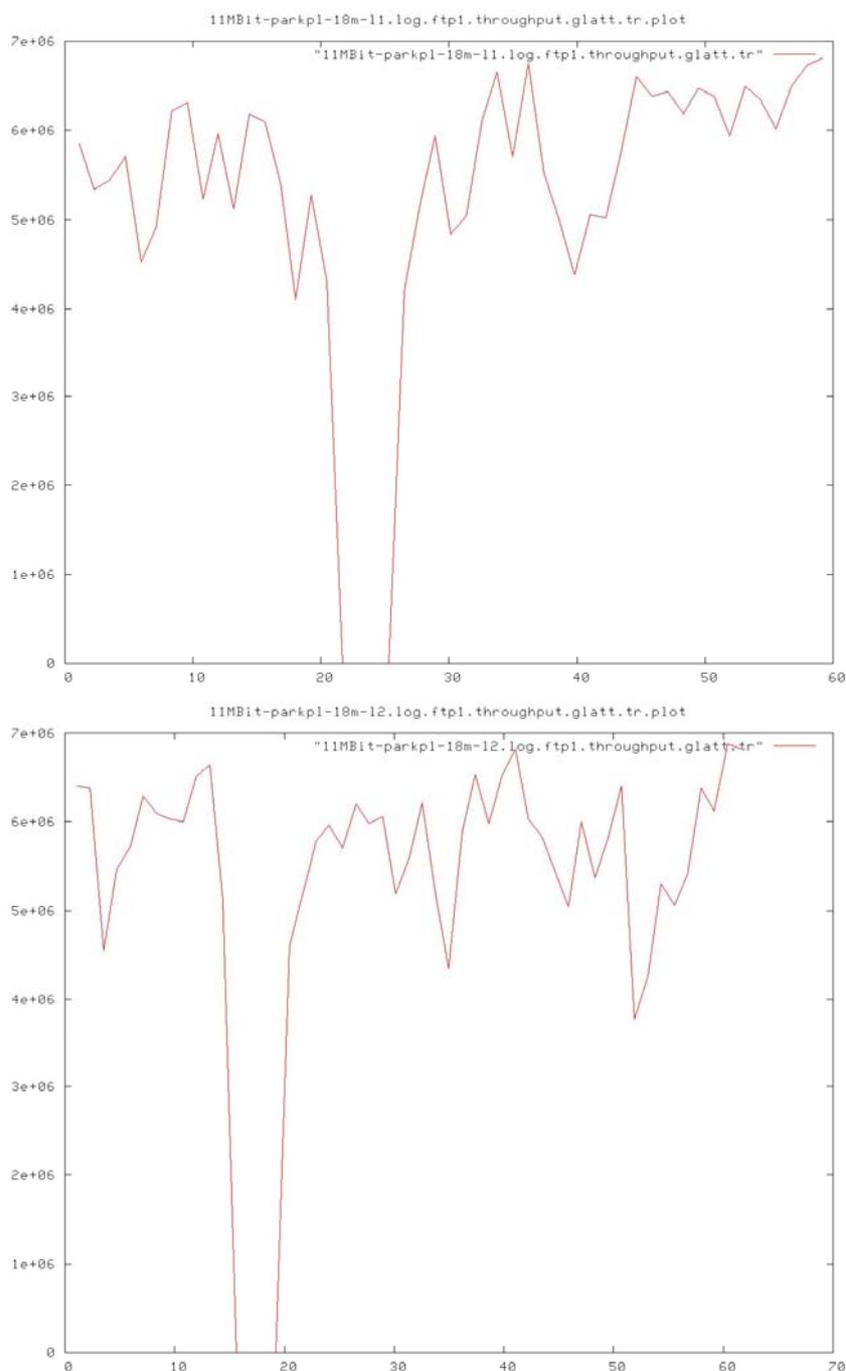


Abb. A.1 : Messkurven für 18 Meter

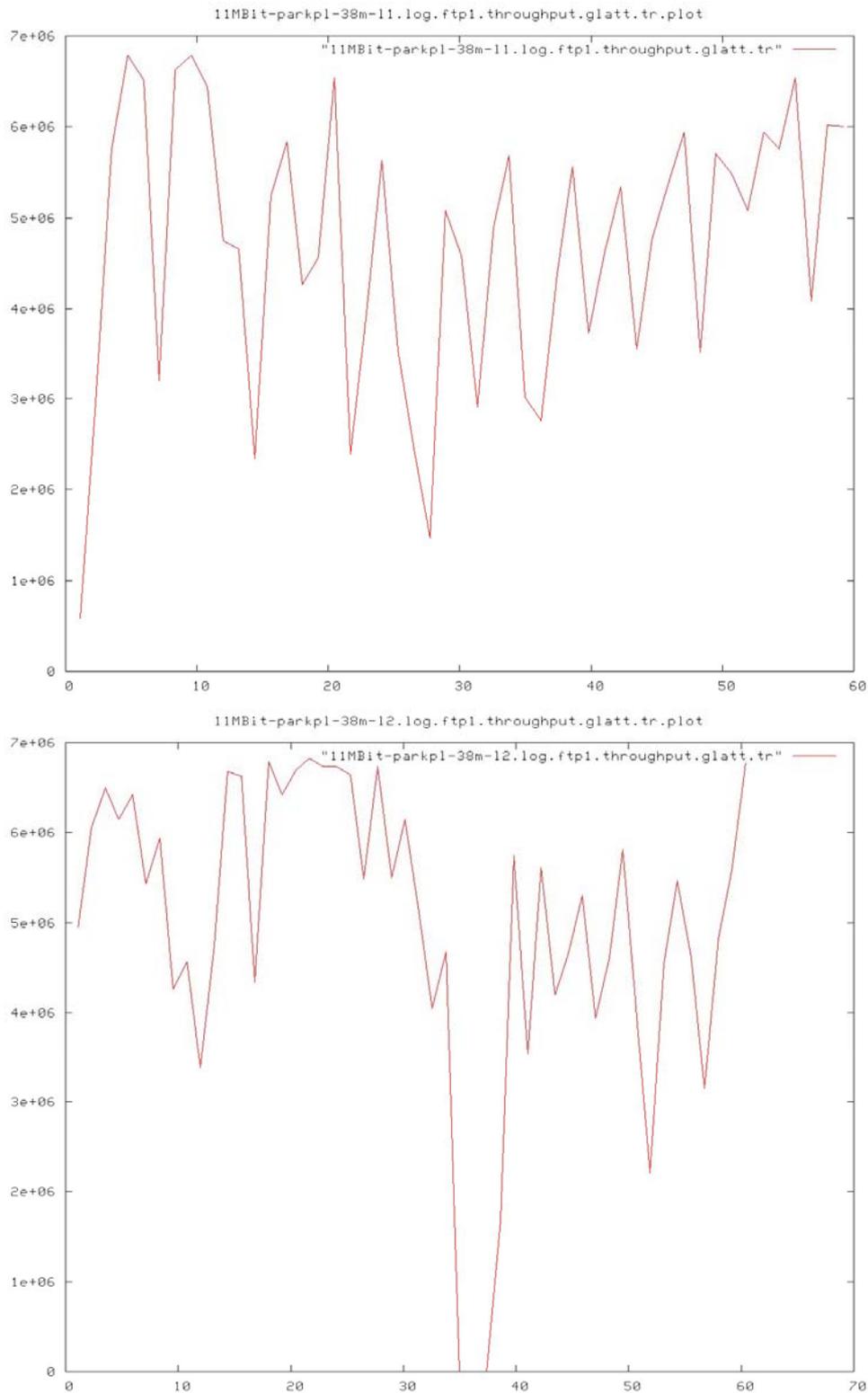


Abb. A.2 : Messkurven für 38 Meter

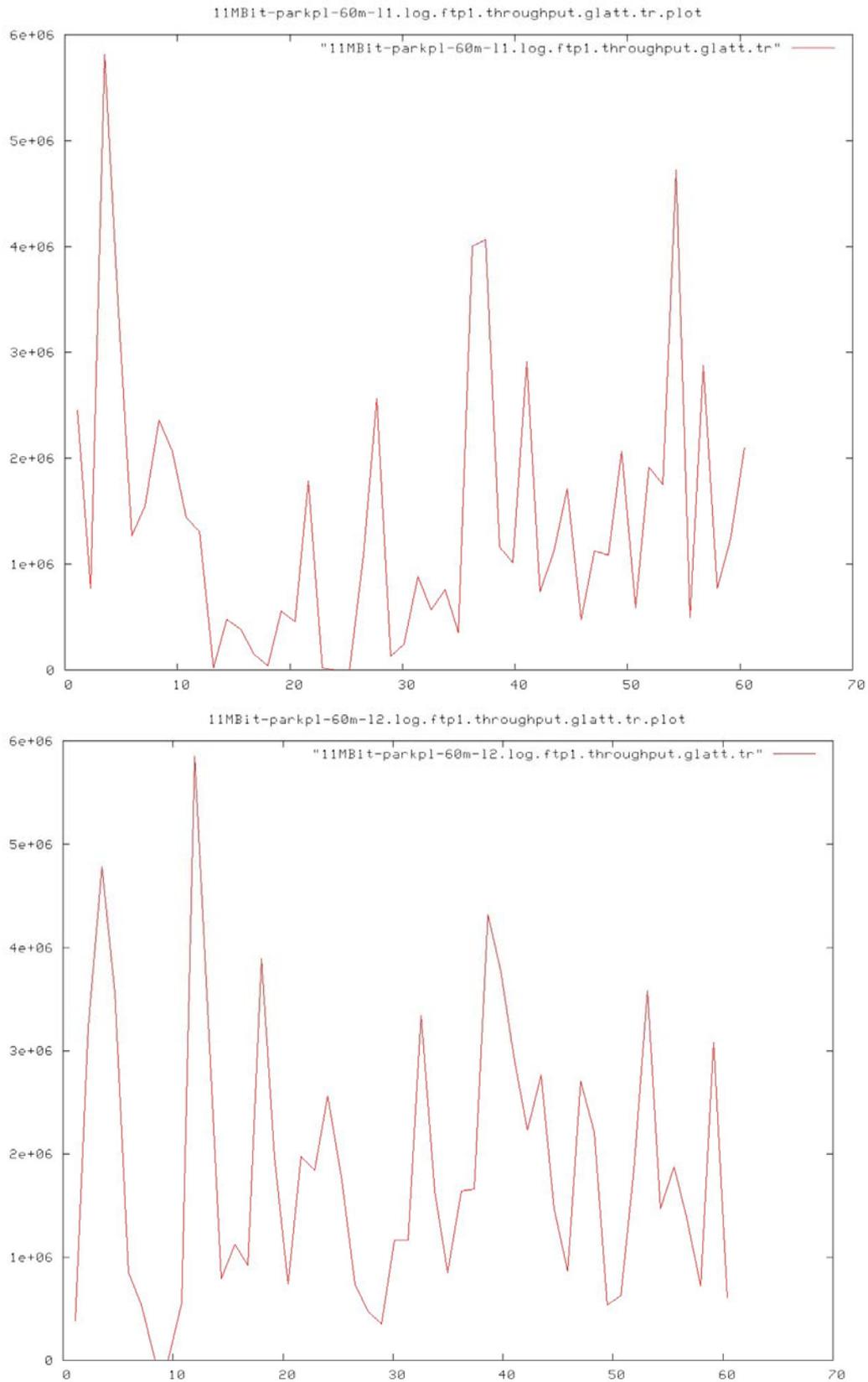


Abb. A.3 : Messkurven für 60 Meter

A.1.1.2 5.5 MBit/s

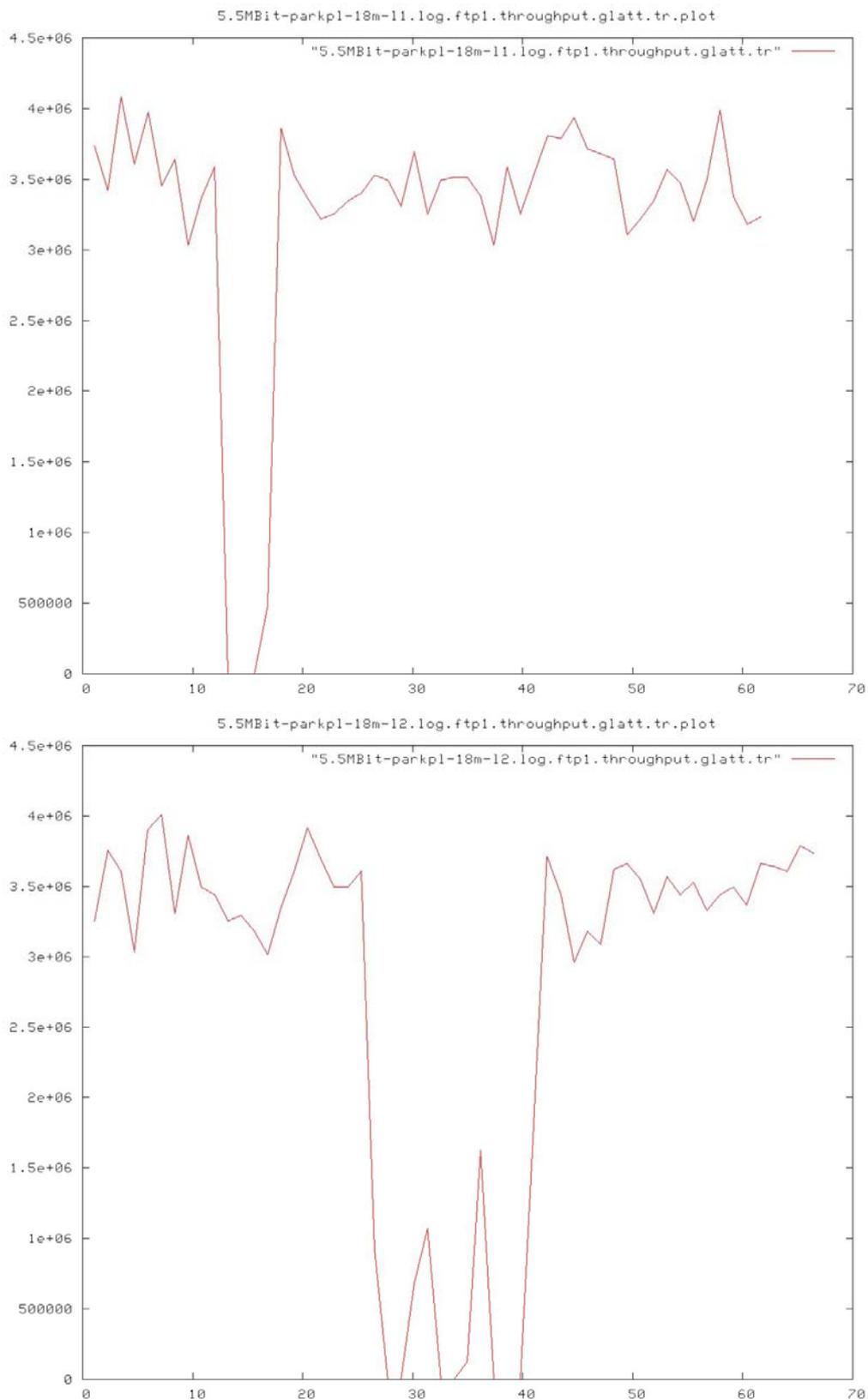
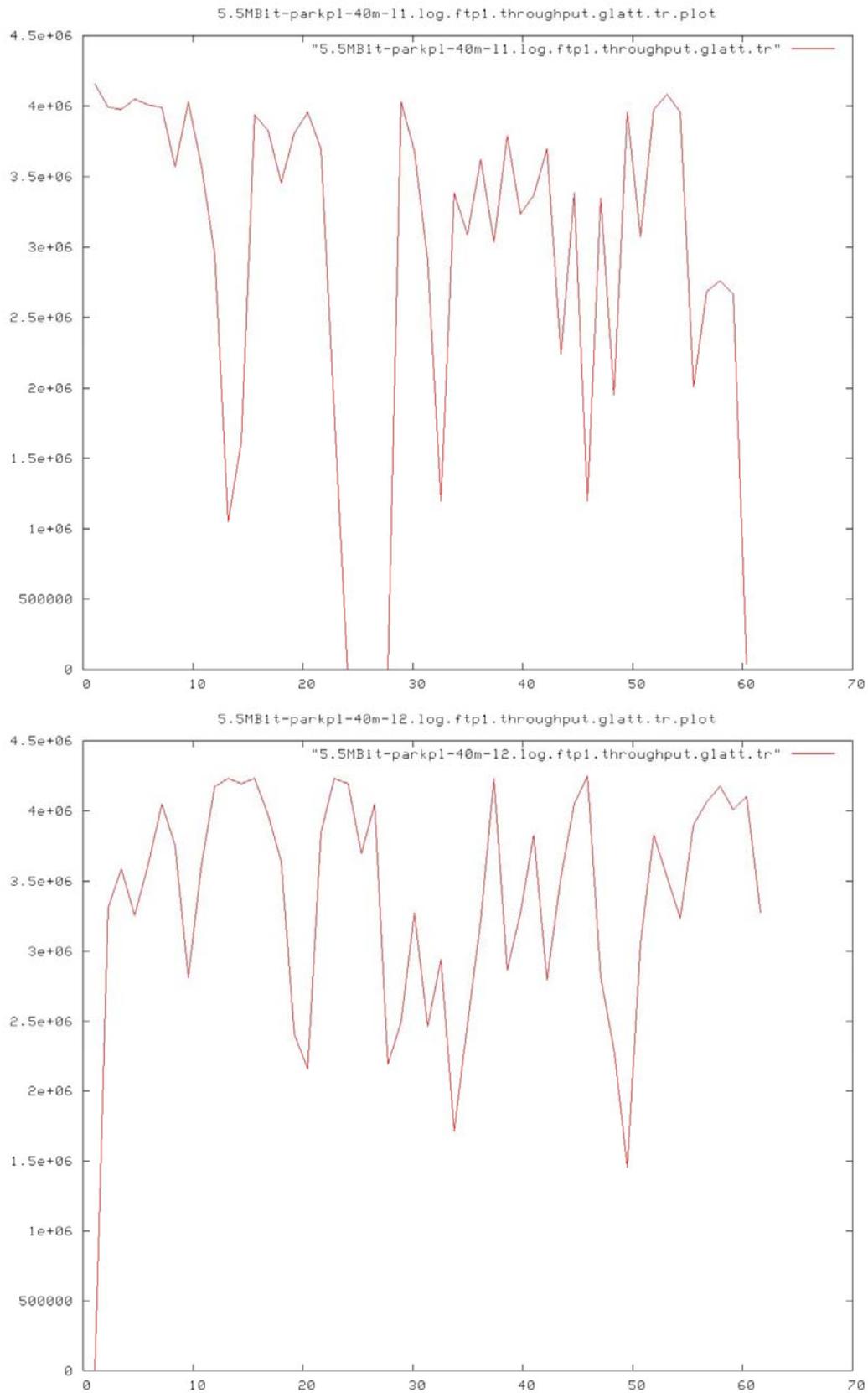


Abb. A.4 : Messkurven für 18 Meter

**Abb. A.5 : Messkurven für 40 Meter**

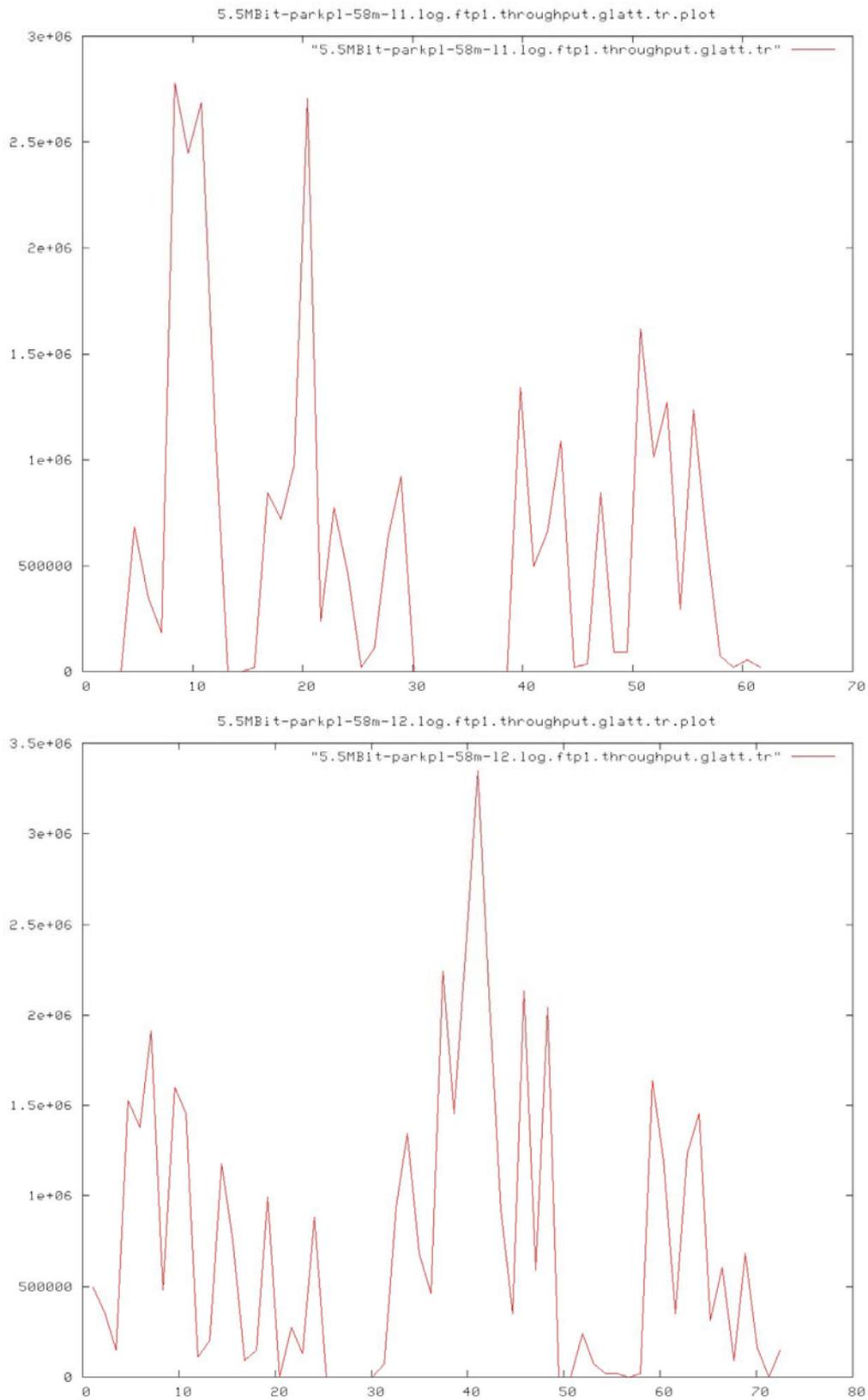


Abb. A.5 : Messkurven für 58 Meter

A.1.1.3 2 MBit/s

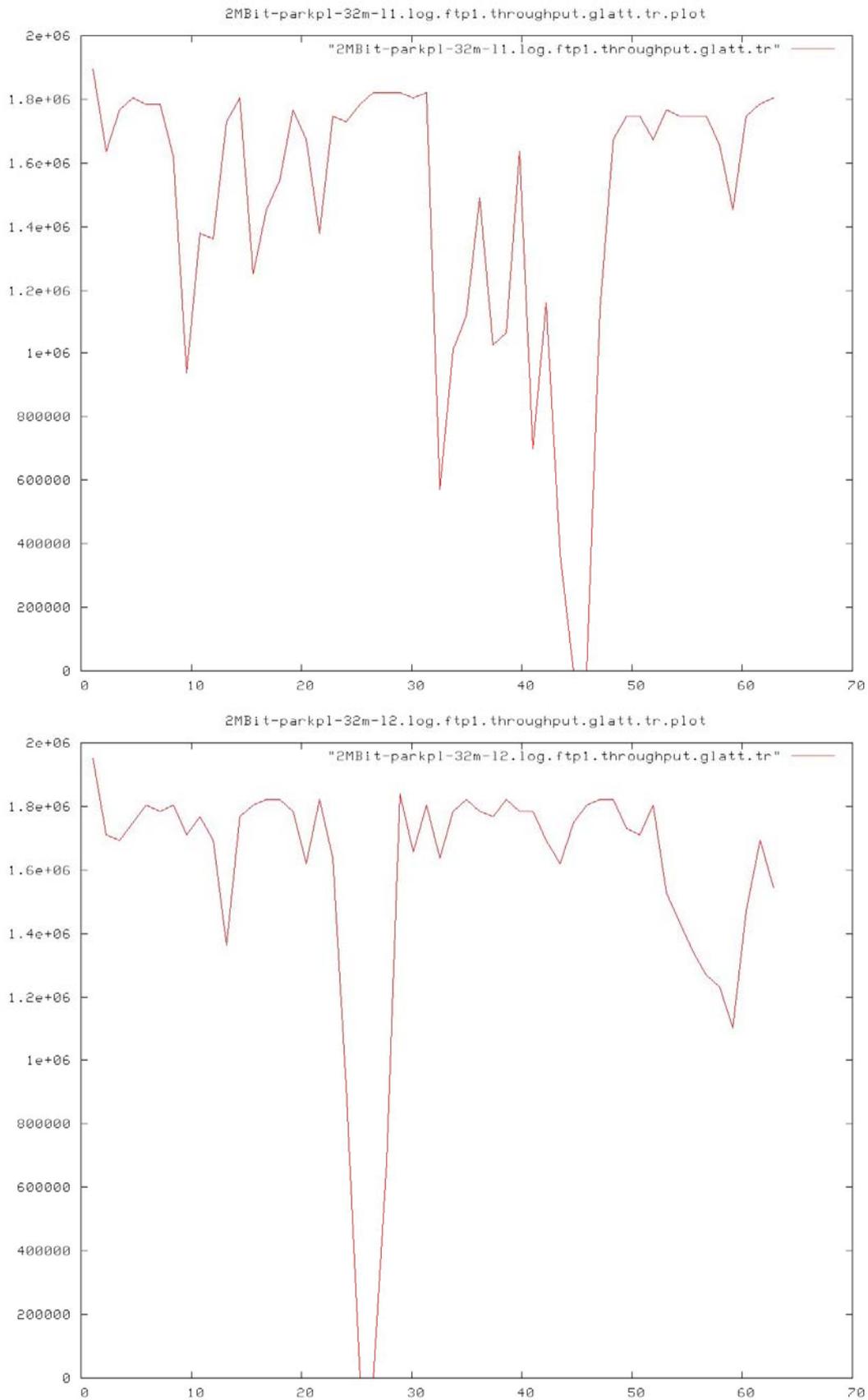


Abb. A.7 : Messkurven für 32 Meter

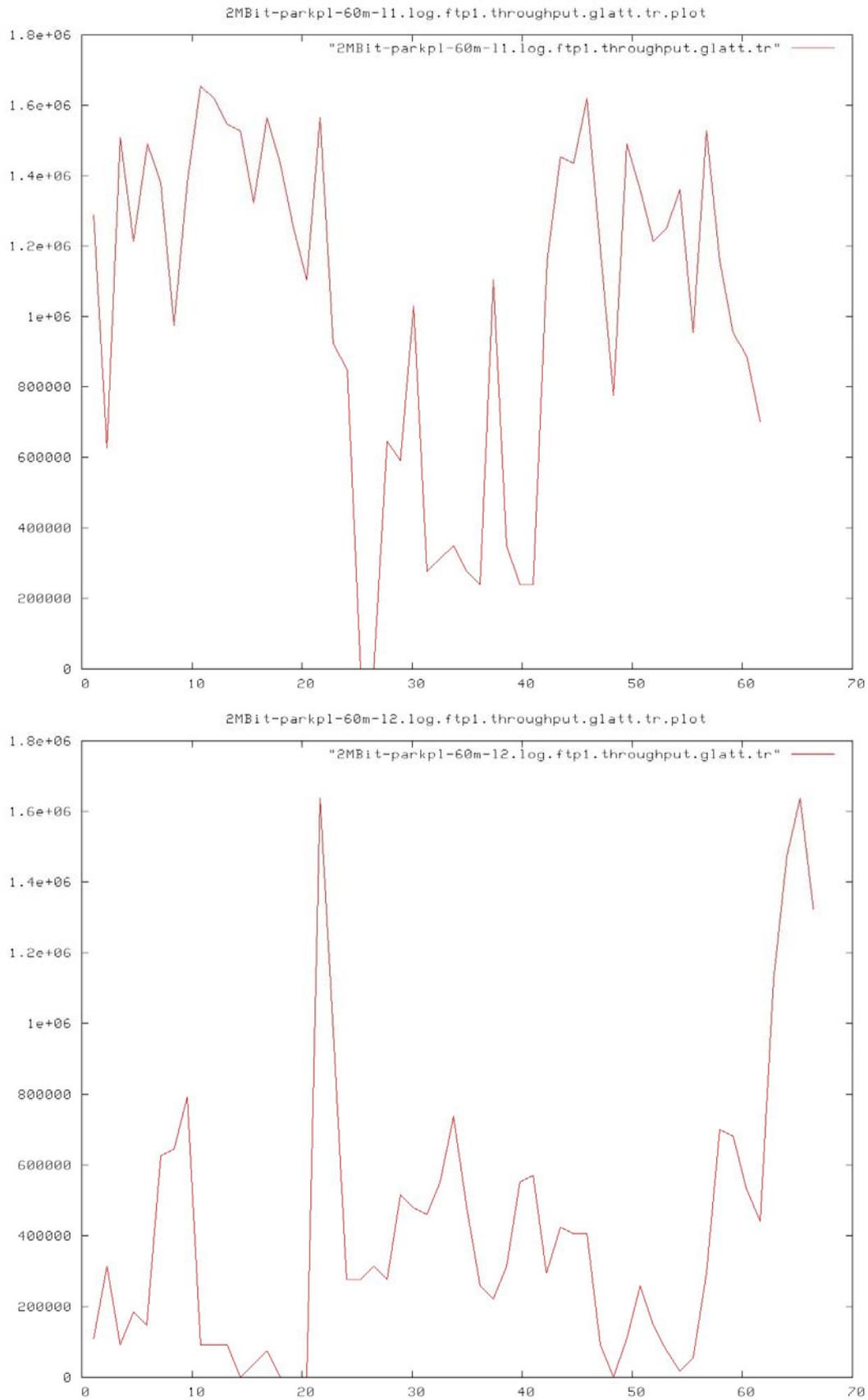


Abb. A.8 : Messkurven für 60 Meter

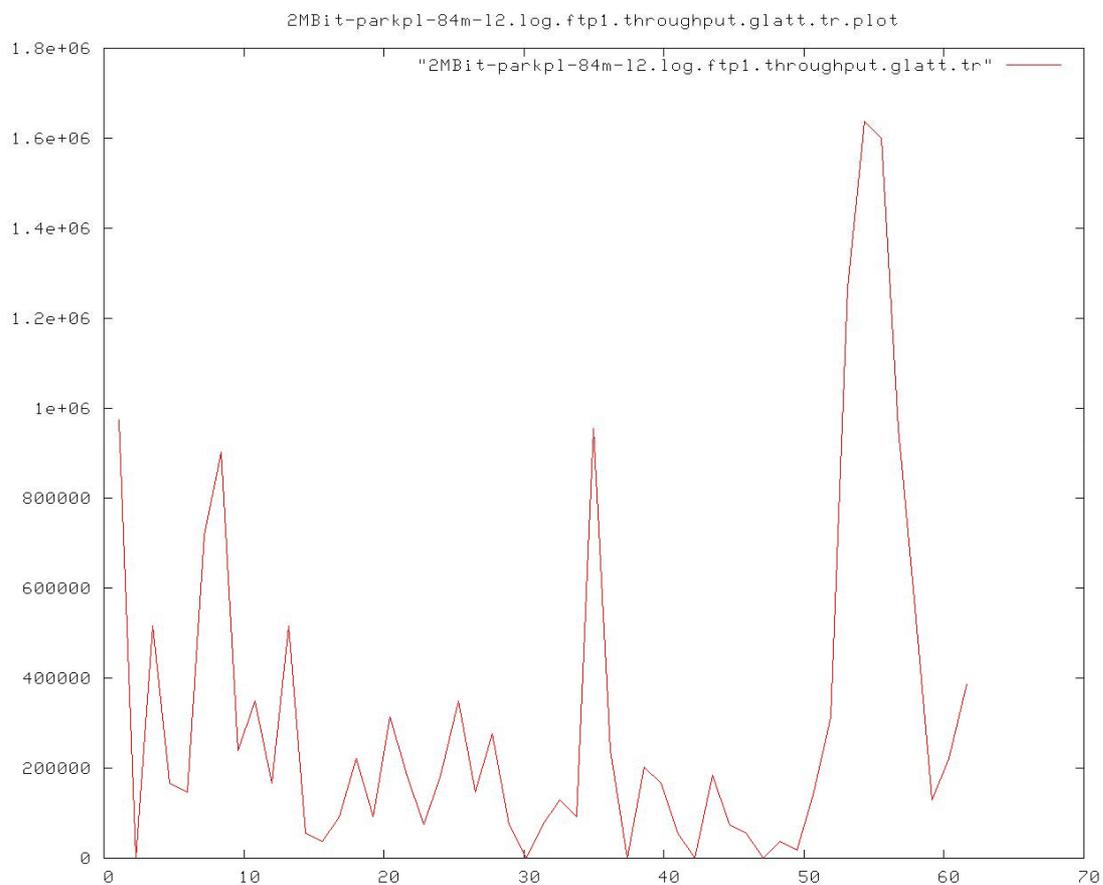
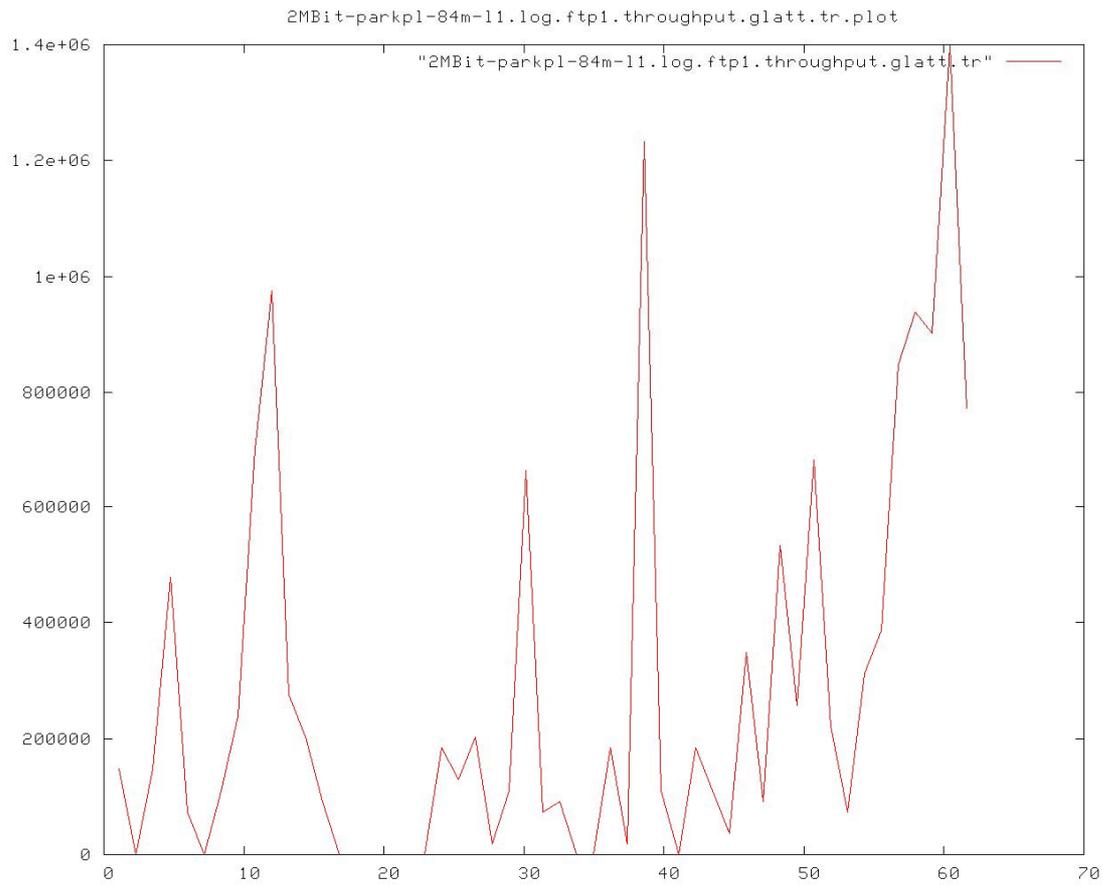


