

# INSTITUT FÜR INFORMATIK

DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN



**Diplomarbeit**

## **Experimentelle Untersuchung der Ableitbarkeit von Dienstgütezuständen aus Messgrößen der optischen Netze**

Peter Weckert

Aufgabensteller: Prof. Dr. Heinz-Gerd Hegering

Betreuer: Matthias Hamm

Mark Yampolskiy

Abgabetermin: 11. Mai 2008



# INSTITUT FÜR INFORMATIK

DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN



**Diplomarbeit**

## **Experimentelle Untersuchung der Ableitbarkeit von Dienstgütezuständen aus Messgrößen der optischen Netze**

Peter Weckert

Aufgabensteller: Prof. Dr. Heinz-Gerd Hegering

Betreuer: Matthias Hamm  
Mark Yampolskiy

Abgabetermin: 11. Mai 2008

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

München, den 11. Mai 2008

.....

*(Unterschrift des Kandidaten)*

## **Abstrakt**

Sowohl das Wissenschaftsnetz (WiN) und andere vergleichbare nationale Netze als auch auf europäischen Niveau die Trans European Networks (TEN) und als deren Nachfolger die GÉANT2-Netze erfuhren in den vergangenen Jahren Veränderungen in Infrastruktur, Organisation und Wartung der Netze. Derzeit ist GÉANT2 das größte Netzwerk, das je für Forscher in Europa aufgebaut wurde.

Für diese Projekte, bei denen der Austausch von hohen Datenmengen zwischen den wenigen dedizierten Endpunkten vorhanden ist, stellt der Aufbau von optischen Virtual Private Networks (OPN) eine Erleichterung dar. Im GÉANT2 Netz werden End-to-End Links (E2E Links) zwischen den GÉANT2-Endpunkten und den Endpunkten der beteiligten Forschungsnetze bereitgestellt. Dadurch wird auch für internationale Projekte der Aufbau von optischen OPNs ermöglicht. Das bekannteste Beispiele für solche Projekte ist der Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf.

Die E2E Links werden als dedizierte optische Verbindungen definiert und sind auf den Technologieschichten 1 und 2 realisiert. Es soll nicht verschwiegen werden, dass den Vorteilen solcher E2E Links auch Nachteile entgegenstehen. Jedes Forschungsnetz betreut unterschiedliche Hard- und Software von unterschiedlichen Herstellern. Folglich gibt es eine Vielzahl an heterogenen Statusinformationen, die nicht zusammen gebracht werden können.

Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit ist, einen Ansatz zu finden, wie eine Qualitätsaussage über ein E2E Link gemacht werden kann, obwohl Heterogenität vorliegt. Ein möglicher Ansatz hierzu liegt in der Suche nach einem regelmäßigen Zusammenhang der Fehler auf der OSI-Schicht 2 und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Fehlern auf der OSI-Schicht 3. Dieser Ansatz ist zunächst nur eine Vermutung, die experimentell überprüft werden soll. Bei den Experimenten werden die Ethernet- sowie Internet Protokolle (IP) verwendet. Sollte sich aber die Vermutung nicht bestätigen, so werden die Ursachen analysiert und beschrieben.

Der Fokus dieser Diplomarbeit liegt auf dem Aufbau, der Gestaltung und der Durchführung der Experimente. Die Messergebnisse werden mit Hilfe der statistischen Analyse ausgewertet. Kann daraus eine erkennbare Schlussfolgerung gezogen werden, so ist ein Ansatz einer Ableitung von Dienstgütezuständen für E2E Link zu formulieren.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Hintergrund	1
1.1.1	Large Hadron Colliders (LHC)	2
1.1.2	End-to-End Links	3
1.2	Motivation	4
1.2.1	Zusammenfassender Ausblick	4
1.2.2	Beschreibung einer Idee	5
1.2.3	Aufbau der Arbeit	6
<b>2</b>	<b>Allgemeine Anforderungen</b>	<b>8</b>
2.1	Statistische Versuchsmethodik	8
2.1.1	Begriffe und Definitionen	9
2.1.2	Statistische Versuchsauswertung	11
2.1.3	Häufigkeitsverteilungen und absolute Häufigkeit	12
2.1.4	Erwartungswert, Varianz, Standardabweichung	12
2.2	Faktorielle Versuchspläne	13
2.2.1	Versuchsplan erster Ordnung	13
2.2.2	Versuchsplan zweiter Ordnung	17
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>19</b>
3.1	Beschreibung des Testbeds	19
3.1.1	Komponenten	19
3.1.2	Verkabelung	21
3.1.3	Einbau der Potentiometer	21
3.2	Tools für Messungen	22
3.2.1	Funktionalität des Senders	24
3.2.2	Funktionalität des Empfängers	24
<b>4</b>	<b>Planung und Gestaltung der Experimente</b>	<b>25</b>
4.1	Systemanalyse	25
4.1.1	Einflussgrößen	25

4.1.1.1	Paketgröße	26
4.1.1.2	Widerstand	26
4.1.2	Zielgrößen	27
4.1.2.1	Anzahl der verlorenen Pakete	28
4.1.2.2	Anzahl der fehlerhaften Frames	28
4.1.3	Protokolleinteilung	29
4.1.4	Identifizierung und Minimierung von Störgrößen	29
4.2	Vorversuche	31
4.2.1	Festlegung der Anzahl der Pakete	31
4.2.2	Festlegung von Intervallen	32
4.3	Auswahl des Versuchsplans	33
4.4	Weitere Festlegungen für die Experimente	33
4.4.1	Bestimmung der Faktoren und Faktorstufen	34
4.4.2	Umfang aller Messwerte pro Versuchspunkt	35
4.5	Ansatz zur Ableitung von Dienstgütezuständen	38
<b>5</b>	<b>Durchführung der Versuche</b>	<b>39</b>
5.1	Durchführungen festlegen	39
5.2	Beschreibung der Tabellen	39
5.2.1	Aufbau im Anhang	40
5.2.2	Aufbau im Hauptteil	40
5.3	Versuchsblöcke I-III	41
5.3.1	Block I: Versuchspunkte 2, 8 und 5	41
5.3.2	Block II: Versuchspunkte 6, 9 und 3	41
5.3.3	Block III: Versuchspunkte 1, 7 und 4	42
<b>6</b>	<b>Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse</b>	<b>43</b>
6.1	Auswertung der Versuchsergebnisse	43
6.1.1	Graphische Darstellung	43
6.1.2	Detailliertere Analyse: Clustering	44
6.2	Interpretation der Versuchsergebnisse	46
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>49</b>
7.1	Zusammenfassung	49
7.2	Ausblick	51
7.2.1	Regressionsanalyse	52
7.2.2	Mögliche Modellansätze	52
<b>A</b>	<b>Messergebnisse aller Versuchspunkte 1-9</b>	<b>55</b>

A.1	Versuchspunkte 1-3 (Paketgröße: 2944 Bytes, Widerstand: 100, 400, 250 $\Omega$ ) . . . . .	55
A.2	Versuchspunkte 4-6 (Paketgröße: 14720 Bytes, Widerstand: 100, 400, 250 $\Omega$ ) . . . . .	58
A.3	Versuchspunkte 7-9 (Paketgröße: 8832 Bytes, Widerstand: 100, 400, 250 $\Omega$ ) . . . . .	61
<b>B</b>	<b>Quellcode</b> . . . . .	<b>65</b>
B.1	Sender . . . . .	65
B.2	Empfänger . . . . .	69
B.3	Unterprogramme . . . . .	73
<b>C</b>	<b>Hintergrundinformationen</b> . . . . .	<b>81</b>
C.1	Signifikanztest . . . . .	81
C.2	Anwendungsbeispiel für den Signifikanztest . . . . .	82
C.3	Methode des integrierten Versuchs . . . . .	84
C.4	Arbeiten mit einem Dämpfer . . . . .	85

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Verteilung der Daten über das Vier-Ebenen Modell [Scha 07]	2
1.2	Modell von E2E Links [YaHa 07]	3
1.3	Struktur eines E2E Links	4
2.1	Ablauf eines vollständigen 2 <sup>2</sup> -Faktorenplans [Gies 06]	16
2.2	Versuchspunkte eines faktoriellen Versuchsplans zweiter Ordnung für zwei Einflussgrößen	17
3.1	Skizze für den Aufbau des Testbeds am LRZ	20
3.2	Querschnitt eines RJ45-Stecker	21
3.3	Die eingebauten Potentiometer auf einer Platine gelötet	22
3.4	Ablaufstruktur der beiden Implementierungen	23
4.1	Darstellung der relevanten Größen im Ursache-Wirkung-Modell	26
4.2	Energieverlust von Signalen während einer Übertragung	27
4.3	OSI-Schichten 2-4 und deren Einbettungshierarchie	30
4.4	Suche nach einem Intervall	32
4.5	Normierter Versuchsraum	35
4.6	Binomial- versus Normalverteilung (n: Anzahl Treppenstufen, p: Wahrscheinlichkeit) [Inc. 08b]	36
6.1	Auswertung aller Messdaten - geordnet nach Paketgröße	44
6.2	Differenziertere Darstellung - geordnet nach der Größe der Widerstände	45
6.3	Unterscheidung der Fälle, wie fehlerhafte Frames auf IP-Pakete auswirken	47
7.1	Prinzip einer einfachen linearen Regressionsgeraden	52
C.1	Stichprobe vs. Grundgesamtheit	81
C.2	Signifikanztest anhand der Beurteilung von statistisch ausgewerteten Effekten	82
C.3	Integriertes Versuchsmodell	84
C.4	Das Pegeldiagramm [DE 99]	86

# Tabellenverzeichnis

1.1	Operationale Zustandswerte	5
3.1	Technische Daten der im Testbed vorkommenden Hardwarekomponenten	21
4.1	Übersicht aller möglichen Paketverluste	32
4.2	$3^2$ -Versuchsplan für die Experimente	34
4.3	Suche nach geeigneten Versuchsumfang $N$	37
5.1	Versuchsplan bei konstanter Einflussgröße $B$ : 400 $\Omega$	41
5.2	Versuchsplan bei konstanter Einflussgröße $B$ : 250 $\Omega$	41
5.3	Versuchsplan bei konstanter Einflussgröße $B$ : 100 $\Omega$	42
6.1	Auswertung des $3^2$ -Versuchsplans	46
A.1	Versuchspunkt 1 (Paketgröße: 2944 Bytes, Widerstand: 100 $\Omega$ )	55
A.2	Versuchspunkt 2 (Paketgröße: 2944 Bytes, Widerstand: 400 $\Omega$ )	56
A.3	Versuchspunkt 3 (Paketgröße: 2944 Bytes, Widerstand: 250 $\Omega$ )	57
A.4	Versuchspunkt 4 (Paketgröße: 14720 Bytes, Widerstand: 100 $\Omega$ )	58
A.5	Versuchspunkt 5 (Paketgröße: 14720 Bytes, Widerstand: 400 $\Omega$ )	59
A.6	Versuchspunkt 6 (Paketgröße: 14720 Bytes, Widerstand: 250 $\Omega$ )	60
A.7	Versuchspunkt 7 (Paketgröße: 8832 Bytes, Widerstand: 100 $\Omega$ )	61
A.8	Versuchspunkt 8 (Paketgröße: 8832 Bytes, Widerstand: 400 $\Omega$ )	62
A.9	Versuchspunkt 9 (Paketgröße: 8832 Bytes, Widerstand: 250 $\Omega$ )	63
C.1	STUDENTsche t-Verteilung: Quantile $t = f(FG, P)$	82
C.2	Versuchsmatrix und deren Messergebnisse	83
C.3	Vergleich der Versuchspläne für $k = \{2, 3, 4\}$	85



# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

In den zurückliegenden Jahren wurden in vielen naturwissenschaftlichen Projekten von internationalem Rang Experimente und Simulationsrechnungen durchgeführt, wie z. B. in den Bereichen der Teilchenphysik und der Astronomie, in denen das Know-how der Informatik mittlerweile unentbehrlich wurde. Die Nachfrage an Rechen- und Speicherleistung ist v. a. auf diesen Gebieten gestiegen. Große Datenmengen fallen bei Experimenten und Messungen an, die derzeit auf einige Rechenzentren weltweit mit entsprechenden Kapazitäten an Rechen- und Speicherressourcen bearbeitet und abgespeichert werden können. Deshalb müssen sie an solche Rechenzentren geschickt werden, um anfallenden Kosten zu reduzieren, die sonst von einem einzelnen Rechenzentrum allein nicht bewältigt werden könnten. Die Herausforderung liegt darin, wie eine Netzinfrastruktur angesichts verteilter Ressourcen optimiert werden kann. An einer angemessenen Lösung wird derzeit von Netzwerkspezialisten und Wissenschaftlern gearbeitet.

Ein nationales Forschungsnetz stellt für Wissenschaft, Forschung und Organisationen ein geeignetes leistungsfähiges Netz bereit, das von einer nationalen Organisation wie z. B. das *Deutsche Forschungsnetz* (DFN) betrieben wird. Werden Forschungseinrichtungen und Universitäten auf nationaler Ebene miteinander vernetzt, so spricht man von einem *National Research and Education Network* (NREN). [Döbb 07] zeigt, wie hoch derzeit die Ausgaben für Projekte in etwa ausfallen:

“Die nationalen Forschungsnetze sind zu fünfzig Prozent an der Finanzierung dieses Netzes beteiligt, weitere fünfzig Prozent steuert die EU Kommission bei, die bis zum Jahr 2008 93 Millionen Euro in das Projekt investieren wird”.

Die eine Hälfte der anfallenden Kosten für Aufbau und Wartung solcher Netze wird von allen 30 europäischen NRENs getragen, die andere Hälfte von der EU Kommission. GÉANT wurde von der Europäischen Union und den NRENs gegründet. Als siebte Generation des europäischen Forschungs-Backbones (GÉANT) wurde am 15. Juni 2005 das GÉANT2 in Luxemburg in Betrieb genommen. Es verfügt über ein Multi-Gigabit-Kernnetz und verbindet derzeit insgesamt 34 Länder und die 30 nationale Forschungsnetze.

Es wird von DANTE, der Forschungsvernetzungsorganisation, koordiniert, und sorgt dafür, dass über 3 Millionen Nutzern einen Zugang zu einem größeren Pool aus Ressourcen und Fachwissen gewährt wird [Davi 08]. Dies erfolgt mittels Hochleistungsverbindungen zu anderen Forschungsorganisationen in Nordamerika, Ja-

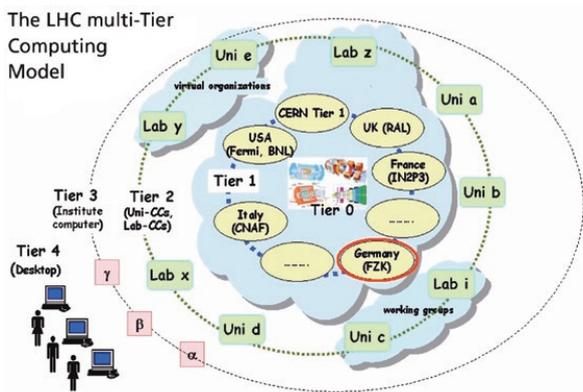
pan, Südafrika etc. Dieses Netz wird die globale Zusammenarbeit vereinfachen und verbindet weltweit alle Forscher zu einer Forschergemeinde.

### 1.1.1 Large Hadron Colliders (LHC)

Ein Beispiel aus dem Forschungsbereich der Teilchenphysik zeigt, wie wichtig eine enge Zusammenarbeit von NRENs und GÉANT2 ist. Das sogenannte Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf und gehört zu einem der größten wissenschaftlichen Projekte der Erde. Es gilt nicht nur vor Ort die riesigen Datenmengen zu speichern, sondern sie auch für andere Wissenschaftlern zugänglich zu machen, indem die Daten an verschiedene wissenschaftliche Standorte verteilt werden. Diese Daten sind zunächst nur Testdaten, die aber seit 2004 enorm angewachsen ist. Ein Zahlenbeispiel soll dies verdeutlichen:

In der Testphase des Jahres 2004 wurden an das Forschungszentrum in Karlsruhe 60 Terabyte Daten verschickt. Laut [Hoel 07] ist die Kapazität der Daten zum Verschicken bei weitem nicht voll ausgeschöpft. Im Jahr 2007 ist das Datenvolumen bereits um ein Vielfaches gestiegen, nachdem der LHC seinen offiziellen Start der Experimente in Verlauf des Jahres 2008 (wahrscheinlich September) aufnehmen wird [Heue 07]. Man spricht von einer Größenordnung im Petabyte-Bereich.

Die Daten am CERN werden weltweit nach einem Vier-Ebenen Modell verteilt. Vor der Übermittlung der Daten speichert CERN (Tier-0) seine experimentell gesammelten Daten zunächst bei sich, um sie dann an die anderen elf Rechenzentren (Tier 1) zu verschicken. Zu den elf Rechenzentren gehört u. a. das Forschungszentrum in Karlsruhe (FZK). Diese Tier 1 Rechenzentren wurden anhand von gewissen Kriterien ausgewiesen.



Ein Tier 1 Rechenzentrum muß entsprechend große Speicher- und Rechenkapazitäten vorweisen und im Rahmen von Grid-Diensten einen 24/7-Support anbieten. Wie in der Abbildung 1.1 zu sehen ist, müssen diese Dienste für Tier 2 Zentren jederzeit verfügbar sein, damit z. B. einzelne LHC-Wissenschaftler über Tier 3 (das sind Institute an einer Universität oder sogar individuelle Rechner bzw. Workstations) auf Informationen von Tier 2 zugreifen können. Diese Arbeitsweise ist deshalb möglich, weil sie auf eine eigene Netzinfrastruktur aufbaut,

Abbildung 1.1: Verteilung der Daten über das Vier-Ebenen Modell [Scha 07]

die sich aus vereinzelt interagierenden Wissenschaftsnetzen zusammensetzt. Seit Juni 2006 sind bereits 90% der europäischen NREN untereinander vernetzt und mit Dark-Fiber-Verbindungen von bis zu 10Gbit/s Bandbreite ausgestattet [Döbb 07] [ScWi 07]. Diese Dark-Fiber-Verbindungen bestehen aus Lichtwellenleiter (LWL) und werden genutzt, um End-to-End Links zu realisieren.

## 1.1.2 End-to-End Links

End-to-End Links (E2E Links) sind dedizierte optische Leitungen, die auf der Basis von NREN/GÉANT2 Glasfaser und entsprechenden Komponenten aufgebaut sind. Ein herausragendes Beispiel für die Nutzung von E2E Links sind Verbindungen aus dem Bereich des LHC Netzwerkes.

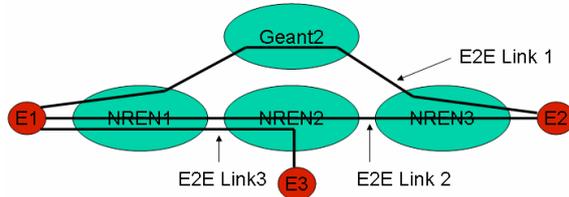


Abbildung 1.2: Modell von E2E Links [YaHa 07]

Die Abbildung 1.2 zeigt ein Grundmodell, wie E2E Links im GÉANT2-Umfeld aufgebaut sind. Sie können sowohl über ein oder mehrere NREN als auch über das GÉANT2-Netz laufen. In diesem Beispiel nutzt der *E2E Link 1* das GÉANT2-Netz als Transitnetzwerk. Die beiden anderen Verbindungsbeispiele zeigen, wie die Daten über mindestens zwei nationale Forschungsnetze hinweg verschickt werden.

Auf das LHC-Projekt bezogen, verbinden E2E Links Tier 0 mit Tier 1 und alle Tier 1 untereinander.

Auf der Basis des Modells für E2E Links wird im LHC-Projekt ein optisches privates Netzwerk (OPN) aufgebaut. Demnach sind E2E Links dedizierte optische Verbindungen, die unter Verwendung der Bitübertragungsschicht (Schicht 1) sowie der Schicht 2 – Sicherungsschicht des ISO-OSI-Modells realisiert werden, wie z. B. das klassische Ethernet oder SDH/SONET [YaHa 07].

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Begriffe *Domäne* und *NREN* bzw. *GÉANT2* als synonym betrachtet. Demnach befinden sich zwischen zwei jeweiligen Endpunkten in der Regel mindestens zwei Domänen. Jede davon unterhält mehrere Standorte, wobei ein Standort z. B. eine Universität darstellt. Zum Beispiel betreibt das DFN als ein NREN das Wissenschaftsnetz X-WiN. Es verfügt über ein Multi-Gigabit-Kernnetz (Standardbandbreiten bis zu 10 Gbit/s) mit derzeit insgesamt 49 Standorten [Hoel 07]. Das *Leibniz-Rechenzentrum* (LRZ) in Garching bei München als ein gemeinsames Rechenzentrum für Forschung und Lehre für alle Münchner Hochschulen kooperiert zusammen mit dem DFN und ist u. a. am LHC-Projekt beteiligt. Jeder dieser Standorte verwaltet entweder homogene oder verschiedene Hardwarekomponenten von unterschiedlichen Herstellern. Ferner wird in Abhängigkeit der Hardware entsprechende Software eingesetzt, die wiederum vielfältig ist. Jeder dieser Komponenten ist für eine bestimmte Transporttechnologie ausgestattet, wie z. B. MPLS, Ethernet over SDH/SONET oder das native Ethernet.

## 1.2 Motivation

### 1.2.1 Zusammenfassender Ausblick

Ein E2E Link durchläuft verschiedene Domänen, wie die Abbildung 1.3 veranschaulicht:

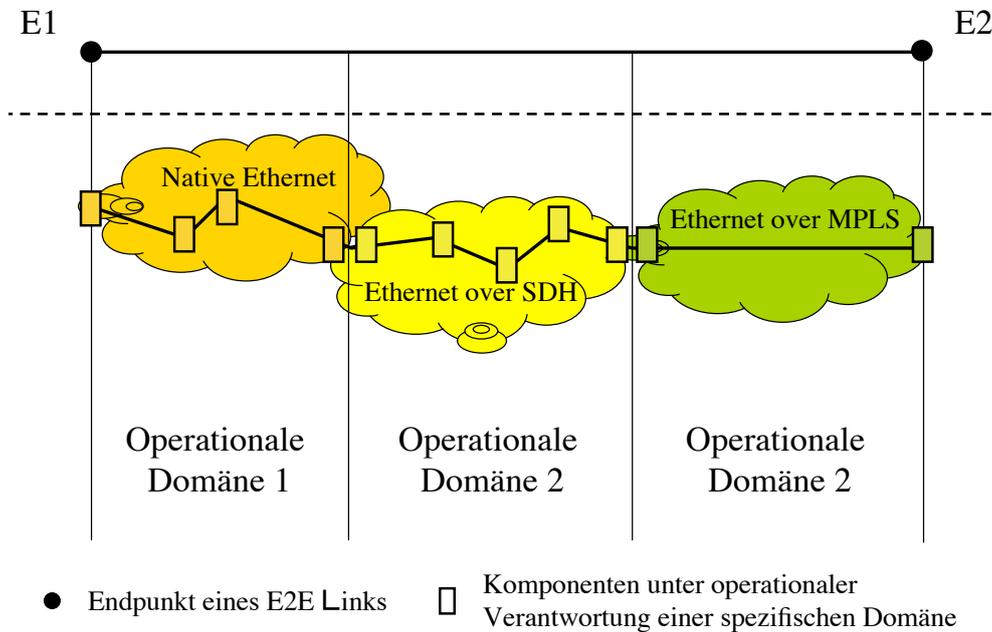


Abbildung 1.3: Struktur eines E2E Links

Jede Domäne mit ihrer Vielzahl an autonomen Standorten stellt ein NREN dar. Jeder dieser Standorte setzt unterschiedliche Transporttechnologien sowie Hard- und Software von unterschiedlichen Herstellern (wie z. B. Alcatel, CISCO, Nortel, u. a. ) ein. Mit dieser Vielfalt geht auch eine Heterogenität an Statusinformationen (*Errored Second, Errored Frames, Unavailable Second, Code Violation, Alarm Indication Signals Second, etc.*) einher. Die Herausforderung in diesem Bereich ist nun, ob und in wie weit eine Interoperabilität unter den derzeit bestehenden heterogenen Messgrößen gewährleistet werden kann. Auf das Problem der E2E Links übertragen, heißt das, ob und wie die Vielfalt an Zustands- bzw. Statusinformationen angesichts der verschiedenen Hardware zusammengebracht werden kann.

Ein erster Ansatz zur Lösung des Problems wurde bereits gemacht. Man legte sich auf zwei Arten von Zustandsinformationen fest: die des *operationalen* und die des *administrativen* Zustandes. Der erste Zustand basiert auf konkreten physikalischen Messdaten, der zweite Zustand dagegen sagt etwas über die aktuell laufenden Operationen aus, die auf einer Verbindung ausgeführt werden. Der Fokus für den weiteren Verlauf dieser Arbeit richtet sich an den operationalen Zustand. In der Tabelle 1.1 auf Seite 5 werden die logischen Zustandswerte aufgeführt.

Tabelle 1.1: Operationale Zustandswerte

Zustandswert	Beschreibung
Unknown	Domäne konnte keine Information über den operationalen Zustand liefern
Up	Verbindung vorhanden
<i>Degraded</i>	Verbindung mit reduzierter Performanz
Down	Verbindung unterbrochen

Die logischen Zustandswerte beziehen sich nicht nur auf die einzelne Streckenabschnitte, sondern auch auf E2E Links in einem Netz. Ist eine Verbindungsleitung, also ein Kommunikationskanal benachbarter Knoten gesetzt, so erhält man als Information für das Netzmanagement den Wert “Up” geliefert, andernfalls “Down”. “Unknown” tritt dann ein, wenn die Domäne keine Information über den operationalen Zustand eines jeweiligen Teilabschnittes liefern kann. Diese drei Werte beschreiben eine Information über den Zustand eines Streckenabschnittes in einem Netzwerk. Schwieriger dagegen ist der Wert “Degraded” zu fassen. Ungeklärt ist, was man eigentlich unter “Verbindung mit reduzierter Performanz” versteht, wieviel Prozent an verminderter Performanz vorliegt, was der Zahlenwert in Prozent (%) über die Verbindung aussagt oder ab wieviel Prozentpunkten eine Verbindung als qualitativ schlecht oder unbrauchbar zu klassifizieren ist.

Die Qualitätsinformation über eine Verbindung soll nicht nur auf ein Segment beschränkt bleiben, sondern auch eine Aussage über ein E2E Link liefern. Die Herausforderung in diesem Ansatz liegt darin, wie eine Aggregation eines E2E Link Zustandes aus einem oder mehreren Segmenten gebildet werden kann.

## 1.2.2 Beschreibung einer Idee

Bei der Zielsetzung dieser Diplomarbeit soll ein Versuch unternommen werden, den Zustandswert “Degraded” zu erweitern bzw. zu verfeinern. Dazu muss man zunächst mit der Heterogenität auskommen. Auf jedem Streckenabschnitt sowohl innerhalb als auch ausserhalb einer Domäne kommen verschiedene Transporttechnologien zum Einsatz. Jede dieser Transporttechnologien hat ihre eigene Frame-Mechanismen auf der ISO-OSI-Schicht 2. Weil eine Vielfalt an Protokollen und Statusinformationen festzustellen ist, die nicht zueinander korrelieren können, ist keine Aussage über die Qualität eines E2E Links zu treffen. Die Aufgabenstellung besteht darin, einen Ansatz zu finden, mit dem trotz der Heterogenität eine Aussage über ein E2E Link getroffen werden kann.

*Der Schwerpunkt dieser Diplomarbeit liegt in einem möglichen Ansatz,  
heterogenes auf etwas homogenes abzubilden.*

Ein möglicher Abbildungsansatz wäre, einen regelmäßigen Zusammenhang der Fehler auf Schicht 2 ( $L_2$ ) und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Fehlern auf der Schicht 3 ( $L_3$ ) zu finden. Es gilt herauszufinden, ob bei einer bekannt vorgegebenen Fehlerrate auf  $L_2$  auf Wahrscheinlichkeit von  $L_3$ -Fehlern ( $P_{L_3}$ ) zurückgeführt werden kann. Dies ist zunächst eine Vermutung, die im Rahmen von experimentellen Unter-

## 1 Einleitung

suchungen überprüft werden soll. Bestätigt sich die Vermutung nicht, so werden die Ursachen analysiert und beschrieben.

Die *Dienstgüte* bzw. die *Quality of Service (QoS)* beschreibt im Allgemeinen die Güte eines Kommunikationsdienstes. Angesichts der Themenstellung werden die Dienstgütezustände in einem kleinen Netz anhand von Experimenten abgeleitet, um zu einer verfeinerten Aussage über den Zustandswert einer Verbindung zu gelangen.

Die Rahmenbedingungen für die Experimentreihen werden festgelegt, um einen regelmäßigen Zusammenhang von Fehlern auf der Schicht 2 und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Fehlern auf der Schicht 3 herauszufinden. Bei der Beobachtung werden die Ethernet- sowie Internet Protokolle (IP) verwendet. Dabei werden mehrere voneinander abzugrenzende Versuchsreihen durchgeführt. Welche konkreten Parameter dabei zum Einsatz kommen und wie genau die Experimente durchgeführt werden, wird im nächsten Kapitel erläutert. Die zu messenden bzw. quantifizierbaren Parameterwerte werden gesammelt und am Ende sollen mit Hilfe von statistischen Berechnungen die Messergebnisse ausgewertet werden. Dank der statistischen Methode kann dann eine Aussage getroffen werden, ob die oben aufgestellte Vermutung Bestand hat oder nicht.

### 1.2.3 Aufbau der Arbeit

In den Kapiteln 2 und 4 werden die Anforderungen, die für die Testumgebung erforderlich sind, vorbereitet. Das Kapitel 2 geht zunächst allgemein auf die statistische Versuchsmethodik und auf die faktoriellen Versuchspläne ein, die eine Basis für das anschließende Kapitel 4 schafft. Dort werden dann die Einfluss- und Zielgrößen des Systems vorgestellt. Daran anschließend werden die für diese Arbeit relevanten Protokolle kurz genannt.

Der Abschnitt 4.2 dient dazu, das Verhalten der Testumgebung kennenzulernen. Es werden einfache Experimente gestartet, um einen ersten Eindruck über das System zu gewinnen. Mit Bezug auf das Kapitel 2 wird eine Auswahl für einen bestimmten Versuchsplan getroffen. Mit dieser Entscheidung geht die Festlegung der relevanten Größen für die Experimente einher.

Das Kapitel 3 beschreibt den Aufbau des Testbeds, in die ausgewählten Anforderungen aus Kapiteln 2 und 4 erfüllt und die Rahmenbedingungen geschaffen werden, um die Experimente durchführen zu können. Nachdem Programme Bestandteile der Testumgebung sind, werden deren erforderliche Funktionalitäten ebenfalls kurz vorgestellt.

Der Inhalt von Kapitel 5 ist die Durchführung der Experimente, wobei dort bereits die Messdaten zusammengefasst und ausgewertet werden. Die detaillierteren Messergebnisse der einzelnen Experimente stehen im Anhang A. Im Anschluss an dieses Kapitel erfolgt die Auswertung der Versuchsergebnisse (Kapitel 6).

Das Kapitel 6.2 rundet diese Arbeit mit der Interpretation der Auswertung ab. Am Ende dieses Kapitels wird dem Thema dieser Arbeit Rechnung getragen, ob aufgrund der experimentellen Untersuchung ein Ansatz zur

Ableitung von Dienstgütezuständen möglich ist.

Nachdem die Idee und der Aufbau dieser Diplomarbeit vorgestellt worden sind, beschäftigt sich nun das nächste Kapitel 2 mit den allgemeinen Anforderungen, die benötigt werden, um einen Rahmen zu schaffen, in dem die Experimente geplant, aufgestellt und durchgeführt werden können. Das Kapitel 4 baut auf das Kapitel 2 auf und wendet die allgemeinen Überlegungen zur statistischen Versuchsmethodik (Abschnitt 2.1) und zu den faktoriellen Versuchsplänen (Abschnitt 2.2) an, indem sie auf die Themenstellung hin angepasst werden.

