
ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Semesterarbeit:
Paketverlustanalyse in einem adaptiven
Sensornetzwerk

Jonas Nyffeler

Betreut von:
Pascal von Rickenbach
&
Nicolas Burri

14. Februar 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Motivation	1
2	Grundlagen und Konzepte	3
2.1	Mica2 Knoten	3
2.1.1	Der Systemkern	3
2.1.2	Das Radiosystem	4
2.1.3	Energieverbrauch	5
2.2	TinyOS	5
2.3	nesC	6
2.4	Die Messung	7
2.5	Die Hypothesen	8
2.5.1	Der Korrelationskoeffizient	9
3	Implementation der Software	11
3.1	Receiverapplikation	11
3.2	Senderapplikation	12
3.3	TOSBase - Applikation	12
3.4	BcastInject- Erweiterung	13
3.5	Analyze Field	13
4	Resultate	15
4.1	1. Messung	16
4.1.1	Korrelationskoeffizient	16
4.1.2	Prozentualer Datenvergleich	17
4.1.3	Hypothesenverifizierung:	17
4.2	2. Messung	19
4.2.1	Korrelationskoeffizient	19
4.2.2	Prozentualer Datenvergleich	20
4.2.3	Hypothesenverifizierung:	20
4.3	3. Messung	21
4.3.1	Korrelationskoeffizient	21
4.3.2	Prozentualer Datenvergleich	21
4.3.3	Hypothesenverifizierung:	22
4.4	4. Messung	24
4.4.1	Korrelationskoeffizient	24
4.4.2	Prozentualer Datenvergleich	25
4.4.3	Hypothesenverifizierung:	25

4.5	5. Messung	27
4.5.1	Korrelationskoeffizient	27
4.5.2	Prozentualer Datenvergleich	28
4.5.3	Hypothesenverifizierung:	28
4.6	6. Messung	30
4.6.1	Korrelationskoeffizient	30
4.6.2	Prozentualer Datenvergleich	31
4.6.3	Hypothesenverifizierung:	31
4.7	7. Messung	33
4.7.1	Korrelationskoeffizient	34
4.7.2	Prozentualer Datenvergleich	34
4.7.3	Hypothesenverifizierung:	34
4.8	8. Messung	36
4.8.1	Korrelationskoeffizient	36
4.8.2	Prozentualer Datenvergleich	37
4.8.3	Hypothesenverifizierung:	37
5	Folgerungen	39
5.1	Messungen	39
5.2	Hypothese	39
5.3	Messort	41
6	Diskussion	43
7	Appendix	45
7.1	Mica2 Software	45
7.2	JAVA	45
7.3	Bericht	45
7.4	MATLAB	45
7.5	Messdaten	45
7.5.1	movie_data	45
7.5.2	correlation	46
7.5.3	Pics	46
7.5.4	statistic_data	46
7.5.5	Movies:	47

Kapitel 1

Einleitung

Zusammenfassung

Durch steigende Anforderungen an die Zuverlässigkeit von drahtlosen Sensornetzwerken ist auch eine höhere Zuverlässigkeit der drahtlosen Kommunikation zwischen den einzelnen Netzknoten erforderlich. Da die Störsicherheit nicht immer gewährleistet ist, werden bei Datentransfers zwischen zwei Knoten Datenpakete unvollständig übertragen, oder es gehen welche ganz verloren. Damit ein Empfangsknoten trotzdem an die von ihm nicht oder falsch empfangenen Datenpakete gelangen kann, gibt es mehrere Möglichkeiten, um sich diese beschaffen zu können. Nicht oder fehlerhaft empfangene Datenpakete müssen vom Sender neu gesendet werden, was jedoch sehr zeitintensiv ist, da während dieser Zeit kein anderer Datenverkehr möglich ist. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass Empfangsknoten die beschädigten oder verlorene Pakete selbstständig mit Hilfe von Prüfsummen rekonstruieren können. Eine letzte Möglichkeit besteht darin, dass der einzelne Empfangsknoten versucht, sich die Daten bei einem Nachbarknoten zu beschaffen. Verfügt dieser über das Paket, schickt er es dem anfragenden Knoten zurück. Andernfalls hat dieser das Paket ebenfalls nicht empfangen, so teilt er es dem anfragenden Knoten mit. Andernfalls gibt er eine negative Antwort. Diese Anfrage wird bei weiteren Nachbarknoten fortgesetzt, bis eine positive Antwort erhalten wird. Hat keiner seiner Nachbarn das Paket empfangen, so kann der Knoten per multi-hop ein Nachbarn seines Nachbarknotens anfragen.

In dieser Arbeit wird ein Konzept vorgestellt, nach welchem ein Sensorknoten eines Netzwerkes vorgehen kann, um möglichst effizient an seine nicht empfangenen Daten zu gelangen. Jeder Knoten eines Netzwerkes könnte dadurch selbstständig an alle vom Sender gesendeten Datenpakete gelangen.

1.1 Motivation

Drahtlose Sensornetzwerke bestehen aus vielen verteilten kleinen Netzknoten, welche über einfache, individuelle Sensoren verfügen. Mit Hilfe dieser Sensoren können spezifische Daten aus der Umgebung gesammelt werden. Die gesammelten Sensordaten lassen sich untereinander oder auch mit anderen Netzen drahtlos austauschen. Je nachdem, welche Funktion ein verteiltes Sensornetz wahrnehmen muss, können Knoten unabhängig voneinander in naher Umgebung oder weit voneinander distanziert platziert sein.

Um ein Sensornetz möglichst kostengünstig und konkurrenzfähig machen zu können, müssen die Knoten klein und günstig sein. Jeder einzelne Knoten muss in einem solchen System ein Minimum an Fähigkeiten besitzen. Zu den Fähigkeiten der einzelnen Knoten gehört zum einen die Möglichkeit zur drahtlosen Kommunikation, das Bearbeiten gesammelter oder empfangener Daten, sowie das Speichern dieser Daten.

Durch die begrenzten Ressourcen eines Netzknotens stellen sich in Sensornetzwerken oft andere Probleme als in üblichen verteilten Systemen, welche aus Rechnern aufgebaut sind. Zum einen besitzen die Knoten meistens eine Batterie als Energiequelle, wodurch auf eine sehr effiziente Verwendung der Energie geachtet werden muss. Zum anderen verfügt jeder Knoten nur über einem begrenzten Speicherplatz, was das Sammeln und Weiterleiten von Daten vor neue Probleme stellt. Aus der Sicht der Datenkommunikation ist das wichtigste der drahtlose Datentransfer. Er ist nur bis zu einer gewissen Distanz möglich, und er kann nur eine gewisse Anzahl von Paketen pro Sekunde übertragen. Einflüsse aus der Umgebung können die Kommunikation zwischen den Knoten verunmöglichen oder zum Verlust von Paketen beim Übertragen führen.

Kapitel 2

Grundlagen und Konzepte

In diesem Kapitel wird erklärt, mit welchen Messinstrumenten in dieser Arbeit gearbeitet worden ist, und welches angewandte Konzept zu den dokumentierten Messresultaten führte. Zu Beginn des Kapitels wird der als Messinstrument verwendete Mica2 Knoten vorgestellt. Dieser Knoten bildet de facto die Standardplattform für Sensornetzwerke und ist in der Praxis wie auch in der Ausbildung weit verbreitet. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird das Konzept behandelt, welches zu den Messresultaten und auch zur Schlussfolgerung dieser Arbeit geführt hat.

2.1 Mica2 Knoten

Der Mica2 Knoten ist ein Sensorboard, welches über einen Microcontroller, mehrere Sensoren, einen Speicher sowie eine Radioantenne verfügt. Mit Hilfe eines Gateways können Daten via Ethernet auf den Mica2 Knoten geladen werden. In den folgenden Unterkapiteln wird speziell auf die Hardware des Mica2 Sensorknotens eingegangen. Die Information stammt aus den Datenblätter[1], welche auf der Homepage des Herstellers Crossbow zu finden ist.

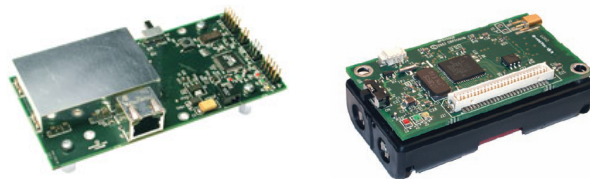


Abbildung 2.1: Ethernet Gateway und Mica2 Knoten

2.1.1 Der Systemkern

Wie viele andere Sensorknoten verfügt auch der Mica2 Sensorknoten nur über beschränkten Datenspeicherplatz. Das Implementieren von Applikationen erfordert ein äusserst sorgfältiges sowie platz sparendes Design der Anwendungen.

Zusätzlich muss auf eine sehr energieeffiziente Anwendung geachtet werden. Dabei gilt es, Komponenten des Knotens bei Nichtgebrauch abzuschalten oder in einen low-Power Modus zu versetzen. Der Mica2 Knoten ist fähig sowohl den Mikrocontroller als auch die Radioantenne unabhängig voneinander ein und aus zu schalten.

Der Knoten ist mit einem ATmega 1281 Microcontroller ausgestattet, der mit einer 8-Bit Architektur arbeitet. Der Microcontroller wird mit einer Taktfrequenz von 7.3728 MHz getaktet und verfügt über insgesamt 648 KByte Speicher. Davon sind 128 KByte Programmspeicher, 512 KByte allgemeiner Speicher, sowie je 4 KByte Daten- und Konfigurationsspeicher. Der Systemkern ist so ausgelegt, dass die Prozessorgeschwindigkeit, die Speichergrösse, externe Input- Output- und Onboardsensoren maximiert sind. Die Systemgrösse als Ganzes sollte dabei jedoch so klein wie möglich sein.

Mica2 Node	
Microcontroller	Atmega 1281
Architektur	8- Bit
Taktfrequenz	7.3728 MHz
Programmspeicher	128 kB
Datenspeicher	4 kB
Konfigurierbarer Speicher	4 kB
Massenspeicher	512 kB

Abbildung 2.2: Systemressourcen

2.1.2 Das Radiosystem

Die Datenrate sowie die Setupzeit ist für das Anwendungsdesign sowie für die Performance einer Applikation von grosser Wichtigkeit. Zusätzlich ist das Interface zwischen Radio und lokaler CPU ebenfalls von Bedeutung. Die Sensitivität sowie die Bandbreite der Antenne haben eher weniger Einfluss auf die Performance einer Applikation, da es eher unbeeinflussbare Antennenparameter sind. Der Mica2 Knoten verfügt über ein CC 1000 Radio, welches über eine Datenrate von 38,4 kbps verfügt. Im Freien hat es eine Reichweite von 150 Meter. In geschlossenen Räumen kommt es auf eine Reichweite von ca 40 Meter. In der Tabelle sind die wichtigsten Radioparameter des Mica2 Knotens zusammengefasst.

Mica2 Node	
Radio	Chipcon CC1000
Standart	ISM
Frequenzband	315 - 916 MHz
Datenrate	38.4 kbps
Setup Zeit	< 50 msec
Sensitivität	- 101 dBm
Reichweite (ausser)	150m
Reichweite (innen)	40m

Abbildung 2.3: Das Radiosystem

CC1000 Radio

In diesem Unterkapitel wird noch detaillierter auf das CC1000 Radio[6] des Mica2 Knotens eingegangen.

Der Chipcon ist ein einfacher RF Sender sowie Empfänger. Durch Verwendung des Bit-Streaminterface ist es dem Chipcon möglich, Pakete adressiert zu verschicken. Trotz Fehlerberichtigung sowie Empfangsbestätigungen ist die Kommunikation zwischen zwei oder mehreren Knoten ziemlich störanfällig. Die Treiber sowie der Protokollstapel des CC1000 Radios bieten das paketframing, Fehlererkennung sowie jede Funktionalität des MAC Layers an. Daher ist das CC1000 Radio relativ einfach in eine Applikation zu implementieren.

2.1.3 Energieverbrauch

Wie schon erwähnt kann der Mica2 Knoten den Microcontroller sowie das CC1000 Radio unabhängig voneinander ein und ausschalten. Die vier Zustände mit unterschiedlichem Energieverbrauch sind:

- Der Mikrocontroller lässt nur einen Timer laufen und ist sonst vollständig ausgeschaltet. Das CC1000 Radio ist ebenfalls ausgeschaltet. Diesen Zustand nennt man auch deep sleep mode.
- Der Mikrocontroller bearbeitet Daten, das CC100 Radio ist jedoch ausgeschaltet.
- Der Mikrocontroller ist voll funktionsfähig und das CC1000 Radio ist bereit um Daten zu empfangen. Der Knoten ist in der idle-listening mode.
- Der Microcontroller verarbeitet Daten, und das CC1000 Radio sendet, oder empfängt gleichzeitig. Der Energieverbrauch ist maximal.

Die folgende Tabelle gibt den Zustand der Energieverbrauch im Überblick.