Abb. A.9 : Messkurven für 84 Meter

A.1.2 Terrain Wald

A.1.2.1 11 MBit/s

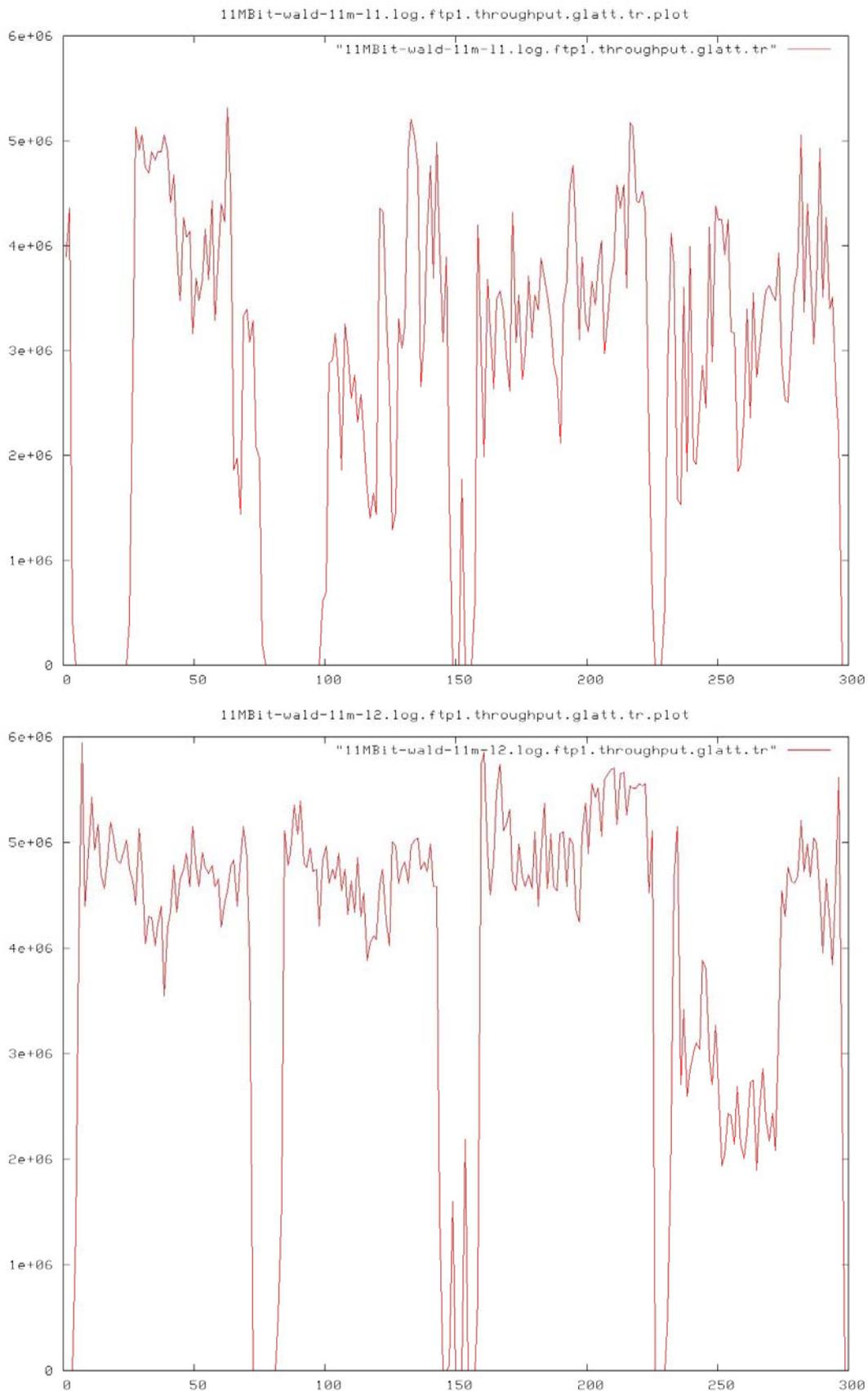


Abb. A.10 : Messkurven für 11 Meter

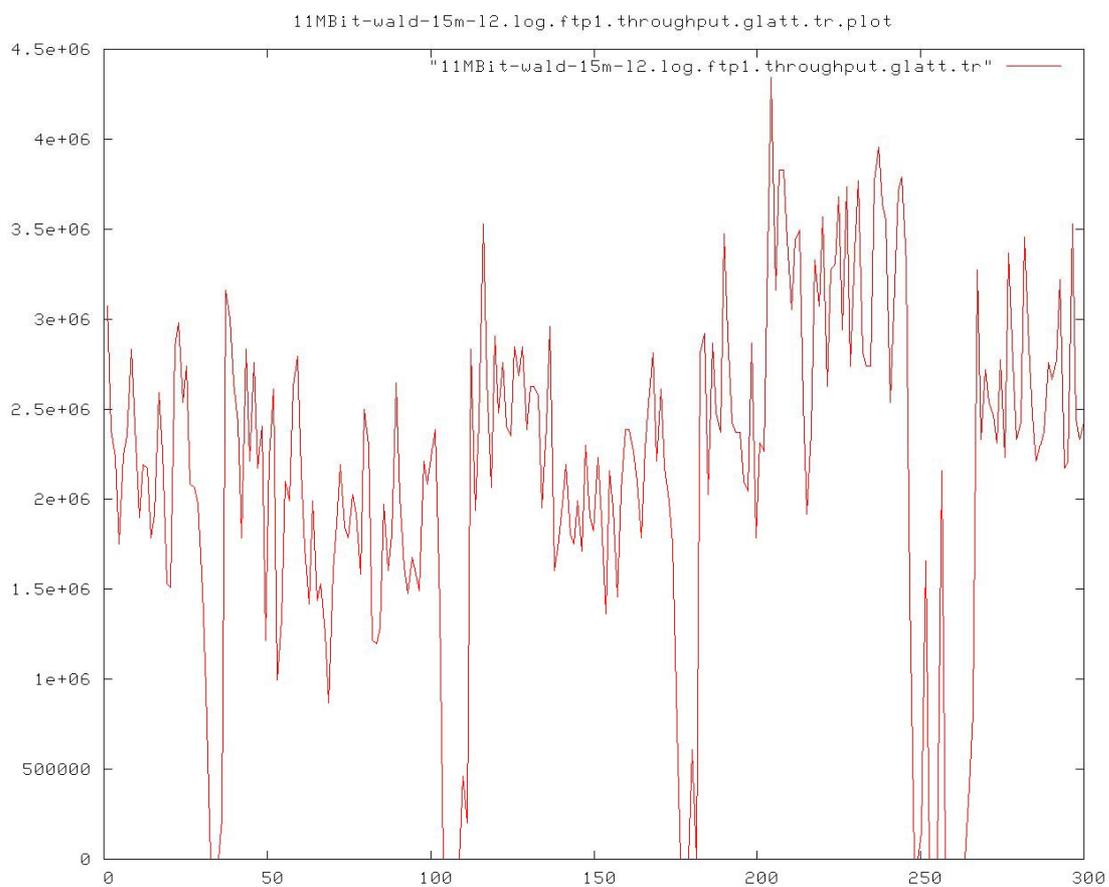
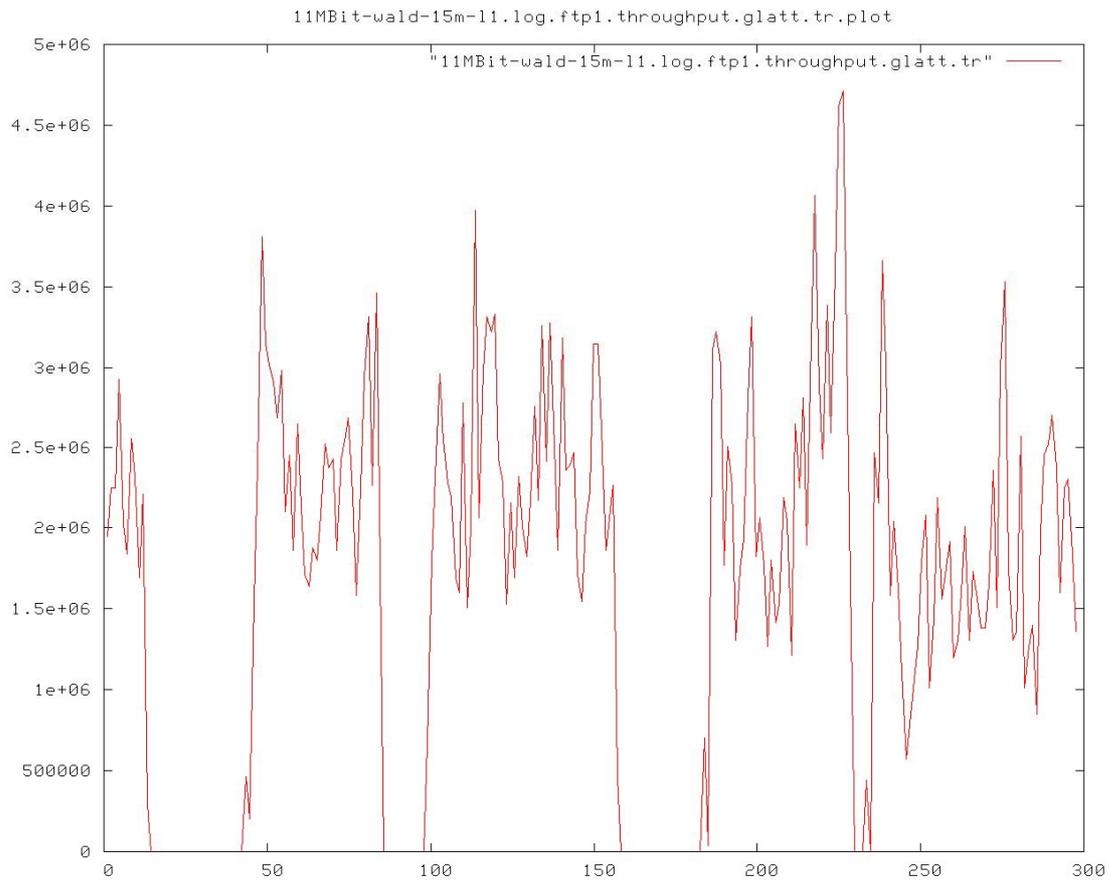


Abb. A.11 : Messkurven für 15 Meter

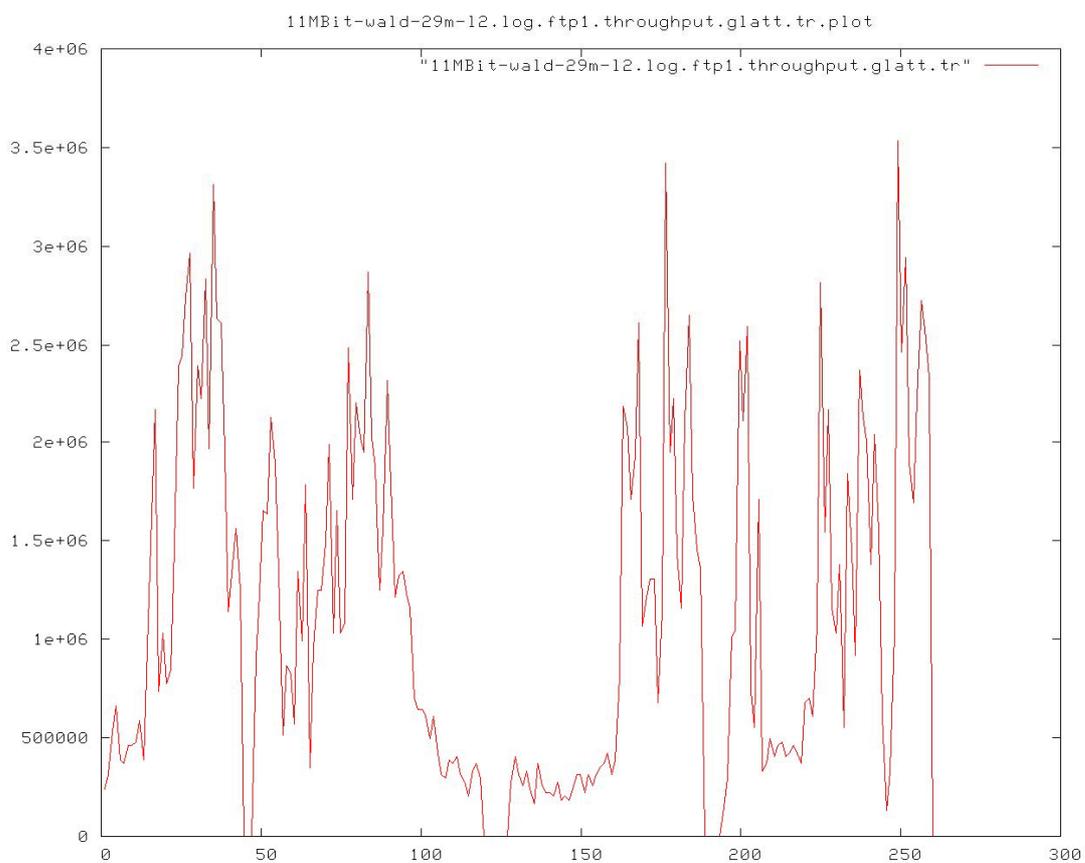
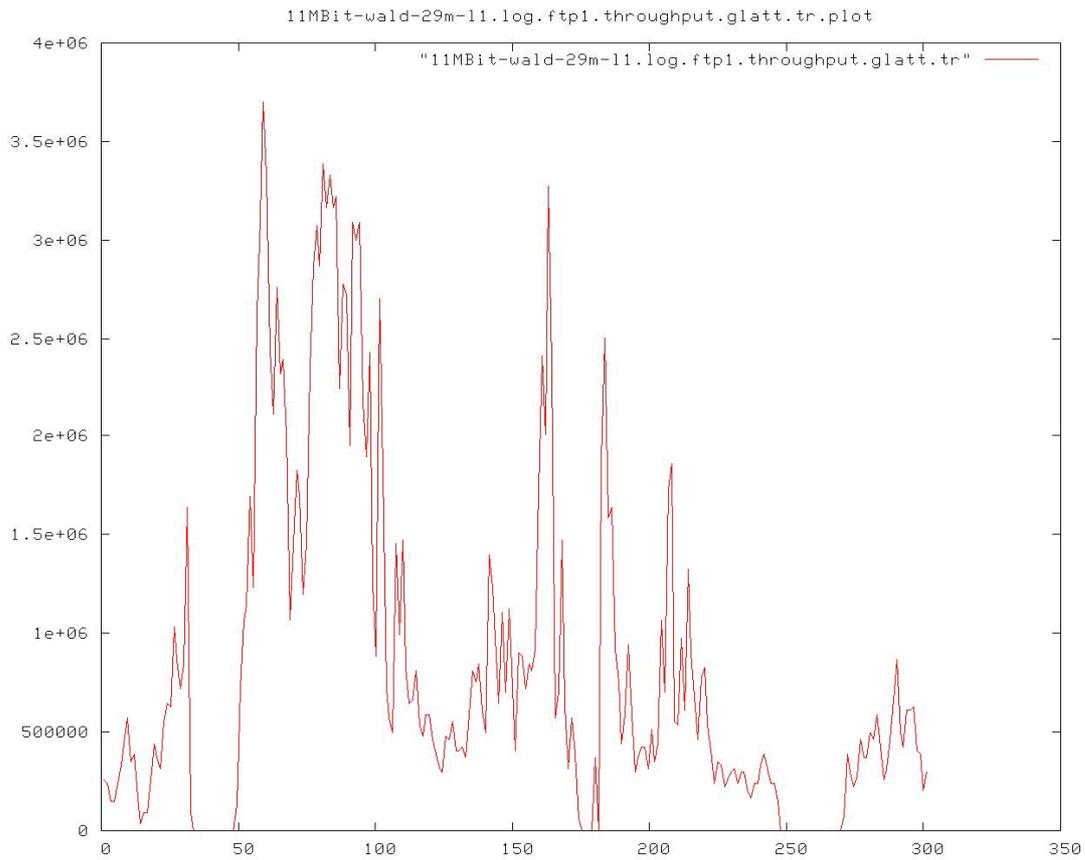


Abb. A.12 : Messkurven für 29 Meter

A.1.2.2 5.5 MBit/s

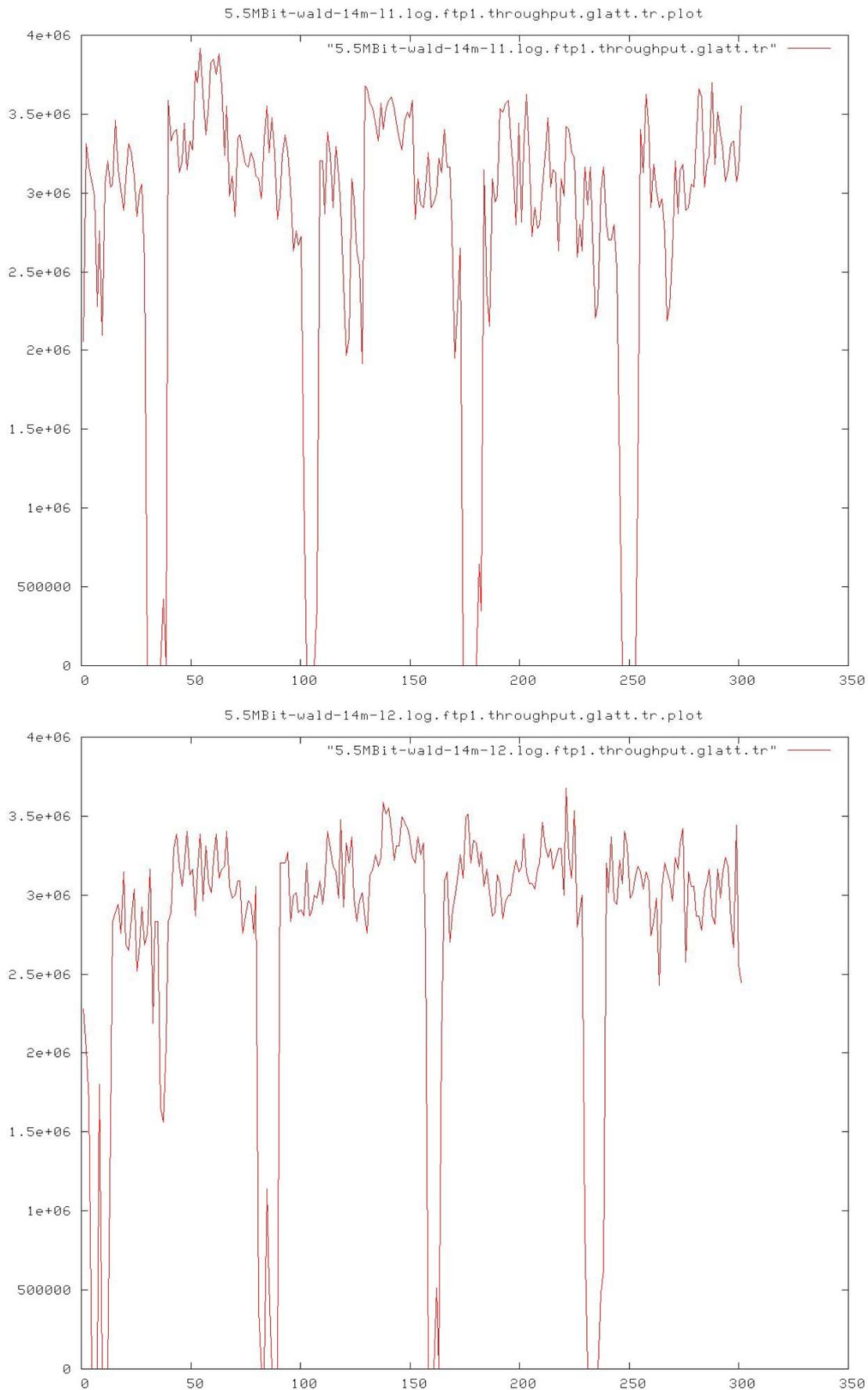


Abb. A.13 : Messkurven für 14 Meter

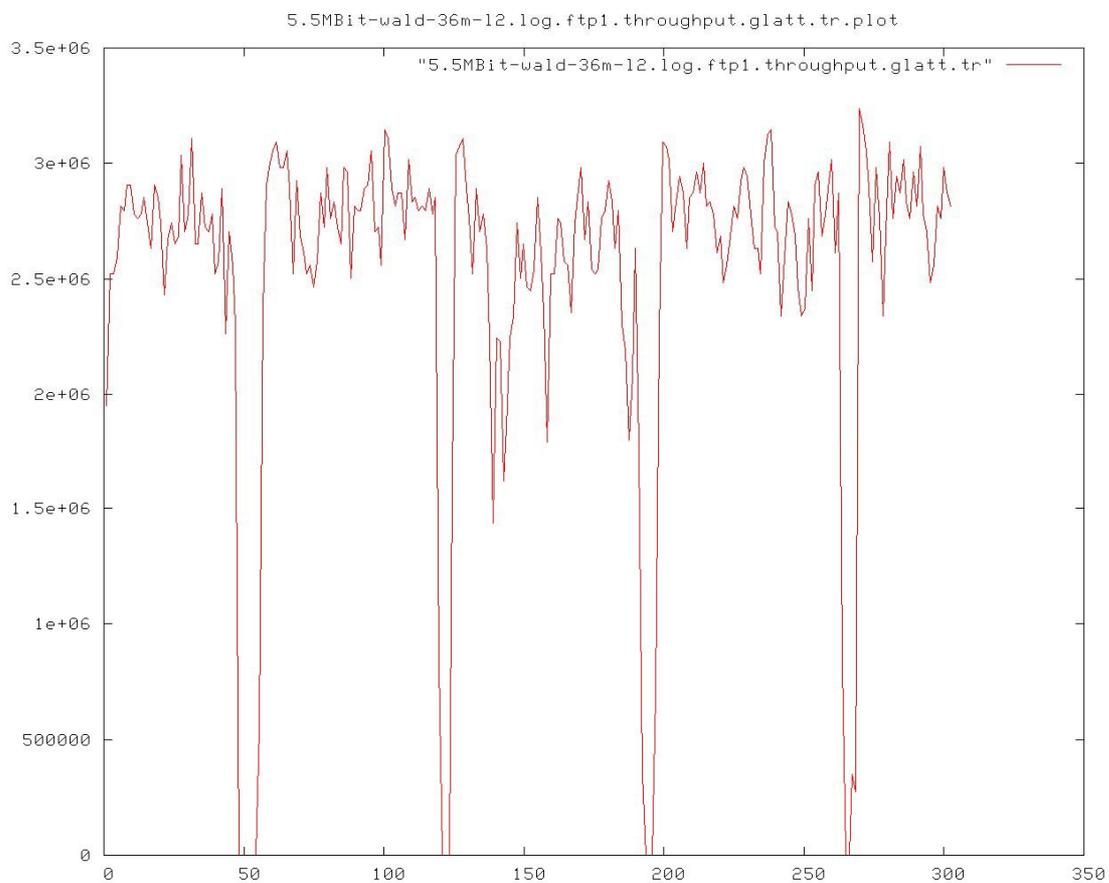
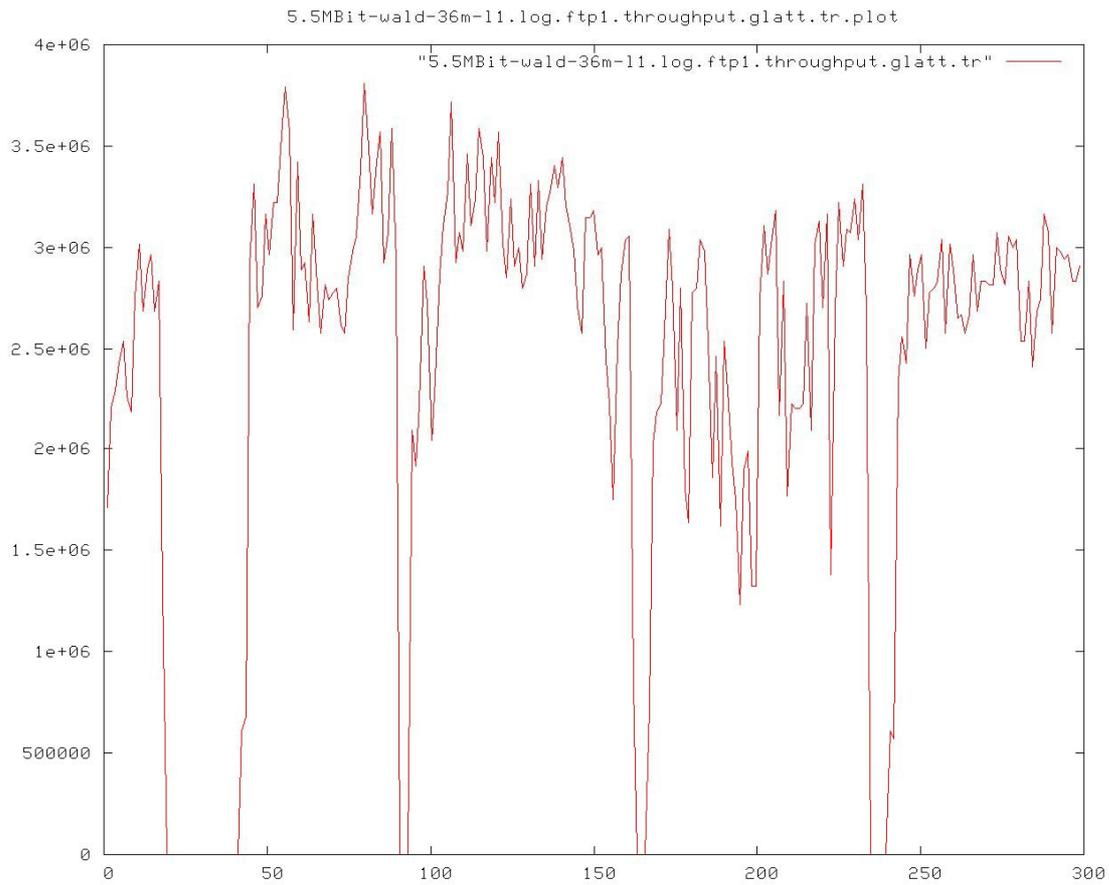


Abb. A.14 : Messkurven für 36 Meter

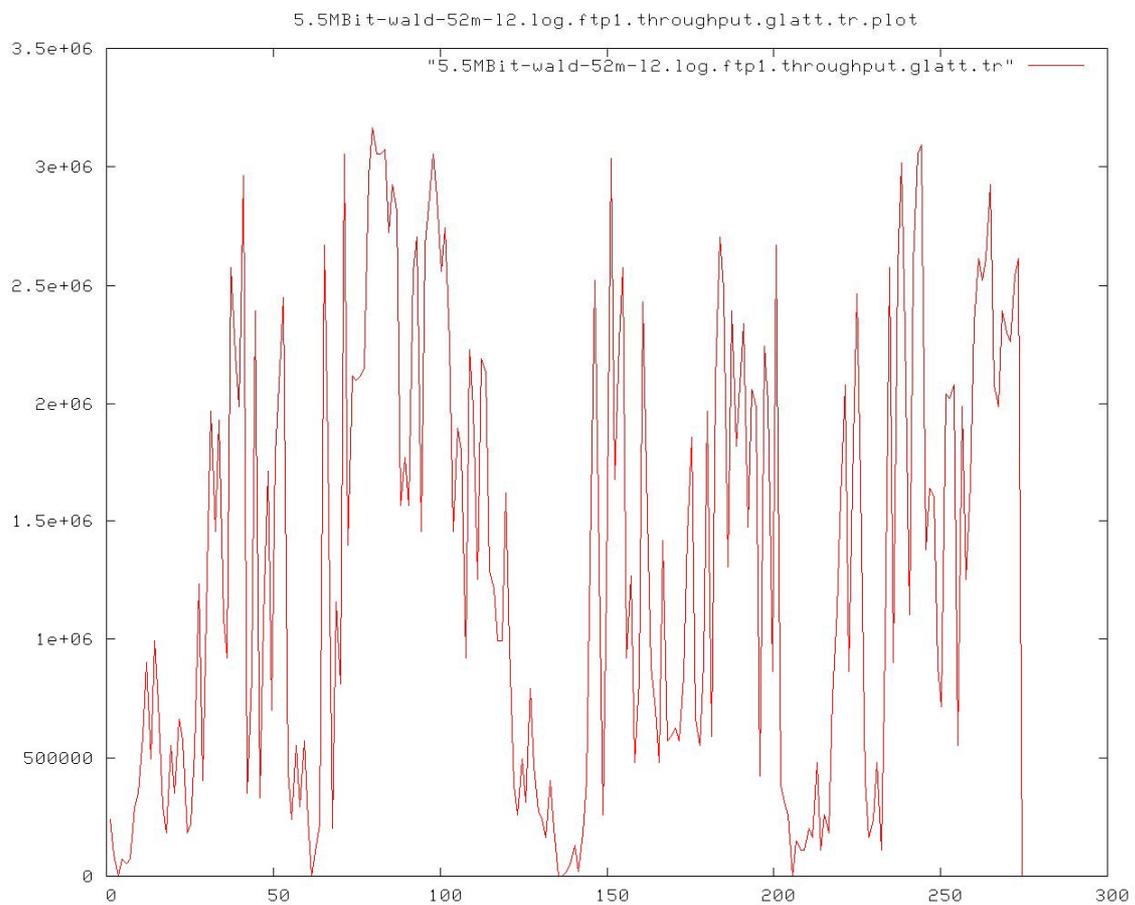
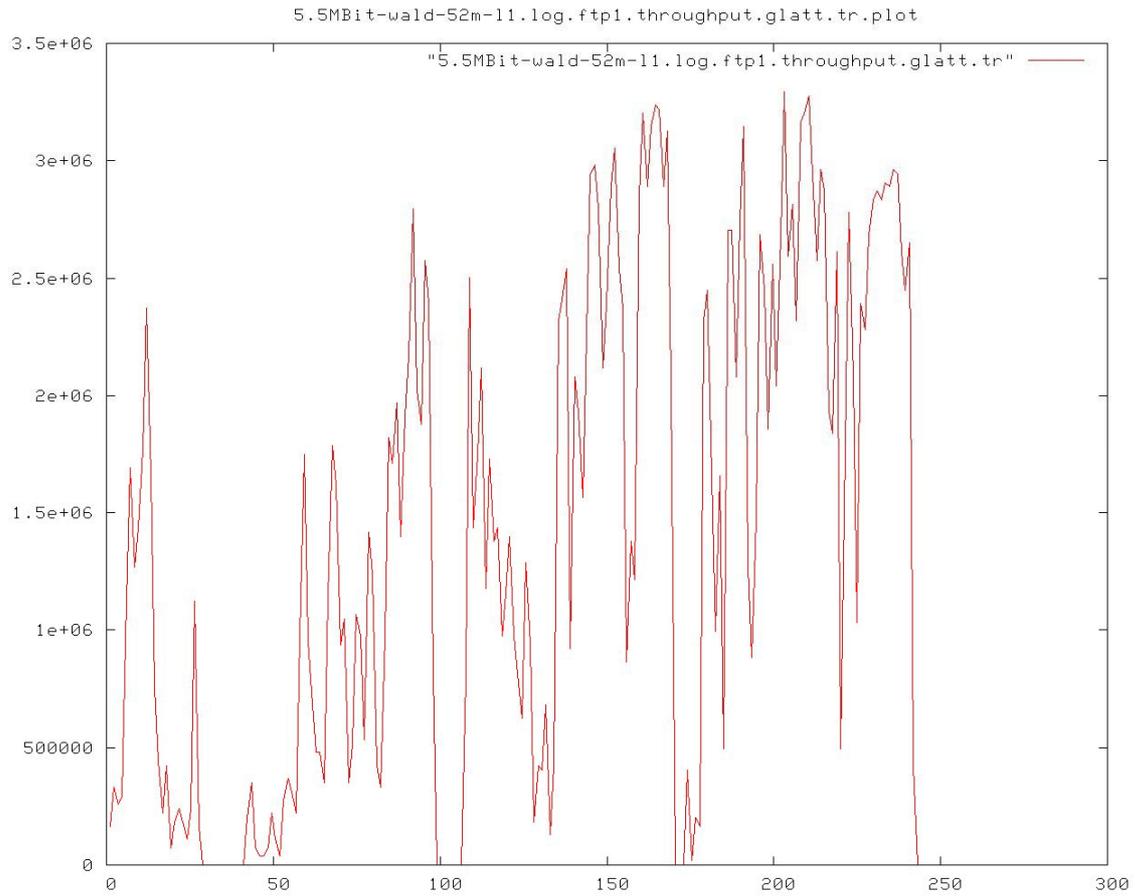


Abb. A.15 : Messkurven für 52 Meter

A.1.2.3 2 MBit/s

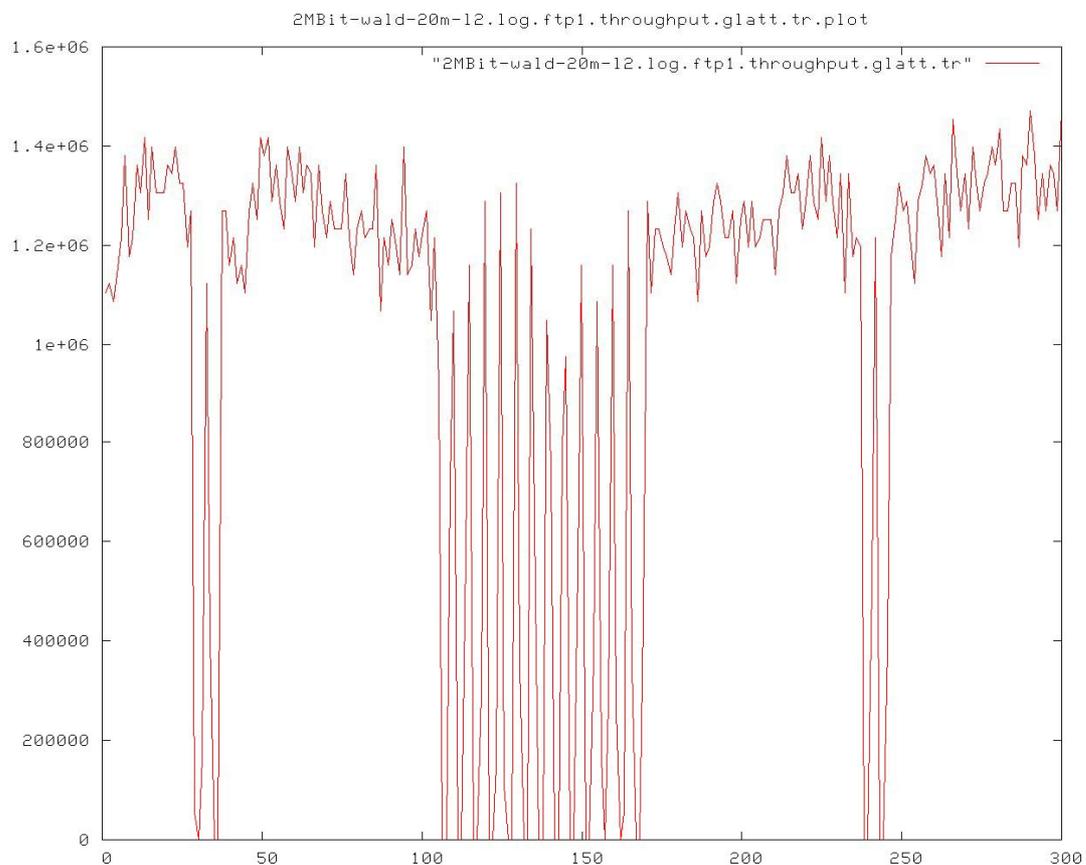
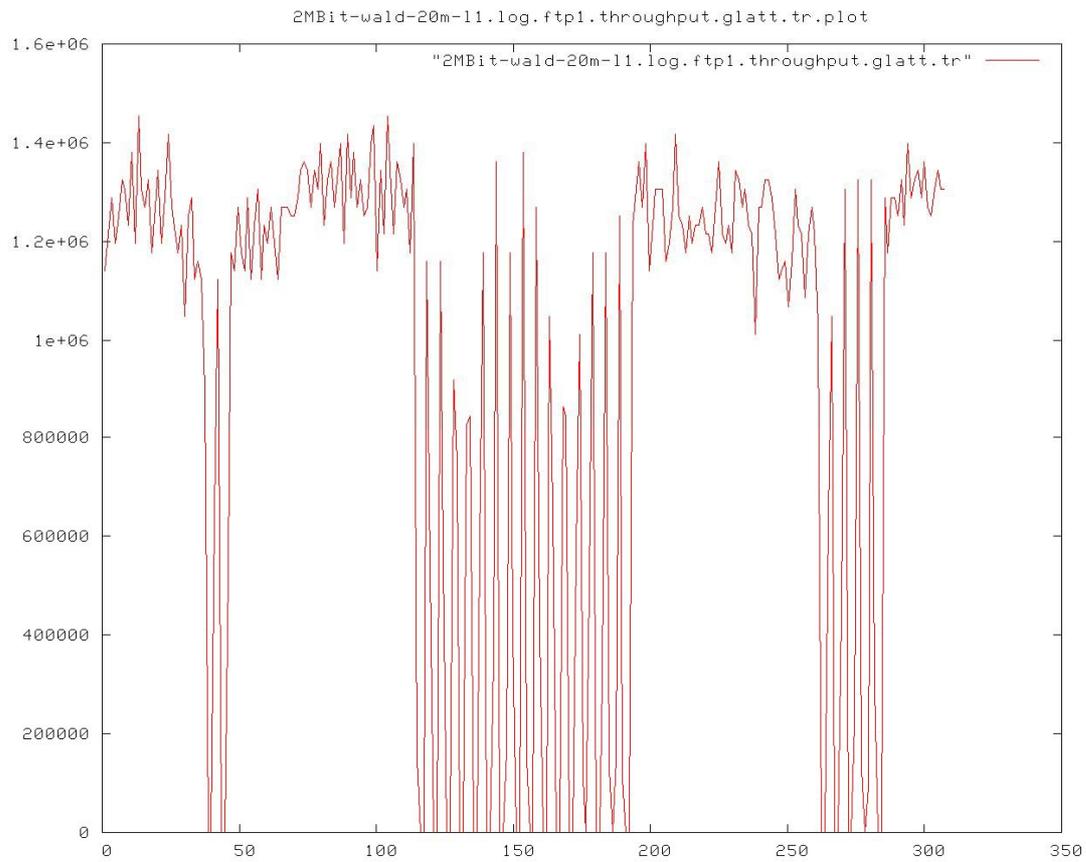
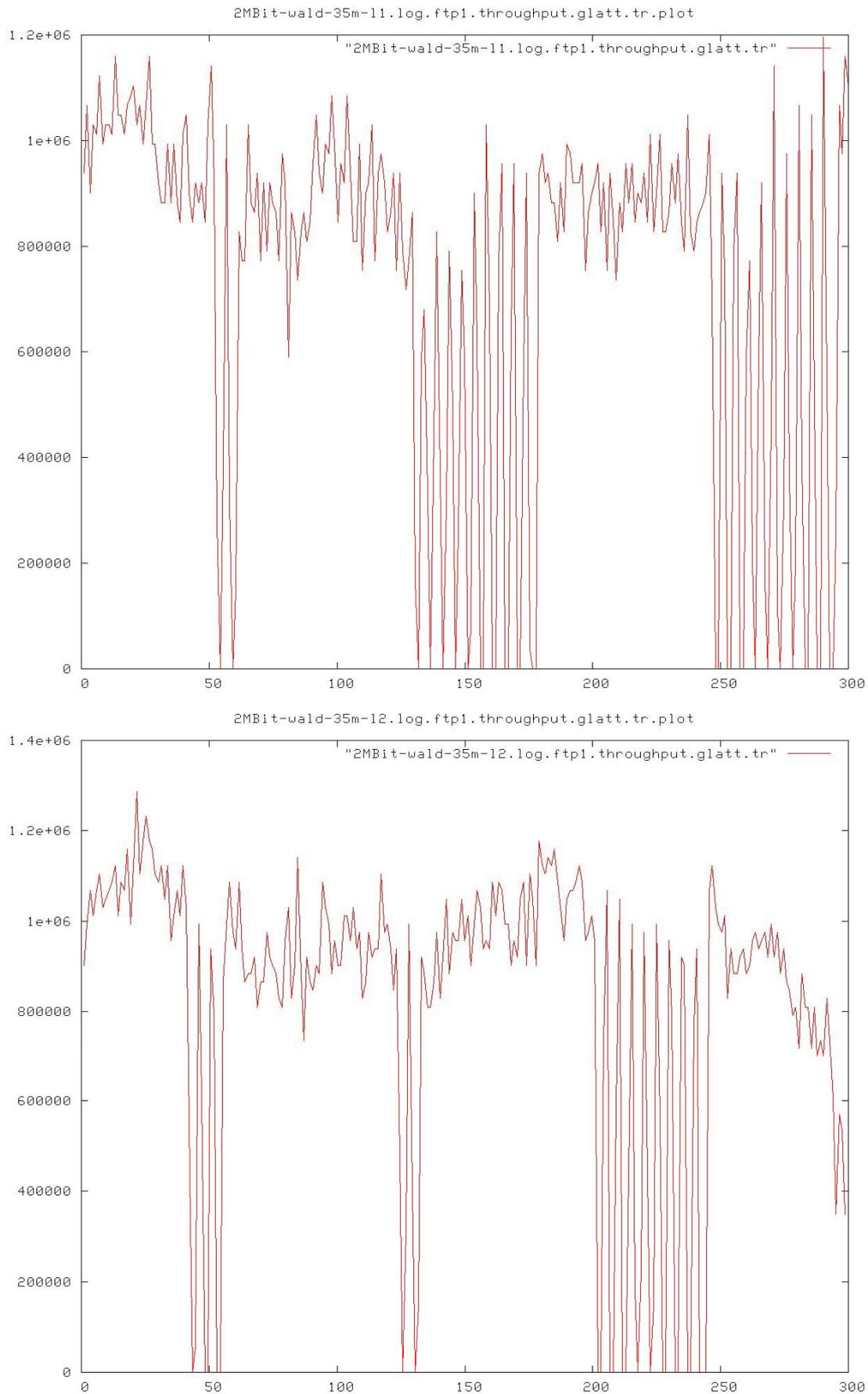
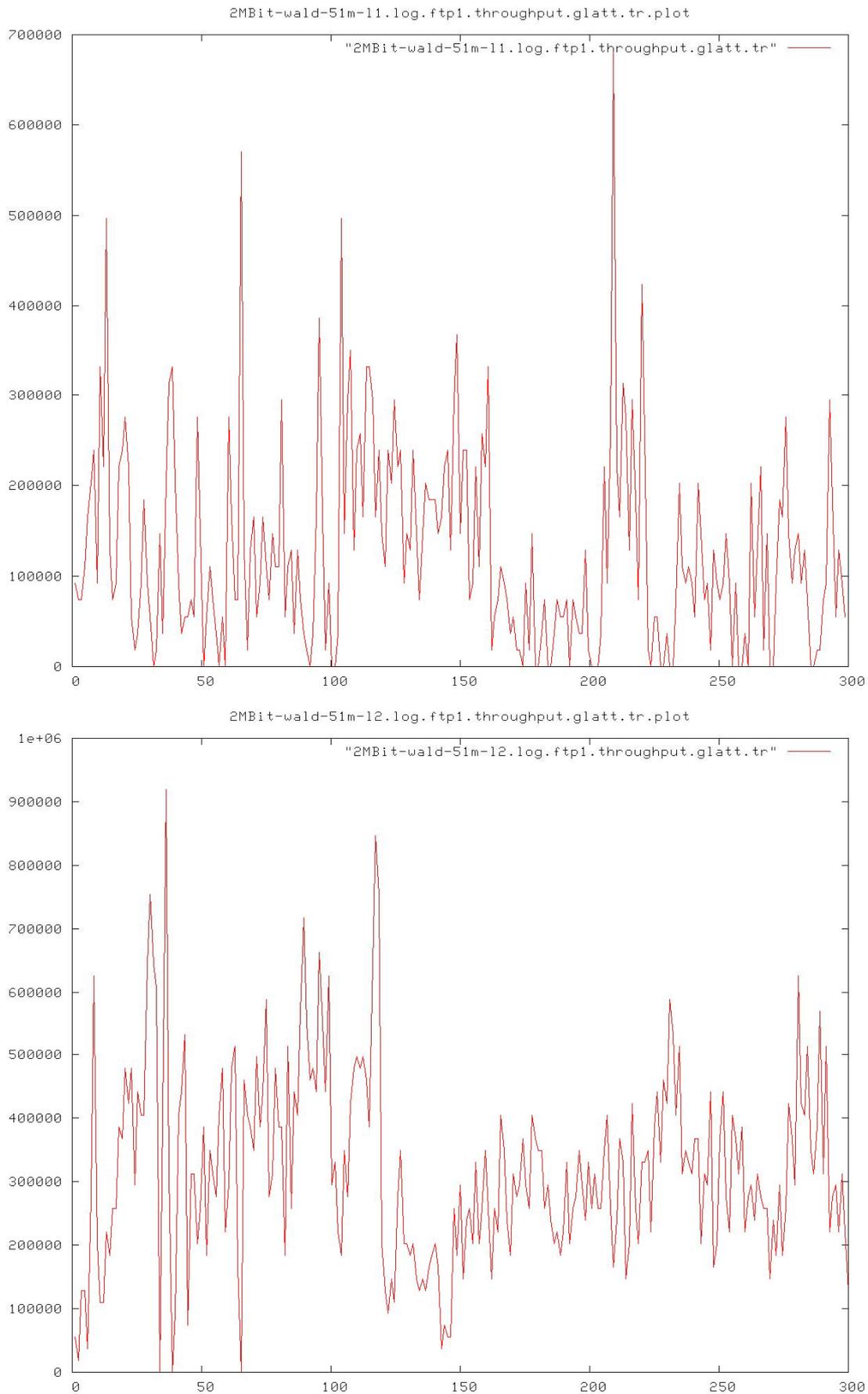