## 2 Allgemeine Anforderungen

Dieses Kapitel befaßt sich mit dem, was zur Aufstellung und Durchführung der experimentellen Untersuchung erforderlich ist. Zunächst beschäftigt sich der Abschnitt 2.1 mit Begriffen und Definitionen. Im Anschluss daran wird überlegt, was bei einer statistischen Versuchsauswertung zu berücksichtigen ist und welche statistische Größen in dem Zusammenhang dieser Arbeit zum Einsatz kommen.

Nach der Vorstellung der statistischen Versuchsmethodik werden im Abschnitt 2.2 zwei Versuchspläne vorgestellt. Die Entscheidung für einen der beiden möglichen Pläne wird im Abschnitt 4.3 getroffen.

### 2.1 Statistische Versuchsmethodik

Bei der statistischen Versuchsmethodik geht es darum, eine Vorgehensweise zu finden, die es erlaubt, ein technisches System zu untersuchen, das von einer großen Anzahl von Einflussgrößen abhängt. Ziel ist es nicht mehr, die genauen physikalischen Gesetzmäßigkeiten eines Systems zu erfassen, sondern ein Modell zu entwickeln, das die relevanten Eigenschaften des Systems hinreichend genau beschreibt.

Eine solche Beschreibung kann u. a. mit der klassischen Einfaktormethode durchgeführt werden, die ein einfaches Verfahren darstellt, um eine optimale Einstellung von Parameterwerten zu finden. Hierbei wird jeder Parameter, der einen möglichen Einfluss auf den Versuchsvorgang hat, isoliert untersucht und verändert, wobei alle anderen Parameter konstant gehalten werden. Die Einstellung eines Parameterwertes wird solange verändert, bis ein schlechtes Versuchsergebnis erzielt wird. Dann wird auf die vorherige Einstellung zurückgegangen und das Verfahren mit einem anderen Faktor fortgeführt. Dieses methodische Verfahren hat zwei Nachteile:

1. Die Einfaktormethode erfordert zahlreiche Versuche und es wird davon ausgegangen, dass zwei oder mehr Parameter nur eine additive Wirkung ergeben können.
2. Eine verstärkende oder eine reduzierende Wirkung kann bei dieser Methode nicht erkannt werden, da niemals zwei oder mehr Parameter zugleich in ihrer Stufenhöhe verändert werden.

Die Besonderheiten der statistischen Versuchsmethodik sind im Vergleich zur klassischen Einfaktormethode die gezielte Anordnung der Messergebnisse eines Experiments und das variable Einstellen aller Parameterwerte. Dadurch kann die Anzahl der Versuche bzw. der Experimente u. U. sogar deutlich reduziert werden, ohne dabei die Qualitätsaussage von Ergebnissen zu beeinträchtigen. Scheffler bringt diesen Sachverhalt mit

folgender Aussage treffend auf den Punkt: “Quantität, Qualität und Allgemeingültigkeit der aus einer Versuchsreihe zu erhaltenden Informationen sind nicht proportional der Anzahl der Experimente, sondern sehr stark abhängig von ihrer Gestaltung.” [Eire 06]

Mit einer mangelhaften Planung der Experimente geht also eine schlechte Qualitätsaussage aller Versuchsergebnisse einher. Eine Untersuchung nach [Bläs 91] hat gezeigt, dass in den Methoden für eine richtige Planung ein deutliches Potenzial zur Verbesserung der Qualitätsaussage steckt. Mit einer gut geplanten Strategie zur Aufstellung und Durchführung der Experimente wird das Ziel erreicht, “die gewünschten oder erforderlichen Erkenntnisse aus der experimentellen Untersuchung mit möglichst geringem Aufwand zu erhalten oder bei beschränktem Versuchsaufwand möglichst aussagekräftige Erkenntnisse zu gewährleisten” [Wald 95]. Der Aufwand an Versuchen soll möglichst minimal gehalten, zugleich aber ein Maximum an Aussagekräftigkeit aller Messergebnisse werden.

### 2.1.1 Begriffe und Definitionen

In diesem Abschnitt werden die Begriffe und Definitionen der statistischen Versuchsmethodik dargelegt. Sie dienen der Eindeutigkeit für den weiteren Verlauf dieser Arbeit. Im Kapitel 2.2 über die *Versuchsplanung im Rahmen dieser Arbeit* finden die Begriffe dann ihre konkrete Verwendung. Der Einfachheit halber werden die Begriffe alphabetisch aufgelistet.

**Effekte** Effekte sind Vergleichsgrößen, die im Rahmen der Auswertung und Interpretation von Versuchsergebnissen eine zentrale Rolle spielen. Sie dienen der Beschreibung der Einflüsse von Faktoren auf die zu betrachtende Zielgröße. Ihre Berechnung erfolgt formal durch Mittelwertvergleiche. Effekte, die auf den Einfluss einer einzigen Variablen zurückzuführen sind, werden als Haupteffekte bezeichnet.

**Einflussgröße** Ein Grundgedanke der statistischen Versuchsmethodik ist es, die Versuchspunkte nach einem bestimmten Plan aufzustellen. Es gilt, die Aussagefähigkeit der Ergebnisse zu verbessern und den Aufwand bei der Durchführung der Versuche so gering wie möglich zu halten. Folglich können die Vorteile dieser Methodik nur genutzt werden, wenn jede Einflussgröße der Versuchsplanung entsprechend eingestellt wird. Die Einflussgrößen können also unabhängig voneinander betrachtet werden und sind entweder variabel oder konstant einstellbar.

**Faktor** Der Begriff des Faktors ist identisch mit dem Begriff der Einflussgröße.

**Haupteffekt** Als Haupteffekt wird ein Effekt genannt, der auf eine Änderung eines Faktors von der unteren auf die obere Stufe zurückzuführen ist. Er berechnet sich als Differenz zwischen dem Mittelwert aller Ergebnisse sowohl auf der oberen als auch auf der unteren Stufe. Ein positiver Haupteffekt bedeutet, dass durch die Erhöhung des Faktors eine Steigerung der Zielgröße hervorgerufen wird. Ein negativer Haupteffekt hat eine Verringerung der Zielgröße zur Folge.

**Identer** Neben den Effekten wird als weitere Größe der Mittelwert aller Mittelwerte bzw. der Gesamtmittelwert aller Versuche berechnet. Dieser Wert repräsentiert die Lage der Versuchsergebnisse und wird als Identer bezeichnet.

**Messpunkt** Ein Messpunkt ist jener zu messende Punkt innerhalb einer Messreihe.

**Messreihe** Eine Messreihe besteht aus einer festgelegten Anzahl von Messwerten. Um eine zuverlässigere Aussage über ein Ergebnis eines Versuchspunktes zu treffen, werden mehrere Messreihen durchgeführt.

**Messwerte** Werden Daten in einem Experiment ermittelt, werden diese Daten als Messwerte bezeichnet. Man unterscheidet Messwerte *mit* und *ohne* absoluten Nullpunkt. Ein Beispiel für einen Messwert *ohne* absoluten Nullpunkt ist ein festgelegtes Intervall, innerhalb dessen die Messwerte liegen. Die gemessenen Werte für Pakete dürfen nicht größer als  $y$  und nicht kleiner als  $x$  sein. Einen absoluten Nullpunkt haben beispielsweise die Werte der Bits. Sie können nur die Werte 0 oder 1 annehmen.

Bemerkung: Es gilt bei der Versuchsplanung darauf zu achten, ob die Messwerte in bestimmte Merkmale (nominale, ordinale oder metrische Merkmale [EsSa 00]) umgewandelt werden oder nicht. Jede Umwandlung dieser Art geht mit einem Informationsverlust einher.

**Modell** Will man ein gesetzmäßiges Verhalten eines zu untersuchenden Systems beschreiben, wird bevorzugt das Verfahren der linearen Regression – als Regressionsanalyse bekannt – angewandt. Es gilt, das System durch einen mathematischen Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen und den Zielgrößen möglichst einfach und dennoch hinreichend genau festzuhalten. Zur Beschreibung dieses Systemverhaltens werden meist einfache lineare oder quadratische Polynome verwendet. In dieser Arbeit soll nach Möglichkeit die lineare Regression zum Einsatz kommen, nachdem im System ein stetiges oder aperiodisches Verhalten (z. B. konstantes Rauschen eines Potentiometers) vorausgesetzt wird.

**Stichprobe** Die Stichprobe ist ein Synonym für Messreihe.

**Störgröße** Alle nicht kontrollierbaren Einflussgrößen werden als Störgrößen bezeichnet. Störgrößen können zu einem systematischen Fehler bzw. Verfälschung der Versuchsergebnisse führen. Kann eine solche Größe ausfindig gemacht werden, so ist zu versuchen, entweder die Störgrößen zu minimieren oder sie in die Versuchsauswertung mit aufzunehmen.

**Stufen** Sie sind Einstellwerte der Einflussgrößen bzw. Faktoren. Bei einem gegebenen Intervall für eine Einflussgröße kann der Wert stufenweise bei jedem Versuch verändert werden.

**Stufenkombination** siehe *Stufen*.

**Versuchsplan** Hierbei handelt es sich um einen Entwurf, wie Versuchspunkte aufgestellt werden, die zusammen gehören und systematisch hergeleitet werden. Der Umfang der Versuchspunkte hängt nicht nur von der Zahl der variablen Einflußgrößen, sondern auch von der Wahl des Modellansatzes und der geforderten Präzision der Ergebnisse ab.

**Versuchspunkt** Dieser legt für einen Versuch die Stufenkombination aller variablen und konstanten Einflussgrößen fest.

**Versuchsraum** Er begrenzt die Werte der Einflussgrößen auf ein gewähltes geschlossenes Intervall. Es gibt darin einen minimalen sowie einen maximalen Wert.

**Wechselwirkungseffekte** Ist der Effekt einer Einflussgröße von einem oder mehreren Faktoren abhängig, so besteht eine wechselseitige Beeinflussung der Faktoren. Diese Interaktion wird als Wechselwirkung und der errechenbare Effekt als Wechselwirkungseffekt bezeichnet. “Bei einer Wechselwirkung zwischen zwei Faktoren A und B bedeutet ein positiver Wechselwirkungsfaktor, dass auf der hohen Faktorstufe des Faktors A eine Änderung des Faktors B einen größeren Effekt hat als bei der niedrigen Faktorstufe des Faktors A (auch die symmetrische Aussage ist möglich)” [Gies 06]. Allgemein bedeutet Wechselwirkung im statistischen Sinne, dass es sich um eine Abhängigkeit zwischen den Faktoren handelt.

**Zielgröße** Die Zielgröße charakterisiert den Verlauf und beschreibt das Ergebnis eines Versuchs. Zielgrößen können allgemein sowohl quantitative als auch qualitative Größen sein. Ziel des Experimentators ist es, die Eigenschaften eines geschlossenen Systems so zu beeinflussen, dass unter den gegebenen Randbedingungen die Zielgröße sein Optimum bzw. Minimum erreicht. In erster Linie handelt es sich bei den Zielgrößen um Messgrößen.

## 2.1.2 Statistische Versuchsauswertung

Bei der Durchführung von Messreihen eines Versuchspunktes wird der Experimentator immer feststellen, dass die Versuchsergebnisse kleine Abweichungen aufweisen, auch wenn die einzelnen Messreihen unter gleichen Versuchsbedingungen sorgfältig durchgeführt und wiederholt wurden. Diese Streuungen der Versuchsergebnisse sind auf nicht beeinflussbare Störgrößen zurückzuführen. Sie sind bei jedem Versuch vorhanden und kaum zu minimieren. Die Störgrößen können z. B. in dem im System verwendeten Material, aber auch in den Messungenauigkeiten begründet liegen. Im Allgemeinen spricht man von Zufallsstreuungen der Versuchsergebnisse. Um sicher zu gehen, dass das Versuchsergebnis auf eine bestimmte Stufenkombination eines Faktors zurückzuführen und nicht zufällig ist, sind mehrere Wiederholungen von Messreihen bzw. Stichproben nötig. Generell gilt bei der Wiederholung von Messreihen, je größer der Stichprobenumfang aus der Grundgesamtheit ist, desto aussagekräftiger sind die Versuchsergebnisse.

Die Versuchsauswertung eines Versuchsergebnisses erfordert die Berechnung verschiedener statistischer Größen, die in der Literatur teilweise unterschiedlich benannt und mit unterschiedlichen Formelzeichen beschrieben werden. Um Missverständnisse im Umgang mit diesen Größen zu vermeiden, werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Begrifflichkeiten sowie die dazugehörigen Formelzeichen nachfolgend in Anlehnung an Kreyszig [Krey 72] definiert.

### 2.1.3 Häufigkeitsverteilungen und absolute Häufigkeit

Eine Häufigkeitsverteilung ist eine Methode zur statistischen Beschreibung von Messwerten einer Stichprobe. In der Statistik ist sie eine Funktion, die zu jedem gegebenen Wert angibt, wie häufig dieser Wert vorgekommen ist. Diese Funktionsabbildungen lassen sich sehr gut tabellarisch oder grafisch darstellen. Zur grafischen Darstellung ist es erforderlich, die ungeordnete Menge an Messdaten nach gleichen Werten zu ordnen. Jeder Wert hat eine Anzahl an Messpunkten, die angibt, wie oft dieser Zahlenwert in der Stichprobe vorkommt. Diese Anzahl wird als *absolute Häufigkeit* des entsprechenden Wertes aus der Stichprobe bezeichnet. Wird die absolute Häufigkeit durch die Gesamtanzahl  $n$  aller Messdaten dividiert, so erhält man die *relative Häufigkeit* des betreffenden Wertes.

Als Ergebnis zu der Häufigkeitsverteilung ist festzuhalten, dass jede Stichprobe durch ihre Häufigkeitsfunktion bestimmt und beschrieben wird. Einer Stichprobe vom Umfang  $n$  mit  $m$  verschiedenen Messwerten  $x_1, x_2, \dots, x_m$  kann man eine Funktion  $\tilde{f}$ , die sogenannte Häufigkeitsfunktion, zuordnen. Wenn  $h_i$  die absolute Häufigkeit  $h(x_i)$  für  $i = 1, 2, \dots, m$  bezeichnet, so stellt sich die folgende Zuordnung dar:

$$\tilde{f}(x) = \begin{cases} h_i & \text{für } x = x_i \text{ mit } (i = 1, 2, \dots, m) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.1)$$

Die Funktion  $\tilde{f}$  nimmt also an den  $m$  Stellen  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) die Werte  $h_i$  an und ist sonst überall gleich Null. Man kann diese Werte graphisch als Balken-, Säulendiagramm oder als Histogramm darstellen. Darauf wird aber im Rahmen dieser Arbeit jedoch verzichtet, da nur die absolute Häufigkeitswerte von Bedeutung sind.

### 2.1.4 Erwartungswert, Varianz, Standardabweichung

Das repräsentative Versuchsergebnis, das aus der Sammlung von Häufigkeitswerten einer Stichprobe gewonnen wurde, wird in der Statistik als Erwartungswert  $\mu$  (auch Mittelwert genannt) und das zugehörige Streuungsmaß  $\sigma^2$  als Varianz bezeichnet. Da die Berechnung dieser Parameter nicht möglich ist, werden sie mit Hilfe von Stichproben geschätzt. Ein Beispiel einer Quantifizierung eines Mittelwertes kann in erster Näherung die Eigenschaft eines E2E Links sein, bei der die mittlere Anzahl von verloren gegangenen IP-Paketen in einer Stichprobe gemessen wird. Als Schätzwert für den Erwartungswert dient der arithmetische Mittelwert  $\bar{y}$  der Stichprobe:

$$\mu \cong \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \stackrel{Def}{=} \bar{y} \quad (2.2)$$

Die Schätzung der Varianz erfolgt anhand der Stichprobenstreuung  $s^2$ :

$$\sigma^2 \cong \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \stackrel{Def}{=} s^2 \quad \text{für} \quad n > 1 \quad (2.3)$$

mit  $\bar{y}$  = Mittelwert einer Stichprobe

$y_i$  = Messwerte der Messgröße Y

$n$  = Anzahl der Messwerte einer Stichprobe

Die positive Quadratwurzel  $s = \sqrt{s^2}$  der Varianz wird als Standardabweichung der Stichprobe bezeichnet und drückt die Streuung der Messwerte um den arithmetischen Mittelwert aus.

Nachdem die Begriffe für die statistische Versuchsmethodik geklärt und die für diese Arbeit in Frage kommenden Methoden zur statistischen Auswertung vorgestellt und definiert wurden, geht es im nächsten Schritt darum, Modelle zu finden, wie die Experimente sinnvoll geplant werden können. Schließlich gilt die statistische Maxime von Waldmann [Wald 95], den Aufwand an Versuchen möglichst gering zu halten, zugleich aber den größten Informationsgehalt aus den Versuchen zu gewinnen.

## 2.2 Faktorielle Versuchspläne

Mit einer bestimmten Wahl eines statistischen Versuchsplanes kann man die Anordnung der Messpunkte beeinflussen. Das Ziel bei der Planung ist es, nach Möglichkeit einen maximalen Informationsgewinn in Bezug auf das Systemverhalten und zugleich einen minimalen Aufwand bei der Durchführung und Auswertung der Versuchspunkte zu erreichen.

Im diesem Abschnitt werden wesentliche in Frage kommende Elemente der statistischen Versuchsplanung beschrieben. Nachdem andere Modelle wie die *fraktionierte faktorielle Versuchspläne* für komplexere Versuchsanordnungen geeignet sind, werden hier im allgemeinen zunächst die  $2^k$ - und anschließend die  $3^k$ -Versuchspläne vorgestellt und nach ihrer sinnvollen Anwendung im Rahmen dieser Arbeit analysiert. Die daraus resultierenden Erkenntnisse bilden dann die Grundlage für das Kapitel 4.

### 2.2.1 Versuchsplan erster Ordnung

Faktorielle Versuchspläne erster Ordnung werden als  $2^k$ -Faktorenpläne bezeichnet und zur Ermittlung von linearen Modellen eingesetzt. Dabei steht die Basis für die Anzahl der Stufen pro Einflussgröße und der Exponent für die Anzahl der Einflussgrößen (Faktoren). Das Ergebnis zeigt dann die Anzahl der Versuchspunkte:

$$N = 2^k \tag{2.4}$$

- mit
- $N$  = Anzahl der Versuchspunkte
  - $k$  = Anzahl der Einflussgrößen
  - 2 = Anzahl der möglichen Einstellwerte pro Einflussgröße

Für einen faktoriellen Versuchsplan erster Ordnung mit zwei Einflussgrößen beschreibt die Lage der Versuchspunkte in diesem Sonderfall ein Quadrat mit vier Punkten, weshalb sie auch als Eckpunkte bezeichnet werden. Jeder neue Faktor, der im Rahmen eines Versuchs zusätzlich evaluiert wird, führt somit zu einer Verdoppelung der Anzahl aller möglichen Versuche. So stellt Klein in diesem Zusammenhang folgendes fest [Klei 04]:

“Bei vollständigen  $2^n$ -Faktorenversuchen müssen immer alle  $2^k$ -Experimente durchgeführt werden. Mit steigender Anzahl der Faktoren steigt der Umfang so weit an, dass er bei mehr als 5 Faktoren meist nicht mehr wirtschaftlich ist.”

Trotzdem kann dieser Faktorplan (bei  $k \leq 5$ ) die gegenseitige Beeinflussungen der Einflussgrößen zweier und/oder mehrerer Faktoren mit erfassen. In dieser Arbeit taucht diese Problematik nicht auf, da nur zwei Einflussgrößen in Betracht kommen.

Bevor ein Beispiel für eine Anwendung des faktoriellen Versuchsplans erster Ordnung gezeigt wird, sind weitere Begriffsklärungen erforderlich. Wie im Abschnitt 2.1.1 wird die Anordnung der Begriffe nach alphabetisch vorgenommen.

**Antwortmatrix** Nachdem die Experimente erfolgreich durchgeführt wurden, werden alle Versuchsergebnisse in die Antwortmatrix entsprechend ihrer Versuchsnummer eingetragen. Ferner werden in ihr die Mittelwerte  $\bar{y}_i$  aus den einzelnen Messreihen pro Versuchspunkt, sowie deren Varianz  $s_i^2$  und Standardabweichung  $s_i$  eingefügt.

**Effektmatrix** Die Effektmatrix dient zur Berechnung der Haupt- und Wechselwirkungseffekte. Die Berechnung der Effekte erfolgt durch das Multiplizieren der jeweiligen zusammengehörenden Vorzeichen in einer Spalte mit den Versuchsergebnissen (repräsentiert im Mittelwert einer Messreihe) aus der Antwortmatrix und Addition der beiden Glieder. Das Ergebnis ist dann durch die halbe Faktorstufenkombination  $N$  zu dividieren. Formal sind alle Effekte mit dieser Formel berechenbar:

$$Effekt = \frac{2}{N} \cdot \left| \sum_{i=1}^N (Vorzeichen \cdot \bar{y}_i) \right| \tag{2.5}$$

Die Effektmatrix kommt beim Signifikanztest zum Einsatz. Der Signifikanztest dient dazu, bei ausgewählten Signifikanzniveau die Effekte auszusondern, die das Niveaukriterium nicht erfüllen. Zugleich kann dadurch zwischen signifikante von zufällige Effekte unterschieden werden. Zur Berechnung des Konfidenzintervalls ist der *Standard Error in the mean* ( $s_{\bar{y}}$ ) [Squi 01] von großer Wichtigkeit, der sich aus dem Mittelwert der Varianzen ( $s_m^2$ ) und der Gesamtzahl aller Einzelversuche  $N_{ges}$  ergibt:

$$s_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{s_m^2}{N_{ges}}} \quad s_m^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N s_i^2 \quad (2.6)$$

Zur Vollständigkeit der Berechnung des Konfidenzintervalls gehört zudem der t-Wert, der aus der Tabelle C.1 der Studentverteilung abzulesen ist. Die t-Werte sind sowohl von der statistischen Sicherheit als auch vom Freiheitsgrad abhängig. Der Freiheitsgrad bezeichnet einen Parameter eines Systems, das sich aus dem Verteilungswert und der statistischen Sicherheit zusammensetzt. Für die Berechnung des zweiseitigen Vertrauensbereichs ist der Freiheitsgrad  $FG$  des Systems nötig:

$$FG = 2^k \cdot (n - 1) \quad \text{bzw.} \quad FG = N \cdot (n - 1) \quad (2.7)$$

mit  $N =$  Anzahl der Versuchspunkte  
 $k =$  Anzahl der Einflussgrößen  
 $n =$  Anzahl der Messwerte pro Versuchspunkt

Ob ein Effekt den Signifikanztest bestanden hat, erfolgt durch den Vergleich des Effekts mit der Breite der 95 %-, 99 %- und 99,9 %-Vertrauensbereiche. Dabei werden alle Effekte, die größer als der 99,9 % Vertrauensbereich sind, als hochsignifikant eingestuft. Sind die Effekte berechnet und auf Signifikanz geprüft, kann die eigentliche Interpretation der Versuchsergebnisse erfolgen. Ein Zahlenbeispiel verdeutlicht im Anhang C.2 das bisher Beschriebene. Ihm vorangestellt wird näher auf den Signifikanztest allgemein eingegangen (Anhang C.1).

**Matrix der unabhängigen Variablen** Die Planmatrix dient als Ausgangs- und Grundlage zur Aufstellung der Matrix der unabhängigen Variablen. Sie übernimmt die Spalten der ursprünglichen Planmatrix und wird um zwei weitere Spalten erweitert, die Spalte für den Identifier und die für die Wechselwirkungen. Bei einem  $2^2$ -Faktorenplan besteht die Matrix aus den zwei Spalten für die Hauptfaktoren A und B und aus der Spalte der Wechselwirkung AB. Die Berechnung der jeweiligen neuen Vorzeichen erfolgt einfach durch Multiplikation der an der Wechselwirkung beteiligten Faktoren.

**Planmatrix** Nachdem die Faktoren, die Stufen und daraus die Anzahl der Versuche festgelegt wurden, beginnt die Aufstellung der Planmatrix. In der Planmatrix werden die Faktorstufen kombiniert und jede Faktorstufenkombination wird einer systematischen Versuchsnummer, die zugleich den Versuchspunkt repräsentiert, zugeordnet. Dabei werden zunächst die echten einzustellenden Parameter der einzelnen Faktoren in der Planmatrix nicht als Realwerte, sondern in normierter Form eingetragen, um die Verfahrensweise bei der Versuchsplanung und bei der späteren Auswertung zu erleichtern. In der Planmatrix stellen das Symbol “-” für einen unteren natürlichen Parameterwert und das Symbol “+” für einen oberen.

## 2 Allgemeine Anforderungen

Anhand eines einfachen Beispiels, in dem zwei Faktoren A und B auf zwei Faktorstufen untersucht werden, wird im weiteren Verlauf die Aufstellung, die Versuchsdurchführung und die Auswertung eines solchen Plans gezeigt. Mit Hilfe des  $2^2$ -Faktorenplans werden zwei Faktoren mit je zwei Stufen angewandt. Die Abbildung 2.1 zeigt die Planmatrix, die Antwortmatrix, die Matrix der unabhängigen Variablen und die Effektmatrix, wobei darauf hingewiesen wird, dass die Pfeilrichtung in der Abbildung das schrittweise Vorgehen bei der Durchführung und Auswertung anzeigt. Die Matrizen der unabhängigen Variablen und der Effekte treten in dieser Abbildung deswegen in den Hintergrund, da sie zwar für die Diplomarbeit keine Relevanz haben, aber für die statistische Vorgehensweise unentbehrlich sind.

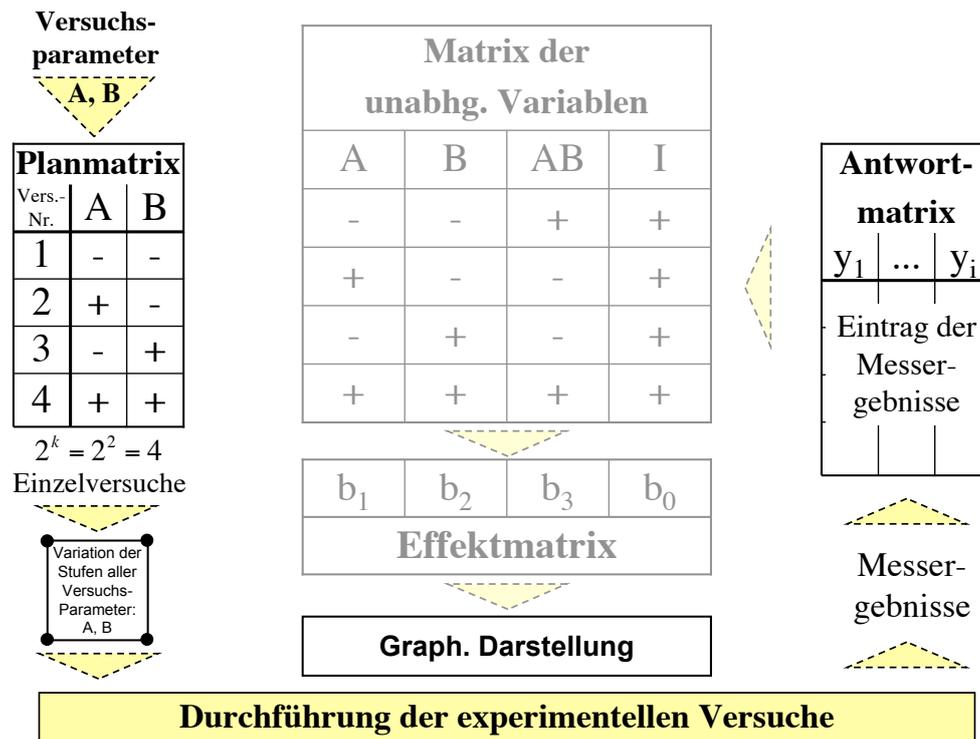


Abbildung 2.1: Ablauf eines vollständigen  $2^2$ -Faktorenplans [Gies 06]

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Vorteil dieses vollständigen faktoriellen Versuchsplans in der vollständigen Erfassung aller Haupt- und Wechselwirkungseffekte und in der Ermittlung einer daraus resultierenden linearen Regression liegt, womit ein mathematisches Modell für die Anordnung der Messpunkte gefunden werden kann. Diese Versuchspläne besitzen eine zuverlässige Aussagefähigkeit. Es gibt auch ein Nachteil, dass mit wachsender Zahl an Faktoren der Versuchsumfang exponentiell steigt.

## 2.2.2 Versuchsplan zweiter Ordnung

Faktorielle Versuchspläne zweiter Ordnung dienen primär zur Ermittlung von mathematischen Modellen, die das Systemverhalten mit einem quadratischen Ansatz beschreiben sollen.

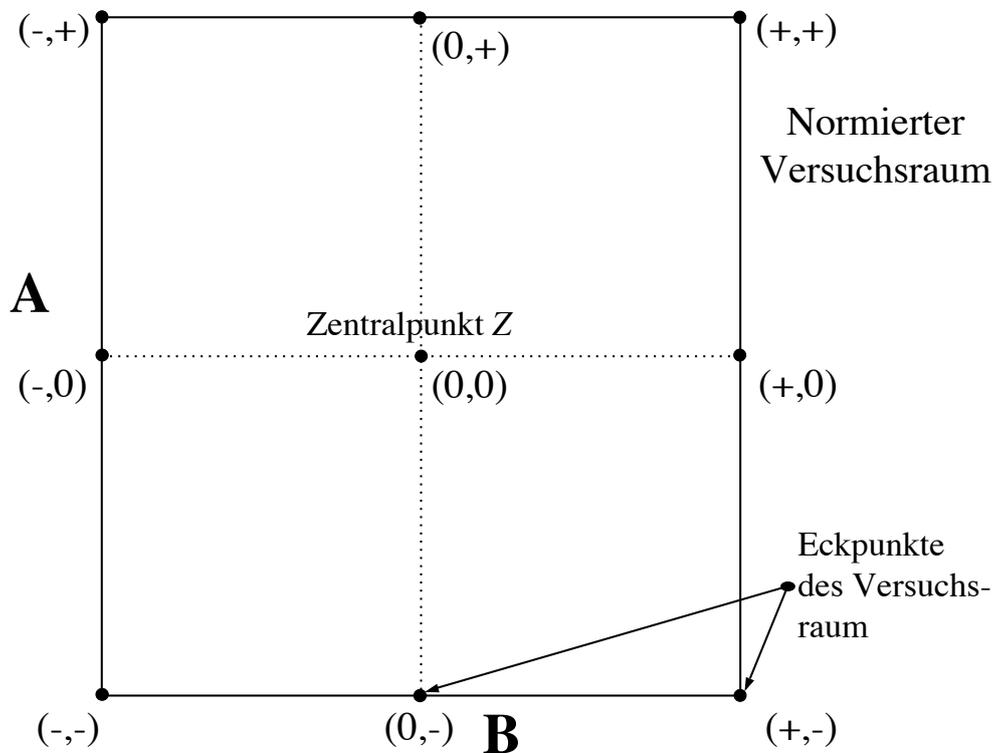


Abbildung 2.2: Versuchspunkte eines faktoriellen Versuchsplans zweiter Ordnung für zwei Einflussgrößen

Hier ist es erforderlich, dass jede Einflussgröße auf drei unterschiedlichen Einstellstufen wiederzufinden ist. Im einfachsten Fall werden die Stufen auf die Werte  $-1, 0$  und  $+1$  bzw.  $-, 0$  und  $+$  eingestellt. D. h. dass der Versuchsplan erster Ordnung nur um die "neutrale" Stufe  $0$  erweitert wurde, wodurch der faktorielle Versuchsplan zweiter Ordnung, auch  $3^k$ -Plan genannt, entstanden ist (Abbildung 2.2). Ein Paar der Form  $(*, *)$  für  $* = \{+, -\}$  bildet in der Matrix einen Eckpunkt bzw. einen Versuchspunkt dar. Dagegen wird das Paar der Form  $(0, 0)$  als Zentralpunkt bezeichnet.

Der für die Realisierung eines  $3^k$ -Plans erforderliche Versuchsumfang findet sich in folgender Formel wieder:

$$N = 3^k \quad (2.8)$$

mit  $N =$  Anzahl der Versuchspunkte  
 $k =$  Anzahl der Einflussgrößen  
 $3 =$  Anzahl der Stufen pro Faktor

## 2 Allgemeine Anforderungen

Einerseits erzielt man mit dieser Variante gegenüber den  $2^k$ -Pänen ein Mehr an Information, jedoch andererseits einen Mehraufwand an Versuchsdurchführungen. “Aus diesem Grunde werden  $3^k$ -Päne in der Praxis nur für maximal vier Einflussgrößen angewandt” [Eire 06]. Darüber hinaus existieren auch teilfaktorielle  $3^{k-p}$ -Pläne, die in dieser Arbeit nicht weiter diskutiert werden.

