

Verlässlichkeitsanalyse paketvermittelnder Netzwerke mittels diskreter ereignisorientierter Simulation

**zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften**

**der Fakultät für Informatik
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)**

genehmigte

Dissertation

von

Andreas Schäfer

aus Reichelsheim im Odenwald

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Juli 2004
Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. W. Görke
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. W. Stucky

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist zwischen September 2000 und Juli 2004 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für fehlertolerante Rechensysteme des Instituts für Rechnerentwurf und Fehlertoleranz der Universität Karlsruhe entstanden.

Den inhaltlichen Anstoß für die Arbeit erhielt ich durch das Papier mit dem Titel „*Where Mathematics meets the Internet*“ [Wil98], das ich allen Mathematik- und Internet-Interessierten als kleine Bettlektüre empfehlen kann.

Bei der Ausarbeitung dieser Doktorarbeit wurde ich von einer ganzen Reihe von Menschen unterstützt, die mir in organisatorischer, fachlicher und auch menschlicher Hinsicht unter die Arme griffen und ohne die das Resultat meiner Forschungsarbeit nicht möglich gewesen wäre. Diesen Menschen gilt mein herzlicher Dank.

An erster Stelle möchte ich hierbei meinen Betreuer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Winfried Görke, nennen, der mir stets ausgiebigen Freiraum zur Entfaltung meiner Ideen ließ, dessen Optimismus mich auch in schwierigen Phasen meiner Tätigkeit begleitete und der es mir ermöglichte, meinen durch das Mathematik-Studium geprägten fachlichen Horizont durch die vertiefte Beschäftigung mit Kommunikationssystemen erheblich zu erweitern.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Wolffried Stucky, der sich bereit erklärte, das Korreferat zu übernehmen und der eine zügige Abwicklung des Promotionsverfahrens ermöglichte.

Viele interessante Anregungen und technische Unterstützung erhielt ich durch die Diskussionen mit meinen Lehrstuhl-Kollegen Sebastian Wilhelmi, Manfred Männle, Felix Holderied, Mark Sujan und Rainer Gmehlich, die ein angenehmes wissenschaftliches Umfeld bildeten, in dem meine Arbeit gedeihen konnte.

Zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die von Kindesbeinen an bereit waren, in meine Ausbildung zu investieren und die mich stets dazu motivierten, meine Doktorarbeit abzuschließen.

Karlsruhe, im August 2004

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt den Einsatz von Methoden der diskreten ereignisorientierten Simulation zur Verlässlichkeitsanalyse paketvermittelnder Netzwerke.

Der Vorgang der Verlässlichkeitsanalyse wird dabei unterteilt in die *Leistungsanalyse* und die *statistische Analyse*. Die Leistungsanalyse befasst sich mit der Bewertung der im Rahmen von Dienstleistungsvereinbarungen getroffenen Zusicherungen in Situationen, in denen Netzwerk-Komponenten durch Ausfälle beeinträchtigt sind. Die Netzwerk-Architektur wird dabei in die Determinanten Topologie, Hardware, Software und Humanware untergliedert, die zusammen mit den Umgebungseinflüssen Lastprofil und Ausfallprofil die Grundlage für die simulative Leistungsbewertung des Netzwerkes bilden. Die statistische Analyse beschäftigt sich mit der Zusammenführung von simulativ untersuchten Ausfallszenarien zu einer statistischen Verlässlichkeitsaussage.

Innerhalb der Leistungsanalyse wird im Rahmen der Arbeit vertieft auf die Bedeutung langzeitabhängiger, selbstähnlicher Verkehrsströme für die Verlässlichkeit paketvermittelnder Netzwerke eingegangen und damit eine Verbindung zwischen den Forschungsgebieten *Verlässlichkeitstheorie für Netzwerke* und *Traffic Engineering* hergestellt. Bei der hier durchgeführten simulativen Untersuchung von langzeitabhängigen Verkehrsströmen in Ausfallsituationen werden die Autokorrelation und die skalierten Varianzen analysiert, die ein wesentliches Bindeglied zwischen den Paketprozessen auf Verbindungsleitungen und den für die Leistungsanalyse relevanten Zielgrößen verfügbare Bandbreite, Paketlaufzeit und Paketverlustrate darstellen. Bei der Modellierung langzeitabhängiger Verkehrsströme wird der Netzwerkarchitektur-unabhängige Einflussfaktor der heavy-tailed Eigenschaft von Verbindungsduern auf Verbindungsebene nachgebildet.

Wesentliche Erkenntnisse der Simulationsversuche betreffen die Veränderung der zweiten Momente auf Restorationspfaden bei Ausfalleintritt, die Minderung der Variabilität von Verkehrsströmen durch Herabsetzung der Datenrate von Verbindungen, den Multiplexing-Verlust an Variabilität durch Überlagerung aggregierter Verkehrsströme und die Reduktion der Langzeitabhängigkeit durch Unterteilung von Verbindungen und disjunktes Mehrpfad-Routing.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Einleitung | 1 |
| I Grundlagen | 9 |
| 2 Netzwerke | 11 |
| 2.1 Klassifikation von Netzwerken | 11 |
| 2.2 Protokoll-Schichten | 13 |
| 2.3 Bezug zur eigenen Arbeit | 15 |
| 3 Verlässlichkeit in Netzwerken | 17 |
| 3.1 Grundbegriffe | 17 |
| 3.1.1 Fehler, Fehlzustände und Ausfälle | 18 |
| 3.1.2 Zeitangaben zur Beschreibung von Ausfällen | 19 |
| 3.2 Verlässlichkeitstechniken für Netzwerke | 20 |
| 3.2.1 Entwurf verlässlicher Netzwerke | 20 |
| 3.2.2 Techniken zur Steigerung der Verlässlichkeit | 21 |
| 3.3 Verlässlichkeit und Dienstgüte | 23 |
| 3.3.1 Dienstgüte in ATM-Netzwerken | 25 |
| 3.3.2 Dienstgüte in IP-basierten Netzwerken | 25 |
| 3.4 Bewertung der Verlässlichkeit von Netzwerken | 27 |
| 3.4.1 Ebenen der Verlässlichkeitsbewertung | 28 |
| 3.4.2 Metriken | 29 |
| 3.4.3 Durchführung der Bewertung | 33 |
| 4 Existierende Modellierungstechniken zur Verlässlichkeitsanalyse von Netzwerken | 35 |
| 4.1 Modellierung von Systemen | 35 |
| 4.2 Konnektivitäts-basierte Netzwerk-Zuverlässigkeitsanalyse | 37 |
| 4.3 Netzwerkflussmodelle | 41 |
| 4.4 Petri-Netz-Modelle | 41 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.5 | Warteschlangenmodelle und Warteschlangennetze | 43 |
| 4.6 | Software-Zuverlässigkeitsmodelle | 44 |
| 4.7 | Simulationsmodelle | 46 |
| 4.7.1 | Diskrete ereignisorientierte Simulation (DES) | 47 |
| 4.7.2 | Durchführung von Simulationsstudien | 48 |
| 4.8 | Kritik der bestehenden Modellierungstechnik | 48 |
| II | Durchführung | 51 |
| 5 | Modellierungsansatz zur Verlässlichkeitsanalyse paketvermittelnder Netzwerke | 53 |
| 5.1 | Determinanten der Netzwerk-Verlässlichkeit | 53 |
| 5.2 | Topologische Struktur des Netzwerkes | 55 |
| 5.3 | Funktionalität der Netzkomponenten | 57 |
| 5.3.1 | Modell für Verbindungsleitungen | 57 |
| 5.3.2 | Knotenmodell | 58 |
| 5.3.3 | Dienstgüteunterstützung | 60 |
| 5.3.4 | Warteschlangen-Management und Bedienung | 60 |
| 5.3.5 | Routing | 63 |
| 5.3.6 | Ausfallbehandlung | 67 |
| 5.4 | Verkehrsmodellierung in Kommunikationsnetzen | 68 |
| 5.4.1 | Generierung von Verkehr mit konstanter Bandbreite | 69 |
| 5.4.2 | Verkehrsmodell für Sprachverkehr | 70 |
| 5.4.3 | Selbstähnlichkeit und Langzeitabhängigkeit | 71 |
| | Erklärungen für Selbstähnlichkeit in paketvermittelnden Netzwerken | 74 |
| 5.4.4 | Verkehrsmodell für Datenverkehr | 77 |
| | Generierung selbstähnlicher Verkehrsströme | 79 |
| | Eigenschaften der Überlagerung von ON-OFF-Prozessen | 82 |
| | Eigenschaften des infinite source heavy-tailed Modells | 83 |
| 5.5 | Lastprofil | 84 |
| 5.6 | Ausfallprofil | 86 |
| | Empirische Ausfallerhebung im BelWue | 87 |
| | Modellierung von Ausfällen | 88 |

| | |
|---|------------|
| 6 Übergang vom Modell zur Simulation | 91 |
| 6.1 Verifikation der Simulationsumgebung | 91 |
| 6.2 Durchführung von Versuchsreihen | 91 |
| 6.2.1 Spreizung des Simulationsversuches und Verdichtung | 92 |
| 6.2.2 Durchführung der Simulation | 93 |
| 6.3 Auswertung der Simulationsergebnisse | 95 |
| 6.3.1 Abgrenzung transienter und stationärer Systemzustände | 95 |
| 6.3.2 Berechnung der Autokorrelation und der skalierten Varianzen | 96 |
| 6.3.3 Wahl der Abtastfrequenz und Verdünnung von Messreihen | 96 |
| 6.3.4 Segmentierung der skalierten Varianzen | 99 |
| 6.3.5 Messung der Variabilitätsänderung | 101 |
| III Erkenntnisse und Schlussfolgerungen | 103 |
| 7 Simulationsergebnisse | 105 |
| 7.1 Auswahl der untersuchten Topologien | 105 |
| 7.2 Vergleich der Verkehrsgeneratoren ISE, ARH, ISHT und FGN | 108 |
| 7.3 Veränderung der ersten Momente von Verkehrsströmen durch Ausfalleintritt | 110 |
| 7.4 Veränderung der zweiten Momente von Verkehrsströmen durch Ausfalleintritt | 115 |
| 7.4.1 Betrachtung über die gesamte Versuchsdauer | 116 |
| 7.4.2 Getrennte Betrachtung der Perioden vor dem Ausfall und nach dem Ausfall | 119 |
| 7.4.3 Verkehrsverhalten bei hochfrequenten Ausfallzyklen | 123 |
| 7.5 Variabilitätsanalyse bei hoher Last | 126 |
| 7.6 Variation der Verteilung der Dauern der ON-Perioden | 129 |
| 7.7 Verkehrsverhalten bei unterschiedlichen Bedienstrategien | 131 |
| 7.8 Reduktion der Langzeitabhängigkeit | 133 |
| 7.9 Weiterführende Untersuchungen | 135 |
| 7.9.1 Routing-Verfahren | 135 |
| 7.9.2 Paketlaufzeit | 135 |
| 7.9.3 Erweiterungen des Verkehrsmodells | 140 |
| Heterogene Netzwerk-Umgebungen und heterogene Verkehrslast | 140 |
| Variation der Datenrate von ON-Perioden | 140 |
| Closed loop Untersuchungen | 141 |
| 7.10 Erkenntnisse für die Dimensionierung fehlertoleranter paketvermittelnder Netzwerke und die Konzeption fehlertoleranter Netzwerk-Protokolle | 143 |

| | |
|---|------------|
| 8 Einbettung von Simulationsversuchen in die Verlässlichkeitsbewertung | 145 |
| 8.1 Behandlung des Zustandsraumes möglicher Ausfälle | 146 |
| 8.2 Eine Szenario-basierte Verlässlichkeitsmetrik | 147 |
| 8.3 Bewertungsbeispiel | 149 |
| 9 Zusammenfassung und Ausblick | 153 |
| | |
| IV Anhang | 155 |
| | |
| A Aufbau der eigenen Simulationsumgebung mit OMNET++ | 157 |
| A.1 Modulstruktur | 157 |
| A.2 Adressierungsschema | 159 |
| A.3 Generierung des Netzwerkes | 160 |
| A.3.1 Beschreibung der Netzwerk-Topologie | 161 |
| A.3.2 Generierung des Netzwerkes zur Übersetzungszeit | 162 |
| A.3.3 Generierung des Netzwerkes zur Laufzeit | 162 |
| A.4 Signalisierungsabläufe | 163 |
| A.5 Komplexitätsabschätzung | 164 |
| A.6 Praktische Erfahrungen beim Erstellen des Simulationswerkzeuges | 166 |
| | |
| B Stochastische Hilfsmittel | 169 |
| B.1 Kenngrößen von Zufallsvariablen und Zeitreihen | 169 |
| B.1.1 Kenngrößen von Zufallsvariablen | 169 |
| B.1.2 Kenngrößen von Zeitreihen | 169 |
| B.2 Verteilungen von Zufallsgrößen | 171 |
| B.2.1 Die heavy-tailed-Eigenschaft | 171 |
| B.2.2 Pareto-Verteilungen | 171 |
| B.3 Selbstähnliche Zeitreihen und selbstähnliche stochastische Prozesse | 173 |
| B.3.1 Selbstähnliche stochastische Prozesse | 173 |
| B.3.2 Selbstähnliche Zeitreihen | 173 |
| B.3.3 Langzeitabhängigkeit und Kurzzeitabhängigkeit | 174 |
| B.3.4 Eigenschaften selbstähnlicher Zeitreihen | 175 |
| B.4 Verkehrsmodelle für paketvermittelnde Netzwerke | 175 |
| Momente des Zuwachsprozesses für das ISHV-Modell | 175 |
| B.4.1 Grenzbetrachtungen für Verkehrsmodelle | 177 |
| Grenzbetrachtung für das ARH-Modell | 177 |
| Grenzbetrachtung für das ISH-Modell | 178 |

| | |
|--|------------|
| B.4.2 Erläuterungen zu selbstähnlichem Verkehr | 179 |
| Zusammenhang zwischen selbstähnlichen stochastischen Prozessen und selbst- ähnlichen Zeitreihen | 179 |
| Fraktale Brownsche Bewegung | 180 |
| Interpretation der Erklärungen für Selbstähnlichkeit | 180 |
| B.5 Effektive Bandbreite | 180 |
| C Verifikation der Simulationsumgebung | 183 |
| C.1 Verkehrsgeneratoren | 183 |
| C.2 Netzwerksimulation | 188 |
| Symbolverzeichnis | 191 |
| Abkürzungsverzeichnis | 195 |
| Literaturverzeichnis | 197 |
| Index | 207 |

Kapitel 1

Einleitung

Der weltweite Siegeszug des heutigen Internet als Informationsquelle für private und geschäftliche Benutzer ist größtenteils auf die Entstehung des World Wide Web (WWW) zurückzuführen. Damit verbunden ist die Möglichkeit, Informationen für breite Schichten der Bevölkerung in graphisch ansprechender Form zugänglich zu machen, ohne dass für den Zugriff eine fundierte technische Ausbildung notwendig ist.