Abb. A.16 : Messkurven für 20 Meter

**Abb. A.17 : Messkurven für 35 Meter**

**Abb. A.18 : Messkurven für 51 Meter**

A.1.3 Terrain Wiese

A.1.3.1 11 MBit/s

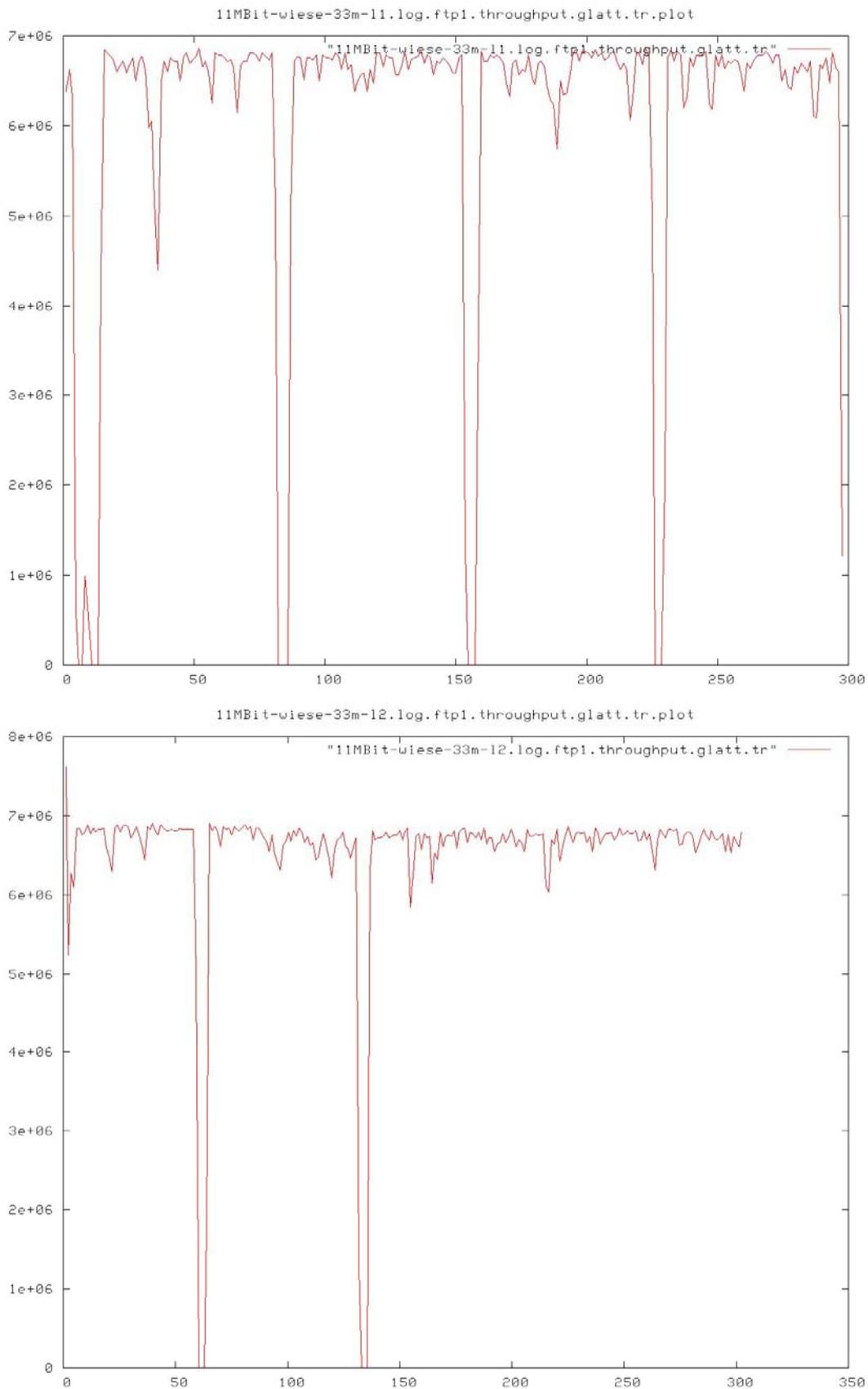
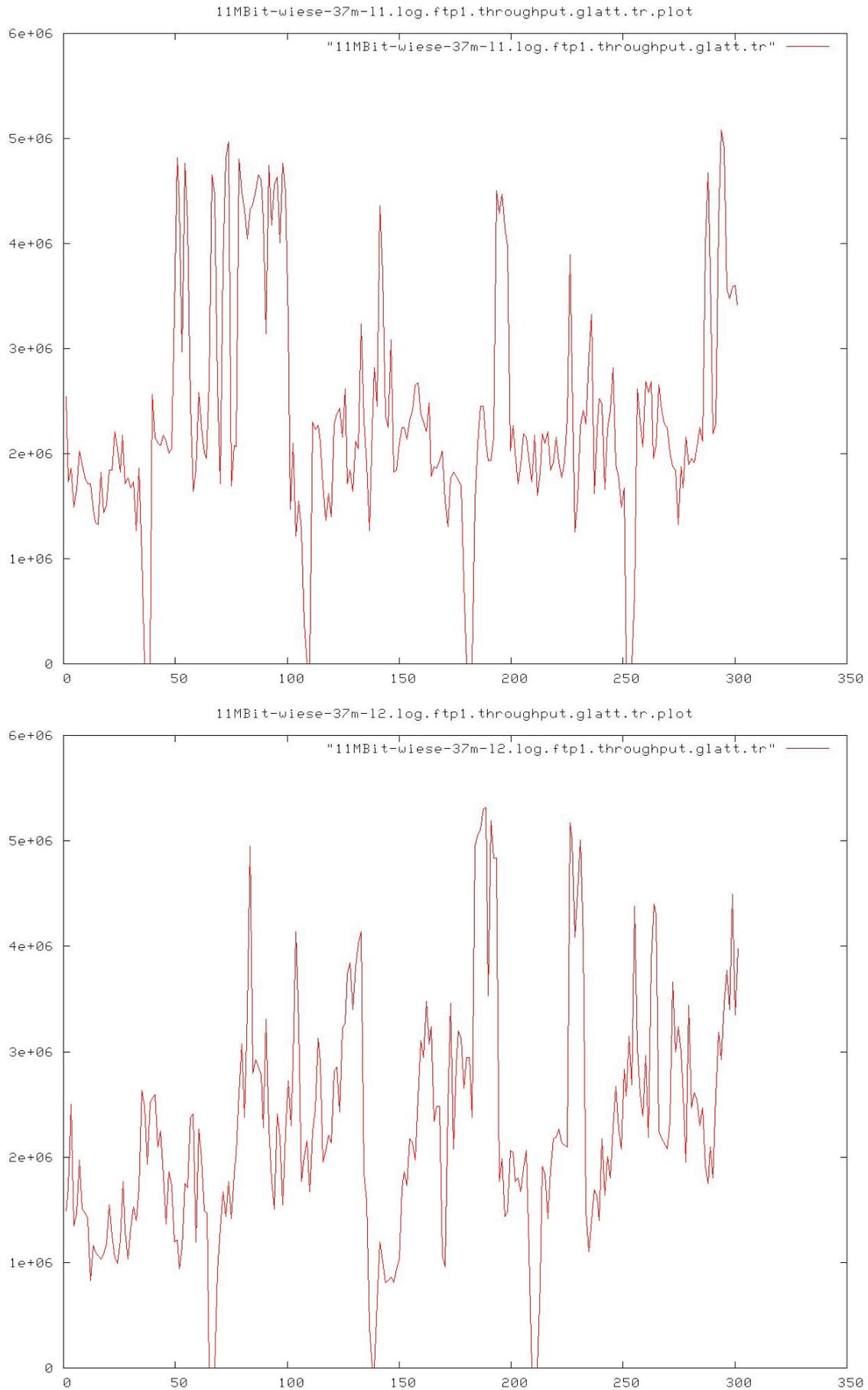
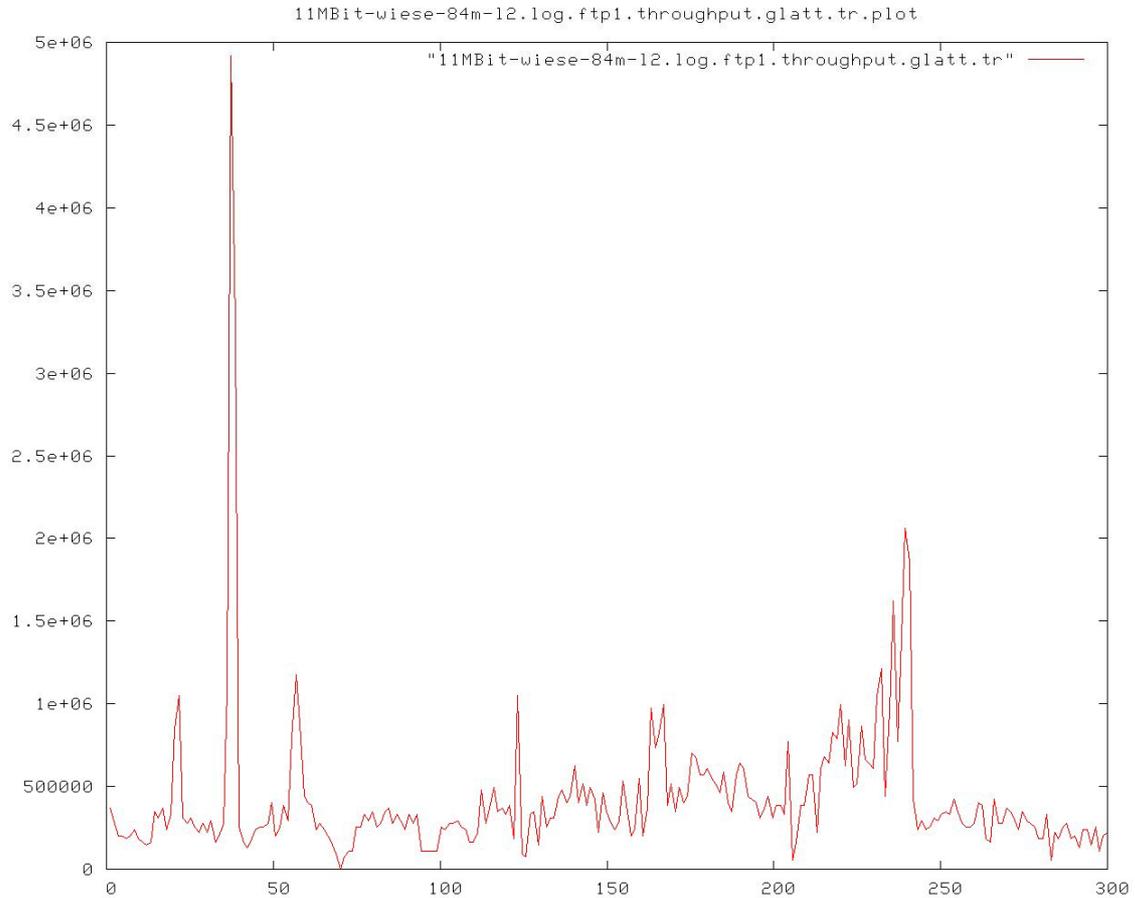
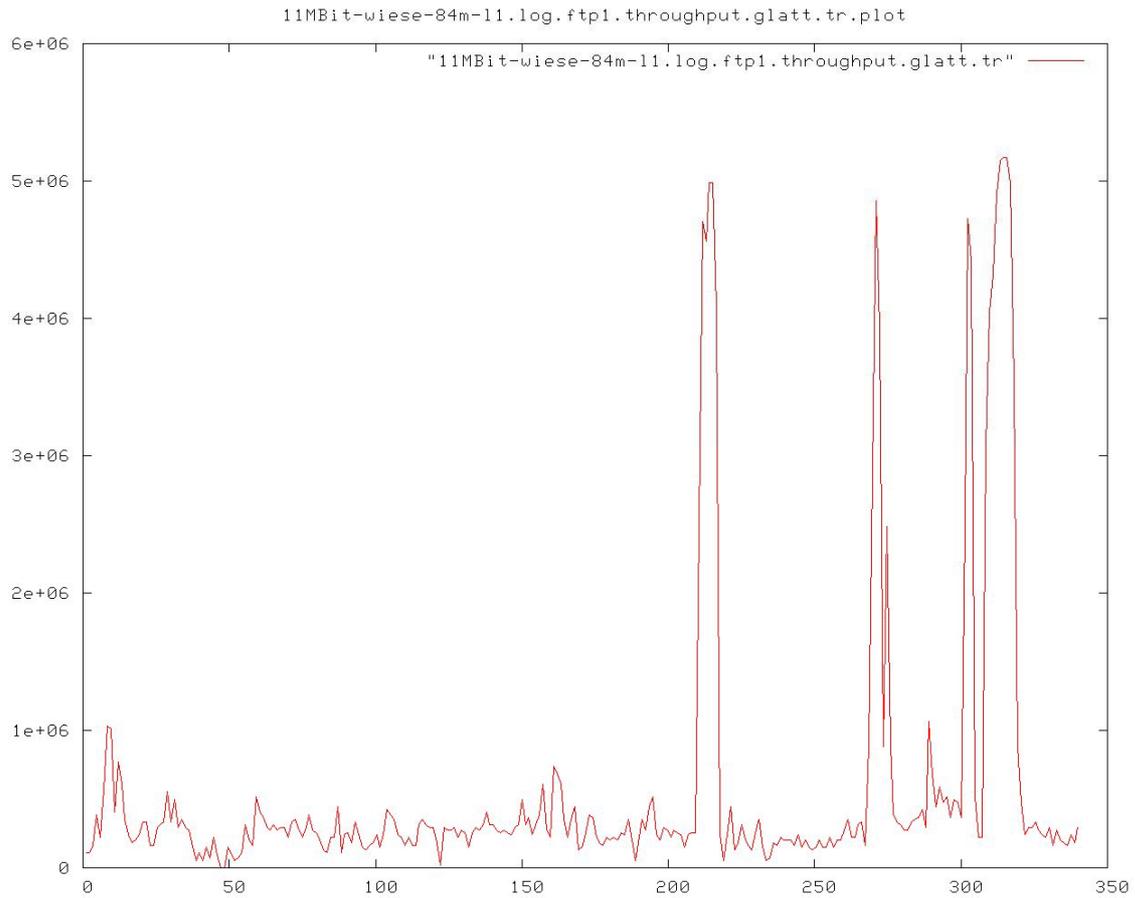


Abb. A.19 : Messkurven für 33 Meter

**Abb. A.20 : Messkurven für 37 Meter**

**Abb. A.21 : Messkurven für 84 Meter**

A.1.3.2 5.5 MBit/s

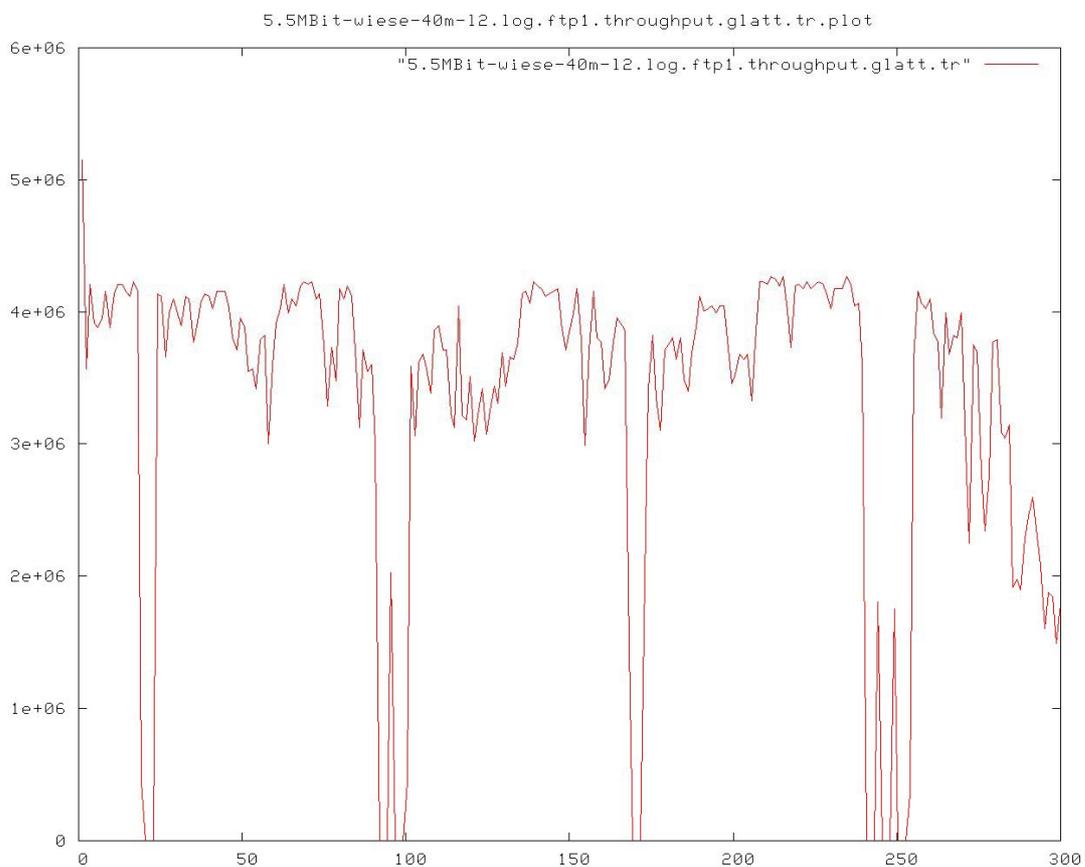
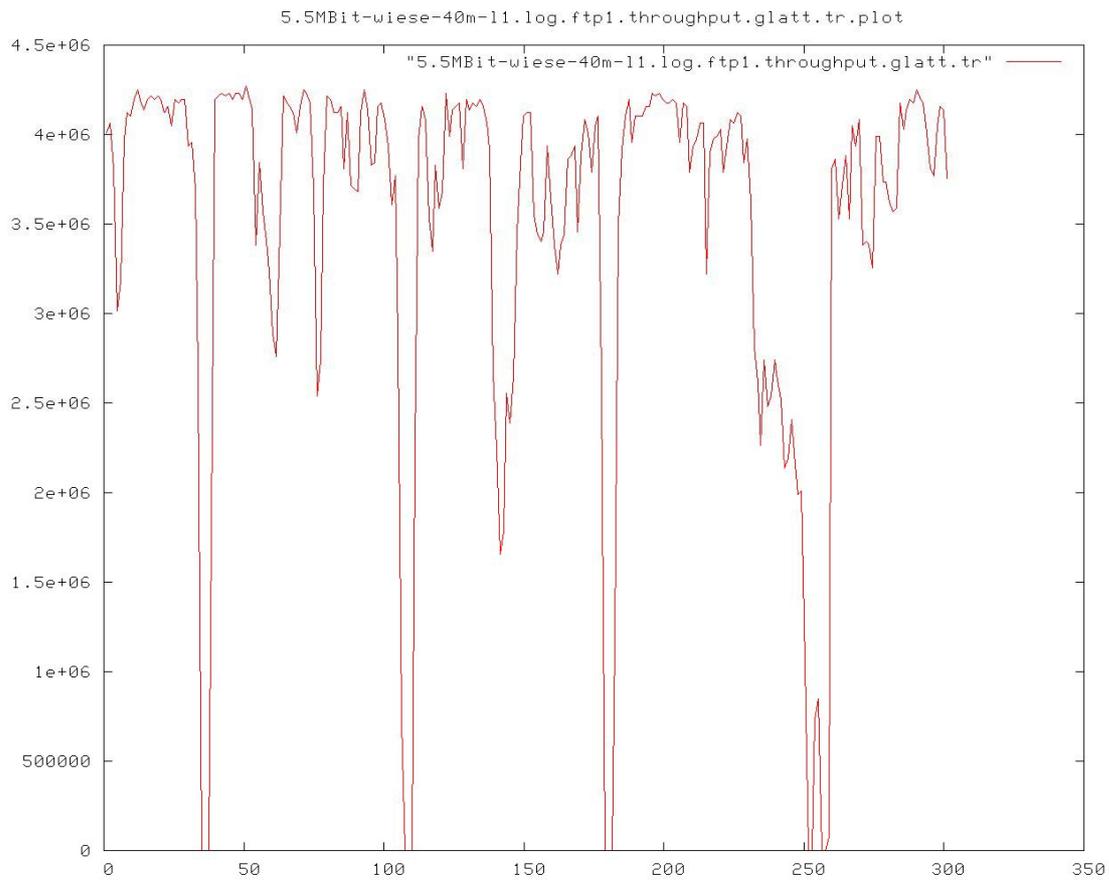
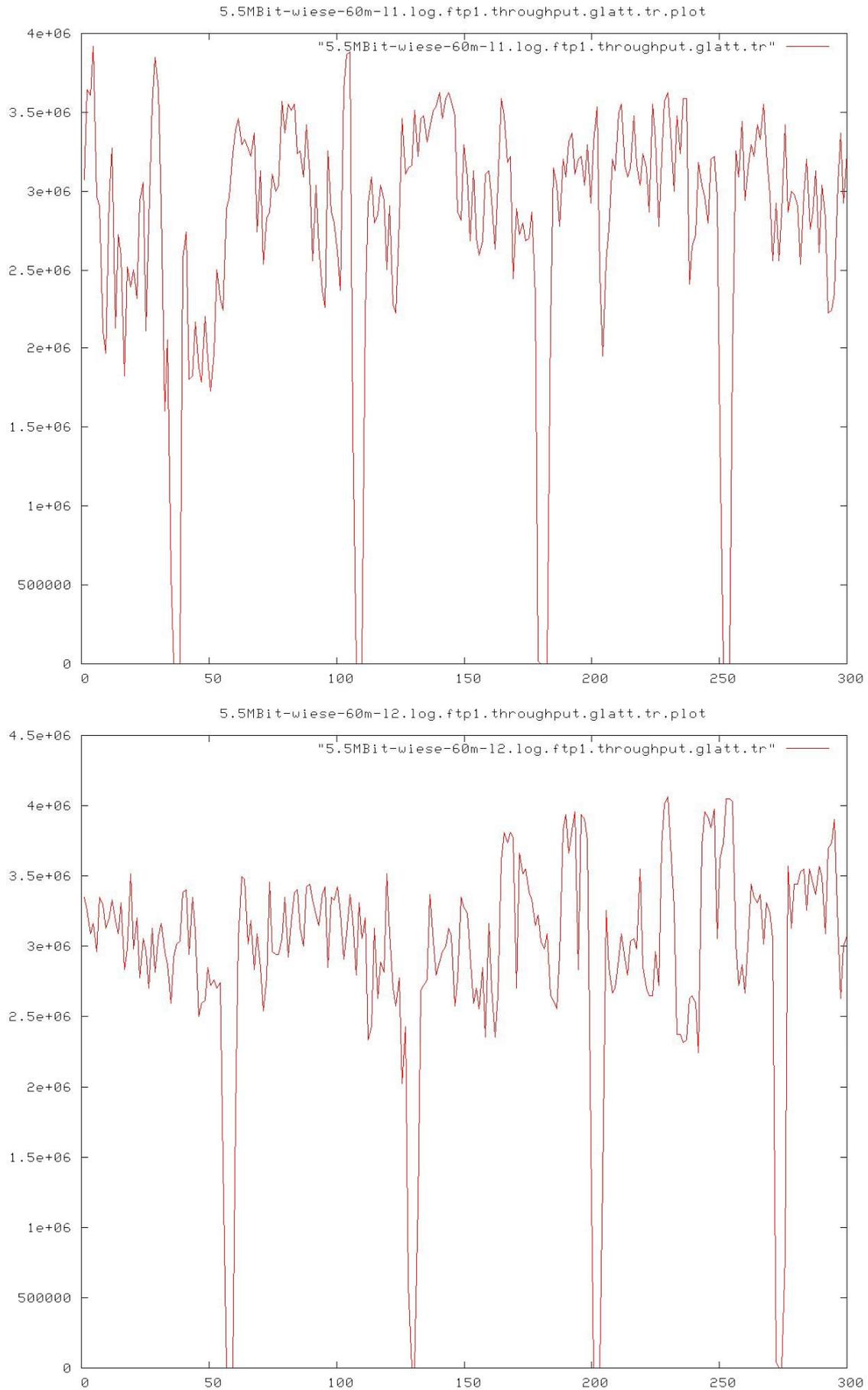


Abb. A.22 : Messkurven für 40 Meter

**Abb. A.23 : Messkurven für 60 Meter**

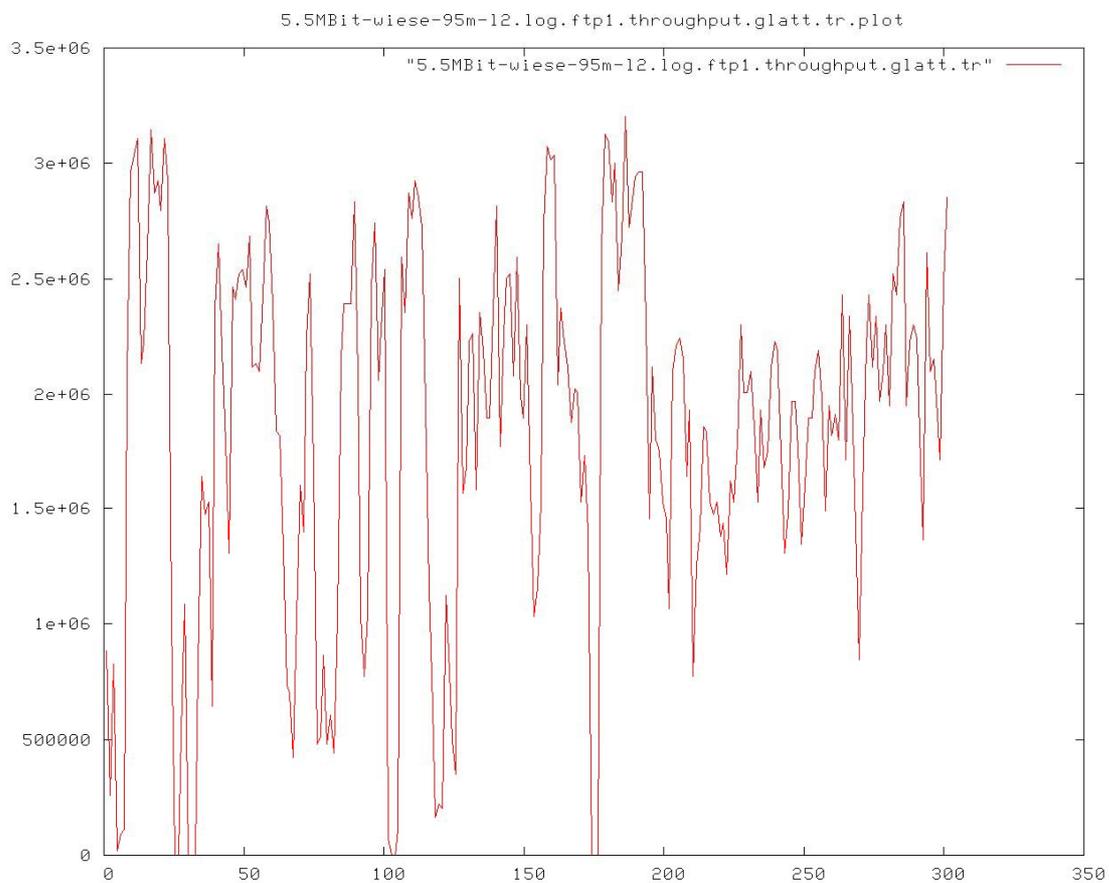
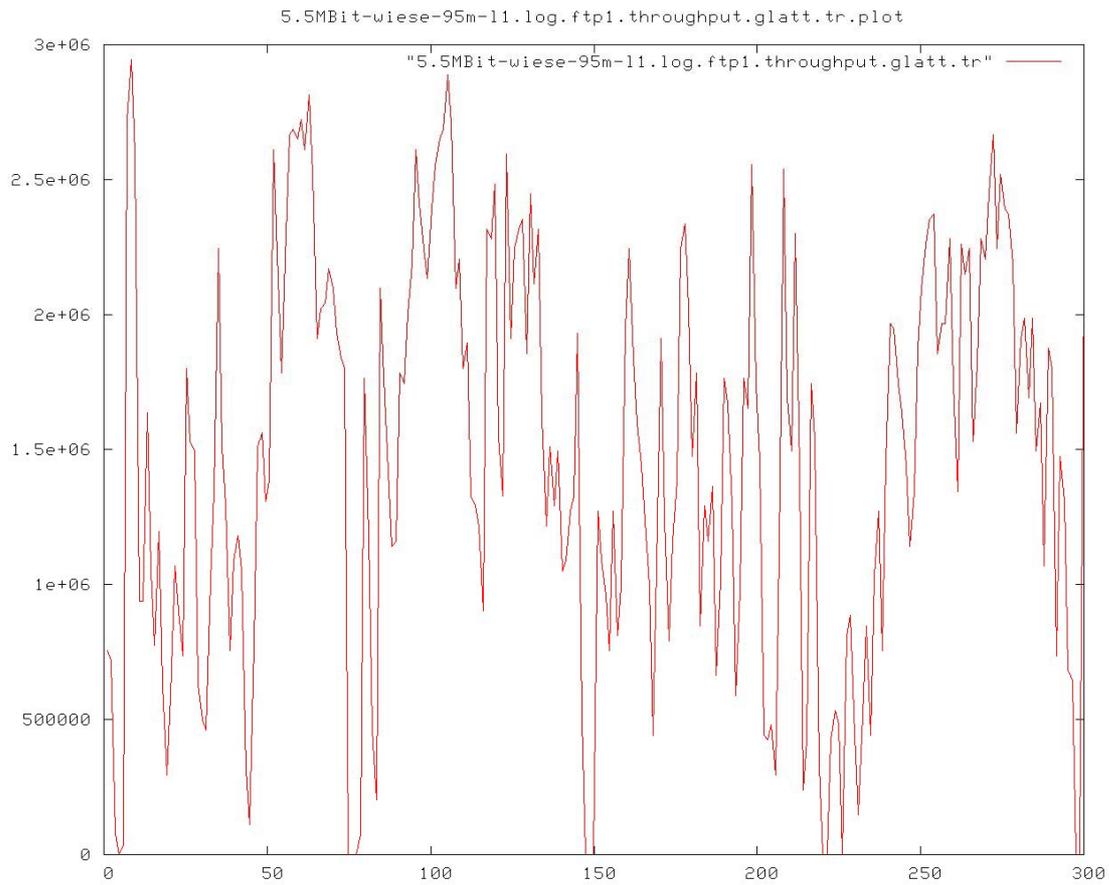


Abb. A.24 : Messkurven für 95 Meter

A.2 Messkurven der zweiten Serie

A.2.1 Terrain Parkplatz

A.2.1.1 11 MBit/s

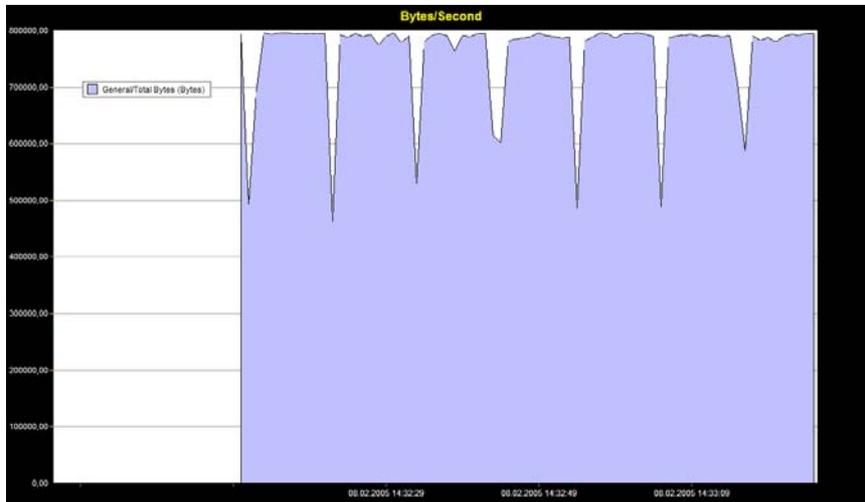


Abb. A.25 : Messkurve für 14 Meter (Prism2)

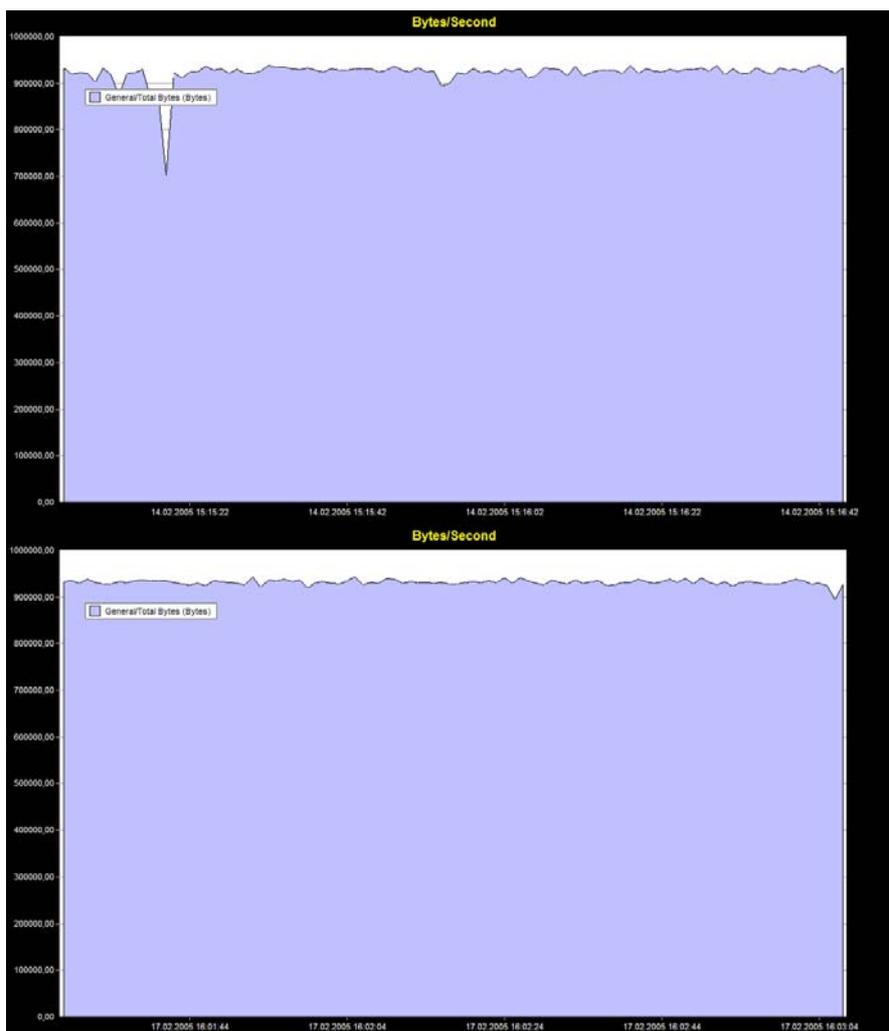


Abb. A.26 : Messkurven für 14 Meter (Netgear)