Mica2 Node	
Batterie	2 AA Batterien
Minimum V _{cc}	2.7 Volt
Batteriekapazität	200 mAh
CPU off, Radio off	0.054 mW
CPU on, Radio off	36 mW
CPU on, Radio listen	66 mW
CPU on, Radio RX/ TX	117 mW
Maximal Power	165 mW

Abbildung 2.4: Der Energieverbrauch

2.2 TinyOS

Das TinyOS[2] Betriebssystem wurde an der Universität von Kalifornien, genauer in Berkeley[3], entwickelt. TinyOS ist ein Open Source Betriebssystem, welches speziell für den Einsatz in drahtlosen Sensornetzwerken entwickelt worden ist. Es wurde mit nesC komponentenbasiert implementiert, womit es durch

neue Zusätze sehr einfach erweitert werden kann. Zudem beansprucht der komponentenbasierte Quelltext viel weniger Platz, was für die Verwendung bei Sensornetzwerken wichtig ist, da die einzelnen Netzknoten nur über begrenzten Speicherplatz verfügen.

2.3 nesC

nesC[7] ist eine Erweiterung der Programmiersprache C. Durch die Erweiterung von C auf nesC konnten die Strukturierungsvorstellungen und das Ausführungsmodell des Betriebssystems TinyOS besser realisiert werden. Durch die Komponentenstruktur wird eine hohe Modularität bewirkt. Ein nesC Compiler übersetzt das ganze Programm in C-Code, das daraufhin mit einem C-Copiler kompiliert wird. Der kompilierte Code wird daraufhin auf die Hardware transferiert. TinyOS, anfangs in C implementiert, ist heute vollständig in nesC reimplementiert.

Die Basiskonzepte hinter nesC sind:

- NesC ist eine statische Programmiersprache. Der Programmierer kann weder auf Funktionszeiger, noch auf dynamische Speicherallozierung, noch auf dynamische Instantierung zurückgreifen.
- Programme sind aus Komponenten aufgebaut, welche miteinander verbunden, ganze Programme bilden. Dadurch sind in nesC die Konstruktion und die Zusammensetzung der Komponenten klar getrennt. Die Komponenten definieren zwei Bereiche: Ein Bereich für die Spezifizierung, worin die Namen der verwendeten und unterstützten Interfaces enthalten sind, und der andere Bereich für die Implementierung der Komponenten. Der Programmcode aller Komponenten wird parallel zum Programmcode anderer Komponenten ausgeführt. Das heißt, die Komponenten werden in Form von parallelen Tasks ausgeführt.
- Interfaces können von Komponenten zur Verfügung gestellt oder durch diese verwendet werden. Die zur Verfügung gestellte Schnittstelle repräsentiert die Funktionalität der Komponenten, die er seinem Benutzer oder einer anderen Komponente zur Verfügung stellt. Wird ein Interface verwendet, so repräsentiert das Interface die Funktionalität der Komponente, welche für die Ausführung ihres Jobs gebraucht wird. Dadurch spezifizieren Interfaces ein Set von Funktionen. Die vom Interfaceprovider implementierten Funktionen werden *commands* genannt. Zusätzlich sind noch Funktionen spezifiziert, welche von denjenigen Komponenten implementiert sind, die das Interface verwenden. Diese Funktionen werden *events* genannt. Ein einzelnes Interface kann somit eine komplexe Interaktion zwischen zwei Komponenten repräsentieren. Da die Programmiersprache eventbasiert aufgebaut ist, muss jeder Commandaufruf einer Komponente, ein Event auslösen, das ihm das Ende des ausgeführten Commands bestätigt.
- Durch die statische Verbindung der Komponenten durch die Interfaces, ist das Programm viel schneller, effektiver und erlaubt eine übersichtliche statische Analyse.

2.4 Die Messung

Das Konzept beruht darauf, dass ein Knoten einem anderen Knoten eine gewisse Anzahl von Paketen schickt. Wegen Störungen wird der Empfangsknoten eine gewisse Anzahl der gesendeten Pakete nicht empfangen. Es wird registriert, welche und auch wie viele Pakete der Knoten nicht empfangen hat. Über die Ursachen des Paketsverlusts lässt sich jedoch nur schwer etwas aussagen. Wird die Messung auf mehrere Empfangsknoten erweitert, lässt sich daraus schon mehr Information herauslesen. Werden die Empfangsknoten zum Beispiel in einem 2-dimensionalen Array platziert, können dadurch Rückschlüsse auf den Paketverlust in einem Raum gezogen werden. In bestimmten Regionen des Arrays gehen messbar mehr Pakete verloren als in anderen. Zusätzlich ist die Beschaffenheit des Raumes bekannt und dadurch können erste Vermutungen über die Ursache des Paketsverlust angestellt werden. Die Korrelation zwischen den Daten der einzelnen Knoten gibt Aufschluss darüber, ob der Datenverlust der einzelnen Knoten voneinander abhängig ist.

In dieser Arbeit wurde so vorgegangen, dass 36 Sensorknoten in einem 4x9-Array angeordnet wurden. 2.5 Meter vor dem Array wurde ein Sender platziert, welcher mit unterschiedlicher Sendestärke 2000 Pakete an jeden Empfangsknoten sendet. Empfängt der Empfangsknoten ein Paket, so schreibt er es in sein RAM. Nach dem Sendevorgang kann durch das Auslesen des RAMs via Ethernet festgestellt werden, welche der Pakete empfangen wurden. Die Sendestärke des Senders konnte zwischen 0 und 255 variiert werden. Der Wert 0 bedeutet nicht, dass die Sendeleistung auf Null gesetzt wird, sondern, dass sie um 20 dBm gesenkt wurde. Wird der Wert auf 255 gesetzt, so erhöht sich die Sendeleistung um 5 dBm. Eine detaillierte Erklärung ist im Chipcon SmartRF CC1000 Datenblatt [6] ersichtlich.

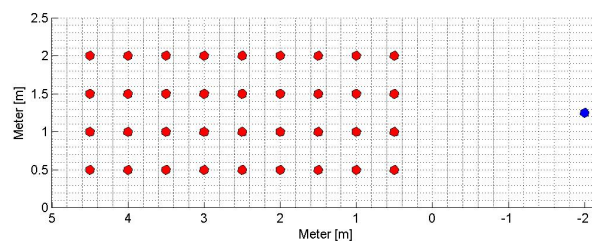


Abbildung 2.5: Versuchsanordnung. Die roten Punkte zeigen die Positionen der Empfangsknoten. Der blaue Punkt zeigt die Position des Senders



Abbildung 2.6: Messorte: Link zeigt ein Bild einer Messung in der Tiefgarage. Rechts zeigt ein Bild einer Messung auf der Terrasse des ETL-Gebäudes

2.5 Die Hypothesen

Für diese Arbeit wurden zwei Hypothesen aufgestellt und getestet. Gesucht ist eine Rezept, wie ein Knoten vorgehen muss, wenn er fehlerhaft oder gar nicht empfangene Pakete optimal ersetzen will. Da er sich in einem 4×9 -Array befindet, hat der Knoten zwei bis maximal vier Nachbarknoten. Die Schwierigkeit besteht nun darin, dass der Knoten selbständig abschätzen muss, welcher seiner Nachbarknoten mit höchster Wahrscheinlichkeit das Paket empfangen hat, welches ihm fehlt. Um diese Abschätzungen selbständig vornehmen zu können, wurden in dieser Arbeit zwei Hypothesen getestet. Sie beruhen darauf, dass nach einem Sendevorgang im 4×9 Array die Datensätze aller Nachbarknoten miteinander verglichen wurden.

Für die erste Hypothese wurde zwischen den Datensätzen ein Korrelationskoeffizient berechnet. Aus diesen Koeffizienten ist ersichtlich, ob die Daten der Knoten voneinander abhängen. Ist nämlich die Korrelation zwischen den Datensätzen zweier Nachbarknoten nahe bei eins, so sind die Daten der beiden Knoten linear abhängig. Das heisst, die Pakete gehen systematisch und nicht zufällig verloren. Ist die Korrelation zwischen den Datensätzen zweier Nachbarknoten nahe bei null, so sind die Datensätze der Nachbarknoten linear unabhängig. Das heisst, dass die beiden Nachbarknoten zufällig und unabhängig voneinander Pakete verpassen.

Möchte nun der Knoten seinen Datensatz vervollständigen, so wird er den Nachbarknoten kontaktieren, dessen Daten mit den eigenen möglichst nicht korreliert sind. Das heisst, der Korrelationskoeffizient ist nahe bei Null.

In dieser Arbeit wurde für jede Messung berechnet, in wie vielen Fällen diese erste Annahme richtig ist.

Für die andere Hypothese, wurde zwischen den Datensätzen berechnet, zu wie viel Prozent die Datensätze miteinander übereinstimmen. Ist dieser Prozentsatz nahe bei 100%, so haben beide Nachbarknoten fast identische Datensätze empfangen. Ist der Prozentsatz nahe bei 0%, so haben die beiden Nachbarknoten nur wenige Pakete gemeinsam. Möchte nun der Knoten seinen Datensatz vervollständigen, so wird er diesen Nachbarknoten kontaktieren, dessen Daten mit den Daten des Knoten einen Prozentsatz haben, der nahe bei null ist.

In dieser Arbeit wurde für jede Messung berechnet, in wie vielen Fällen diese

zweite Hypothese richtig ist.

2.5.1 Der Korrelationskoeffizient

Der Korrelationskoeffizient [5] ist ein Grad des linearen Zusammenhangs zwischen mindestens zwei Merkmalen. Er ist dimensionslos und kann nur Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei ein Wert von 1 als ein vollständigen linearer Zusammenhang zwischen den Merkmalen zu betrachtet ist. Nimmt der Koeffizient den Wert -1 an, so besteht zwischen den Merkmalen ebenfalls ein linearer Zusammenhang, jedoch ist dieser vollständig negativ. Hat der Korrelationskoeffizient den Wert 0, so hängen die beiden betrachteten Merkmale überhaupt nicht linear voneinander ab.

$$\text{Kor}_e(X, Y) := \rho_e(X, Y) := \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i$$

Abbildung 2.7: Definition des Korrelationskoeffizienten, wenn zwei Messreihen miteinander verglichen werden

Als weitere Hilfe zur Interpretation des Korrelationkoeffizienten hilft eine bildliche Darstellung. In der Abbildung 2.8 sind typische Korrelationen der Daten zwischen zwei Nachbarknoten gezeigt. Es stellt die empfangenen Pakete der Knoten dar. Die linke Grafik der Abbildung 2.8 zeigt die Abhängigkeit der Da-

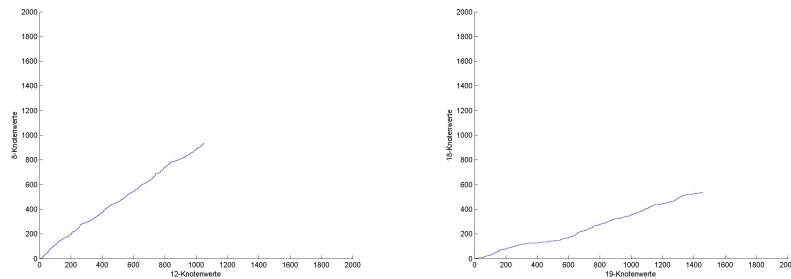


Abbildung 2.8: Darstellung der empfangenen Pakete von zwei Nachbarknoten. In der linken Grafik sind in auf der x-Achse die empfangenen Pakete des 12. Knotens aufgetragen. Auf der y-Achse sind die empfangenen Pakete des 8. Knotens aufgetragen. In der rechten Grafik sind die Pakete des 18. Knotens in der x-Achse und die des 19. in der y-Achse aufgetragen.

tensätze zweier Nachbarknoten. Aus dem Bild ist ersichtlich, dass beide Knoten praktisch die gleichen Pakete verpasst haben. Aus der Tatsache, dass die Gerade nicht bis in die rechte obere Ecke reicht, lässt sich folgern, dass beide Knoten Pakete verloren haben. Die 45 Grad Steigung der Geraden, lässt den Schluss zu, dass beide Knoten ca die gleichen Pakete verpasst haben.

Die rechte Grafik der Abbildung 2.8 zeigt, dass beide Knoten eine unterschiedliche Anzahl von Paketen empfangen haben. Knoten 19 hat viel mehr Pakete

empfangen als der Knoten 18. Anfragen nach Pakete von Knoten 18 an Knoten 19 führen mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Erfolg. Sind zwei Datensätze vollständig miteinander korreliert, so liegen alle Messwerte in dem 2-dimensionalen Koordinatensystem auf einer Geraden. Bei einer perfekten positiven Korrelation (Korrelationskoeffizient = 1) steigt die Gerade.

Je kleiner der Betrag des Korrelationskoeffizienten, desto kleiner der lineare Zusammenhang. Für einen Korrelationskoeffizienten = 0 kann der statistische Zusammenhang zwischen den Datensätzen nicht mehr durch eine eindeutig steigende oder sinkende Gerade dargestellt werden. Dennoch kann dann ein nicht-linearer statistischer Zusammenhang zwischen den Daten gegeben sein. Umgekehrt gilt jedoch: Wenn die Merkmale statistisch unabhängig sind, nimmt der Korrelationskoeffizient stets den Wert 0 an.