Der Abschnitt 2.2 hat zwei alternative Versuchspläne im Rahmen der Statistik vorgestellt. Welche der beiden Modelle in dieser Diplomarbeit zum Einsatz kommt, wird im Kapitel 4 unter Abschnitt 4.3 entschieden. Zuvor wird die Versuchsanlage aufgebaut und beschrieben. Dabei geht es zunächst darum, welche Komponenten eingesetzt wurden (Abschnitt 3.1.1), wie sie miteinander verkabelt sind (Abschnitt 3.1.2) und an welcher Stelle der Potentiometer eingebaut wurde (Abschnitt 3.1.3). Im Anschluss daran werden die Tools vorgestellt, ohne denen kein Messen möglich ist. Dabei werden die Funktionalitäten sowohl des Senders (Abschnitt 3.2.1) als auch des Empfängers beschrieben (Abschnitt 3.2.2).

# 3 Versuchsaufbau

Nachdem die Randbedingungen für die Aufgabenstellung festgelegt wurden, gilt es nun, eine passende Versuchsumgebung aufzubauen, in der die allgemeinen Anforderungen aus dem Kapitel 2 erfüllt sind. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Versuchsanordnung, wie und mit was sie aufgebaut ist, ist Gegenstand dieses Kapitels. Es liegt eine einfache Netzstruktur vor, bestehend aus zwei Rechnern, die über einen Switch miteinander verbunden sind. Am Switch ist ergänzend ein Ethernetkabel angeschlossen, über das die IP-Pakete von einem Rechner zum anderen verschickt werden. In beiden Rechnern laufen verschiedene Tools für die Messungen. Woraus die Funktionalitäten der einzelnen Tools bestehen, wird am Ende dieses Kapitels in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 erläutert.

## 3.1 Beschreibung des Testbeds

Im Testbed werden Komponenten und Verkabelungen benötigt, die den Anforderungen aus dem Kapitel 2 genügen. Der Aufbau findet am LRZ statt.

Das LRZ ist gemeinsames Rechenzentrum für Forschung und Lehre für alle Münchner Hochschulen und befindet sich auf dem Forschungszentrum in Garching bei München. Es hat einerseits die Aufgabe, allgemeine Dienste der Informationsverarbeitung für die Hochschulen in München und für die Bayerische Akademie der Wissenschaften zu erbringen. Zum anderen stellt es mit dem Münchner Wissenschaftsnetz (MWN) eine leistungsfähige Kommunikationsinfrastruktur bereit und ist Kompetenzzentrum für Datenkommunikationsnetze. Es betreibt umfangreiche Platten- und automatisierte Kassetten-Speicher zur Sicherung großer Datenmengen (Archivierung und Backup) und ist Zentrum für technisch-wissenschaftliches Hochleistungsrechnen für alle deutschen Hochschulen [[Sche 07](#)].

### 3.1.1 Komponenten

Zunächst werden zwei Rechner und ein Switch im Testbed benötigt. Ein Rechner davon soll die IP-Pakete generieren und verschicken. Die gesendeten Pakete kommen dann beim anderen Rechner an. Die Abbildung 3.1 auf Seite 20 skizziert den Aufbau der Anlage.

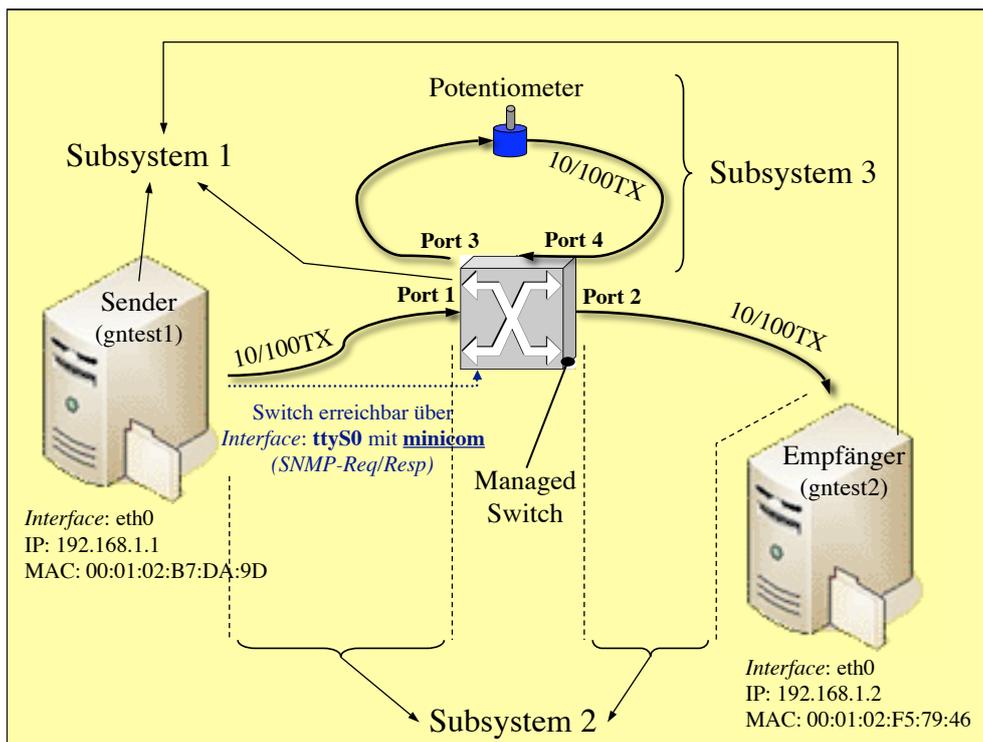


Abbildung 3.1: Skizze für den Aufbau des Testbeds am LRZ

Der Sender (*gntest1*) erzeugt die IP-Pakete und verschickt sie an den Empfänger (*gntest2*). Der Empfänger zählt die ankommenden Pakete mit. Dabei durchlaufen die Pakete u. a. auch die Teilstrecke, bei der ein elektrischer Widerstand in Form eines Potentiometers eingebaut ist. Um den Verlauf der IP-Pakete in dem Testbed-Szenario nachvollziehen zu können, wird er in einzelne Teilstreckenabschnitte gegliedert:

- Sender (*gntest1*, End Point) ⇒ Switch (Port 1)
- Switch (Port 1) ⇒ Switch (Port 25) [ Switch – intern ]
- Switch (Port 25) ⇒ Switch (Port 26) [ Segment mit dem Potentiometer ]
- Switch (Port 26) ⇒ Switch (Port 2) [ Switch – intern ]
- Switch (Port 2) ⇒ Empfänger (*gntest2*, End Point)

Somit liegt zwischen den beiden Rechnern ein E2E Link vor. Ein IP-Paketverlust liegt dann vor, wenn eine Differenz zwischen der Anzahl der gesendeten und der empfangenen Pakete existiert. Gibt es dagegen keine Differenz, so spricht man von einer erfolgreichen Übertragung aller Pakete. Die Gleichung für die Anzahl an Paketverlusten einer Messreihe wurde bereits im Abschnitt 4.1 festgelegt.

Als nächstes sind die Adressdaten und die entsprechenden Interfaces der einzelnen im Testbed vorkommenden und eingesetzten Komponenten in der unten angegebenen Tabelle 3.1 auf Seite 21 aufgelistet. Sie dienen einer zusammenfassenden Übersicht. Die Daten sind in der Abbildung 3.1 verteilt wiederzufinden. In den Zeilen

befinden sich die Hardwarekomponenten und in den Spalten die zu ihnen gehörenden IP-, MAC-Adressen und Interfaces.

Tabelle 3.1: Technische Daten der im Testbed vorkommenden Hardwarekomponenten

	IP-Adresse	MAC-Adresse	Interface
$PC_1$ (gntest1)	192.168.1.1	00:01:02:B7:DA:9D	eth0
$PC_2$ (gntest2)	192.168.1.2	00:01:02:F5:79:46	eth0
HP ProCurve2626	192.168.1.3	00:15:60:27:39:C1	ttyS0

Der *ProCurve 2626*-Switch von HP übernimmt im Rahmen dieser Versuchsanordnung zwei Aufgaben: Zum einen werden die angekommenen IP-Pakete an Port 1 auf das gesonderte Ethernetkabel (Port 3) umgeleitet, um dann vom Port 4 über Port 2 weiter an den Empfänger zu gelangen. Zum anderen zählt er die verworfenen Frames mit.

### 3.1.2 Verkabelung

Die drei Komponenten (gntest1, gntest2 und der Switch) werden miteinander verkabelt, wobei je ein Ethernet-Kabel der Abschirmung *Cat-5 (10/100TX)* die beiden Rechner mit dem Switch verbindet. Ein Rechner (*gntest1*) wird an den Port 1 des HP-Switches angeschlossen und der andere (*gntest2*) an den Port 2. An den Ports 3 und 4 wird ebenfalls ein Ethernetkabel angeschlossen.

Um der Anforderung gerecht zu werden, fehlerhafte Frames zu erzeugen, ist auf der Teilstrecke mit dem Ethernetkabel zusätzlich ein Potentiometer eingebaut, um gezielt fehlerhafte Frames im Bereich des elektrischen Netzes zu erzeugen. Diese fehlerhaften Frames werden dann vom Switch mitgezählt. Vom *gntest1* aus kann der Switch sowohl über ein Managementinterface (serielle Schnittstelle) als auch über eine SNMP-Abfrage erreicht werden.

### 3.1.3 Einbau der Potentiometer

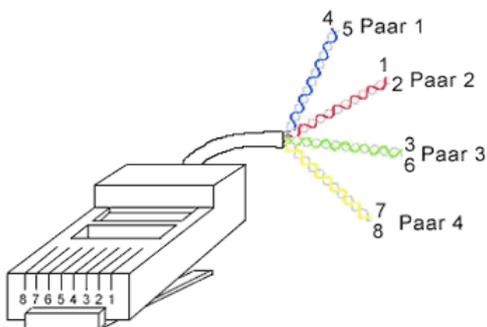


Abbildung 3.2: Querschnitt eines RJ45-Stecker

Die beiden Ports 3 und 4 werden mit einem Ethernetkabel belegt, bei dem ein regelbarer Widerstand eingebaut ist. Es macht wenig Sinn, jede Ader bzw. jedes Pin eines Ethernetkabels durchzutrennen und anschließend mit jeweils einen Potentiometers wieder zusammen zu löten. Die Steckerbelegung eines Twisted-Pair-Kabels in der Abbildung 3.2 zeigt, dass bei 10/100 MBit Ethernet von den acht verfügbaren Adern nur die Ader 1, 2, 3 und 6 genutzt werden. Die ersten beiden Adern werden

für das Senden von Daten belegt, während die Pins 3 und 6 für den Empfang dergleichen ausgelegt sind [Uhlm 07]. Die übrigen ungenutzten Adern werden dann aktiviert, wenn entweder statt 10/100 MBit 1 GBit für die Übertragung von Daten erforderlich sind oder Power over Ethernet verwendet wird.

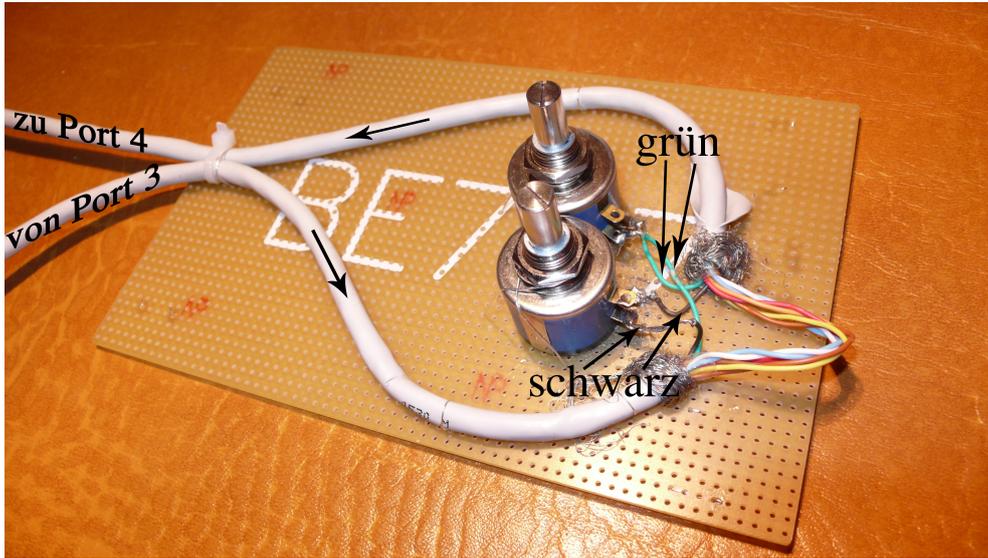


Abbildung 3.3: Die eingebauten Potentiometer auf einer Platine gelötet

Nachdem die Frames im Rahmen der Experimente ausschließlich unidirektional verschickt werden (siehe Pfeilrichtung in der Abbildung 3.3), also im Modus *half-duplex*, sind nur noch die Ader 1 und 2 von Interesse. Die Abbildung 3.3 zeigt, wie die Ader 1 (schwarz) und 2 (grün) durchtrennt und deren Enden jeweils an die Kontaktstellen des Potentiometers gelötet wurden. Die Potentiometer und das Ethernetkabel wurden deswegen auf die Platine gelötet, um bei der Durchführung der Experimente weitere Störgrößen zu vermeiden. Nur so können statistisch zuverlässige Messdaten gesammelt werden.

## 3.2 Tools für Messungen

Es stellt sich nun die Frage, welche Anwendung für die Testumgebung am ehesten geeignet ist, bei der in dem einen Rechner die IP-Pakete erzeugt und zum anderen Rechner verschickt, andererseits diesselben innerhalb eines Experiment gesendeten IP-Pakete beim Empfänger gezählt werden. Es gibt auf diesem Gebiet sowohl kommerzielle Anwendungen (wie z. B. OMNICOR: Network testing tools [Omni 07] oder PACKET DATA SYSTEMS Ltd (PDS): NetDisturb - IP Network Impairment Emulator [Ltd 07]) als auch *Open Source* Applikationen (wie z. B. *Open Internet Measurement Project* (OpenIMP) [Mark 07]). Beide Lösungsansätze kommen für den Einsatz im Testbed nicht in Frage, da die Beschaffung von kommerziellen Softwareprodukte stets mit Kosten verbunden und die Konfiguration der sogenannten *Open Source* Anwendungen sehr zeitaufwendig ist. Der Aufwand für die Installation rechtfertigt den Nutzen nicht. Die benötigte Funktionalität kann durch eine eigene Implementierung verhältnismäßig einfach erzielt werden.

Zur Implementierung des Codes kam die Skriptsprache Perl zum Einsatz, weil sie recht einfach und schnell programmieren lässt und weit verbreitet ist, d. h. auf sehr vielen Systemen standardmäßig installiert ist. Ferner ist eine sehr umfangreiche Modulsammlung vorhanden, wie z. B. CPAN. Als Grundlage und Ausgangspunkt für die Programmierung wurde eine einfache Client-/Server-Architektur mit UDP-Socket gewählt, die dann den Erfordernissen der Versuchsanlage angepaßt wurde. Zwei separate Tools werden dann in die jeweiligen Rechner (*gntest1*, *gntest2*) eingesetzt, die u. a. die Durchführung der Versuche neben dem einstellbaren Widerstand wesentlich bestimmen.

Im Anhang B befinden sich die Quellcode der Tools. Einen ersten Eindruck in den originalen Codefragment für den Sender kann unter B.1 und für den Empfänger unter B.2 gewonnen werden. Des weiteren gibt es Unterprogramme, auf die die beiden Codefragmente zugreifen. Die entsprechende Implementierung ist unter B.3 zu finden.

Die Skizze in der Abbildung 3.4 veranschaulicht den Verlauf der beiden Implementierungen sowohl auf Seite des Senders als auch auf Seite des Empfängers. Das eine Tool enthält die Funktionalität eines Senders, der im *gntest1* zum Laufen gebracht wird, das andere die eines Empfängers, der im *gntest2* zum Einsatz kommt.

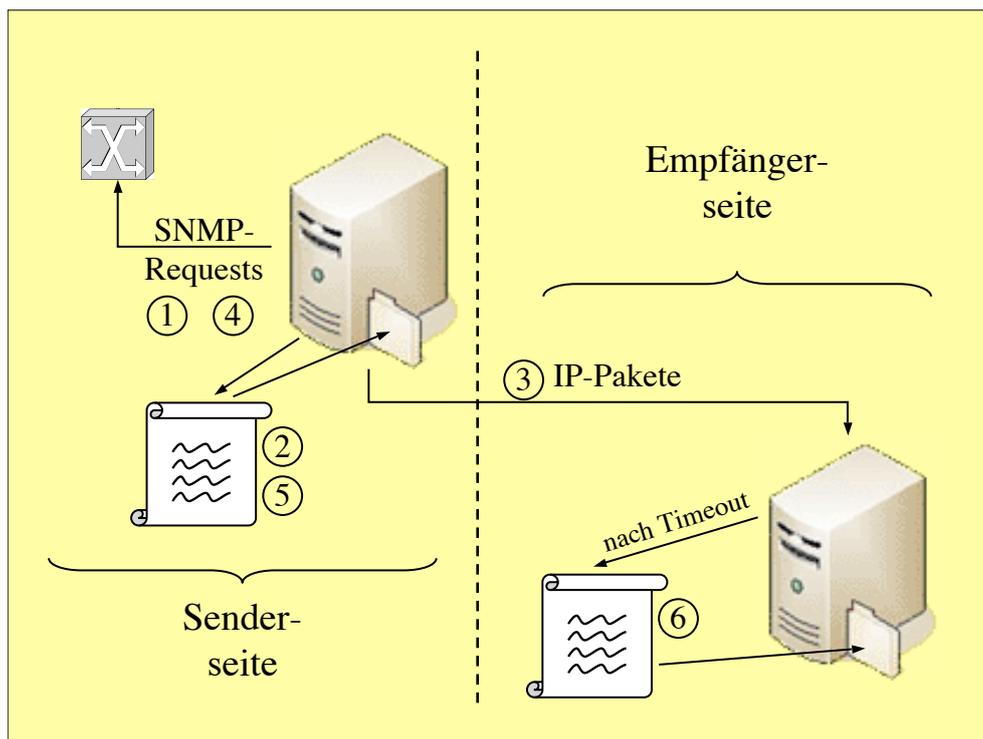


Abbildung 3.4: Ablaufstruktur der beiden Implementierungen

Im folgenden werden die wesentlichen Funktionalitäten der einzelnen Tools beschrieben. Dabei wird darauf hingewiesen, dass sich die Nummerierungen in der Verlaufsskizze im Text wieder finden.

### 3.2.1 Funktionalität des Senders

Vor dem Versenden der ersten Pakete fragt der Sender via *SNMP* (1) die für die statistische Auswertung relevante Statusinformation (Error Rx) des Switch ab und protokolliert das Anfrageergebnis in einer Log-Datei (2). Nach diesem Schritt werden die eingestellten Parameter, wie die Paketgröße, die Anzahl der Pakete (Messwert), Anzahl der Wiederholungen von Messwerten (Messreihe) und Anzahl der Wiederholungen von Messreihen (Versuchspunkt) ausgeführt. Nach jedem Versenden eines Messwertes (3) wird der Switch wiederholt nach dem Wert der aktuellen Anzahl an fehlerhaften Frames (4) abgefragt. Diese Messergebnisse werden solange aufgezeichnet, wie die Wiederholungen von Messwerten bzw. Messreihen noch nicht abgeschlossen sind (5).

### 3.2.2 Funktionalität des Empfängers

Nachdem der Empfänger in der Warteposition ist, um überhaupt etwas empfangen zu können, muss er vor dem Sender gestartet werden. Bei der Initialisierung des Tools legt sich der Empfänger sowie der Sender eine Log-Datei an, sobald er das erste IP-Paket vom Sender empfangen hat. Bei ihm ist im Code ein Timeout eingerichtet, der dafür sorgt, dass nach Ablauf des Timeouts das Socket geschlossen wird und ein Empfang von weiteren Paketen nicht mehr möglich ist. Jede empfangene Messreihe zusammen mit seinen Beobachtungsdaten wird als Ergebnis in Form des Mitzählens von IP-Paketen während der Durchführung eines Experiments in die Log-Datei gespeichert (6). Sollten zwischendurch Pakete innerhalb einer Messreihe oder sogar über mehrer Messreihen hinweg verloren gegangen sein, wird auch der Verlust mit registriert.

Somit decken die beiden Implementierungen alle Anforderungen an eine Versuchsanforderung ab. Der Sender erzeugt die IP-Pakete und schickt sie zum Empfänger. Der Empfänger übernimmt die Funktion eines IP-Paketzählers. Der Switch zählt alle fehlerhaften Frames mit, deren Anzahl dann aufgrund einer SNMP-Anfrage seitens des Senders an ihn geliefert wird.

Nachdem die Versuchsanlage aufgebaut und beschrieben wurde, gilt es nun, die allgemeine Grundlegung der statistischen Versuchsmethodik aus dem Abschnitt 2.2 wieder aufzugreifen und konkret für diese Arbeit anzuwenden.

# 4 Planung und Gestaltung der Experimente

Zunächst wird das System nach dessen Einfluss-, Ziel- und Störgrößen analysiert. Der Abschnitt 4.2 ermittelt den Umfang an Paketen pro Messwert und das geeignete Intervall für den Widerstand. Im Anschluss an die Entscheidung für einen bestimmten Versuchsplan (Abschnitt 4.3) gilt es, nicht nur die Faktoren und deren Stufen zu bestimmen, sondern auch die Anzahl der Messwerte pro Versuchspunkt zu ermitteln (Abschnitt 4.4.2). Am Ende des Kapitels 4 wird ein erster Ansatz zur Ableitung von Dienstgütezuständen unternommen.

## 4.1 Systemanalyse

Ziel dieser Arbeit ist es, mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung nicht nur einen Zusammenhang zwischen den Einfluss- und Zielgrößen, sondern auch vor allem zwischen den Zielgrößen untereinander zu beobachten. Um aber einen dem Ziel entsprechenden und bestimmten Versuchsplan aufstellen zu können, ist zunächst eine detaillierte Beschreibung der Ausgangssituation notwendig. Dies beinhaltet neben der Vorstellung *Statistischer Versuchsmethodik* (Abschnitt 2.1) und *Statistischer Versuchsplanung* (Abschnitt 2.2) eine ausführliche Beschreibung aller relevanten Einfluss- und Zielgrößen.

### 4.1.1 Einflussgrößen

Eine oder mehrere Einflussgrößen stehen in einem funktionalen Zusammenhang zur Zielgröße einer Untersuchung und beeinflussen sie, d. h. die Parameterwerte der Einflussgrößen werden auf einen Wert der Zielgröße abgebildet.

Folglich ist jede Zielgröße von diversen Einflussgrößen abhängig. Dank dieses Zusammenhangs können alle Ursachen identifiziert werden, die sich auf das Systemverhalten auswirken. Andernfalls kann es nur unvollständig abgebildet und optimiert werden. Der Fall tritt dann ein, wenn Störgrößen nicht erkannt werden. Deshalb wird versucht, die Störgrößen über alle Versuchsreihen hinweg möglichst konstant zu halten. Die Zusammenhänge werden in der Abbildung 4.1 auf Seite 26 eines Ursache-Wirkung-Modells veranschaulicht [Eire 06].

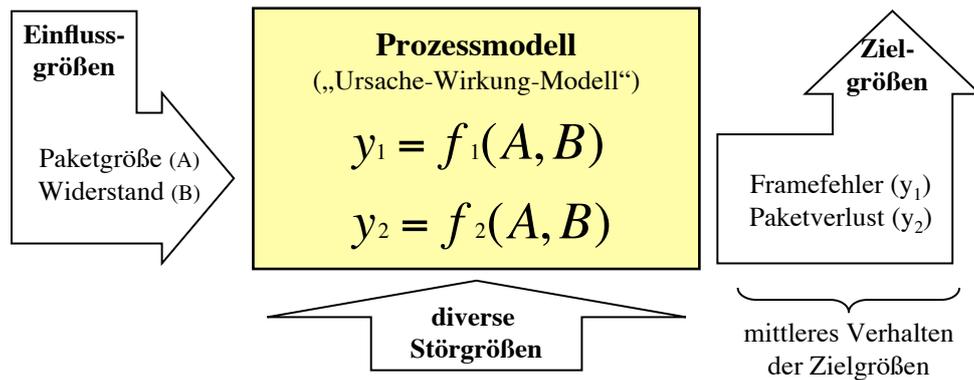


Abbildung 4.1: Darstellung der relevanten Größen im Ursache-Wirkung-Modell

#### 4.1.1.1 Paketgröße

Die erste der beiden Einflussgrößen für das Systemverhalten ist die Größe eines Pakets. Das Internet Protokoll kommt hier zum Einsatz.

Es gilt bei der Einstellung der Paketgröße zu beachten, dass in einem Ethernet-Datenfeld (Payload) die maximale Größe auf 1500 Byte spezifiziert wurde [Horn 08]. Nimmt man die beiden Header von IP und dem User Datagram Protocol (UDP) in Byte zusammen und zieht den Betrag von Payload des Ethernet-Frames ab, so bleiben 1472 Bytes an reinem Datenvolumen für das IP-Paket, das Platz in einem Frame hat. Für die Länge des IP-Paketes im Rahmen dieser vorliegenden Arbeit ergibt sich nun, dass alle Eingaben für IP-Pakete, die größer als 1472 Bytes sind, für die Untersuchung interessant sind, da die Vermittlungsschicht eine Fragmentierung vornehmen muss. Dagegen ist eine Vermeidung von Fragmentierungseffekte eher uninteressant, da sonst eine 1:1-Abbildung der Fehler von der IP-Schicht auf die Ethernet-Schicht vorliegt und somit für die Untersuchung nicht in Frage kommt.

Während der Versuche werden zum einen die bestimmte Anzahl an IP-Pakete versendet und zum anderen die angekommenen Pakete gezählt. Ein Zähler erkennt zudem, wann und ob das letzte Paket angekommen ist. Über den anderen Zähler kann die Größe und Anzahl der zu versendenden Pakete eingestellt werden. Bei jedem Durchlauf einer Messreihe werden die Messwerte aufgezeichnet, die dann für die statistische Auswertung relevant sind.

#### 4.1.1.2 Widerstand

Eine weitere Einflussgröße in diesem Experiment ist der elektrische Widerstand. Er ist Bestandteil des elektrischen Teilabschnittes und soll Framefehler verursachen.

Wie in der Abbildung 4.2 auf Seite 27 dargestellt, erleidet das elektrische Signal beim Durchlaufen eines elektrischen Leiters, wie z. B. eines Ethernetkabels, eine Abschwächung seiner Intensität und somit seiner Leistung; dieser Vorgang wird als *Energieverlust* bezeichnet. Je größer der Widerstand in einer Leitung ist,

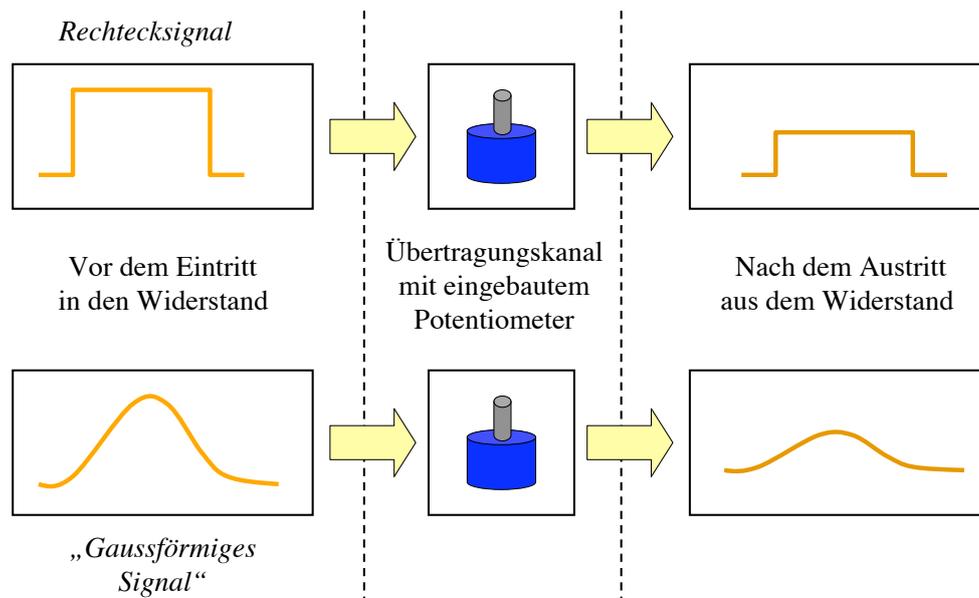


Abbildung 4.2: Energieverlust von Signalen während einer Übertragung

desto schwächer wird die Energie des Signals und desto häufiger können Bitstörungen auftreten. Die Signale können mit einem Regenerator verstärkt werden. Aufgrund der Signalstörung bzw. des Energieverlustes wird ein Frame fehlerhaft. Mit diesem Effekt soll im Experiment gezielt gearbeitet werden. In dem Teilbereich, in dem die Frames über eine elektrische Leitung geschickt werden, wird ein Potentiometer dazwischen geschaltet, bei dem der Wert des Widerstands bei jeder Versuchsdurchführung neu eingestellt werden kann. Aufgrund dieser Vorgehensweise soll eine längere Leitung simuliert werden, bei dem fehlerhafte Frames verursacht werden.

Die für die Experimente zur Verfügung gestellten Potentiometer besitzen dieselbe Eigenschaft wie die eines Schiebewiderstandes, bei dem der Wert durch das Schieben bzw. durch ein Regelwerk eingestellt wird. Ferner arbeitet der Widerstand nicht unter unregelmäßigen oder sogar zufälligen Bedingungen, sondern relativ konstant bzw. gleichmäßig, wobei dennoch eine geringfügige Abweichung von 5 % des jeweils eingestellten Wertes zu rechnen ist. Die Angabe der Abweichung kann von dem aufgeklebten Etikett des Potentiometers entnommen werden.

### 4.1.2 Zielgrößen

Aus der Rahmenbedingung, die von der Themenstellung und der Motivation her vorgegeben ist, gibt es zwei Zielgrößen, die - jede für sich betrachtet - in Abhängigkeit von den Einflussgrößen untersucht werden. Zum einen ist die mittlere Wirkung der *verloren gegangenen Pakete* und zum anderen die der *fehlerhaften Frames* zu beobachten.

#### 4.1.2.1 Anzahl der verlorenen Pakete

Eine erste Zielgröße im Rahmen der Experimente ist das Messen von Paketverlusten. Ein Paket gilt dann als verloren, wenn es vom Sender gesendet, aber beim Empfänger nicht angekommen ist. In der Praxis wird bei der Bestimmung eines Paketverlustes mit einem Timeout für den Empfang von Datenpaketen gearbeitet. Der Paketverlust errechnet sich aus der Differenz der Anzahl der abgeschickten und der Anzahl der angekommenen Pakete ( $\Delta P$ ). Dies lässt sich durch folgende Gleichung 4.1 ausdrücken:

$$\Delta P = (P_{out} - P_{in}) \quad (4.1)$$

mit  $P_{out}$ : Anzahl der abgeschickten Pakete  
 $P_{in}$ : Anzahl der angekommenen Pakete

Jede berechnete Differenz von Paketen bildet einen Messwert innerhalb jeder Messreihe. Auch diese Beobachtungsdaten fließen dann in die statistische Analyse ein, wobei vorwiegend die statistische Auswertungsmethode der absoluten Häufigkeit zum Einsatz kommt.

#### 4.1.2.2 Anzahl der fehlerhaften Frames

Die zweite Zielgröße ist das Messen von fehlerhaften Frames. Ein Frame wird dann als fehlerhaft erkannt, wenn in ihm Fehler durch "umgekippte" Bits vorliegen. Mittels eines Prüfsummenverfahrens wird die Korrektheit eines Frames ermittelt. Verläuft das Prüfverfahren positiv, wird der Frame als korrekt erkannt, ansonsten als fehlerhaft verworfen. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass es hier um Fehlererkennungs-, nicht aber um Fehlerkorrekturtechniken geht [KuRo 05]. Liegt also ein fehlerhafter Frame vor, so wird er komplett verworfen. Nur derartige fehlerhafte Datenframes werden gemessen, festgehalten und für die statistische Auswertung herangezogen.