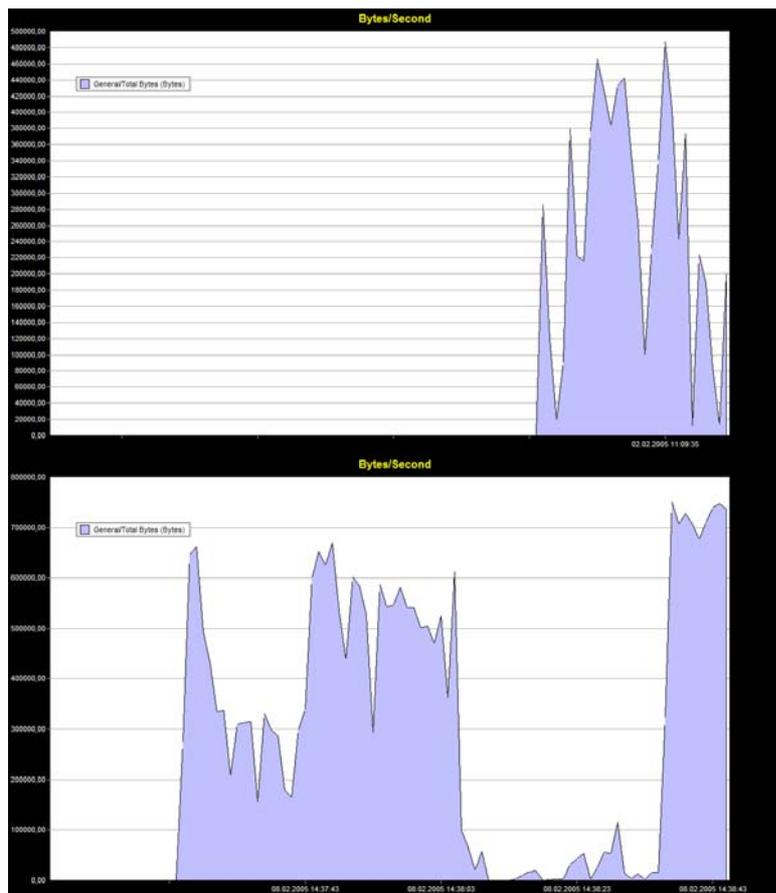


Abb. A.27 : Messkurven für 32 Meter (Prism2)

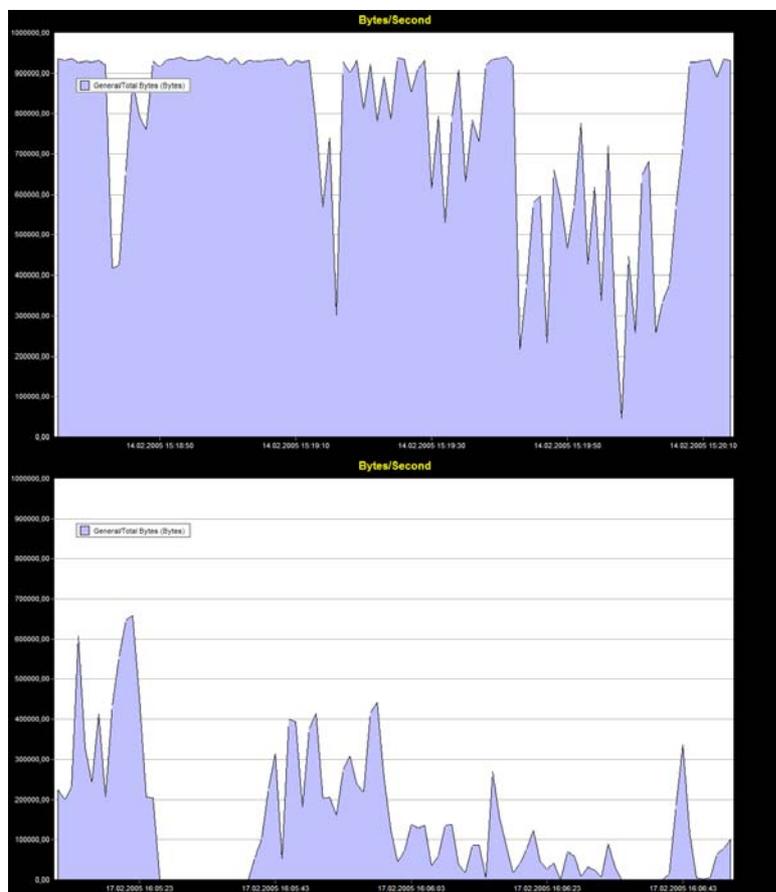


Abb. A.28 : Messkurven für 32 Meter (Netgear)

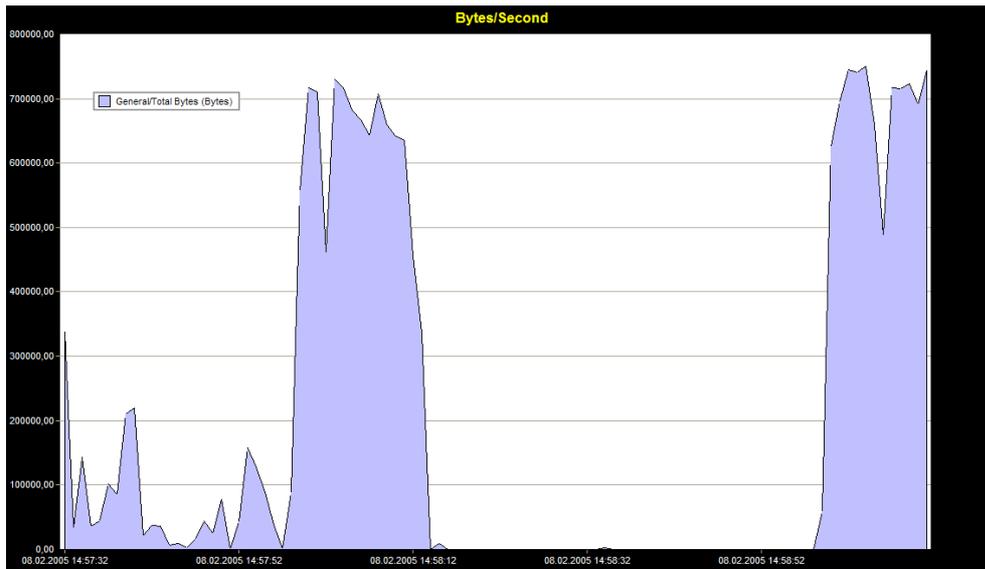


Abb. A.29 : Messkurve für 46 Meter (Prism2)

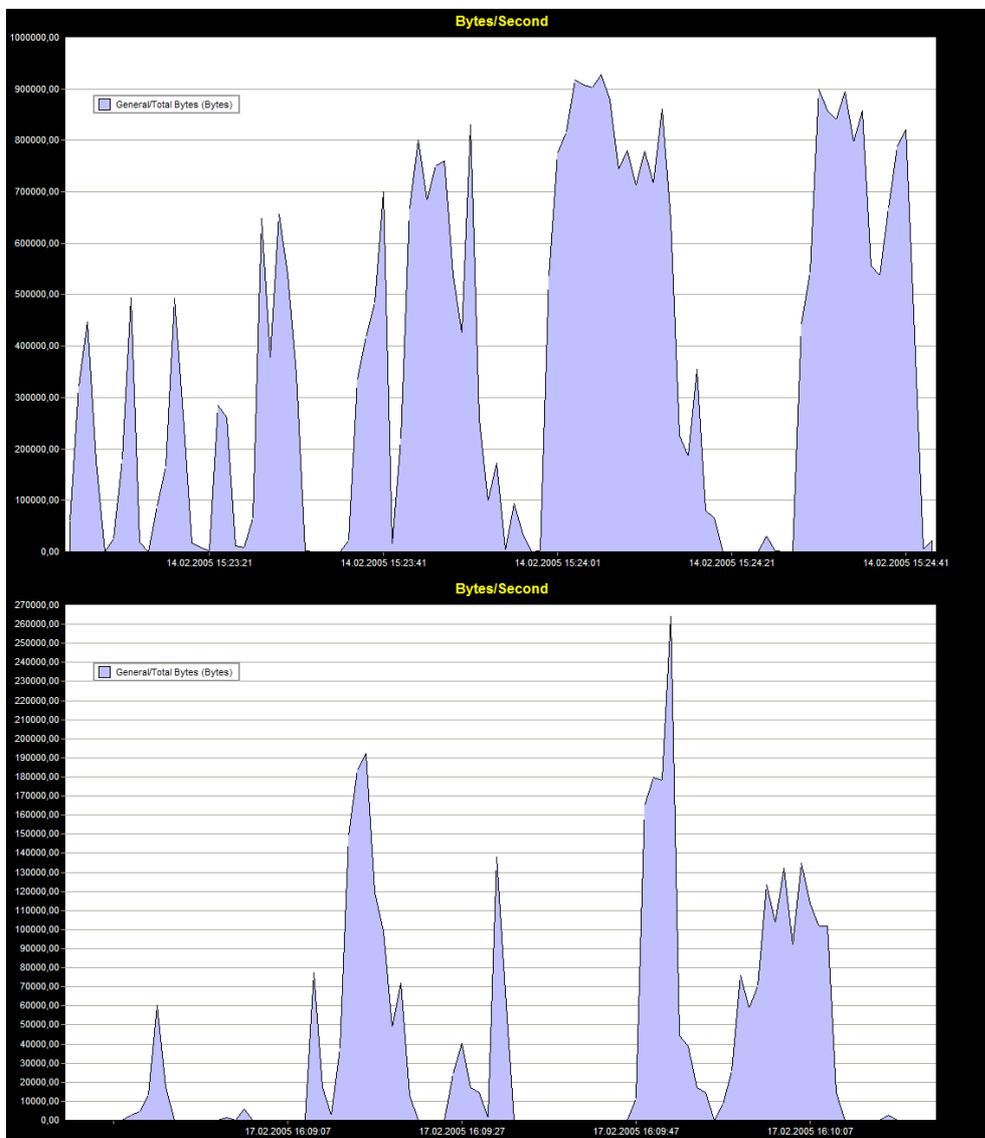


Abb. A.30 : Messkurven für 46 Meter (Netgear)

A.2.1.2 2 MBit/s

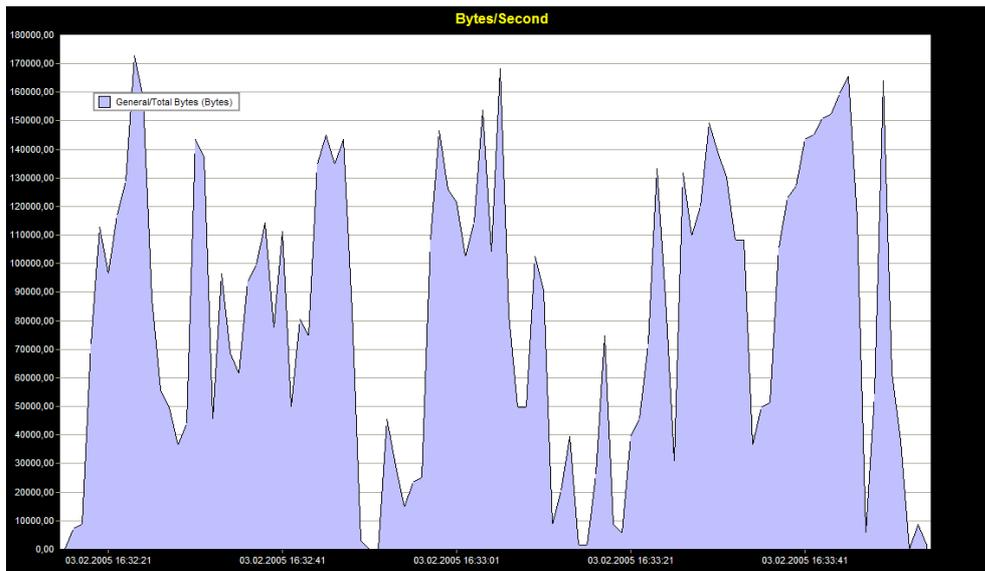


Abb. A.31 : Messkurve für 32 Meter (Prism2)

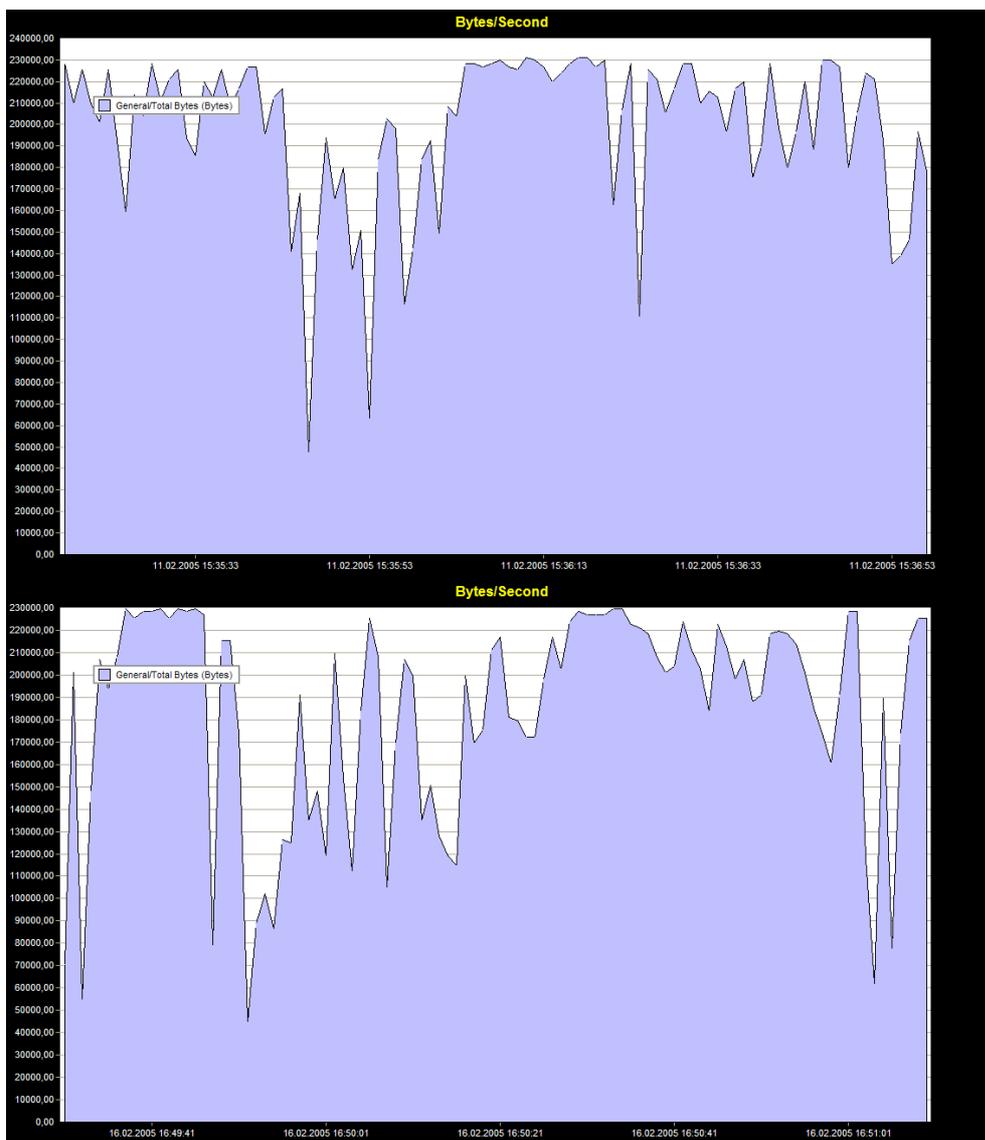


Abb. A.32 : Messkurven für 32 Meter (Netgear)

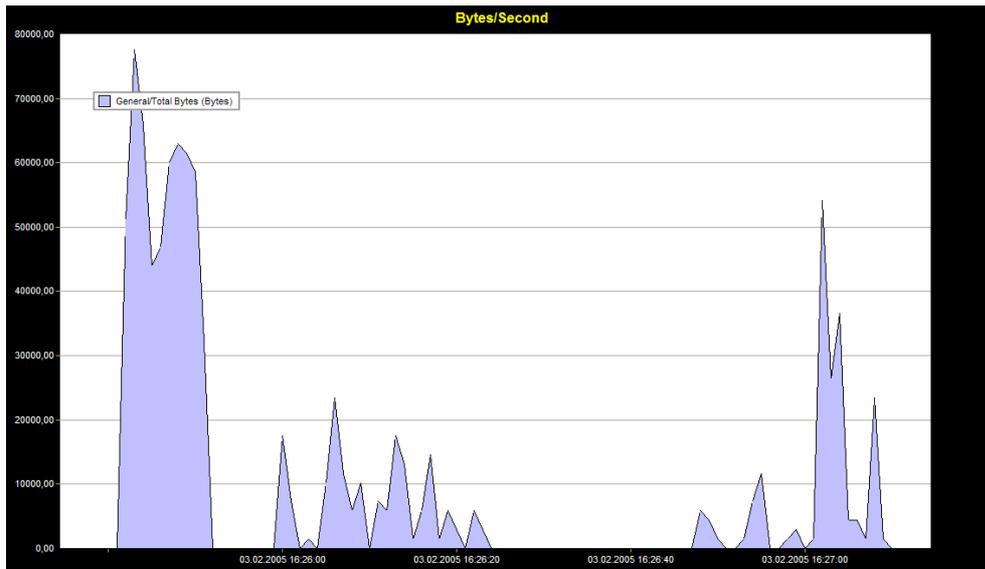


Abb. A.33 : Messkurve für 46 Meter (Prism2)

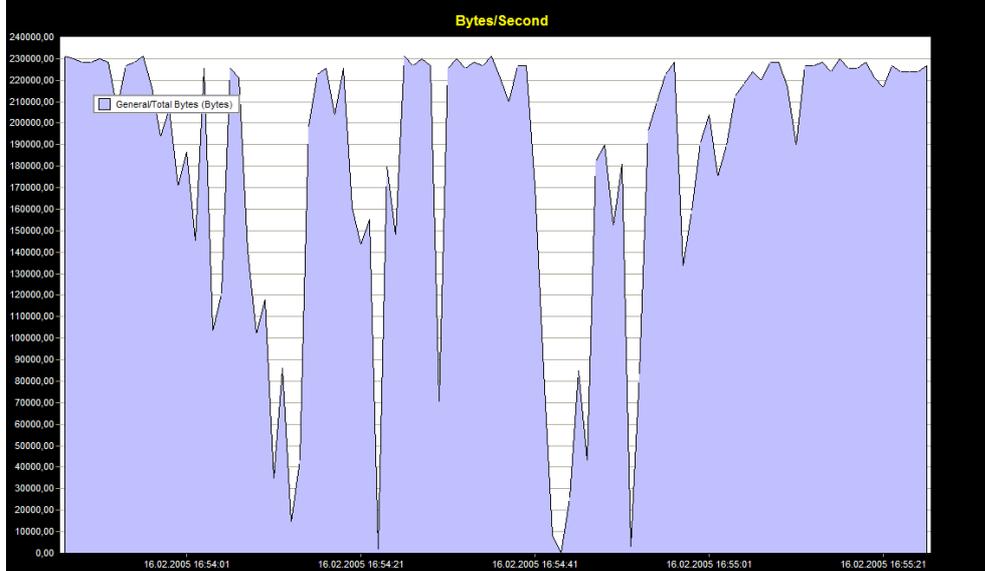
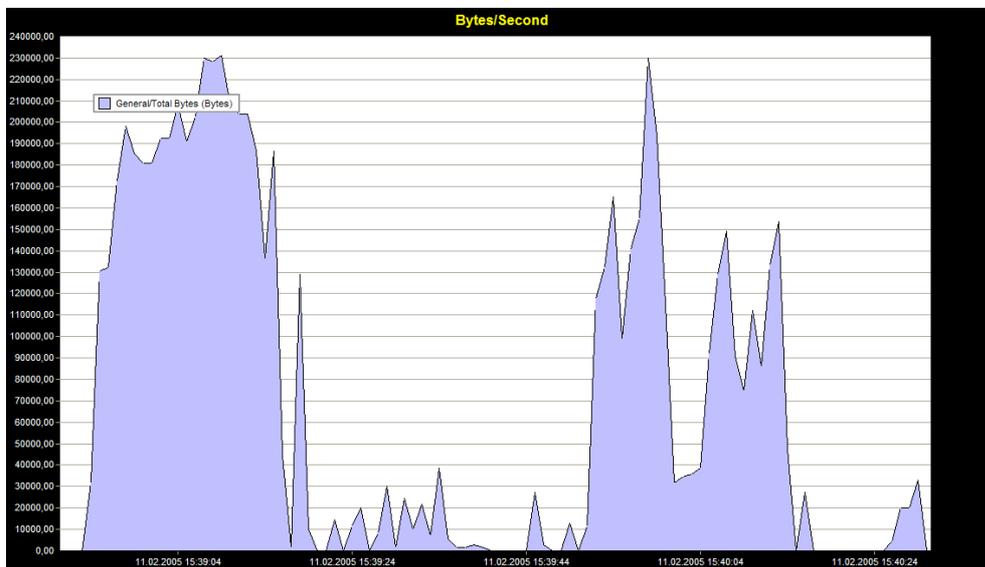


Abb. A.34 : Messkurven für 46 Meter (Netgear)

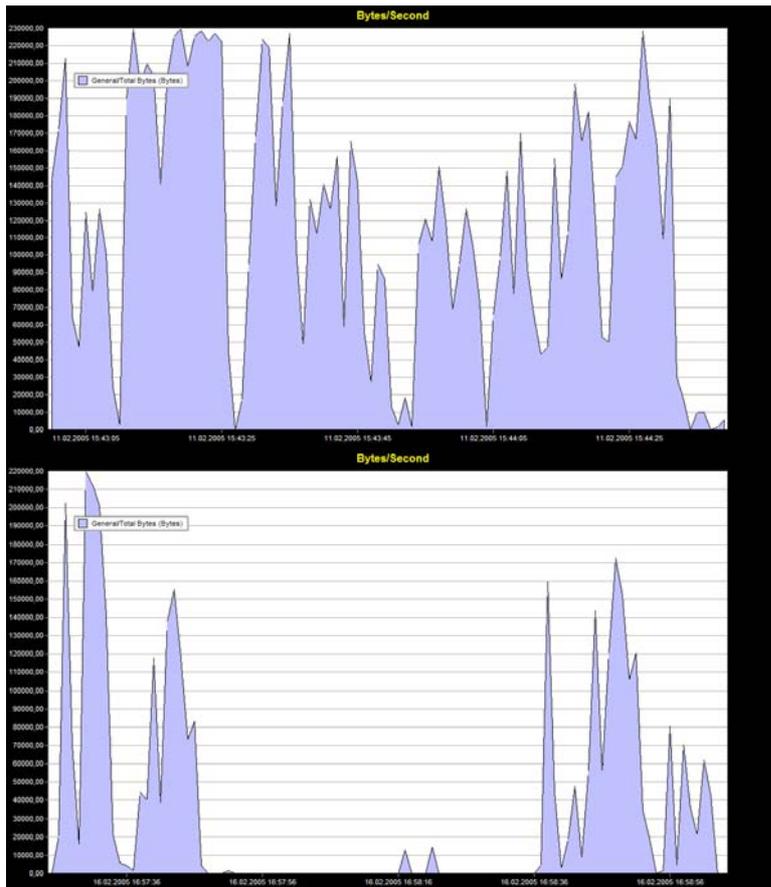


Abb. A.35 : Messkurven für 66 Meter (Netgear)

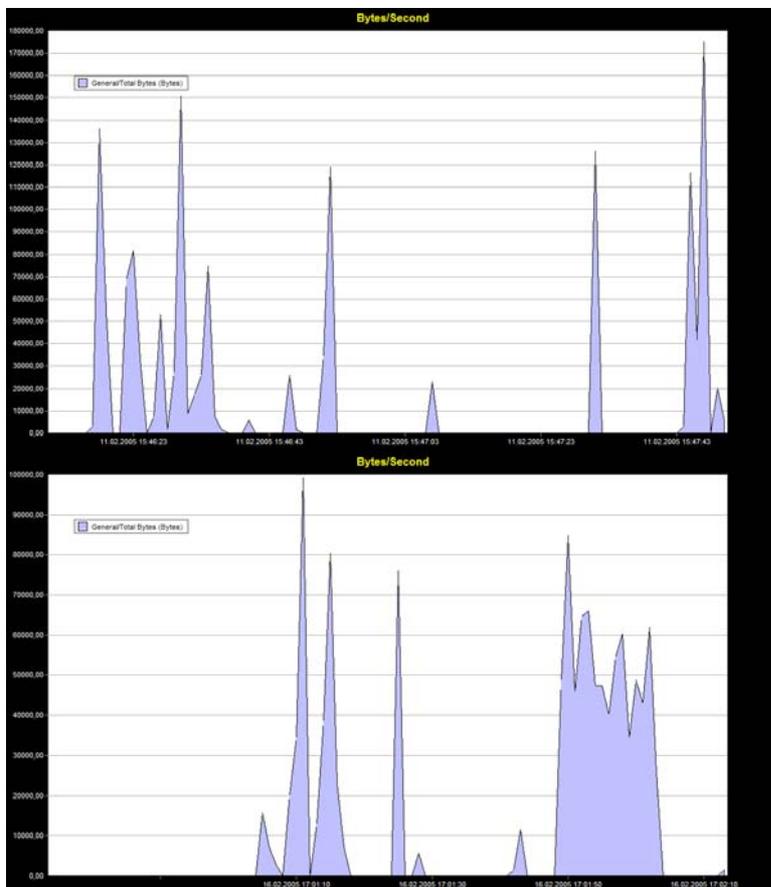


Abb. A.36 : Messkurven für 84 Meter (Netgear)

A.2.2 Terrain Unterholz

A.2.2.1 11 MBit/s

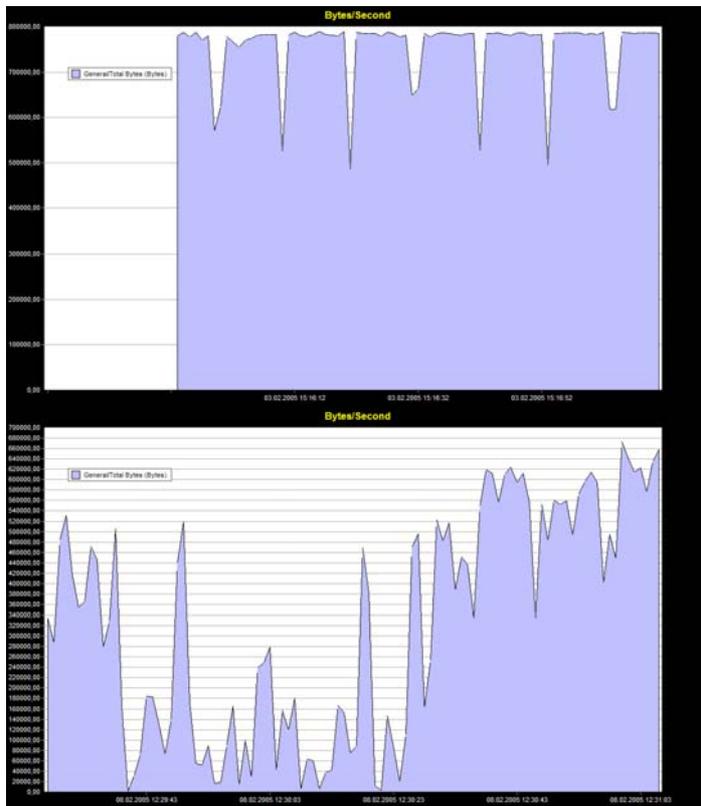


Abb. A.37 : Messkurven für 10 Meter (Prism2)

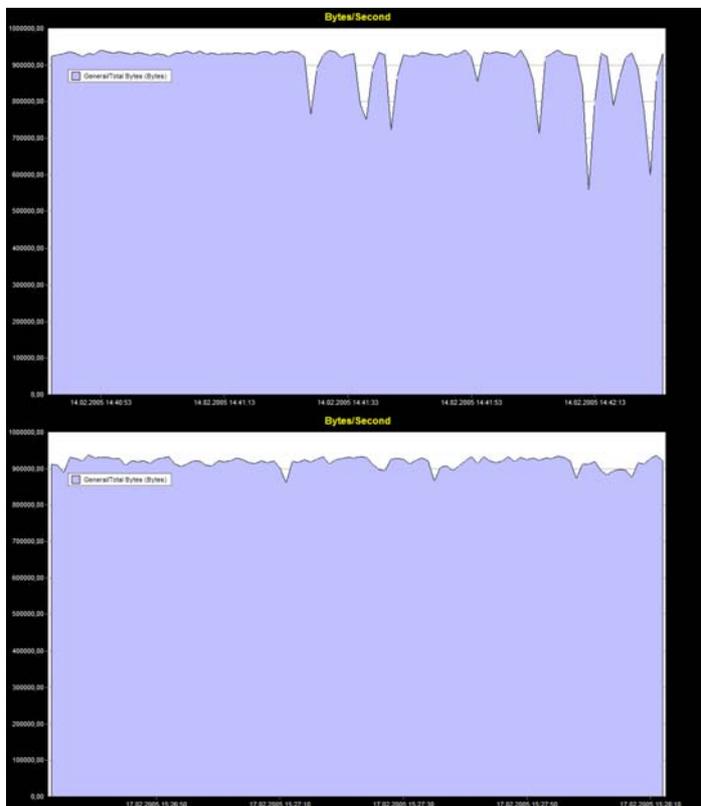


Abb. A.38 : Messkurven für 10 Meter (Netgear)

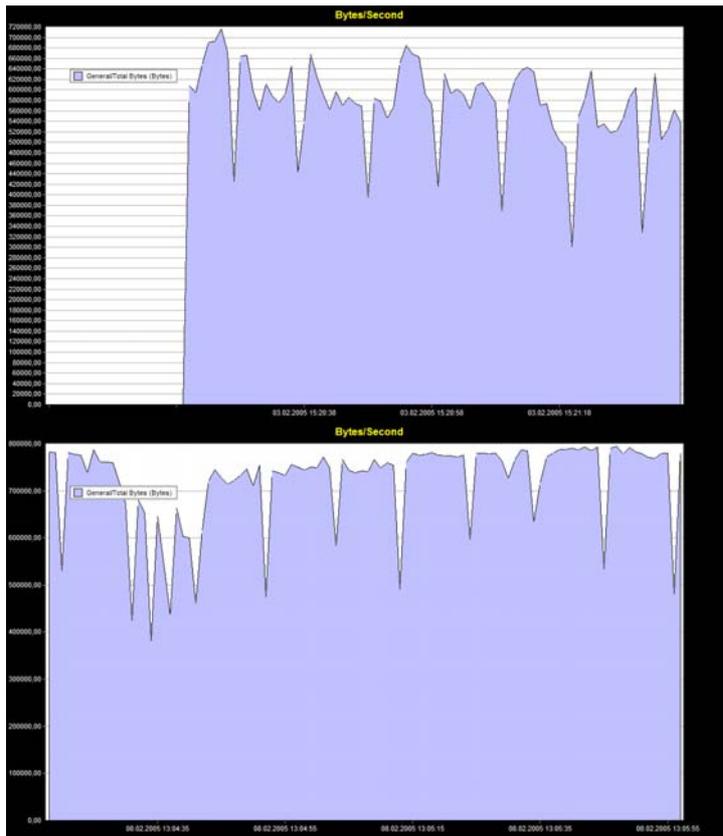


Abb. A.39 : Messkurven für 21 Meter (Prism2)

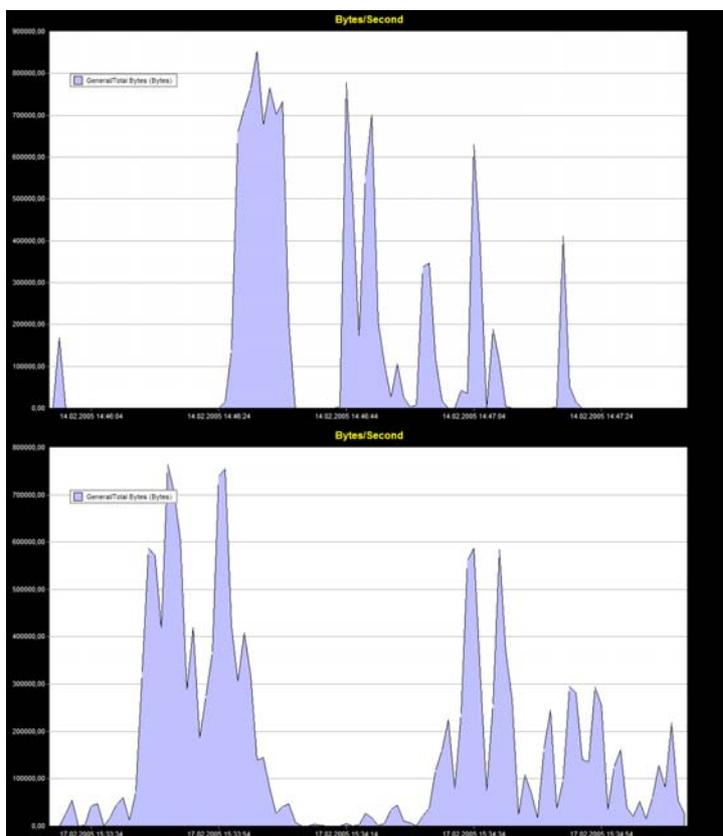


Abb. A.40 : Messkurven für 21 Meter (Netgear)

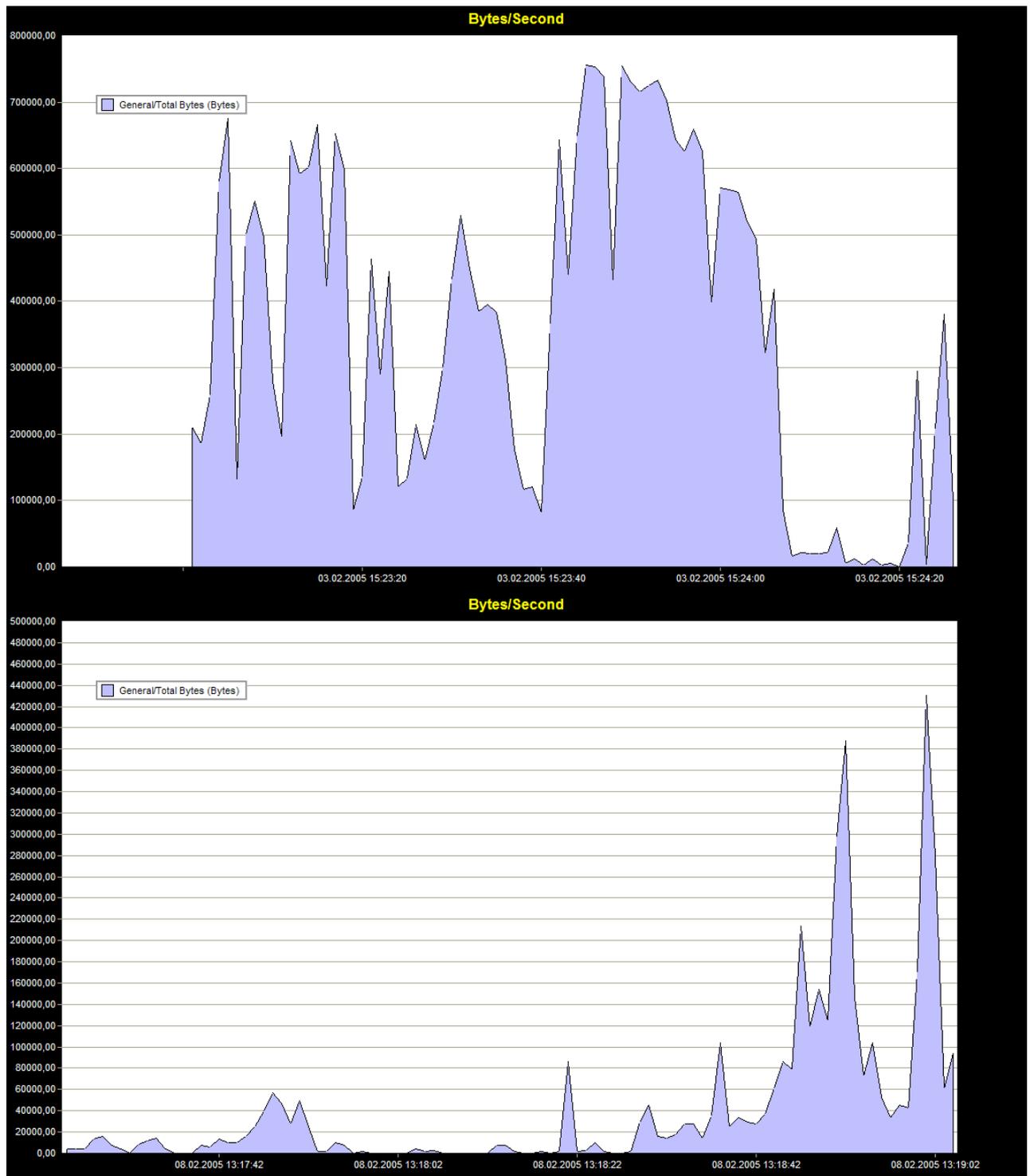


Abb. A.41 : Messkurven für 30 Meter (Prism2)

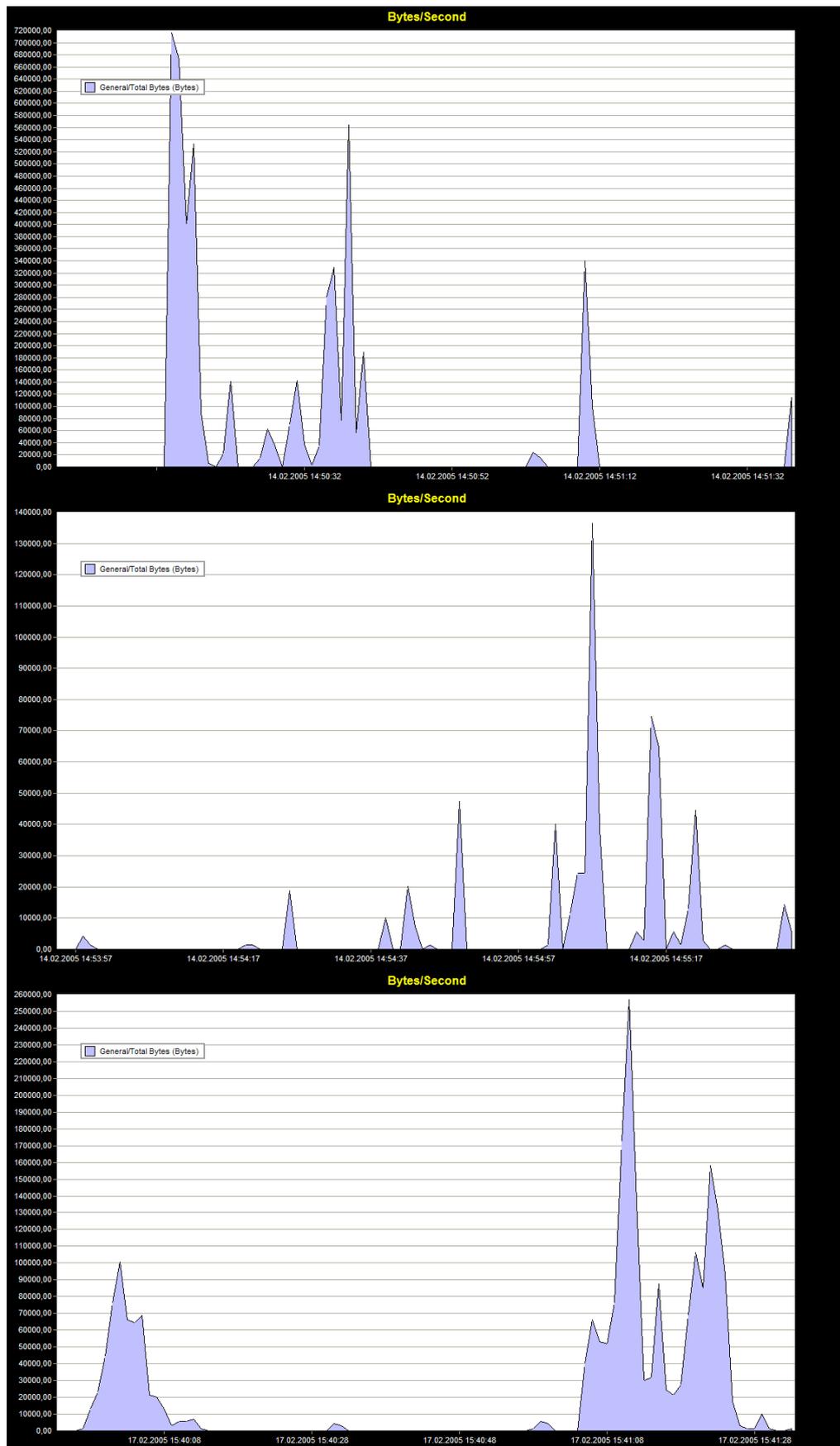


Abb. A.42 : Messkurven für 30 Meter (Netgear)