Sieht man von den technischen Grundlagen, die das WWW ermöglicht haben, einmal ab, so kann man darüber hinaus die These vertreten, dass der unbeschränkte Wissensdurst und das Kommunikationsbedürfnis - eines der elementaren Bedürfnisse des Menschen - als starke Katalysatoren die technische Entwicklung einer weltumspannenden Kommunikationsinfrastruktur mit getragen haben und dass die technische Errungenschaft des Internet nur als Ausdruck der geänderten Bedürfnisse des Menschen in einer sich entwickelnden Informationsgesellschaft zu interpretieren ist, die früher oder später hätte kommen müssen.

Das Wachstum des Internet ist ungebrochen. Bei den *Internet-Anwendungen* macht die Dynamik der Entwicklung von Anwendungen, die das Internet als Übertragungsmedium nutzen, eine langfristig angelegte Prognose über dessen Nutzung schwierig. Nach dem heutigen Stand ist für die nächsten Jahre mit weiterem kontinuierlichem Wachstum beim Bedarf und bei der Verfügbarkeit von Bandbreite zu rechnen. Haupttriebfedern für mehr Bandbreite sind die im privaten Bereich zu erwartende zunehmende Übertragung multimedialer Inhalte, wie z. B. Videos, und das Wachstum im Bereich elektronischen Handels. Im Bereich der *Internet-Infrastruktur* dominieren sowohl wirtschaftlich als auch technologisch die Fortschritte im Bereich der drahtlosen Internetkommunikation und im Bereich der optischen Datenübertragung (insbesondere optische Vermittlungseinrichtungen) die aktuellen Entwicklungen [DRC00, Qia99].

Betrachtet man das Internet unter dem Aspekt des Zusammenwachsens von Sprach- und Datenkommunikationsnetzen, so steht bei der Vermittlungstechnik ein Paradigmenwechsel bevor bzw. ist bereits im Gange. Dieser bringt in der Sprachtelefonie netzübergreifend einen Übergang von der Leitungsvermittlung zur Paketvermittlung mit sich. Dabei entstehen dienstintegrierende Netze, welche in der Lage sind, unterschiedliche Dienstqualitäts-Anforderungen [quality of service requirements] und dabei insbesondere so genannte weiche oder *elastische* Anforderungen umzusetzen. Als am weitesten entwickelte Technologie kann in diesem Zusammenhang ATM eingestuft werden (vgl. z. B. [Sai94]). Ob und wann bei der Übertragung von Sprache ein vollständiger Wandel von der Leitungsvermittlung zur Paketvermittlung statt findet, wird neben der technischen Reife der bereitstehenden Lösungen von wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängen. Die Trägheit des Kunden mit seiner bestehenden Sprachkommunikationstechnik und dem für eine Umrüstung verbundenen Aufwand ist dabei nicht zu unterschätzen. Dennoch ist zu vermuten, dass die ständig statt findende Erneuerung von Vermittlungstechnik durch die Netzbetreiber mit dem Ziel der Übertragung höherer Bandbreiten dazu führen wird, dass Sprache und

Daten eines Tages netzweit über eine gemeinsame Infrastruktur übertragen werden - ließen sich doch die Kosten für die Wartung und Instandhaltung einer einzigen Kommunikationsinfrastruktur im Gegensatz zum Status Quo drastisch senken.

Verlässlichkeit in paketvermittelnden Netzwerken

Wesentlicher Hinderungsgrund für Netz- und Telefonanlagenbetreiber, paketvermittelnde Lösungen netzübergreifend für die Sprachtelefonie zu nutzen oder einzuführen, ist neben den hohen Umstellungs-kosten mangelnde Zuverlässigkeit und Verlässlichkeit [Ben00, Can01, Ben02].

Zielvorgabe und Voraussetzung für eine Migration aus Sicht der Netzbetreiber ist dabei, den Grad der Verlässlichkeit leitungsvermittelnder Sprachnetze auch für integrierte paketvermittelnde Architekturen zu erreichen.

Der Begriff *Zuverlässigkeit* [reliability] beschreibt die Fähigkeit eines Systems, eine spezifizierte Leistung über einen bestimmten Zeitraum hinweg ohne Unterbrechung erbringen zu können. Unter dem Begriff *Verfügbarkeit* versteht man das Qualitätsmerkmal eines Systems, welches durch die Wahrscheinlichkeit, dass ein System eine spezifizierte Leistung zu einem bestimmten Zeitpunkt erfüllen kann, gegeben ist. Zuverlässigkeit [reliability], Verfügbarkeit [availability], Sicherheit [safety] und Vertraulichkeit [security] stellen Attribute der *Verlässlichkeit* [dependability] eines Systems dar (vgl. [Lap92] und Kapitel 3). Ziel der klassischen Verlässlichkeitsanalyse ist es, aus den Verlässlichkeitseigenschaften der Komponenten eines Systems Aussagen über die Verlässlichkeit des Gesamtsystems abzuleiten und damit Anhaltspunkte für die Konzeption und dabei insbesondere für die Dimensionierung von Systemen zu gewinnen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich auf den Zuverlässigkeitsspekt, den Verfügbarkeitsspekt und die verfügbarkeitsrelevanten Aspekte der Systemvertraulichkeit eingegangen. Gefahren für die Gesundheit des Menschen und Techniken zur Abwehr von Attacken auf die System-sicherheit spielen hingegen keine Rolle.

Die Verlässlichkeit in diesem Sinne wird im Wesentlichen durch Fehler und Ausfälle einzelner System-Komponenten oder ganzer Teilsysteme beeinflusst. Im Bereich der Zuverlässigkeits-Modellbildung wird dabei im Allgemeinen unterschieden zwischen *Hardware-Fehlern* und *Software-Fehlern*: Hardware-Fehler [Bir88] sind in der Regel auf alterungsbedingten Verschleiß zurückzuführen. Bei Software-Fehlern [Mus87] handelt es sich hingegen stets um *Entwurfsfehler*, also Fehler, die bereits vor der Inbetriebnahme des Systems vorhanden sind. Daneben finden in interdisziplinären Zuverlässigkeitsstudien in zunehmendem Maße durch menschliches Fehlverhalten hervorgerufene Ausfälle Beachtung (vgl. [Lev95], ch. 14). Eine weitere Klasse von Bedrohungen der Verlässlichkeit sind *bewusste Angriffe* mit dem Ziel der Störung des Netzbetriebes.

Bei Verlässlichkeitsanalysen von Netzwerken treten im Vergleich mit Analysen anderer technischer Systeme spezielle Randbedingungen auf, die eine an den herkömmlichen Methoden der Verlässlichkeits-analyse orientierte Vorgehensweise erschweren oder einer besonderen Behandlung bedürfen. Dazu zählen:

- *Hohe Komplexität (Hardware und Software)*

Netzwerk-Software und -Hardware weisen ein hohes Maß an Komplexität auf. Die Auswirkungen der Interaktionen mehrerer Netzwerk-Protokolle auf verschiedenen Ebenen eines Protokoll-Stapels sind schwer zu analysieren. Darüber hinaus muss die Aussagekraft von Rückschlüssen, die auf detaillierten Nachbildungen im Modell basieren, wegen der genannten Interaktions-Komplexität als zweifelhaft eingestuft werden. In diesem Zusammenhang tritt die Frage auf, ob ein einfaches Modell eines Netzwerkes, welches wenige zentrale Komponenten der Netzwerk-Architektur wie

z. B. Topologie, Verkehrsfluss und Ausfallverhalten nachbildet, zur Analyse von Verlässlichkeitskenngrößen nicht besser geeignet ist als eine detailgetreue Nachbildung des Protokollstapels inklusive der Leistungscharakteristika der Netzwerk-Komponenten.

Im Hinblick auf die Modellierung von Datenströmen in paketvermittelnden Netzwerken ist insbesondere im Rahmen von Simulationsstudien eine Vereinfachung bzw. Abstraktion anzustreben, da sich statistisch fundierte Studien mit ausgedehntem Detaillierungsgrad wegen des hohen Rechenzeitbedarfes nicht realisieren lassen. Für die Abstraktion sind *Invariante*, d. h. Phänomene, die unabhängig von der spezifischen Ausgestaltung eines Protokollstapels und der Netzwerk-Hardware in Erscheinung treten, von besonderem Interesse. Forschungsergebnisse des letzten Jahrzehnts untermauern die These, dass es sich bei der *Selbstähnlichkeit* und der *Langzeitabhängigkeit* von Datenströmen in paketvermittelnden Netzwerken (s. u.) um ein solches Phänomen handelt (vgl. dazu auch Abschnitt 5.4).

- **Seltenheit und Schwere von Ausfällen (Ausfallprofil)**

Eine der Hauptschwierigkeiten von Verlässlichkeitsanalysen, welche auch bei der Netzwerk-Verlässlichkeitsanalyse auftritt, ist die *Seltenheit des Auftretens von Ausfällen*. Diese gehen jedoch in der Regel mit einem hohen materiellen Schaden einher, selbst wenn nur eine kurzzeitige Störung des Netzbetriebes vorliegt. Die Analyse empirischen Datenmaterials über Ausfälle in Netzwerken ist wegen der geringen Menge an Daten in der Regel allenfalls für Einzelanalysen geeignet, die darauf abzielen, die Ursachen für Störungen aufzudecken und Fehler in der Netzwerk-Architektur zu beheben. Für statistisch fundierte Aussagen ist die Menge des empirisch verwertbaren Materials über Störungen und Ausfälle meist zu gering. Eine weitere Schwierigkeit liegt in der hohen Erneuerungsrate der technischen Infrastruktur. Verlässlichkeitsaussagen auf der Basis langfristig angelegerter Studien sind oft alleine deshalb nicht möglich, weil sich die Netzwerk-Infrastruktur und damit die Verlässlichkeitseigenschaften innerhalb kurzer Produktzyklen ändern.

Da eine gezielte Herbeiführung von Ausfällen und Störungen (physikalische Analyse) zum Zweck der Verlässlichkeitsanalyse in der Praxis nur mit extrem hohem Aufwand zu realisieren ist, finden modellbasierte analytische und simulative Verfahren zur *Schätzung* der Verlässlichkeit in verstärktem Maße Anwendung.

- **Inhärente topologische Redundanz (Topologie)**

Betrachtet man die topologische Struktur eines Netzwerkes, so treten Redundanzen in Erscheinung, sobald die Topologie eine Obermenge eines Baumes darstellt. Sieht man einmal von lokalen Netzen ab, in denen auch Busstrukturen anzutreffen sind, so besitzen die meisten größeren realen Netzwerk-Architekturen im MAN- und WAN-Bereich Redundanzen der genannten Art, z. B. in Form einer Ringstruktur wie beim *Self-Healing Ring* [Kaw99]. Zur Analyse der Leistungs- und Verlässlichkeitseigenschaften einfacher und symmetrischer topologischer Strukturen wie Ringen oder Sternen können analytische Verfahren eingesetzt werden. Bei heterogenen und größeren Topologien steigt der kombinatorische Aufwand jedoch schnell an und führt zu unübersichtlichen Formelausdrücken, weswegen dann eine simulative Analyse zu bevorzugen ist.

- **Dienstabhängigkeit der Verlässlichkeit**

Die Bewertung der Verlässlichkeit eines paketvermittelnden Netzwerkes ist in hohem Maße dienstabhängig. Während der kurzzeitige Zusammenbruch der Verbindung zu einem Mail-Server und eine damit verbundene verspätete Auslieferung einer elektronischen Nachricht vom Benutzer eventuell gar nicht als Beeinträchtigung empfunden wird, werden Verzögerungen oder Unterbrechungen bei der Sprachtelefonie in paketvermittelnden Netzwerken unmittelbar als Verletzung der Verlässlichkeit angesehen.

Stochastische Modelle zur Verlässlichkeitsanalyse paketvermittelnder Netzwerke

Wesentliches Hilfsmittel der Zuverlässigkeit- und Verfügbarkeitsanalyse komplexer Systeme ist die *Stochastik*. Im Bereich der Netzwerkverlässlichkeitsanalyse werden stochastische Methoden in verschiedenen Bereichen eingesetzt. Drei Haupteinsatzgebiete sind die *Modellierung von Ausfällen von Netzwerk-Komponenten*, die *Modellierung von Netzwerk-Verkehr* und die *Modellierung der topologischen Struktur eines Netzwerkes*.