Den aktuellen Stand der fehlerhaften Frames wird fortlaufend von einer Komponente gespeichert. Um die korrekte Anzahl der verworfenen Frames pro Messwert zu ermitteln, wird der Inhalt jeweils vor und nach dem Messen eines Messwertes aus der Komponente ausgelesen. Somit gewinnt man aus der Differenz ( $\Delta F$ ) der beiden Inhalte den Wert der verworfenen Frames als einen Messwert, der dann zu  $\Delta P$  zugeordnet werden kann. Dies wird auch als *Frameverlust* bezeichnet und lässt sich durch die nächst folgende Gleichung 4.2 ausdrücken:

$$\Delta F = (F_{after} - F_{before}) \quad (4.2)$$

mit  $F_{after}$ : Anzahl der fehlerhaften Frames *nach* dem Messen eines Messwertes  
 $F_{before}$ : Anzahl der fehlerhaften Frames *vor* dem Messen eines Messwertes

### 4.1.3 Protokolleinteilung

Für jede OSI-Schicht wurden Protokolle festgelegt, so dass zwei Rechner unter vorgeschriebenen Regeln kommunizieren können. So kennt die Sicherungsschicht Protokollarten wie *Ethernet*, *Token Ring*, *FDDI*, *PPP*, *ARP* etc. Ebenso gibt es auf der OSI-Schicht 3 eine Vielzahl von RFC-spezifizierten Protokollen, wie z. B. *RIP*, *IP*, *ICMP*, *OSPF*, *BGP* etc. Bei der Durchführung der Experimente im Rahmen dieser Arbeit werden drei Protokolle zum Einsatz kommen:

- User Datagram Protocol (UDP / OSI-Schicht 4)
- Internet-Protokoll (IP) zum Versenden der Pakete (OSI-Schicht 3)
- Ethernet-Protokoll zum Messen von fehlerhaften Frames (OSI-Schicht 2)

Es gibt zwei Gründe, das UDP im Rahmen dieser Diplomarbeit einzusetzen:

1. Es gibt zu diesem Protokoll eine einfache Implementierung, die als Basis dient, IP-Pakete zu versenden bzw. zu empfangen. Auf diese "Rohfassung" eines Client-Sever-Paradigmas stützend, besteht nun die Herausforderung, ein Tool für die Experimente so zu erstellen, dass die erforderlichen Aufgaben im Rahmen der Experimente durchzuführen sind, wie z. B. die Größe eines Pakets oder die Anzahl der zu versendenden Pakete.
2. Dieses Protokoll verursacht im Vergleich zu Transport Control Protocol (TCP) kein Overhead verursacht. Der Mechanismus des Drei-Wege-Handshakes und des Acknowledgements kommt bei UDP nicht vor. Diese zusätzliche Mechanismus würde die Messergebnisse deutlich verfälschen. Weil UDP dies alles nicht hat, wird es dem TCP vorgezogen.

Anhand der Verknüpfung von IP-Adressen (*Source-Address*, *Destination-Address*, OSI-Schicht 3) und Portnummern (*Source-Port*, *Destination-Port*, OSI-Schicht 4) kann ein eindeutiger Datenstrom erzeugt werden. Über einen längeren Zeitraum können auch mehrere Datenströme hintereinander beobachtet werden. Die Abbildung 4.3 auf Seite 30 veranschaulicht das Ineinander-Verschachteln der drei Protokolle Ethernet, IP und UDP. Die verknüpfenden Parameterwerte in den IP- und UDP-Headern sind in dieser Abbildung hervorgehoben.

### 4.1.4 Identifizierung und Minimierung von Störgrößen

Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorherigen Abschnitte, in denen die Zielgrößen definiert und die Einflussgrößen nach den Anforderungen der statistischen Versuchsplanung angepasst wurden, wird in diesem Abschnitt geklärt, ob und inwiefern im Aufbau und bei der Durchführung der Experimente Störgrößen auftreten können. Es soll damit die erforderliche Wiederholbarkeit der Messergebnisse erreicht werden, die eine zwingende Voraussetzung für die Anwendbarkeit der statistischen Versuchsmethodik ist. Wenn ferner

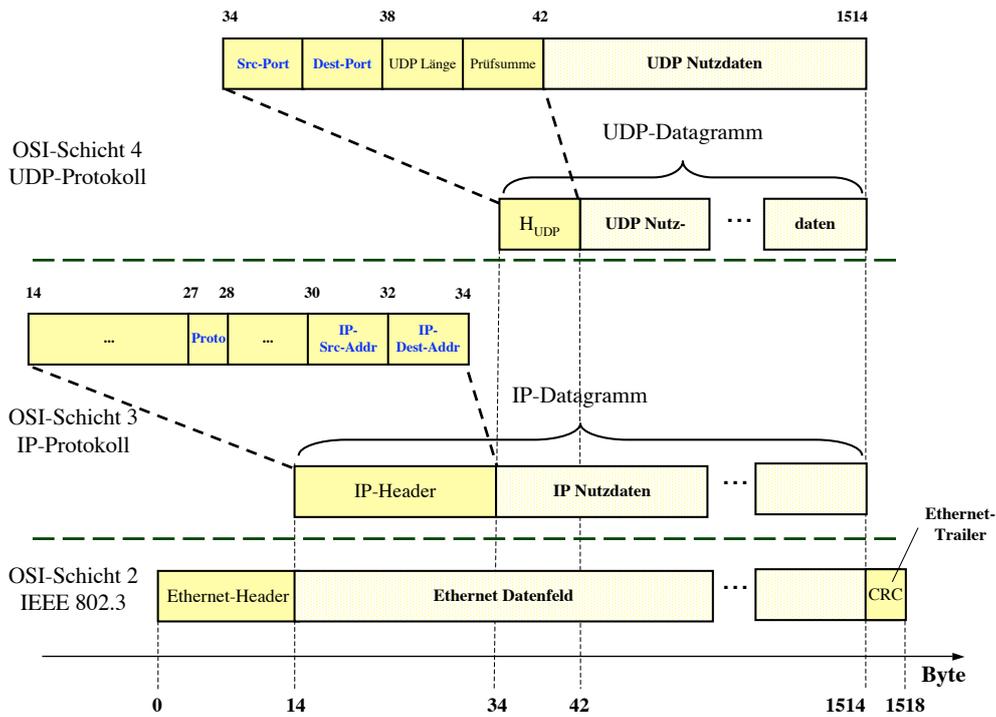


Abbildung 4.3: OSI-Schichten 2-4 und deren Einbettungshierarchie

die Störgrößen identifiziert und gegebenenfalls sogar minimiert werden können, dann ist damit die Allgemeingültigkeit und die Übertragbarkeit der ermittelten Zusammenhänge gewährleistet. Es wurde eine kritische Untersuchung durchgeführt, bei der im System eventuelle Störgrößen auftreten könnten, die u. U. zu minimieren sind.

Das experimentelle System kann in folgende drei Sub-Systeme unterteilt werden, die bereits in der Abbildung 3.1 auf Seite 20 eingezeichnet wurden:

- **Subsystem 1 – Zwei Rechner und ein Switch**

Abgesehen von Ausnahmesituationen wie Stromausfall, Störung im Betriebssystem oder Wackelkontakt zwischen der Ethernetkarte und dem Mainboard, können im allgemeinen keine für die Experimente beeinflussenden Störgrößen ausgemacht werden. Dieses Subsystem kann daher als sicher betrachtet werden.

- **Subsystem 2 – Ethernet-Kabel zwischen den Rechnern und dem Switch**

Es besteht die Möglichkeit, dass das Ethernet-Kabel (Cat-5) nicht korrekt im Port steckt. Eine Abhilfe schafft eine Überprüfung der Stecker oder das Ersetzen eines neuen Kabels. Mögliche elektromagnetische Störeinflüsse von außen können den Datenstrom nicht beeinflussen, da die verdrehten Adernpaare im Twisted-Pair-Kabel den erforderlichen Schutz garantieren. Ein elektrisch leitender Schirm (z. B. aus Aluminiumfolie oder Kupfergeflecht) schützt zusätzlich gegen störende äußere elektromagnetische Felder. Somit scheidet auch das zweite Subsystem als mögliche und ernst zu nehmende Störgröße bei der

Durchführung der Experimente aus.

- **Subsystem 3 – Teilabschnitt mit dem Ethernetkabel und dem eingebauten Potentiometer**

In diesem Subsystem gibt es mehrere Lötstellen, die die einzelnen Aderpaare des Ethernetkabels mit dem Potentiometer verbinden. Die Schutzfolie um diese Aderpaare wurde entfernt, wodurch auf die elektrischen Signale in der offen gelegten Leitung elektromagnetische Störungen einwirken können. Folglich liegt hierin eine mögliche Schwachstelle, da die elektromagnetische Stärke quadratisch abnimmt. Trotzdem gilt dies bei der Durchführung der Experimente mit zu berücksichtigen.

## 4.2 Vorversuche

Die Vorversuche dienen dazu, das Verhalten des Systems kennenzulernen. In diesem Zusammenhang werden die Vorversuche auch *Tastversuche* genannt, weil nach statistischen Gesichtspunkten ein bestmöglicher Versuchsplan *ertastet* wird. Unter einem bestmöglichen Versuchsplan versteht man nicht etwa, alle möglichen Faktorstufen auszuschöpfen, also einen Plan mit der größten Informationsmenge, sondern ein gezieltes bewußtes Auswählen von Versuchskombinationen mit einem sinnvollen Intervall für die jeweiligen Faktoren, aus der dann ein Maximum an Informationen bei der statistischen Auswertung gewonnen werden kann.

### 4.2.1 Festlegung der Anzahl der Pakete

Es werden zunächst mehrere Faktorstufenkombinationen zufällig bestimmt und durchgeführt, um die mittlere Wirkung einer Zielgröße, wie z. B. der Paketverluste zu beobachten. Dazu ist das 1<sup>st</sup> *lessons learned* ein geeignetes Hilfsmittel, um ggf. bestimmte Faktorstufen von vorne herein für die Versuchsplanung und -durchführung auszuschließen. Bei diesem Hilfsmittel muss zunächst ein Qualitätsmerkmal hinsichtlich des Messens von Paketen für einen Messwert in einem Versuch bzw. in einer Messreihe (Stichprobe) festgelegt werden. Es wird ein Entscheidungskriterium erstellt, aus dem hervorgeht, wie viele verloren gegangenen Pakete für einen Messwert noch akzeptabel (also *gut*) oder inakzeptabel (also *schlecht*) sind. Dieses Kriterium ist eng mit der Frage nach dem Umfang der zu sendenden Pakete verbunden. Zur Auswahl stehen drei Zahlen in Prozent (5 %, 1 % und 0,1 %). Bei einem statistischen Verlust von 5 % für die 1.000 verschickten Pakete, würden 50 verlorene Pakete erwartet. Analog lassen sich die übrigen Zahlenwerte interpretieren, wie sie in Tabelle 4.1 auf Seite 32 dargestellt sind.

Würde nun bei einem Vorversuch von 1.000 Paketen der Verlust zwischen 0 und 50 Paketen liegen, so war die Wahl richtig. Ansonsten muss das Entscheidungsverfahren modifiziert werden. Entweder erhöht man die Anzahl der Pakete bei gleichbleibenden Wert für den statistischen Verlust von 5 % oder man wählt einen anderen Wert und setzt die 1<sup>st</sup> *lessons learned*-Intervalle neu.

In einem der ersten Vorversuche wurden 100.000 Paketen mit je 24 KB pro Messwert beobachtet. Dabei wurde festgestellt, dass nach einer Laufzeit von zwölf Stunden erst 14 von insgesamt 105 Messwerten regis-

Tabelle 4.1: Übersicht aller möglichen Paketverluste

Verlust	# Pakete ( $P_{out}$ )	# Pakete ( $P_{in}$ )	# Pakete ( $\Delta P$ )	1 <sup>st</sup> lessons learned
5 %	100	95	5	[0; 50] $\mapsto$ gut ]50; 1000] $\mapsto$ schlecht
	<b>1.000</b>	<b>950</b>	<b>50</b>	
	10.000	9.500	500	
1 %	100	99	1	
	1.000	990	10	
	10.000	9.900	100	
0,1 %	100	99	1	
	1.000	999	1	
	10.000	9.990	10	

triert werden konnte. Angesichts eines Versuchspunktes von 105 Messwerten (das entspricht 15 Messwerte pro Messreihe), würde das zu einer Laufzeit von vier Tagen führen. Bei einem Versuchsplan erster Ordnung mit zwei Faktoren sind vier Versuchspunkte durchzuführen, was einer Gesamtlaufzeit von etwa 16 Tagen entspricht. Ähnliche Beobachtungen wurden mit 10.000 Paketen festgestellt, bei denen die zeitliche Dauer für die Durchführung desselben Umfangs für einen Versuchspunkt immer noch bei über sechseinhalb Stunden lag.

Somit schränkt sich die Auswahl auf einen Umfang von 100 und 1.000 Paketen ein. Da bei den weiteren Vorversuchen mit dem Paketumfang von 1.000 bereits Verluste von mehr als fünf, aber weniger als 50 Pakete beobachtet wurden, ist es sinnvoll, sich für alle statistisch geplanten und durchgeführten Versuche auf die Paketanzahl von 1.000 festzulegen.

## 4.2.2 Festlegung von Intervallen

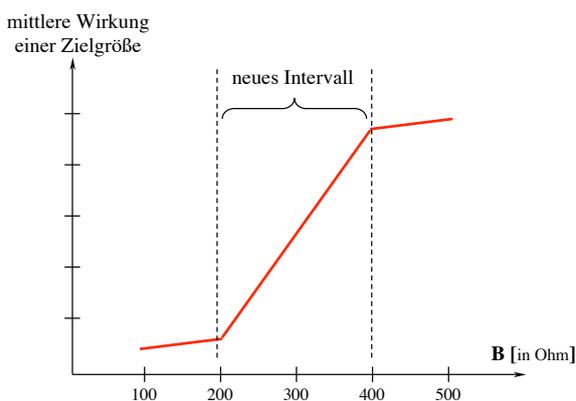


Abbildung 4.4: Suche nach einem Intervall

Es kann bei den Tastversuchen auch der mögliche Fall eintreten, bei dem sich ab einem bestimmten Schwellenwert der Verlauf der mittleren Wirkung nicht mehr linear fortsetzt, sondern bei der nächsten Faktorstufe einen Sprung nach oben beschreibt. Dort verläuft er dann in derselben Weise weiter, wie vor dem Sprung. Wenn am System ein solches Verhalten zu beobachten ist, dann können der zu untersuchende Intervall eines Faktors und dessen Levelstufen neu bestimmt werden. In der Abbildung 4.4

ist zu erkennen, dass beim Verlauf der mittleren Wirkung der Zielgröße bei 200  $\Omega$  ein Sprung und bei 500

$\Omega$  ein Knick zu beobachten ist. Dank dieser Beobachtung kann der Intervall von ursprünglich  $[100; 500]$  auf  $[200; 400]$  verkürzt werden. Das Ziel bei diesem statistischen Entscheidungsverfahren ist es, den zu untersuchenden Bereich stärker einzugrenzen, um das Verhalten des Systems besser beschreiben zu können. Gegebenenfalls kann dadurch der Aufwand bei der Planung und Durchführung der Experimente eventuell deutlich reduziert werden.

Aufgrund der letzten Überlegung nach einem geeigneten Intervall für die Experimente, wurde im Zusammenhang mit den Tastversuchen nach einem passenden Potentiometer gesucht, bei dem am System ein sprunghaftes Verhalten der mittleren Wirkung der Zielgrößen beobachtet wurde. Das gesuchte Intervall liegt zwischen  $100 \Omega$  und  $500 \Omega$ .

Auf Grundlage von gut gewählten Vor- bzw. Tastversuchen kann eine solide Basis für die Auswahl, Vorbereitung und Durchführung des Versuchsplans gebildet werden.

### 4.3 Auswahl des Versuchsplans

Im Rahmen der Systemanalyse wurden zwei Einflussgrößen (also:  $k = 2$ ) aufgezeigt. Dank dieser Feststellung hält sich die Auswahl eines passenden Versuchsplans in überschaubaren Grenzen. Zur Disposition stehen zwei mögliche statistische Versuchspläne: der  $2^2$ - und der  $3^2$ -Plan.

Wählt man die erste Variante, so nimmt man an, dass die mittlere Wirkung von einen der beiden Zielgrößen oder von den beiden zusammen ein lineares Verhalten nach sich zieht. Ferner bewegt sich der  $2^2$ -Versuchsplan zwischen nur zwei Levelstufen. Hiermit hat man zwar einen absolut minimalen Aufwand an Versuchen erreicht, aber das Ergebnis der statistischen Auswertung und seiner Interpretation sind nicht aussagekräftig genug. Zudem ist es äußerst schwierig, den Ausgang der Experimente im Vorfeld beurteilen zu können.

Eine differenziertere Darstellung am Ende der Durchführung von Versuchspunkten und deren statistischen Analyse bietet der  $3^2$ -Versuchsplan. In diesem Rahmen werden die Faktoren jeweils auf drei Stufenhöhen  $(-1, 0, +1)$  eingestellt. Mit der Zunahme an Versuchsaufwand geht aber ein erweiterter Informationsgewinn einher. Mit der Entscheidung für diesen Versuchsplan nähert man sich dem Ziel aus dem Abschnitt 2.2:

*Erstens* ist der Aufwand für die Durchführung der Experimenten immer noch minimal gehalten worden, ohne dabei absolut minimal zu werden und *zweitens* wurde damit ein maximaler Informationsgehalt bzgl. des Systemverhaltens erreicht.

### 4.4 Weitere Festlegungen für die Experimente

Auf Grundlage der im Abschnitt 4.1 durchgeführten Systemanalyse und unter Einhaltung der Randbedingungen des  $3^2$ -Versuchsplans erfolgt nun die *Bestimmung der Faktoren* mit deren *Faktorstufen*. Nachdem die

Tastversuche ein sprunghaftes Verhalten des für den Experimentator noch unbekanntes Systems gezeigt haben und somit ein passendes Intervall gefunden wurde, unterliegen die Faktoren und deren Faktorstufen bestimmten Einschränkungen. Ferner muss der *Umfang aller Messwerte pro Versuchspunkt* festgelegt werden.

#### 4.4.1 Bestimmung der Faktoren und Faktorstufen

Unter Berücksichtigung des  $3^2$ -Versuchsplans werden die zwei Einflussgrößen *Paketgröße* sowie *Widerstand* als Faktoren der Prozessparameter bestimmt. Aus den Vorversuchen können die vorgegebenen Parameter *Anzahl der Pakete* und *Größe des Intervalls* ohne Weiteres übernommen und in die Vorbereitung der Versuchsplanung integriert werden.

Nachdem die zu untersuchenden Faktoren bestimmt wurden, gilt es, deren einzelnen Faktorstufen festzulegen. Die richtige Auswahl der Faktorstufen hat einen relevanten Einfluss auf den Erfolg der Untersuchung. Speziell beim ausgewählten Versuchsplan ist zur Vermeidung von Fehlinterpretationen darauf zu achten, dass die Faktorstufen nicht zu nah beieinander, aber auch nicht zu weit auseinander liegen. Ausgehend von den arithmetischen Mittelwerten, wurden die Faktorstufen so gewählt, dass sie um den Mittelwert liegen, wobei der Mittelwert selbst der jeweiligen Einflussgrößen einen realen Wert darstellt. Die zwei eingestellten Werte bei diesem Versuchsplan sind im zusätzlichen Zentralpunkt *Z* gebündelt.

Es ist dabei zu beachten, dass das wesentliche Merkmal des  $3^2$ -Versuchsplans nicht ausser Acht gelassen werden darf. Dieser Plan kennt neben den beiden Faktoren auch die dreigliedrige Aufteilung der Stufen. Die Tabelle 4.2 enthält in Anlehnung an [Klei 04] einen gesamten Überblick über alle zu untersuchenden Faktoren und deren Faktorstufen.

Tabelle 4.2:  $3^2$ -Versuchsplan für die Experimente

Versuchspunkt <i>l</i>	Paketgröße <i>A</i> [Bytes]	Widerstand <i>B</i> [ $\Omega$ ]	Norm	
			<i>A</i>	<i>B</i>
1	2944	100	-	-
2	2944	400	+	-
3	2944	250	0	-
4	14720	100	-	+
5	14720	400	+	+
6	14720	250	0	+
7	8832	100	-	0
8	8832	400	+	0
9	8832	250	0	0

Nach dieser groben Darstellung der Faktoren samt Faktorstufen erfolgt das eigentliche Aufstellen des Versuchsplans. Hierbei werden den echten physikalischen Werten systematisch die Faktoren A und B zugeordnet und entsprechend die Faktorstufenkombinationen eingetragen.

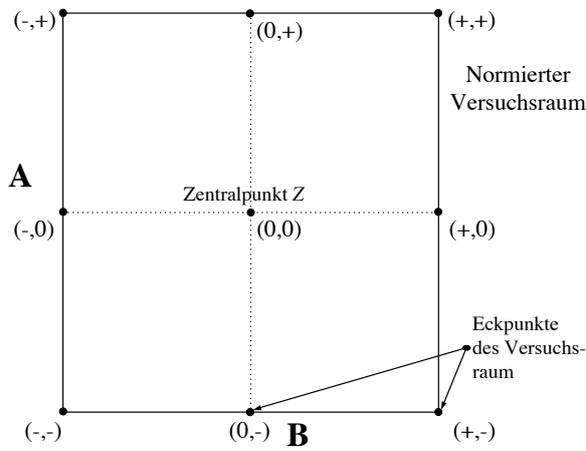


Abbildung 4.5: Normierter Versuchsraum

Diese Zuordnung aber hat grundsätzlich keinen Einfluss auf das spätere Versuchsergebnis. Die Abbildung 4.5 zeigt den normierten Versuchsraum aufgrund der Entscheidung für den  $3^2$ -Versuchsplan, der zur Aufstellung der Versuchspunkte dient.

Bei dieser Abbildung fällt bereits auf, dass nicht mehr die einzelnen Originalwerte der Faktorstufen, sondern normierte Werte, die sogenannten Stufenhöhen angegeben werden. Wie die Regel für die faktoriellen Versuchspläne erster Ordnung vorgibt, wird der unteren Stufenhöhe jeder Einflussgröße der

Wert “-” und der oberen der Wert “+” zugeordnet. Die mittlere Stufenhöhe erhält den Wert Null. Ein Stufenhöhen-Paar der Form  $(-, +)$  bildet in dieser Einstellmatrix einen Eckpunkt des Versuchsraums, wobei jeder dieser Eckpunkte einen Versuchspunkt repräsentiert.

Im Anschluss an dieses Kapitel erfolgt die Realisierung, Umsetzung und Durchführung der Versuche. Zuvor wird der Umfang an Messwerten für einen Versuchspunkt ermittelt.

#### 4.4.2 Umfang aller Messwerte pro Versuchspunkt

Die Ermittlung des Umfangs von Messwerten für einen Versuchspunkt hängt in erster Linie von der Gaußschen Normalverteilung ab. Es wird vorausgesetzt, dass die gemessenen Werte voneinander unabhängige und stochastisch gleich verteilte Werte sind. Schließlich kommt der *Zentrale Grenzwertsatz* der Mathematik zum Tragen:

“Bei vielen unabhängigen Einflussgrößen strebt die Häufigkeitsverteilung der davon in Summe beeinflussten Messgrößen zur Normalverteilung, egal welche Häufigkeitsverteilung jeder Einflussgröße für sich produzieren würde.” [MA ]

Zum besseren Verständnis sei auf die Abbildung 4.6 auf Seite 36 verwiesen, aus dem die Annäherung der verschiedenen Häufigkeitsverteilungen (treppenförmige Linie) an die Normalverteilung (durchgezogene Linie) ersichtlich ist. Selbst dann konvergiert die Binomialverteilung zur Normalverteilung, wenn die Häufigkeiten nicht gleichmäßig verteilt sind (untere Bildhälfte).

Nachdem die erste Rahmenbedingung geklärt wurde, sind nun weitere allgemeine Aussagen nötig, um die Ermittlung des Umfangs gut eingrenzen zu können. Es ist offensichtlich, dass jeder Versuchspunkt eine be-

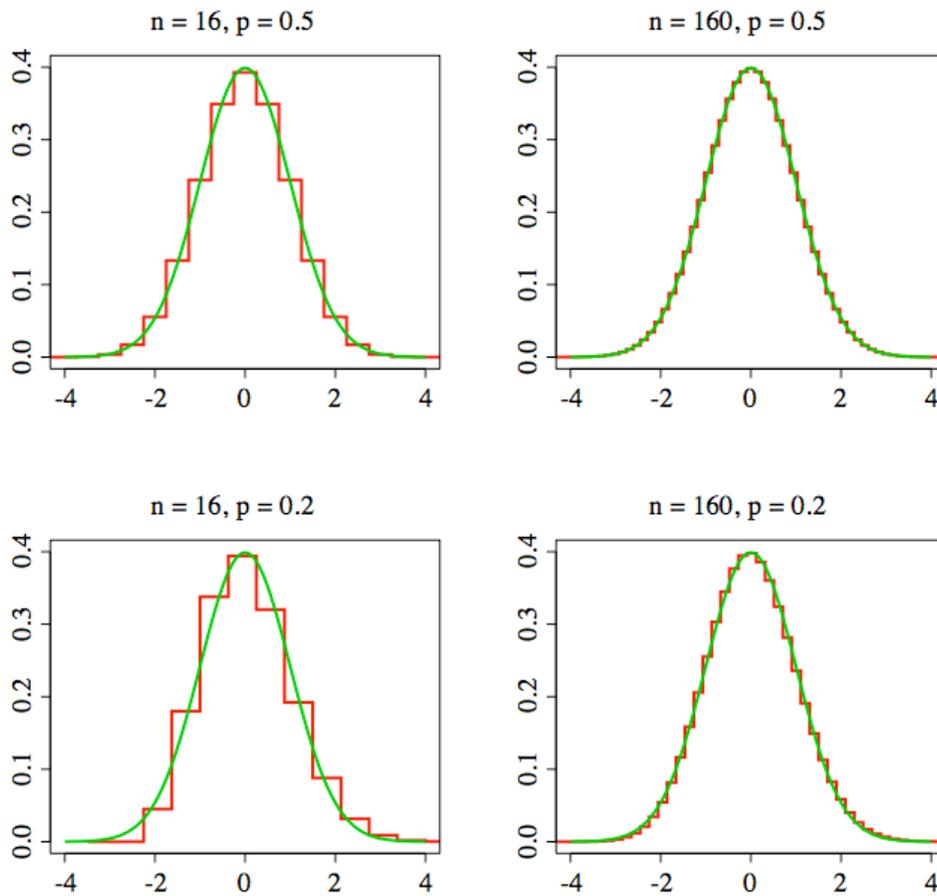


Abbildung 4.6: Binomial- versus Normalverteilung ( $n$ : Anzahl Treppenstufen,  $p$ : Wahrscheinlichkeit) [Inc. 08b]

stimmte Anzahl an Stichproben bzw. jede Stichprobe eine dedizierte Anzahl an Messwerten enthält. Werden mehrere Stichproben (Messreihen) aus der gleichen Grundgesamtheit entnommen, so kommt man zu folgenden Aussagen:

- Mehrere Stichproben liefern in der Regel unterschiedliche Ergebnisse bzgl. Häufigkeitsverteilung, Mittelwert  $\bar{\mu}_i$ , Varianz  $s_i^2$  und Standardabweichung  $s_i$ , weil die Messwerte und damit die Stichproben dem Zufall unterliegen.
- Die Mittelwerte der Stichproben sind um den wahren Mittelwert  $\mu$  der Grundgesamtheit normal- (bei  $n \rightarrow \infty$ ) bzw. t-verteilt (bei  $n < \infty$ ).
- Der Versuchsumfang ( $N = m \cdot n$ ) setzt sich aus der Anzahl der Stichproben ( $m$ ) und der Anzahl der Messwerte pro Stichprobe ( $n$ ) zusammen. Je größer der Versuchsumfang ist, desto weniger streuen die Mittelwerte der einzelnen Stichproben um den wahren Mittelwert  $\mu$ .
- Der Mittelwert aus den Mittelwerten der Stichproben nähert sich dem wahren Wert  $\mu$  mit zunehmender Anzahl an Stichproben.

Für die Suche nach dem geeigneten Umfang liefert neben den bisher aufgestellten Rahmenbedingungen die Formel 4.3 für das zweiseitige Vertrauensintervall einen sehr guten Anhaltspunkt:

$$\bar{y} - t \cdot s_{\bar{y}} \leq \mu \leq \bar{y} + t \cdot s_{\bar{y}} \quad (4.3)$$

Von größerem Interesse ist der t-Wert, der sich bekanntlich aus dem Freiheitsgrad ( $FG$ ) und der statistischen Sicherheit ( $P$ ) zusammensetzt. Die Abbildung 4.6 auf Seite 36 zeigt, dass eine Größenordnung von über 100 Messwerten die Gaußsche Normalverteilung relativ gut approximiert. Die Tabelle C.2 aus dem Anhang bestätigt die Abweichung des t-Wertes vom normal-Wert. Bei einem Freiheitsgrad von 100 liegt die differentielle Abweichung bei 0,024 für 95 % oder bei 0,05 für 99 % oder bei 0,099 für 99,9 %. Somit läßt sich mit dem Freiheitsgrad von 100 gut ansetzen.

Mit der Formel 4.4 lassen sich sehr schnell mehrere mögliche Werte für  $m$  und  $n$  berechnen.

$$FG = m \cdot (n - 1) \approx 100 \quad (4.4)$$

mit  $m =$  Anzahl der Stichproben  
 $n =$  Anzahl der Messwerte pro Stichprobe

Jeder Wert, der fixiert wird, beeinflusst das Resultat des anderen Wertes. Wählt man z. B.  $m = 5$ , so liegt der nächste ideale Wert für  $n$  bei 21. Die Tabelle 4.3 zeigt zunächst alle möglichen Zahlenkombinationen, die für  $m$  und  $n$  in Frage kommen. Es macht wenig Sinn, wenn die Anzahl der Messwerte kleiner wird als die der Stichproben. Daher existiert eine Grenze nach oben.

Tabelle 4.3: Suche nach geeigneten Versuchsumfang  $N$

$m$	1	2	4	<b>7</b>	8	9	10
$n$	101	51	26	<b>15</b>	14	12	11
$FG(m, n)$	100	100	100	<b>98</b>	104	99	100

Stichprobengrößen von 1, 2 oder 4 sind angenehm zum Auswerten von Mittelwert, Varianz und Standardabweichung, weil der Umfang der Auswertung relativ schnell erledigt ist. Doch sagen sie aber nicht viel aus, wie sich diese wenigen verfügbaren Mittelwerte an den wahren Mittelwert annähern. Mit mehr Auswertungsaufwand sieht es dagegen bei einer Stichprobengröße von 9 oder 10 aus. Hier kommt man fast einer quadratischen Matrix nahe. Somit bleibt nur noch die Möglichkeit, sich zwischen  $m = 7$  und  $m = 8$  zu entscheiden. Die Wahl ist deshalb auf  $m = 7$  gefallen, weil die Wahrscheinlichkeit durchaus gegeben ist, dass aus der Menge von 7 Stichproben eine existiert, deren Mittelwert den wahren Mittelwert vertritt, so dass rechts und links von ihm jeweils gleich verteilt die übrigen Mittelwerte streuen.

## 4.5 Ansatz zur Ableitung von Dienstgütezuständen

Wenn aufgrund der experimentellen Durchführung ein regelmäßiger Zusammenhang der Fehler auf Schicht 2 und der Fehler auf Schicht 3 ermittelt werden kann, so läßt sich ein Ansatz zur Ableitung von Dienstgütezuständen formulieren.