Kapitel 3

Implementation der Software

Alle Applikationen für den Mica2 Knoten wurden in nesC geschrieben. Für die Messung wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Receiverapplikation und eine Senderapplikation implementiert. Weiter wurde eine TOSBaseapplikation verwendet, welche die Kommunikation zwischen dem Ethernetgateway und dem Mica2 Knoten ermöglicht. Ein Java Programm namens BcastInject.java wurde erweitert, um die im RAM des Mica2 Knoten geloggtten Datenpakete auslesen zu können. Damit dies jedoch möglich ist, muss auf dem Computer eine SerialForwarder-Applikation laufen. Diese Anwendung leitet die vom Knoten an den Computer gesendeten Pakete weiter zur Java-Applikation. Zudem werden die Pakete in Javaobjekte gewrappt. Schickt die Java-Anwendung dem Knoten ein Paket, so macht der SerialForwarder genau das Gegenteil (Serialisieren). Abschliessend wurden die gesammelten Daten mit Hilfe eines MATLAB-Programms analysiert und visualisiert.

Im folgenden Kapitel werden die Receiver-, die Sender-, die TOSBase- Applikation und die MATLAB-Routinen näher erklärt.

3.1 Receiverapplikation

Die Receiverapplikation ist so aufgebaut, dass der Mica2 Knoten auf empfangene Kommandos seinen Zustand ändern kann. Der Mica2 Knoten kann in die Zustände `Start_receiving`, `Stop_receiving` und `read_log` gebracht werden. Im Idle-Zustand werden alle empfangenen Pakete, aussert `Commandmessages`, ignoriert. Dieser Zustand wird mit dem Leuchten des roten LEDs signalisiert.

Empfängt der Knoten die `Commandmessage start_receiving` so wird zuerst das grüne LED aktiviert und das rote deaktiviert. Der Knoten speichert nun alle zukünftig empfangenen Datenpakete in sein RAM ab, bis er die `Commandmessage stop_receiving` empfängt. Nach dem Empfangen der `Commandmessage stop_receiving`, wird das grüne LED deaktiviert und das rote LED wird wieder aktiv. Daraufhin kann mit der `Commandmessage read_log` das RAM zeilenweise ausgelesen werden. Um die Daten tatsächlich aus dem RAM des Knoten auslesen zu können, muss der Knoten mit dem Gateway verbunden werden.

Die Applikation ist aus mehreren Komponenten aufgebaut. Siehe dazu Abbil-

dung 3.1.

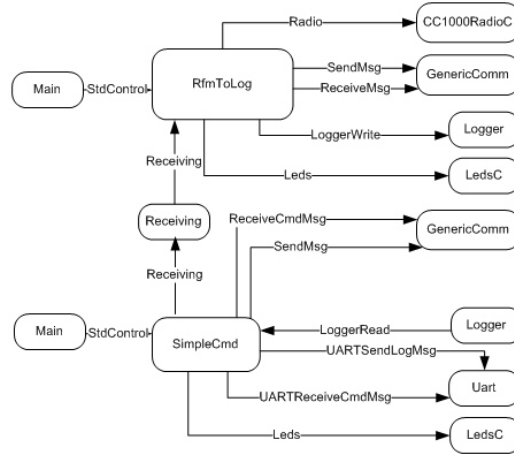


Abbildung 3.1: Komponentenverknüpfung von RfmToLog

3.2 Senderapplikation

Die Senderapplikation ist so aufgebaut, dass der Mica2 Knoten nach dem Einschalten selbständig einen Counter initiiert und startet. Die Werte werden über Funk an alle Empfangsknoten versendet. Zusätzlich werden die drei niedrigstwertigen Bits des Counterwertes auf den LEDs angezeigt. Die Applikation ist aus mehreren Komponenten aufgebaut. Siehe dazu Abbildung 3.2.

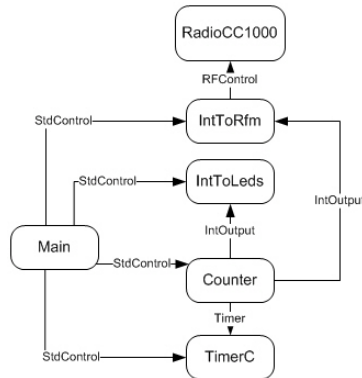


Abbildung 3.2: Knotenverknüpfung von CntToLedsAndRfm

3.3 TOSBase - Applikation

Die TOSBase Applikation ist als Schnittstelle zwischen das CC1000 Radio und der UART zu verstehen. Pakete oder besser Messages, die der CC1000 Radio empfängt, werden direkt an die UART weitergeleitet. Dies können Datenpakete

oder auch Commandmessages sein. Die TOSBase Applikation ist bidirektional. Pakete von der UART werden an das CC1000 Radio weitergeleitet und umgekehrt. In dieser Arbeit wurde die TOSBase Applikation vorwiegend dafür verwendet, den im Array platzierten Mica2 Knoten die Befehle `start_receiving` und `stop_receiving` senden zu können. In der Abbildung 3.3 ist aufgezeigt, aus welchen Komponenten sich die TOSBase-Applikation zusammensetzt.

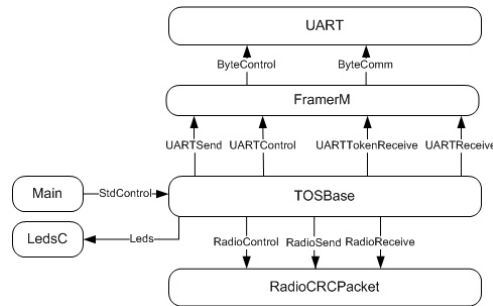


Abbildung 3.3: Knotenverknüpfung von TOSBase

3.4 BcastInject- Erweiterung

In diesem Abschnitt wird die Erweiterung des JAVA-Programms `BcastInject.java` erläutert. Das `BcastInject.java` Programm wird dazu verwendet, um den Empfangsknoten per Computer Befehle schicken zu können. Die Befehle werden dem `SerialForwarder` in Form von Javaobjekten übergeben. Dieser serialisiert die Objekte und sendet diese an die UART. Ein Mica2 Knoten, der die TOSBase - Applikation unterstützt, nimmt die Message in Empfang und sendet diese per CC1000 Radio den gewünschten Knoten.

Für diese Arbeit wurde das Programm soweit abgeändert, dass die Befehle `start_receiving`, `stop_receiving` und `read_log` verwendet werden können. Das Auslesen des RAMs ist so organisiert, dass pro Ausführung des Befehls `read_log` eine Zeile aus dem RAM des Knoten ausgelesen wurde. Der Befehl `read_log` wird so oft aufgerufen, bis der ganze RAM-Inhalt ausgelesen ist. Die ausgelesenen Daten wurden direkt in eine Datei mit der Endung `.log` gespeichert.

3.5 Analyze Field

Das in MATLAB programmierte Datei `Analyze_Field.m` wurde zum Analysieren der ausgelesenen Daten verwendet. Kombiniert mit der `poor_data` Funktion können damit alle in dieser Arbeit dokumentierten Resultate gewonnen werden. Nachdem die Daten der Knoten einzeln in Dateien ausgelesen wurden, können diese mit der `poor_data.m` Funktion aufbereitet werden. Die `poor_data.m` Funktion bereinigt fehlerhafte und ergänzt fehlende Pakete. Die Funktion bereitet zusätzlich die Daten für die Bilder sowie für die statistischen Analysen auf und speichert sie in bestimmte Dateien ab. Je nach Datenmenge ist der Funktionsablauf sehr rechen- sowie speicherintensiv. Sie sollte daher am besten nur auf leistungsstarken Rechnern ausgeführt werden.

Wurde die `poor_data.m` Funktion erfolgreich ausgeführt, können nun die Daten mit Hilfe der `Analyze_Field.m` Funktion ausgewertet werden. Die Funktion stellt mehrere Möglichkeiten zum Analysieren der Daten zur Verfügung. Diese sind in vier Routinen aufgeteilt. Dies sind die `MOVIE`- Routine, die `MISSED_PACKET`- Routine, die `STATISTICS`- Routine sowie die `BURST_ANALYSIS`- Routine.

In der `MOVIE`- Routine können Filme über den zeitlichen Verlauf des RSSI-Wertes im Array erstellt werden. Dabei wird pro versandtes Paket ein Bild berechnet, das den RSSI-Wert der Knoten im Array darstellt. Die gewonnenen Bilder werden dann zu einem Film zusammengefügt und als `AVI`- Datei abgespeichert. Zusätzlich wird eine Grafik erstellt, die den zeitlichen Mittelwert des RSSI-Wertes aller Knoten darstellt.

In der `MISSED_PACKET`- Routine kann eine Grafik erstellt werden, die dreidimensional darstellt, welcher Knoten wie viele Pakete verloren hat. Da die Anzahl der verlorenen Pakete für jeden Knoten einen diskreten Wert darstellt, wurden diese Werte mit Hilfe eines Interpolationsverfahrens approximiert. Die Grafik zeigt die an die Werte der Knoten approximierte Fläche.

Die `STATISTICS`- Routine ist die wichtigste dieser Arbeit. In ihr werden alle Korrelationskoeffizienten unter den Nachbarknoten des Arrays berechnet, in einer Matrix dargestellt und in eine Datei abgespeichert. Dasselbe wird auch mit dem Prozentkoeffizient gemacht. Dieser Koeffizient drückt die Wahrscheinlichkeit aus, zu wie viel Prozent zwei benachbarte Knoten die gleichen Pakete besitzen. Zusätzlich prüft die Routine die gestellte Hypothese auf der Basis der Korrelationskoeffizienten sowie der Prozentkoeffizienten. Das heißt, sie berechnet, im Fall eines Paketsverlusts, in wie vielen Fällen die Anwendung der Hypothese zum Erfolg führte. Der berechnete Wert bewegt sich zwischen 0 und 100 Prozent. Im Hypothesentest wird noch zusätzlich die zeitliche Veränderung des Korrelationskoeffizienten sowie des Prozentkoeffizienten veranschaulicht.

In der `BURST_ANALYSIS`- Routine wird der zeitliche Verlauf des RAM-Inhalts jedes Knotens visualisiert. Anhand dieser Visualisierungen kann nachvollzogen werden, wann und wie viele Pakete der Knoten empfangen hat. Durch diese Visualisierungen kann erkannt werden, ob der Knoten viele Pakete auf einmal oder mehr oder weniger dauernd immer wieder Pakete verpasst hat.

Anhand dieser Routinen konnten sehr viele Resultate gewonnen werden. Diese Resultate werden im nächsten Kapitel erläutert.

Kapitel 4

Resultate

In diesem Kapitel sind alle Messresultate der Messreihen zusammengefasst. Es wurden 6 Messungen in einer Tiefgarage durchgeführt und dann noch 2 in freier Natur. Zusätzlich wurde die Senderstärke variiert. Zwei Messungen wurden dadurch gestört, dass unvorhergesehen starke Reflexionen durch ein Auto verursacht wurden, welches sich zu nahe an der Messeinrichtung befand. Diese Messreihen sind zwar nicht so aussagekräftig, wie die anderen, sie werden jedoch trotzdem ausgeführt. Zudem wurden diese Messungen noch einmal wiederholt, wobei darauf geachtet wurde, dass keine Reflexionen durch Autos zu Stande kamen.

Das Kapitel ist so aufgeteilt, dass alle Messungen nacheinander dokumentiert sind.

4.1 1. Messung

Bei der ersten Messung wurde die Sendestärke auf 255 eingestellt. Bei dieser Messung wurden 2000 Pakete an alle 36 Empfängerknöten geschickt. Es wurde erwartet, dass sich bei dieser Messung das beste Resultat zeigt. Das heißt, die Knöten empfangen fast alle Pakete, die vom Sender verschickt wurden. Wie die unteren Abbildungen zeigen, werden die Erwartungen ziemlich gut erfüllt.

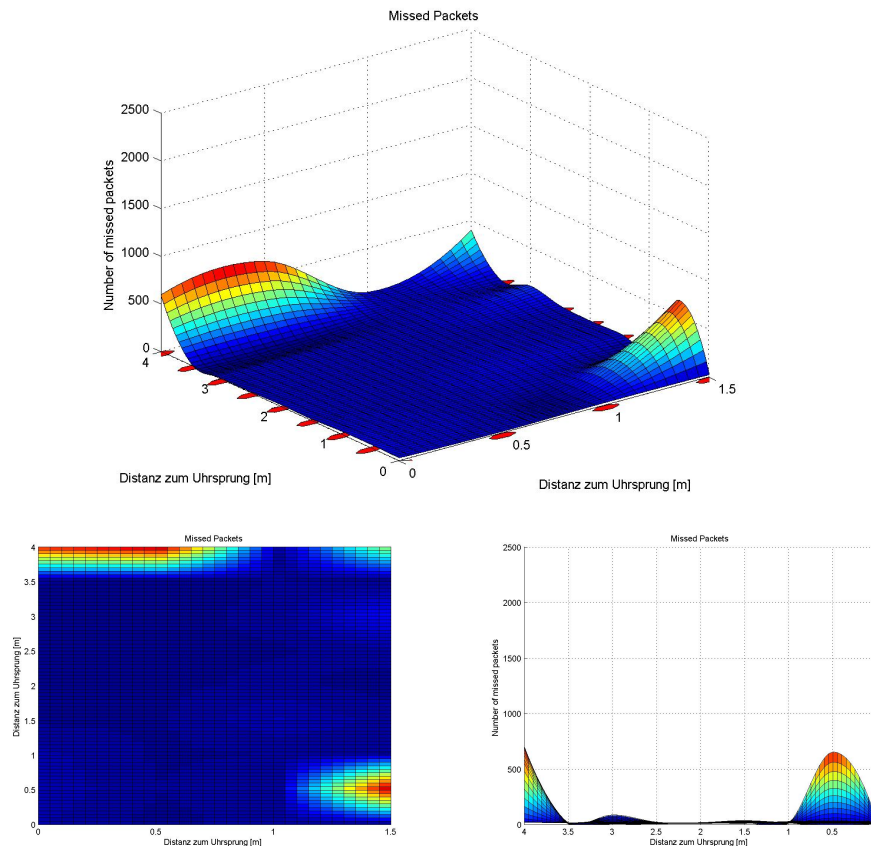


Abbildung 4.1: Grafische Plots des Paketverlusts der Messung in einer Tiefgarage mit Senderstärke von 255. Auf der oberen Abbildung ist der Paketverlust dreidimensional dargestellt. Die linke der beiden kleineren Abbildungen zeigt die Paketverluste zweidimensional. Die rechte zeigt den dreidimensionalen Paketverlust von der Seite her betrachtet.