- Im Bereich der Ausfallmodellierung werden die Zeitdauern ausfallfreien Betriebs und die Reparaturdauern von Systemkomponenten durch Zufallsvariablen beschrieben. Die Techniken, die dabei für die Modellierung von Hardware- und Software-Ausfällen eingesetzt werden, sind ähnlich. Am weitesten verbreitet ist der Einsatz von Exponentialverteilungen und verwandten Verteilungstypen zur Modellierung von Betriebs- und Reparaturdauern.
- Zur Modellierung von Verkehr in Kommunikationsnetzen werden z. B. Poisson-Prozess-basierte Verfahren, modulierte Poisson-Verfahren, Erneuerungsprozess-basierte Verfahren, autoregressive Verfahren, Fluid-Verfahren und Verfahren zur Generierung selbstähnlichen Verkehrs verwendet (vgl. Abschnitt 5.4 und [Fro94]).
- Verfahren zur Modellierung topologischer Internet-Strukturen analysieren Topologie-Eigenschaften des realen Internet wie Subnetz-Größe, Anzahl der verbundenen Subnetze, Durchmesser und Grad der Konnektivität eines Subnetzes und generieren an Hand dieser Angaben Topologien, die dem Internet ähnlich sind [Zeg96]. Dabei wird im Allgemeinen unterschieden zwischen *Transit-Netzwerken* [transit networks] und *Zugangs-Netzwerken* [stub networks] [Zeg96]. Dies führt bei der Erzeugung synthetischer Internet-Strukturen zu einem zweistufigen Prozess. Dabei wird in der ersten Stufe die Topologie der Subnetze untereinander (*Grob-Topologie*) generiert. Der zweite Schritt enthält die Erzeugung der *Fein-Topologien*, d.h. der Topologien innerhalb der Subnetze. Interessant sind in diesem Zusammenhang neuere Untersuchungen, welche belegen, dass sich die Verteilungen der Verbindungsgrade von Knoten im Internet durch heavy-tailed-Verteilungen (vgl. Anhang B.2.1 und [Wil02a]) beschreiben lassen.

Bedeutung selbstähnlicher Verkehrsströme in paketvermittelnden Netzwerken

Empirische Untersuchungen von Verkehrsströmen in paketvermittelnden Netzwerken untermauern, dass die aus dem Umfeld der Poisson-Prozesse stammenden Modelle für leitungsvermittelnde Telefonnetze die Verkehrscharakteristika in paketvermittelnden Netzwerken nicht angemessen beschreiben [Pax95b, Lel94, Wil97, Err02, Wil01]. Verkehrsströme in Datennetzen zeigen Eigenschaften wie Selbstähnlichkeit und Langzeitabhängigkeit, die bei reinem Sprachverkehr nicht auftreten. Die Bedeutung der Entdeckung selbstähnlicher, langzeitabhängiger Verkehrsmuster liegt in den Konsequenzen, die sich bezüglich der Variabilitäts-Eigenschaften [*burstiness*] über Zeiträume verschiedener Größenordnung ergeben: So nimmt die Variabilität selbstähnlichen Verkehrs mit zunehmender Anzahl überlagerter Verkehrsströme im Vergleich mit Poisson-ähnlichen Verkehrsströmen viel langsamer ab. Hauptkonsequenz langzeitabhängigen Verkehrsverhaltens ist eine starke Zunahme der Überlaufwahrscheinlichkeiten für die Puffer der Knoten eines Netzwerkes, d. h. dass Schwankungen des Paket-Ankunftsprozesses durch die Knotenpuffer weniger gut aufgefangen werden können als dies bei kurzzeitabhängigem Verkehr der Fall ist [Tsy97].

Die Bedeutung langzeitabhängigen Verkehrsverhaltens liegt in der Tatsache, dass das Phänomen sowohl in lokalen Netzwerken als auch in Weitverkehrsnetzen festgestellt werden kann. Empirische Untersuchungen untermauern die These, dass die Hauptursache für die Langzeitabhängigkeit nicht in der Protokoll- und Hardware-Architektur liegt, sondern von den empirischen Verteilungen der Größen und Übertragungsdauern von Informationen (Dateien, Videos, WWW-Seiten, etc.), die über Datennetze übertragen werden, herrührt [Taq97]. Die so genannte *heavy-tailed*-Eigenschaft (vgl. Anhang B.2.1) solcher Verteilungen ist als Ursache für Selbstähnlichkeit inzwischen anerkannt [Err02].

Wesentlich für die Bedeutung selbstähnlicher, langzeitabhängiger Verkehrsströme ist die Erkenntnis, dass es sich hierbei um ein von der Netzwerk-Architektur unabhängiges persistentes Phänomen handelt, welches auch in Zukunft erhalten bleibt¹ und mit dem Ingenieure in der Kommunikationstechnik „leben lernen müssen“.

Ziel und Beitrag der Arbeit

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird die Verlässlichkeit der Transportfunktionalität paketvermittelnder Netzwerke untersucht. Ziel der Arbeit ist es, das Verhalten langzeitabhängiger, selbstähnlicher Verkehrsströme in der Situation des Ausfalls von Netzwerk-Komponenten zu charakterisieren. Dabei wird von der Ausfallursache abstrahiert. Eine solche Charakterisierung dient der Gewinnung von Richtlinien für die Dimensionierung paketvermittelnder Transport-Netzwerke, welche den Ausfall von Netzwerk-Komponenten tolerieren können. Im Mittelpunkt der Betrachtung steht dabei nicht die Gewinnung statistischer Verlässlichkeitsaussagen, sondern die Untersuchung des einzelnen Ausfallereignisses und dabei insbesondere der statistischen Eigenschaften der Verkehrsbewegungen innerhalb des Netzwerkes vor und nach dessen Eintritt. Dabei sind folgende *Basiskenngrößen* relevant (vgl. Abschnitt 3.4.2):

- *Verfügbare Bandbreite*
- *Paketlaufzeit*
- *Paketverlustrate*.

Der Schwerpunkt der mit diskreter ereignisorientierter Simulation durchgeführten Versuche liegt in der Untersuchung der Autokorrelation und der Variabilität von Verkehrsströmen. Zur Bewertung der Variabilität wird ein spezielles Maß, die *skalierten Varianzen*, benutzt (vgl. Abschnitt 6.3.2). Autokorrelation und skalierte Varianzen werden im folgenden als *zweite Momente* bezeichnet. Dabei wird eine in der Praxis nur mit hohem Aufwand zu realisierende Überwachung des Verkehrsflusses auf den Netzwerk-Verbindungsleitungen vorgenommen.

Motivation für die Untersuchung der zweiten Momente ist die Erkenntnis, dass gerade die Autokorrelation und die Varianzen über verschiedene Skalierungsstufen (vgl. Abschnitt 5.4.4) einen entscheidenden und lange vernachlässigten Einfluss auf die Leistungskenngrößen in paketvermittelnden Netzwerken wie Puffer-Überlaufwahrscheinlichkeit und Durchsatz besitzen. Darüber hinaus liefert die Untersuchung der Autokorrelation und der Variabilität im Vergleich zu den als Basiskenngrößen aufgeführten *Punkt-Informationen* ein erheblich detaillierteres Bild des Verkehrsverhaltens in einem Netzwerk.

Das im Rahmen der Arbeit entwickelte und als Grundlage für die Simulation verwendete erweiterte Warteschlangenmodell (vgl. Kapitel 5) gliedert die Einflussfaktoren für die Verlässlichkeit eines paketvermittelnden Netzwerkes in die *Architekturkomponente* und die *Netzwerk-Umgebung* (vgl. Abbildung 1.1 und Abschnitt 5.1). Die Netzwerk-Architektur wird definiert durch die Faktoren

¹Vorausgesetzt wird dabei, dass sich die Empirik der Übertragungsdauern nicht gravierend ändert.

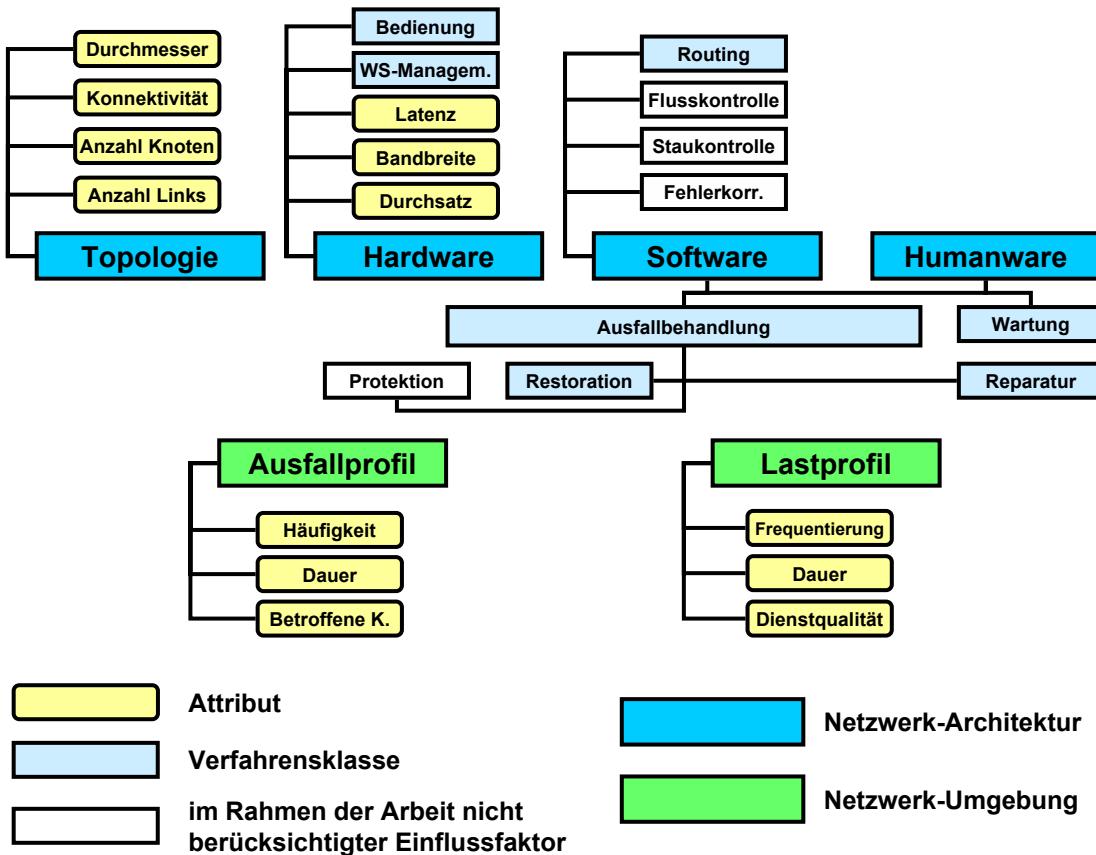


Abbildung 1.1: Einflussfaktoren der Netzwerkverlässlichkeit

- *Topologie*
- *Hardware*
- *Software* und
- *Humanware*,

die Netzwerk-Umgebung setzt sich zusammen aus

- *Lastprofil* und
- *Ausfallprofil*.

Die genannten sechs Einflussfaktoren werden im Folgenden mit *Determinanten der Netzwerkverlässlichkeit* bezeichnet.

Die gemeinsame Untersuchung der Determinanten der Netzwerk-Verlässlichkeit führt zu neuen Erkenntnissen, die sich mit etablierten, in Kapitel 4 aufgeführten Modellierungstechniken nicht gewinnen lassen. Die hohe Komplexität des Modellierungsansatzes macht es unmöglich, analytische Verfahren der Zuverlässigkeitssanalyse anzuwenden. Insbesondere die Einbeziehung von Ausfällen von Netzwerk-Komponenten ist bekanntermaßen mit herkömmlichen Methoden der Warteschlangen-Theorie nicht zu bewerkstelligen (vgl. dazu [Cha96]). Es wird daher auf Verfahren der diskreten ereignisorientierten Simulation zurückgegriffen.

Kerneigenschaften der vorliegenden Modellierung sind

- **Protokoll-Unabhängigkeit**

Anstatt die spezifischen Eigenschaften eines Protokoll-Stapels zu untersuchen, wird eine Protokoll-unabhängige Betrachtung der statistischen Eigenschaften von Verkehrsströmen durchgeführt.

- **Gesamtnetz-Betrachtung**

Die Untersuchung im Simulationsmodell ermöglicht es, die Gesamtheit der in einem paketvermittelnden Netzwerk statt findenden Verkehrsbewegungen zu analysieren. Im Gegensatz dazu steht der weit verbreitete Ansatz der Untersuchung des Verhaltens einzelner Netzwerk-Komponenten wie z. B. Warteschlangen mit selbstähnlichem Eingangsprozess.

- **Verbindungs-Modell**

Innerhalb des vorgestellten Modellierungsansatzes werden *Verbindungen* von Sendern zu Empfängern aufgebaut. Bei dem im Rahmen der Arbeit verwendeten Dienstgüte-Modell wird dabei ein Signalisierungsmechanismus zum Aufbau, Abbau und zum Abbruch von Verbindungen bei Eintritt eines Ausfalls benutzt. Im Unterschied dazu wird in vielen Publikationen bei der Verkehrs-Generierung auf weitaus weniger aufwendige synthetische Verfahren zur Erzeugung aggregierter Verkehrsströme zurückgegriffen, welche auf einzelne Verbindungen verzichten.