Eine genauere Ausprägung einer Ableitung hängt entscheidend mit den zu messenden und beobachtenden Punkten ab. Erst die statistische Auswertung aller Messergebnisse zeigt, ob ein derartiger Ansatz vorliegt oder nicht. Dabei soll im Rahmen dieser Arbeit zur Aufstellung dieses Ansatzes kein mathematisches Modell herangezogen werden, sondern allein mit Hilfe der absoluten Häufigkeitsverteilung gearbeitet werden. Stellt sich bei der graphischen Auswertung der Messpunkte heraus, dass sich die Messwerte um einen Punkt häufen, also sie sich um einen Häufungspunkt scharen, so kann von einer Regelmäßigkeit ausgegangen werden. Wie dann eine solche Beobachtung zu formulieren ist, hängt wiederum von der Grundgesamtheit aller Messwerte ab und von der Interpretation (Kapitel 6.2).

In diesem Kapitel wurde eine Ausgangsbasis geschaffen, von der aus die Experimente durchgeführt werden können (Kapitel 5). Die Rahmenbedingungen sind aufgestellt und es ist geklärt, was und mit welchen Eingangsgrößen untersucht wird. Dank der Wahl für einen statistisch grundgelegten Versuchsplan erhalten die Versuchspunkte eine nach Regeln aufgestellte Ordnung (Stichpunkte: Stufenkombination, normierter Versuchsraum), die in der Tabelle 4.2 auf Seite 34 zusammenfassend dargestellt wurden. Im Abschnitt 4.4.2 konnte der Umfang aller Messwerte pro Versuchspunkt ermittelt und festgelegt werden. Nachdem dieser Versuchsplan steht, kann mit der Sammlung der experimentellen Daten begonnen werden.

# 5 Durchführung der Versuche

Nachdem in Kapitel 3 der Aufbau des Testbed beschrieben und alle Rahmenbedingungen in Kapitel 4 festgelegt wurden, erfolgt in diesem Kapitel die Ermittlung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen den Zielgrößen *Anzahl der fehlerhaften Frames* sowie der *Anzahl der Paketverluste*. Dabei werden die Einflussgrößen *Paketgröße* und *Widerstand* nach den Vorgaben der Versuchspläne eingestellt. Nach der Durchführung der Experimente werden alle gewonnenen Messwerte aus den Log-Files ausgelesen und in die Tabellen eingetragen, die alle im Anhang A aufgelistet sind. Ein bereits vorweg genommener Teil der statistischen Auswertung der Messergebnisse erfolgt in den Tabellen 5.1 bis 5.3 des Abschnitts 5.3. Die eigentliche Auswertung mit den graphischen Darstellungen findet im Kapitel 6 statt.

## 5.1 Durchführungen festlegen

Zunächst wird der Versuchsplan in drei Versuchsblöcke aufgeteilt. Dabei werden die Versuchspunkte jeweils unter einem konstant eingestellten Widerstandswert zusammengefasst. Um Auswirkungen von systematischen Störeinflüssen von außen auf die Ergebnisse möglichst gering zu halten, wird die Reihenfolge der Versuchspunkte zufällig ausgewählt bzw. “randomisiert” (per Zufallszahl ermittelt).

Aus dem Handbuch *MESOS für Windows* gibt es eine wichtige Empfehlung bei der Versuchsdurchführung. Es gilt, möglichst viele Randbedingungen [...] und alle sonstigen Beobachtungen (z. B. Abweichungen von bestimmten Einstellgrößen) aufzunotieren. Falls sich später herausstellt, dass einzelne Ergebnisse nicht in das Gesamtbild passen, können diese Notizen ein erster Anhaltspunkt bei der Ursachenforschung sein [MP 04].

## 5.2 Beschreibung der Tabellen

Jeder Versuchspunkt hat gemäß der Aufstellung des  $3^2$ -Versuchsplans aus dem Abschnitt 4.4.1 seine fixen Vorgaben, wie die Parameterwerte vor jeder Durchführung der Experimente einzustellen sind. Wurde die Einstellung für einen beliebigen Versuchspunkt vorgenommen, so wurden während und nach dem Experimentieren alle erforderlichen Messdaten in eine Log-Datei gespeichert. Somit erhielt jeder Versuchspunkt seine eigene Log-Datei, deren Messwerte in die entsprechende für jeden Versuchspunkt vorgesehene Tabelle übertragen

wurde. Jeder durchnummerierter Versuchspunkt aus dem  $3^2$ -Versuchsplan hat seine Entsprechung in der Tabelle im Anhang [A](#).

Bevor im Folgenden der Aufbau der Tabellen sowohl im Anhang als auch im Hauptteil erläutert werden, sollen hier zwei Abkürzungen erklärt werden, die im Aufbau der beiden Tabellen zu finden sind.  $L_3$  steht für die Zielgröße *Anzahl der Paketverluste*, um anzudeuten, dass die zu untersuchende Größe auf der Schicht 3 lokalisiert ist. Analog steht  $L_2$  für die Zielgröße *Anzahl der verworfenen Frames*, um anzudeuten, dass die zu untersuchende Größe auf der Schicht 2 zu lokalisieren ist.

### 5.2.1 Aufbau im Anhang

Alle Tabellen haben die Größe einer  $15 \times 18$ -Matrix mit 15 Zeilen und 18 Spalten, wobei ausser der ersten alle anderen übrigen Zeilen jeweils paarweise (2-3, 4-5, ..., 14-15) zusammengefasst sind und dadurch eine Messreihe repräsentieren. An erster Stelle der gepaarten Zeilen stehen die Messwerte von  $L_3$  und an zweiter Stelle die von  $L_2$ . Die ersten Spalte zeigt die Anzahl der Messreihen an. Die Spalten 3 bis 17 stellen die 15 Messwerte der jeweiligen Messreihe  $i$  und der Zielgrößen  $L_x$  mit  $x = \{2, 3\}$  dar. Die letzte Spalte zeigt die Mittelwerte aller Messergebnisse pro Messreihe an, wobei auch hier zwischen den Mittelwerten von  $L_3$  und  $L_2$  unterschieden wird. Diese Mittelwerte, die mit der Formel [2.2](#) aus Abschnitt [2.1.4](#) errechnet werden, finden sich in den Tabellen des Hauptteils wieder.

### 5.2.2 Aufbau im Hauptteil

Im Hauptteil haben die Tabellen die Größe einer  $7 \times 12$ -Matrix mit 7 Zeilen und 12 Spalten. Hier bilden die Zeilen 2-3, 4-5 und 5-6 jeweils einen Versuchspunkt. Analog zu den Tabellen im Anhang (Tabellen [A.1](#) bis [A.9](#)) stehen an erster Stelle der paarweisen Zeilen die Werte von  $L_3$  und an zweiter Stelle die von  $L_2$ . Diesmal aber sind die Werte keine direkten Messergebnisse, die direkt aus den Messungen heraus entnommen und in eine Tabelle eingesetzt wurden, sondern indirekte Messergebnisse. Als ein Beispiel ist der Mittelwert ein indirektes Messergebnis, weil die ursprünglichen Messwerte einer Messreihe auf einen aggregierenden Wert konzentriert, der nicht unbedingt einem realen Wert in den Messungen entspricht. Diese Mittelwerte befinden sich in den Spalten 5 bis 11, wobei jede dieser Spalten alle Mittelwerte (unterschieden nach  $L_3$  und  $L_2$ ) einer Messreihe  $i$  aus dem entsprechenden Versuchspunkt  $A.l$  mit  $l \in [1, 9]$  darstellt. Die Versuchspunkte werden in der ersten Spalte, die Paketgrößen in der zweiten und in der dritten Spalte die Anzahl der Frames pro IP-Paket untergebracht. Die letzte Spalte repräsentiert den Mittelwert aller Mittelwerte.

### 5.3 Versuchsblöcke I-III

Die einzelnen Messwerte der jeweiligen Versuchspunkte können im Anhang A nachgelesen werden. Die einzelnen Versuchspunkte in der Spalte *Versuchspunkt A.l* sind mit einer Referenz versehen, mit deren Hilfe die entsprechende Stelle im Anhang zu finden ist. Alle Mittelwerte einer Messreihe eines Versuchspunkts *A.l* mit  $l \in [1, 9]$  sind mit den Werten in den letzten Spalten der Tabellen im Anhang identisch.

#### 5.3.1 Block I: Versuchspunkte 2, 8 und 5

Tabelle 5.1: Versuchsplan bei konstanter Einflussgröße  $B: 400 \Omega$ 

Versuchspunkt $A.l$	Paketgröße $A$ [Bytes]	Anz. d. Frames pro IP-Paket	Mittelwert $\bar{y}_i$ der Messreihe $i$								
			$L_x$	$\bar{y}_1$	$\bar{y}_2$	$\bar{y}_3$	$\bar{y}_4$	$\bar{y}_5$	$\bar{y}_6$	$\bar{y}_7$	$\bar{y}_{l_x}$
A.2	2944	2	$L_3$	2,20	2,20	2,20	1,60	2,40	2,00	1,87	2,07
			$L_2$	2,60	2,40	2,40	1,73	2,67	2,00	2,00	2,26
A.8	8832	6	$L_3$	6,13	7,33	3,93	5,40	2,87	4,13	3,47	4,75
			$L_2$	7,33	9,20	4,33	5,67	3,20	4,13	3,47	5,33
A.5	14720	10	$L_3$	8,33	6,93	9,07	9,40	2,67	6,07	3,27	6,53
			$L_2$	9,67	8,00	12,80	14,33	2,87	9,07	3,40	8,59

#### 5.3.2 Block II: Versuchspunkte 6, 9 und 3

Tabelle 5.2: Versuchsplan bei konstanter Einflussgröße  $B: 250 \Omega$ 

Versuchspunkt $A.l$	Paketgröße $A$ [Bytes]	Anz. d. Frames pro IP-Paket	Mittelwert $\bar{y}_i$ der Messreihe $i$								
			$L_x$	$\bar{y}_1$	$\bar{y}_2$	$\bar{y}_3$	$\bar{y}_4$	$\bar{y}_5$	$\bar{y}_6$	$\bar{y}_7$	$\bar{y}_{l_x}$
A.6	14720	10	$L_3$	7,53	8,07	8,20	7,93	6,13	6,47	3,80	6,88
			$L_2$	9,67	8,00	12,80	14,33	2,87	9,07	3,40	8,95
A.9	8832	6	$L_3$	5,67	4,33	3,60	1,67	3,00	3,13	2,27	3,38
			$L_2$	6,00	4,67	4,33	1,67	3,00	3,13	2,20	3,57
A.3	2944	2	$L_3$	1,00	1,40	0,87	0,67	1,27	0,67	1,47	1,05
			$L_2$	1,00	1,40	0,87	0,67	1,27	0,67	1,47	1,05

### 5.3.3 Block III: Versuchspunkte 1, 7 und 4

Tabelle 5.3: Versuchsplan bei konstanter Einflussgröße  $B: 100 \Omega$

Versuchspunkt $A.l$	Paketgröße $A$ [Bytes]	Anz. d. Frames pro IP-Paket	Mittelwert $\bar{y}_i$ der Messreihe $i$								
			$L_x$	$\bar{y}_1$	$\bar{y}_2$	$\bar{y}_3$	$\bar{y}_4$	$\bar{y}_5$	$\bar{y}_6$	$\bar{y}_7$	$\bar{\bar{y}}_{L_x}$
A.1	2944	2	$L_3$	1,00	0,87	1,27	1,20	0,80	1,33	1,47	1,13
			$L_2$	1,13	0,87	1,27	1,27	0,87	1,40	1,67	1,21
A.7	8832	6	$L_3$	3,27	2,73	5,27	4,40	4,93	4,20	4,47	4,18
			$L_2$	3,60	3,20	5,87	5,00	5,80	4,40	5,40	4,75
A.4	14720	10	$L_3$	13,53	14,40	13,87	15,93	14,33	11,00	15,00	14,01
			$L_2$	15,67	16,33	16,47	19,93	17,80	12,80	17,87	16,70

# 6 Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse

Nachdem alle Messungen nach dem  $3^2$ -Versuchsplan abgeschlossen sind, gilt es nun, die Messergebnisse auszuwerten und zu interpretieren. In den Abschnitten 5.3.1 bis 5.3.3 aus dem Kapitel 5 wurde die Berechnung der einzelnen Mittelwerte pro Stichprobe innerhalb eines Versuchspunktes durchgeführt, wobei für jede mittlere Wirkung der Zielgrößen  $L_2$  und  $L_3$  eigens die Mittelwerte berechnet wurden. Fasst man alle einzelnen Mittelwerte zusammen, so erhält man insgesamt 126 einzelne Mittelwerte über alle Versuchspunkte.

Diese Werte werden nun in diesem Kapitel weiter verarbeitet, um die erste graphische Darstellung zu erzielen (Abschnitt 6.1.1). Der nächste Abschnitt versucht den gewonnen Eindruck genauer zu betrachten, um zu einer möglichst differenziertere Aussagefähigkeit der Ergebnisse zu gelangen. Der Abschnitt 6.2 trägt die Auswertungsergebnisse aus den beiden vorangegangenen Abschnitten zusammen und rundet die Untersuchung mit einer Schlussfolgerung ab.

## 6.1 Auswertung der Versuchsergebnisse

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse für die Visualisierung und für die detaillierteren Analyse werden die 126 Mittelwerte der einzelnen Stichproben bzw. der einzelnen Messreihen verwendet.

### 6.1.1 Graphische Darstellung

Für eine graphische Darstellung genügt in diesem Zusammenhang ein zweidimensionales Koordinatensystem. Auf der horizontalen Achse werden die Werte von  $L_2$  und auf der vertikalen Achse die Werte von  $L_3$  aufgetragen. Ein Tupel der Form  $(\bar{y}_{i_2}, \bar{y}_{i_3})$  wird auf einen Punkt im gegebenen Koordinatensystem abgebildet. Somit gewinnt man aus den 126 Mittelwerten 63 Tupelpaare, mit denen alle Messwerte aller Versuche repräsentativ dargestellt werden können.

Es wurde darauf geachtet, dass die abgebildeten Tupelpaare voneinander unterscheidbar dargestellt werden. Die rautenförmige Punkte im Koordinatensystem, wie sie in der Abbildung 6.1 auf Seite 44 zu sehen sind, gruppieren alle 21 Tupel, bei denen die Paketgröße auf 2944 Bytes fixiert wurden, um zu beobachten, ob sich

das Verhalten bei variierenden Widerstandswerten ändert. In analoger Weise wurde mit den kreisförmigen (8832 Bytes) sowie mit den rechteckigen (14720 Bytes) Punkten verfahren.

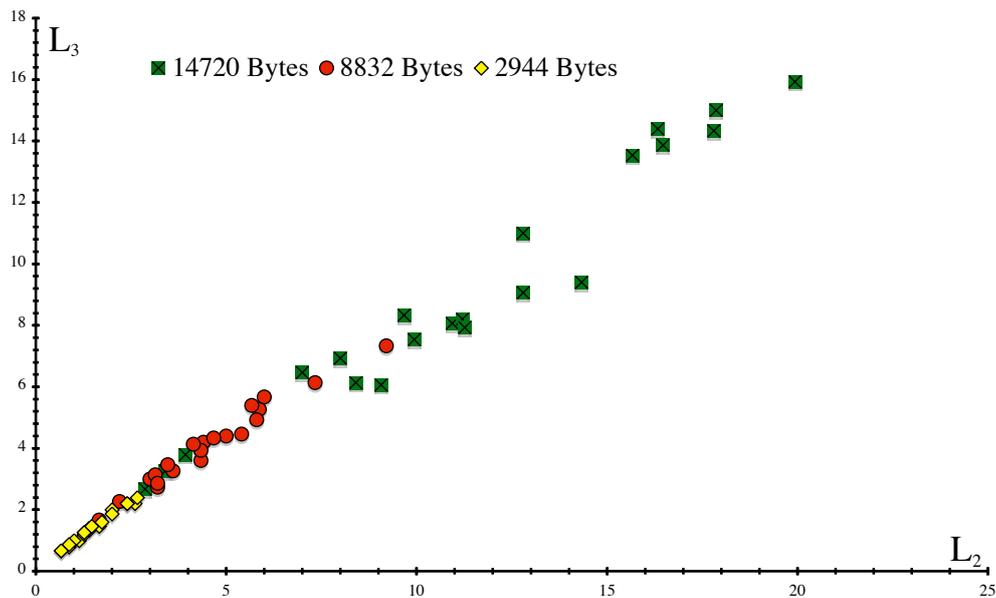


Abbildung 6.1: Auswertung aller Messdaten - geordnet nach Paketgröße

Die gruppierte Punktmenge der 21 Rauten befinden sich im linken unteren Teil des Koordinatensystems. Ferner ist festzustellen, dass sie sehr eng beieinander liegen. Bei der Gruppe der kreisförmigen Punkte, die im mittleren Bereich der gesamten Punktmenge zu finden sind, entsteht der Eindruck, die Punkte diffundieren, wohingegen sich kann bei den übrigen 21 Rechtecke die Punkte sich über die restliche Fläche des Koordinatensystems verteilen. Trotz des Eindrucks einer starken Streuung bei der letzten Gruppierung kann mit ihr, aber auch mit den beiden übrigen Punktmengen zunächst generell festgestellt werden, dass alle Punkte an einer unsichtbaren Geraden entlang verlaufen.

### 6.1.2 Detailliertere Analyse: Clustering

In diesem Abschnitt wird der Versuch unternommen, nicht nach den Paketgrößen, sondern nach der Größe der bei den Experimenten eingestellten Widerständen zu sortieren. Das Ergebnis dieses neuen Ansatzes findet sich in der Abbildung 6.2 auf Seite 45 wieder. Sieht man von einer Differenzierung der Punkte einmal ab, so stellt sich bei genauerer Beobachtung heraus, dass die Punktverteilung im Koordinatensystem mit der Darstellung aus der Abbildung 6.1 identisch ist. Dadurch ist zwar auf den ersten Blick kein weiterer Informationsgewinn erreicht, die Verteilung der Punkte kann zudem verwirrend sein. Die rautenförmigen Punkte mischen sich mit den kreisförmigen und quadratischen. Es entsteht scheinbar der Eindruck, dass keine Ordnung mehr vorliegt. Mit Hilfe des Clustering-Verfahrens gibt es aber einen Lösungsweg.

Die Fachdisziplin *Knowledge Discovery in Databases* beschäftigt sich u. a. mit dem Thema *Clustering*, wenn es darum geht, große Mengen von Objekten in Gruppen zu partitionieren, “so dass Objekte eines Clusters

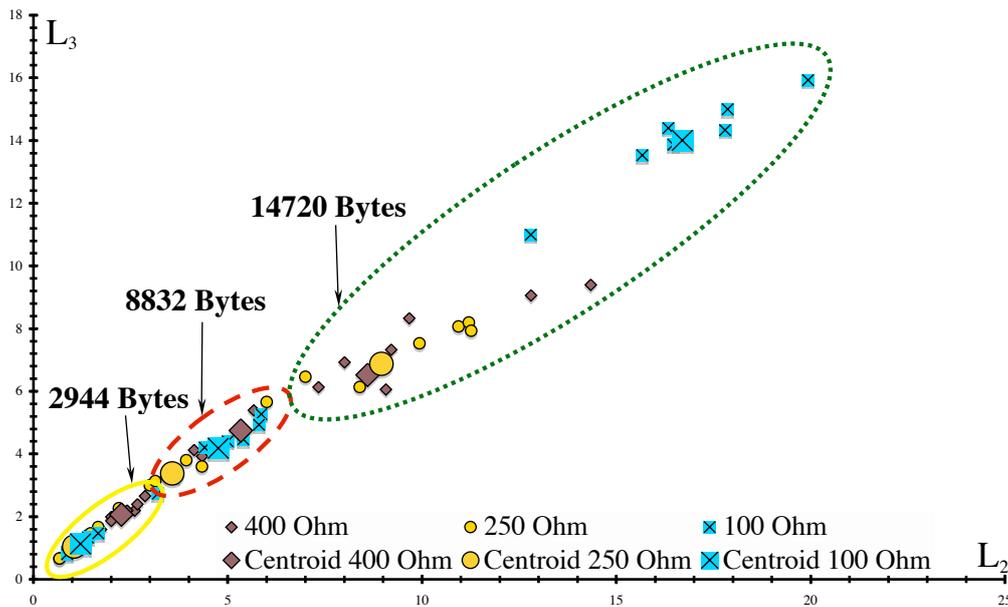


Abbildung 6.2: Differenziertere Darstellung - geordnet nach der Größe der Widerstände

möglichst ähnlich, Objekte verschiedener Cluster möglichst unähnlich sind. Ausreißer sind Objekte, die zu keinem der gefundenen Cluster gehören” [EsSa 00]. Bei dieser Analyse geht es hauptsächlich darum, herauszufinden, ob die aus Mittelwerten bestehende Datenmenge zu einem Cluster gehört oder nicht bzw. ob Ausreißer (Outlier oder auch “Rauschen” genannt) vorhanden sind oder nicht. Je mehr Ausreißer festgestellt werden können, desto weniger kann eine Aussage über die Punktverteilung im Koordinatensystem getroffen werden.

Beim Verfahren des Clusters existiert für jedes Cluster einen *Centroiden*, der ein zentrales Objekt einer beliebigen Datenmenge darstellt. Im Unterschied zum *Medoiden* kommt der Centroid nicht als ein reales Objekt in der Datenmenge vor. Das Berechnen eines Centroiden aus einer partitionierten Punktmenge kann durchaus ein hilfreiches Mittel sein, um eine differenziertere Aussage über die Punktverteilung des gewählten Clusters  $C$  zu gewinnen. Folglich wird die gesamte Punktmenge in überschaubare Teilmengen aufgegliedert, die dann durch sogenannte Centroiden repräsentiert werden.

Im Rahmen dieser Auswertung stellt der Mittelwert aller Mittelwerte (das sind alle Mittelwerte einer Messreihe innerhalb eines Versuchspunktes) einen Centroiden dar. Auch an dieser Stelle wird zwischen den Centroiden  $\bar{y}_{l_2}$  auf  $L_2$  und den Centroiden  $\bar{y}_{l_3}$  auf  $L_3$  unterschieden, um wiederum mit dem Tupel  $(\bar{y}_{l_2}; \bar{y}_{l_3})$  derart arbeiten zu können, dass das Paar als Punkt im Koordinatensystem abgebildet werden kann. Die Tabelle 6.1 zeigt zusammenfassend alle Centroide:

Tabelle 6.1: Auswertung des 3<sup>2</sup>-Versuchsplans

Versuch punkt $l$	Paketgröße $A$ [Bytes]	Widerstand $B$ [ $\Omega$ ]	Symbol	Centroid		Norm	
				$\bar{y}_{l_2}$	$\bar{y}_{l_3}$	$A$	$B$
1	2944	100	□	1,21	1,13	-	-
2	2944	400	◇	2,26	2,07	+	-
3	2944	250	○	1,05	1,05	0	-
4	14720	100	□	16,70	14,01	-	+
5	14720	400	◇	8,59	6,53	+	+
6	14720	250	○	8,95	6,88	0	+
7	8832	100	□	4,75	4,18	-	0
8	8832	400	◇	5,33	4,75	+	0
9	8832	250	○	3,57	3,38	0	0

Wie aus der vierten Spalte in der Tabelle 6.1 zu entnehmen ist, werden die Centroide durch verschiedene Symbole repräsentiert. Jedes Tupel  $(\bar{y}_{l_2}; \bar{y}_{l_3})$  stellt pro Versuchspunkt nicht nur einen Centroiden dar, sondern es wird durch ein Symbol markiert, das sich in der Abbildung 6.2 auf Seite 45 widerspiegelt.

Jetzt erst wird die Ordnung in der scheinbaren Unordnung von verstreuten Farbpunkten sichtbar. Die mit feinen Punkten eingekreiste Datenmenge wird durch die drei Centroiden (großer Kreis, großes Quadrat und große Raute) repräsentiert, wobei jeder dieser Centroiden von sieben kleinen Symbolen gleicher Form umgeben ist. Es sind jene sieben Mittelwerte einer Messreihe. Fasst man nun die drei Centroiden zusammen, so stellt man fest, dass sie zu der Gruppe *Paketgröße 14720 Bytes* zugeordnet werden können. Nicht nur in dieser Gruppe, sondern auch in den beiden anderen Gruppen (*Paketgröße 8832 Bytes* und *Paketgröße 2944 Bytes*) befindet sich kein Centroid, der mindestens zweimal vorkommt. Ferner ist festzustellen, dass es keine auffallende Ausreißer gibt, womit alle Cluster ähnlich sind.

## 6.2 Interpretation der Versuchsergebnisse

Wie schon bei der ersten graphischen Darstellung aller Versuchsergebnisse aus dem Abschnitt 6.1.1 beobachtet wurde, liegen die Punkte im Koordinatensystem auf einer unsichtbaren Geraden. Jede Gerade kann durch ein mathematisches Modellpolynom beschrieben werden. Jeder Eingangswert kann somit auf einen Ausgangswert abgebildet werden. Folglich besteht zwischen den beiden Werten ( $L_2$  und  $L_3$ ) eine lineare Abhängigkeit und somit auch eine Gesetzmäßigkeit.

Ferner ist zu beobachten, dass die Einflussgröße bzw. der Faktor (*elektr.*) *Widerstand* keinerlei Einfluß auf das Systemverhalten zeigt. Die Gruppen *Paketgröße 2944 Bytes* und *Paketgröße 8832 Bytes* aus der Abbildung 6.2 auf Seite 45 zeigen offensichtlich, dass die verschiedenen eingekreisten Punktmengen keinem Gesetz folgen.

Sie sind zufällig angeordnet und verteilen sich innerhalb der jeweiligen Gruppe gleichmäßig.

Dagegen zeigt der Faktor *Paketgröße* Wirkung. Es ist im Bezug auf alle Messwerte (A.1 bis A.9) festzustellen, dass bei klein eingestellten Paketgrößen die Anzahl der Verluste an fehlerhaften Frames wie auch die Anzahl der Paketverlusten kleiner ist als bei größeren Paketen. Dennoch ist allen Paketgrößen eine auffallende Beobachtung gemeinsam, die in dem folgenden Satz festzuhalten ist:

Die Anzahl der fehlerhaften Frames ist entweder gleich oder größer der Anzahl der verloren gegangenen Paketen. In eine mathematische Gleichung formuliert, sieht es wie folgt aus:  $L_2 \geq L_3$

Die Abbildung 6.3 versinnbildlicht den Inhalt dessen, was bei der Beobachtung während der Auswertung der Messergebnisse, aber auch schon während der Durchführung der Experimente festgestellt wurde.

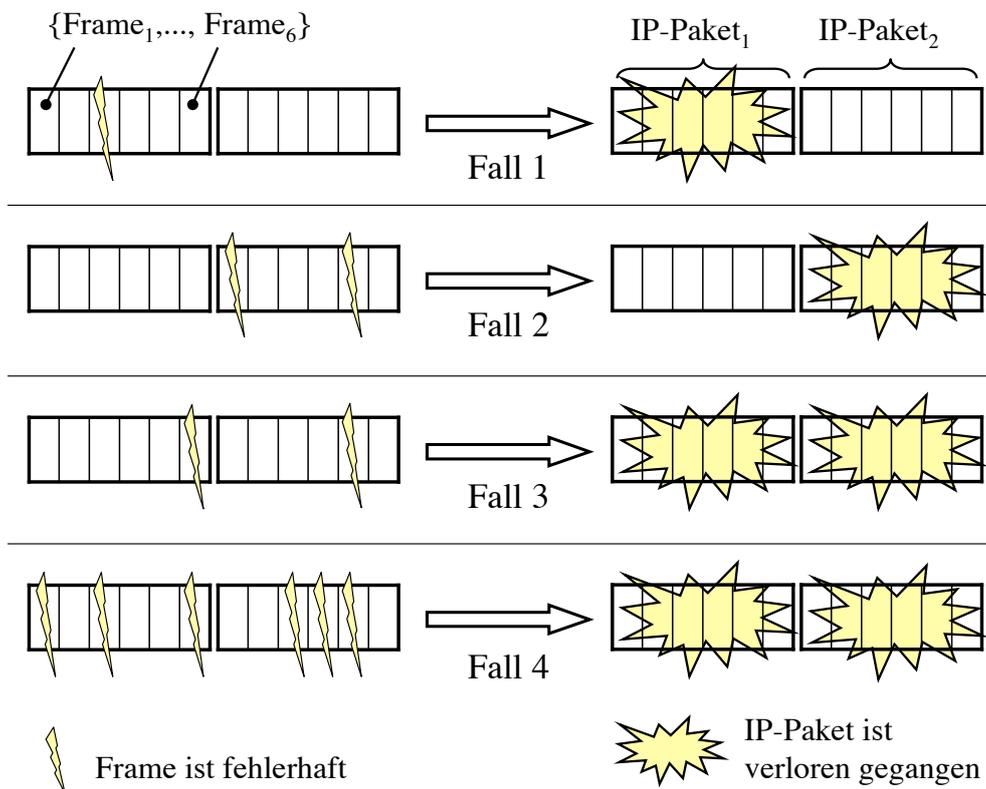


Abbildung 6.3: Unterscheidung der Fälle, wie fehlerhafte Frames auf IP-Pakete auswirken

In der Skizze werden zwei IP-Pakete der Größe 8832 Bytes mit jeweils sechs Frames pro IP-Paket vorgestellt. Es sei am Rande bemerkt, dass die Positionierung der fehlerhaften Frames in einem IP-Paket beliebig gewählt ist. Im ersten Fall tritt im dritten Frame des ersten IP-Paketes ein Fehler auf, der einen Verlust eines ganzen IP-Paketes nach sich zieht. Im zweiten Fall liegt im zweiten IP-Paket zwei fehlerbehaftete Frames vor. Ob ein oder mehrere Fehler innerhalb eines IP-Paketes aufgetreten sind, in beiden Fällen führt dies zu einem Paketverlust. Im dritten Fall tritt sowohl im ersten als auch im zweiten IP-Paket jeweils ein Fehler in einem Frame auf. Das Ergebnis dieses Ereignisses ist der Verlust beider Pakete. Der letzte Fall entspricht dem Fall zwei, nur mit dem Unterschied, dass nicht nur in einem IP-Paket mehrere Framefehler festzustellen sind, sondern in beiden

IP-Paketen.

Es kann nun folgendes zusammenfassend dargestellt werden: Liegen zwei fehlerbehaftete Frames vor, so muss genau betrachtet werden, ob die beiden Frames in einem IP-Paket liegen (Fall 2) oder getrennt auf zwei verschiedene IP-Pakete verteilt sind (Fall 3). In dem einen Fall liegt nur ein Paketverlust vor, im anderen Fall sind beide IP-Pakete verloren gegangen.

Dank der Fallunterscheidung werden nun zwei Schlussfolgerungen gezogen, die sogar für einen Ansatz zur Ableitung von Dienstgütezuständen gut geeignet sind. Für den Zustand einer Dienstgüte können aufgrund der Beobachtung zwei Fälle unterschieden werden. Der günstige Fall (*Best Case*) tritt dann ein, wenn ein Paketverlust durch maximal so viele fehlerhafte Frames verursacht wird, wie Frames in ein IP-Paket passen. Es liegt somit eine hohe Fehlerrate auf Schicht 2, die aber keine gravierende Auswirkungen auf die Anzahl der Paketverluste einnimmt. Der ungünstige Fall (*Worst Case*) liegt dann vor, wenn zu jedem Framefehler ein Paketverlust nach sich zieht.

# 7 Zusammenfassung und Ausblick

Zum Abschluss dieser Diplomarbeit wird die Bearbeitung der gestellten Aufgabe zusammenfassend dargestellt. Das Ergebnis der experimentellen Untersuchung wird im Spiegel der Themenstellung erneut reflektiert und gebündelt dargestellt. Im Anschluss daran steht zur Diskussion, welche Alternativen sich anbieten, um eine solche Aufgabenstellung um einen weiteren Lösungsansatz zu erweitern: die mathematische Regressionsanalyse.

## 7.1 Zusammenfassung

In dieser Diplomarbeit ging es darum, eine Ableitung von Dienstgütezuständen in Netzen zu finden, die mit Hilfe von Experimenten erzielt wurde. Es wurde eine Testumgebung konzipiert und aufgebaut. Die Daten als Messgrößen der elektrischen Netze wurden experimentell ermittelt und mit statistischen Verfahren ausgewertet. Bei diesem Ermittlungsverfahren wurden die Ethernet und IP verwendet.