4.1.1 Korrelationskoeffizient

Aus der Abbildung 4.2 ist der Korrelationskoeffizient zwischen zwei Nachbarknoten ersichtlich. In dieser Abbildung sieht man, ob der Datenverlust der Knoten voneinander abhängen. Wird ein Paket von mehreren benachbarte Knoten nicht empfangen, so besteht in diesem Sinn eine Abhängigkeit zwischen den Knoten.

Das heisst, der Korrelationskoeffizient wird in der Nähe von 1 liegen. Wie aus der Grafik ersichtlich ist, bewegen sich die Werte der Koeffizient nahe um Null herum. Daher kann man davon ausgehen, dass die Knoten gar keine, oder unabhängig voneinander Pakete verlieren.

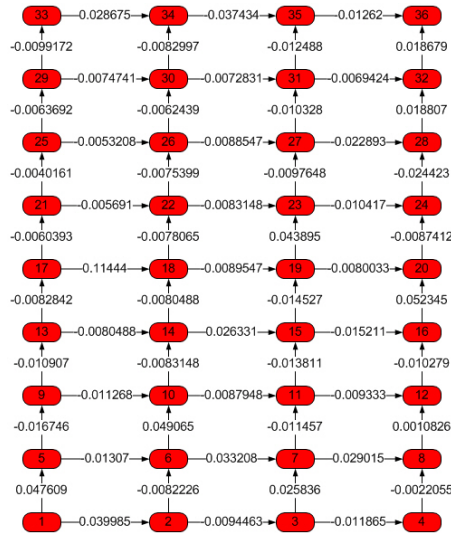


Abbildung 4.2: Korrelation zwischen den Knoten

4.1.2 Prozentualer Datenvergleich

Aus der Abbildung 4.3 ist ersichtlich, inwiefern die Datensätze der einzelnen Nachbarknoten übereinstimmen. Besitzen zwei Nachbarknoten die gleichen Pakete, so wird der Koeffizient den Wert 100 % haben. Betrachtet man diese Abbildung zusammen mit der linken unteren Grafik der Abbildung 4.1 so wird man feststellen, dass die Koeffizienten genau in diesen Regionen ziemlich tief sind, wo die Steigung der Fläche sehr gross ist. Das ist damit zu begründen, dass Knoten, die sehr viele Pakete empfangen haben, untereinander hohe Koeffizienten haben. Knoten die nur wenige Pakete empfangen haben, besitzen untereinander auch hohe Koeffizienten. Dazwischen liegende Knoten haben eher tiefe Koeffizienten.

4.1.3 Hypothesenverifizierung:

Für diese Messung wurde die Hypothese für jedes Paket getestet, das von einem Knoten nicht empfangen wurde. Aus Abbildung 4.1 ist ersichtlich, dass die Knoten sehr viele Pakete empfangen haben.

Korrelationskoeffizient als Basis der Hypothese

In diesem Test traf die Hypothese zu 98.864% der Fälle zu.

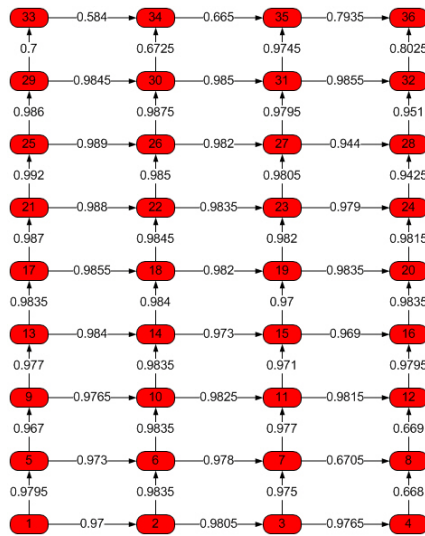


Abbildung 4.3: Prozentualer Datenvergleich zwischen den Knoten

Prozentualer Datenvergleich als Basis der Hypothese

In diesem Test traf die Hypothese zu 84.43% der Fälle zu.

4.2 2. Messung

Bei der zweiten Messung wurde die Sendestärke auf 50 reduziert. Es wurde erwartet, dass die Knoten deutlich mehr Pakete verpassen als bei voller Sendestärke. Wie die unteren Bilder zeigen, werden die Erwartungen erfüllt.

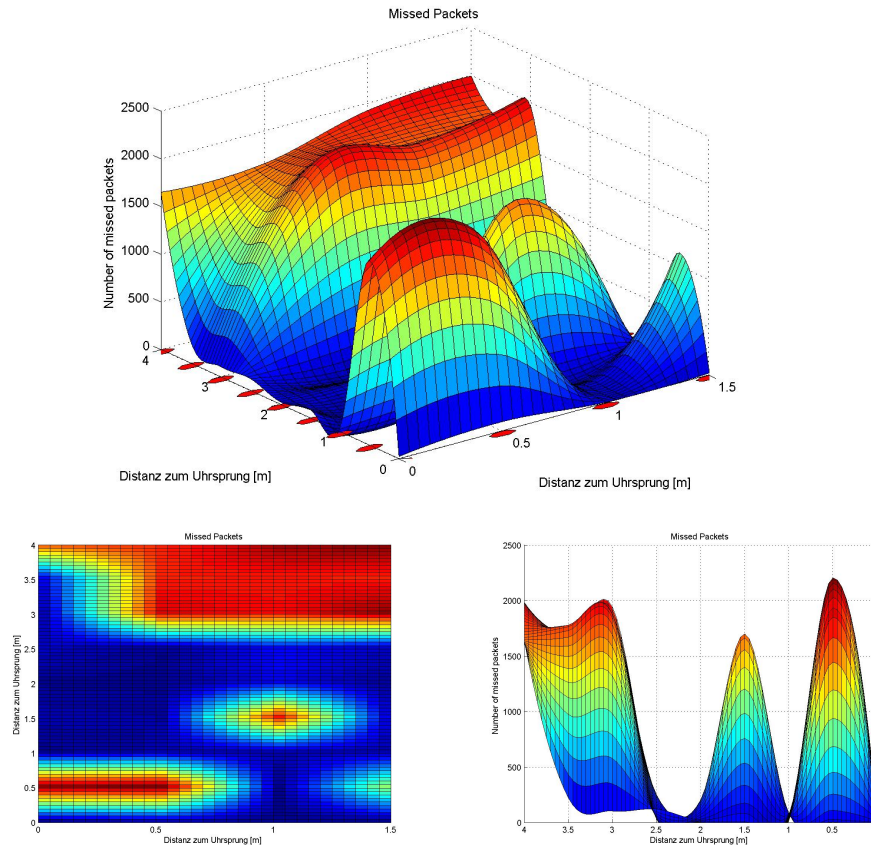


Abbildung 4.4: Grafische Plots des Paketverlusts der Messung in einer Tiefgarage mit Senderstärke von 50. Auf der oberen Abbildung ist der Paketverlust dreidimensional dargestellt. Die linke der beiden kleineren Abbildungen zeigt die Paketverluste zweidimensional. Die rechte zeigt den dreidimensionalen Paketverlust von der Seite her betrachtet.

4.2.1 Korrelationskoeffizient

Aus der Abbildung 4.5 sind die Korrelationskoeffizienten zwischen je zwei Nachbarknoten ersichtlich. Sie zeigt, ob der Datenverlust der Knoten voneinander abhängt. Wird ein Paket von mehreren benachbarte Knoten nicht empfangen, so besteht in diesem Sinn eine Abhängigkeit zwischen den Knoten.

Die Werte der Koeffizienten bewegen sich nahe um Null herum. Daher kann man davon ausgehen, dass die Knoten gar keine, oder unabhängig voneinander

Pakete verlieren.

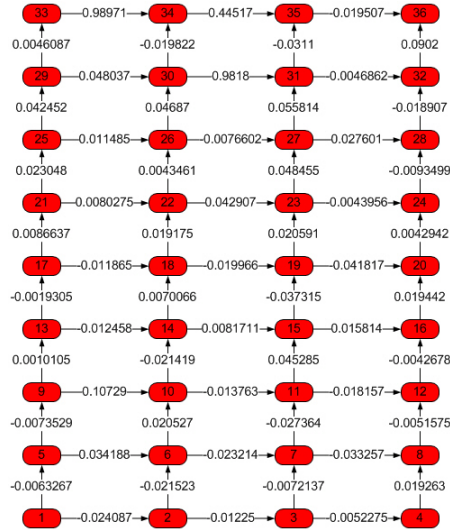


Abbildung 4.5: Korrelation zwischen den Knoten

4.2.2 Prozentualer Datenvergleich

Abbildung 4.6 zeigt, inwiefern die Datensätze der einzelnen Nachbarknoten übereinstimmen. Betrachtet man diese Abbildung zusammen mit der linken unteren Grafik der Abbildung 4.4 so wird man feststellen, dass die Koeffizienten genau in diesen Regionen ziemlich tief sind, wo die Steigung der Fläche sehr gross ist. Das ist damit zu begründen, dass Knoten, die sehr viele Pakete empfangen, untereinander hohe Koeffizienten haben. Knoten die nur wenige Pakete empfangen, besitzen untereinander auch hohe Koeffizienten. Dazwischenliegende Knoten haben eher tiefe Koeffizienten.

4.2.3 Hypothesenverifizierung:

Für diese Messung wurde die Hypothese für jedes nicht empfangene Paket getestet. Die Hypothese wurde auf der Basis des Korrelationskoeffizienten wie auch auf der Basis des prozentualen Datenvergleichs getestet.

Korrelationskoeffizient als Basis der Hypothese

In diesem Test traf die Hypothese zu 54.985% der Fälle zu.

Prozentualer Datenvergleich als Basis der Hypothese

In diesem Test traf die Hypothese zu 63.779% der Fälle zu.

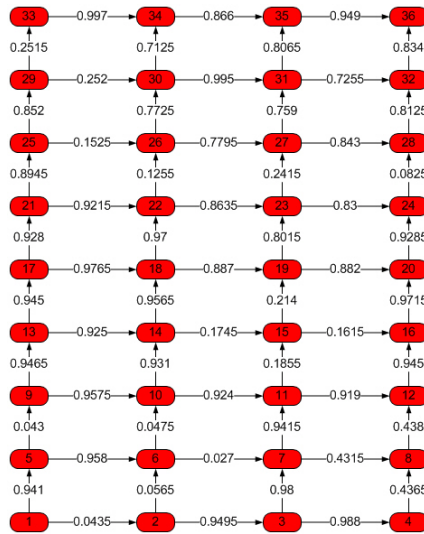


Abbildung 4.6: Korrelation zwischen den Knoten

4.3 3. Messung

Bei der dritten Messung wurde die Sendestärke auf 30 reduziert. Es wurde erwartet, dass die Knoten deutlich mehr Pakete verpassen als bei voller und reduzierter Sendestärke. Wie die unteren Bilder zeigen, werden die Erwartungen nicht erfüllt. Durch die nachfolgende Interpretation der Ergebnisse kam man auf den Schluss, dass durch Reflexionen von Autos die Ergebnisse deutlich beeinflusst wurden.

4.3.1 Korrelationskoeffizient

Aus der Abbildung 4.8 sind die Korrelationskoeffizienten zwischen je zwei Nachbarknoten ersichtlich. Sie zeigt, ob der Datenverlust der Knoten voneinander abhängen. Wird ein Paket von mehreren benachbarten Knoten nicht empfangen, so besteht in diesem Sinn eine Abhängigkeit zwischen den Knoten.

Die Werte der Koeffizienten bewegen sich nahe um Null herum. Daher kann man davon ausgehen, dass die Knoten gar keine, oder unabhängig voneinander Pakete verlieren.