- **Grenzbetrachtung bei Verkehrsmodellen**

Die meisten Ansätze zur Ressourcen-Abschätzung in paketvermittelnden Netzwerken mit selbstähnlichem Verkehr wie z. B. bei der Zugangskontrolle [call admission control, CAC] orientieren sich ausschließlich an den durch Grenzbetrachtungen herleitbaren theoretischen Erkenntnissen (vgl. Anhang B.4.1) und nutzen dabei Abschätzungen über die fraktale Brownsche Bewegung [Nor94, Nor95, Nei98, Fon99, Bod00]. Breitbandige Architekturen, in denen große Mengen von Verkehrsbewegungen gemultiplext werden, legen eine solche Vorgehensweise nahe. Reale Verkehrsströme sind jedoch nicht exakt, sondern nur näherungsweise selbstähnlich. Im Einzelfall ist zu entscheiden, ob die Grenzbetrachtung sinnvoll ist. Wie die Simulationsergebnisse in Kapitel 7 zeigen, ergeben sich bei den statistischen Eigenschaften Unterschiede zwischen Verkehrsströmen, die auf Aggregation von Einzelverbindungen basieren, und dem (hier angenäherten) Grenzprozess, der fraktalen Brownschen Bewegung.

Überblick über die Arbeit

Die Arbeit ist in vier Teile gegliedert (vgl. Abbildung 1.2).

Der **Grundlagenteil** führt in Kapitel 2 und in Kapitel 3 die zum Verständnis des Modellierungsgegenstandes erforderliche Terminologie ein. In Kapitel 3 wird darüber hinaus ein systematischer Ansatz zur Durchführung von Verlässlichkeitsanalysen paketvermittelnder Netzwerke erarbeitet. Kapitel 4 geht auf existierende Modellierungstechniken zur Verlässlichkeits- und Zuverlässigkeitssanalyse von Netzwerken wie konnektivitäts-basierte Modelle, Netzwerkflussmodelle, Petri-Netz-Modelle, Software-Zuverlässigkeitssmodelle, Warteschlangenmodelle und Simulationsmodelle ein, beschreibt die Defizite vorhandener Verfahren und motiviert damit den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Modellierungsansatz.

Der **Durchführungsteil** beginnt mit Kapitel 5. Hier wird der Übergang vom realen System zum Netzwerk-Modell dargestellt. Leitfaden hierfür ist die Untergliederung in die *Determinanten* der

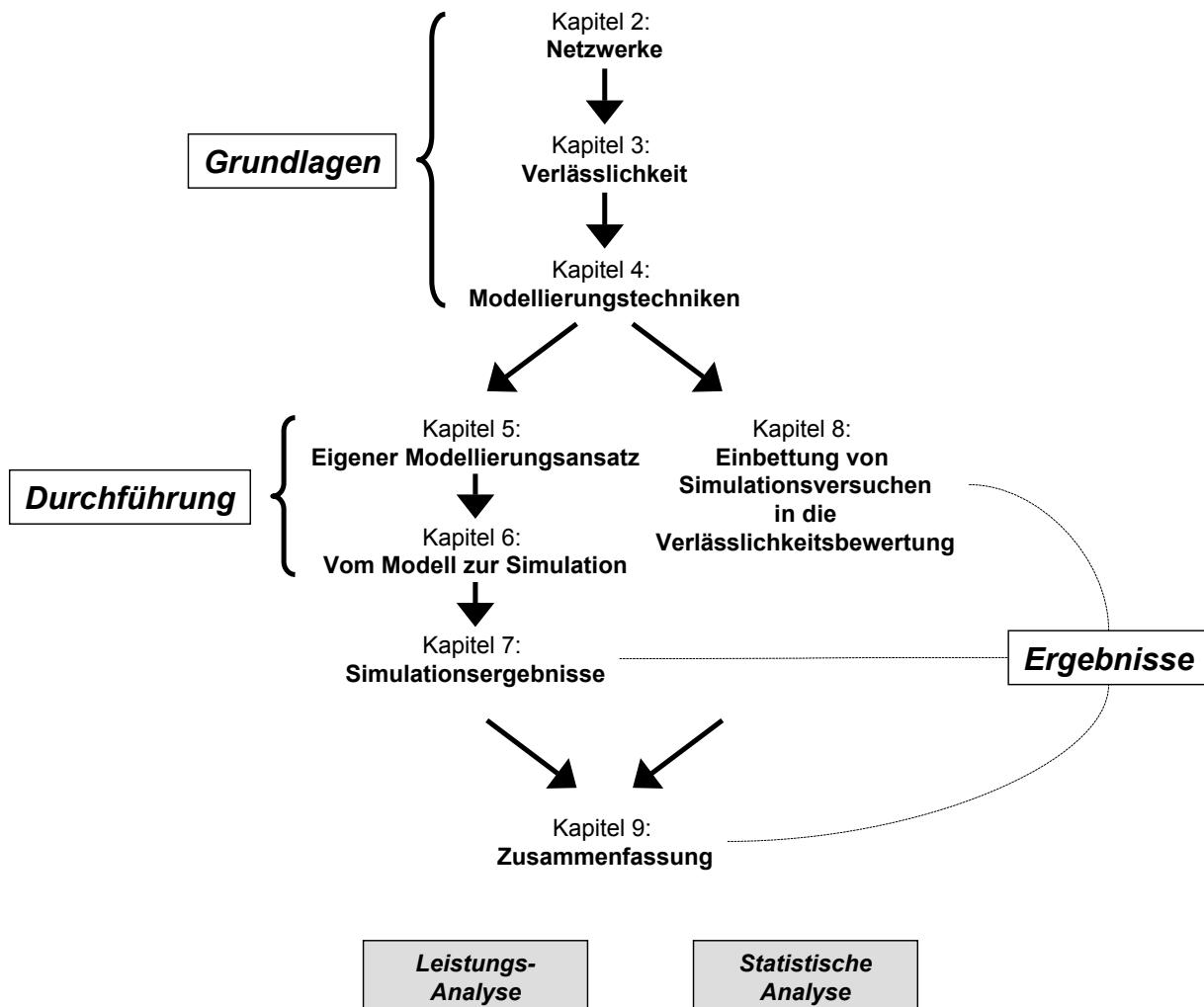


Abbildung 1.2: Überblick über die Arbeit

Netzwerk-Verlässlichkeit. Den Schwerpunkt des Kapitels bildet die Verkehrsmodellierung in Kommunikationsnetzwerken. Kapitel 6 behandelt die wesentlichen Aspekte der Abbildung des im vorausgehenden Kapitel entworfenen konzeptionellen System-Modells auf ein diskretes ereignisorientiertes Simulationsmodell.

Der abschließende **Ergebnisteil** dokumentiert in Kapitel 7 die Resultate der Simulationsversuche und beschreibt die Schlussfolgerungen, die sich aus diesen für die Planung fehlertoleranter paketvermittlender Netzwerke und die Konstruktion fehlertoleranter Protokolle ergeben.

Ansatzpunkte für weitere Forschungstätigkeiten werden gegeben.

Kapitel 8 stellt ein Verfahren zur simulativen Verlässlichkeitsanalyse vor, das auf der Zusammenführung einzelner probabilistisch gewichteter Simulationsversuche basiert.

Den vierten Teil der Arbeit bilden die Anhänge. Anhang A dokumentiert die Implementierung des im Rahmen der Arbeit benutzten Simulationsmodells in der Simulationsumgebung OMNET++, Anhang B stellt die mathematischen Grundlagen der Arbeit zusammen und enthält die Herleitungen für die Momente der gestützten Pareto-Verteilung und der Variabilität für das ISHV-Verkehrsmodell (siehe Abschnitt 5.4.4). Der Anhang schließt mit Teil C, der die Verifikation der Simulationsumgebung behandelt.

Teil I

Grundlagen

Kapitel 2

Netzwerke

In der Kommunikationstechnik umfasst der Begriff *Netzwerk* eine Vielzahl verschiedener Architekturen. Für das Verständnis des in den Kapitel 5 entwickelten Modells ist die Systematisierung des Begriffes hilfreich und die Schaffung einer terminologischen Basis erforderlich. Beide Punkte sind Inhalt dieses Kapitels.

2.1 Klassifikation von Netzwerken

Ein *Netzwerk* beschreibt eine Menge von *Netzwerk-Knoten*, die über *Verbindungswege* miteinander kommunizieren. Die Aufgabe des Netzwerkes besteht darin, den Transport von *Information* zwischen den Knoten zu ermöglichen. Information tritt dabei in verschiedener Gestalt in Erscheinung, wie z. B. Sprache, Bilder, Videos, Web-Seiten, usw.

Netzwerke lassen sich nach folgenden Kriterien klassifizieren:

- **Vermittlungstechnik**

Praktische Relevanz besitzen zwei Vermittlungstechniken (vgl. [Saa94], Kap. 1.5):

- **Leitungsvermittlung**

Charakteristisch für die Leitungsvermittlung ist das Reservieren einer festen Bandbreite zwischen Sender und Empfänger für die Gesamtdauer einer *Verbindung*. Während der Verbindungsauflaufphase wird nach erfolgreicher Prüfung der zur Verfügung stehenden Ressourcen ein fester Pfad zwischen Sender und Empfänger etabliert (*verbindungsorientierter Dienst*). Die Übertragung erfolgt als *synchroner Datenstrom*; dadurch sind Übertragungsverzögerungen nur sehr geringen Schwankungen ausgesetzt und hängen lediglich von signaltechnischen Laufzeiten ab.

Wesentlicher Nachteil der Leitungsvermittlung im Vergleich zur Paketvermittlung ist die ineffiziente Nutzung der Ressource Bandbreite (s. u.).

- **Paketvermittlung**

Das Paradigma der Paketvermittlung basiert auf der Idee, dass Information in kleine Einheiten (Pakete) zerlegt werden kann, die einzeln und unabhängig voneinander vom Sender zum Empfänger (bzw. zu den Empfängern) übertragen werden. Pakete bestehen aus einem *Paket-Kopf*, der *Kontrolldaten* wie z. B. die Quell- oder Zieladresse enthält, und aus den *Nutzdaten*.

Im Unterschied zur Leitungsvermittlung findet in den *vermittelnden Netzknoten* (VNks) eine Zwischenspeicherung von Paketen in Puffern bzw. Warteschlangen statt (*asynchroner*

Datenstrom). Der Fortgang der Weiterleitung von Paketen wird maßgeblich von den *Bediensstrategien* als auch vom *Warteschlangen-Management* beeinflusst (vgl. Abschnitt 5.3). Dabei kann es vorkommen, dass es auf Grund temporärer Lastunterschiede zu starken Laufzeitschwankungen kommt oder dass Pakete wegen Überlastung der Puffer sogar verworfen werden müssen.

Paketvermittlung kann differenziert werden nach *Datagramm-Übertragung* und *virtuellen Verbindungen*.

Bei der Datagramm-Übertragung werden Datenpakete (*Datagramme*) ohne Aufbau einer Verbindung vom Sender los geschickt (*verbindungsloser Träger-Dienst*). Es ist Aufgabe der vermittelnden Netzknoten, die Auslieferung an den Empfänger zu bewerkstelligen. Damit entfällt für die VNKs der Aufwand der Verwaltung von Verbindungsinformationen. Dem gegenüber steht die Notwendigkeit, jedes einzelne Datagramm mit Information über den Empfänger auszustatten. Die dabei verwendeten Zieladressen werden von den VNKs aus den Datagrammen extrahiert, interpretiert und für die Vermittlung genutzt. Dabei ist es möglich, dass Datagramme auf unterschiedlichen Wegen und u. Umst. in einer von der Sende-Reihenfolge abweichenden Reihenfolge vom Sender zum Empfänger gelangen. Es ist Aufgabe der Netzwerk- und Transportprotokolle, die richtige Reihenfolge beim Empfänger wiederherzustellen (vgl. Abschnitt 2.2 und [Com00], Kap. 13).

Bei virtuellen Verbindungen wird wie bei der Leitungsvermittlung vor Beginn der Übertragung ein Pfad zwischen Sender und Empfänger aufgebaut, der für die Gesamtdauer der Übertragung genutzt wird und erhalten bleibt ([Tan96], Kap. 5.1.2). Im Gegensatz zur Datagramm-Übertragung ist es nicht notwendig, jedes Datenpaket mit einer Zieladresse auszustatten. Vielmehr wird beim Verbindungsauflauf eine Verbindungs-Identifikation festgelegt, mittels derer Pakete gekennzeichnet und verschiedene Verbindungen unterschieden werden können.

Die Unterschiede zwischen Leitungsvermittlung und Paketvermittlung resultieren im Wesentlichen dem Anforderungsprofil der während der Entstehungsphase der Vermittlungstechniken dominierenden Dienste. Leitungsvermittelnde Netzwerke finden sich vorwiegend im Bereich der *Telekommunikationsnetzwerke*. Für die dort anfallende Hauptanwendung, die Übertragung von Sprache, ist aufgrund des Echtzeit-Charakters ein kontinuierlicher Datenstrom zwischen Sender und Empfänger mit geringen Laufzeitschwankungen erforderlich.

Die Übertragung von Textdateien, Web-Seiten oder E-Mails, welche ursprünglich die Hauptanwendungen in paketvermittelnden *Datennetzen* darstellten, erfordert diese permanente Bandbreiten-Präsenz nicht. Bei der Übertragung der genannten Inhalte beeinträchtigen Bandbreiten- und Laufzeit-Schwankungen - sofern diese von der Netzwerk-Software in geeigneter Weise aufgefangen werden - die Qualität der übertragenen Information nicht. Wesentlich ist hierbei, dass Information fehlerfrei übertragen wird, zeitliche Restriktionen spielen hingegen eine untergeordnete Rolle.