Das Kapitel 1 lieferte einen Überblick über die Hintergründe der Aufgabenstellung und über die Motivation zu dieser Arbeit. Das Beispiel des LHC zeigte, wie verschiedene Netze (GÉANT2, NREN) über nationale Grenzen hinweg interagieren. Dabei wird auf der Basis von E2E Links ein OPN aufgebaut, die dedizierte Verbindungen ermöglichen. Auch das LRZ ist in diesem Projekt mit einbezogen. Jedes nationale Netz arbeitet autonom und wird unter vorgegebenen Policies mit eigenen Hard- und Software ausgestattet. Jede dieser eingesetzten Hardwarekomponenten arbeitet mit der für ihn konfigurierten Software bzw. liefert firmenspezifische Statusinformationen. Aufgrund dieser beobachtenden Pluralität taucht das Problem bei E2E Links auf, wie die verschiedenen Statusinformationen zusammengeführt werden kann. Dabei soll die Qualitätsinformation nicht innerhalb eines Segments oder eines internen Netzes liegen, sondern über mehrere Netze hinweg.

Im Abschnitt 1.2.2 wurde dann eine Idee beschrieben, wie die Problematik angegangen werden kann. Es wurde der Versuch unternommen, einen Ansatz zu formulieren, wie trotz der vorliegenden Heterogenität an Statusinformationen eine Qualitätsaussage über ein E2E Link getroffen werden kann. Die Formulierung dieses Ansatzes befindet sich im demselben Abschnitt 1.2.2 auf Seite 5.

Im Kapitel 2 wurden allgemeine Anforderungen für die Planung und Gestaltung einer experimentellen Umgebung aufgestellt. Zunächst wurden im Rahmen der statistischen Versuchsmethodik eine Reihe von Begriffen und Definitionen eingeführt, bevor erste Überlegungen zur statistischen Auswertung von Versuchen angestellt

wurden. Zur Berechnung der Versuchsergebnisse sind die statistische Größen, wie Häufigkeitsverteilung, absolute Häufigkeit, Mittelwert, Varianz und Standardabweichung, wichtige Instrumentarien. Daher wurden sie per Definition in den Abschnitten 2.1.3 und 2.1.4 eingeführt. Zur Vorbereitung einer Versuchsumgebung gehört auch die Gestaltung eines Versuchsplans, der die Anordnung der Versuchspunkte bestimmt. Es wird hiermit das Ziel verfolgt, den Aufwand bei der Durchführung und Auswertung der Versuchspunkte möglichst minimal zu gestalten und trotzdem einen maximalen Informationsgewinn in Bezug auf das Systemverhalten zu erreichen. Zwei *faktorielle Versuchspläne* wurden am Ende des Kapitels 2 vorgestellt.

Das Kapitel 3 beschrieb den Aufbau der Versuchsumgebung, welche Komponenten und welche Kabeltypen zum Einsatz kommen. Der Abschnitt 3.1.3 übernahm die Beschreibung zum *Einbau der Potentiometer*. Die Potentiometer waren bei der Durchführung der Experimente wichtig, weil sie dazu dienten, fehlerhafte Frames zu erzeugen. Die Vorkehrungen beim Einbau mussten so getroffen werden, dass bei der Ausführung der Versuche die Messdaten immer noch statistisch zuverlässig betrachtet werden konnten. Es galt hier besonders, unnötige Störgrößen zu vermeiden. Im Abschnitt 3.2 wurden die Tools für die Messungen sowohl auf Seite des Senders, der u. a. Pakete generiert und verschickt, als auch auf Seite des Empfängers, der angekommenen Pakete zählt, vorgestellt.

Auf der Basis allgemeiner Anforderungen und der nun aufgebauten Versuchsumgebung konnte im Kapitel 4 mit der konkreten Planung und Gestaltung der Experimente für diese Diplomarbeit begonnen werden. Zunächst galt es, das vorliegende System sowohl nach seinen Einflussgrößen (Paketgröße und Widerstand) als auch nach seinen Zielgrößen (Anzahl der verlorenen Pakete und Anzahl der fehlerhaften Frames) zu analysieren. Ferner musste auch festgelegt werden, welche Protokolle bei den Versuchen eingesetzt wurden. Die Abbildung 4.3 auf Seite 30 zeigt sehr schön, wie sich die gewählten Protokolle zueinander verhalten und wie UDP in IP und (UPD, IP) in ein Ethernet-Frame verpackt werden. Der Abschnitt 4.1.4 rundet die Systemanalyse ab, bei dem der Vollständigkeit halber der statistischen Versuchsplanung Rechnung getragen wird, herauszufinden, ob im vorliegenden System mit eventuellen Störgrößen bei der Durchführung der Versuche zu rechnen ist.

Die Vorversuche (Abschnitt 4.2) dienten dem Zweck, sich mit dem Experimentierfeld vertraut zu machen. Dabei wurden erste Erkenntnisse gewonnen, die für die weitere Gestaltung des Versuchsplans wichtig sind. Die Anzahl der Pakete wie auch das Intervall für die Größe der Widerstände wurden in diesem Abschnitt festgelegt. Nach dieser Festlegung konnte mit der Auswahl eines für diese Arbeit relevanten Versuchsplans begonnen werden. Zur Disposition standen die beiden Versuchspläne aus dem Abschnitt 2.2. Mit der Entscheidung für den  $3^2$ -Versuchsplan stand die Bestimmung der Faktoren und deren Stufen fest. Es galt nur noch herauszufinden, wie groß der Umfang aller Messwerte pro Versuchspunkt sein musste. Zur Ermittlung für diesen Umfang wurde auf die Gaußsche Normalverteilung zurückgegriffen.

Zum Ende des Kapitels 4 konnte mit der eigentlichen Durchführung der Versuche begonnen werden. Die einzelnen experimentell erhobenen Messdaten befinden sich alle tabellarisch geordnet im Anhang A. Ein Teil der statistischen Auswertung (Berechnen von Mittelwerten) erfolgte bereits im Abschnitt 5.3, bei dem in den

tabellarischen Ausführungen keine direkten Messergebnisse mehr stehen. Die ausgewerteten Ergebnisse bildeten die eigentliche Basis für die graphische Darstellung und für die Interpretation der Versuchsergebnisse, die im Kapitel 6 zu finden sind.

Das Resultat der experimentellen Untersuchung ist, dass sich die Vermutung aus Abschnitt 1.2.2 bestätigt hat: *Es gibt einen gesetzmäßigen Zusammenhang der Fehler auf Schicht 2 ( $L_2$ ) und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Fehlern auf der Schicht 3 ( $L_3$ )*. Der gesuchte Ansatz wurde somit gefunden, dass etwas heterogenes auf homogenes abgebildet werden kann. Der beobachtete Zusammenhang von  $L_2$  und  $L_3$  findet seinen prägnanten Ausdruck in der Fallunterscheidung:

**Best Case** Geht im arithmetischen Mittel *ein* IP-Paket verloren, dann wurde der Paketverlust durch mindestens (es können auch mehrere sein) einen Fehler im Frame verursacht. In diesem Fall ist die Anzahl der Framefehler größer als die der Paketverluste.

**Worst Case** Im schlechtesten Fall verursacht höchstens *ein* fehlerhafter Frame *einen* Paketverlust. In der Konsequenz würde das bedeuten, dass die Anzahl der verloren gegangenen IP-Pakete auf die Anzahl der fehlerhaften Frames zurückgeführt werden kann.

Im Anhang dieser Diplomarbeit befindet sich der komplette Quellcode der Tools für den Sender wie auch für den Empfänger. Außerdem werden im Anhang C Bereiche behandelt, auf die diese Arbeit zum Teil zugreift (Signifikanztest und sein Anwendungsbeispiel), aber auch eine Möglichkeit für eine weitere Diplomarbeit bietet, sofern z. B. mit einem Dämpfer in optischen Netzen gearbeitet werden.

## 7.2 Ausblick

Bei der graphischen Auswertung der Versuchsergebnisse in dieser Diplomarbeit wurde beobachtet, dass alle Koordinaten der Mittelwerte auf einer Gerade liegen, die mathematisch eine Funktion darstellt. Welche exakte Form die Funktion in diesem Zusammenhang der Auswertung der Versuchsergebnisse hat, war nicht Gegenstand dieser Arbeit. Ein passendes mathematisches Modellpolynom dazu heraus zu finden, kann ein möglicher Ansatz für eine weitere Diplomarbeit sein. Dieser Ansatz wird in den Abschnitten 7.2.1 (*Regressionsanalyse*) und 7.2.2 (*Modellansätze*) vorgestellt.

In dieser Diplomarbeit wurde im Bezug auf das Verhalten des Systems nach einer Qualitätsaussage gesucht, die im Abschnitt 6.2 gefunden wurde. Es gibt eine weitere Variante, das Verhalten eines Systems zu beschreiben, nämlich durch ein mathematisches Modell. Beide Varianten haben die Experimente und deren Messergebnisse als Grundlage. Die Versuche, die nach Vorgabe statistischer Versuchspläne durchgeführt werden, werden entweder mit der *Varianz-* oder mit der *Regressionsanalyse* ausgewertet. Grundsätzlich gilt, daß sowohl die *Varianz-* als auch die *Regressionsanalyse* eingesetzt werden können, wenn alle Versuchsergebnisse Messwerte sind.

Nachdem die Regressionsanalyse für eine mögliche weitere Diplomarbeit von größerer Relevanz ist als die Varianzanalyse, wird sie im weiteren Verlauf genauer beschrieben.

### 7.2.1 Regressionsanalyse

“Mit Hilfe der Regressionsanalyse wird das Verhalten einer Zielgröße  $y$  in Abhängigkeit der Einflussgrößen  $x_1$  bis  $x_k$  durch einen mathematischen Zusammenhang beschrieben” [DrMa 93]. Gesucht wird also eine Funktion dieser allgemeinen Form:  $y = f(x_1, \dots, x_k)$

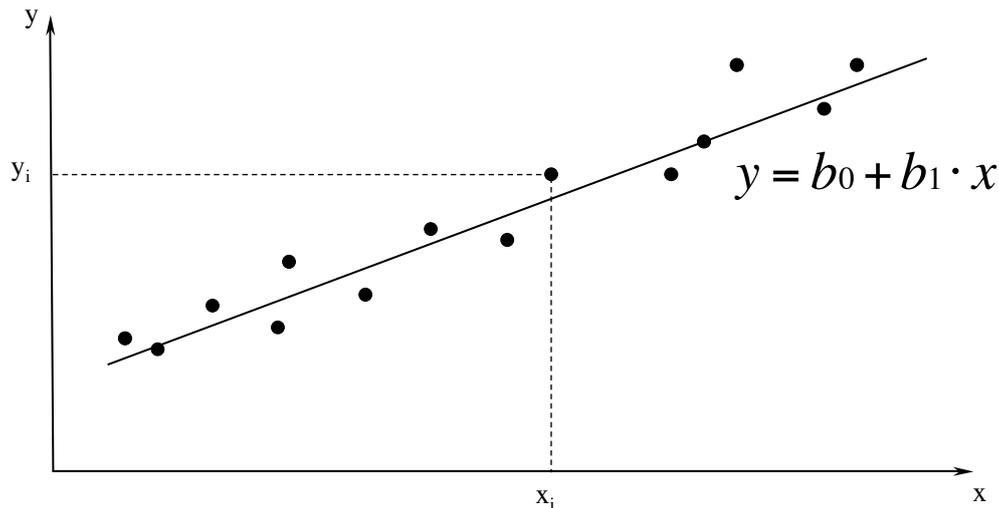


Abbildung 7.1: Prinzip einer einfachen linearen Regressionsgeraden

Diese ganz allgemein und dennoch abstrakt gehaltene Funktion bezeichnet man als Regressions- oder Modellpolynom. Sie bildet das mittlere Verhalten der Zielgröße  $y$  in Abhängigkeit von den Einflussgrößen  $x_1$  bis  $x_k$  ab. Die Parameter - auch Regressionskoeffizienten genannt - werden aus den Versuchsdaten errechnet, wie an einem Zahlenbeispiel der “Parameter- und Wechselwirkungsanalyse” im Anhang C.2 dargestellt wurde. Die Effekte wurden dort ebenso aus den Versuchsdaten gewonnen. Der einfachste Sonderfall einer Modellgleichung zur Beschreibung eines Systemverhaltens ist die in der Abbildung 7.1 dargestellte einfache lineare Regressionsgerade.

### 7.2.2 Mögliche Modellansätze

Die Positionierungen der einzelnen Messpunkte über alle Versuche hinweg, bilden die Grundlage zur Berechnung der Regressionskoeffizienten eines mathematischen Modells. Sie beschreiben den Zusammenhang zwischen Einfluss- und Zielgrößen. Die Wahl des Ansatzes hängt aber von den Beobachtungsdaten ab. Eventuelle Vorkenntnisse im Bezug auf das Verhalten des Systems sind von Vorteil. Für den Fall einer einfachen Geraden, wie in der Abbildung 7.1 dargestellt ist, kann ein einfacher linearer Modellansatz gewählt werden.

Dieser soll aber in allgemeiner Form dargestellt werden:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i \quad (7.1)$$

Dieser Ansatz darf nur gewählt werden, wenn das zugrunde liegende Systemverhalten durch lineare Zusammenhänge gebildet werden kann. Liegt dergleichen nicht vor, so sind nicht lineare Modellansätze erforderlich.

Es werden dabei zwei Formen unterschieden:

- Nicht-Linearität in den Variablen, aber Linearität in den Parametern: Dieser Fall liegt dann vor, wenn das Polynom z. B. aus bilinearen Gliedern der Form  $b_{ij} \cdot x_i x_j$  oder aus quadratischen Gliedern der Form  $b_{ii} \cdot x_i^2$  besteht. Derartige Modellansätze werden nicht mehr *einfache*, sondern *quasi* lineare Polynome bezeichnet.
- Nicht-Linearität in den Parametern. Diese Modellansätze sind im Rahmen einer Regressionsanalyse nicht einfach zu lösen.

Die allgemeine Form eines quasi linearen Modellansatzes erster Ordnung lautet:

$$y = \underbrace{b_0}_{\text{Identier}} + \underbrace{\sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i}_{\text{Haupteffekte}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{ij} \cdot x_i x_j}_{\text{Zweifach-Wechselwirkungen}} \quad (7.2)$$

mit  $b_i, b_{ij}$  Regressionskoeffizienten  
 $x_i, x_j$  Variablen

Die bilinearen Glieder  $b_{ij} \cdot x_i x_j$  drücken die wechselseitige Wirkung bzw. die Interaktionen von Einflussgrößen  $x_i$  und  $x_j$ , die den linearen Teil des Polynoms erweitern. Wechselwirkungen höherer Ordnungen (ab Ordnung dritten Grades) sind im Betrag meistens sehr klein und nur selten sinnvoll interpretierbar. In der Praxis werden sie vernachlässigt bzw. außer Acht gelassen.

Erwähnenswert im Allgemeinen ist das Ergänzen des Polynoms durch quadratische Glieder in der darstellenden Form  $b_{ii} \cdot x_i^2$ . Man erhält einen quadratischen Modellansatz zweiter Ordnung, mit der Parabeln im zweidimensionalen Raum bzw. gekrümmte Flächen im n-dimensionalen Raum beschrieben werden können.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{ij} \cdot x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^2 \quad (7.3)$$

Wurde ein geeigneter Ansatz zur Beschreibung eines Systemverhaltens ausgewählt, kann mit einer Versuchsplanung begonnen werden. Liegen in einer Auswertungsanalyse zwei Einflussgrößen vor, ist die Auswahl der hier dargestellten möglichen Modellansätze überschaubar. Zum Einsatz können entweder Modelle mit einfachen linearen (Gleichung 7.1) oder quasi linearen Polynome erster Ordnung (Gleichung 7.2) kommen. Ferner ist es ratsam, sich an Klein [Klei 04] zu orientieren, der im Allgemeinen für praktische Problemstellungen

## *7 Zusammenfassung und Ausblick*

als ausreichend ansieht, “ein lineares Modell mit Zweifach-Wechselwirkungen oder in selteneren Fällen ein quadratisches Modell zu wählen.”

# A Messergebnisse aller Versuchspunkte 1-9

## A.1 Versuchspunkte 1-3 (Paketgröße: 2944 Bytes, Widerstand: 100, 400, 250 $\Omega$ )

Tabelle A.1: Versuchspunkt 1 (Paketgröße: 2944 Bytes, Widerstand: 100  $\Omega$ )

Mess.- reihe $i$	$L_x$	Messwerte bzw. -ergebnisse $y_i$ der Messreihe $i$															M.wert $\bar{y}_{i_x}$
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	
1	$L_3$	2	0	0	2	1	1	0	0	0	0	3	3	2	1	0	1,00
	$L_2$	2	0	0	2	1	1	0	0	0	0	3	3	2	2	1	1,13
2	$L_3$	0	0	3	0	2	1	0	0	2	0	0	1	0	2	2	0,87
	$L_2$	0	0	3	0	2	1	0	0	2	0	0	1	0	2	2	0,87
3	$L_3$	2	3	0	3	1	0	2	0	0	1	0	4	3	0	0	1,27
	$L_2$	2	3	0	3	1	0	2	0	0	1	0	4	3	0	0	1,27
4	$L_3$	4	0	1	1	1	2	1	1	0	1	2	0	0	1	3	1,20
	$L_2$	5	0	1	1	1	2	1	1	0	1	2	0	0	1	3	1,27
5	$L_3$	0	0	0	1	1	1	0	0	2	2	1	1	0	1	2	0,80
	$L_2$	0	0	0	1	1	1	0	0	2	3	1	1	0	1	2	0,87
6	$L_3$	1	1	0	1	2	0	1	3	4	3	1	1	1	1	0	1,33
	$L_2$	2	1	0	1	2	0	1	3	4	3	1	1	1	1	0	1,40
7	$L_3$	2	1	1	3	0	2	0	2	2	0	1	1	2	2	3	1,47
	$L_2$	2	1	2	3	0	3	0	2	2	0	1	1	2	2	4	1,67

zurück zur Haupttabelle [5.3](#)

Tabelle A.2: Versuchspunkt 2 (Paketgröße: 2944 Bytes, Widerstand: 400  $\Omega$ )

Mess.- reihe $i$	$L_x$	Messwerte bzw. -ergebnisse $y_i$ der Messreihe $i$														M.wert	
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	$\bar{y}_{i_x}$
1	$L_3$	0	0	3	0	4	0	2	1	1	2	2	2	6	5	5	2,20
	$L_2$	0	0	5	0	4	0	2	1	1	2	2	2	6	8	6	2,60
2	$L_3$	2	1	2	2	1	1	4	3	2	3	3	3	2	3	1	2,20
	$L_2$	2	1	2	2	1	1	4	3	3	3	3	3	3	4	1	2,40
3	$L_3$	3	2	3	3	3	0	6	4	3	1	0	1	2	1	1	2,20
	$L_2$	4	2	3	3	4	0	6	4	3	1	0	1	2	2	1	2,40
4	$L_3$	2	3	2	4	1	4	0	0	1	4	0	0	1	0	2	1,60
	$L_2$	2	5	2	4	1	4	0	0	1	4	0	0	1	0	2	1,73
5	$L_3$	2	3	3	0	3	3	4	2	5	2	1	1	1	2	4	2,40
	$L_2$	2	3	4	0	2	5	6	2	5	2	1	1	1	2	4	2,67
6	$L_3$	4	3	1	0	1	1	3	3	2	2	1	2	2	0	5	2,00
	$L_2$	4	3	1	0	1	1	3	3	2	2	1	2	2	0	5	2,00
7	$L_3$	2	2	3	1	1	1	2	0	2	2	2	2	2	2	4	1,87
	$L_2$	2	2	3	2	1	1	2	0	2	2	2	2	2	2	5	2,00

zurück zur Haupttabelle [5.1](#)

Tabelle A.3: Versuchspunkt 3 (Paketgröße: 2944 Bytes, Widerstand: 250  $\Omega$ )

Mess.- reihe $i$	$L_x$	Messwerte bzw. -ergebnisse $y_i$ der Messreihe $i$															M.wert $\bar{y}_{i_x}$
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	
1	$L_3$	1	1	3	0	0	1	0	2	0	1	0	1	3	1	1	1,00
	$L_2$	1	1	3	0	0	1	0	2	0	1	0	1	3	1	1	1,00
2	$L_3$	0	0	0	1	1	0	3	3	3	1	0	2	1	1	5	1,40
	$L_2$	0	0	0	1	1	0	3	3	3	1	0	2	1	1	5	1,40
3	$L_3$	1	1	1	2	1	1	0	2	0	1	0	1	0	0	2	0,87
	$L_2$	1	1	1	2	1	1	0	2	0	1	0	1	0	0	2	0,87
4	$L_3$	1	0	0	0	0	3	1	1	0	3	0	0	0	0	1	0,67
	$L_2$	1	0	0	0	0	3	1	1	0	3	0	0	0	0	1	0,67
5	$L_3$	2	0	5	2	0	0	0	1	3	2	0	1	0	3	0	1,27
	$L_2$	2	0	5	2	0	0	0	1	3	2	0	1	0	3	0	1,27
6	$L_3$	1	1	1	1	0	0	2	0	1	1	1	1	0	0	0	0,67
	$L_2$	1	1	1	1	0	0	2	0	1	1	1	1	0	0	0	0,67
7	$L_3$	1	1	0	1	1	2	2	1	1	2	3	4	1	2	0	1,47
	$L_2$	1	1	0	1	2	1	2	1	1	2	3	4	1	2	0	1,47

zurück zur Haupttabelle [5.2](#)

## A.2 Versuchspunkte 4-6 (Paketgröße: 14720 Bytes, Widerstand: 100, 400, 250 $\Omega$ )

Tabelle A.4: Versuchspunkt 4 (Paketgröße: 14720 Bytes, Widerstand: 100  $\Omega$ )

Mess.- reihe $i$	$L_x$	Messwerte bzw. -ergebnisse $y_i$ der Messreihe $i$															M.wert $\bar{y}_{i_x}$
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	
1	$L_3$	5	3	12	6	16	13	15	13	22	21	26	7	6	13	25	13,53
	$L_2$	5	3	17	6	16	15	15	15	27	29	31	7	9	13	27	15,67
2	$L_3$	24	18	17	15	13	18	13	7	16	12	15	9	16	12	11	14,40
	$L_2$	25	18	19	16	17	20	15	10	18	15	15	11	17	13	16	16,33
3	$L_3$	9	15	13	9	17	11	14	12	9	10	21	26	12	16	14	13,87
	$L_2$	13	15	17	9	24	12	15	12	11	10	29	26	14	23	17	16,47
4	$L_3$	17	19	26	15	21	13	20	17	18	8	14	13	7	15	16	15,93
	$L_2$	26	20	18	20	25	18	34	20	30	9	18	15	9	17	20	19,93
5	$L_3$	22	20	16	10	10	18	21	10	17	16	17	9	9	13	7	14,33
	$L_2$	29	26	20	13	11	24	28	10	26	20	20	9	11	13	7	17,80
6	$L_3$	6	2	8	9	6	11	11	11	13	15	7	13	15	13	25	11,00
	$L_2$	6	3	8	9	6	14	13	13	14	19	8	17	18	15	29	12,80
7	$L_3$	13	19	14	22	22	16	27	15	9	8	8	11	8	14	19	15,00
	$L_2$	14	20	17	30	26	20	32	20	9	12	9	13	8	16	22	17,87

[zurück zur Haupttabelle 5.3](#)

Tabelle A.5: Versuchspunkt 5 (Paketgröße: 14720 Bytes, Widerstand: 400  $\Omega$ )

Mess.- reihe $i$	$L_x$	Messwerte bzw. -ergebnisse $y_i$ der Messreihe $i$															M.wert $\bar{y}_{i_x}$
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	
1	$L_3$	12	6	9	7	1	12	10	7	7	8	17	7	7	6	9	8,33
	$L_2$	23	10	10	7	1	12	11	8	7	8	17	7	7	6	9	9,67
2	$L_3$	6	8	6	10	7	2	5	7	11	11	11	8	2	5	5	6,93
	$L_2$	6	18	6	10	7	2	5	7	11	11	13	8	2	5	5	8,00
3	$L_3$	12	12	7	7	4	6	1	6	2	3	7	8	45	8	8	9,07
	$L_2$	12	19	8	8	4	8	1	6	2	3	7	8	90	8	8	12,80
4	$L_3$	4	3	15	16	7	10	13	4	5	27	13	6	12	4	2	9,40
	$L_2$	5	3	21	18	7	10	13	4	5	68	27	7	20	5	2	14,33
5	$L_3$	3	4	3	4	0	0	1	4	0	2	0	10	5	3	1	2,67
	$L_2$	3	4	4	4	0	0	1	4	0	2	0	10	5	5	1	2,87
6	$L_3$	4	4	6	4	7	13	3	9	5	1	5	4	7	12	7	6,07
	$L_2$	4	4	6	4	8	24	3	9	6	1	5	4	7	44	7	9,07
7	$L_3$	10	2	7	6	0	1	3	4	3	1	1	5	1	2	3	3,27
	$L_2$	10	2	8	6	0	1	3	4	4	1	1	5	1	2	3	3,40

[zurück zur Haupttabelle 5.1](#)

Tabelle A.6: Versuchspunkt 6 (Paketgröße: 14720 Bytes, Widerstand: 250  $\Omega$ )

Mess.- reihe $i$	Messwerte bzw. -ergebnisse $y_i$ der Messreihe $i$															M.wert $\bar{y}_{i_x}$	
	$L_x$	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14		15
1	$L_3$	3	8	6	4	8	9	13	5	7	8	8	14	6	8	6	7,53
	$L_2$	3	8	6	4	9	9	24	6	7	10	13	25	6	8	11	9,93
2	$L_3$	5	4	4	10	21	5	9	9	15	8	7	5	3	8	8	8,07
	$L_2$	6	4	4	15	29	7	11	13	24	12	8	10	5	8	8	10,93
3	$L_3$	15	9	7	5	10	10	8	5	3	1	6	13	8	11	12	8,20
	$L_2$	19	13	7	7	14	11	12	6	3	1	7	20	8	15	25	11,20
4	$L_3$	18	5	4	3	0	5	8	8	16	4	12	9	7	10	10	7,93
	$L_2$	25	5	9	4	0	5	8	11	21	4	15	15	13	16	18	11,27
5	$L_3$	10	12	11	6	4	4	3	9	0	5	11	9	2	1	5	6,13
	$L_2$	13	20	17	6	4	4	3	9	0	5	18	19	2	1	5	8,40
6	$L_3$	7	3	2	2	1	12	21	8	4	10	10	4	4	5	4	6,47
	$L_2$	7	3	2	2	1	12	24	9	4	11	13	4	4	5	4	7,00
7	$L_3$	3	11	2	2	0	3	4	3	4	4	2	6	0	7	6	3,80
	$L_2$	4	12	2	2	0	3	4	3	4	4	2	6	0	7	6	3,93

zurück zur Haupttabelle [5.2](#)

### A.3 Versuchspunkte 7-9 (Paketgröße: 8832 Bytes, Widerstand: 100, 400, 250 Ω)

Tabelle A.7: Versuchspunkt 7 (Paketgröße: 8832 Bytes, Widerstand: 100 Ω)

Mess.- reihe $i$	$L_x$	Messwerte bzw. -ergebnisse $y_i$ der Messreihe $i$															M.wert $\bar{y}_{i_x}$
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	
1	$L_3$	6	1	5	4	2	1	4	1	2	3	3	4	3	4	6	3,27
	$L_2$	6	1	5	6	2	1	5	1	2	3	4	4	3	5	6	3,60
2	$L_3$	1	3	4	2	0	2	3	0	3	5	1	1	6	3	7	2,73
	$L_2$	1	3	5	2	0	2	4	0	3	6	1	2	6	4	9	3,20
3	$L_3$	10	3	1	2	4	9	10	9	5	3	7	1	3	4	8	5,27
	$L_2$	10	3	1	1	4	11	14	10	5	3	8	1	3	5	9	5,87
4	$L_3$	2	10	4	1	7	0	3	6	4	4	0	6	7	6	6	4,40
	$L_2$	2	10	4	2	8	0	4	6	5	4	1	8	9	6	6	5,00
5	$L_3$	2	5	9	9	4	5	2	5	7	0	6	3	10	7	0	4,93
	$L_2$	2	7	11	11	5	5	2	5	7	0	6	3	12	10	1	5,80
6	$L_3$	5	3	3	4	3	5	5	3	3	9	7	6	2	2	3	4,20
	$L_2$	5	3	3	5	3	6	5	3	3	10	7	6	2	2	3	4,40
7	$L_3$	6	4	7	7	3	4	7	2	6	2	4	2	7	5	1	4,47
	$L_2$	7	8	7	8	4	5	8	3	8	2	4	2	7	7	1	5,40

[zurück zur Haupttabelle 5.3](#)

Tabelle A.8: Versuchspunkt 8 (Paketgröße: 8832 Bytes, Widerstand: 400  $\Omega$ )

Mess.- reihe $i$	$L_x$	Messwerte bzw. -ergebnisse $y_i$ der Messreihe $i$															M.wert $\bar{y}_{i_x}$
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	
1	$L_3$	7	10	12	6	5	5	5	6	4	4	4	2	8	6	8	6,13
	$L_2$	9	12	13	10	6	5	8	6	5	4	4	2	10	7	9	7,33
2	$L_3$	10	12	8	6	7	8	5	7	13	4	5	7	10	2	6	7,33
	$L_2$	11	14	8	11	7	11	9	13	18	6	5	7	10	2	6	9,20
3	$L_3$	4	4	6	3	2	6	6	2	1	0	5	8	4	3	5	3,93
	$L_2$	5	4	6	3	2	6	6	2	1	0	5	12	4	3	6	4,33
4	$L_3$	5	5	7	5	9	8	6	4	11	5	5	0	0	9	2	5,40
	$L_2$	7	6	7	5	8	6	6	4	11	8	6	0	0	9	2	5,67
5	$L_3$	3	2	4	5	4	1	3	3	3	3	0	4	4	3	1	2,87
	$L_2$	3	2	4	5	4	1	3	3	5	5	1	4	4	3	1	3,20
6	$L_3$	6	3	2	3	2	2	2	4	4	4	11	4	4	9	2	4,13
	$L_2$	6	3	2	3	2	2	2	4	4	4	11	4	4	9	2	4,13
7	$L_3$	4	2	4	3	9	1	1	5	2	7	3	3	1	1	6	3,47
	$L_2$	4	2	4	3	9	1	1	5	2	7	3	3	1	1	6	3,47

zurück zur Haupttabelle [5.1](#)

Tabelle A.9: Versuchspunkt 9 (Paketgröße: 8832 Bytes, Widerstand: 250  $\Omega$ )

Mess.- reihe $i$	$L_x$	Messwerte bzw. -ergebnisse $y_i$ der Messreihe $i$															M.wert $\bar{y}_{i_x}$
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	
1	$L_3$	4	10	1	3	11	4	2	8	5	6	6	9	4	5	7	5,67
	$L_2$	4	10	1	3	11	4	2	7	6	8	7	10	5	5	7	6,00
2	$L_3$	9	6	8	7	12	8	4	1	2	3	1	0	2	0	2	4,33
	$L_2$	11	6	10	7	12	8	5	1	2	3	1	0	2	0	2	4,67
3	$L_3$	6	8	6	11	5	1	0	0	0	0	0	4	4	4	5	3,60
	$L_2$	7	9	8	12	5	2	0	0	0	0	4	4	4	5	5	4,33
4	$L_3$	3	1	3	1	3	0	0	3	2	1	2	1	1	1	3	1,67
	$L_2$	3	1	3	1	3	0	0	3	2	1	2	1	1	1	3	1,67
5	$L_3$	2	2	0	1	4	3	6	4	3	8	2	2	3	1	4	3,00
	$L_2$	2	2	0	1	4	3	6	4	3	8	2	2	3	1	4	3,00
6	$L_3$	2	4	2	4	3	7	3	4	3	4	3	1	2	3	2	3,13
	$L_2$	2	4	2	4	3	7	3	4	3	4	3	1	2	3	2	3,13
7	$L_3$	5	2	3	3	1	1	2	3	4	4	1	2	1	2	0	2,27
	$L_2$	5	2	3	3	1	1	2	3	4	3	1	2	1	2	0	2,20

zurück zur Haupttabelle [5.2](#)