4.3.2 Prozentualer Datenvergleich

Abbildung 4.9 zeigt, inwiefern die Datensätze der einzelnen Nachbarknoten übereinstimmen. Betrachtet man diese Abbildung zusammen mit der linken unteren Grafik der Abbildung 4.7 so wird man feststellen, dass die Koeffizienten genau in diesen Regionen ziemlich tief sind, wo die Steigung der Fläche sehr groß ist. Das ist damit zu begründen, dass Knoten, die sehr viele Pakete empfangen, untereinander hohe Koeffizienten haben. Knoten die nur wenige Pakete

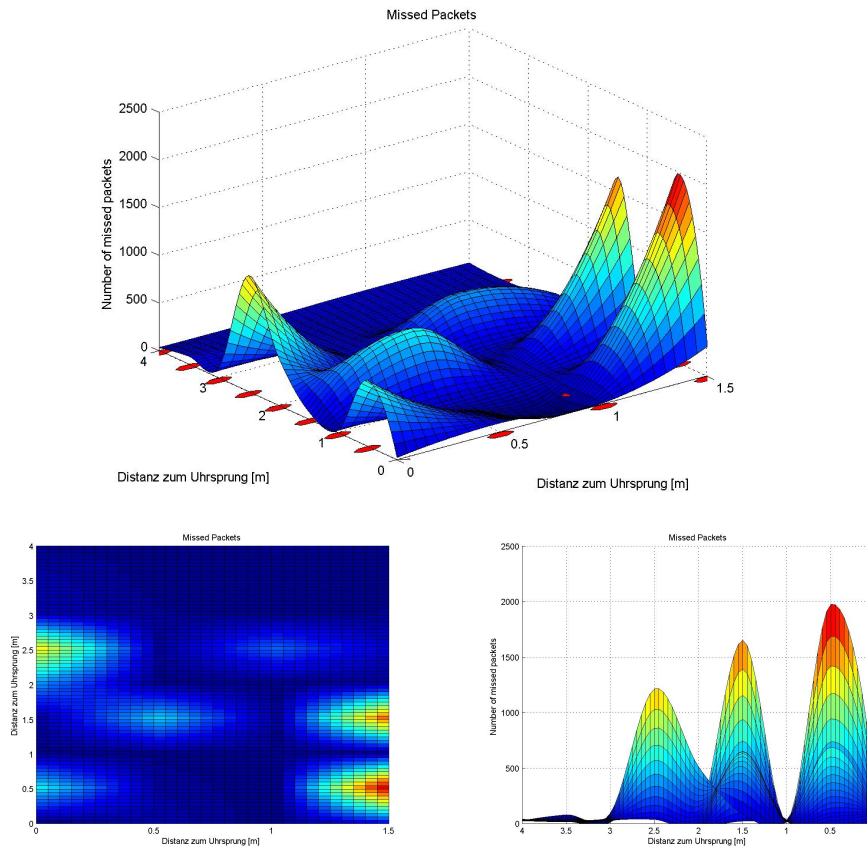


Abbildung 4.7: Grafische Plots des Paketverlusts der Messung in einer Tiefgarage mit Senderstärke von 30. Auf der oberen Abbildung ist der Paketverlust dreidimensional dargestellt. Die linke der beiden kleineren Abbildungen zeigt die Paketverluste zweidimensional. Die rechte zeigt den dreidimensionalen Paketverlust von der Seite her betrachtet.

empfangen, besitzen untereinander auch hohe Koeffizienten. Dazwischenliegende Knoten haben eher tiefe Koeffizienten.

4.3.3 Hypothesenverifizierung:

Für diese Messung wurde die Hypothese für jedes nicht empfangene Paket getestet. Die Hypothese wurde auf der Basis des Korrelationskoeffizienten wie auch auf der Basis des prozentualen Datenvergleichs getestet.

Korrelationskoeffizient als Basis

In dieser Messung traf die Hypothese zu 85.137% der Fälle zu.

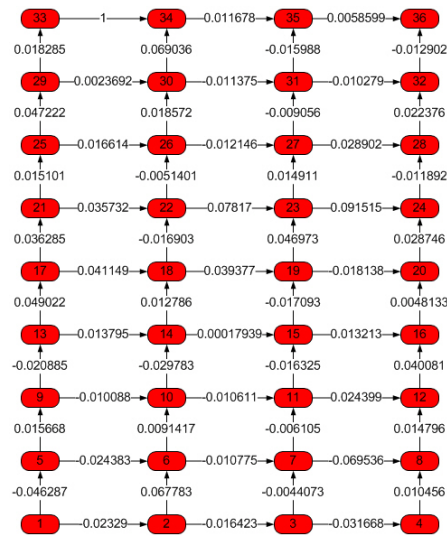


Abbildung 4.8: Korrelation zwischen den Knoten

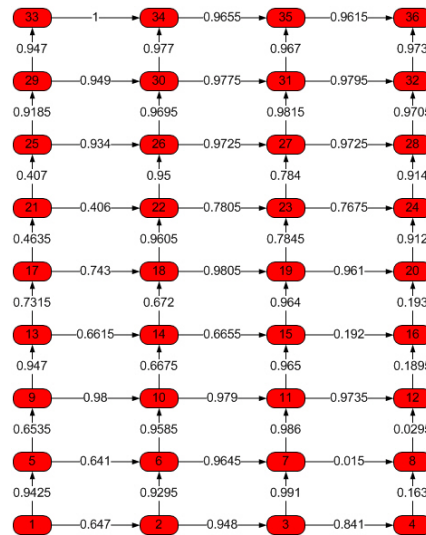


Abbildung 4.9: Prozentualer Datenvergleich zwischen den Knoten

Prozentualer Datenvergleich als Basis

In dieser Messung traf die Hypothese zu 86.216% der Fälle zu.

4.4 4. Messung

Die vierte Messung ist eine Wiederholung der dritten Messung, da bei dieser die Resultate sehr unerwartet ausgefallen sind. Diesmal wurde jedoch darauf geachtet, dass keine Reflexionen von Autos mehr auftreten können. Bei der vierten Messung wurde die Sendestärke erneut auf 30 eingestellt. Es wurde erwartet, dass keine unvorhersehbare und schwer interpretierbare Reflexionen von Autos auftreten.

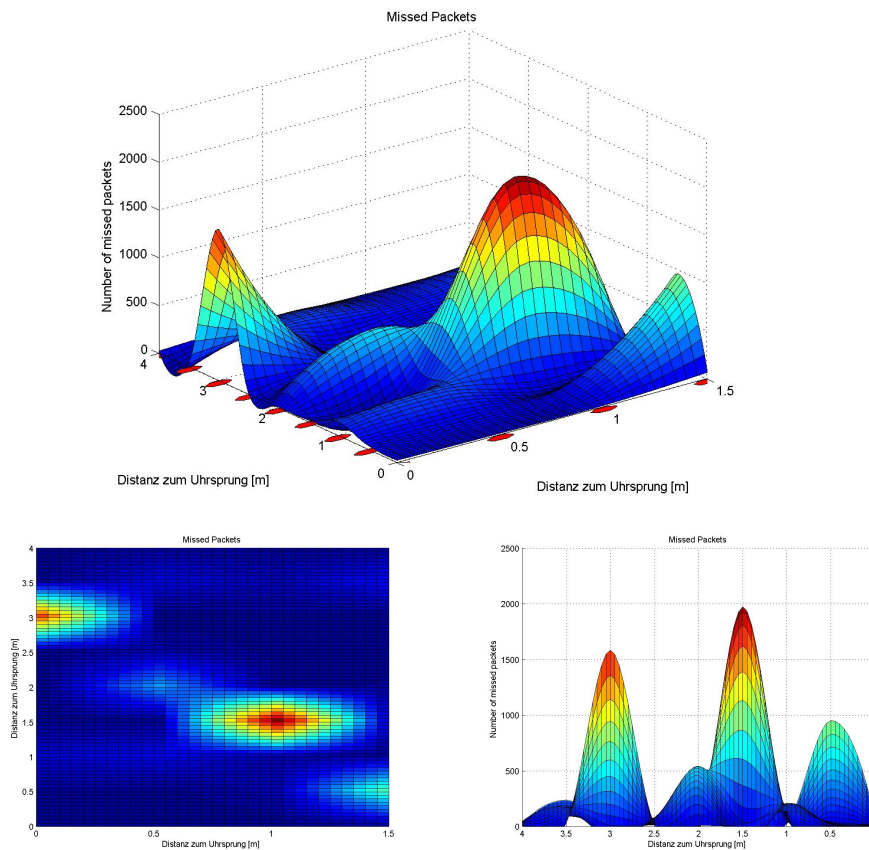


Abbildung 4.10: Grafische Plots des Paketverlusts der Messung in einer Tiefgarage mit Senderstärke von 30. Die grosse Abbildung zeigt die Paketverluste dreidimensional dargestellt. Die linke der beiden kleineren Abbildungen zeigt die Paketverluste zweidimensional. Die rechte zeigt den dreidimensionalen Paketverlust von der Seite her betrachtet.

4.4.1 Korrelationskoeffizient

Aus der Abbildung 4.11 sind die Korrelationskoeffizienten zwischen je zwei Nachbarknoten ersichtlich. Sie zeigt, ob der Datenverlust der Knoten voneinander abhängen. Wird ein Paket von mehreren benachbarte Knoten nicht emp-

fangen, so besteht in diesem Sinn eine Abhängigkeit zwischen den Knoten. Die Werte der Koeffizienten bewegen sich nahe um Null herum. Daher kann man davon ausgehen, dass die Knoten gar keine, oder unabhängig voneinander Pakete verlieren.

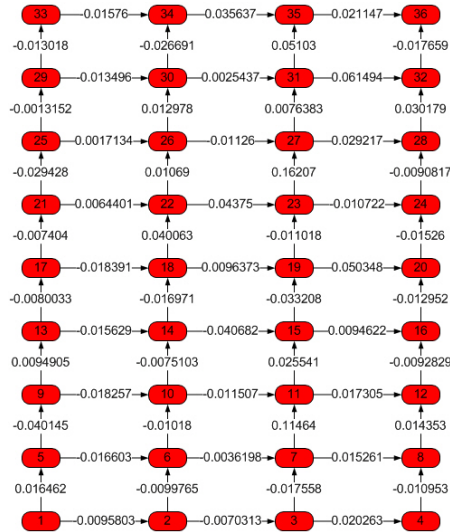


Abbildung 4.11: Korrelation zwischen den Knoten

4.4.2 Prozentualer Datenvergleich

Abbildung 4.12 zeigt, inwiefern die Datensätze der einzelnen Nachbarknoten übereinstimmen. Betrachtet man diese Abbildung zusammen mit der unteren linken Grafik Abbildung 4.10 so wird man feststellen, dass die Koeffizienten genau in diesen Regionen ziemlich tief sind, wo die Steigung der Fläche sehr gross ist. Das ist damit zu begründen, dass Knoten, die sehr viele Pakete empfangen, untereinander hohe Koeffizienten haben. Knoten die nur wenige Pakete empfangen, besitzen untereinander auch hohe Koeffizienten. Dazwischenliegende Knoten haben eher tiefe Koeffizienten.

4.4.3 Hypothesenverifizierung:

Für diese Messung wurde die Hypothese für jedes nicht empfangene Paket getestet. Die Hypothese wurde auf der Basis des Korrelationskoeffizienten wie auch auf der Basis des prozentualen Datenvergleichs getestet.

Korrelationskoeffizient als Basis der Hypothese

In dieser Messung traf die Hypothese zu 97.149% der Fälle zu.

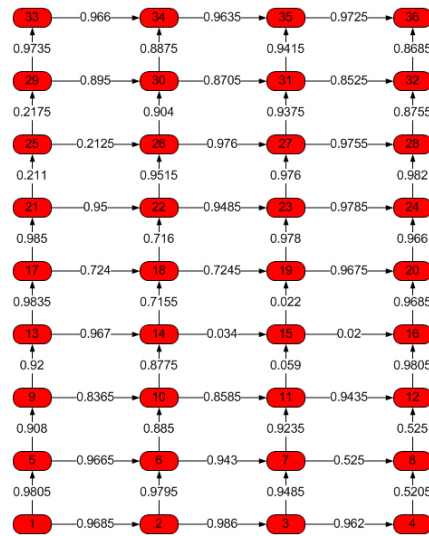


Abbildung 4.12: Prozentualer Datenvergleich zwischen den Knoten

Prozentualer Datenvergleich als Basis der Hypothese

In dieser Messung traf die Hypothese zu 92.778% der Fälle zu.

4.5 5. Messung

Bei der fünften Messung wurde die Sendestärke auf 10 eingestellt. Es wurde erwartet, dass die Knoten deutlich mehr Pakete verpassen, als bei einer Sendestärke von 30. Wie die unteren Bilder zeigen, werden die Erwartungen wieder nicht erfüllt. Durch die nachfolgende Interpretation der Ergebnisse kam man auf den Schluss, dass wieder durch Reflexionen von Autos die Ergebnisse deutlich beeinflusst wurden.