Einer der Hauptvorteile der Paketvermittlung gegenüber der Leitungsvermittlung liegt in der Möglichkeit, Ressourcen (Bandbreite, Rechenleistung der VNKs) effizienter ausnutzen zu können. Dieser Vorteil macht sich insbesondere in diensteintegrierenden Netzwerken mit großer Benutzeranzahl und einer Vielzahl verschiedenartiger Anwendungen und Dienstqualitätsanforderungen bemerkbar. Erreicht wird die Effizienzsteigerung durch eine ständige Anpassung der Zuteilung von Ressourcen an die sich dynamisch ändernden Ressourcen-Anforderungen der Anwendungen. Insbesondere bei Datenübertragungen wechseln sich Perioden mit hoher („bursts“) und niedriger Bandbreitenförderung in der Regel ab. Unter der Annahme, dass die Anforderungs-Spitzen verschiedener Anwendungen nicht zu gleichen Zeitpunkten auftreten, lässt sich die Ressource Bandbreite durch bedarfsgerechte Zuteilung effizient ausnutzen (*statistisches Multiplexen*, [Sai94]).

- **Sender-Empfänger-Relation**

Die Sender-Empfänger-Relation drückt aus, an wie viele Empfänger die von einem Sender emittierte Information weitergeleitet wird. Dabei wird unterschieden zwischen *Punkt-zu-Punkt-Netzwerken*, *Multicast-Netzwerken* und *Broadcast-Netzwerken*.

In Punkt-zu-Punkt-Netzwerken überträgt ein Sender pro Sendevorgang jeweils nur zu einem einzelnen Empfänger Information. In Multicast-Netzwerken wird Information von einem Sender an mehrere Empfänger gleichzeitig gesendet und in Broadcast-Netzwerken sind alle Endeinrichtungen (s. u.) außer dem Sender Empfänger der vom Sender ausgehenden Information.

- **Physikalische Ausdehnung**

Zur Unterscheidung der Größe paketvermittelnder Netzwerke hat sich eine Unterteilung nach *lokalen Netzwerken* ([local area networks], LANs), *Stadtnetzwerken* ([metropolitain area networks], MANs) und *Weitverkehrsnetzwerken* ([wide area networks], WANs) etabliert [Tan96].

Lokale Netze erstrecken sich über ein oder mehrere Gebäude und dienen im Allgemeinen als *Zugangsnetz* für Netzwerke größerer räumlicher Ausdehnung und bilden gleichzeitig die Schnittstelle zum Benutzer (vgl. Abbildung 2.2). Kennzeichnend für lokale Netze sind in der Regel Ring- oder Bustopologien mit geringer topologischer Redundanz, eine verglichen mit MANs und WANs relativ geringe Bandbreite und die Beschränkung auf die physikalische Schicht und die Sicherungsschicht des OSI-Referenzmodells (vgl. Abschnitt 2.2). Stadtnetzwerke dehnen sich, wie der Name bereits andeutet, im Allgemeinen über den Bereich einer Stadt oder aber z. B. über einen Universitäts-Campus aus. Sie verbinden in der Regel mehrere lokale Netzwerke miteinander und dienen als *Transitnetz* mit Zugang zu Weitverkehrsnetzen.

Weitverkehrsnetze besitzen die geographische Größenordnung eines Landes oder Kontinents. Im Allgemeinen sind Weitverkehrsnetze reine Transit-Netze, d. h. ein WAN besitzt keine direkte Verbindung zu Benutzern oder Applikationsrechnern [hosts], sondern empfängt über eine Zugangsnetz-Transitnetz-Schnittstelle (vgl. Abbildung 2.2) Daten, die durch das WAN geleitet und an ein anderes Transitnetz oder ein anderes Zugangsnetz übertragen werden.

- **Übertragungswege/Übertragungstechnik**

Hierbei muss unterschieden werden zwischen *Festnetzen* und *drahtlosen Netzwerken*. Verbindungswege in Festnetzen enthalten physikalische Verbindungsleitungen, die in der Regel aus Kupfer- oder Glasfaserkabel bestehen.¹ Drahtlose Netzwerke nutzen die sog. *Luftschnittstelle* als Übertragungsmedium. Während sich im Festnetz um Größenordnungen höhere Übertragungsraten und eine viel geringere Fehleranfälligkeit realisieren lassen, liegen die Hauptvorteile drahtloser Netzwerke in der ermöglichten Mobilität und der nicht erforderlichen Notwendigkeit der (physikalischen) Verkabelung des Senders bzw. Empfängers.

2.2 Protokoll-Schichten

Die Vielfalt und Komplexität der Aufgaben, die von der Kommunikations-Software in den vermittelnden Netzknoten vollbracht werden muss, wie

- Verbindungsauf- und abbau (nur bei verbindungsorientierten Diensten)
- Fehlerkorrektur

¹Als Synonym für den Begriff Verbindungsleitung wird in dieser Arbeit die Bezeichnung *Link* verwendet.

- Segmentierung und Reassemblierung
- Flusskontrolle
- Staukontrolle
- Wegewahl [Routing]

verlangt nach Mechanismen der Strukturierung und der Abstraktion. Moderne Kommunikations-Software nutzt einen Mechanismus, der es erlaubt, Kommunikation auf verschiedenen Abstraktionsebenen zu betrachten: *Protokoll-Schichten* (vgl. [Tan96]). Jedes Protokoll einer Schicht enthält eine Menge von Regeln zum Ablauf von Kommunikation (*horizontale Schnittstelle*). Schichten nehmen Dienste der nächst tieferen Schicht in Anspruch und stellen Dienste für die nächst höhere Schicht bereit (*vertikale Schnittstelle*). Ein *Dienst* ist eine Menge von Funktionen, die einem *Dienstnehmer* von einem *Dienstgeber* zur Verfügung gestellt werden. In paketvermittelnden Netzwerken werden über die vertikale Schnittstelle Pakete weitergegeben. Dabei werden Pakete der nächst höheren Schicht als *Nutzdaten* interpretiert, mit *Kontrolldaten* der eigenen Schicht versehen und an die nächst tiefere Schicht weitergegeben.

Die am weitesten verbreiteten Schichtenmodelle sind das *ISO-OSI-Referenzmodell* und das *TCP/IP-Referenzmodell* [Tan96]. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Betrachtungen reicht ein vereinfachtes OSI-Modell aus, in dem die Applikationsschicht, die Präsentationsschicht und die Sitzungsschicht zu einer gemeinsamen *Anwendungsschicht* zusammengefasst werden (vgl. Abbildung 2.1). Dabei werden

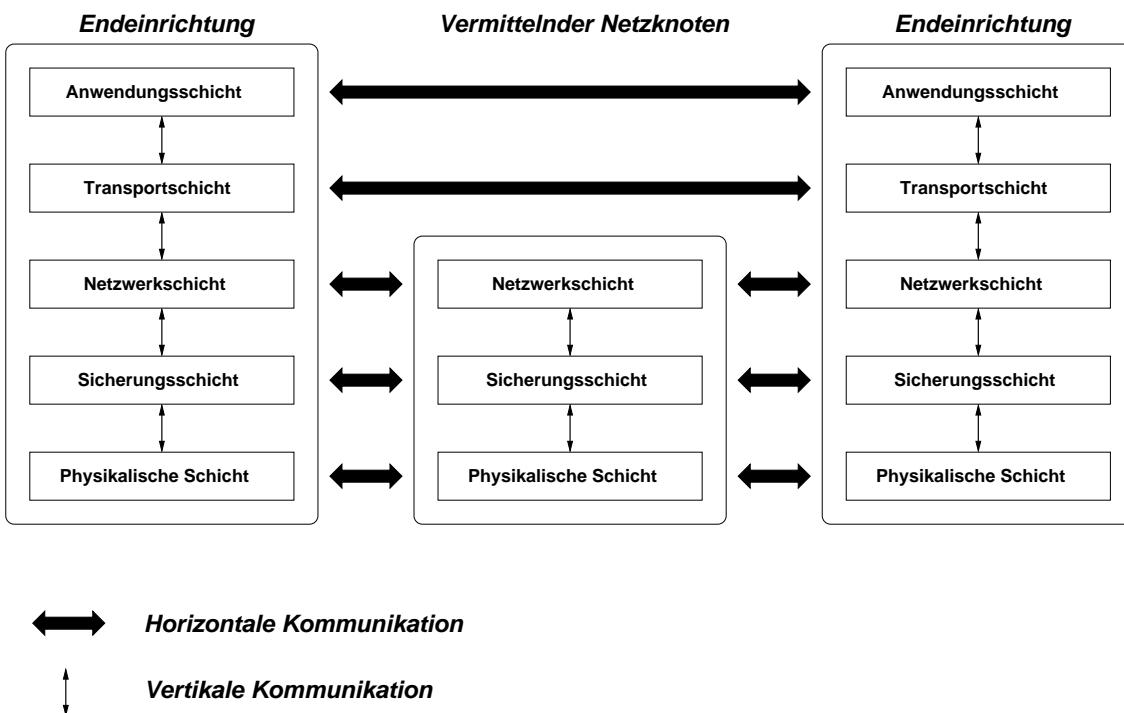


Abbildung 2.1: Schichten-Modell

die TCP-Schicht und die IP-Schicht des TCP/IP-Modells als Transportschicht bzw. Netzwerkschicht bezeichnet².

²Ein Vergleich der beiden Referenzmodelle und eine Kritik der Eingliederung des TCP/IP-Modells in das OSI-Modell findet sich in [Tan96], Kap. 1.4.3.

2.3 Bezug zur eigenen Arbeit

Bei dem im weiteren Verlauf der Arbeit entwickelten Modell werden paketvermittelnde Punkt-zu-Punkt-Festnetze beliebiger Größenordnung (LAN, MAN oder WAN) modelliert. Abbildung 2.2 zeigt den für alle weiteren Betrachtungen zu Grunde gelegten Netzwerk-Aufbau. Dabei werden folgende Begriffe verwendet:

- **Endeinrichtung**

Eine Endeinrichtung kann ein *Netzwerk-Benutzer* oder ein *Anwendungsrechner* sein. Wesentliches Merkmal einer Endeinrichtung im Hinblick auf die Modellierung ist, dass durch diese Verkehr generiert oder Verkehr an diese gesendet wird. Endeinrichtungen besitzen über die *Benutzer-Schnittstelle*³ eine Anbindung an ein leitungsvermittelndes oder paketvermittelndes *Zugangsnetz*.

- **vermittelnder Netzknoten (VNK)**

Ein vermittelnder Netzknoten empfängt Datenpakete und sendet diese an andere Netzknoten weiter. Es kann sich dabei um einen Switch (Sicherungsschicht), einen Router (Netzwerkschicht) oder ein Gateway (höhere Schichten) handeln. Dabei wird unterschieden zwischen *Randknoten* und *Zentralknoten*. Ein Randknoten besitzt eine externe Netzschnittstelle, also eine Schnittstelle zu anderen Subnetzen. Ein Zentralknoten ist ausschließlich mit Netzknoten des eigenen Subnetzes verbunden.

- **Verbindungsleitung**

Der Begriff *Verbindungsleitung* beschreibt eine physikalische (Festnetz-)Verbindung zwischen vermittelnden Netzknoten.

- **Zugangsnetz und Transitnetz**

Zugangsnetze (z. B. Universitätsnetze) bilden das Bindeglied zwischen Endeinrichtungen und Transitnetzen. Transitnetze wie z. B. das BelWue [Bela] besitzen im Allgemeinen um Größenordnungen höhere Bandbreiten als Zugangsnetze. Die Schnittstelle zwischen beiden Netztypen wird mit *Zugangsnetz-Transitnetz-Schnittstelle* bezeichnet⁴.

- **Verbindungen, Flüsse und Ströme**

Eine *Verbindung* ist eine Menge von Paketen, die den Informationsfluss einer einzelnen Anwendung zwischen zwei durch ein oder mehrere Netzwerke verbundene Endeinrichtungen repräsentiert. Eine Verbindung kann z. B. ein ftp-Dateitransfer, eine HTTP-Verbindung beim Abruf einer WWW-Seite (Anwendungsschicht), eine TCP-Verbindung (Transportschicht) oder eine IP-Verbindung, d. h. eine Menge von Paketen, die zu einer TCP-Verbindung gehören (Netzwerk-Schicht), sein.