# B Quellcode

## B.1 Sender

Listing B.1: Perl-Programm für den Sender (*gntest1*)

```
0 #####
1 # !perl -w
2 #
3 # For mastersthesis:
4 # Programming to generate a IP-Counter via UDP Socket
5 #
6 # by (c) Peter Weckert 2007/2008
7 #
8 #####
9
10 #-----
11 # LOADING packages
12 #-----
13
14 use File::Basename;
15 use Socket;
16 use IO::Socket;
17 use Sys::Hostname;
18 use warnings;
19 use Net::SNMP;
20
21 use POSIX qw(floor);
22 use Digest::MD5 qw(md5_base64);
23 use Time::HiRes qw(sleep alarm);
24
25 #-----
26 # CONFIGURATION section
27 #-----
28
29 # $sendToHost = '127.0.0.1';      # localhost
30 $sendToHost = '192.168.1.2';    # gntest2 takes over a role as
31                                 # 'Transmitter'
32 $sendToPort = '7890';          # fixed Port
33
34 $SLEEP      = '0';              # SleepTime inside of
35                                 # experimental point
36
37 $logfile    = 'udpservice_%MODE%.log';
38
39 #-----
40 # maximal $PacketSize = 65500 (in Bytes!!!), because
41 # PacketSize = 65535(IP_max)-20(IP_header)-8(UDP_header)=ca.65500
42 # Configuration of some values:
43 #-----
44
```

## B Quellcode

```
45 $defaultPacketSize      = 2800; # Size of one Packet
46 $defaultPacketCount    = 3;    # #_of Packet of 1 measurepoint
47 $default_xtimes        = 2;    # Number of Measurepoints
48 $defaultSamples        = 2;    # Number of Samples
49
50 $lowerCharsetDigit      = 32;   # lower ordinary number of character
51                          # in charset (below 32 there are
52                          # control codes we don't want)
53 $upperCharsetDigit     = 127;  # upper ordinary number of character
54                          # in charset (255 is upper boundary
55                          # of 8 bit)
56
57 #-----
58 # MAIN PROGRAM - role of 'Sending'
59 #-----
60
61 (@ARGV > 0) or &usage(); # we need at least one parameter
62 $mode = lc(shift @ARGV or 'send');
63 ($mode =~ /^(send|recv)$/is) or &usage();
64
65 # we allow providing packet size and count via CLI:
66 $packetSize      = (shift @ARGV or '');
67 $packetCount     = (shift @ARGV or '');
68
69 $logfile         =~ s,%MODE%, $mode, gis;
70 $log = Logfile->new($logfile);
71 $log->log('-----_Log_started_-----');
72
73 #-----
74 # SENDING mode, i.e. mode of sending of packets
75 #-----
76
77 if ($mode eq 'send') {
78     # detect packet size and count
79     $packetSize = ($packetSize =~ /\d+$/is) ? $packetSize :
80                 $defaultPacketSize;
81     $packetCount = ($packetCount =~ /\d+$/is) ? $packetCount :
82                 $defaultPacketCount;
83
84     # client mode: init as client via UDP Socket
85     $client = UDP->initClient($sendToHost, $sendToPort);
86     $log->log('Working_in_SENDING_mode. ');
87     $log->log("Will_send_packets_with_$packetSize_Bytes
88     ___$packetCount-times_from_port_". $client->getLocalport(). "/UDP");
89     my $packetsMP = $packetCount*$default_xtimes;
90     my $packetsSAMPLES=$packetCount*$default_xtimes*$defaultSamples;
91
92     #-----
93     # here is the begin of an experimental point
94     #-----
95
96     # do a loop for all samples
97     for ($s=1; $s<=$defaultSamples; $s++) {
98
99     #-----
100 # here is the begin of the series of messure points (or samples)
101 #-----
102
103     # do a loop with sending message packets depending
104     # on $default_xtimes
105     for ($n=1; $n<=$default_xtimes; $n++) {
```

```

106
107 # Count values for error statistic via snmp-request at switch:
108 # 192.168.1.3 duration of experiment
109     eval {
110         ($session, $error)=Net::SNMP->session(
111             -hostname => '192.168.1.3',
112             -community => 'public',
113             -port => 161 );
114         if (!defined($session)){$log->log("Error:_" . $error);}
115         @portnr = (1,2,25,26);
116         $len = @portnr;
117         for ($pindex=0; $pindex<$len; $pindex++) {
118             $log->log("Port_/_". $portnr[$pindex]);
119             $a=0;
120             @namecount = ("Bytes_Rx", "Unicast_Rx", "B/Mcast_Rx",
121                 "Unknown1", "Unknown2", "Unknown3",
122                 "Bytes_Tx", "Unicast_Tx", "B/Mcast_Rx");
123             for ($i=10; $i<=18; $i++) {
124                 $output_id = ".1.3.6.1.2.1.2.2.1.$i.$portnr[$pindex]";
125                 $output = $session->get_request(
126                     -varbindlist => [$output_id] );
127                 $input = "$namecount[$a]_/_". $output->{$output_id};
128                 $log->log($input);
129                 $a++;
130             }
131             $log->log("") if ($pindex<($len-1));
132         }
133         $session->close;
134     };
135
136 # do a loop with generating a message depending
137 # on $packetCount
138     for ($i=1; $i<=$packetCount; $i++) {
139         $msg_counter = $packetCount."_t_". $i."_t_"
140             . $packetsSAMPLES."_t_". $n."_t_". $default_xtimes
141             . "_t_". $s."_t_";
142         $length_msg_counter = length($msg_counter);
143
144         # generate a individual dummy message
145         $msg = &getMessage(($packetSize-$length_msg_counter));
146         my $digest = md5_base64($msg);
147         $len=$client->send($msg_counter.$msg);
148     } # End of $packetCount-Loop (= one sequenz of packets)
149
150     $log->logVerbose("SENT_". $len."_bytes_to_". $client
151         ->getRemotehost().":". $client
152         ->getRemoteport(). "_/_". ($i-1)
153         . "_packets)\t_/_MeasurePoint_ $n");
154 } # End: $default_xtimes-Loop (1 sequenz of measurepoints)
155
156 # Count values for error statistic via snmp-request at switch:
157 # 192.168.1.3 after experiment
158     eval {
159         ($session, $error)=Net::SNMP->session(
160             -hostname => '192.168.1.3',
161             -community => 'public',
162             -port => 161 );
163         if (!defined($session)){$log->log("Error:_" . $error);}
164         @portnr = (1,2,25,26);
165         $length = @portnr;
166         for ($pindex=0; $pindex<$length; $pindex++) {

```

## B Quellcode

```
167     $log->log("Port_/_".$portnr[$pindex]);
168     $a=0;
169     @namecount = ("Bytes_Rx", "Unicast_Rx", "B/Mcast_Rx",
170                 "Unknown1", "Unknown2", "Unknown3",
171                 "Bytes_Tx", "Unicast_Tx", "B/Mcast_Rx");
172     for ($i=10; $i<=18; $i++) {
173         $output_id = ".1.3.6.1.2.1.2.2.1.$i.$portnr[$pindex]";
174         $output = $session->get_request(
175             -varbindlist => [$output_id] );
176         $input = "$namecount[$a]_/_".$output->{$output_id};
177         $log->log($input);
178         $a++;
179     }
180     $log->log("") if ($pindex<($length-1));
181 }
182 $session->close;
183 };
184 #-----
185     $log->logVerbose("SENT_".$len."_bytes_to_".$client
186                   ->getRemotehost().":".$client
187                   ->getRemoteport()."_/_all_"
188                   .($default_xtimes*$packetCount)
189                   ."_packets_of_Sample_$s");
190     sleep($SLEEP);
191 }
192 $log->logVerbose("SENT_".$len."_bytes_to_".$client
193               ->getRemotehost().":".$client->getRemoteport()
194               ."_/_(all_$packetsSAMPLES_packets)\t_Experimental_Point");
195 } # end of 'if ($mode eq 'send')'
```

---

## B.2 Empfänger

Listing B.2: Perl-Programm für den Empfänger (*gntest2*)

```

0 #####
1 # !perl -w
2 #
3 # For mastersthesis:
4 # Programming to generate a IP-Counter via UDP Socket
5 #
6 # by (c) Peter Weckert 2007/2008
7 #
8 #####
9
10 #-----
11 # LOADING packages
12 #-----
13
14 use File::Basename;
15 use Socket;
16 use IO::Socket;
17 use Sys::Hostname;
18 use warnings;
19
20 use POSIX qw(floor);
21 use Digest::MD5 qw(md5_base64);
22 use Time::HiRes qw(sleep alarm);
23
24 #-----
25 # CONFIGURATION section
26 #-----
27
28 # $sendToHost   = '127.0.0.1';      # localhost
29 $sendToHost    = '192.168.1.1';    # gntest2 takes over a role
30                                     # as 'Receiver'
31
32 $sendToPort    = '7890';           # fixed Port
33 $TIMEOUT      = '2';
34 $logfile      = 'udpservice_%MODE%.log';
35
36 #-----
37 # MAIN PROGRAM - role of 'Receiver'
38 #-----
39
40 (@ARGV > 0) or &usage(); # we need at least one parameter
41 $mode = lc(shift @ARGV or 'send');
42 ($mode =~ /^(send|recv)$/is) or &usage();
43
44 $logfile      =~ s,%MODE%, $mode,gis;
45 $log = Logfile->new($logfile);
46 $log->log('-----_LOG_/__STARTED_-----');
47
48 #-----
49 # SENDING mode, i.e. mode of sending of packets
50 #-----
51
52 if ($mode eq 'send') {
53     # ...
54     # see more Appendix Source of Code: part of SENDING mode
55     # ...

```

```

56 }
57
58 #-----
59 # 'Receiving' mode, i.e. mode of receiving and counting of packets
60 #-----
61
62 else {
63     # server mode: init as server via UDP Socket
64     $server = UDP->initServer($sendToPort);
65     $log->log('Working_in_/_RECV_mode. ');
66     $log->logVerbose('-----LISTENS_on_/_PORT_'. $server
67         ->getLocalport(). '/UDP_-----');
68
69     $whileloop    = 1;
70     $ipcount      = 0; # Counter of all IP packets
71                   # per experimental point
72     $partcount    = 0; # Counter of IP packets per complete sample
73     $samplescount = 0; # Counter of IP packets per complete samples
74     $sc           = 1; # Pointer for Index of Samples
75     $nc           = 1; # Pointer for Index of MeasurePoints
76
77     WHILE: while($whileloop) {
78         eval {
79             local $SIG{ALRM} = sub { die "recv()_timed_out\n" };
80             alarm $TIMEOUT;
81             $data = $server->recv();
82             ($total, $actual, $allpackets, $n, $nfix, $s, $realdata)
83                 = split('_t_', $data);
84             $digest = md5_base64($realdata);
85             $actual2=$total*($n-1)+($s-1)*$total*$nfix+$actual;
86             if($allpackets == $actual2) {
87                 $ipcount++;
88                 $samplescount++;
89                 $partcount++;
90                 $whileloop = 0;
91                 $log->logVerbose("RECV_".length($data). "_bytes_from_"
92                     .$server->getSenderhost(). ":"
93                     .$server->getSenderport()
94                     . "_/_" ($partcount_ok, "_"
95                     . ($total-$partcount)
96                     . "_lost)\t_/_MeasurePoint_ $n");
97
98                 $log->logVerbose("RECV_".length($data)
99                     . "_bytes_from_". $server
100                     ->getSenderhost(). ":"
101                     .$server->getSenderport()
102                     . "_/_" ($samplescount_ok, "_"
103                     . (($nfix*$total)-$samplescount)
104                     . "_lost)\t_/_Sample_ $s");
105                 last;
106             } else {
107                 $ipcount++;
108
109                 # to collect MeasurePoints per Sample
110                 if($s==$sc) {
111                     $samplescount++;
112
113                     # to collect MeasurePoints per MeasurePoin
114                     if(($s==$sc) && ($n==$nc)) {
115 t
116
117                         $partcount++;

```

```

117         $n_old = $n;
118         $s_old = $s;
119     } else {
120         $log->logVerbose("RECV_".length($data)
121             ."_bytes_from_".$server
122             ->getSenderhost().": "
123             ."$server->getSenderport()"
124             ."/_($partcount_ok,_"
125             .($total-$partcount)
126             ."_lost)\t_/_MeasurePoint_{$n_old}");
127         $partcount = 1;
128         $nc = $n;
129     }
130 } else {
131     $log->logVerbose("RECV_".length($data)
132         ."_bytes_from_".$server
133         ->getSenderhost().": "
134         ."$server->getSenderport()"
135         ."/_($partcount_ok,_"
136         .($total-$partcount)
137         ."_lost)\t_/_MeasurePoint_{$n_old}");
138
139     $log->logVerbose("RECV_".length($data)
140         ."_bytes_from_".$server
141         ->getSenderhost().": "
142         ."$server->getSenderport()"
143         ."/_($samplescount_ok,_"
144         .(($nfix*$total)-$samplescount)
145         ."_lost)\t_/_Sample_{$s_old}");
146     $samplescount = 1;
147     $partcount = 1;
148     $sc = $s;
149     $nc = $n;
150 }
151 alarm 0;
152 1;
153 }
154 #-----
155 } or die eval { $log->logVerbose("TIMEOUT(after_{$TIMEOUT}_sec):
156     _____RECV_".length($data)."_bytes_from_".$server->getSenderhost()
157         .":".$server->getSenderport()
158         ."/_($ipcount_ok,_"
159         .($allpackets-$ipcount)
160         ."_lost)\n_-----_LOG_ENDED_-----");
161 }
162 }
163 if (defined $realdata) {
164
165     # really all packets have arrived and counted
166     $log->logVerbose("RECV_".length($data)."_bytes_from_"
167         ."$server->getSenderhost().": "
168         ."$server->getSenderport()"
169         ."/_($ipcount_ok,_"
170         .($allpackets-$ipcount)
171         ."_lost)\t_/_All_{$s_samples}");
172 } else {
173     $log->logVerbose('Server_terminated_due_to_rcv()_error:_'
174         ."$server->getError()");
175 }
176 $log->log('-----_LOG_/_ENDED_-----');
177 } # end of receiver

```

*B Quellcode*

178

179 **exit** 0;

---

## B.3 Unterprogramme

Listing B.3: Perl-Codes für die gemeinsamen Unterprogramme von Sender und Empfänger

```

0 #####
1 # !perl -w
2 #
3 # For mastersthesis:
4 # Programming to generate a IP-Counter via UDP Socket
5 #
6 # SUBROUTINES
7 #
8 # by (c) Peter Weckert 2007/2008
9 #
10 #####
11
12
13 #-----
14 # Dump a Usage message and quit
15 #-----
16
17 sub usage {
18     my $script = basename($0);
19     die <<EOT;
20     Usage: $script OPTIONS
21         For server mode use
22             $script server
23         For client mode use
24             $script client [packet size in bytes] [packet count]
25             By default size=64 and count=8
26 EOT
27 }
28
29 #-----
30 # Generate a dummy and random message with specified length
31 # @param $size Size in bytes
32 # @return Generated message
33 #-----
34
35 sub getMessage {
36     my $size = shift;
37     my $s     = '';
38     for (my $i = 0; $i < $size; $i++) {
39         $s .= chr($lowerCharsetDigit+POSIX
40                 ::floor(rand(1+$upperCharsetDigit-$lowerCharsetDigit)));
41     }
42     return $s;
43 }
44
45
46 #-----
47 # Simple Object Oriented Class for UDP socket handling
48 #-----
49
50 package UDP;
51
52 use constant    SERVER          => 0;
53 use constant    CLIENT          => 1;
54 use constant    BUFFERSIZE      => 65536;
55

```

## B Quellcode

```
56 use Socket;
57 use Sys::Hostname;
58
59 #-----
60 # Initialize UDP socket for use as server.
61 # @param $listen Port where the server listens to UDP messages.
62 # @return UDP object
63 #-----
64
65 sub initServer {
66     my $inst = shift;
67     my $listen = shift;
68     (defined $listen) or die "Missing_port_number_where_the_server_listens"
69         . "_for_messages.\n";
70     ($listen =~ /\d+$/is) or die "Invalid_port_number\n";
71
72     my $this = {}; bless($this, ref($inst) || $inst);
73     $this->_createSocket($listen); # create socket to invoke subroutine
74     $this->{'runas'} = SERVER;
75
76     return $this;
77 }
78
79 #-----
80 # Initialize UDP socket for use as client.
81 # @param $desthost The host the UDP message are sent to.
82 # @param $destport The Port where the UDP messages are delivered.
83 # @return UDP object
84 #-----
85
86 sub initClient {
87     my $inst = shift;
88     my $desthost = shift; (defined $desthost) or die
89         "Missing_destination_hostname."/address.\n";
90     my $destport = shift; (defined $destport) or die
91         "Missing_port_number_where_to"."_send_messages_to.\n";
92     my $this = {}; bless($this, ref($inst) || $inst);
93
94     # create socket to invoke subroutine
95     $this->_createSocket();
96
97     # get host and port for the send command
98     my $iaddr = inet_aton($desthost);
99     (defined $iaddr) or die("Could_not_resolve_$desthost:$_!\n");
100     $this->{'portaddr'} = sockaddr_in($destport, $iaddr);
101
102     # do the reverse: detect the REAL destination hostname and port:
103     $this->{'desthost'} = inet_ntoa($iaddr);
104     $this->{'destport'} = $destport;
105     $this->{'runas'} = CLIENT;
106
107     return $this;
108 }
109
110 #-----
111 # Creates simple UDP socket.
112 # @visibility protected
113 # @param $listen port number to bind to. 0 for random one
114 #-----
115
116 sub _createSocket {
```

```

117     my $this          = shift;
118     my $listen        = (shift or 0);
119     my $recvHost      = '192.168.1.1'; # IP of gntest1 within testbed
120     # my $recvHost    = '192.168.1.2'; # IP of gntest2 within testbed
121     # my $recvHost    = '127.0.0.1';   # localhost
122
123     socket(SOCKET,PF_INET,SOCK_DGRAM,getprotobyname('udp')) or
124         die "Socket_create_failed:$_!\n";
125     $this->{'localSocket'} = \*SOCKET;
126     my $iaddr = inet_aton($recvHost); # bind it to localhost
127     my $paddr = sockaddr_in($listen,$iaddr); # bind it to given port number
128     bind(SOCKET,$paddr) or die "Bind_socket_to_".hostname()
129         .":$listen_failed:$_!\n";
130
131     # do the reverse: detect the REAL hostname and port:
132     my ($port,$myaddr) = sockaddr_in(getsockname(SOCKET));
133     $this->{'localhost'} = inet_ntoa($myaddr);
134     $this->{'localport'} = $port; # either specified one of the kernel
135 }
136
137 #-----
138 # The object destructor
139 # Is only be called by the Garbage Collector of Perl
140 #-----
141
142 sub DESTROY {
143     my $this = shift;
144     return unless (defined $this->{'localSocket'});
145     shutdown($this->{'localSocket'},2);
146     close($this->{'localSocket'});
147 }
148
149 #-----
150 # Return the hostname that the local socket uses.
151 # Isn't necessarily the same as "localhost".
152 # @return local hostname
153 #-----
154
155 sub getLocalhost {
156     return (shift)->{'localhost'};
157 }
158
159 #-----
160 # Return the port number of the local socket.
161 # @return local port number
162 #-----
163
164 sub getLocalport {
165     return (shift)->{'localport'};
166 }
167
168 #-----
169 # Return the hostname (as AAA.BBB.CCC.DDD) of the destination socket.
170 # @return remote hostname
171 #-----
172
173 sub getRemotehost {
174     return (shift)->{'desthost'};
175 }
176
177 #-----

```

## B Quellcode

```
178 # Return the port of the destination socket.
179 # @return destination port
180 #-----
181
182 sub getRemoteport {
183     return (shift)->{'destport'};
184 }
185
186 #-----
187 # Return the hostname (as AAA.BBB.CCC.DDD) of the sender socket.
188 # This information is only available if a packet have been recv()'d.
189 # @return sender hostname
190 #-----
191
192 sub getSenderhost {
193     return (shift)->{'senderhost'};
194 }
195
196 #-----
197 # Return the port of the sender socket.
198 # This information is only available if a packet have been recv()'d.
199 # @return sender port
200 #-----
201
202 sub getSenderport {
203     return (shift)->{'senderport'};
204 }
205
206 #-----
207 # Sends a message.
208 # @param $message The message being sent.
209 # @return #_of bytes sent||undef in case of an error. Use getError()
210 # to get the error message
211 #-----
212
213 sub send {
214     my $this = shift;
215     my $message = shift;
216     my $len = CORE::send($this->{'localSocket'}, $message
217         , 0, $this->{'portaddr'});
218     $this->{'error'} = $! unless (defined $len);
219     return $len;
220 }
221 }
222
223 #-----
224 # Receives a message.
225 # @param $message The message being sent.
226 # @return #_of bytes sent||undef in case of an error. Use getError()
227 # to get the error message
228 #-----
229
230 sub recv {
231     my $this = shift;
232     my $rdata = undef;
233     my $sender = CORE::recv($this->{'localSocket'}
234         , $rdata, BUFSIZE, 0);
235
236     # find out who sent it:
237     if (defined $sender) {
238         my ($port, $myaddr) = sockaddr_in($sender);
```

```

239     $this->{'senderhost'} = inet_ntoa($myaddr);
240
241     # either specified one or one of the kernel
242     $this->{'senderport'} = $port;
243 } else {
244     $this->{'error'} = $!;
245     print main::hexDump($rdata)."\n";
246     $rdata = undef;
247 }
248 return $rdata;
249 }
250
251 #-----
252 # Returns the error message if something went wrong.
253 # @return Error message or undef is no error
254 #-----
255
256 sub getError {
257     return (shift)->{'error'};
258 }
259
260
261 #-----
262 # Hand-made PACKAGE Logfile
263 #-----
264
265 package Logfile;
266
267 use constant TRUE      => (1==1);
268 use constant FALSE    => (1==0);
269 use constant LF        => "\n";          # CR = \r
270 use constant TAB      => "\t";
271
272 #-----
273 # Creates Logfile instance.
274 # @param $filename Name of the logfile to write to.
275 # @return Logfile object
276 #-----
277
278 sub new {
279     my $inst = shift;
280     my $filename = shift;
281     my $this={}; bless($this,ref($inst) || $inst);
282
283     $this->{'logfile'} = $filename;
284     $this->{'keepopen'} = TRUE;          # hardcoded
285     $this->{'invalid'} = FALSE;
286     $this->{'prefix'} = '';
287
288     return $this;
289 }
290
291 #-----
292 # Sets logfile Creates Logfile instance.
293 # @param $prefix String for logfile entry prefix
294 #-----
295
296 sub setPrefix {
297     my $this = shift;
298     my $prefix = (shift or '');
299

```

## B Quellcode

```
300     $prefix =~ s/[\r\n\t]//gis;          # eliminate newlines and tabs
301     $prefix .= TAB if (length($prefix)>0);
302     $this->{'prefix'} = $prefix;
303 }
304
305 #-----
306 # Log message.
307 # @param $message Message to write to logfile
308 #-----
309
310 sub log {
311     my $this    = shift;
312     my $message = shift;
313
314     $this->openLog() or return;
315     my $fh = $this->{'fh'};
316     print $fh $this->sortableTime().'_/_'. $this->{'prefix'}. $message.LF;
317     $this->closeLog() unless ($this->{'keepopen'});
318 }
319
320 #-----
321 # Log message and dump it on STDERR too.
322 # @param $message Message to write to logfile
323 #-----
324
325 sub logVerbose {
326     my $this    = shift;
327     my $message = shift;
328
329     $this->log($message);
330     print STDERR "$message\n";
331 }
332
333 #-----
334 # Opens logfile for writing.
335 # @return TRUE
336 #-----
337
338 sub openLog {
339     my $this = shift;
340
341     # return immediately if fh already ex.
342     return TRUE if (defined $this->{'fh'});
343
344     # return immediately if invalid filename
345     return FALSE if ($this->{'invalid'});
346
347     if (open(OUT, ">>". $this->{'logfile'})) {
348         my $old_fh = select(OUT); # well done
349         $| = 1; # turn on autoflush
350         select($old_fh);
351         $this->{'fh'} = \*OUT; # keep fh for further actions
352         $this->{'invalid'} = FALSE;
353     } else {
354         print STDERR "\nWARNING:\nLogfile_". $this->{'logfile'}
355             . "_is_not_writeable:_$_!\nLogging_feature_disabled!\n\n";
356         # couldn't open for appending, so mark it as invalid
357         $this->{'invalid'} = TRUE;
358         return FALSE;
359     }
360     return TRUE;

```

```

361 }
362
363 #-----
364 # Closes logfile
365 #-----
366
367 sub closeLog {
368     my $this = shift;
369
370     # return immediately if there's no fh
371     return unless (defined $this->{'fh'});
372     close($this->{'fh'});
373     $this->{'fh'} = undef;
374 }
375
376 #-----
377 # Returns timestamp formatted for sorting.
378 # @param $current UNIX timestamp or undef (=current timestamp)
379 # @return formatted timestamp using the format YYYYMMDD_HHMMSS
380 #-----
381
382 sub sortableTime {
383     my $this = shift;
384     my $current = (shift or time());
385     @months = (Jan, Feb, Mar, Apr, May, Jun, Jul, Aug, Sept, Oct, Nov, Dez);
386     my ($sec, $min, $hour, $mday, $mon, $year, $wday) = localtime($current);
387
388     return sprintf("[%02u/$months[$mon+1]/%04u:%02u:%02u:%02u_+0100]",
389                   $mday,
390                   1900+$year,
391                   $hour,
392                   $min,
393                   $sec);
394 }
395
396 #-----
397
398 package main;

```

---



# C Hintergrundinformationen

## C.1 Signifikanztest

Der Signifikanztest klassifiziert die Effekte nach einem statistischen Prüfverfahren in *zufällige* bis *hochsignifikante* Effekte. Einen solchen Parametertest nennt man auch *Signifikanztest*.

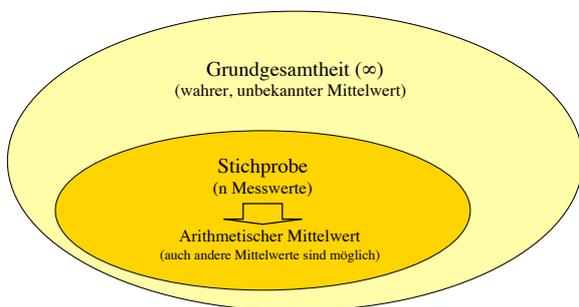


Abbildung C.1: Stichprobe vs. Grundgesamtheit

Er ermöglicht die Beurteilung der Effekte, indem der Konfidenzintervall auf der Basis eines gewählten Signifikanzniveaus berechnet wird. Dabei geht man davon aus, dass das arithmetische Mittel  $\bar{y}$  einer Stichprobe vom Umfang  $n$  in der Nähe des wahren, aber unbekanntes Mittelwert  $\mu$  (wegen  $n \rightarrow \infty$ ) der Grundgesamtheit liegt, wie die Abbildung C.1 verdeutlicht. Zur Bestimmung des Vertrauensinter-

vall wird zunächst der Schätzwert  $s_{\bar{y}}$  für die Standardabweichung des Mittelwerts bestimmt [Squi 01]:

$$s_{\bar{y}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{C.1})$$

Mit Hilfe der Student-Verteilung lässt sich nun das zweiseitige Vertrauensintervall des unbekanntes Mittelwertes errechnen:

$$\bar{y} - t \cdot s_{\bar{y}} \leq \mu \leq \bar{y} + t \cdot s_{\bar{y}} \quad (\text{C.2})$$

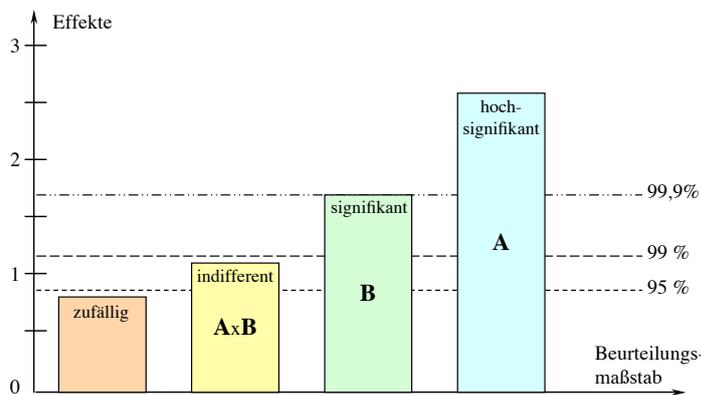
Den t-Wert entnimmt man aus der Tabelle C.1 auf Seite 82 der Studentsche t-Verteilung. Der t-Wert ist dabei von dem Freiheitsgrad  $FG = n - 1$  und der gewählten Wahrscheinlichkeit  $P$  abhängig.

Legt man sich für eine bestimmte Wahrscheinlichkeit  $P$  (z. B. 99.000 %) fest, dann gibt dieses zweiseitige Vertrauensintervall für den Mittelwert  $\mu$  mit dem entsprechenden  $t$  aus der Gleichung C.2 an, in welchem Bereich der unbekanntes Mittelwert  $\mu$  zu erwarten ist. Es gilt zu beachten, dass je höher die Wahl des Signifikanzniveaus ist, desto breiter dann auch der Konfidenzintervall ist.

Für den Signifikanztest werden in der Regel die 95 %-, 99 % und der 99,9 %-Vertrauensbereiche genommen und den jeweiligen Effekten je Faktor gegenübergestellt (Abbildung C.2 auf Seite 82), die mittels einer Formel errechnet werden. Die Effekte der Faktoren fallen bei Anwendung des Signifikanztests durch, die das gewählte Signifikanzniveau nicht erreicht haben.

Tabelle C.1: STUDENTsche t-Verteilung: Quantile  $t = f(FG, P)$

	Wahrscheinlichkeitsverteilung $P$ [MA, 13]		
	95,000 %	99,000 %	99,900 %
<i>FG</i>			
1	12,706	63,657	636,62
2	4,303	9,925	31,60
3	3,182	5,841	12,92
4	2,766	4,604	8,610
5	2,571	4,032	6,869
⋮	⋮	⋮	⋮
10	2,228	3,169	4,587
15	2,131	2,947	4,073
20	2,086	2,845	3,850
30	2,042	2,750	3,646
⋮	⋮	⋮	⋮
50	2,009	2,678	3,496
100	1,984	2,626	3,390
500	1,965	2,586	3,311
∞	1,960	2,576	3,291



Liegt ein Effekt unterhalb des 95 %-Vertrauensbereiches, so wird der Effekt als *zufällige* Größe bewertet. Er ist statistisch nicht abgesichert und wird von daher ausgesondert. Liegt er dagegen Bereich von 95 % und 99 %, dann gilt der Effekt als *indifferent*. Hinter der Bezeichnung eines indifferenten Effektes steht der Grundgedanke, dass bei Vorliegen einer größeren Datenmenge eine genauere Angabe zu diesem Effekt errechnet und

Abbildung C.2: Signifikanztest anhand der Beurteilung von statistisch ausgewerteten Effekten

sicher angegeben werden kann. Effekte zwischen dem 99 %- und dem 99,9 %-Konfidenzbereich gelten als *signifikant* und Effekte über dem 99,9 %-Vertrauensbereich als *hochsignifikant*. Generell und im Allgemeinen nimmt man alle die Effekte an, die die 95 %-Grenze überschreiten, ansonsten liegt es im Ermessen des Experimentators, die Grenze(n) gesondert festzusetzen.

## C.2 Anwendungsbeispiel für den Signifikanztest

Ein Beispiel soll veranschaulichen, was bisher formal beschrieben wurde. Dabei wird auf Zahlen von [Klei 04] zurück gegriffen. Klein führt ein Experiment an, bei dem die Korrosionsbeständigkeit von Bauteilen verbessert werden soll. Bei diesem Prozess sind die Faktoren *Druck* und *Temperatur* entscheidend. Weiterhin wird auch eine gegenseitige Beeinflussung der Faktoren vermutet. Da bei diesem Verfahren eine bestmögliche Qualität

erreicht werden soll, sind die Faktoreinstellungen zu verbessern.