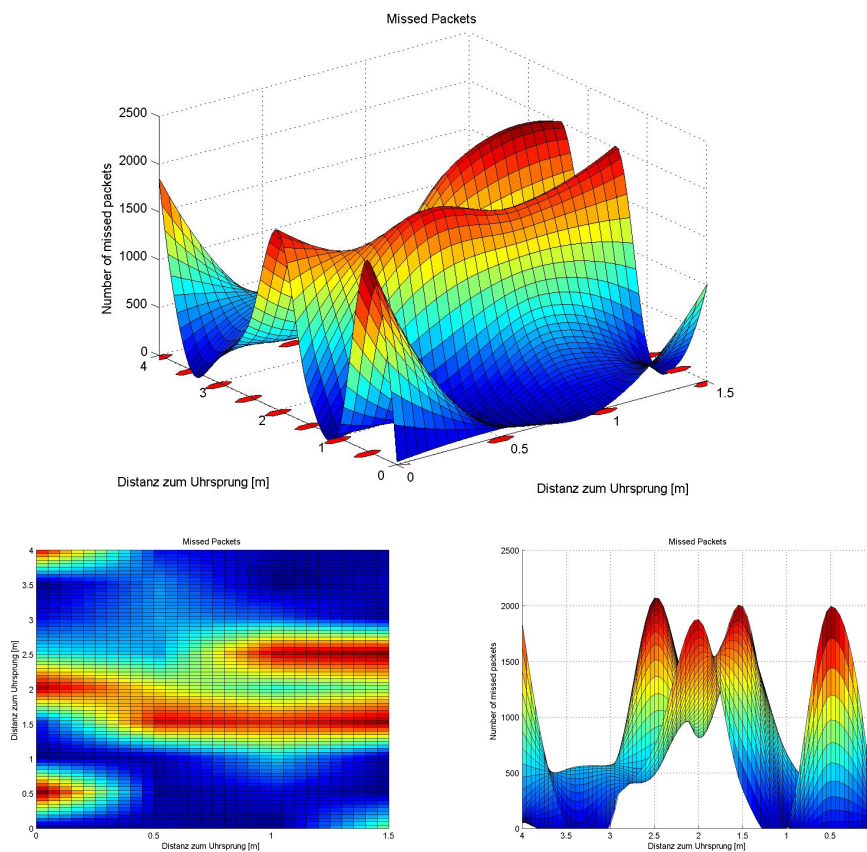


Abbildung 4.13: Grafische Plots des Paketverlusts der Messung in einer Tiefgarage mit Senderstärke von 10. Die grosse Abbildung zeigt die Paketverluste dreidimensional dargestellt. Die linke der beiden kleineren Abbildungen zeigt die Paketverluste zweidimensional. Die rechte zeigt den dreidimensionalen Paketverlust von der Seite her betrachtet.

4.5.1 Korrelationskoeffizient

Aus der Abbildung 4.14 sind die Korrelationskoeffizient zwischen je zwei Nachbarknoten ersichtlich. Sie zeigt, ob der Datenverlust der Knoten voneinander abhängen. Wird ein Paket von mehreren benachbarte Knoten nicht empfangen,

so besteht in diesem Sinn eine Abhängigkeit zwischen den Knoten. Die Werte der Koeffizienten bewegen sich nahe um Null herum. Daher kann man davon ausgehen, dass die Knoten gar keine, oder unabhängig voneinander Pakete verlieren.

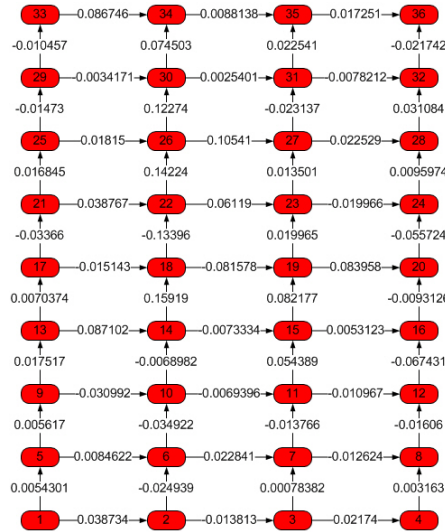


Abbildung 4.14: Korrelation zwischen den Knoten

4.5.2 Prozentualer Datenvergleich

Abbildung 4.15 zeigt, inwiefern die Datensätze der einzelnen Nachbarknoten übereinstimmen. Betrachtet man diese Abbildung zusammen mit der unteren linken Grafik der Abbildung 4.13 so wird man feststellen, dass die Koeffizienten genau in diesen Regionen ziemlich tief sind, wo die Steigung der Fläche sehr gross ist. Das ist damit zu begründen, dass Knoten, die sehr viele Pakete empfangen, untereinander hohe Koeffizienten haben. Knoten die nur wenige Pakete empfangen, besitzen untereinander auch hohe Koeffizienten. Dazwischenliegende Knoten haben eher tiefe Koeffizienten.

4.5.3 Hypothesenverifizierung:

Für diese Messung wurde die Hypothese für jedes nicht empfangene Paket getestet. Die Hypothese wurde auf der Basis des Korrelationskoeffizienten wie auch auf der Basis des prozentualen Datenvergleichs getestet.

Korrelationskoeffizient als Basis der Hypothese

In dieser Messung traf die Hypothese zu 64.453% der Fälle zu.

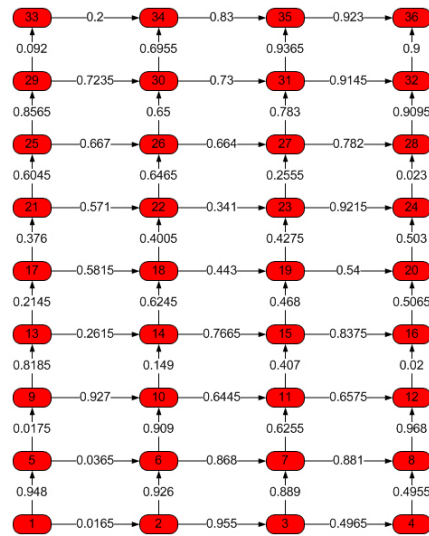


Abbildung 4.15: Korrelation zwischen den Knoten

Prozentualer Datenvergleich als Basis der Hypothese

In dieser Messung traf die Hypothese zu 69.856% der Fälle zu.

4.6 6. Messung

Die sechste Messung ist eine Wiederholung der fünften Messung, da bei dieser die Resultate sehr unerwartet ausgefallen sind. Diesmal wurde jedoch darauf geachtet, dass keine Reflexionen von Autos mehr auftreten können. Bei der sechsten Messung wurde die Sendestärke erneut auf 10 eingestellt. Es wurde erwartet, dass das Ergebnis besser ausfallen sollte als bei der dritten Messung. Das heisst, es treten keine unvorhersehbare und schwer interpretierbare Reflexionen von Autos auf.

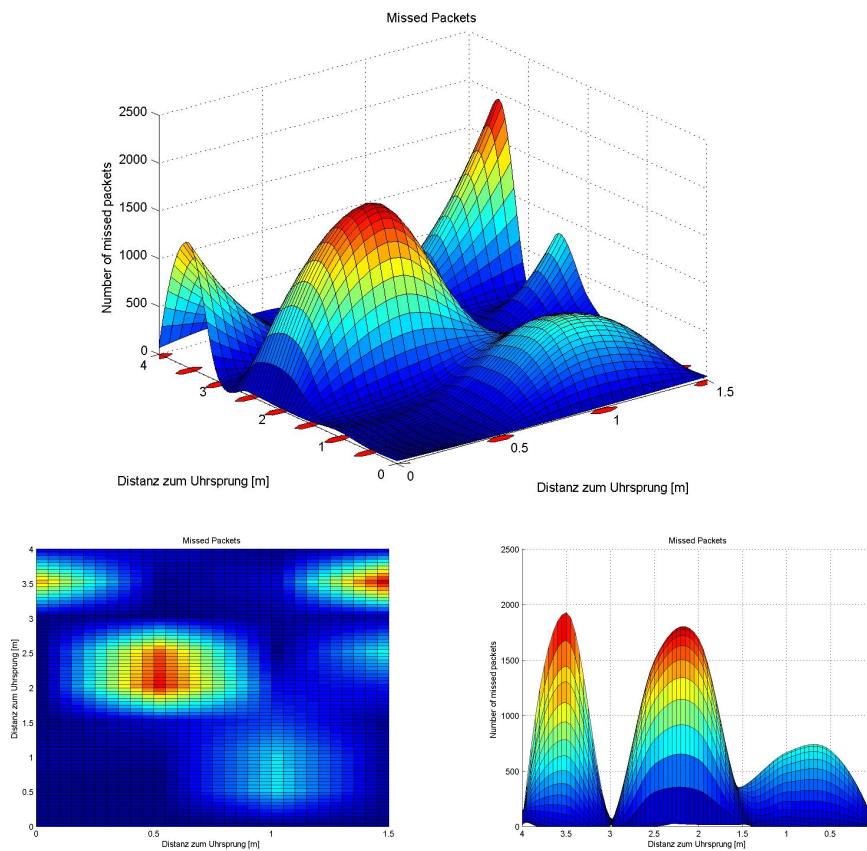


Abbildung 4.16: Grafische Plots des Paketverlusts der Messung in einer Tiefgarage mit Senderstärke von 10. Die grosse Abbildung zeigt die Paketverluste dreidimensional dargestellt. Die linke der beiden kleineren Abbildungen zeigt die Paketverluste zweidimensional. Die rechte zeigt den dreidimensionalen Paketverlust von der Seite her betrachtet.

4.6.1 Korrelationskoeffizient

Aus der Abbildung 4.17 sind die Korrelationskoeffizienten zwischen je zwei Nachbarknoten ersichtlich. Sie zeigt, ob der Datenverlust der Knoten vonein-

ander abhängen. Wird ein Paket von mehreren benachbarte Knoten nicht empfangen, so besteht in diesem Sinn eine Abhängigkeit zwischen dan Knoten. Die Werte der Koeffizienten bewegen sich nahe um Null herum. Daher kann man davon ausgehen, dass die Knoten gar keine, oder unabhängig voneinander Pakete verlieren.

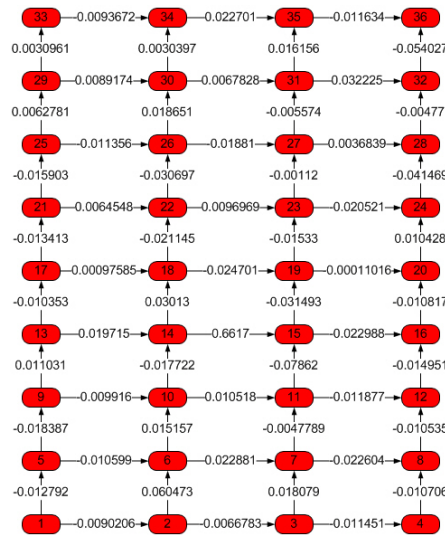


Abbildung 4.17: Korrelation zwischen den Knoten

4.6.2 Prozentualer Datenvergleich

Abbildung 4.18 zeigt, inwiefern die Datensätze der einzelnen Nachbarknoten übereinstimmen. Betrachtet man diese Abbildung zusammen mit der unteren linken Grafik der Abbildung 4.16 so wird man feststellen, dass die Koeffizienten genau in diesen Regionen ziemlich tief sind, wo die Steigung der Fläche sehr gross ist. Das ist damit zu begründen, dass Knoten, die sehr viele Pakete empfangen, untereinander hohe Koeffizienten haben. Knoten die nur wenige Pakete empfangen, besitzen untereinander auch hohe Koeffizienten. Dazwischenliegende Knoten haben eher tiefe Koeffizienten.

4.6.3 Hypothesenverifizierung:

Für diese Messung wurde die Hypothese für jedes nicht empfangene Paket getestet, das von einem Knoten nicht empfangen wurde. Die Hypothese wurde auf der Basis des Korrelationskoeffizienten wie auch auf der Basis des prozentualen Datenvergleichs getestet.

Korrelationskoeffizient als Basis der Hypothese

In dieser Messung traf die Hypothese zu 91.383% der Fälle zu.

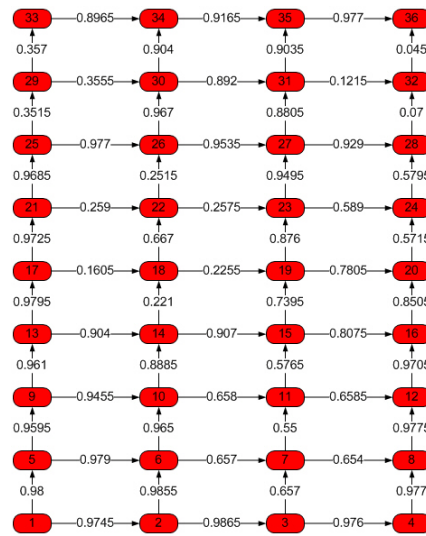


Abbildung 4.18: Prozentualer Datenvergleich zwischen den Knoten

Prozentualer Datenvergleich als Basis der Hypothese

In dieser Messung traf die Hypothese zu 84.265% der Fälle zu.

4.7 7. Messung

In der siebten Messung wurde im Freien, auf einer Terrasse des ETL- Gebäudes gemessen. Da in einer Tiefgarage die Wände ebenfalls reflektieren und das Ergebnis beeinflussen, wurde eine Messung im Freien notwendig. Die Messung war dadurch frei von Reflexionen, jedoch konnten nun Störungen aus der Umgebung das Ergebnis beeinträchtigen. Die Sendestärke wurde auf 5 reduziert. Dadurch wurde die Reichweite des Sender so stark vermindert, dass die Pakete nur noch in der vorderen Hälfte des Arrays empfangen wurden. Wie aus der Abbildung 4.19 ersichtlich ist, dass die Pakete ab einer Distanz von 4 Meter zum Sender nicht mehr richtig empfangen wurden.