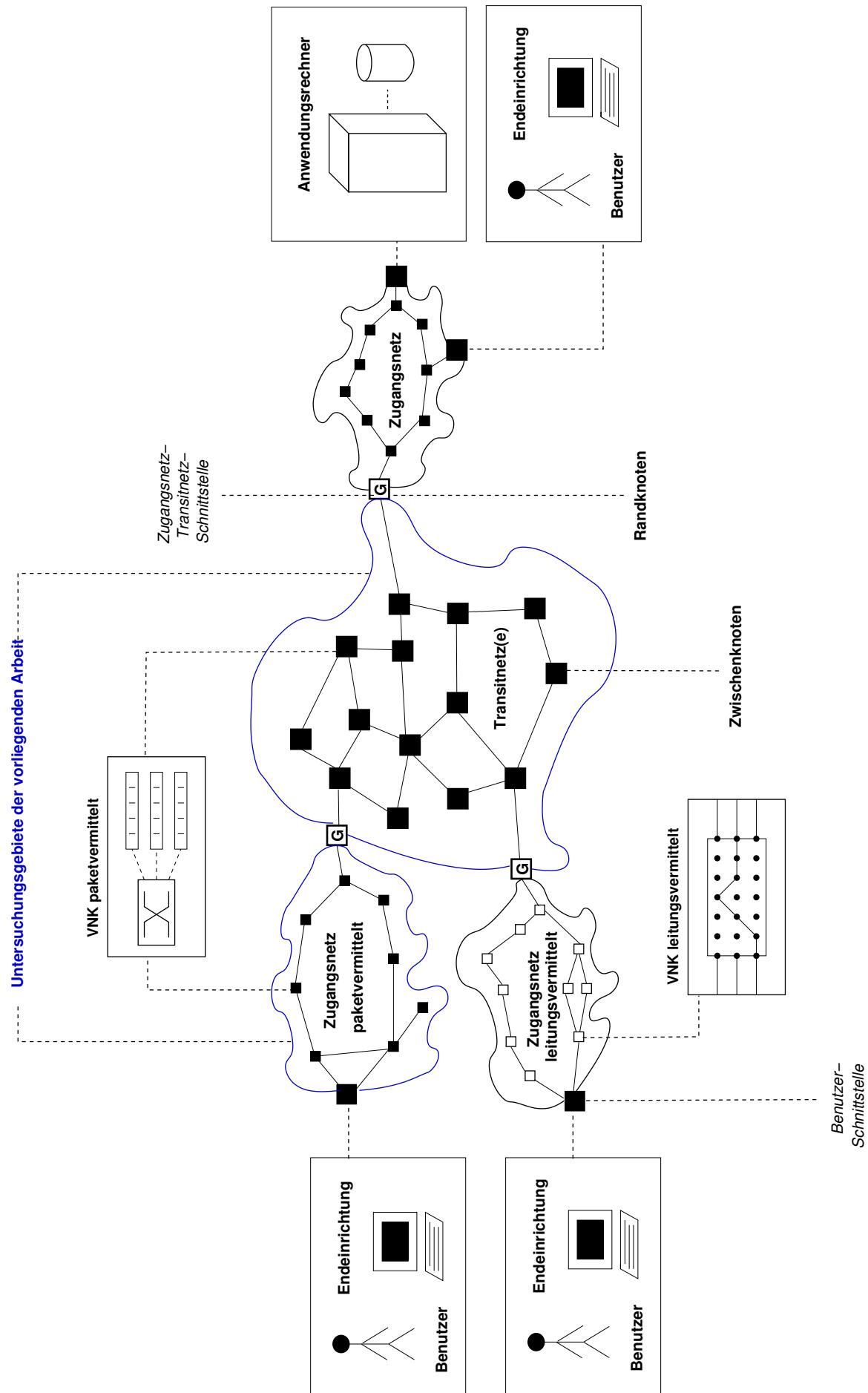
Die Gesamtmenge der innerhalb einer fest definierten Zeitspanne von einem Senderknoten an einen Empfängerknoten übertragenen Datenpakete bildet einen *Verkehrsfluss*. Verkehrsflüsse entstehen durch Aggregation von Verbindungen mit gleichem Sender und Empfänger.

Als *Verkehrsstrom* wird die Sequenz der innerhalb einer fest definierten Zeitspanne auf einer Verbindungsleitung übertragenen Datenpakete bezeichnet. Verkehrsströme entstehen durch Überlagerung von Verkehrsflüssen verschiedener Sender-Empfänger-Paare.

Vermittelnde Netzknoten und Verbindungsleitungen werden als *Netzwerk-Komponenten* bezeichnet. Ziel der im Rahmen dieser Arbeit durchgeföhrten und in Kapitel 7 dokumentierten Simulationsversuche ist die Modellierung von Ausfällen von Netzwerk-Komponenten und die Untersuchung der Eigenschaften von Verkehrsströmen während der Ausfalldauer.

³Der Begriff Benutzer-Schnittstelle wird hier nicht als Mensch-Maschine-Schnittstelle, sondern als die Schnittstelle zwischen dem Endgerät des Benutzers und dem Zugangsnetz verstanden.

⁴In Abbildung 2.2 sind die Knoten an den Netzübergängen mit dem Buchstaben "G" wie "Gateway" gekennzeichnet.



Kapitel 3

Verlässlichkeit in Netzwerken

Grundvoraussetzung jeder Form von qualitativer oder quantitativer Bewertung der Qualitätseigenschaften technischer Systeme ist ein angemessenes Verständnis des Qualitätsbegriffes und dessen Attributen wie der Verlässlichkeit. Die Schaffung dieses Verständnisses mit der Zielrichtung modellgestützter Verlässlichkeitsanalyse ist Inhalt dieses Kapitels.

Abschnitt 3.1 geht hierzu zunächst auf die traditionelle für Verlässlichkeitsbetrachtungen technischer Systeme notwendige Terminologie ein, eine Fokussierung des Verlässlichkeitsbegriffes für die speziellen Randbedingungen paketvermittelnder Netzwerke wird in den darauf folgenden Abschnitten vorgenommen.

Abschnitt 3.2 ordnet den in Kapitel 5 entwickelten Modellierungsansatz in das Umfeld der Verlässlichkeitstechniken für Netzwerke ein.

Abschnitt 3.3 beschäftigt sich mit der Bedeutung von Dienstgüte.

In Abschnitt 3.4 werden die einzelnen Teilschritte des Prozesses der Verlässlichkeitsbewertung dargestellt. Dabei wird insbesondere die Konstruktion und Auswahl geeigneter Metriken erörtert.

3.1 Grundbegriffe

Mit dem Begriff Qualität verbindet man im Allgemeinen die Vorstellung, dass ein Gegenstand oder eine Handlung gewissen Gütekriterien genügt.

Nach ISO 8402 ist die Qualität eines Produktes oder einer Dienstleistung wie folgt definiert:

Definition 3.1 *Qualität ist die Gesamtheit von Merkmalen und Merkmalswerten einer Betrachtungseinheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen.*

Die Definition wird getragen von dem Gedanken, dass Qualität vorliegt, wenn gestellte Anforderungen an ein Produkt oder eine Dienstleistung erfüllt werden können. Diese Sichtweise schlägt sich auch in dem im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Verlässlichkeitsbegriff nieder.

Die *Verlässlichkeit [dependability]*¹ eines Rechensystems beschreibt eine Qualitätseigenschaft, die den Grad der Vertrauenswürdigkeit in die Erbringung der durch eine *Spezifikation*² zugesicherten System-Leistung ausgedrückt. Laprie [Lap92] gliedert die Verlässlichkeit in die vier Attribute *Zuverlässigkeit*

¹ Anders als in [Lap92] wird der Begriff *dependability* hier mit *Verlässlichkeit* übersetzt und der Begriff *reliability* mit *Zuverlässigkeit*. Damit wird ein Überladen des Begriffes Zuverlässigkeit vermieden.

² Im Zusammenhang mit Netzwerken ist an Stelle des Begriffs Spezifikation eher der Begriff *Dienstleistungsvereinbarung* angebracht (vgl. Abschnitt 3.4).

[reliability], Verfügbarkeit [availability], Sicherheit [safety] und Vertraulichkeit [security]. Mit den vier Attributen werden die Aspekte

- (punktuelle) Bereitschaft zur Erbringung der Systemleistung
- kontinuierliche Erbringung der Systemleistung
- Erbringung der Systemleistung ohne katastrophale Folgen für die Umwelt
- Schutz des Systems vor unautorisiertem Zugriff mit Beeinträchtigung der Systemleistung

beschrieben. Im Umfeld der Analyse von Netzwerken wird in der englischsprachigen Literatur außer dem Begriff *dependability* auch die Bezeichnung *survivability* für Verlässlichkeit benutzt [Ben00]. Diese beschreibt die Fähigkeit der Leistungserbringung in störungsbedingten Ausnahmesituationen [Yur99]. Im Bereich der Modellierung von Rechensystemen hat sich für die Kombination aus Leistung und Zuverlässigkeit der Begriff *performability*, eine Synthese aus *performance* und *reliability*, eingebürgert.

3.1.1 Fehler, Fehlzustände und Ausfälle

Für die Beschreibung fehlerhaften Systemverhaltens ist die in [Lap92] eingeführte Terminologie geeignet. Dabei wird unterschieden zwischen

- *Fehler [fault]*
Ein Fehler einer Systemkomponente ist ein Makel, der die Ursache für fehlerhafte Zustände und Ausfälle bildet.
- *Fehlzustand [error]*
Ein Fehlzustand ist ein Systemzustand, der einen Ausfall verursachen kann. Fehlzustände müssen nicht zwangsläufig zu Ausfällen führen. Der Begriff *Störung* wird in der Folge als Synonym für Fehlzustand verwendet.
- *Ausfall [failure]*
Ein Ausfall tritt ein, wenn die von einem System erbrachte Leistung nicht mehr mit der spezifizierten Leistung übereinstimmt.

Fehler, Fehlzustände und Ausfälle beeinträchtigen die Verlässlichkeit von Rechensystemen. Sie bilden eine Kausalkette: Fehler können zu fehlerhaften Zuständen führen und fehlerhafte Zustände können zu Ausfällen führen. Für die quantitative Verlässlichkeitsbewertung ist der Zeitpunkt ab dem Eintreten des Ausfalls von Bedeutung (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Im Hinblick auf Verlässlichkeitsbetrachtungen macht es Sinn, Ausfälle nach folgenden Kriterien zu unterteilen:

- *Ursache*
Eine Klassifizierung nach der Ausfallursache ist im Rahmen von vorwärtsgerichteten Verlässlichkeitsuntersuchungen sinnvoll (vgl. Abschnitt 3.4.2). Hierbei lässt sich im Hinblick auf den phänomenologischen Typ der verursachenden Systemkomponente(n) unterscheiden bezüglich *Hardware-Fehler*, *Software-Fehler*, *menschliches Fehlverhalten* (*Bedienungsfehler*, *Unterlassungsfehler*, etc.), *Umgebungseinflüsse* (*Stromversorgung*, *Wasserschaden*, *Temperierung*, etc.) und *höhere Gewalt* (*Blitzschlag*, *Feuer*, *Erdbeben*, etc.).

- **Wirkung**

Aus dem Blickwinkel des Benutzers ist eine Klassifikation nach der Wirkung eines Ausfalls anzustreben, da diese im Gegensatz zur Ursache in unmittelbarem Zusammenhang mit der von ihm erfahrenen Beeinträchtigung steht. Die Wirkung eines Ausfalls lässt sich messen an Hand der Faktoren

- **Zeitangaben**

Hierzu zählen Häufigkeit, Zeitpunkt und Ausfalldauer. Die Häufigkeit von Ausfällen eines bestimmten Typs ist als statistische Angabe nur im Rahmen einer langfristig angelegten Ausfallanalyse möglich. Zeitpunkt und Ausfalldauer lassen sich hingegen auch für einzelne Ausfälle bestimmen.

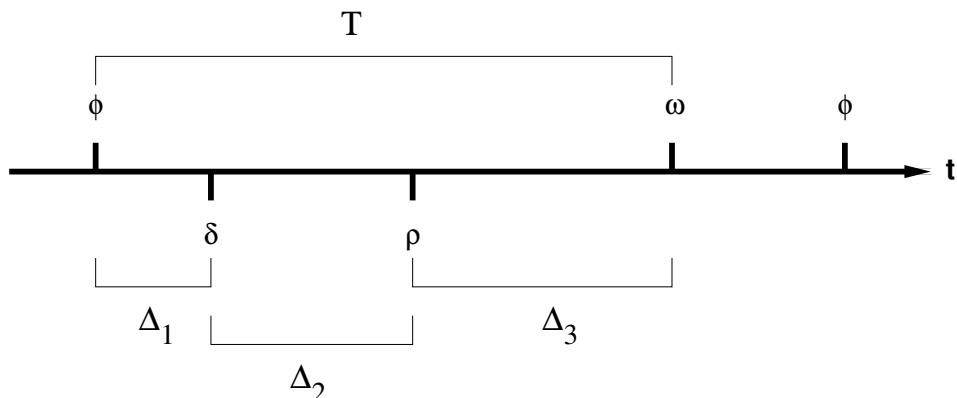
- **Menge der betroffenen Systemdienste (vgl. Abschnitt 3.3)**

Systemdienste werden im Rahmen von *Dienstleistungsvereinbarungen (DLV) [service level agreements, SLA]* spezifiziert.

- **Menge der betroffenen Benutzer**

Die Menge der betroffenen Benutzer wird zusammen mit der Ausfalldauer häufig verwendet, um die *Schwere* eines Ausfalls an Hand einer kardinalen Bewertungsskala (z. B. leicht - mittel - schwer) zu charakterisieren.