A.2.2.2 2 MBit/s

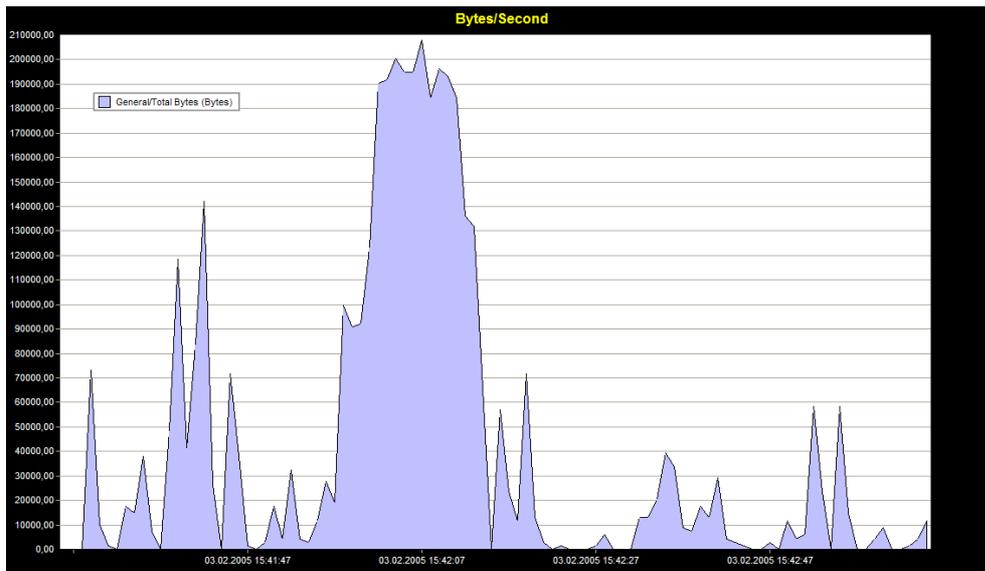


Abb. A.43 : Messkurve für 20 Meter (Prism2)

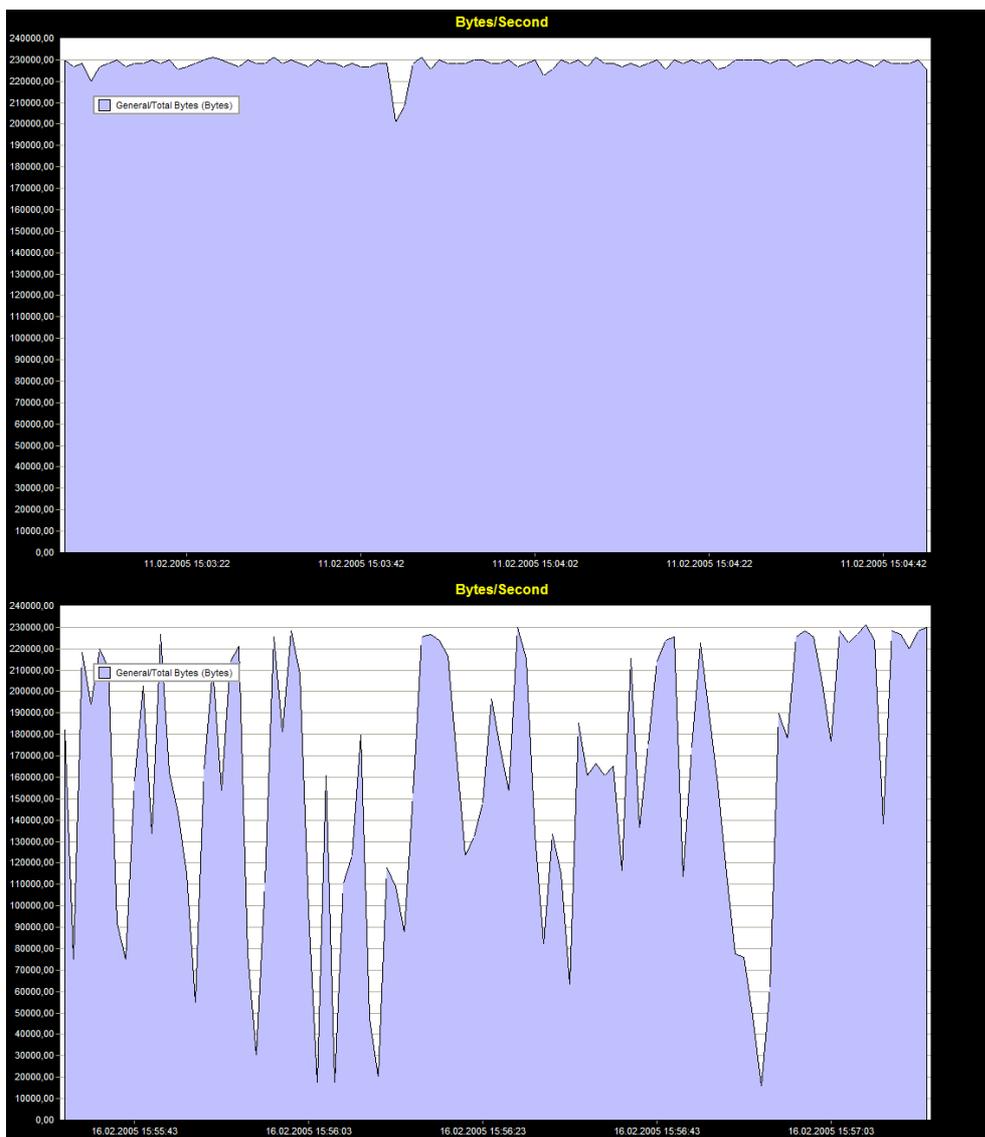


Abb. A.44 : Messkurven für 20 Meter (Netgear)

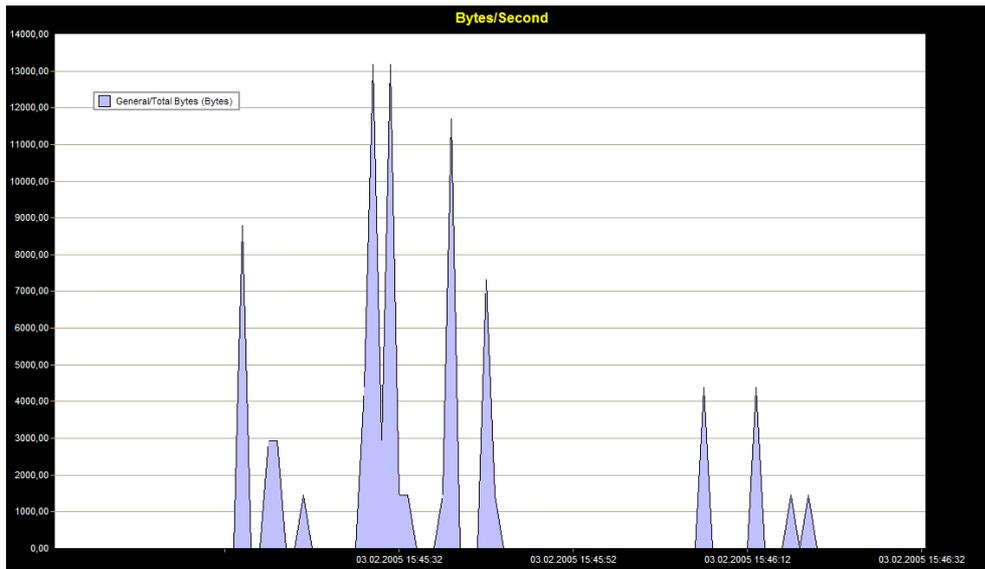


Abb. A.45 : Messkurve für 35 Meter (Prism2)

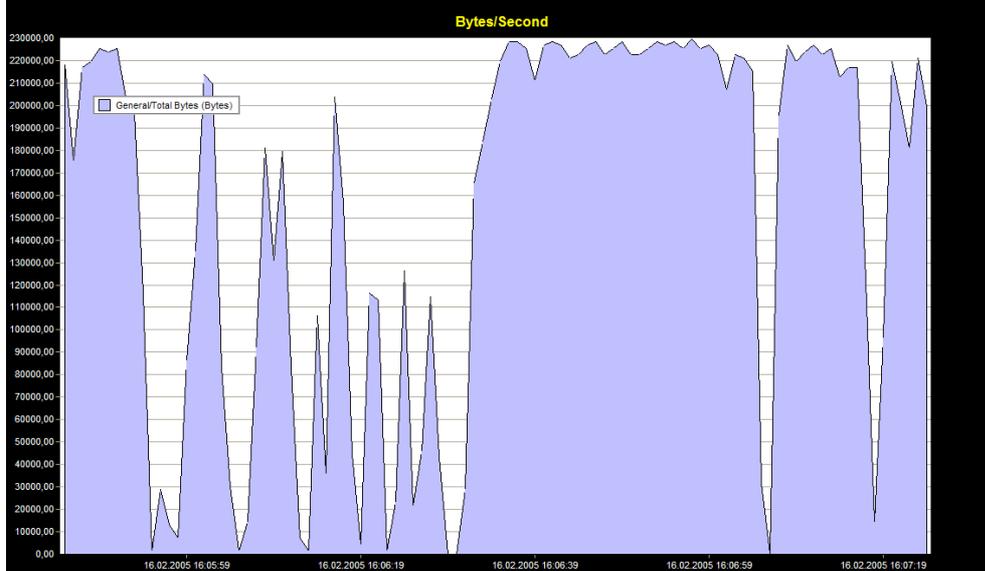
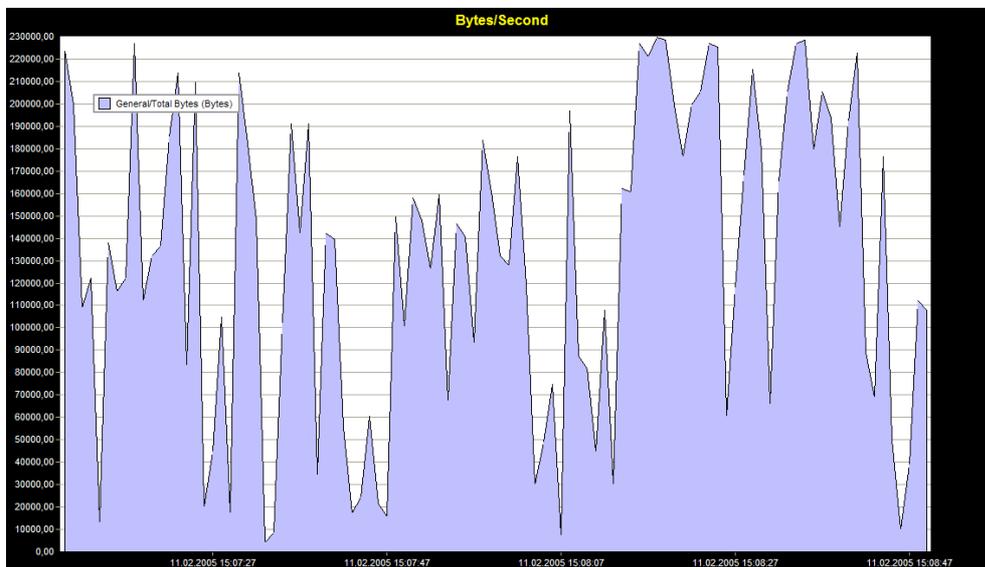


Abb. A.46 : Messkurven für 35 Meter (Netgear)

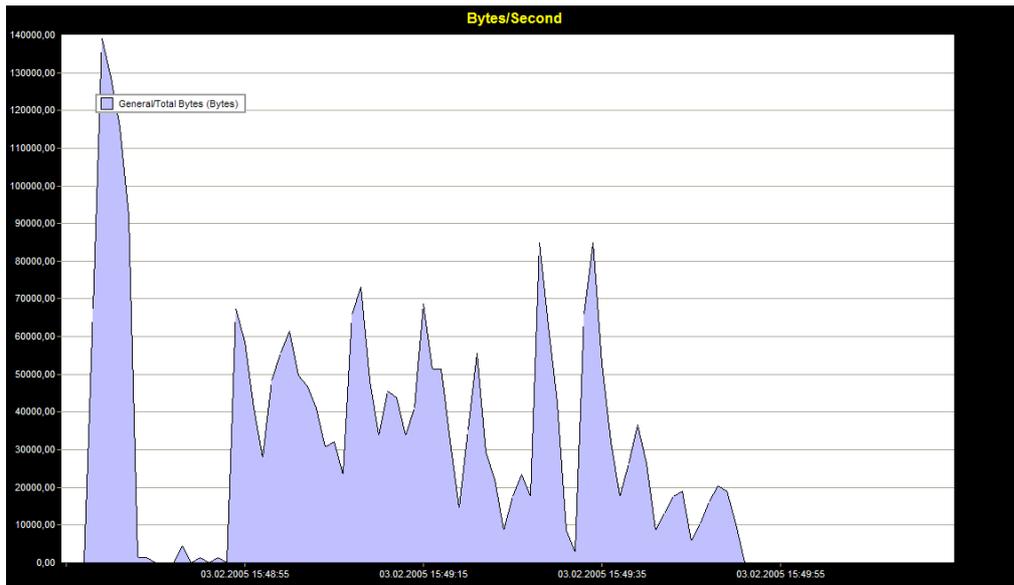


Abb. A.47 : Messkurve für 50 Meter (Prism2)

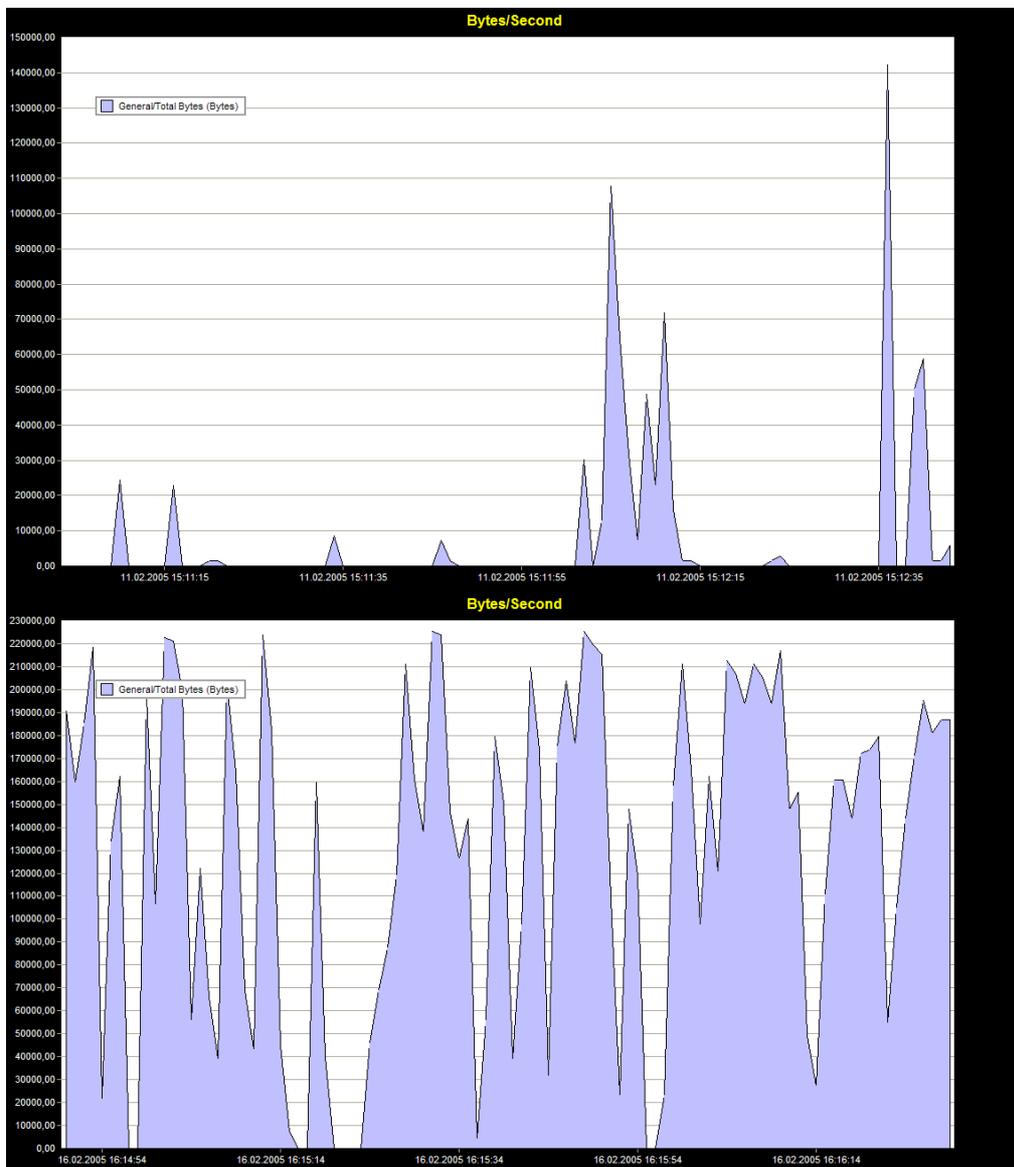


Abb. A.48 : Messkurven für 50 Meter (Netgear)

A.2.3 Terrain Wald

A.2.3.1 11 MBit/s

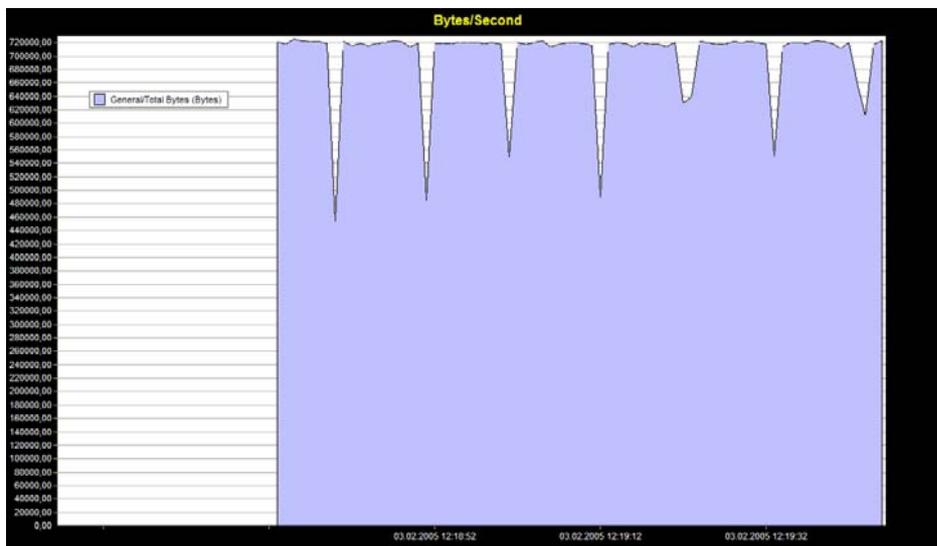


Abb. A.49 : Messkurve für 20 Meter (Prism2)

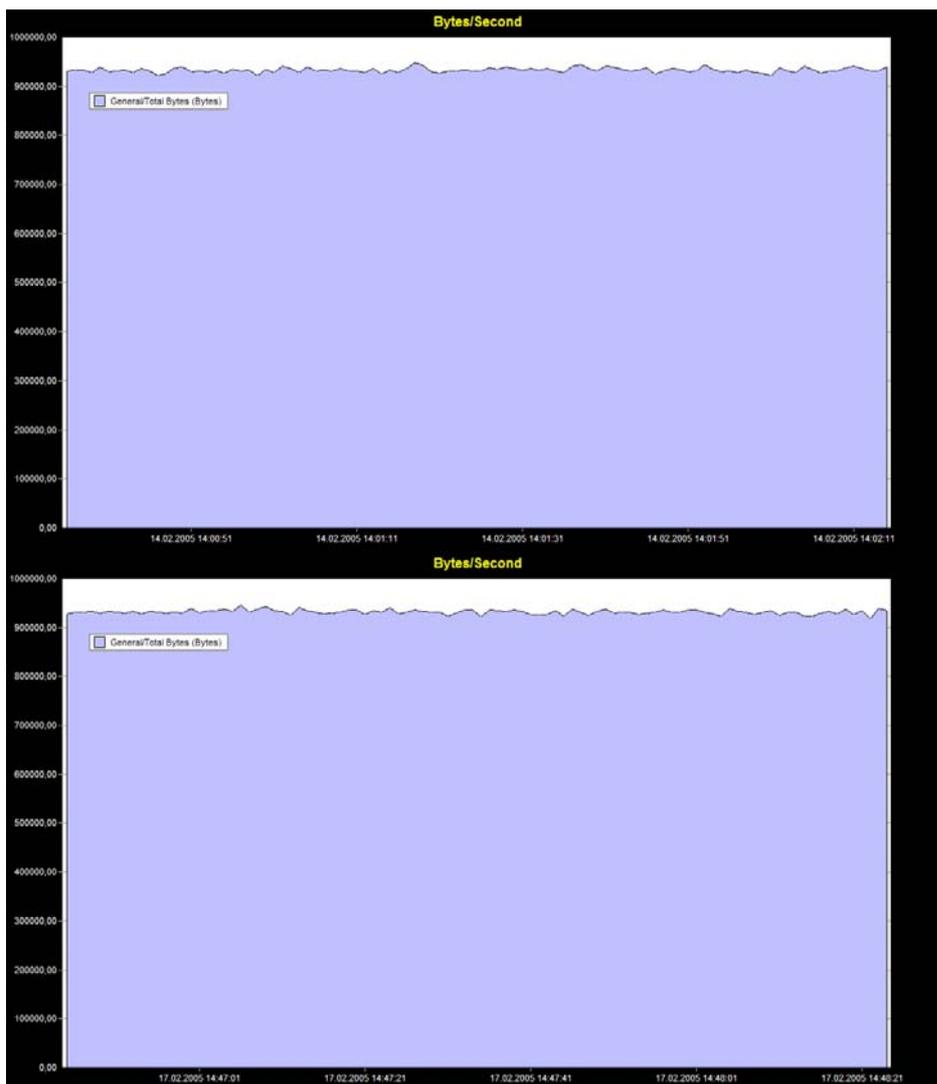


Abb. A.50 : Messkurven für 20 Meter (Netgear)

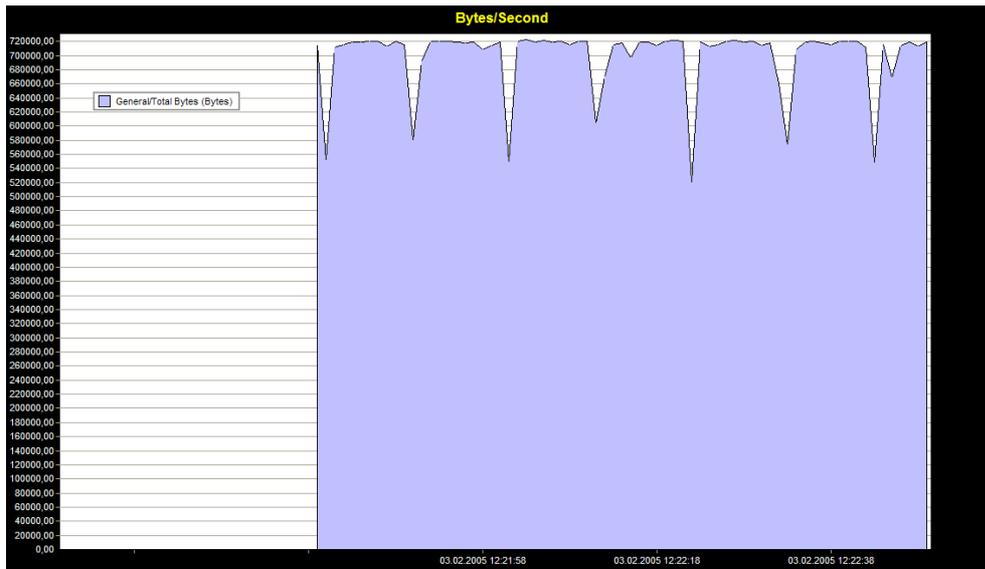


Abb. A.51 : Messkurve für 35 Meter (Prism2)

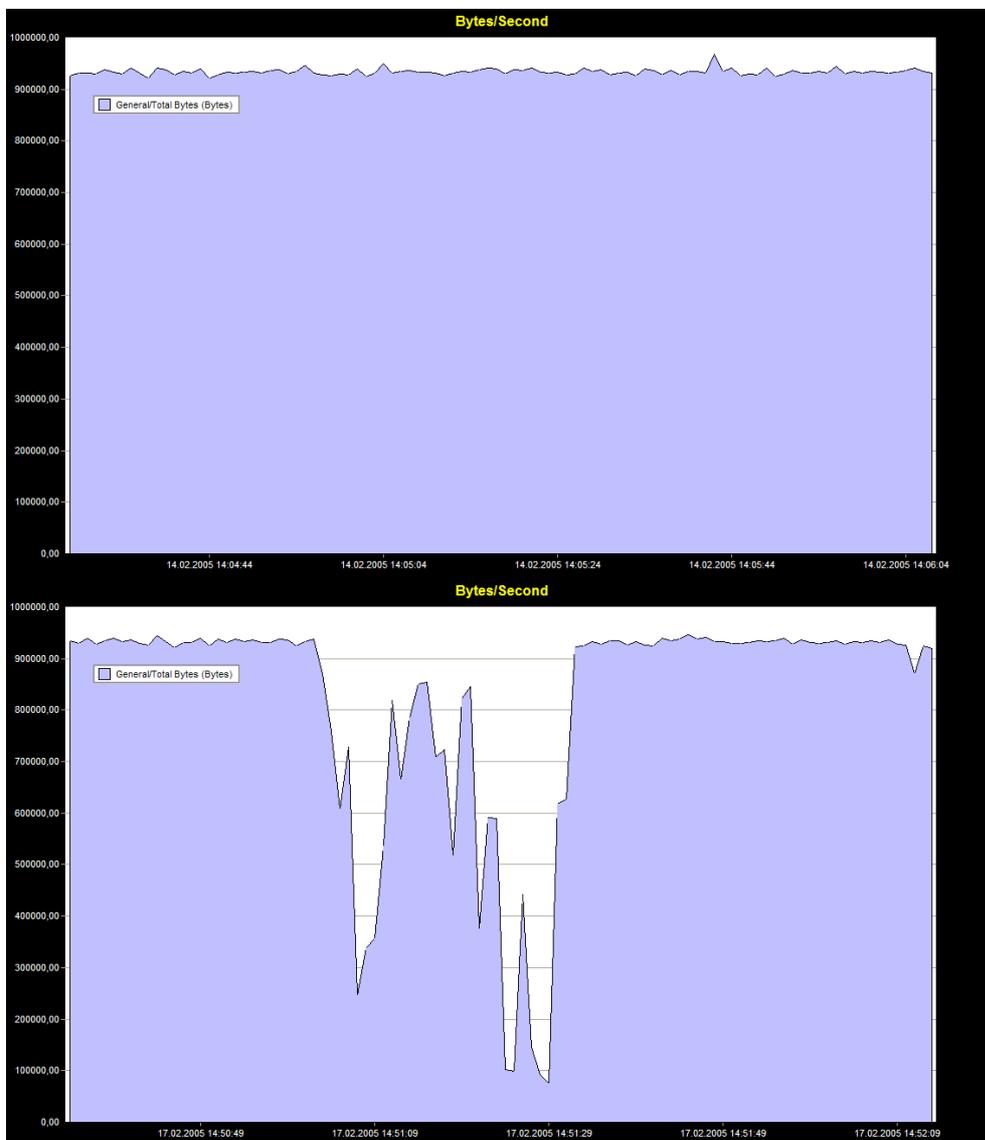


Abb. A.52 : Messkurven für 35 Meter (Netgear)

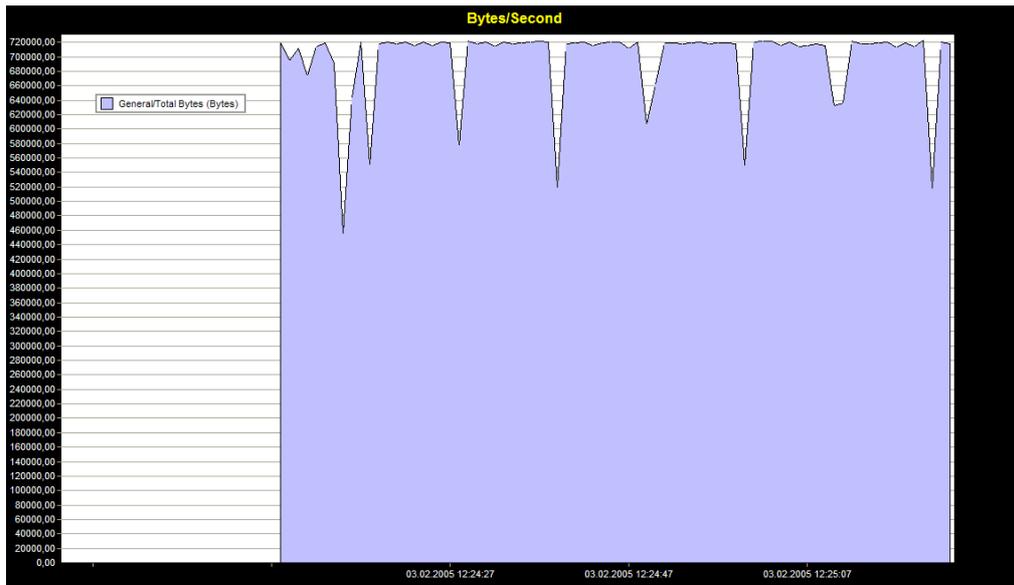


Abb. A.53 : Messkurve für 45 Meter (Prism2)



Abb. A.54 : Messkurven für 45 Meter (Netgear)

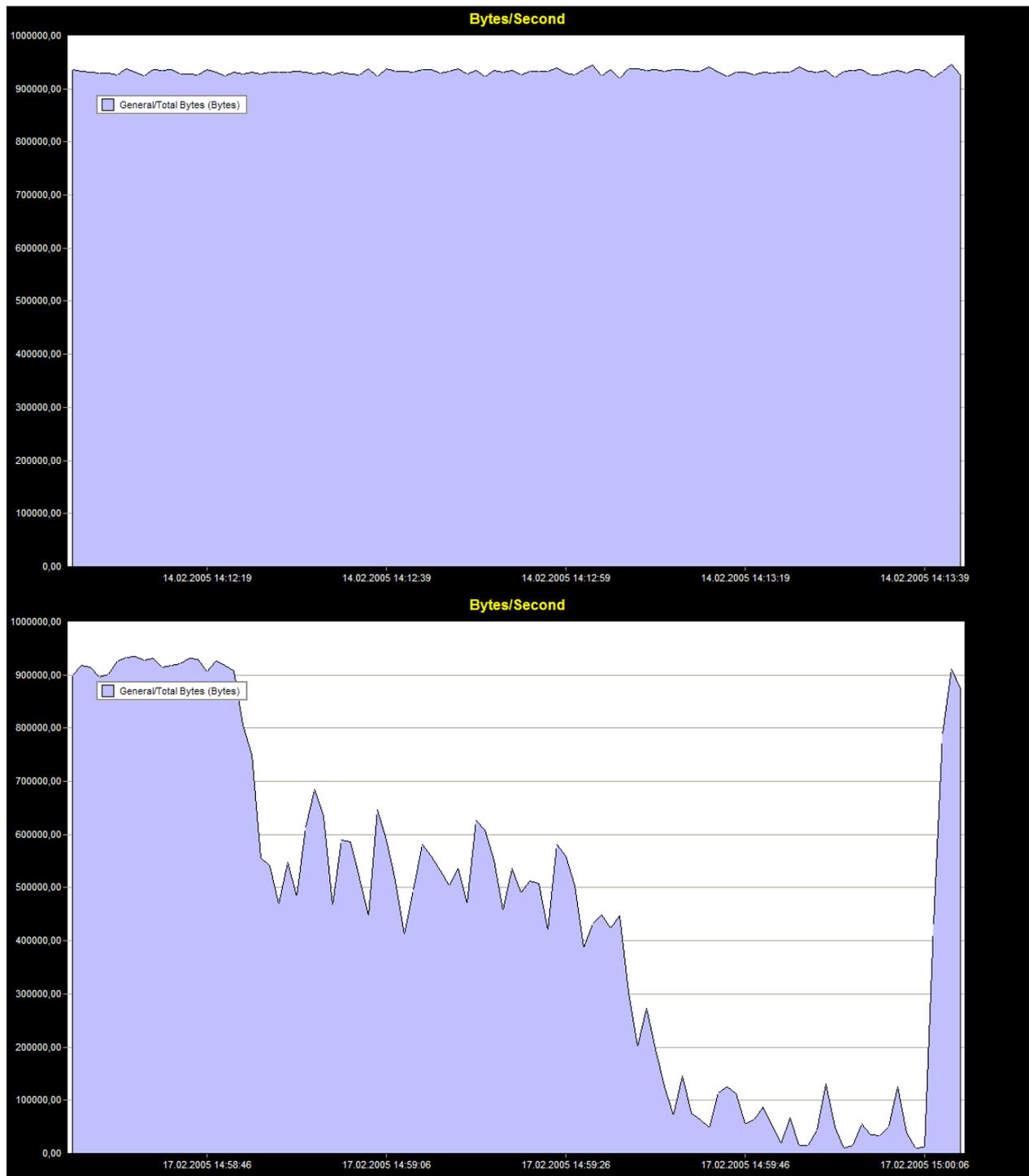


Abb. A.55 : Messkurven für 65 Meter (Netgear)

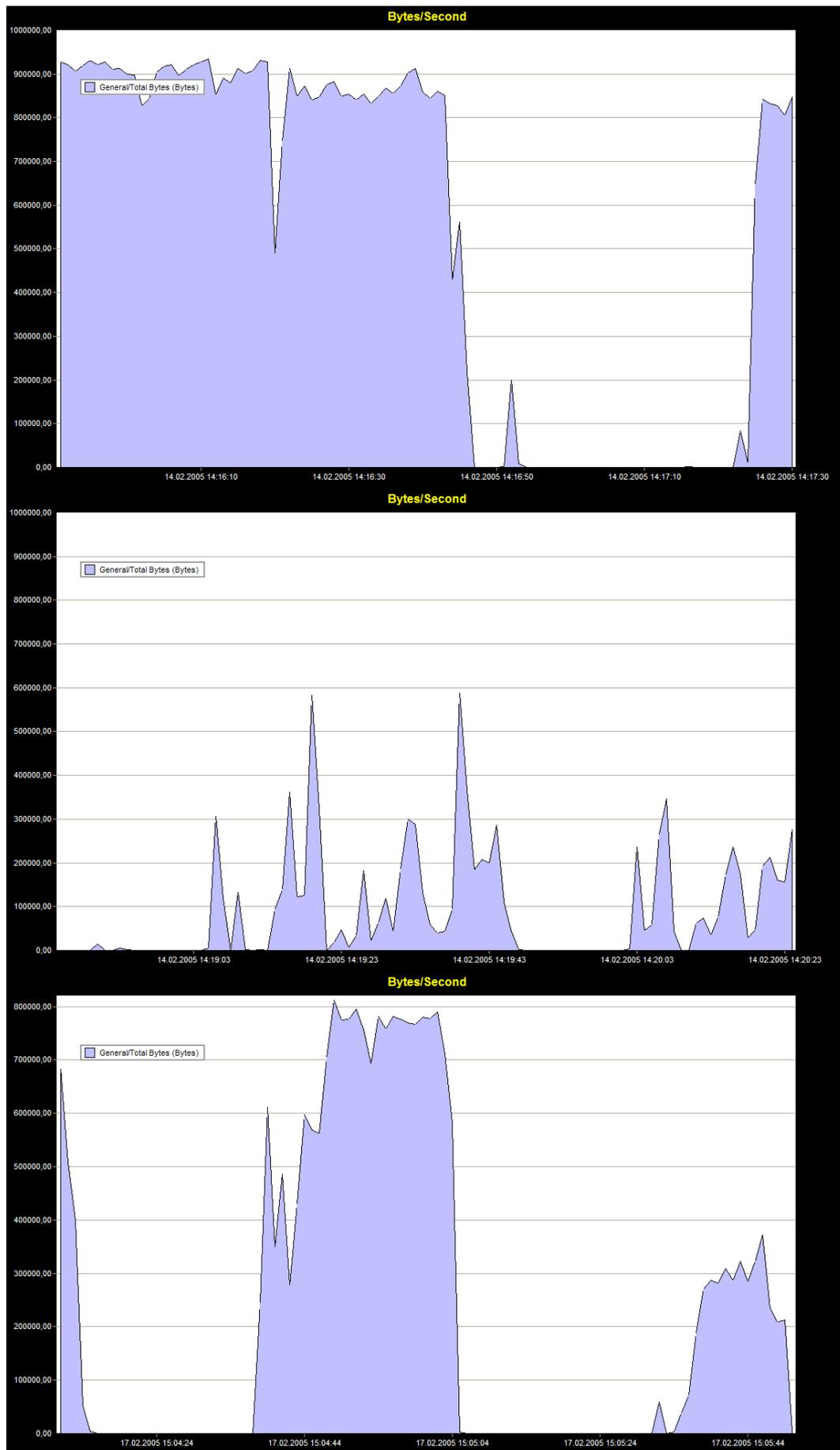


Abb. A.56 : Messkurven für 80 Meter (Netgear)

A.2.3.2 2 MBit/s

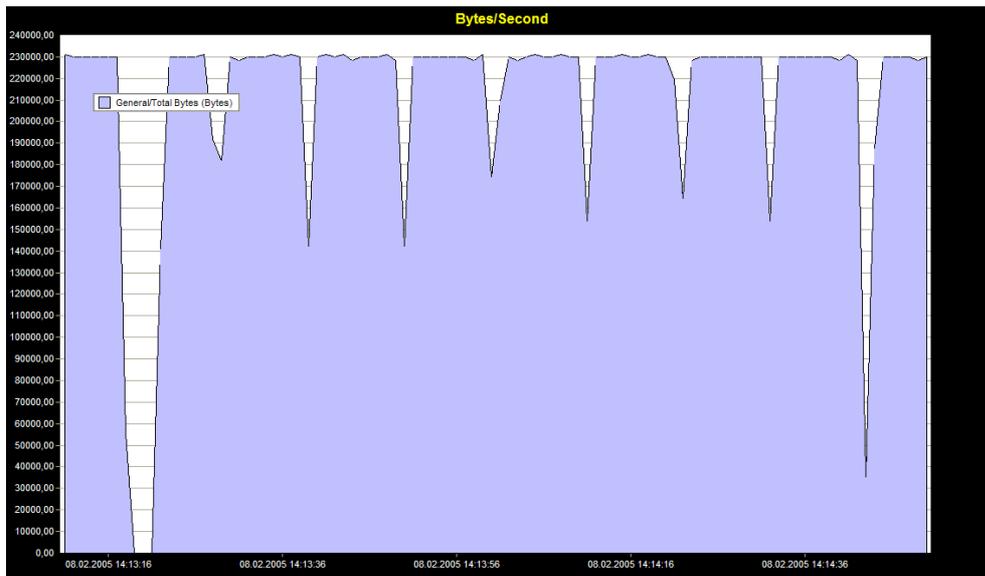


Abb. A.57 : Messkurve für 45 Meter (Prism2)