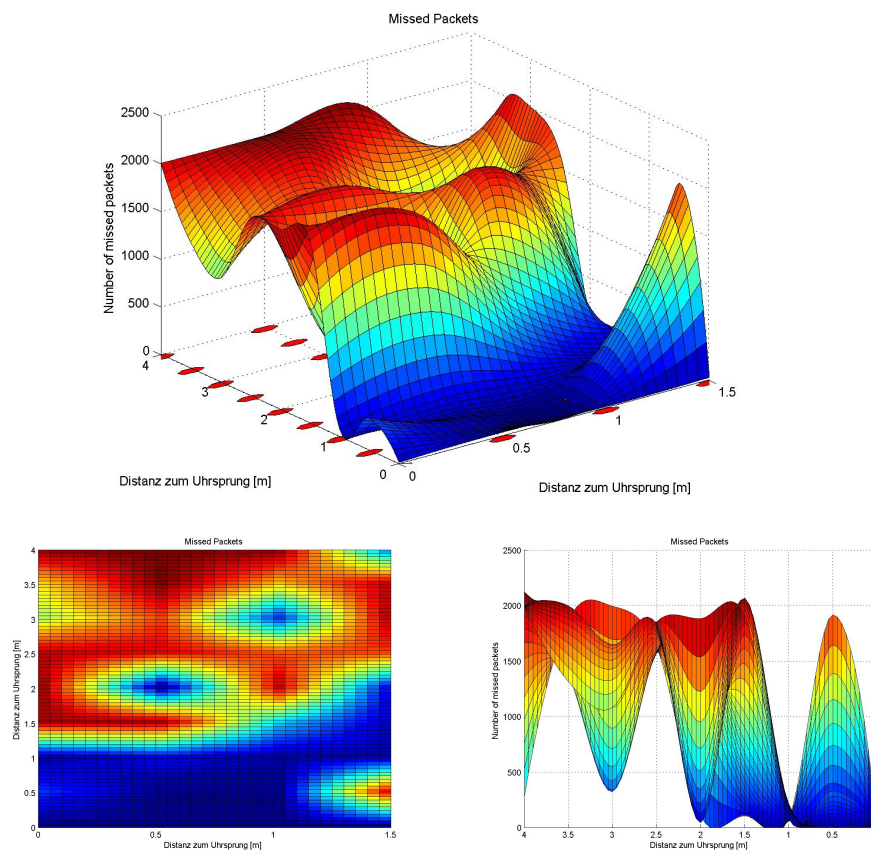


Abbildung 4.19: Grafische Plots des Paketverlusts der Messung im Freien mit Senderstärke von 5. Die grosse Abbildung zeigt die Paketverluste dreidimensional dargestellt. Die linke der beiden kleineren Abbildungen zeigt die Paketverluste zweidimensional. Die rechte zeigt den dreidimensionalen Paketverlust von der Seite her betrachtet.

4.7.1 Korrelationskoeffizient

Aus der Abbildung 4.20 sind die Korrelationskoeffizienten zwischen je zwei Nachbarknoten ersichtlich. Sie zeigt, ob der Datenverlust der Knoten voneinander abhängen. Wird ein Paket von mehreren benachbarte Knoten nicht empfangen, so besteht in diesem Sinn eine Abhängigkeit zwischen den Knoten. Die Werte der Koeffizienten bewegen sich nahe um Null herum. Daher kann man davon ausgehen, dass die Knoten gar keine, oder unabhängig voneinander Pakete verlieren.

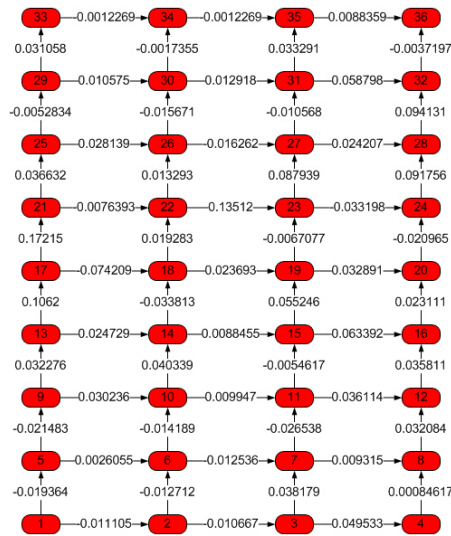


Abbildung 4.20: Korrelation zwischen den Knoten

4.7.2 Prozentualer Datenvergleich

Abbildung 4.21 zeigt, inwiefern die Datensätze der einzelnen Nachbarknoten übereinstimmen. Betrachtet man diese Abbildung zusammen mit der unteren linken Grafik der Abbildung 4.19 so wird man feststellen, dass die Koeffizienten genau in diesen Regionen ziemlich tief sind, wo die Steigung der Fläche sehr gross ist. Das ist damit zu begründen, dass Knoten, die sehr viele Pakete empfangen, untereinander hohe Koeffizienten haben. Knoten die nur wenige Pakete empfangen, besitzen untereinander auch hohe Koeffizienten. Dazwischenliegende Knoten haben eher tiefe Koeffizienten.

4.7.3 Hypothesenverifizierung:

Für diese Messung wurde die Hypothese für jedes nicht empfangene Paket getestet. Aus Abbildung 4.1 ist ersichtlich, dass die Knoten sehr viele Pakete empfangen haben.

Korrelationskoeffizient als Basis der Hypothese

In dieser Messung traf die Hypothese zu 40.876% der Fälle zu.

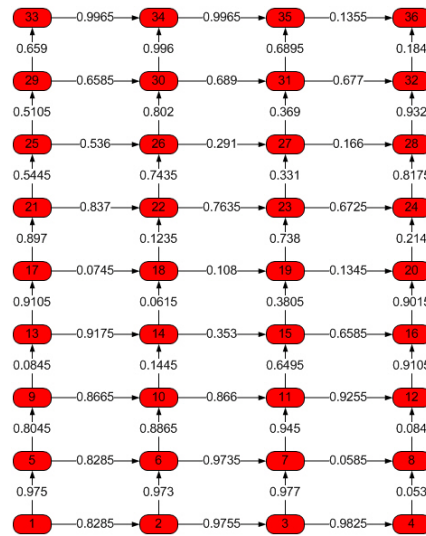


Abbildung 4.21: Prozentualer Datenvergleich zwischen den Knoten

Prozentualer Datenvergleich als Basis der Hypothese

In dieser Messung traf die Hypothese zu 69.655% der Fälle zu.

4.8 8. Messung

In der achten Messung wurde ebenfalls im Freien, auf einer Terrasse gemessen. Die Sendestärke wurde nun auf 3 reduziert, damit der Effekt der siebten Messung noch stärker zu beobachten ist. Wie aus der Abbildung 4.22 ersichtlich ist, dass die Pakete ab einer Distanz von 3 Meter zum Sender nicht mehr richtig detektiert wurden.

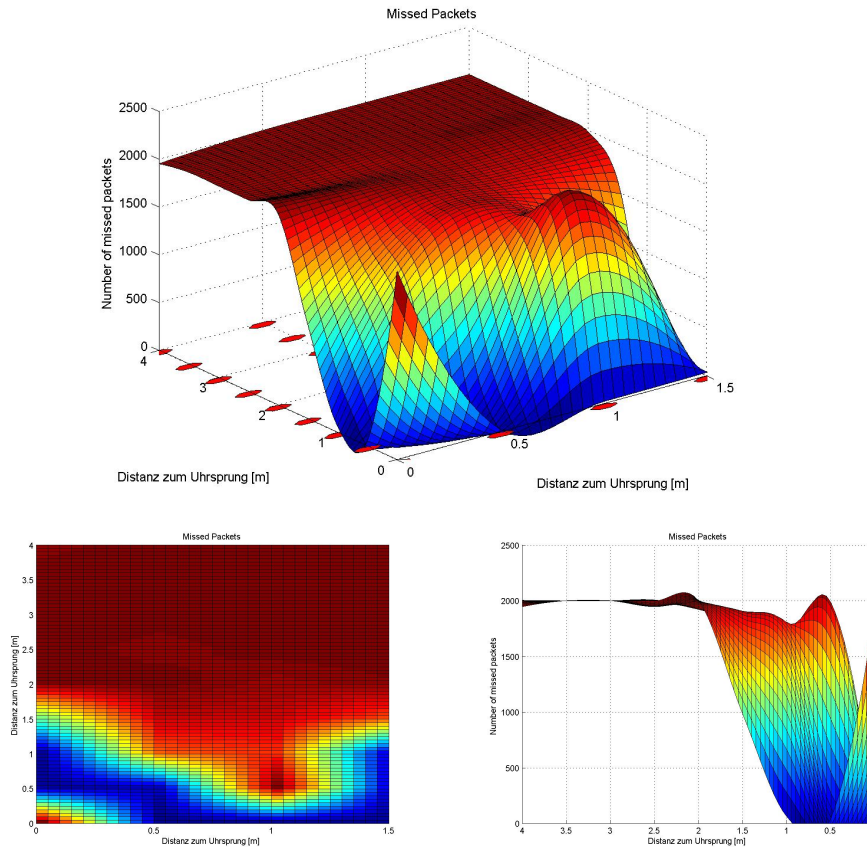


Abbildung 4.22: Grafische Plots des Paketverlusts der Messung im Freien mit Senderstärke von 3. Die grosse Abbildung zeigt die Paketverluste dreidimensional dargestellt. Die linke der beiden kleineren Abbildungen zeigt die Paketverluste zweidimensional. Die rechte zeigt den dreidimensionalen Paketverlust von der Seite her betrachtet.

4.8.1 Korrelationskoeffizient

Aus der Abbildung 4.23 sind die Korrelationskoeffizienten zwischen je zwei Nachbarknoten ersichtlich. Sie zeigt, ob der Datenverlust der Knoten voneinander abhängen. Wird ein Paket von mehreren benachbarte Knoten nicht empfangen, so besteht in diesem Sinn eine Abhängigkeit zwischen den Knoten. Die Werte der Koeffizienten bewegen sich nahe um Null herum. Daher kann

man davon ausgehen, dass die Knoten gar keine, oder unabhängig voneinander Pakete verlieren.

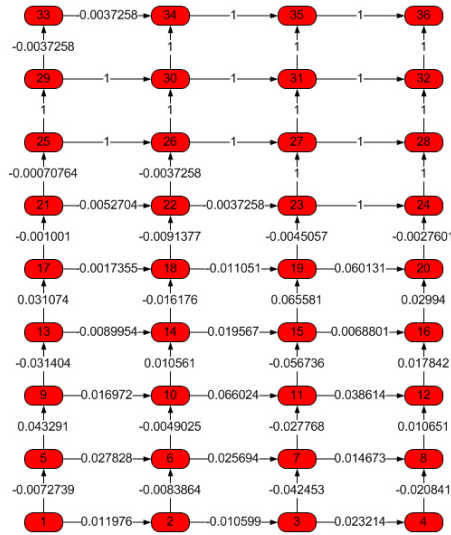


Abbildung 4.23: Korrelation zwischen den Knoten

4.8.2 Prozentualer Datenvergleich

Abbildung 4.24 zeigt, inwiefern die Datensätze der einzelnen Nachbarknoten übereinstimmen. Betrachtet man diese Abbildung zusammen mit der unteren linken Grafik der Abbildung 4.22 so wird man feststellen, dass die Koeffizienten genau in diesen Regionen ziemlich tief sind, wo die Steigung der Fläche sehr gross ist. Das ist damit zu begründen, dass Knoten, die sehr viele Pakete empfangen, untereinander hohe Koeffizienten haben. Knoten die nur wenige Pakete empfangen, besitzen untereinander auch hohe Koeffizienten. Dazwischenliegende Knoten haben eher tiefe Koeffizienten.

4.8.3 Hypothesenverifizierung:

Für diese Messung wurde die Hypothese für jedes nicht empfangene Paket getestet. Aus Abbildung 4.1 ist ersichtlich, dass die Knoten sehr viele Pakete empfangen haben.

Korrelationskoeffizient als Basis der Hypothese

In dieser Messung traf die Hypothese zu 13.728% der Fälle zu.

Prozentualer Datenvergleich als Basis der Hypothese

In dieser Messung traf die Hypothese zu 22.362% der Fälle zu.