3.1.2 Zeitangaben zur Beschreibung von Ausfällen



- φ **Zeitpunkt des Auftretens des Ausfalls**
- δ **Zeitpunkt der Entdeckung des Ausfalls / Beginn der Fehlerdiagnose**
- ρ **Zeitpunkt des Endes der Fehlerdiagnose / Beginn des Reparaturbeginns**
- ω **Zeitpunkt des Endes der Reparatur / Beginn der Wiederaufnahme des Betriebes**

Abbildung 3.1: Relevante Zeitpunkte zur Beschreibung von Ausfällen

In der Literatur wird die Zeitspanne zwischen dem Auftreten eines Ausfalls und der vollständigen Reparatur oftmals in die Phasen

- Ausfallerkennungsphase
- Fehlerdiagnosephase
- Fehlerbehebungsphase

unterteilt (vgl. [Kau95], Kap. 2.1.2). Dabei werden die nachstehenden Bezeichnungen für die auftretenden Zeitdauern verwendet (vgl. Abbildung 3.1):

- MTBF [Mean Time Between Failure]: Mittlere Zeitdauer zwischen zwei Ausfällen
- MTFR [Mean Time Between Failure and Repair]: Mittlere Zeitdauer zwischen dem Auftreten des Ausfalls und dessen Behebung:

$$MTFR = \mathbb{E}(T).$$

- MTFD [Mean Time Between Failure and Disclosure]: Mittlere Zeitdauer zwischen dem Auftreten des Ausfalls und der Entdeckung des Fehlers:

$$MTFD = \mathbb{E}(\Delta_1).$$

- MTDD [Mean Time Between Disclosure and Diagnosis]: Mittlere Zeitdauer zwischen dem Entdecken des Fehlers und dem Abschluss der Fehlerdiagnose:

$$MTDD = \mathbb{E}(\Delta_2).$$

- MTDR [Mean Time Between Diagnosis and Repair]: Mittlere Zeitdauer zwischen dem Abschluss der Fehlerdiagnose und dem Ende der Reparatur:

$$MTDR = \mathbb{E}(\Delta_3).$$

Im Sinne der quantitativen Bewertung der Folgen eines Ausfalls sind für die weiteren Betrachtungen lediglich der Ausfalleintrittszeitpunkt (ϕ) und der Zeitpunkt der Beendigung der Reparatur bzw. die Wiederaufnahme des Betriebes (Zeitpunkt ω) von Bedeutung. Die durch diese Zeitpunkte definierte Zeitspanne wird mit *Ausfalldauer* bezeichnet. Der statistische Erwartungswert der Ausfalldauer innerhalb eines stochastischen Modells ist die *MTFR* (vgl. Abbildung 3.1). Synonym wird auch der Begriff *Unklardauer* verwendet. Für die Zeitspanne zwischen Reparaturzeitpunkt und Ausfall wird die Bezeichnung *Betriebsdauer* verwendet.

Das soweit vorgestellte allgemeine Rahmenwerk orientiert sich an der Verlässlichkeitsanalyse beliebiger Rechensysteme. Um eine Brücke zwischen der allgemeinen Betrachtung und einer an den Eigenheiten paketvermittelnder Netzwerke orientierten Verlässlichkeitsdefinition zu bauen, sind folgende weitere Aspekte zu berücksichtigen:

- *Ausfallbehandlung in Netzwerken*
Die nach eingetretenem Ausfall und erfolgreicher Fehlerdiagnose erfolgende *Ausfallbehandlung* setzt sich in der Netzwerk-Praxis in der Regel aus den beiden unabhängigen Prozessen *Reparatur* und *Restoration* zusammen (vgl. Abschnitt 3.2.2).
- *Berücksichtigung von Dienstgüte* (vgl. Abschnitt 3.3)
- *Berücksichtigung von Überlast-Situationen und Angriffen* (vgl. Abschnitt 3.4.2).

3.2 Verlässlichkeitstechniken für Netzwerke

3.2.1 Entwurf verlässlicher Netzwerke

Als Rahmenwerk für den modellgestützten Entwurf verlässlicher Netzwerke kann der in Abbildung 3.2 dargestellte iterative Ansatz mit eingebetteter Analyse verwendet werden.

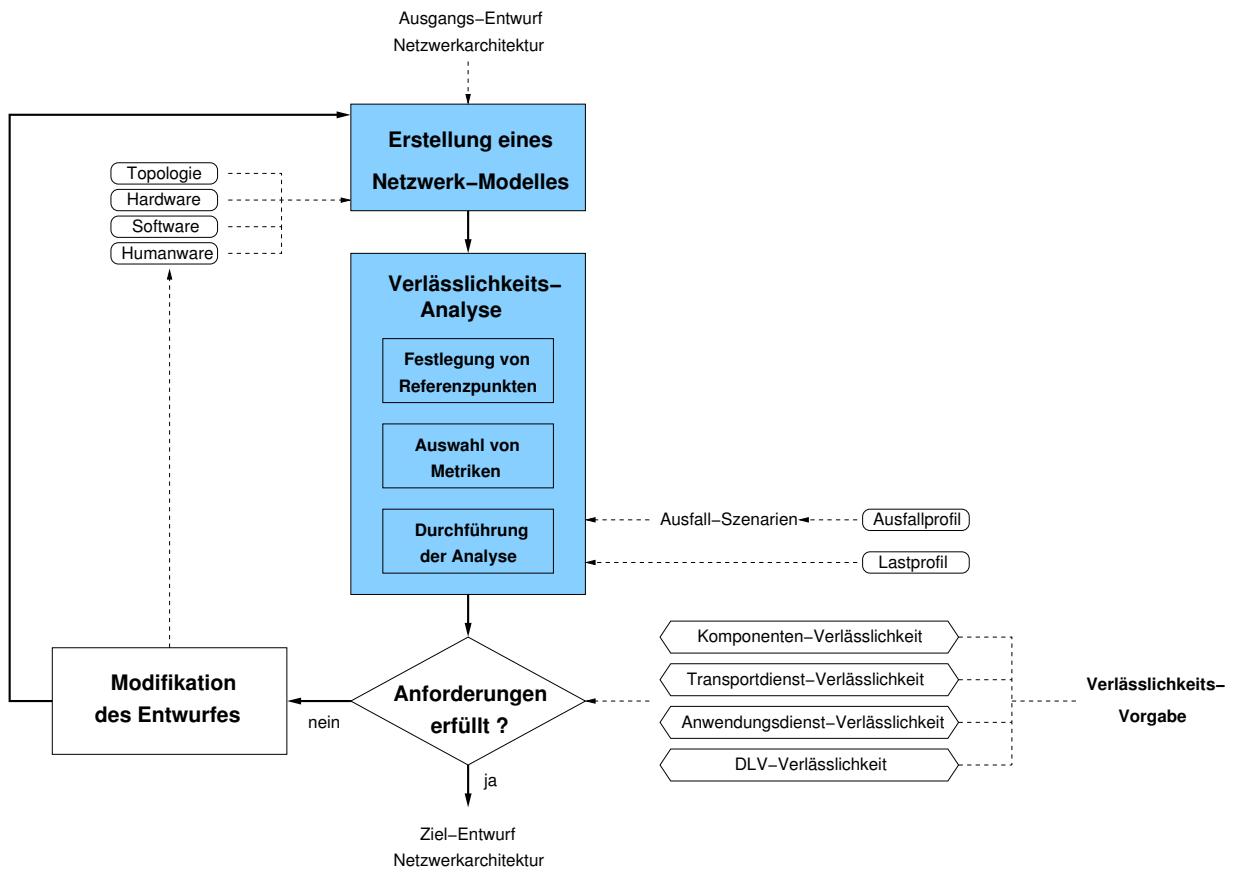


Abbildung 3.2: Entwurf und Analyse verlässlicher Netzwerke

Dabei wird, basierend auf einem Ausgangs-Entwurf, das Ziel verfolgt, die in einer *Verlässlichkeitsvorgabe*³ spezifizierten Anforderungen in einen Ziel-Entwurf umzusetzen. Die Iteration besteht aus der *Erstellung eines Netzwerk-Modelles*, dem *Analyseschritt* und der *Prüfung der Vorgabe*. Abhängig von der Erfüllung der Vorgabe ist der Ziel-Entwurf erreicht oder es ist eine Modifikation des Entwurfes unter Änderung der Architektur-Determinanten (Topologie, Hardware, Software, Humanware)⁴ vorzunehmen. Der Analyseschritt wird in Abschnitt 3.4 beschrieben, der Prozess der Modellerstellung wird in den Kapiteln 4 und 5 eingehend betrachtet.

3.2.2 Techniken zur Steigerung der Verlässlichkeit

Maßnahmen zur Erhöhung der Verlässlichkeit lassen sich in Bezug auf deren Wirkungszeitpunkt relativ zum Ausfallereignis untergliedern in *Präventivmaßnahmen* und *reaktive Maßnahmen*. Präventivmaßnahmen umfassen z. B. redundante topologische Planung eines Netzwerkes (Topologie-Determinante)⁴, Auswahl zuverlässiger Einzel-Komponenten, Hardware-Redundanz (Hardware-Determinante), Einsatz fehlertoleranter Software (Software-Determinante), Überdimensionierung und Protektion (Hardware- und Software-Determinante), die Erstellung eines Ausfallbehandlungsplanes, die Durchführung regelmäßiger Wartungen oder die Schulung der für den Netzwerk-Betrieb zuständigen Mitarbeiter (Humanware-Determinante). Reaktive Maßnahmen beinhalten z. B. Trouble Ticketing, Restoration (Software-Komponente) oder den Austausch defekter Hardware-Komponenten (Humanware-Determinante).

³Zur Diskussion der vier genannten Verlässlichkeits-Ebenen Komponenten-Ebene, Transportdienst-Ebene, Anwendungsdienst-Ebene und DLV-Ebene siehe Abschnitt 3.4.1.

⁴Eine genaue Beschreibung der Determinanten findet sich in Kapitel 5.

| | Protektion | Restoration |
|--|-----------------------|---|
| Bereitstellung redundanter Kapazitäten | vor Ausfallereignis | nach Ausfallereignis |
| Aktivierungsdauer | $< 100 \text{ ms}$ | $100 \text{ ms} - 5 \text{ min.}$ |
| Auswahl von Reservepfaden | statisch | statisch oder dynamisch |
| Kontrolle | verteilt | verteilt oder zentralisiert |
| Schicht der Kontrollinstanz | Physikalische Schicht | Sicherungsschicht oder Netzwerkschicht |

Tabelle 3.1: Protektion und Restoration

Diese unvollständige Aufzählung lässt sich beliebig erweitern und verfeinern. Bei den im Rahmen der Arbeit durchgeführten Simulationsversuchen werden ausschließlich Protektions- und Restorations-techniken verwendet und untersucht. Ziel der Analysen ist es, Richtlinien für die Überdimensionierung von Netzwerken unter spezieller Berücksichtigung des Gesichtspunktes der Langzeitabhängigkeit von Verkehrsströmen in paketvermittelnden Netzwerken abzuleiten. Überdimensionierung kann im Verbund mit entsprechender Restorations-Funktionalität der Netzwerk-Software dazu eingesetzt werden, um Netzwerk-Ausfälle zu tolerieren bzw. um Überlastsituationen zu vermeiden.

Bei der *Protektion* und bei der *Restoration* werden redundante topologische Strukturen zur Tolerierung von Komponenten-Ausfällen eingesetzt [Ben00, Kaw99]. Dabei wird Netzwerk-Verkehr bei Ausfalleintritt auf Reservepfaden (vgl. Definition 5.3) umgeleitet.

Eine Gegenüberstellung von Restoration und Protektion ist in Tabelle 3.1 gegeben: Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Techniken liegt im Zeitpunkt der Reservierung der zur Ausfall-Tolerierung notwendigen Ressourcen. Bei der *Protektion* werden diese vor Eintritt des Ausfallereignisses bereitgestellt. Dabei ist zu unterscheiden zwischen [Con02]

- *dedizierter Protektion [dedicated protection]*

Jeder durch Protektion geschützte Pfad besitzt einen *Reservepfad*, der im Bedarfsfall für die Umleitung des Verkehrs auf dem zu schützenden Pfad verwendet wird.

- *geteilter Protektion [shared protection]*

Reservepfade werden von mehreren zu schützenden Päden gemeinsam genutzt.

Bei der *Restoration* wird *nach* Eintritt eines Ausfalls ermittelt, welche Pfade für die Tolerierung eines Ausfalls genutzt werden. Die Auswahl der Reservepfade kann *statisch* innerhalb einer vorher festgelegten Auswahl oder *dynamisch* in Abhängigkeit der momentanen Verkehrsbelastung erfolgen. Protektion ist im Allgemeinen um Größenordnungen schneller als Restoration. Protektionstechniken sind in der Regel in den unteren Schichten des Protokollstapels in Hardware realisiert, während Restorationstechniken sowohl in Hardware (Sicherungsschicht) als auch in Software (Netzwerkschicht) auftreten [Ben00].

Ein abstrakter Ablauf der Ausfallbehandlung nach [Ben00] ist in Abbildung 3.3 dargestellt: Nach der *Erkennung des Ausfalls*⁵ sorgt die Kontroll-Architektur des Netzwerkes für eine *Ausfall-Proklamation*. Dabei wird eine zentrale Kontrollinstanz (zentrale Kontrolle) bzw. die Netzwerk-Knoten (verteilte Kontrolle) über den Ausfall unterrichtet. Danach setzen zwei unabhängige Prozesse ein:

1. *Reparaturprozess*

Innerhalb der *Fehlerdiagnose* wird eine Fehlerlokalisierung durchgeführt. Als defekt erkannte System-Komponenten werden manuell oder automatisch durch *Reparatur* behandelt.

⁵Die Ausfallerkennung kann mittels Selbstdiagnose durch die fehlerhafte Komponente (z. B. bei einem Switch- oder Router-Ausfall) oder durch benachbarte Komponenten, z. B. bei Überschreiten einer Zeitschranke [Timeout] oder das Ausbleiben eines physikalischen Signals (z. B. bei einem Kabelbruch) erfolgen.

2. Restorationsprozess

Der Restorationsprozess besteht aus der *Last-Analyse*, die die Identifikation der durch den Ausfall umzuleitenden Verkehrsströme beinhaltet, und der *Rekonfiguration*, welche die Wegewahl und das Umleiten [rerouting] von Verkehr realisiert. Eine Iteration der Schritte Last-Analyse und Rekonfiguration für einzelne Verkehrsbewegungen (Verbindungen, Flüsse) ist möglich.