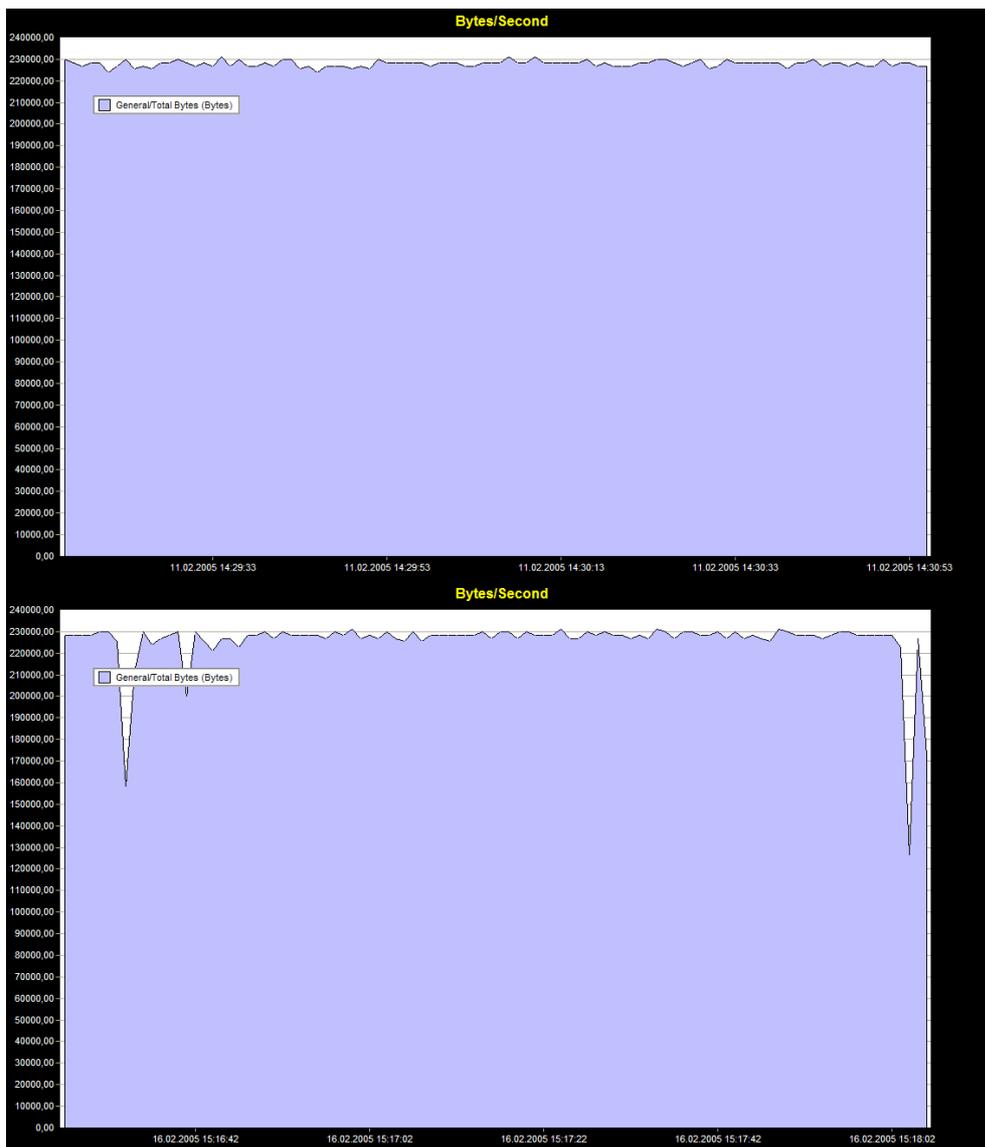


Abb. A.58 : Messkurven für 45 Meter (Netgear)

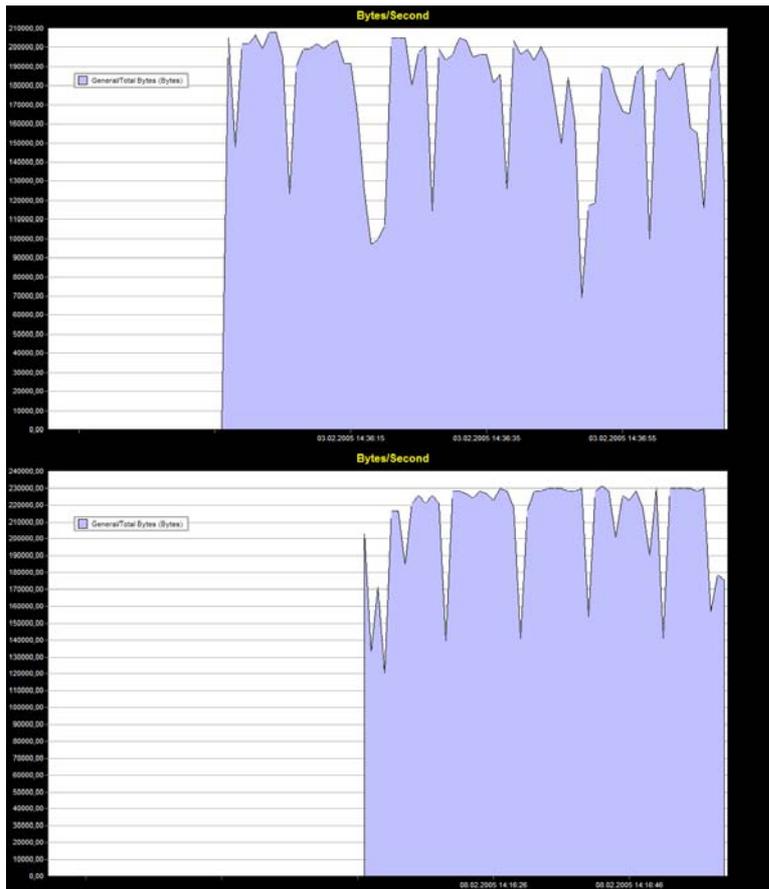


Abb. A.59 : Messkurven für 60 Meter (Prism2)

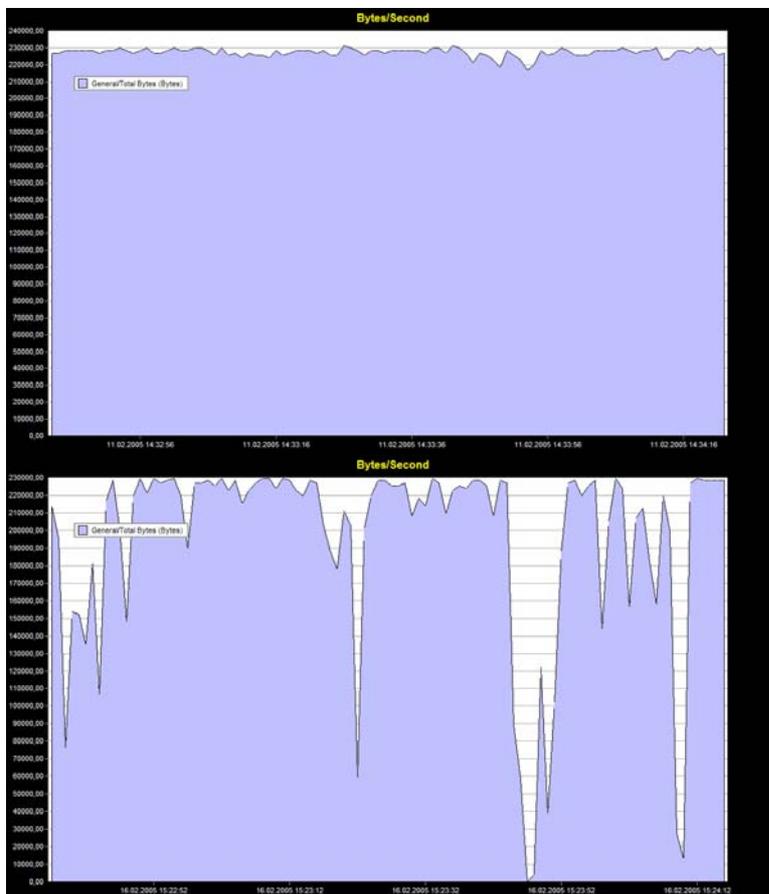


Abb. A.60 : Messkurven für 60 Meter (Netgear)

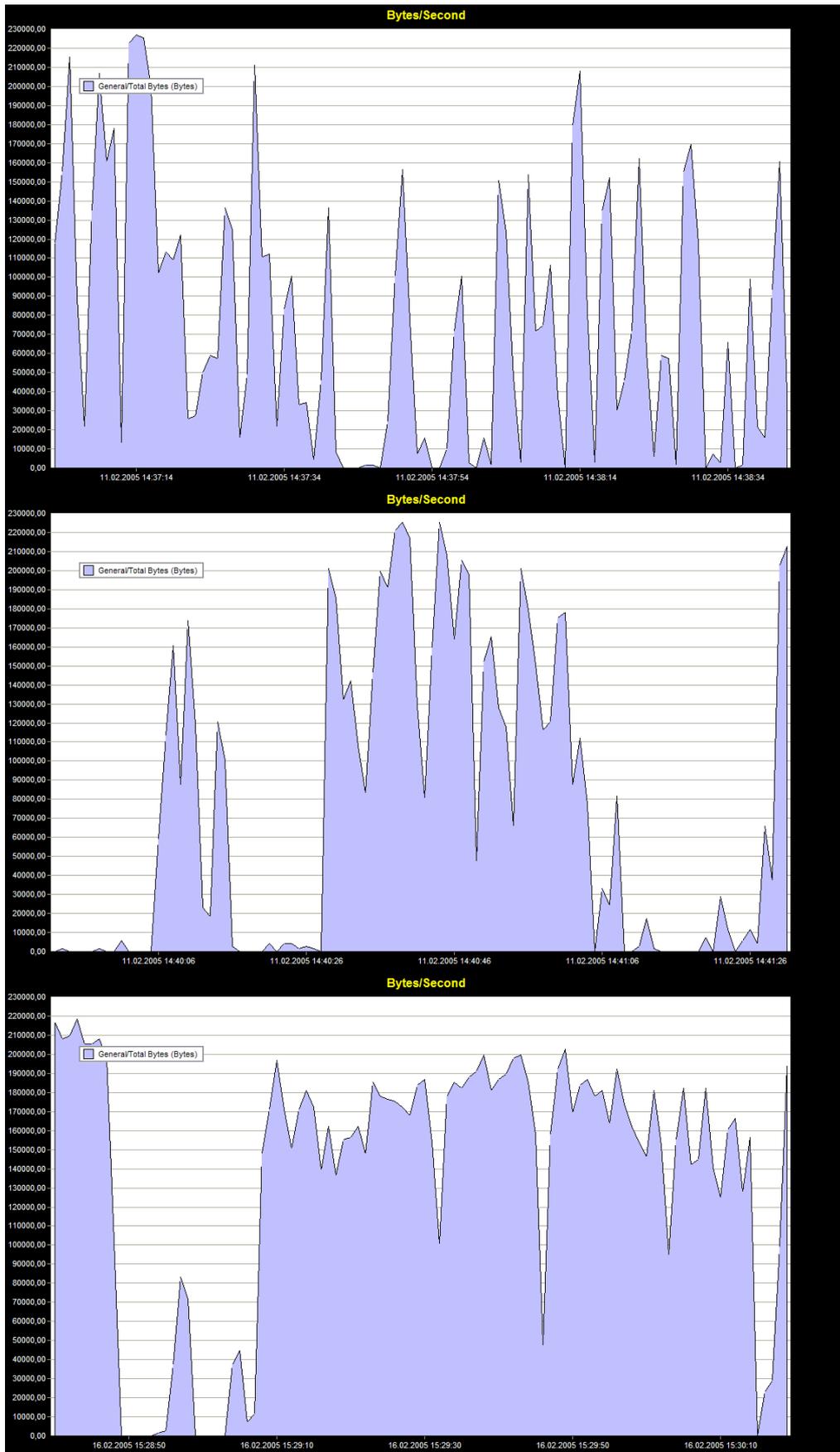


Abb. A.61 : Messkurven für 90 Meter (Netgear)

A.2.4 Terrain Wiese

A.2.4.1 11 MBit/s

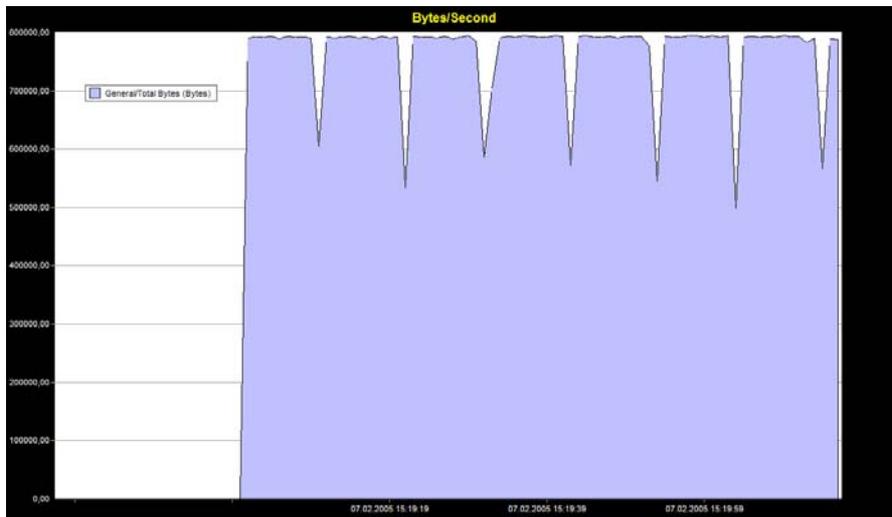


Abb. A.62 : Messkurve für 25 Meter (Prism2)

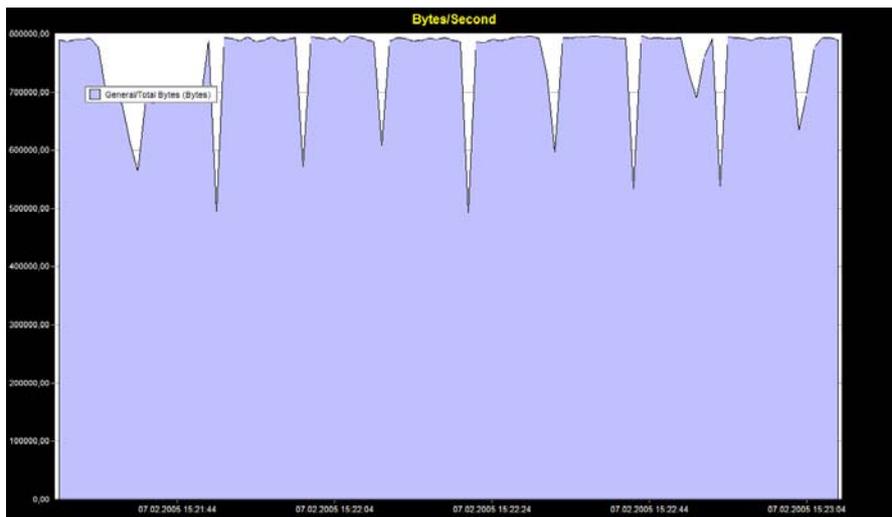


Abb. A.63 : Messkurve für 50 Meter (Prism2)

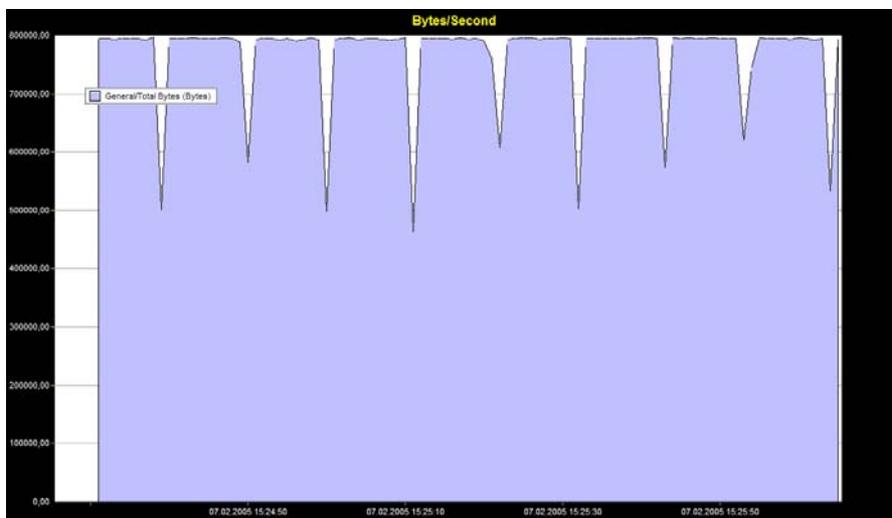


Abb. A.64 : Messkurve für 75 Meter (Prism2)

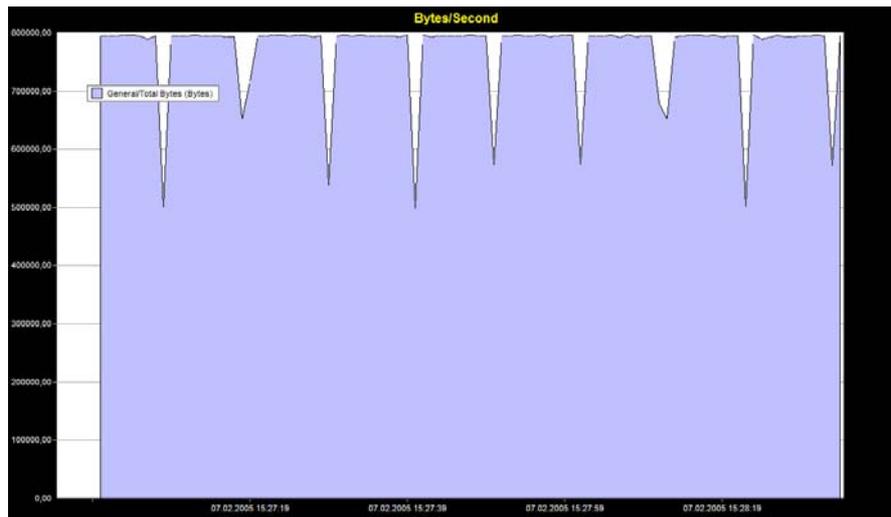
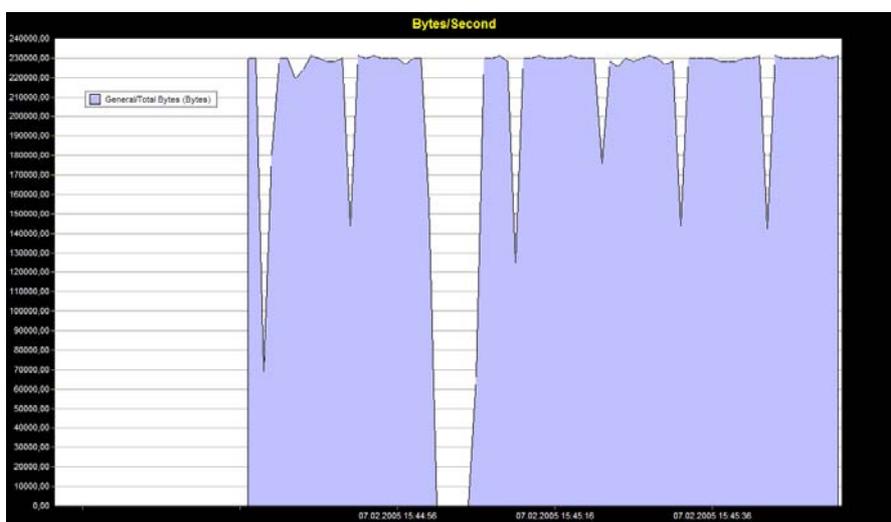
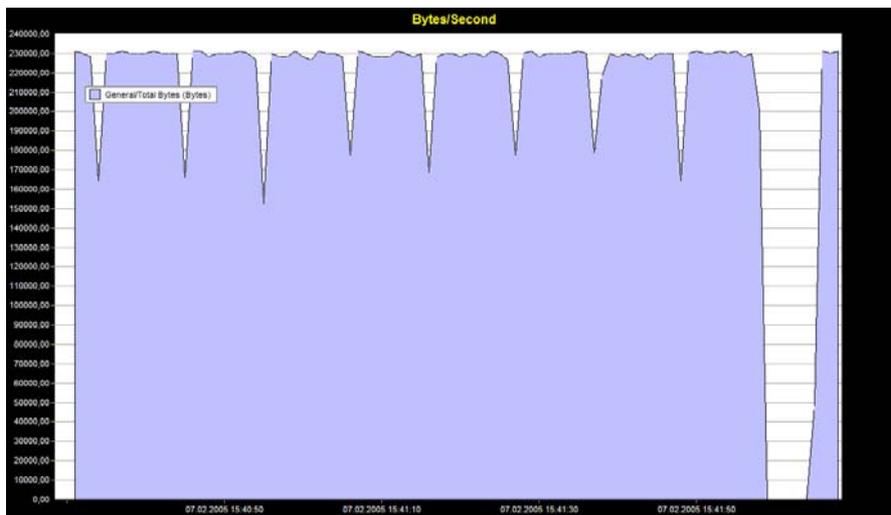
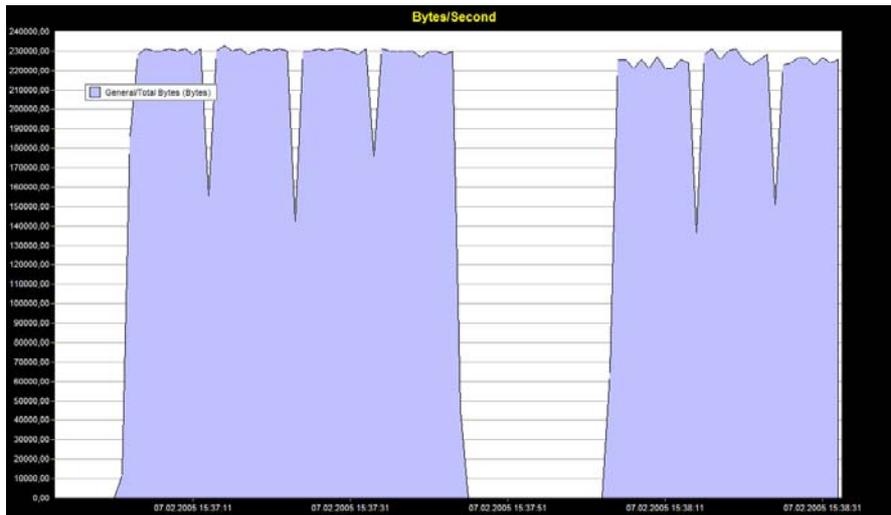


Abb. A.65 : Messkurve für 100 Meter (Prism2)

A.2.4.2 2 MBit/s



A.3 Simulationskurven der ersten Simulationsphase

Anmerkung: Der Datendurchsatz ist in der Einheit MBit/s aufgetragen

A.3.1 Terrain Parkplatz

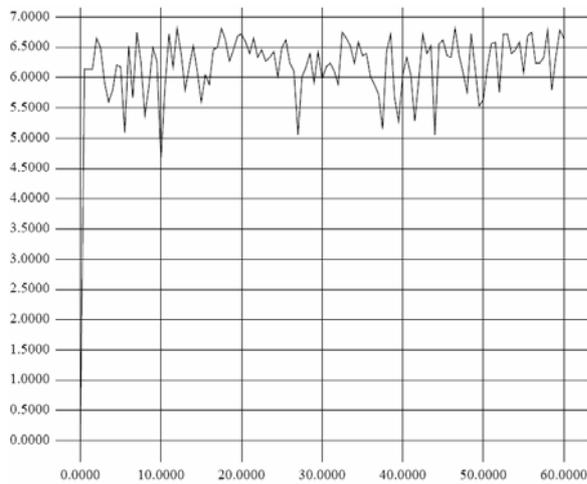


Abb. A.71 : 11 MBit, 18 Meter

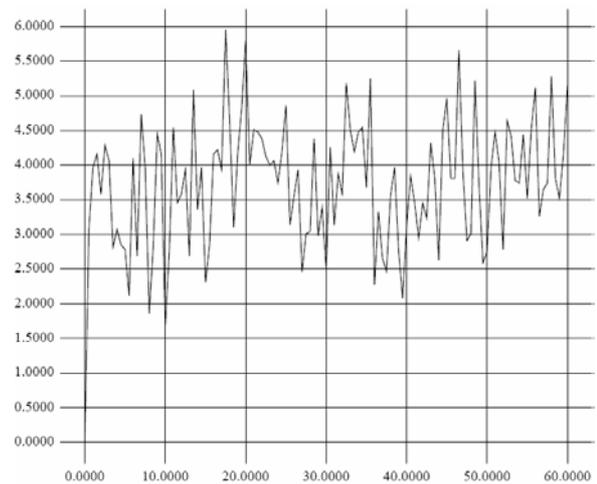


Abb. A.72 : 11 MBit, 38 Meter

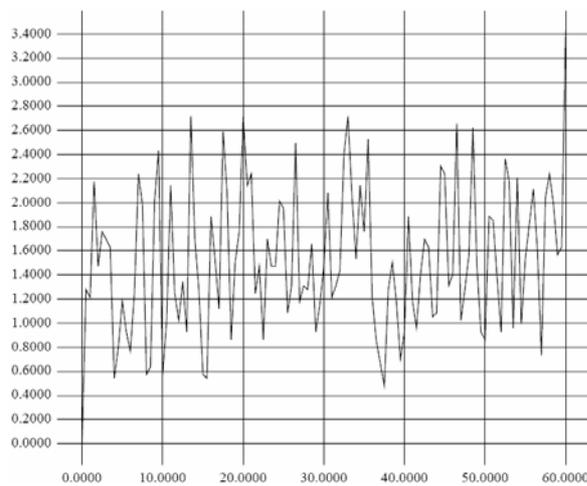


Abb. A.73 : 11 MBit, 60 Meter

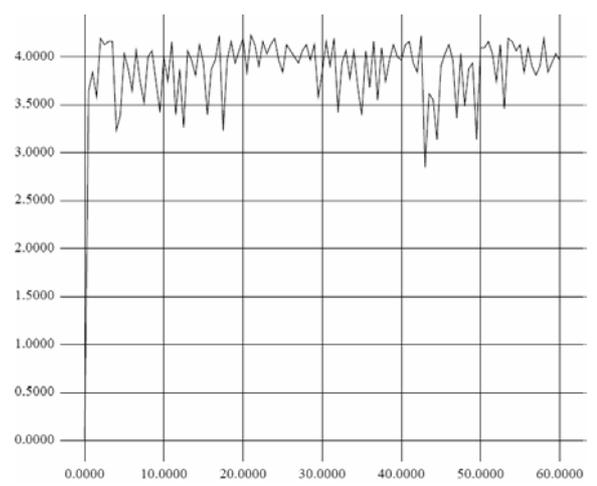


Abb. A.74 : 5.5 MBit, 18 Meter

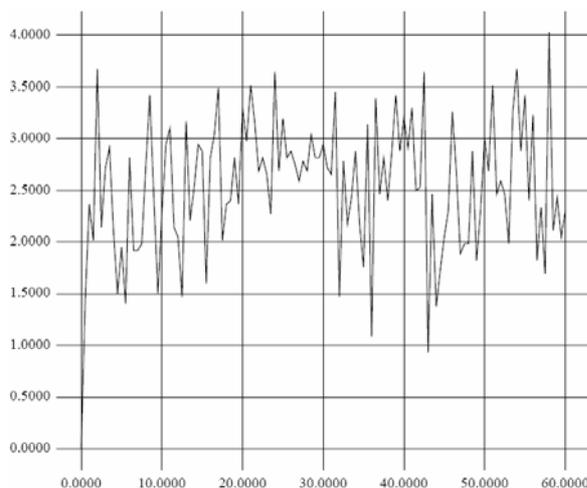


Abb. A.75 : 5.5 MBit, 40 Meter

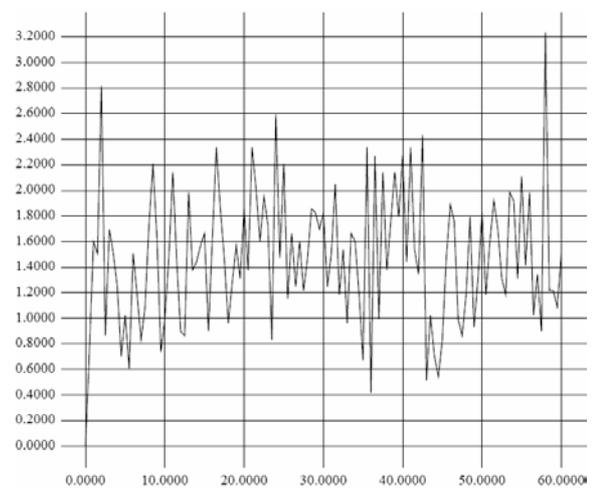
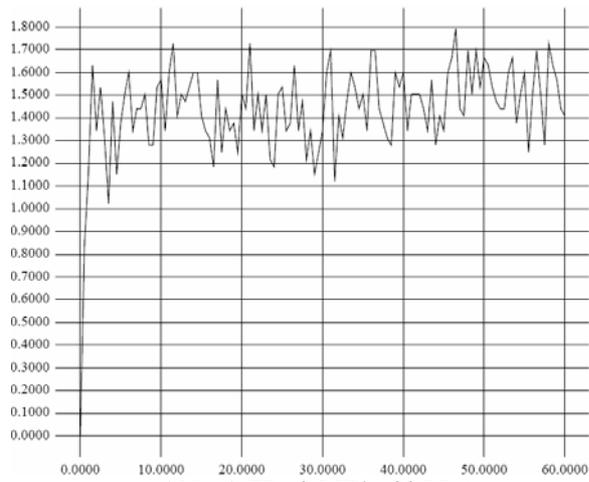
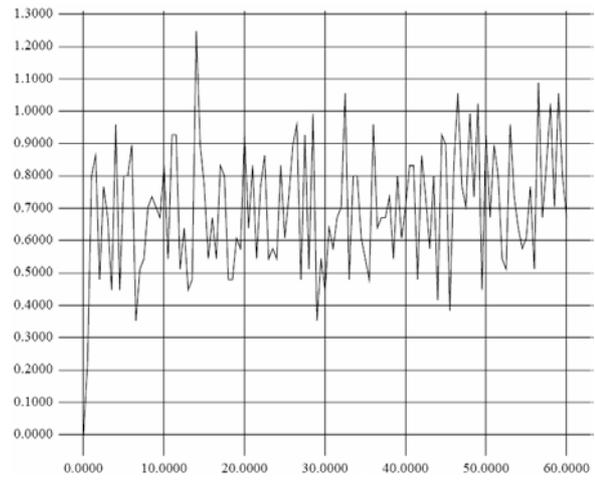
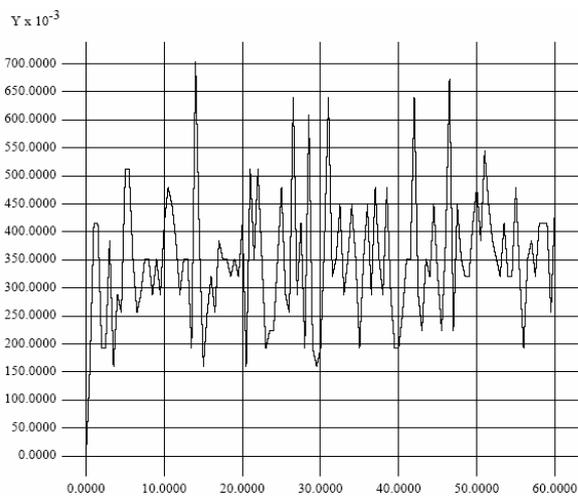
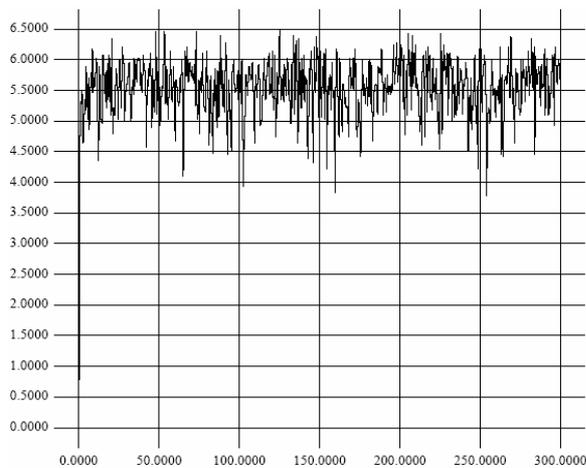
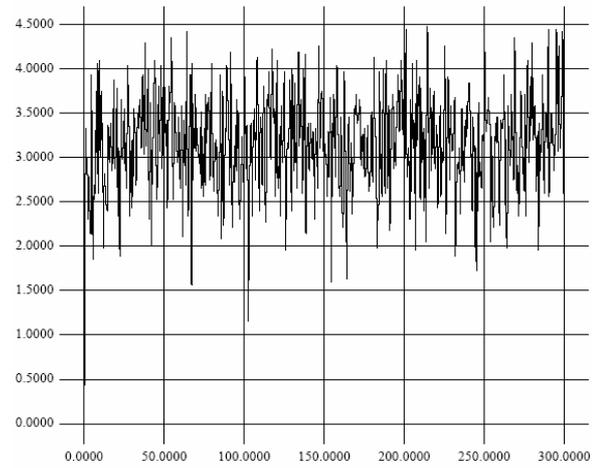
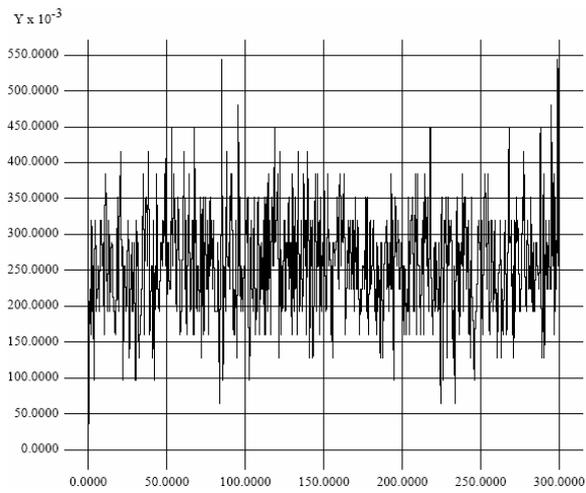
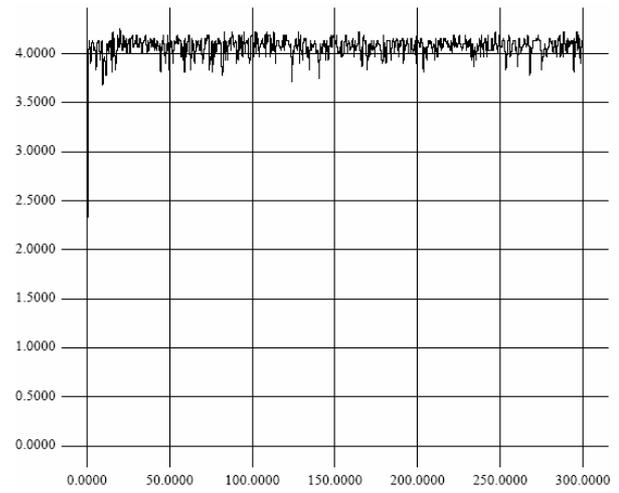
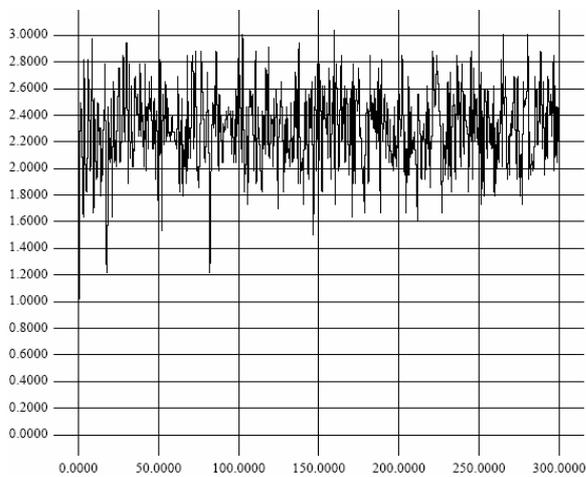
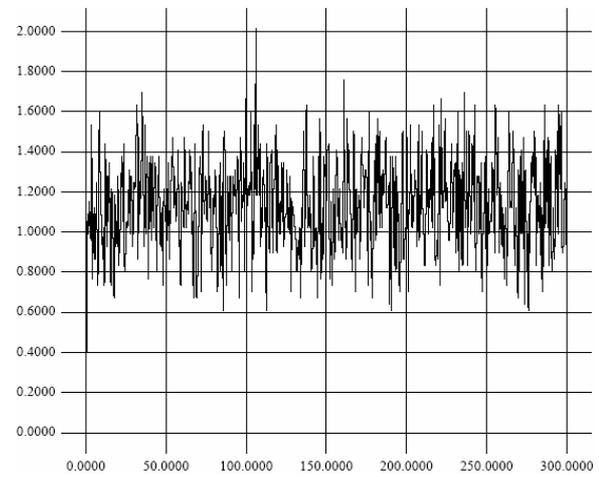
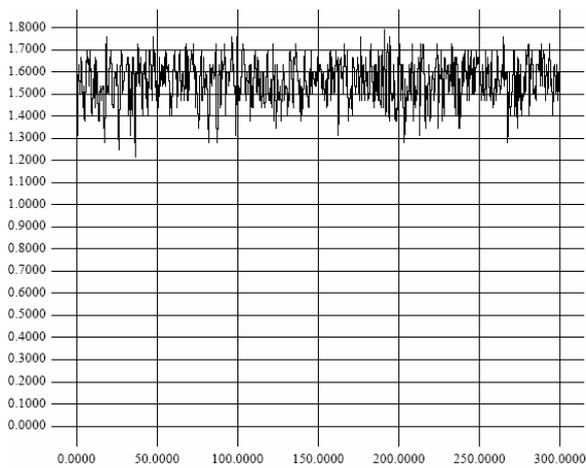
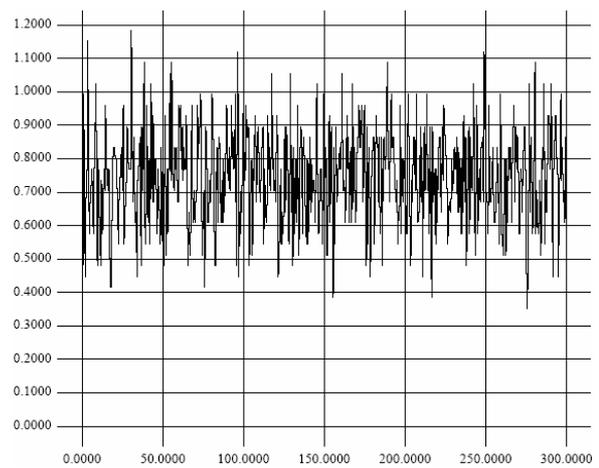