Zur Bearbeitung des Problems soll ein vollständiger  $2^2$ -Plan herangezogen werden, worauf im Abschnitt 2.2.1 bereits eingegangen wurde. Der Druck entspricht hier dem Faktor A und die Temperatur dem Faktor B. Die Wechselwirkung (WW) beider Faktoren werden in dem Symbol  $A \times B$  repräsentiert. In der Tabelle C.2 findet sich nun die Versuchsmatrix mit ihren Messergebnissen und deren einzelnen Mittelwerte und Varianzen [Klei 04]:

Tabelle C.2: Versuchsmatrix und deren Messergebnisse

Exp.nr.	Druck A	Temperatur B	WW $A \times B$	Schichtdickengeschw. $\nu[\mu\text{m}/\text{min}]$				$\bar{y}_i$	$s_i^2$
1	400 (-)	700 (-)	+	6,1	5,9	5,4	6,6	6,0	0,247
2	600 (+)	700 (-)	-	6,1	7,7	8,9	7,3	7,5	1,333
3	400 (-)	800 (+)	-	5,8	6,4	7,5	6,7	6,6	0,500
4	600 (+)	800 (+)	+	9,7	11,0	10,4	10,1	10,3	0,300
$\Sigma$ Effekt	2,6	1,7	1,1					$(\Sigma)30,4$ $\bar{y} = 7,6$	$(\Sigma)2,38$ $\bar{s}^2 = 0,595$

1. Systematische Untersuchung der Faktorwirkungen (= Effekte  $E_x$ ):

$$\begin{aligned}
 E_A &= \left| \frac{7,5 + 10,3}{2} - \frac{6,0 + 6,6}{2} \right| = 2,6 \mu\text{m}/\text{min} \\
 E_B &= \left| \frac{6,6 + 10,3}{2} - \frac{7,5 + 6,0}{2} \right| = 1,7 \mu\text{m}/\text{min} \\
 E_{A \times B} &= \left| \frac{10,3 - 7,5}{2} - \frac{6,6 - 6,0}{2} \right| = 1,1 \mu\text{m}/\text{min} \quad \text{oder:} \\
 E_{B \times A} &= \left| \frac{10,3 - 6,6}{2} - \frac{7,5 - 6,0}{2} \right| = 1,1 \mu\text{m}/\text{min}
 \end{aligned} \tag{C.3}$$

2. Signifikanztest für die Beurteilung der Effekte bzw. Faktoren

- Schätzwert für die mittlere Varianz

$$\bar{s}^2 = \frac{0,247 + 1,333 + 0,500 + 0,300}{4} = 0,595$$

- Freiheitsgrad (FG)

$$FG = 4 \cdot (n - 1) = 4 \cdot (4 - 1) = 4 \cdot 3 = 12$$

- Schätzwert der Standardabweichung aller Effekte

$$s = \sqrt{\frac{\bar{s}^2}{N}} = \sqrt{\frac{0,595}{16}} = 0,1928$$

wobei  $N \doteq$  Umfang aller im Versuchsplan vorkommenden Messwerte (hier: 4 Versuchspunkte und 4 Messwerte) ist, also  $4 \cdot 4 = 16$ .

- Bestimmung des zweiseitigen Vertrauensbereich für  $FG = 12$  und Ermittlung des  $t$ -Wertes aus der STUDENTschen Verteilungstabelle C.1:

$$\begin{aligned}
 t(FG, 95\%) &= 2,179 \implies 2 \cdot t \cdot s = 2 \cdot 2,179 \cdot 0,1928 = 0,840 \\
 t(FG, 99\%) &= 3,055 \implies 2 \cdot t \cdot s = 2 \cdot 3,055 \cdot 0,1928 = 1,178 \\
 t(FG, 99,9\%) &= 4,318 \implies 2 \cdot t \cdot s = 2 \cdot 4,318 \cdot 0,1928 = 1,665
 \end{aligned}
 \tag{C.4}$$

Zur Einordnung des Verhältnisses von Effekt und Vertrauensbereich, kann auf Abbildung C.2 auf Seite 82 verwiesen werden. Wählt man für eine statistische Sicherheit von 95 %, so würden alle drei Effekte den Signifikanztest bestehen. Wird dagegen die nächste statistische Sicherheitsstufe (99 %) herangezogen, so würde in diesem Fall der Effekt  $E_{A \times B}$  verworfen werden, da er nicht mehr signifikant und statistisch zweifelhaft wäre.

### C.3 Methode des integrierten Versuchs

Reine  $2^k$ -Pläne eignen sich nur zur Beschreibung linearer Zusammenhänge. Die zur Erfassung quadratischer Abhängigkeiten notwendigen  $3^k$ -Pläne zeichnen sich demgegenüber durch eine für viele Anwendungen zu hohe Zahl von Versuchsreihen aus, wenn die Anzahl der Faktoren zunimmt.

Um dieser Beobachtung entgegen zu wirken, wurde aus diesem Grund der *integrierte Versuchsplan* entwickelt, der den geringen Aufwand und die Einfachheit des  $2^k$ -Plans mit der Möglichkeit des  $3^k$ -Plans verbindet. Wenn die mittlere Wirkung mit bestimmten Faktorstufenkombinationen linear steigt (oder fällt) und ab einem gewissen Punkt dann nur noch

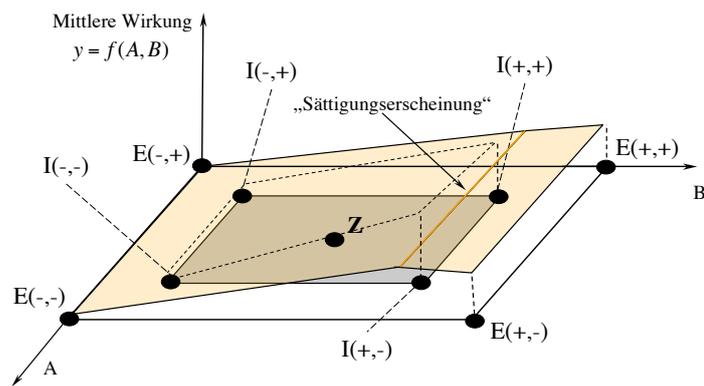


Abbildung C.3: Integriertes Versuchsmodell

geringfügig einem Endwert ab- (bzw. zu-) nimmt, so beschreibt dieses Systemverhalten eine leichte Nichtlinearität oder eine Art „Sättigungserscheinung“ (Abbildung C.3). Dazu werden zwei  $2^k$ -Pläne mit verschiedenen physikalischen Levelstufen ineinander verschachtelt und, falls sinnvoll, um einen genau in der Mitte liegenden Zentralpunktversuch ergänzt. Die Mittelwerte finden bei der statistischen Auswertung des Koeffizienten  $b_0$  Eingang, alle übrigen Effekte werden vom Ergebniswert der Mittelwerte nicht beeinflusst [Klei 04]. Der Teilplan mit den extremen Levelstufen wird dabei als externer Versuch und der Teilplan mit den engeren Parametervariationen als interner Versuch bezeichnet.

Stehen die Levelstufen des externen Versuches ggf. nach Durchführung der Vorversuche fest, werden die Stufen des internen Versuchs symmetrisch dazu gelegt. Dabei sollte sowohl der Abstand zu den externen Levelstufen als auch der Abstand zwischen den Stufen des internen Versuches etwa gleich sein. Nach Möglichkeit soll die Stufe für den Zentralpunkt den realen Mittelwert des jeweiligen Faktors darstellen. In der Abbildung C.3 spiegelt er sich im „Z“-Symbol wider.

Durch die besondere Anordnung der Versuchspunkte eines integrierten Versuches im Versuchsraum können neben linearen Modellansätzen auch einfache nichtlineare Abhängigkeiten untersucht werden. Dazu sind trotz Ausführung zweier  $2^k$ -Pläne (evtl. den Zentralpunkt dazu) weniger Versuchseinstellungen notwendig als bei einem  $3^k$ -Plan. Die Tabelle C.3 zeigt den Vergleich:

Tabelle C.3: Vergleich der Versuchspläne für  $k = \{2, 3, 4\}$ 

$k$	$N = 2^k$	$N = 2 \cdot 2^k + Z$	$N = 3^k$
2	4	9	9
3	8	17	27
4	16	33	81
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

## C.4 Arbeiten mit einem Dämpfer

Sollte eine Arbeit entstehen, bei der in optischen Netzen mit einem Dämpfer gearbeitet wird, ist es sinnvoll, sich ein differenziertes Bild über den Dämpfer zu gewinnen. Der Begriff *Dämpfung* meint zunächst im Allgemeinen nicht ein spezielles Element, sondern teilt es in unterschiedliche Teilaspekte auf, die aber letztlich wieder zusammen betrachtet werden müssen. Auf einer Glasfaserstrecke zwischen der Laserdiode als Sender und dem Empfänger müssen folgende Aspekte bekannt sein: die Leistung des Senders, die Empfindlichkeit des Empfängers, die Dämpfungskoeffizienten und die Längen der LWL sowie die Dämpfung der Stecker, der Spleiße und der Koppler. Bei einer Planung unter dem Aspekt der Dispersion muss neben den Streckenlängen beim *Multimode-LWL* das Bandbreiten-Längen-Produkt und beim *Monomode-LWL* dessen Dispersion sowie Halbwertsbreite des optischen Senders bekannt sein.

Wenn  $P_T$  die Leistung des Senders ist, die in den LWL eingekoppelt wird, und  $P_R$  für die Empfängerempfindlichkeit steht, dann beträgt die maximal zulässige Dämpfung  $a_{zul}$ :

$$\frac{a_{zul}}{dB} = \frac{P_T}{dBm} - \frac{P_R}{dBm} \quad (C.5)$$

mit  $\frac{P_R}{dBm} \approx -10 \cdot \left(7 - \lg \frac{B}{B_0}\right)$  für  $\lambda = 850nm$  (= Monomode)

und  $\frac{P_R}{dBm} \approx -10 \cdot \left(6,5 - \lg \frac{B}{B_0}\right)$  für  $\lambda = 1300nm$  bzw.  $\lambda = 1550nm$  (= Multimode)

Dieser Wert darf nicht überschritten werden. Die Summe der Dämpfungen der Systemkomponenten (also Stecker, Spleißstellen, LWL-Abschnitte, etc.) ergibt die Regeneratorfelddämpfung  $a_k$ . Damit das Übertragungssystem funktioniert, muß  $a_k \leq a_{zul}$  sein.

### C Hintergrundinformationen

Im Pegeldiagramm (Abbildung C.4) wird die Leistung im LWL als Funktion seiner Länge abgebildet. Die Einheit  $dB$  ist eine logarithmische Größe und stellt die Leistung dar. Man erkennt zwei Teilstrecken mit gleicher, aber sehr vernachlässigbaren Dämpfungskoeffizienten<sup>1</sup>. Steckerdämpfung wird als Stufe sichtbar. Die obere Zeile zeigt die Leistung des Senders und die Leistung am Empfänger sowohl in Milliwatt als auch in  $dBm$ .

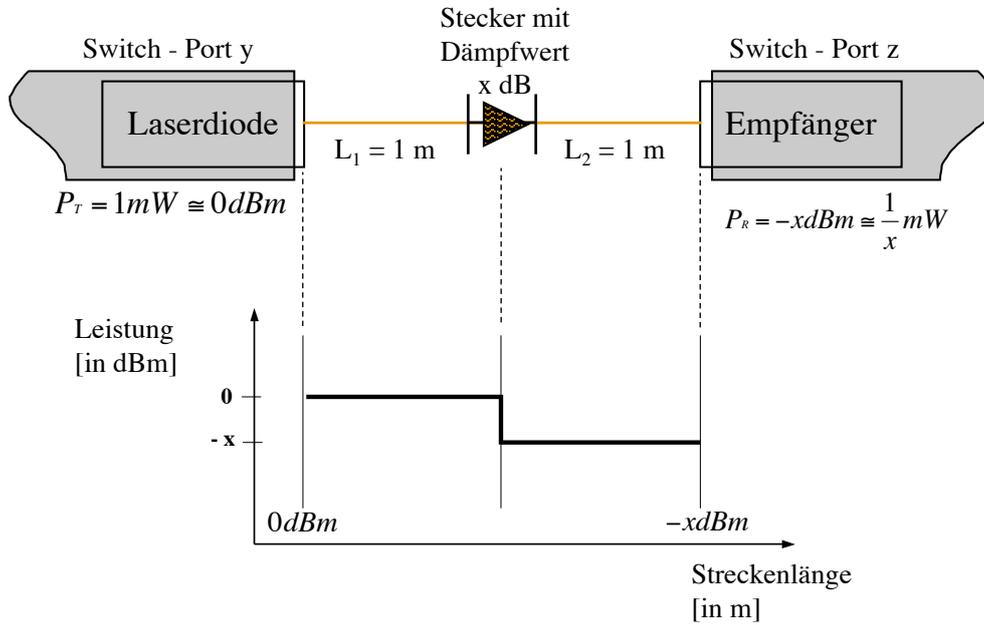


Abbildung C.4: Das Pegeldiagramm [DE 99]

<sup>1</sup>Ein Zahlenbeispiel soll die Behauptung untermauern. Dabei entstammen die Zahlenwerte aus einem Aufsatz aus dem Jahre 1999 ([DE 99]). Demnach ergibt sich für ein LWL einen mittleren Dämpfungswert von  $0,37 \frac{dB}{km}$ , d. h. auf eine Einheit von 1 Meter entspricht dieser Mittelwert:  $3,7 \cdot 10^{-4} \frac{dB}{m}$

# Literaturverzeichnis

- [AHST<sup>+</sup> 07] AL-HERBISH, THAMER, W. RICHARD STEVENS, JOHN W. TEMPLES, MICHAEL MASINO, LAMONT GRANQUIST, MICHAEL T. STOLARCHUK, MIKE BORELLA und DERRICK J BRASHEAR: *Raw IP Networking FAQ*, Zugriff: 25. September 2007, <http://www.faqs.org/faqs/internet/tcp-ip/raw-ip-faq/> .
- [AKZ 07] ALMES, G., S. KALIDINDI und M. ZEKAUSKAS: *A One-way Delay Metric for IPPM*, Zugriff: 20. Februar 2007, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2679.txt> .
- [Bern 04] BERNSTEIN, GREG: *SONET and SDH: Advanced Topics, Modern Optical Network Control Plane, Interdomain Control*. In: *Optical Network Control. Architecture, Protocols and Standards*, Seiten 64–88, 131–158, 373–392, Boston, 2004. Pearson-Verlag.
- [Bläs 91] BLÄSING, JÜRGEN P.: *Statistische Qualitätskontrolle*. gmft, 1991.
- [Davi 08] DAVIES, GARETH: *GÉANT2 macht einen Riesenschritt für Europäische Forschungstätigkeiten*. Géant2, Zugriff: 5. April 2008, <http://www.geant2.net/server/show/conWebDoc.1367> .
- [DE 99] DIETER EBERLEIN, DR.: *Systementwurf - Lichtwellenleiter-Technik*. Funkschau, 1/2 Auflage, 1999.
- [Döbb 07] DÖBBELING, HANS: *Paneuropäische Vernetzung mit GÉANT2*, Zugriff: 26. August 2007, <http://www.dfn.de/fileadmin/5Presse/DFNMitteilungen/heft70.pdf> .
- [DrMa 93] DREYER, HELMUT und HANS-JÜRGEN MALIG: *Statistische Versuchsmethodik*. Gesellschaft für Datenverarbeitung und Systemtechnik mbH, 2 Auflage, April 1993.
- [Eire 06] EIREINER, DIETER: *Prozessmodelle zur statistischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding*. 201. Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2006.
- [EsSa 00] ESTER, MARTIN und JÖRG SANDER: *Knowledge Discovery in Databases - Techniken und Anwendungen*. Springer, 2000.
- [FKT 01] FOSTER, I., C. KESSELMANN und S. TUECKE: *The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organisations*. Intl. J. Supercomputer Applications, 2001.
- [Gies 06] GIES, CHRISTIAN: *Evaluation der Prozesseinflussgrößen beim Fließlochformen mittels DoE*. kassel university press GmbH, 2006.

- [GMS 00] M. GOOSSENS, F. MITTELBACH und A. SAMARIN: *Der LaTeX Begleiter*. Addison-Wesley, ISBN 3-8273-1689-8, 2000.
- [HAN 99a] HEGERING, H.-G., S. ABECK und B. NEUMAIR: *Integriertes Management vernetzter Systeme – Konzepte, Architekturen und deren betrieblicher Einsatz*. dpunkt-Verlag, 1999, <http://www.dpunkt.de/produkte/management.html> .
- [Heue 07] HEUER, ROLF-DIETER: *Director's Corner*, Zugriff: 2. September 2007, [http://zms.desy.de/sites/site\\_www/content/e409/e8731/e8852/e8858/-infoboxContent9935/DESY\\_inForm\\_2007\\_09\\_de\\_ger.pdf](http://zms.desy.de/sites/site_www/content/e409/e8731/e8852/e8858/-infoboxContent9935/DESY_inForm_2007_09_de_ger.pdf) .
- [Hoel 07] HOELZNER, KAI: *Hybride Netze für Europas Wissenschaftler*, Zugriff: 26. August 2007, <http://www.dfn.de/fileadmin/5Presse/DFNMitteilungen/heft68.pdf> .
- [Horn 08] HORNIG, CHARLES: *A Standard for the Transmission of IP Datagrams over Ethernet Networks*, Zugriff: 5. April 2008, <http://tools.ietf.org/html/rfc894> .
- [Inc. 08a] INC., WIKIPEDIA FOUNDATION: *Ethernet*, Zugriff: 1. März 2008, <http://de.wikipedia.org/wiki/Ethernet> .
- [Inc. 08b] INC., WIKIPEDIA FOUNDATION: *Zentraler Grenzwertsatz*, Zugriff: 28. Februar 2008, [http://de.wikipedia.org/wiki/Zentraler\\_Grenzwertsatz](http://de.wikipedia.org/wiki/Zentraler_Grenzwertsatz) .
- [Int 08] INTERNET SOCIETY: *Internet Engineering Task Force. Home Page.*, Zugriff: 12. März 2008, <http://www.ietf.org> .
- [JMGB 07] JAMES, LAURA B., ANDREW W. MOORE, MADELEINE GLICK und JAMES BULPIN: *Physical Layer Impact upon Packet Errors*. Passive and Active Measurement Conference (PAM 2006), Zugriff: 10. Februar 2007, <http://www.pamconf.org/2006/papers/s6-james.pdf> .
- [Jost 07] JOSTEL, J.: *User Datagram Protocol*, Zugriff: 26. August 2007, <http://www.ietf.org/rfc/rfc768.txt> .
- [Kazi 06] KAZI, KHURRAM: *Generic Framing Procedure (GFP), Background on timing and synchronization and jitter, Ethernet services over public WAN, Ethernet services over MPLS networks*. In: *Optical Networking standards - a comprehensive guide*, Seiten 153–187, 191–212, 373–423, 425–455, New York, NY, 2006. Springer.
- [Klei 04] KLEIN, BERND: *Versuchsplanung - DoE Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2004.
- [KöBe 97] KÖNIG, ECKARD und ANNETTE BENTLER: *Arbeitsschritte im qualitativen Forschungsprozeß*. In: FRIEBERTSHÄUSER, BARBARA und ANNELORE PRENGEL (Herausgeber): *Handbuch Qualitative Forschungsmethoden in der Erziehungswissenschaft*, Kapitel Teil II: Methodologische Grundlagen, Seiten 88–97. Juventa Verlag, München, 1997.

- [Krey 72] KREYSZIG, ERWIN: *Statistische Methoden und ihre Anwendungen*. Vandenhoeck & Ruprecht, Karlsruhe, 4 Auflage, Frühjahr 1972.
- [KuRo 05] KUROSE, JAMES F. und KEITH W. ROSS: *Computernetze - Ein Top-Down-Ansatz mit Schwerpunkt Internet*. PearsonStudium-Verlag, München, 4 Auflage, Oktober 2005.
- [Lieb 07] LIEBSCH, THOMAS: *Im Gleichtakt schwingen - Optoelektronik: Synchron laufende Laser senken die Bitfehlerrate beim Senden über lange Glasfaserstrecken*, Zugriff: 20. Februar 2007, <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/21/21470/1.html> .
- [Ltd 07] LTD, PACKET DATA SYSTEMS: *NetDisturb NetDisturb - IP Network Impairment Emulator*. via Internet, Zugriff: 16. Oktober 2007, <http://www.pds-test.co.uk/products/netdisturb.html> .
- [MA ] MARIO ADAM, PROF. DR.-ING.: *Statistische Versuchsplanung und Auswertung (DoE Design of Experiments)*. Fachhochschule Düsseldorf, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik.
- [Mark 07] MARK, LUTZ: *Internet Measurement Project*. via Internet, Zugriff: 16. Oktober 2007, <http://www.ip-measurement.org/openimp/index.html> .
- [Merk 97] MERKENS, HANS: *Stichproben bei qualitativen Studien*. In: FRIEBERTSHÄUSER, BARBARA und ANNEDORE PRENGEL (Herausgeber): *Handbuch Qualitative Forschungsmethoden in der Erziehungswissenschaft*, Kapitel Teil II: Methodologische Grundlagen, Seiten 97–107. Juventa Verlag, München, 1997.
- [MP 04] MANFRED POPP, DIPL.-ING.: *MESOS für Windows - Benutzerhandbuch*. Süddeutsches Kunststoff-Zentrum, Frankfurter Str. 15-17, August 2004.
- [Omni 07] OMNICOR: *Network Testing Tools*. via Internet, Zugriff: 16. Oktober 2007, <http://www.omnicor.com/netest.htm> .
- [Oswa 97] OSWALD, HANS: *Was heißt qualitativ forschen? Eine Einführung in Zugänge und Verfahren*. In: FRIEBERTSHÄUSER, BARBARA und ANNEDORE PRENGEL (Herausgeber): *Handbuch Qualitative Forschungsmethoden in der Erziehungswissenschaft*, Kapitel Teil II: Methodologische Grundlagen, Seiten 71–88. Juventa Verlag, München, 1997.
- [Poko 05] POKORRA, GERD: *Perl - Eine Einführung*. Regionales Rechenzentrum für Niedersachsen (RRZN), Hannover, 2 Auflage, März 2005.
- [Scha 07] SCHAUERHAMMER, KARIN: *WiN als Netzressource im Grid*, Zugriff: 26. August 2007, <http://www.dfn.de/fileadmin/5Presse/DFNMitteilungen/heft69.pdf> .
- [Sche 07] SCHEDEL, DANIEL: *Evaluation von Sprachen und Tools zur Prozessmodellierung am Beispiel des Incident Management Prozesses am LRZ*. Diplomarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München, 30. April 2007.

- [ScWi 07] SCHAUERHAMMER, KARIN und MARTIN WILHELM: *Fasern ohne Grenzen - Cross-Border-Fibres als Ergänzung der GÉANT2-Konnektivität*, Zugriff: 26. August 2007, <http://www.dfn.de/fileadmin/5Presse/DFNMitteilungen/heft71.pdf> .
- [SGPH 07] STONE, JONATHAN, MICHAEL GREENWALD, CRAIG PARTRIDGE und JAMES HUGHES: *Perfomancer of checksums and CRC's over real data*, Zugriff: 25. November 2007, <http://citeseer.ist.psu.edu/34744.html> .
- [SJ 07] SCHWEIZER-JÄCKLE, SIBYLLE: *Performance-Monitoring für Europas Forschungsnetz*, Zugriff: 26. August 2007, <http://www.dfn.de/fileadmin/5Presse/DFNMitteilungen/heft70.pdf> .
- [Squi 01] SQUIRES, GORDON LESLIE: *Practical Physics*. Cambridge University Press, 4 Auflage, 2001.
- [StPa 07] STONE, JONATHAN und CRAIG PARTRIDGE: *When the CRC and TCP checksum disagree*, Zugriff: 25. November 2007, <http://www.citeseer.ist.psu.edu/stone00when.html> .
- [Uhlm 07] UHLMANN, DIRK T.: *Twisted-Pair-Kabel Steckerbelegung*. Fachhochschule Ludwigshafen, Zugriff: 10. August 2007, <http://www.fh-luh.de/pollidi/cat.5.kabel.html> .
- [Wald 95] WALDMANN, KARL-HEINZ: *Design of double CUSUM quality control schemes*. Inst. für Wirtschaftstheorie und Operations Research, 1995.
- [X.20 94] X.200, ITU-T RECOMMENDATION: *Data Networks and Open System Communications. Open System Interconnection - Model and Notation. Information Technology - Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: The Basic Model*. Technischer Bericht, ITU-T, Genf, Juli 1994.
- [YaHa 07] YAMPOLSKIY, MARK und MATTHIAS K. HAMM: *Management of Mutlidomain End-to-End Links – A Federated Approach for the Pan-European Research Network Géant 2*. Integrated Network Management. 10th IFIP/IEEE International Symposium, Seiten 189–198, Zugriff: 25. Juli 2007, <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentCon.jsp?punumber=9839&conhome=4258513> .

# Stichwort- und Abkürzungsverzeichnis

- Analyse, [43](#)
  - Clustering-Verfahren, [44](#)
    - Centroide, [45, 46](#)
    - Medoide, [45](#)
    - Outlier, [45](#)
  - graphische Darstellung, [43](#)
  - Regressionsanalyse, [51](#)
  - statistische Analyse, [28](#)
  - statistischen Auswertung, [39](#)
  - Systemanalyse, [25, 33, 50](#)
  - Varianzanalyse, [52](#)
  - Wechselwirkungsanalyse, [52](#)
- ARP , *siehe* Address Resolution Protocol
- Best Case, [48](#)
- BGP , *siehe* Border Gateway Protocol
- CERN, *siehe* Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
- Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, [2](#)
- Dämpfer, [85](#)
- DANTE , *siehe* Delivery of Advanced Network Technology to Europe
- Delivery of Advanced Network Technology to Europe, [1](#)
- Deutsches Forschungsnetz, [1](#)
- DFN, *siehe* Deutsches Forschungsnetz
- E2E Link , *siehe* End-to-End Link
- Effekte, [9, 81](#)
  - Fragmentierungseffekte, [26](#)
  - Haupteffekt, [9, 14](#)
  - Wechselwirkungseffekte, [11, 14, 53, 83](#)
- Einflussgröße, [9](#)
- Einflussgröße, [25, 34, 39, 46, 52](#)
- End-to-End Link, [3, 4, 20, 49](#)
- Energieverlust, [27](#)
- Faktor, *siehe* Einflussgröße
- Faktorieller Versuchsplan
  - erster Ordnung, [13](#)
  - fraktionierte, [13](#)
  - zweiter Ordnung, [17, 34](#)
- FDDI , *siehe* Fiber Distributed Data Interface
- Forschungszentrum Karlsruhe, [2](#)
- FZK , *siehe* Forschungszentrum Karlsruhe
- GÉANT2, [1, 49](#)
- Häufigkeit
  - absolute, [12, 28, 50](#)
  - Häufigkeitsfunktion, [12](#)
  - Häufigkeitsverteilung, [12, 35, 50](#)
  - relative, [12](#)
- ICMP , *siehe* Internet Control Message Protocol
- Identifier, [10, 15](#)
- Internet Protokoll, [6, 26, 29, 50](#)
- Intervall, [32](#)
- IP , *siehe* Internet Protokoll
- ISO-OSI-Modell, [3, 29](#)
  - Schicht 1 – Bitübertragungsschicht, [3](#)
  - Schicht 2 – Sicherungsschicht, [3](#)

- Address Resolution Protocol, 29
- Ethernet, 3, 5, 26, 29, 50
- Ethernet over SDH, 3
- Ethernet over SONET, 3
- Fiber Distributed Data Interface, 29
- Point-to-Point Protocol, 29
- Multiprotocol Label Switching, 3
- Schicht 3 – Vermittlungsschicht
  - Border Gateway Protocol, 29
  - Internet Control Message Protocol, 29
  - Internet Protokoll, 5, 6, 26, 29, 50
  - Open Shortest Path First, 29
  - Routing Information Protocol, 29
- Schicht 4 – Transportschicht
  - Transport Control Protocol, 29
  - User Datagram Protocol, 26, 29, 50
- ISO-OSI-Modell, *siehe* International Organization for Standardization/Open Systems Interconnection Reference Model (ISO-OSI-Modell)
- Konfidenzintervall, 14, 37, 81
- Koordinatensystem, 43, 45
- Large Hadron Collider, 2, 49
- Leibniz-Rechenzentrum, 3, 19, 49
- LHC, *siehe* Large Hadron Collider
- Lichtwellenleiter, 2, 85
  - Monomode, 85
  - Multimode, 85
- LRZ, *siehe* Leibniz-Rechenzentrum
- LWL, *siehe* Lichtwellenleiter
- Matrix, 40
  - Matrix der unabhängigen Variablen, 15
  - Planmatrix, 15
  - Antwortmatrix, 14
  - Effektmatrix, 14
  - Einstellmatrix, 35
  - Versuchsmatrix, 83
- Messpunkt, 10
- Messreihe, 10, 40, 46
- Messwerte, 10, 36, 40
- Modell, 10
  - linearer Modellansatz, 52
  - mathematisches Modellpolynom, 51
  - Modellgleichung, 52
  - quadratischer Modellansatz, 53
  - quasi linearer Modellansatz, 53
- MPLS, *siehe* Multiprotocol Label Switching
- Münchener Wissenschaftsnetz, 19
- MWN, *siehe* Münchener Wissenschaftsnetz
- National Research and Education Network, 1, 49
- NREN, *siehe* National Research and Education Network
- OPN, *siehe* Optisches privates Netzwerk
- Optisches privates Netzwerk, 3, 49
- OSPF, *siehe* Open Shortest Path First
- PPP, *siehe* Point-to-Point Protocol
- QoS, *siehe* Quality of Service
- Quality of Service, 6
- RIP, *siehe* Routing Information Protocol
- SDH, *siehe* Synchronous Digital Hierarchy
- Signifikanztest, 14, 81
- Simple Network Management Protocol, 21, 24
- SNMP, *siehe* Simple Network Management Protocol
- SONET, *siehe* Synchronous Optical Network
- Statistik, 12
  - Standard Error in the Mean, 14
  - statistische Maxime, 13
  - Einfaktormethode, 8
  - Erwartungswert, 12

- Freiheitsgrad, [15](#), [37](#), [81](#)
- Mittelwert, [12](#), [36](#), [41](#), [43](#), [50](#), [81](#)
- Normalverteilung, [35](#), [50](#)
- Standardabweichung, [13](#), [36](#), [50](#)
- statistische Analyse, [28](#)
- statistische Sicherheit, [15](#), [84](#)
- statistische Versuchsmethodik, [8](#), [49](#)
- statistische Versuchsplanung, [13](#), [50](#)
- statistischen Auswertung, [39](#)
- Varianz, [13](#), [36](#), [50](#)
- Stichprobe, *siehe* Messreihe
- Störgröße, [10](#), [25](#), [29](#), [50](#)
- Stufen, [10](#), [34](#)
- Stufenkombination, *siehe* Stufen
- Synchronous Digital Hierarchy, [3](#)
- Synchronous Optical Network, [3](#)
  
- TCP, *siehe* Transport Control Protocol
- Testbed, [19](#)
  - Potentiometer, [21](#), [26](#), [31](#)
  - Rechner, [19](#), [30](#)
  - Switch, [21](#), [30](#)
  - Tool, [23](#), [51](#)
  - Verkabelung, [21](#), [30](#)
- Tupel, [43](#)
  
- UDP, *siehe* User Datagram Protocol
- User Datagram Protocol, [26](#), [29](#), [50](#)
  
- Verlust
  - Frameverlust, [28](#), [40](#), [47](#)
  - Paketverlust, [28](#), [31](#), [40](#), [47](#)
- Versuchsplan, [10](#), *siehe* Faktorieller Versuchsplan,  
[33](#), [39](#), [43](#)
  - integrierter Versuchsplan, [84](#)
- Versuchspunkt, [11](#), [35](#), [39](#), [50](#)
- Versuchsraum, [11](#)
- Versuchsumfang, *siehe* Faktorieller Versuchsplan
- Vertrauensintervall, *siehe* Konfidenzintervall
  
- Widerstand, *siehe* Potentiometer, [39](#), [46](#)
- Worst Case, [48](#)
  
- X-WiN, *siehe* X-Wissenschaftsnetz
- X-Wissenschaftsnetz, [3](#)
  
- Zentrale Grenzwertsatz, [35](#)
- Zielgröße, [11](#), [27](#), [31](#), [32](#), [52](#)
- Zustand
  - administrativer, [4](#)
  - Dienstgütezustand, [6](#), [38](#), [48](#)
  - operationaler, [4](#)
  - Qualitätsinformation, [5](#)
  - Qualitätsaussage, [9](#), [49](#), [51](#)
  - Statusinformation, [4](#), [49](#)