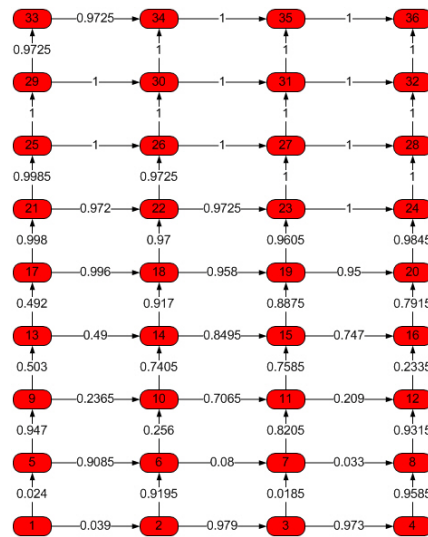


Abbildung 4.24: Prozentualer Datenvergleich zwischen den Knoten

Kapitel 5

Folgerungen

5.1 Messungen

Aus den acht Messungen und der daraus gewonnenen Information ist klar hervorgegangen, dass der Paketverlust eines Knotens rein zufällig und unabhängig von anderen Knoten ist. Dies lässt sich daraus schliessen, dass praktisch alle Korrelationskoeffizienten zwischen zwei Nachbarknoten nach einer gewissen Zeitspanne Werte um Null annehmen. Betrachtet man den zeitlichen Verlauf des Korrelationskoeffizienten zwischen den Daten zweier benachbarten Knoten, so ist festzustellen, dass er zu Beginn der Messung gleich eins ist, da die beiden Knoten praktisch die selben Datenpakete empfangen haben. Mit dem voranschreiten der Zeit, wird der RAM-Inhalt der Knoten immer wie unterschiedlicher und vor allem auch unabhängig. Dies ist daraus zu schliessen, dass sich der Korrelationskoeffizient immer mehr dem Wert Null nähert. Würde die Messung länger durchgeführt werden, so kann man davon ausgehen, dass der Korrelationskoeffizient zwischen den Daten der Knoten konstant bleibt. Das heisst, der Dateninhalt in des RAMs der benachbarten Knoten werden auch dann noch unabhängig sein.

Ein weiteres Indiz, welches diese Annahme stützt, beruht auf dem zeitlichen Verlauf des RAM-Inhalts der einzelnen Knoten. Betrachtet man den RAM-Inhalt mehrerer Knoten über die Zeitspanne einer Messung, so ist festzustellen, dass die einzelnen Knoten relativ konstant und zufällig Pakete verpassen. Daraus lässt sich ableiten, dass sich der Korrelationskoeffizient nicht stark ändert, da sich der Koeffizient nur beim Verlust von vielen sich folgenden Paketen verändern würde. Verpasst ein Knoten sehr viele Pakete auf einmal, so würde dieses starken Einfluss auf den Korrelationskoeffizient zu seinem Nachbarknoten haben. Dieses Ereignis würde sich in einer waagrechten Linie in der Abbildung 5.2 wieder spiegeln. Da dies aber nicht der Fall ist, ändert sich der Korrelationskoeffizient zwischen zwei benachbarten Knoten nicht abrupt, je länger die Messung dauert.

5.2 Hypothese

Wie aus den Messungen hervorgegangen ist, ist der Paketverlust der Knoten rein zufällig und unabhängig. Da kein systematischer Paketverlust vorhanden

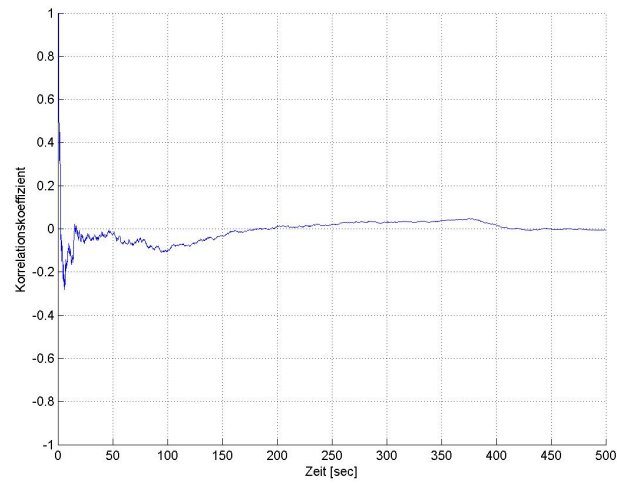


Abbildung 5.1: Rapresentativer zeitlicher Verlauf des Korrelationskoeffizient zwischen zwei benachbarten Knoten

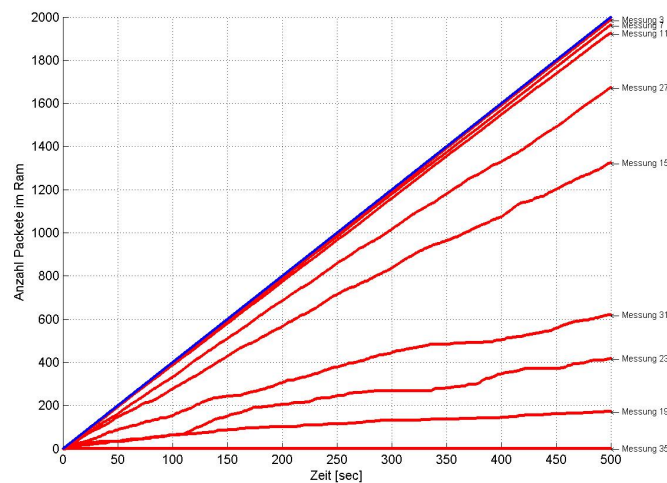


Abbildung 5.2: Zeitlicher Verlauf der Raminhalte

ist, gibt es kein systematisches Vorgehen, damit ein Knoten seine verpassten Pakete bei einem seiner Nachbarknoten beschaffen kann. Die beiden getesteten Hypothesen sind jedoch zwei systematische Vorgehensweisen und sind deshalb nicht brauchbar. Da der Paketverlust zufällig und unabhängig ist, bleibt einem Knoten nichts anderes übrig als einen zufälligen Nachbarknoten zu kontaktieren. Ob der Knoten beim Verpassen eines Paketes systematisch oder zufällig nach dem Paket sucht, spielt keine Rolle, da die Wahrscheinlichkeit eines Erfolges gleich gross ist. Würde es jedoch ein systematischer Paketverlust geben, so könnte der Knoten systematisch nach seinem Paket suchen und es mit grossem

Erfolg.

5.3 Messort

Die Messungen wurden in einer Tiefgarage wie auch im Freien auf einer Terrasse durchgeführt. Durch die unterschiedlichen Messorte waren die Messresultate stark verschieden.

Bei der Messung im Freien wurde klar festgestellt, dass ab einer gewissen Distanz des Empfängerknotens zum Sender der Paketverlust massiv zunimmt und mit zunehmender Distanz grösser wird.

Bei der Messung in der Tiefgarage wurde festgestellt, dass keine solche Distanz klar auszumachen ist. Durch die starken Reflexionen an den Wänden der Tiefgarage, empfangen Knoten praktisch unabhängig von der Distanz zum Sender sehr viele oder praktisch keine Pakete. Das heisst, im Innern eines Raumes sind die Ausbreitungseigenschaften der Pakete deutlich anders und zu berücksichtigen. In der Abbildung 5.3 ist dieser Unterschied dargestellt.

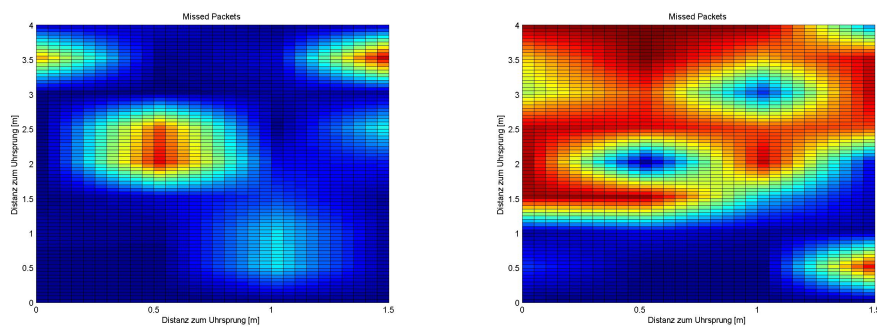


Abbildung 5.3: In dieser Abbildung ist der zweidimensionale Paketverlust dargestellt. Die linke Grafik zeigt den Paketverlust der Messung in der Tiefgarage bei einer Sänderstärke von 10. Die rechte Grafik zeigt den Paketverlust der Messung auf der Terrasse bei einer Sänderstärke von 5.

Kapitel 6

Diskussion

Es stellt sich die Frage, ob der Korrelationskoeffizient als Messgrösse zur Bestimmung der Unabhängigkeit des Paketverlusts taugt. Bestimmt man den Koeffizienten zwischen zwei Datensätzen und nimmt dieser den Wert Null an, so muss das nicht heissen, dass die beiden Messungen voneinander unabhängig sind. Man kann nur sagen, dass sie höchstwahrscheinlich unabhängig sind.

Ein weiterer Punkt ist, dass die Messungen in einer realen Umgebung durchgeführt wurden. Hätte man die Möglichkeit in einen gut abgeschirmten Raum mit schlecht reflektierenden Wänden eine Messung durch zu führen, so wären die daraus gewonnene Information wohl aussagekräftiger.

Kapitel 7

Appendix

Der CD-Inhalt

7.1 Mica2 Software

Der Ordner Mica2 Software ist in drei Unterordner aufgeteilt. Der Ordner Sender beinhaltet die Implementierung des Senders in nesC. Der Ordner Receiver beinhaltet die Implementierung der Empfangsknoten. Der Ordner TOSBase beinhaltet die Implementierung der TOSBase Anwendung.

7.2 JAVA

Der Java Ordner beinhaltet die Erweiterung des BcastInject.java Programms.

7.3 Bericht

Der Ordner beinhaltet die Arbeit als PDF- und als Latex-Dokument.

7.4 MATLAB

Im Matlabordner sind die Funktionen poor_data.m und Analyze_Field.m abgelegt.

7.5 Messdaten

Der Ordner Messdaten ist jede Messung ein Unterordner angelegt. Alle Messdaten sind in vier Ordner gegliedert. Der Movie- Ordner enthält Filme zum RSSI-Wert einer Messung.

7.5.1 movie_data

Im movie_data Ordner sind die Messdaten abgelegt, welche für den Film aufbereitet wurden.

7.5.2 correlation

Im correlation-Ordner sind alle statistischen Ergebnisse abgelegt.

- `hypothese_corr.log`:
In dieser Datei ist das Ergebnis des Hypothesentests gespeichert. Der Test wurde auf der Basis des Korrelationskoeffizienten durchgeführt.
- `hypothese_perc.log`:
In dieser Datei ist das Ergebnis des Hypothesentests gespeichert. Der Test wurde auf der Basis des Prozentkoeffizienten durchgeführt.
- `node_hypothese_corr.log`:
In dieser Datei ist für jeden Knoten aufgeführt, in wie vielen Fällen die erste Hypothese beim Knoten zum Erfolg geführt hatte.
- `node_hypothese_perc.log`:
In dieser Datei ist für jeden Knoten aufgeführt, in wie vielen Fällen die zweite Hypothese zum Erfolg geführt hatte.
- `Percent_CNT_correlation.log`:
In dieser Datei ist festgehalten, zu wieviel Prozent der Empfangsknoten die vom Sender verschickte Daten empfangen hat.
- `WEB_correlation`:
In dieser Datei sind alle Korrelationskoeffizienten zwischen den Nachbarknoten gespeichert.
- `WEB_PERCENT_correlation`:
In dieser Datei sind alle Prozentkoeffizienten zwischen den Nachbarknoten gespeichert.

7.5.3 Pics

In diesem Ordner sind die Bilder zum Paketverlust abgelegt.

7.5.4 statistic_data

Dieser Ordner beinhaltet sechs Unterordner

- `burst`-Ordner:
In diesem Ordner sind die Daten zum Analysieren von Bursts abgelegt. Zudem wurde zu jedem Knoten ein Bild erstellt, welches den zeitlichen Verlauf des RAM-Inhalts des Knotens darstellt. Der Unterordner `Represent` beinhaltet vier repräsentative Grafiken zum Paketverlust der Knoten. Ein Bild zeigt den RAM- Inhalt der neun Knoten, die vom Sender her auf einer Geraden liegen.
- `coefficient_visual`-Ordner:
In diesem Ordner sind die Bilder der Korrelationskoeffizienten zwischen den Nachbarknoten abgelegt.
- `corr`-Ordner:
In diesem Ordner sind die Daten zum Berechnen der Korrelationskoeffizienten abgelegt.

- **plot-Ordner:**
In diesem Ordner sind die Daten zum Erstellen aller Bilder abgelegt.
- **time_coeff-Ordner:**
Dieser Ordner beinhaltet Bilder mit den zeitlichen Verläufe aller Korrelationskoeffizienten.
- **time_percent-Ordner:**
In diesem Ordner sind die Bilder der zeitlichen Verläufe aller Prozentkoeffizienten abgelegt.

7.5.5 Movies:

In diesem Ordner sind Filme zum zeitlichen Verlauf des RSSI-Werts.

Literaturverzeichnis

- [1] Mica2 Datenblatt
http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICA2_Datasheet.pdf
- [2] TinyOS Homepage:
<http://www.tinyos.net>
- [3] Homepage of the Computer Science Division at University of California Berkeley:
<http://www.cs.berkeley.edu/>

Institut für Technik und Informatik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
<http://www.cpt.haw-hamburg.de/~caenzler/SS04/TIS/students/Kutzera/presentation.pdf>
- [4] Crossbow Technology
<http://xbow.com>
- [5] Korrelationskoeffizient:
http://de.wikipedia.org/wiki/Korrelationskoeffizient#Verteilung_des_Korrelationskoeffizienten
- [6] Chipcon Radio:
<http://www.chipcon.com/>
Chipcon Radio Datenblatt:
http://www.chipcon.com/files/CC1000_Data_Sheet_2_3.pdf
- [7] NesC Homepage:
<http://nesc.sourceforge.net/>
nesc 1.1 Language Reference Manual
<http://www.tinyos.net/tinyos-1.x/doc/nesc/ref.pdf>