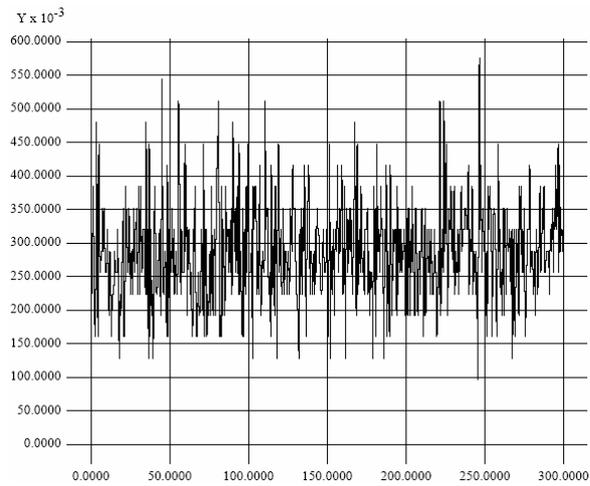
Abb. A.76 : 5.5 MBit, 58 Meter

**Abb. A.77 : 2 MBit, 32 Meter****Abb. A.78 : 2 MBit, 60 Meter****Abb. A.79 : 2 MBit, 84 Meter**

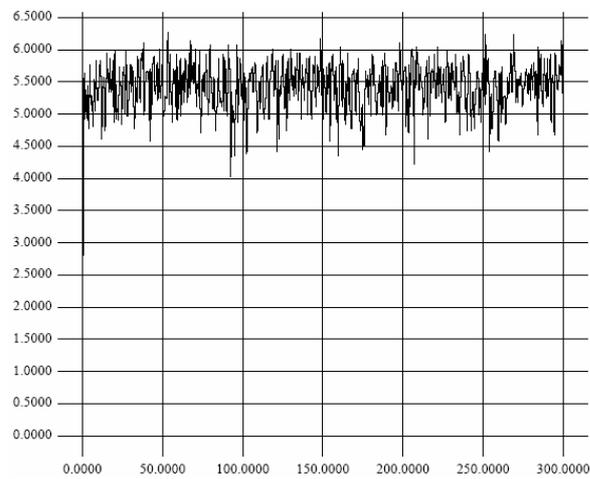
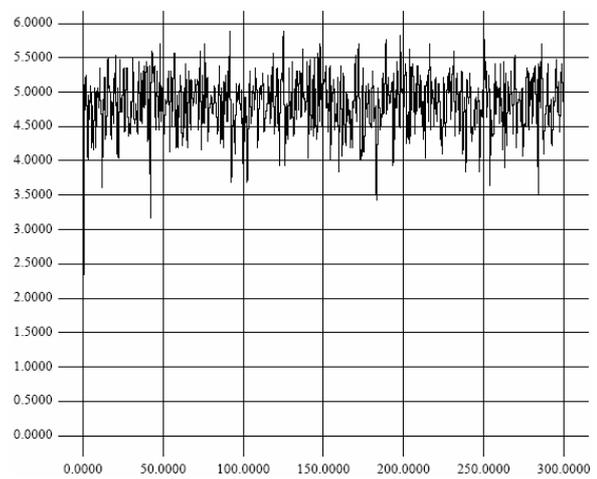
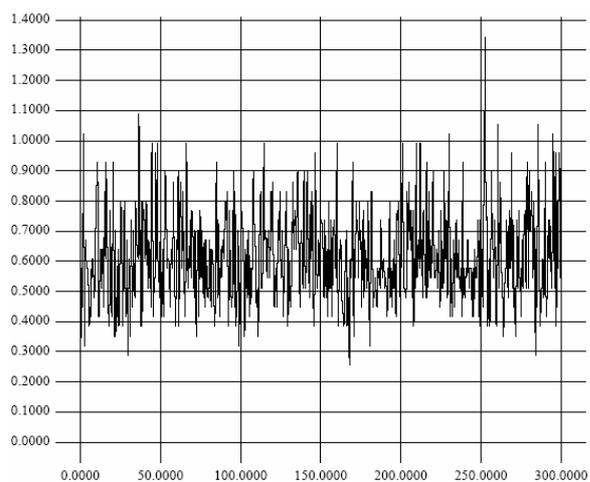
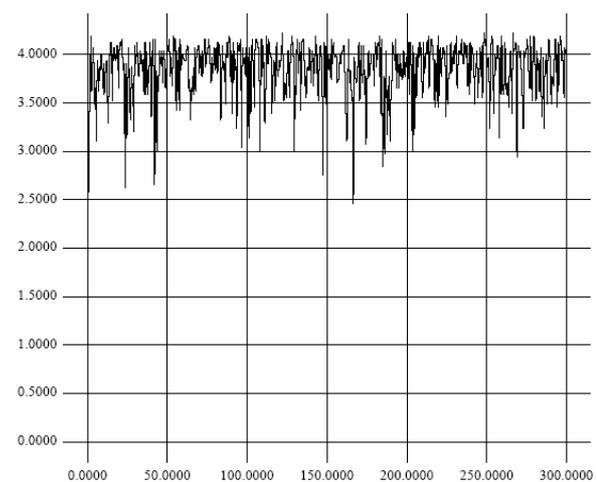
A.3.2 Terrain Wald

**Abb. A.80 : 11 MBit, 11 Meter****Abb. A.81 : 11 MBit, 15 Meter**

**Abb. A.82 : 11 MBit, 29 Meter****Abb. A.83 : 5.5 MBit, 14 Meter****Abb. A.84 : 5.5 MBit, 36 Meter****Abb. A.85 : 5.5 MBit, 52 Meter****Abb. A.86 : 2 MBit, 20 Meter****Abb. A.87 : 2 MBit, 35 Meter**

**Abb. A.88 : 2 MBit, 51 Meter**

A.3.3 Terrain Wiese

**Abb. A.89 : 11 MBit, 33 Meter****Abb. A.90 : 11 MBit, 37 Meter****Abb. A.91 : 11 MBit, 84 Meter****Abb. A.92 : 5.5 MBit, 40 Meter**

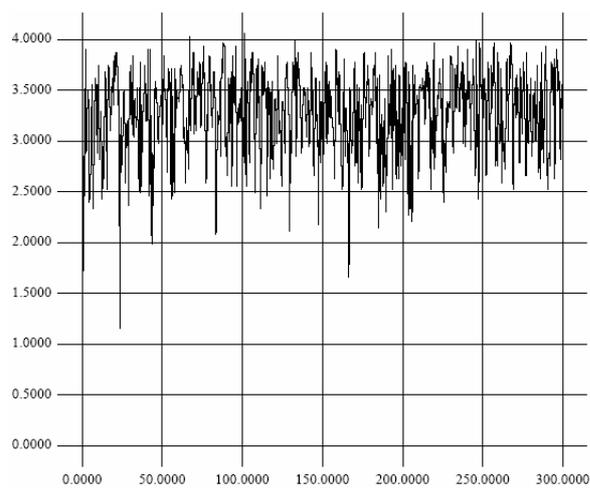


Abb. A.92 : 5.5 MBit, 60 Meter

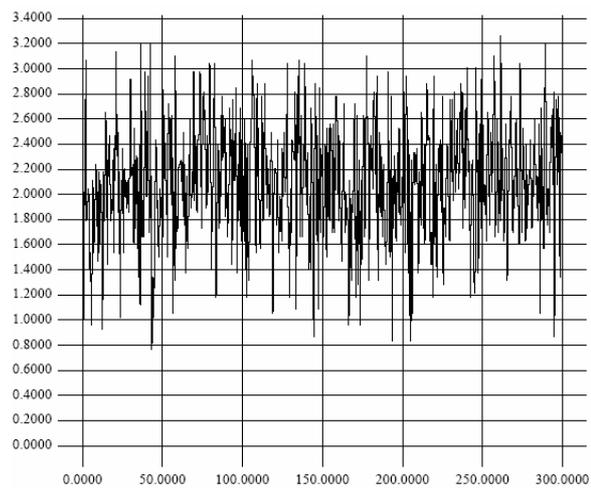


Abb. A.93 : 5.5 MBit, 95 Meter

A.4 Simulationskurven der zweiten Simulationsphase

Anmerkung: Der Datendurchsatz ist in der Einheit MBit/s aufgetragen

A.4.1 Terrain Parkplatz

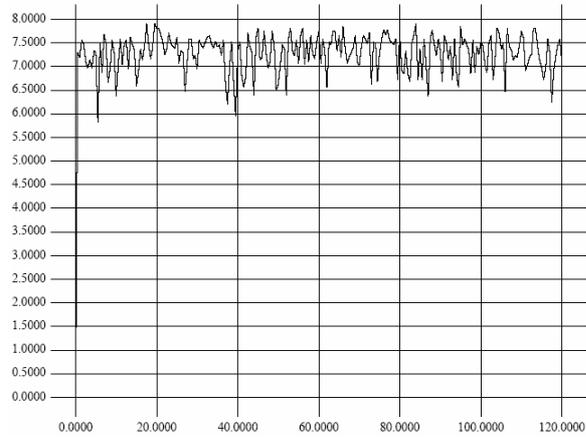


Abb. A.94 : 11 MBit, 14 Meter

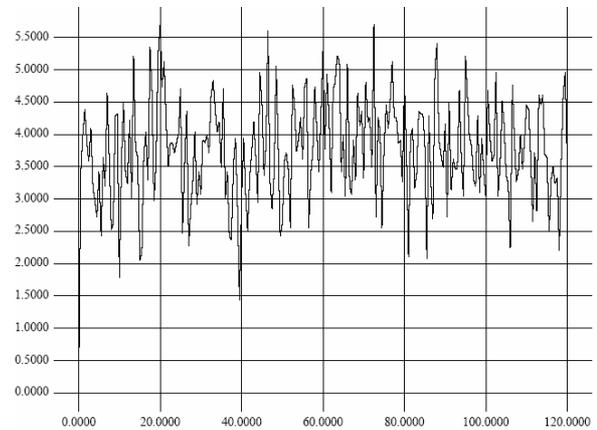


Abb. A.95 : 11 MBit, 32 Meter

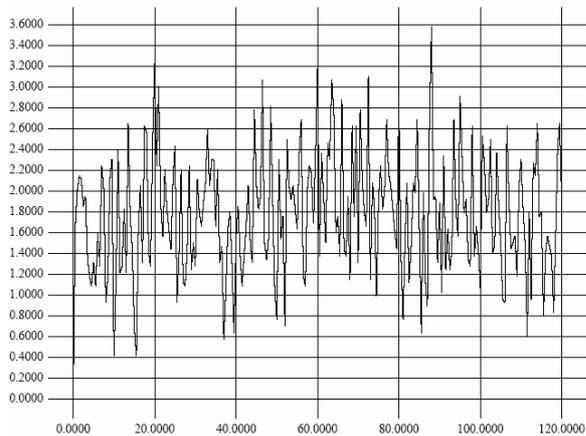


Abb. A.96 : 11 MBit, 46 Meter

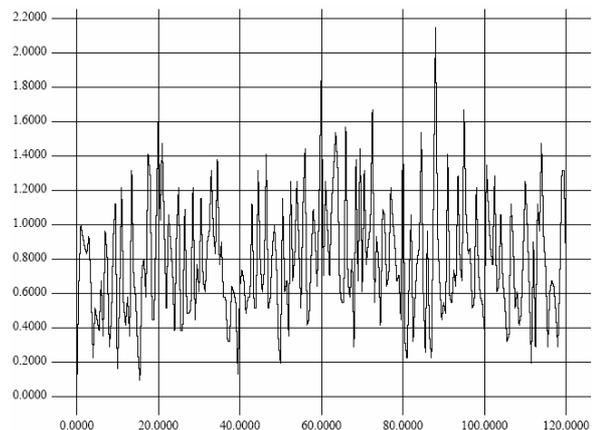


Abb. A.97 : 11 MBit, 60 Meter

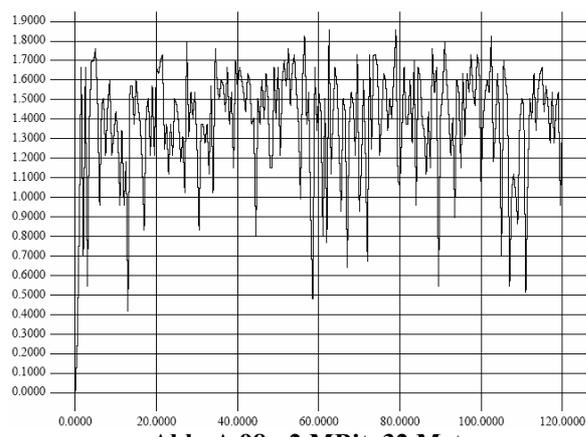


Abb. A.98 : 2 MBit, 32 Meter

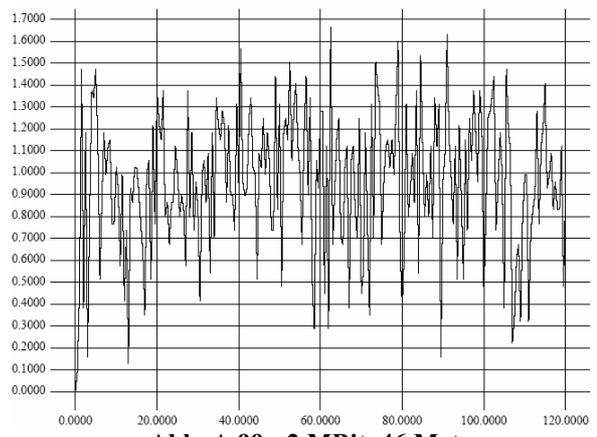
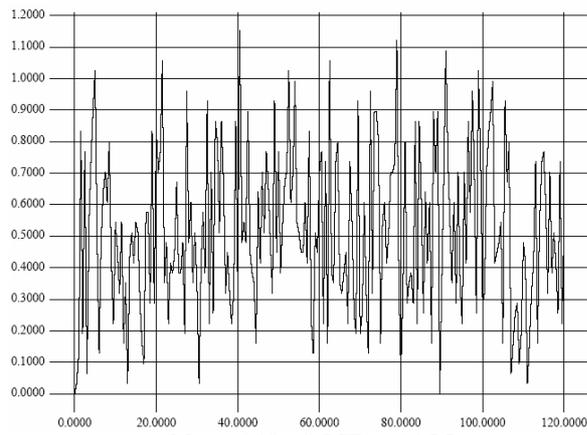
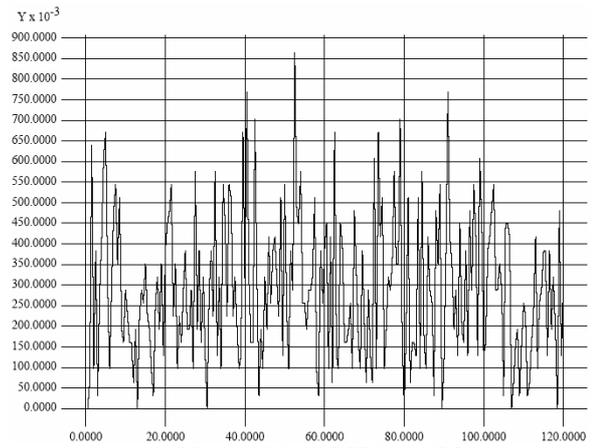
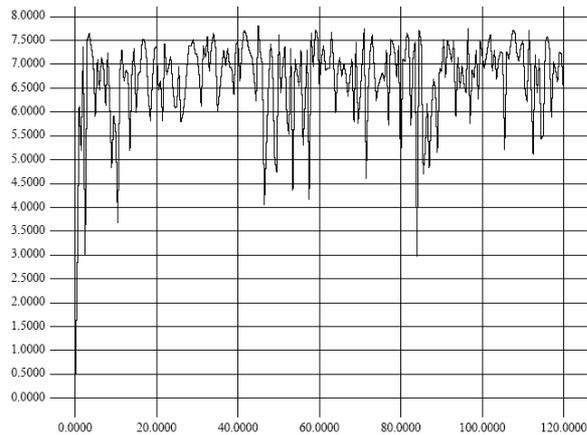
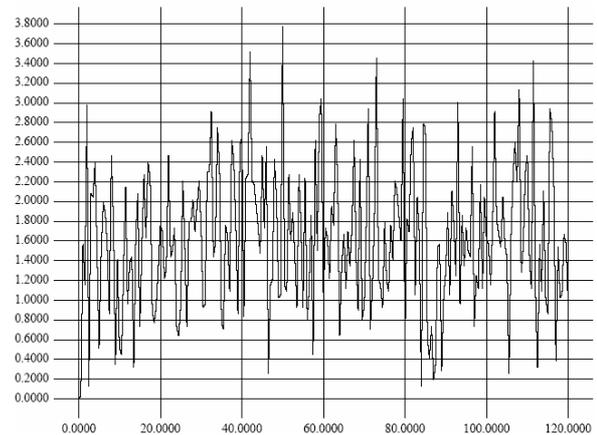
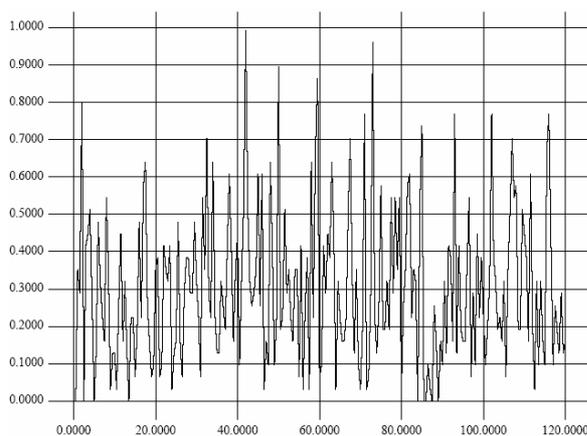
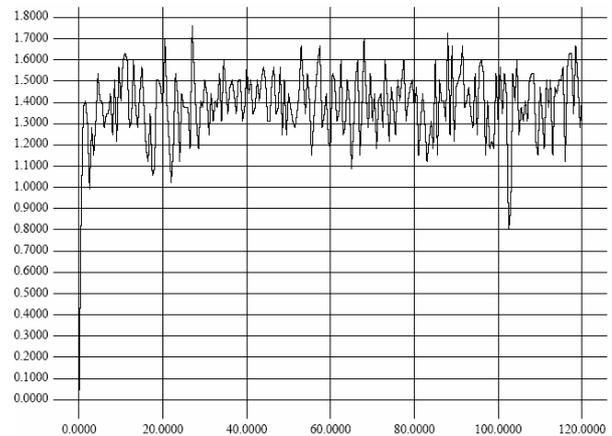
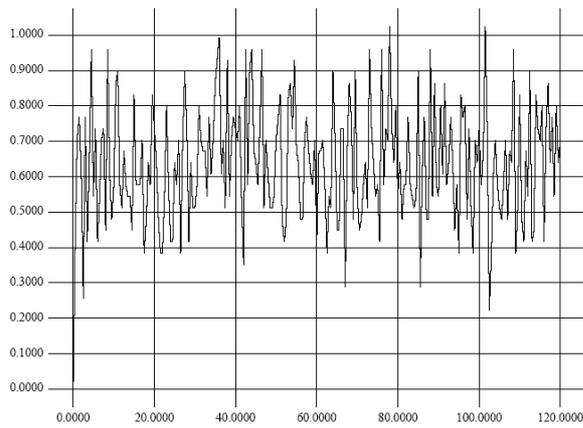
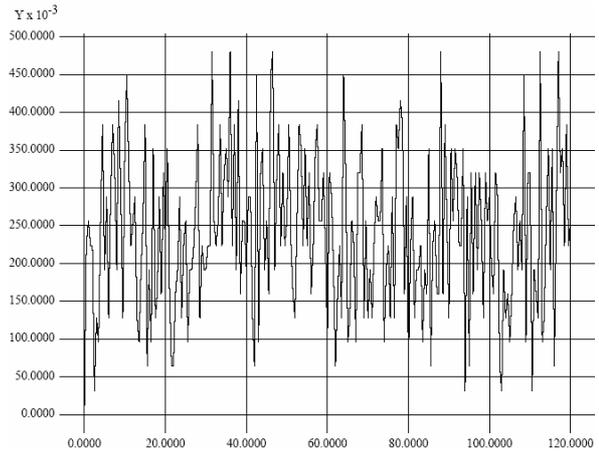


Abb. A.99 : 2 MBit, 46 Meter

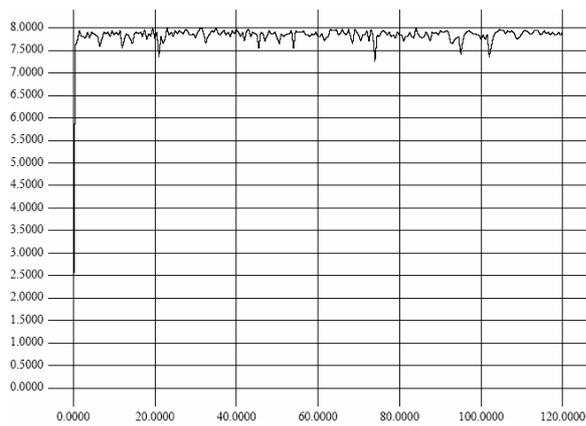
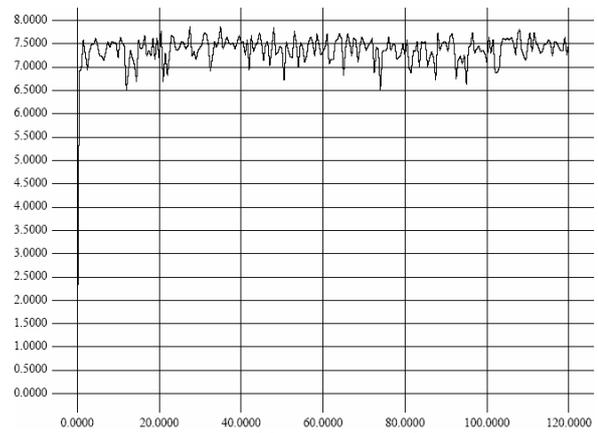
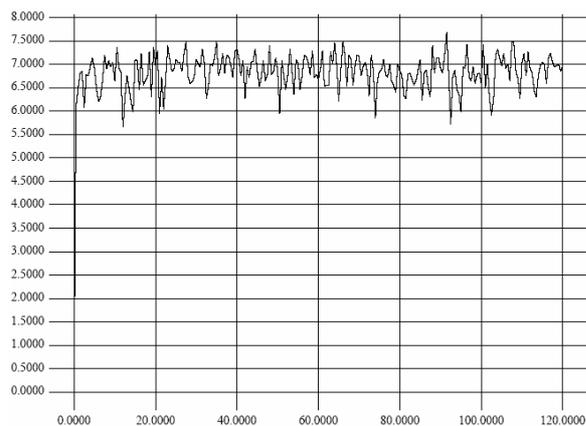
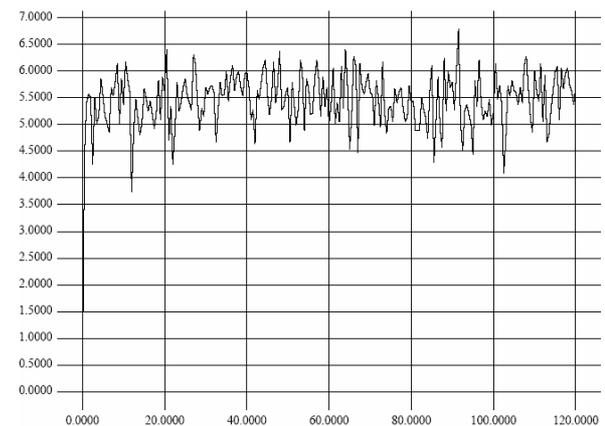
**Abb. A.100 : 2 MBit, 66 Meter****Abb. A.101 : 2 MBit, 84 Meter**

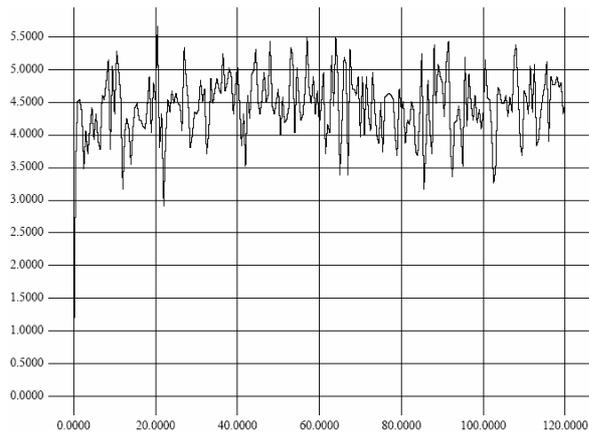
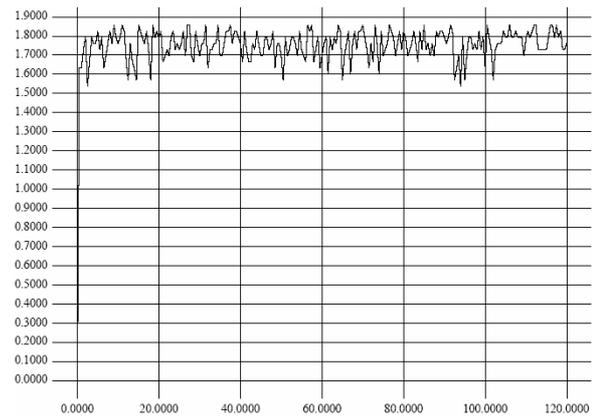
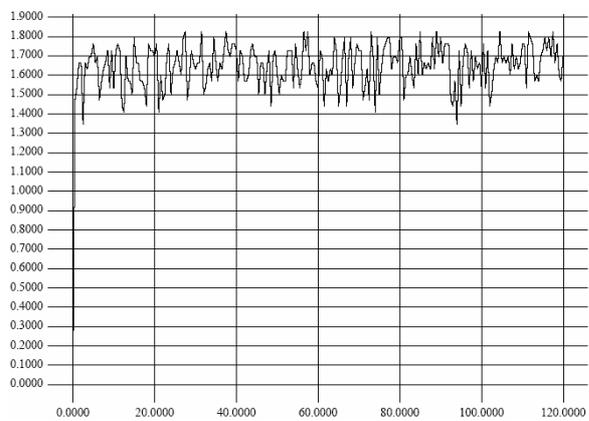
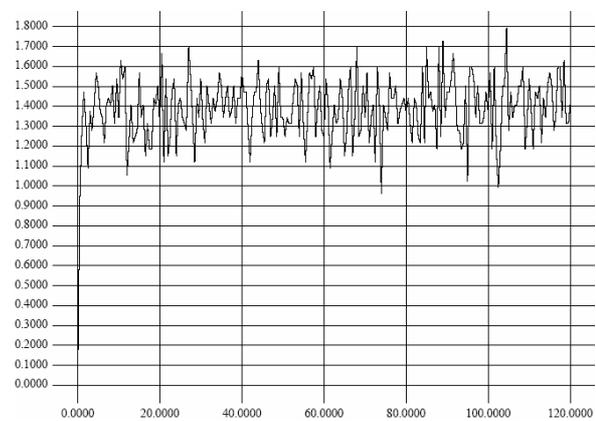
A.4.2 Terrain Unterholz

**Abb. A.102 : 11 MBit, 10 Meter****Abb. A.103 : 11 MBit, 21 Meter****Abb. A.104 : 11 MBit, 30 Meter****Abb. A.105 : 2 MBit, 20 Meter**

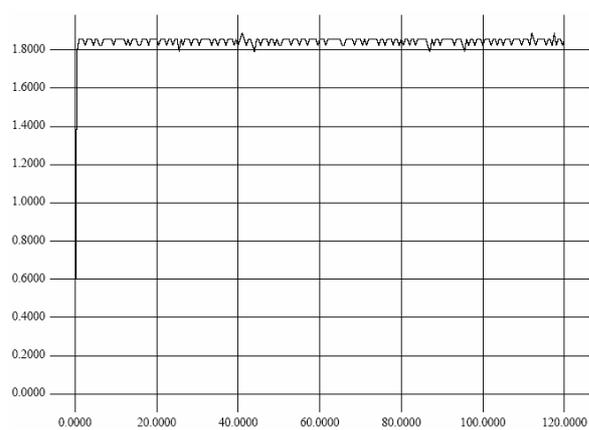
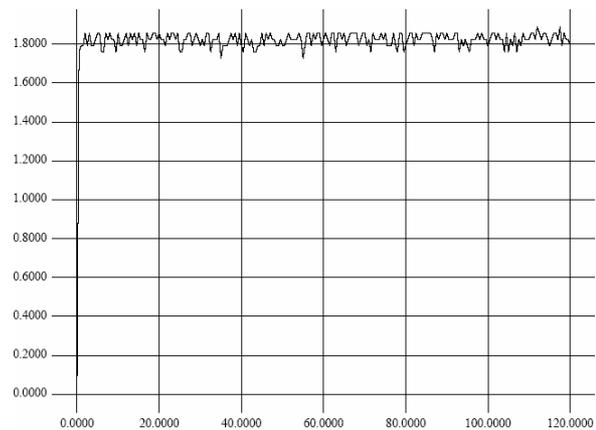
**Abb. A.106 : 2 MBit, 35 Meter****Abb. A.107 : 2 MBit, 50 Meter**

A.4.3 Terrain Wald

**Abb. A.108 : 11 MBit, 20 Meter****Abb. A.109 : 11 MBit, 35 Meter****Abb. A.110 : 11 MBit, 45 Meter****Abb. A.111 : 11 MBit, 65 Meter**

**Abb. A.112 : 11 MBit, 80 Meter****Abb. A.113 : 2 MBit, 45 Meter****Abb. A.114 : 2 MBit, 60 Meter****Abb. A.115 : 2 MBit, 90 Meter**

A.4.4 Terrain Wiese

**Abb. A.116 : 2 MBit, 50 Meter****Abb. A.117 : 2 MBit, 100 Meter**

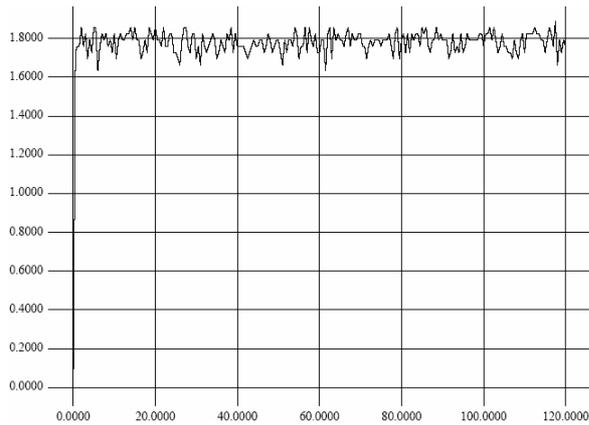


Abb. A.118 : 2 MBit, 147 Meter

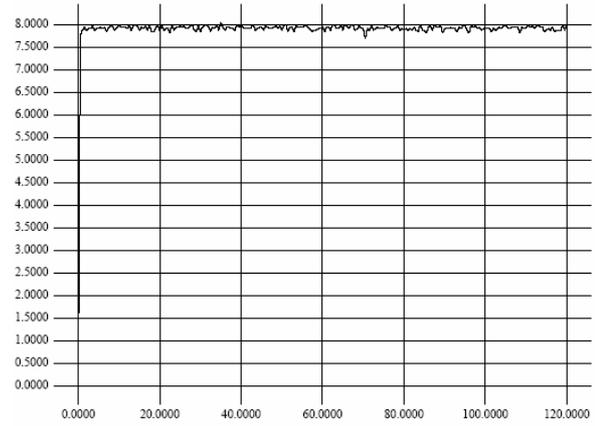


Abb. A.119 : 11 MBit, 50 Meter

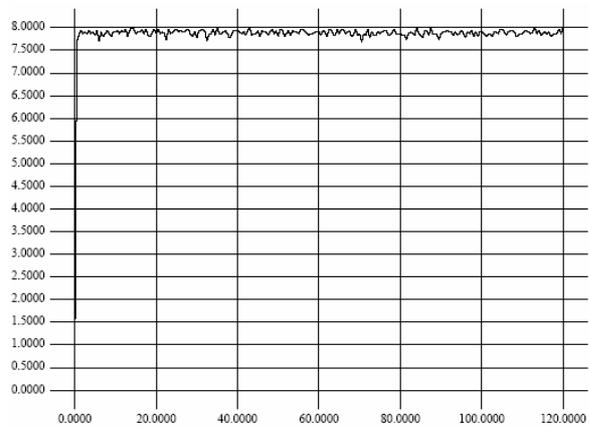


Abb. A.120 : 11 MBit, 75 Meter

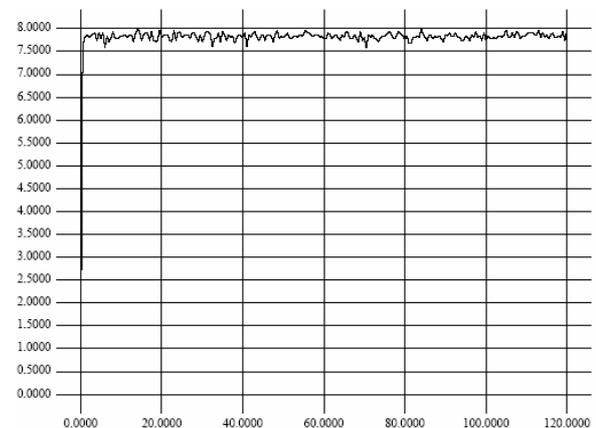


Abb. A.121 : 11 MBit, 100 Meter

Anhang B : Die für die Simulation verwendeten OTcl-Skripte

B.1 simple-wireless-common.tcl

```

=====
===
# Define options
#
=====
===
set val(chan)      Channel/WirelessChannel      ;# channel type
set val(prop)      Propagation/Shadowing/Ricean ;# radio-propagation model
set val(netif)     Phy/WirelessPhy            ;# network interface type
set val(mac)       Mac/802_11                ;# MAC type
set val(ifq)       Queue/DropTail/PriQueue    ;# interface queue type
set val(ll)        LL                        ;# link layer type
set val(ant)       Antenna/OmniAntenna       ;# antenna model
set val(ifqlen)    50                       ;# max packet in ifq
set val(nn)        2                         ;# number of mobilenodes
set val(rp)        DumbAgent                 ;# routing protocol

proc record {} {
    global sinks f1 f2 f3
    #Get an instance of the simulator
    set ns [Simulator instance]
    #Set the time after which the procedure should be called again
    set time 0.5
    #How many bytes have been received by the traffic sinks?
    set bw1 [$sinks(1) set bytes_]

    #Get the current time
    set now [$ns now]
    #Calculate the bandwidth (in MBit/s) and write it to the files
    puts $f1 "$now [expr $bw1/$time*8/1000000]"

    set lo1 [$sinks(1) set nlost_]
    puts $f3 "$now $lo1"

    #Reset the bytes_ values on the traffic sinks
    set rc1 [$sinks(1) set bytes_]
    puts $f2 "$now $rc1"

    $sinks(1) set bytes_ 0
    $sinks(1) set nlost_ 0

    #Re-schedule the procedure
    $ns at [expr $now+$time] "record"
}

```

```
proc finish {} {
    global f1 f2 f3

    #Close the output files
    close $f1
    close $f2
    close $f3

    #Call xgraph to display the results
    #exec xgraph out1.tr out2.tr -geometry 800x400
    exit 0
}

proc setAt {param} {

}

#
=====
===
# Main Program
#
=====
===
Simulator set MacTrace_ ON

#
# Initialize Global Variables
#
set ns_      [new Simulator]
set tracefd  [open simple.tr w]
set f1       [open $file_prefix.throughput.tr w]
set f2       [open $file_prefix.rcvd_bytes.tr w]
set f3       [open $file_prefix.lost_bytes.tr w]

$ns_ trace-all $tracefd

#set nf [open out.nam w]
#$ns_ namtrace-all $nf

# set up topography object
set topo    [new Topography]

$topo load_flatgrid 500 500
```

```
Mac/802_11 set dataRate_ $bandwidth
Mac/802_11 set basicRate_ $bandwidth

Phy/WirelessPhy set bandwidth_ $bandwidth

# Works for ns 2.27
Mac/802_11 set RTSThreshold_ 5000

# Works for midofied ns 2.1b9a
#Mac/802_11 RTSThreshold_ 5000

# Short
Mac/802_11 set PreambleLength_ $preamblesize

# first set values of shadowing model
Propagation/Shadowing/Ricean set pathlossExp_ 2 ;# path loss exponent
Propagation/Shadowing/Ricean set std_db_ 7 ;# shadowing deviation (dB)
Propagation/Shadowing/Ricean set dist0_ 1.0 ;# reference distance (m)
Propagation/Shadowing/Ricean set seed_ 0 ;# seed for RNG

#
# Create God
#
create-god $val(nn)

#
# Create the specified number of mobilenodes [$val(nn)] and "attach" them
# to the channel.
# Here two nodes are created : node(0) and node(1)

# configure node

    $ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
        -llType $val(ll) \
            -macType $val(mac) \
            -ifqType $val(ifq) \
            -ifqLen $val(ifqlen) \
            -antType $val(ant) \
            -propType $val(prop) \
            -phyType $val(netif) \
            -channelType $val(chan) \
            -topoInstance $topo \
            -agentTrace ON \
            -routerTrace ON \
```

```
-macTrace ON \
-movementTrace OFF

set prop_inst [$ns_ set propInstance_]
$prop_inst MaxVelocity $ric_vel;
$prop_inst RiceanK $ric_k;
$prop_inst LoadRiceFile $ric_txt;

for {set i 0} {$i < $val(mn) } {incr i} {
    set node_($i) [$ns_ node]
    $node_($i) random-motion 0      ;# disable random motion
}

#
# Provide initial (X,Y, for now Z=0) co-ordinates for mobilenodes
#
$node_(0) set X_ $pos_x(0)
$node_(0) set Y_ $pos_y(0)
$node_(0) set Z_ $pos_z(0)

$node_(1) set X_ $pos_x(1)
$node_(1) set Y_ $pos_y(1)
$node_(1) set Z_ $pos_z(1)

# $ns_ node-config -propType Propagation/Shadowing

#
# Now produce some simple node movements
# Node_(1) starts to move towards node_(0)
#
#$ns_ at 50.0 "$node_(1) setdest 25.0 20.0 15.0"
#$ns_ at 10.0 "$node_(0) setdest 20.0 18.0 1.0"

# Node_(1) then starts to move away from node_(0)
#$ns_ at 100.0 "$node_(1) setdest 490.0 480.0 15.0"

# Setup traffic flow between nodes
# TCP connections between node_(0) and node_(1)

set cbr1 [new Application/Traffic/CBR]
```

```
$cbr1 set packetSize_ $cbr_size
$cbr1 set rate_ $cbr_rate #(11 MBit)
$cbr1 set random_ 1

set tcp1 [new Agent/UDP]
$tcp1 set packetSize_ $udp_size
$tcp1 set class_ 2
$tcp1 set dst_addr_ -1

#set sink1 [new Agent/LossMonitor]

$ns_ attach-agent $node_(0) $tcp1
#$ns_ attach-agent $node_(1) $sink1

#$ns_ connect $tcp1 $sink1

$cbr1 attach-agent $tcp1

# Create udp sinks and set default targets
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    set sinks($i) [new Agent/LossMonitor]
    $ns_ attach-agent $node_($i) $sinks($i)

    # recv all packets coming in
    set p [$node_($i) set dmux_]
    $p defaulttarget $sinks($i)
}

$ns_ at 0.0 "record"
$ns_ at 0.01 "$cbr1 start"

#
# Tell nodes when the simulation ends
#
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ at $send_time.0 "$node_($i) reset";
}
$ns_ at $send_time.00 "stop"
$ns_ at $send_time.01 "finish"
$ns_ at $send_time.02 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"

proc stop {} {
    global ns_ tracefd
    $ns_ flush-trace
    close $tracefd
}
```

```
puts "Starting Simulation..."
$ns_run
```

B.2 Beispiel für ein szenariospezifisches Skript

Dieses Skript namens „2MBit-unterh-35m.tcl“ kommt bei der Simulation der Datenübertragung über eine Entfernung von 35 Metern im Terrain Unterholz mit einer Bitrate von 2 MBit/s zum Einsatz. Skripte für andere Szenarien sind analog aufgebaut.

```
set bandwidth 2e6
set preamble_size 144
set cbr_size 2000
set cbr_rate 2000000
set udp_size 65535

set end_time 120
set file_prefix 2MBit-unterh-35m

set pos_x(0) 10.0
set pos_y(0) 10.0
set pos_z(0) 0.0

set pos_x(1) 45.0
set pos_y(1) 10.0
set pos_z(1) 0.0

set ric_txt rice_table.txt
set ric_vel 2
set ric_k 0.8

source simple-wireless-common.tcl
```

Anhang C : Ausgefüllte Templates für die Experimente

C.1 Template der ersten Serie von Messungen (Experiment 01)

C.1.1 Allgemeines

Das erste Experiment „Zwei stationäre Knoten“ mit der ID-Nummer 01 befasst sich mit der Frage, wie sich unterschiedliche Terrains, Entfernungen und Bitraten auf die Übertragungsqualität und Sendereichweite von zwei WLAN-Knoten auswirken. Hierzu soll der Durchsatz gemessen werden.

C.1.2 Exakte Beschreibung

C.1.2.1 Aufbau

- Verwendete Hardware:
Zwei mit Netgear-WLAN-Karten (PCMCIA) ausgerüstete Dell-Notebooks (Rechner mit Nummern RNB01 und RNB02 der AG Vernetzte Systeme)

- Verwendete Software:
 - Software Packetsim generiert benötigten Traffic
 - Übertragungsrate als Parameter einstellbar.
 - Protokoll für Übertragung: UDP
 - 3 verschiedene Scripte zur Generierung von Traffic mit 2, 5.5 bzw. 11 MBit/s

- Geplante Durchführungsorte
 - Drei verschiedene Orte:
 - Wiese
 - Parkplatz
 - Waldstück (mit Bäumen zwischen den Knoten → keine (ideale) LOS)
 - Auf Wiese wird von freiem Sichtfeld ausgegangen
 - An anderen beiden Orten LOS nicht gegeben (Bäume, parkende Fahrzeuge)

C1..2.2 Anzahl Personen

Das Experiment wird durchgeführt von:

- Michael Bender (Projektarbeiter)

C.1.2.3 Ablauf

- Beide Knoten in diesem Experiment stets stationär (keine Bewegung)
- Datendurchsatz während der Messung ablesen und in Logfile speichern

C.1.2.4 Dauer des Experiments und Anzahl Wiederholungen

- In jedem Terrain Messungen für drei unterschiedliche Übertragungsraten (2, 5.5 und 11 MBit/s)
- Für alle Terrains und Übertragungsraten Entfernung zwischen beiden Knoten variieren
 - Hierzu drei verschiedene Abstände verwenden (während der Durchführung festzulegen)
 - Abstand 1: ca. 90% des Durchsatzes zweier direkt benachbarter Knoten

- Abstand 2: ca. 50%
- Abstand 3: ca. 10%
- Client bleibt hierbei stets stationär
- Position von Server wird variiert
- Für jede Kombination aus Terrain, Übertragungsrate und Entfernung drei Messläufe vorgesehen
- Dauer eines Messlaufes: 5 Minuten
- Jede einzelne Messung sowohl mit UDP als auch direkt auf MAC-Ebene durchführen
- Gesamtzahl der Messläufe: $3 \times 4 \times 3 \times 2 = 72$

C.1.2.5 Checkliste

Messung Terrain Wiese:

11 MBit/s	UDP	Abstand 1	1. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	UDP	Abstand 1	2. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	UDP	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	UDP	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	UDP	Abstand 2	1. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	UDP	Abstand 2	2. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	UDP	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	UDP	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	UDP	Abstand 3	1. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	UDP	Abstand 3	2. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	UDP	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	UDP	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 1	1. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 1	2. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	UDP	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 2	1. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 2	2. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	UDP	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	1. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	2. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	UDP	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen

Gewählte Abstände Terrain Wiese (Abstand 1/ Abstand 2/ Abstand 3):

	11 MBit/s	5.5 MBit/s	2 MBit/s	1 MBit/s
UDP	33m / 37m / 84m	40m / 60m / 95m	gestrichen	gestrichen
MAC	gestrichen	gestrichen	gestrichen	gestrichen

Messung Terrain Parkplatz:

11 MBit/s	UDP	Abstand 1	1. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 1	1. Lauf	ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 1	2. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 1	2. Lauf	ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	UDP	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	UDP	Abstand 2	1. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 2	1. Lauf	ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 2	2. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 2	2. Lauf	ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	UDP	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	UDP	Abstand 3	1. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 3	1. Lauf	ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 3	2. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 3	2. Lauf	ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	UDP	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 1	1. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 1	2. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	UDP	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 2	1. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 2	2. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	UDP	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	1. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	2. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	UDP	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen

Gewählte Abstände Terrain Parkplatz (Abstand 1/ Abstand 2/ Abstand 3):

	11 MBit/s	5.5 MBit/s	2 MBit/s	1 MBit/s
UDP	18m / 38m / 60m	18m / 40m / 58m	32m / 60m / 84m	gestrichen
MAC	gestrichen	gestrichen	gestrichen	gestrichen

Messung Terrain Wald:

11 MBit/s	UDP	Abstand 1	1. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 1	1. Lauf	ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 1	2. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 1	2. Lauf	ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	UDP	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	UDP	Abstand 2	1. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 2	1. Lauf	ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 2	2. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 2	2. Lauf	ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	UDP	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	UDP	Abstand 3	1. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 3	1. Lauf	ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 3	2. Lauf	Ok	2 MBit/s	UDP	Abstand 3	2. Lauf	ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	UDP	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen

11 MBit/s	MAC	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen
11 MBit/s	MAC	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen	2 MBit/s	MAC	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 1	1. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 1	2. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	UDP	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 2	1. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 2	2. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	UDP	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	1. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	2. Lauf	Ok	1 MBit/s	UDP	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	UDP	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 1	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 1	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 1	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 2	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 2	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 2	3. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 3	1. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 3	2. Lauf	gestrichen
5.5 MBit/s	MAC	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen	1 MBit/s	MAC	Abstand 3	3. Lauf	gestrichen

Gewählte Abstände Terrain Wald (Abstand 1/ Abstand 2/ Abstand 3):

	11 MBit/s	5.5 MBit/s	2 MBit/s	1 MBit/s
UDP	11m / 15m / 29m	14m / 36m / 52m	20m / 35m / 51m	gestrichen
MAC	gestrichen	gestrichen	gestrichen	gestrichen

Messungen mit 1 MBit/s und auf MAC-Ebene wurden aus Zeitgründen gestrichen.

C.1.2.6 Mögliche äußere Einflüsse und Fehlerquellen

- Auf Wiese keinen größeren Beeinträchtigungen der Signalübertragung zu erwarten (keine stationären Hindernisse)
- Kleinere Störungen wie vorbei fliegende Vögel denkbar
- Auf Parkplatz mit mehreren geparkten / an- und abfahrenden Fahrzeugen zu rechnen
- Somit auch mit ein- und aussteigenden Personen
- Im Wald Beeinflussung durch terrainbedingte Hindernisse (Baumstämme, Zweige, fallende Blätter)
- Wetterverhältnisse: mit kalten Temperaturen, Feuchtigkeit, Nebel oder Schneefall zu rechnen

C.1.3 Durchführung

Es wird der Verlauf der Experimentdurchführung beschrieben, insbesondere die dabei aufgetretenen Fehler und Probleme.

C.1.3.1 Ort & Zeit

- 20.12.2004 (Tag 1)
 - Beginn 11.00 Uhr
 - Waldstück nahe der TU Kaiserslautern
 - Messungen für 11 und 5 MBit/s (Terrain Wald)
- 21.12.2004 (Tag 2)
 - Beginn 11.30 Uhr
 - anderes Waldstück als an Tag 1
 - Messungen für 2 MBit/s (Terrain Wald)

- 7.1.2005 (Tag 3)
 - Beginn 13.30 Uhr
 - Rasenstück hinter Gebäude 48 (Client bei Grillplatz positioniert)
 - Messungen für 11 und 5 MBit/s (Terrain Wiese)
- 10.1.2005 (Tag 4)
 - Beginn 11.30
 - Großer Parkplatz hinter Gebäude 48
 - Messungen für 11, 5 und 2 MBit/s (Terrain Parkplatz)

C.1.3.2 Dauer

- Tag 1: bis 15.30 Uhr
- Tag 2: bis 13.30 Uhr
- Tag 3: bis 16.45 Uhr (dazwischen Unterbrechung wegen Systemabstürzen)
- Tag 4: bis 13.00 Uhr, Dauer eines Laufes auf eine Minute reduziert (Zeitgründe)

C.1.3.3 Wetterverhältnisse

- An Tag 1 und 2 kalte Temperaturen (0 Grad) und klarer Himmel
- Tag 3: Temperatur ca. 8 Grad, wolkiger Himmel, trocken
- Tag 4: Milde Temperatur (ca. 10 Grad), klarer Himmel, trocken

C.1.3.4 Äußere Einflüsse und Fehlerquellen

- Den Weg versperrende Bäume und dichtes Unterholz erschweren Fortbewegung mit Notebook (Tag 1 und 2)
- An Tag 2 anderes Waldstück als Durchführungsort verwendet
 - Anzahl von Bäumen und Dichte von Unterholz hier höher als in Waldstück von Tag 1
 - Daher verwendete Abstände trotz niedrigerer Übertragungsrate (2 MBit/s) nicht größer als bei 5.5 MBit/s
 - Bei maximaler Entfernung Anheben des Servers erforderlich, auf Bodenniveau waren fast keine Pakete mehr zu empfangen
 - Eventueller weiterer Grund: Antenne von Client an Tag 2 dem Server abgewandt (im Gegensatz zu Tag 1)
- Angegebene Entfernungen möglicherweise ungenau, wurden lediglich abgeschätzt (eine Schrittlänge entsprach einem Meter)
- Tag 3:
 - Verwendetes Terrain leicht uneben => keine LOS, wenn Notebooks auf Bodenniveau
 - Daher Client erhöht positioniert (Sitz bei Grillplatz) und Server bei Messläufen in der Hand behalten
 - Viadukt (Gottlieb-Daimler-Str.) musste bei größeren Entfernungen passiert werden => möglicher Störfaktor wegen Reflexionen
 - Bei Entfernung von 92m leichte Störung der LOS durch Schilfgras
 - Messungen für 2 MBit/s noch nicht durchgeführt, da auf Universitätsgelände kein passendes Terrain (200m LOS) vorhanden
- Tag 4:
 - Parkplatz voll besetzt => zahlreiche PKWs behindern Sichtlinie
 - Hierdurch auch Einschränkung der möglichen Positionen für Server

- Position des Servers zu den Fahrzeugen unterschiedlich (in einigen Fällen Fahrzeug direkt vor Server positioniert, in anderen nicht)
- Entfernungen hier mit Hilfe von Parkplatzmarkierungen gut abschätzbar
- Sporadisch ankommende und abfahrende Fahrzeuge

C.1.3.5. Probleme mit Software / Hardware

- Ständige Verbindungsausfälle der Netgear-Karten großes Problem an Tag 1
 - Nach Ausfall stets Neustart von Software auf Client erforderlich
 - Während eines fünfminütigen Messlaufes durchschnittlich 2-3 Ausfälle
 - Da Experiment von einzelner Person durchgeführt wurde, ständiges Pendeln zwischen Server und Client zwecks Neustart bei Ausfällen erforderlich
 - Messläufe über größere Server-Client-Distanz daher nur unter erschwerten Bedingungen durchführbar
 - Verbindungsausfall auf Seite des Clients nur durch Blinkfrequenz der Leuchten an den Karten zu erkennen, da bei Client keine Anzeige des Datendurchsatzes
 - Lösung dieses Problems (erst nach Durchführung entdeckt): Pingprozess zwischen Server und Client im Hintergrund laufen lassen, daraufhin keine Ausfälle mehr
 - Messläufe an Tag 2 frei von diesem Problem
- An Tag 3 Unterbrechung der Experimentdurchführung wegen mehreren Systemabstürzen des Clients beim Starten des Skripts für 5.5 MBit/s
- An Tag 4 Systemabsturz des Servers beim Starten des Skripts für 5.5 MBit/s

C.1.3.6 Benennung der Logfiles

- Dateiname der Logfiles
 - $\langle 2|5.5|11 \rangle \text{MBit/s} - \langle \text{wald|parkpl|wiese} \rangle - (\text{distanz})\text{m} - \langle 1|2 \rangle .\text{log}$
 - Bsp.: Name für Logfile bei 11MBit/s und 15 Metern Entfernung im Terrain Wald (1. Lauf): 11MBit/s- wald-15m-11.log

C.1.4 Gemessene Größen

- Anzahl an empfangenen Paketen bzw. der Datendurchsatz als Maß für Qualität der Datenübertragung zwischen beiden WLAN-Knoten
- Sendereichweite

C.1.5 Ansprechpartner

- Michael Bender (Projektarbeiter)
- Thomas Kuhn (Betreuer der Projektarbeit)

C.2 Template der zweiten Serie von Messungen (Experiment 01b)

C.2.1 Allgemeines

Das Experiment „Zwei stationäre Knoten“ mit der ID-Nummer 01b befasst sich mit der Frage, wie sich unterschiedliche Terrains, Entfernungen und Bitraten auf die Übertragungsqualität und Sendereichweite von zwei WLAN-Knoten auswirken. Hierzu soll der Durchsatz gemessen werden.

Die Messungen in diesem Experiment dienen der Verifikation und ggf. Modifikation des durch die Messungen in Experiment 01 gewonnen Simulationsmodells.

C.2.2 Exakte Beschreibung

C.2.2.1 Aufbau

- Verwendete Hardware:
 - Zwei Dell-Notebooks (Rechner mit Nummern RNB01 und RNB02 der AG Vernetzte Systeme)
 - Server ausgerüstet mit Netgear-WLAN-Karte, Client mit Prism-WLAN-Karte
 - Ab Tag 6 auch Client mit Netgear-Karte ausgerüstet

- Verwendete Software:
 - Software Packetsim unter Linux generiert benötigten Traffic
 - Übertragungsrate als Parameter einstellbar.
 - Protokoll für Übertragung: UDP
 - 3 verschiedene Scripte zur Generierung von Traffic mit 2, 5.5 bzw. 11 MBit/s
 - Messen des Durchsatzes und Erstellen der Graphen mit Software AiropEEK unter Windows XP

- Geplante Durchführungsorte
 - Drei verschiedene Orte:
 - Wiese
 - Parkplatz
 - Waldstück (mit Bäumen zwischen den Knoten → keine (ideale) LOS)
 - Auf Wiese wird von freiem Sichtfeld ausgegangen
 - An anderen beiden Orten LOS nicht gegeben (Bäume, parkende Fahrzeuge)

C.2.2.2 Anzahl Personen

Das Experiment wird durchgeführt von:

- Michael Bender (Projektarbeiter)
- Thomas Kuhn (1.2.2005)
- Simon Jung, Hiwi der AG Vernetzte Systeme (7.2.2005)

C.2.2.3 Ablauf

- Beide Knoten in diesem Experiment stets stationär (keine Bewegung)
- Datendurchsatz während der Messung ablesen und in Logfile speichern

C.2.2.4 Dauer des Experiments und Anzahl Wiederholungen

- In jedem Terrain Messungen mit UDP für drei unterschiedliche Übertragungsraten (2, 5.5 und 11 MBit/s)
- Für alle Terrains und Übertragungsraten Entfernung zwischen beiden Knoten variieren
 - Client bleibt hierbei stets stationär
 - Position von Server wird variiert
 - Entfernungen aufgrund der in den vorherigen Messungen (Experiment 01) gemachten Erfahrungen auswählen
- Für jede Kombination aus Terrain, Übertragungsrate und Entfernung ein Messlauf vorgesehen
- Dauer eines Messlaufes: maximal 2 Minuten

C.2.2.5 Checkliste

Messung Terrain Wiese:

11 MBit/s	UDP	Abstand 1	Ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 2	Ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 3	Ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 4	Ok
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 1	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 2	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	gestrichen
2 MBit/s	UDP	Abstand 1	Ok
2 MBit/s	UDP	Abstand 2	Ok
2 MBit/s	UDP	Abstand 3	Ok

Gewählte Abstände Terrain Wiese:

	11 MBit/s	5.5 MBit/s	2 MBit/s
UDP	25m / 50m / 75m / 100m	gestrichen	50m / 100m / 147m

Messung Terrain Parkplatz:

11 MBit/s	UDP	Abstand 1	Ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 2	Ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 2	Ok
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 1	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 2	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	gestrichen
2 MBit/s	UDP	Abstand 1	Ok
2 MBit/s	UDP	Abstand 2	Ok
2 MBit/s	UDP	Abstand 3	Ok
2 MBit/s	UDP	Abstand 4	Ok

Gewählte Abstände Terrain Parkplatz:

	11 MBit/s	5.5 MBit/s	2 MBit/s
UDP	14m / 32m / 46m	gestrichen	32m / 46m / 66m / 84m

Messung Terrain Wald:

11 MBit/s	UDP	Abstand 1	Ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 2	Ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 3	Ok
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 1	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	gestrichen
2 MBit/s	UDP	Abstand 1	Ok
2 MBit/s	UDP	Abstand 2	Ok
2 MBit/s	UDP	Abstand 3	Ok
2 MBit/s	UDP	Abstand 4	Ok
2 MBit/s	UDP	Abstand 5	Ok

Gewählte Abstände Terrain Wald:

	11 MBit/s	5.5 MBit/s	2 MBit/s
UDP	45m / 60m / 90m	gestrichen	20m / 35m / 45m / 65m / 80m

Messung Terrain Unterholz (Einführung erst im Verlauf des Experiments):

11 MBit/s	UDP	Abstand 1	Ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 2	Ok
11 MBit/s	UDP	Abstand 3	Ok
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 1	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	gestrichen
5.5 MBit/s	UDP	Abstand 3	gestrichen
2 MBit/s	UDP	Abstand 1	Ok
2 MBit/s	UDP	Abstand 2	Ok
2 MBit/s	UDP	Abstand 3	Ok

Gewählte Abstände Terrain Unterholz:

	11 MBit/s	5.5 MBit/s	2 MBit/s
UDP	10m / 21m / 30m	gestrichen	20m / 35m / 50m

C.2.2.6 Mögliche äußere Einflüsse und Fehlerquellen

- Auf Wiese keinen größeren Beeinträchtigungen der Signalübertragung zu erwarten (keine stationären Hindernisse)
- Kleinere Störungen wie vorbei fliegende Vögel denkbar
- Auf Parkplatz mit mehreren geparkten / an- und abfahrenden Fahrzeugen zu rechnen
- Somit auch mit ein- und aussteigenden Personen
- Im Wald Beeinflussung durch terrainbedingte Hindernisse (Baumstämme, Zweige, fallende Blätter)
- Wetterverhältnisse: mit kalten Temperaturen, Feuchtigkeit, Nebel oder Schneefall zu rechnen

C.2.3 Durchführung

Es wird der Verlauf der Experimentdurchführung beschrieben, insbesondere die dabei aufgetretenen Fehler und Probleme.

C.2.3.1 Ort & Zeit

- 1.2.2005 (Tag 1)
 - Beginn ca. 14.30 Uhr
 - Rasenstück hinter Gebäude 48
 - Messungen für 11 und 2 MBit/s
 - 5.5 MBit/s aus Zeitgründen nicht durchgeführt
- 2.2.2004 (Tag 2)
 - Beginn 10.30 Uhr bzw. 13.30 (zwei Abschnitte)
 - Ort: Großer Parkplatz hinter Gebäude 48 / Waldstück nahe Universität
 - Messungen für 11 MBit/s (Terrains Parkplatz und Wald)
- 3.2.2005 (Tag 3)
 - Beginn 12.00 Uhr bzw. 14.00 Uhr
 - Orte:
 - Waldstück nahe Universität (wie an Tag 2)
 - Anderes Waldstück (dichteres Unterholz)
 - Großer Parkplatz hinter Gebäude 48
 - Messungen für
 - 11 und 2 MBit/s (Terrain Wald)
 - 11 und 2 MBit/s (Terrain Unterholz)
 - 2 MBit/s (Terrain Parkplatz)
- 7.2.2005 (Tag 4)
 - Ort:
 - Sportplatz der Universität (für Terrain Wiese)
 - Größere Abstände möglich als bei vorherigem Terrain
 - Weniger Einflüsse durch fremde WLANs
 - Beginn: 15.00 Uhr
 - Messungen für 11 und 2 MBit/s (Terrain Wiese)
- 8.2.2005 (Tag 5)
 - Beginn: 12.30 Uhr
 - Orte:
 - Waldstück nahe Universität (wie an Tag 2&3)
 - Anderes Waldstück (dichteres Unterholz)
 - Großer Parkplatz hinter Gebäude 48
 - Messungen für
 - 11 MBit/s (Terrain Unterholz)
 - 2 MBit/s (Terrain Wald)
 - 11 MBit/s (Terrain Parkplatz)
- 11.2.2005 (Tag 6)
 - Beginn: 14.30 Uhr
 - Orte:
 - Waldstück nahe Universität (wie an Tag 2, 3 und 5)
 - Waldstück mit dichtem Unterholz
 - Großer Parkplatz hinter Gebäude 48
 - Messungen für
 - 2 MBit/s (Terrain Wald)
 - 2 MBit/s (Terrain Unterholz)
 - 2 MBit/s (Terrain Parkplatz)

- 14.2.2005 (Tag 7)
 - Beginn: 14.00 Uhr
 - Orte: siehe Tag 6
 - Messungen für:
 - 11 MBit/s (Terrain Wald)
 - 11 MBit/s (Terrain Unterholz)
 - 11 MBit/s (Terrain Parkplatz)
- 16.2.2005 (Tag 8)
 - Beginn: 15.00 Uhr
 - Orte: siehe Tag 6 und 7
 - Messungen für:
 - 2 MBit/s (Terrain Wald)
 - 2 MBit/s (Terrain Unterholz)
 - 2 MBit/s (Terrain Parkplatz)
- 17.2.2005 (Tag 9)
 - Beginn: 14.30 Uhr
 - Orte: siehe Tag 6, 7 und 8
 - Messungen für:
 - 11 MBit/s (Terrain Wald)
 - 11 MBit/s (Terrain Unterholz)
 - 11 MBit/s (Terrain Parkplatz)

C.2.3.2 Dauer

- Tag 1: bis 16.30 Uhr
- Tag 2: bis 11.15 Uhr bzw. 14.30 Uhr (Abbruch wegen Regenfalls)
- Tag 3: bis 12.30 (Abbruch wegen Regenfalls) bzw. 16.30 Uhr
- Tag 4: bis 16.00 Uhr
- Tag 5: bis 15.00 Uhr
- Tag 6: bis 16.00 Uhr
- Tag 7: bis 15.30 Uhr
- Tag 8: bis 17.00 Uhr
- Tag 9: bis 16.15 Uhr

C.2.3.3 Wetterverhältnisse

- Tag 1: Tauwetter (schlammiger Boden), kühl
- Tag 2: bewölkt, Nieselregen, kühl
- Tag 3: bewölkt, kühl, später starker Regen
- Tag 4: leicht bewölkt, trocken, kühl
- Tag 5: klarer Himmel, feuchter Waldboden, Temperatur etwas milder
- Tag 6: klarer Himmel, angenehme Temperatur
- Tag 7: bewölkt, angenehme Temperatur, gegen Ende kurzer Hagelschauer
- Tag 8: bewölkt, kühl, schneebedeckter Waldboden, zwischendurch leichter Schneefall
- Tag 9: bewölkt, kalt, schneebedeckter Waldboden

C.2.3.4 Äußere Einflüsse und Fehlerquellen

- Tag 1:
 - Erstmals Einsatz der neuen Software Airopack
 - Störungen durch Fremdpakete vom ESA bei Entfernung von 90m
 - Reflexionen von Universitätsgebäuden und Viadukt
 - Rutschiger Untergrund
- Tag 2:
 - Durchsatzraten im Wald wesentlich höher als erwartet
 - Grund: Weniger Unterholz und Server nicht mehr auf Bodenniveau
 - Außerdem Sichtlinie nur durch Bäume behindert
 - Daher ab sofort Behandlung von Wald mit Unterholz als eigenes Terrain
 - Nach den Messreihen für 11 MBit/s Abbruch wegen beginnendem Nieselregens
 - Messungen auf Parkplatz durch Fremdpakete beeinflusst
 - Durchsatzraten hier geringer als bei Messungen in Versuch 01
- Tag 3:
 - Erste Messungen im Wald wegen starken Regens abgebrochen
 - Fortbewegung in Terrain Unterholz bisweilen schwierig
 - Durchsatzwerte für 2 MBit/s dort unerwartet gering
 - Werte für 11 MBit/s hingegen höher als erwartet
 - Wiederauffinden des stationären Notebooks (Client) im Unterholz problematisch
- Tag 4:
 - Durchsatz für 2 MBit/s zeigt auch bei maximal möglichem Abstand keinen Einbruch
 - Sonst keine störenden Einflüsse
- Tag 5:
 - Gemessene Werte für Unterholz geringer als an Tag 3
 - Bei Entfernung von 21 Metern allerdings unerwartet hoch
 - Auf Parkplatz starker Einfluss von Fremdpaketen bei höheren Entfernungen
- Tag 6:
 - Gemessene Werte bei Parkplatz (mittlere Entfernung) etwas niedrig
 - Keine störenden Einflüsse festzustellen
- Tag 7:
 - Durchsatz bei 11 MBit/s bei nebeneinander stehenden Notebooks größer als zuvor (Einsatz neuer Treiber)
 - Keine störenden Einflüsse
- Tag 8:
 - Fortbewegung im Wald wird durch Schnee erschwert
 - Im Terrain Wald einige Fremdpakete empfangen
- Tag 9:
 - Gemessener Durchsatz bei gleicher Entfernung geringer als an Tag 7 (Terrains Wald und Parkplatz)
 - Durchsatzraten im Terrain Unterholz bei größerer Entfernung stark abhängig von Platzierung des Servers (Bodenniveau oder leicht höher, direkt hinter Geäst)
 - Fremdpakete im Terrain Parkplatz (im Gegensatz zu Tag 8)

C.2.3.5. Probleme mit Software / Hardware

- Tag 1:
 - Abbruch der Übertragung bei 11 MBit/s im Messlauf 90 Meter
- Tag 2:
 - Kurzzeitig Sendeausfall des Clients bei 2 MBit/s, Entfernen und Wiedereinsetzen der WLAN-Karte löste Problem
 - Danach jedoch Absturz des Servers (Bluescreen)
- Tag 3:
 - Übertragung mit 5.5 MBit/s funktioniert nicht, keine durchkommenden Pakete
 - Messungen mit dieser Datenrate daraufhin gestrichen
- Tag 4:
 - Anfangs Absturz des Servers (Bluescreen) nach versehentlichem Starten des Demos der Software AiropEEK
 - Bei 2 MBit/s oft Zusammenbruch der Übertragung, nur durch Neustart der Software auf Client zu beheben
- Tag 5:
 - Sehr häufige Zusammenbrüche der Übertragung bei 2 MBit/s => Messungen im Terrain Unterholz und Parkplatz mit dieser Datenrate nicht durchführbar
 - Im Terrain Wald zwei Messläufe mit 2 MBit/s durchgeführt, dann Abbruch wegen erwähnten Zusammenbrüchen
 - Erstmals auch Zusammenbrüche bei 11 MBit/s, mehrere Neustarts der Software auf Client erforderlich
- Tag 6:
 - Dank neuer Treibersoftware keine Probleme mehr mit Zusammenbrüchen
 - Auch keine sonstigen Probleme
- Tag 7:

Keine Probleme
- Tag 8:
 - Durchsatzrate bei nebeneinander stehenden Notebooks zuerst zu gering (ca. 30% des Maximalwerts); Entfernen der Karte und Neustart des Clients lösten Problem
 - Später vergleichbares Problem; Entfernen/Wiedereinstecken der Karte des Servers und anschließendes Bedienen der Software AiropEEK führten zu Absturz des Systems („Bluescreen“)
- Tag 9:
 - Keine Probleme

C.2.3.6 Benennung der Logfiles

- Dateiname der Logfiles
 - <2|11>MBit/s-<wald|parkpl|wiese|sportpl|unterh>- (Distanz)m(-2).apc
 - Bsp.: Name für Logfile bei 11MBit/s und 15 Metern Entfernung im Terrain Wald (1. Lauf): 11MBit/s- wald-15m.apc

C.2.4. Gemessene Größen

- Anzahl an empfangenen Paketen bzw. der Datendurchsatz als Maß für Qualität der Datenübertragung zwischen beiden WLAN-Knoten
- Sendereichweite

C.2.5. Ansprechpartner

- Michael Bender (Projektarbeiter)
- Thomas Kuhn (Betreuer der Projektarbeit)

Anhang D : Tabelle Papers

	[HBEI01]	[BT99]
Inhalt Paper	Befasst sich mit den Auswirkungen des Hinzufügens von Details zu Simulationsmodellen	Bestandteile, Werkzeuge und Techniken zur Validation von Netzwerksimulationen
Daten für Beschreibung von Szenario	leerer Parkplatz, Maße: 10m x 10m	"kleines Szenario"
zusätzliche Annahmen Umgebung	Messpunkte in 1m-Intervallen	k. A.
gesammelte Daten	Messung Konnektivität	# gesendete Pakete, # verlorene Pakete
verwendeter Simulator	k. A.	NS, GloMoSim
Ausbreitungsmodell	einfach & idealisiert => sphärisch	k. A.
Umgebung (Modell)	flat	flat
Anzahl Knoten	2	3
simulierte Protokolle	k. A.	k. A.
Netzlaster/Verkehr	k. A.	k. A.
Bewegungsmodelle	k. A.	k. A.
Energieverbrauch berücksichtigt	ja (in Zusatzbed. mit Routingprotokollen)	k. A.
statistische Besonderheiten	k. A.	k. A.
Validation durch Experimente	ja	Nein

	[MM01]	[QK03]
Inhalt Paper	Beschreibt Approximation eines Kanals mit Rayleigh-Fading durch ein Markov-Modell	Untersucht die Auswirkungen von shadowing auf das Verhalten der Protokolle AODV und DSR
Daten für Beschreibung von Szenario	siehe "Umgebung"	Fläche: 1500m x 300m, Simulationszeit: 500s
zusätzliche Annahmen Umgebung	k. A.	k. A.
gesammelte Daten	Datendurchsatz für Rayleigh und MM	PDR, # Kontrollnachrichten, Latenzzeit, # Hops
verwendeter Simulator	ns-2	ns-2
Ausbreitungsmodell	k. A.	shadowing (zum Vergl. Ideal)
Umgebung (Modell)	flat channel	Flat
Anzahl Knoten	vermutlich 2	50 mobile Knoten, 20 Sourceknoten
simulierte Protokolle	TCP	DSR (+ Modifikationen), AODV
Netzlaster/Verkehr	k. A.	k. A.
Bewegungsmodelle	k. A.	pause time: 0-500s, max. Geschwindigkeit: 20m/s
Energieverbrauch berücksichtigt	nein	Nein
statistische Besonderheiten	Rayleigh-Fading, Markov-Modell	k. A.
Validation durch Experimente	nein	Nein

	[TBLG99]	[DD04]
Inhalt Paper	Beschreibt die Auswirkungen verschiedener Ausbreitungsmodelle auf die Simulationserg.	Erweiterung des ns-2-Simulators um neue Techniken
Daten für Beschreibung von Szenario	Topographie, Gebäudetyp	Korridor von 10m Länge
zusätzliche Annahmen Umgebung	30m zwischen quelle und Ziel, node aggregation	k. A.
gesammelte Daten	Erfolgsrate[%], Funktionsaufrufe, Durchsatz, Ausführungszeit, Speedup	Signalstärke, BER
verwendeter Simulator	GloMoSim & NS/CMU	ns-2
Ausbreitungsmodell	SIRCIM (detailed), freespace	shadowing, ray-tracing
Umgebung (Modell)	Topographie (line of sight/obstructed), Gebäudetyp	"office model", Wände & Korridore
Anzahl Knoten	12 (Ringtopologie) bzw. bis zu 10000	k. A.
simulierte Protokolle	TCP, CSMA	k. A.
Netzlast/Verkehr	Paketgröße: 32 Byte	Geschwindigkeit: 1m/s
Bewegungsmodelle	k. A.	Markov-Kette
Energieverbrauch berücksichtigt	nein	Nein
statistische Besonderheiten	k. A.	Markov-Kette
Validation durch Experimente	nein	Ja

	[TMB01]	[AJRN00]
Inhalt Paper	Befasst sich mit der Modellierung der physikalischen Schicht und deren Wirkung auf Routingprotok.	Vergleich der Performance von vier Routingprotokollen (DSR, AODV, DSDV, CEDAR)
Daten für Beschreibung von Szenario	10*N/10 Zellen. Reichweite: 250m / Fläche: 1200m x 1200m	rechteckiges Feld (variable Größe), CEDAR: 1500x300 & 1500x1500, simul. Zeit: 900s
zusätzliche Annahmen Umgebung	2. Exp.: Reichweite 627m bzw. 376m (abh. vom path-loss-modell)	k. A.
gesammelte Daten	PDR, Latenzzeit (Ende zu Ende), link breaks/s	# gesendete/empfangene Pakete, Overhead, Latenzzeit
verwendeter Simulator	ns-2, GloMoSim	ns-2
Ausbreitungsmodell	freespace & two ray	k. A.
Umgebung (Modell)	flat / flat	Fallstudie Universitätscampus
Anzahl Knoten	50-200 / 100	variabel, bis zu 50
simulierte Protokolle	DSR, AODV	DSDV, DSR, AODV, CEDAR
Netzlast/Verkehr	Werte von 1-10 (Metrik?), 100s pause time, Geschwindigkeit: 0-20m/s (zufällig)	Bitrate & # Sendeknoten variiert
Bewegungsmodelle	k. A.	random waypoint, Geschw: 0-20m/s (gleichverteilt), pause time: 0-900s
Energieverbrauch berücksichtigt	nein	Nein
statistische Besonderheiten	Vergleich Ricean/Rayleigh	Gleichverteilung Geschwindigkeit
Validation durch Experimente	nein	ja (Fallstudie)

	[BMDHJ98]	[RL02]
Inhalt Paper	Vergleich der Performance von vier Routingprotokollen (DSR, AODV, DSDV, TORA)	Stellt knotenbasierte Ansätze für hybrides Routing in Ad-Hoc-Netzen vor
Daten für Beschreibung von Szenario	1500mx300m, sim. Zeit: 900s	1000m x 500m, sim. Zeit: 600s
zusätzliche Annahmen Umgebung	210 unterschiedliche Szenario-Files, Sendereichweite: 250m	Sendereichweite: 250m
gesammelte Daten	# Pakete, # Topologieänderungen, Länge der Routen / # gesendete bzw. empf. Pakete, Overhead, Hops	PDR, Overhead, Average Hop Count, Latenz, # Anfragen (queries)
verwendeter Simulator	ns-2 (erweitert)	ns-2
Ausbreitungsmodell	freespace und two ray ground reflection kombiniert	k. A.
Umgebung (Modell)	flat	k. A.
Anzahl Knoten	50	31
simulierte Protokolle	DSDV, TORA, DSR, AODV	NEST, SOAR, AODV, DSR
Netzlast/Verkehr	Paketgröße: 64 bzw. 1024 Bytes (# Quellen bei Vergleich berücks.)	flow on/off einstellbar, 3 bzw. 5 Pakete pro Sekunde
Bewegungsmodelle	random waypoint, pause time: 0-900s, mx. Geschw. In jedem Szenario variabel (1-20m/s)	random waypoint, pause time variabel (Max. 0-300s)
Energieverbrauch berücksichtigt	durch Overhead	Nein
statistische Besonderheiten	k. A.	k. A.
Validation durch Experimente	nein	Nein

	[MR04]	[GKND04]
Inhalt Paper	Befasst sich mit der Modellierung von Energieverbrauch, Batterien und CPUs in Sensornetzwerken	Vergleich vierer Routingalg. Durch Simulation und reale Experimente
Daten für Beschreibung von Szenario	Kette mit Länge 5 Knoten / Gitter / Fläche: 1000m x 1000m	outdoor: 225m x 365m (Sportplatz)
zusätzliche Annahmen Umgebung	k.A. / sim. Zeit: 15 min	4 Sektionen, 1 Sektion 4-6m tiefer als die anderen
gesammelte Daten	# empf. Pakete, # Routingpakete, # überlieferte Pakete, energieverbrauch	message delivery ratio, communication efficiency, # Hops, Latenzzeit (Ende zu Ende)
verwendeter Simulator	Qualnet	SWAN
Ausbreitungsmodell	k.A.	freespace, two ray, generisches modell
Umgebung (Modell)	k. A.	flat (nicht uniform)
Anzahl Knoten	5/16/50 bzw. 49/100 (bei Routing)	33 funktionierende von insgesamt 40
simulierte Protokolle	AODV, DSR	APRL, AODV, ODMRP, STARA / UDP
Netzlaster/Verkehr	Paketgröße: 512 Bytes, 2 Pakete/s, bei Routing: 256 Bytes, 1 Paket/s	Senderate: 20 Mb/s, traffic-Generator, 423 Bytes pro Sekunde und Knoten
Bewegungsmodelle	k. A.	im Experiment zufällig, für Simulation Muster reproduziert => Approx. Random waypoint
Energieverbrauch berücksichtigt	ja	Nein
statistische Besonderheiten	k. A.	Gaußvert. bestimmen Paketgröße und -anzahl, Gleichvert. bestimmt Zielknoten
Validation durch Experimente	nein	ja

	[CSS02]	[GKL04]
Inhalt Paper	Vergleich der Performance dreier Simulatoren in einem Szenario mit Flooding	Leistungsbewertung zweier Ad-Hoc-Routing-Protokolle in städtischen Umgebungen
Daten für Beschreibung von Szenario	1000m x 1000m	350m x 350m bzw. 500m x 500m, simulierte Zeit: 900s
zusätzliche Annahmen Umgebung	Sendereichweite: 1-30m	Gebäude als Hindernisse
gesammelte Daten	Erfolgsrate, Latenz, Overhead	Paketverlustrate, Overhead, path optimality
verwendeter Simulator	Opnet, ns-2, GloMoSim	ns-2
Ausbreitungsmodell	freespace	Walfish-Ikegami
Umgebung (Modell)	flat	Italy scenario, Manhattan scenario
Anzahl Knoten	50	30/50/100
simulierte Protokolle	Flooding-Algorithmus	AODV, DSR
Netzlast/Verkehr	4-20 Pakete/s, Senderate: 2 MB/s, Broadcast Rate: 4 Pakete/s	Paketgröße: 64 Bytes, Quellen: 4 Pakete/s
Bewegungsmodelle	random waypoint, Geschw.: 0-20 m/s	city motion, max. Geschw.: 1 bzw. 10m/s
Energieverbrauch berücksichtigt	nein	Nein
statistische Besonderheiten	Gleichverteilung bei Platzierung der Knoten	k. A.
Validation durch Experimente	nein	Nein