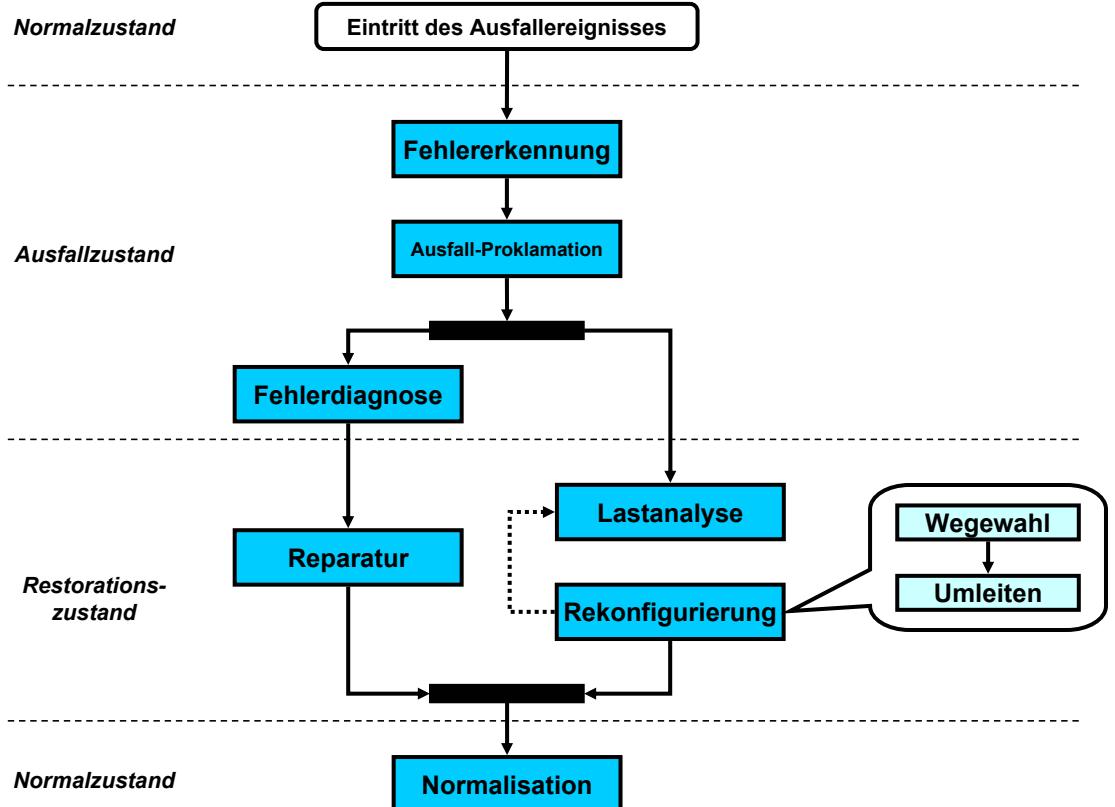


Abbildung 3.3: Ausfallbehandlung nach [Ben00]

Nach abgeschlossener Reparatur ist die Rückkehr zum Normalbetrieb möglich.

3.3 Verlässlichkeit und Dienstgüte

Mit der Zunahme des Bedarfes nach Übertragung von multimedialen Inhalten wie Videos oder Sprache haben sich die Anforderungen an moderne paketvermittelnde Netzwerke geändert. Im Gegensatz zu anspruchslosen Anwendungen wie z. B. elektronischer Post oder Datei-Transfer erfordert die Übertragung multimedialer Inhalte in Echtzeit die Einhaltung von Randbedingungen bezüglich der Leistungs-Basiskenngrößen verfügbare Bandbreite, Paketverlustrate oder Paketlaufzeit (siehe Abschnitt 3.4.2). Das Bestreben, verschiedene Dienste innerhalb eines Netzes zu integrieren bei gleichzeitiger Unterschiedlichkeit der Dienstgüte-Anforderungen macht die Einführung von *Dienstgüteklassen* notwendig (zu Einzelheiten siehe z. B. [Det02]). Für die Vermittlungseinrichtungen ist die Erfüllung verschiedener Dienstgüte-Anforderungen verbunden mit Signalisierungsaufwand und zeitlichem Aufwand bei der Auswertung von Paketkopf-Informationen und bei der Anwendung von Verfahren zur Bedienung und zum Warteschlangen-Management. Dieser Aufwand schlägt sich in der Praxis in einer zeitlichen Verzögerung, der *Bearbeitungsverzögerung*, nieder (vgl. Abschnitt 3.4.2).

Grundsätzlich lassen sich zwei Haupt-Strategien zur Erreichung von Dienstgüte in paketvermittelnden Netzwerken unterscheiden [Wur01]:

- *Ressourcen-Reservierung*
- *Priorisierung.*

Beide Strategien werden zur Bereitstellung von *Transportdiensten* eingesetzt. Transportdienste sind *Netzwerkdienste*, die dafür sorgen, dass die Datenübertragung zwischen den Knoten eines Netzwerkes unter Einhaltung von Dienstgüte-Anforderungen realisiert werden kann (auch: Trägerdienste [*bearer services*], vgl. [Sai94]). Im Gegensatz dazu stehen *Systemdienste*, d. h. Dienste, die von Applikationsrechnern zur Verfügung gestellt werden, wie z.B. E-Mail oder WWW-Dienste. Offensichtlich ist durch die einseitige Abhängigkeit eine enge Verzahnung zwischen Netzwerkdiensten und Systemdiensten gegeben: Ohne einen funktionsfähigen Netzwerkdienst kann ein auf der Transportfunktionalität des Netzwerkes aufbauender Systemdienst nicht erbracht werden (zu Einzelheiten bzgl. Netzwerk- und System-Management siehe [Heg99]).

Die Trennung zwischen System- und Netzwerkdiensten ist im Hinblick auf die Zuordnung von Ausfällen entscheidend: Systemausfälle wie das Abstürzen eines WWW-Servers bewirken unter Umständen aus Sicht des Benutzers dieselbe Empfindung der Dienstbeeinträchtigung wie der Konnektivitätsverlust zum Server als Folge des Bruchs einer Glasfaserleitung. Der erste Fall betrifft die Systemdienste, der zweite Fall die Netzwerkdienste.

Die Auswirkungen des Ausfalls von Netzwerk-Komponenten hängen in sehr starkem Maß vom benutzten *Dienst* ab [Net02]: Während z. B. beim Laden einer HTML-Seite über das HTTP-Protokoll die durch Überlast hervorgerufene Unterbrechung der Verbindung zu einem WWW-Server dazu führen kann, dass die gewünschte Seite zeitweilig nicht abgerufen werden kann und daraus eine mittelbare Beeinträchtigung für den Netzwerk-Benutzer entsteht, wird der temporäre Ausfall eines vermittelnden Netzknotens eventuell gar nicht wahrgenommen, da Verkehr auf Reservepfaden ohne Beeinträchtigung der Transportleistung umgeleitet werden kann.

Zur Beschreibung der Dienstqualität ist das in [ITU] und [Can01] verwendete Sitzungs- und Transaktionsmodell geeignet. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich jede Anwendungs-Dienstleistung aus *Sitzungen* [*sessions*] und *Transaktionen* [*transactions*] zusammensetzt. Eine Sitzung kann aus mehreren Transaktionen bestehen. Beispielsweise entspricht das Laden einer WWW-Seite, die verschiedene Bilder enthält, einer Sitzung. Für das Laden der Seitenbeschreibung und der Bilder werden separate TCP-Verbindungen zwischen dem HTTP-Client und dem HTTP-Server aufgebaut. Jede dieser Verbindungen entspricht einer Transaktion.

Der zeitliche Ablauf einer Transaktion besteht aus den Phasen

- *Aufbauphase* [*Access*]
- *Übertragungsphase* [*Transfer*]
- *Beendigungsphase* [*Disengagement*].

Die Leistungs-Eigenschaften einer Transaktion sind gegeben durch die Parameter

- *Geschwindigkeit* [*Speed*]
- *Genauigkeit* [*Accuracy*]
- *Störungsfreiheit* [*Dependability*]⁶

⁶Die englische Übersetzung des Begriffes Störungsfreiheit deckt sich hier mit der des übergeordneten Begriffs Verlässlichkeit. In diesem Zusammenhang bezieht er sich auf eine einzelne Transaktion und beschreibt die Wahrscheinlichkeit für den störungsfreien Ablauf der Phase.

Aus der Kreuzung der Transaktionsphasen mit den Leistungs-Eigenschaften ergibt sich die sog. *Matrix-Darstellung* zur Charakterisierung der Dienstgüte (vgl. Abbildung 3.6: die Transaktionsphasen sind hier mit den Buchstaben A, T, D, die Leistungs-Eigenschaften mit den Buchstaben S, A, D abgekürzt).

In den nachfolgenden beiden Abschnitten werden die Dienstgütemechanismen der beiden unter dem Gesichtspunkt praktischer Verbreitung bedeutendsten Architekturen ATM und IP vorgestellt.

3.3.1 Dienstgüte in ATM-Netzwerken



Abbildung 3.4: ATM-Schichtenmodell

Die ATM-Schicht des ATM-Referenzmodells stellt den höheren Schichten verschiedene Dienstgüteklassen zur Verfügung (vgl. Abbildung 3.4). Diese sind [ATM99, Tan96]:

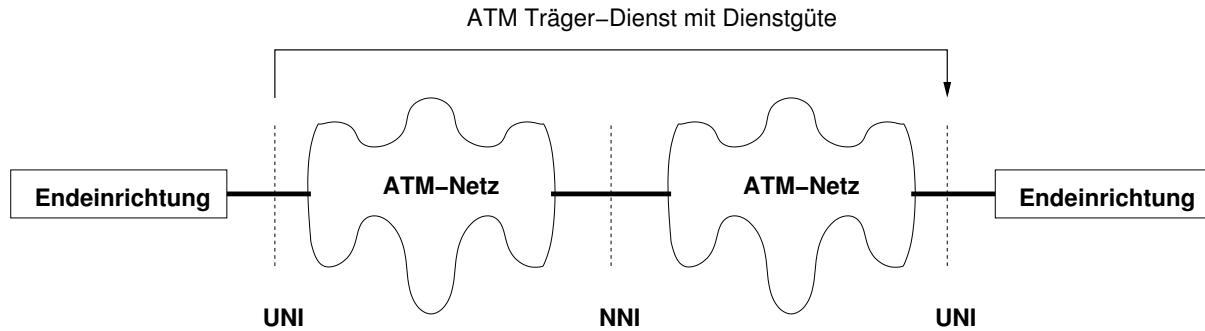
- **CBR (Constant Bit Rate)**
- **VBR-RT (Variable Bit Rate Realtime)**
- **VBR-NRT (Variable Bit Rate Non-Realtime)**
- **ABR (Available Bit Rate)**
- **UBR (Unspecified Bit Rate)**
- **GFR (Guaranteed Frame Rate)**

Die Dienstgüteklassen lassen sich in *echtzeitfähige* (CBR, VBR-RT) und *nicht echtzeitfähige* Klassen (VBR-NRT, ABR, UBR, GFR) unterteilen. Sie orientieren sich an der Verschiedenartigkeit des Anforderungsprofils von Anwendungen wie Telefonie, Videoübertragung, Dateitransfer oder E-Mail [Tan96].

Die Dienstgüteklassen werden durch Angabe von *Dienst-Attributen* näher spezifiziert. Hier ist zu unterscheiden zwischen *Verkehrs-Attributen*, wie z. B. der Spitzenzellenrate [peak cell rate (PCR)], und *Dienstqualitäts-Attributen*, wie z. B. der maximalen Zellenverzögerung [maximum cell transfer delay, CTD]. Vereinbarungen über Dienstgüte beziehen sich in der Regel auf abgeschlossene Netzwerkbereiche, die sich innerhalb von Netzwerk-Schnittstellen wie dem UNI (User Network Interface) und dem NNI (Network Network Interface) befinden (vgl. Abbildung 3.5).

3.3.2 Dienstgüte in IP-basierten Netzwerken

Obwohl bereits die ersten RFCs über das Internet-Protokoll eine Unterstützung von Dienstgüte in Form des type of service-Feldes (s. u.) im IP-Paketkopf vorsahen [Inf81], blieb diese von vielen Implementierungen zunächst ungenutzt. Noch heute verwendet ein nicht unerheblicher Teil der IP-Router den *best effort*-Ansatz, d. h. Internet-Pakete werden so schnell wie möglich vom Sender zum Empfänger transportiert, ohne dass bei der Bearbeitung der Pakete innerhalb des Routers Unterschiede bezüglich verschiedener Dienstgüteklassen gemacht werden. Dies kann zu Schwankungen der Paketlaufzeit oder bei hoher Netzbelaustung sogar zu Paketverlust führen, was für Anwendungen wie die Übertragung von Sprache zu inakzeptablen Randbedingungen führt.



UNI – User/Network-Interface

NNI – Network/Network-Interface

Abbildung 3.5: ATM-Netzschnittstellen

Zwei wesentliche von der IETF vorangetriebene Ansätze zur Unterstützung von Dienstgüte sind das *integrated services-Konzept* und das *differentiated services-Konzept*.

Integrated Services

Der in RFC 1633 beschriebene integrated services-Ansatz [Bra94] setzt Ressourcen-Reservierung zur Erreichung von Dienstgüte ein. Als geeignetes Signalisierungsprotokoll wird RSVP vorgeschlagen [Whi97].

Vor dem Etablieren eines Verkehrsflusses zwischen einem Sender und einem Empfänger initiiert der Sender eine Überprüfung der notwendigen Ressourcen (z. B. Bandbreite, Puffer⁷). Verläuft die Überprüfung erfolgreich, so werden in jedem Router auf dem ausgewählten Pfad zwischen Sender und Empfänger die entsprechenden Ressourcen reserviert und eine Verkehrsfluss-spezifische Zustandsinformation abgelegt. Pakete werden beim Eintreffen im Router klassifiziert und gemäß ihrer ermittelten Dienstgütekasse bearbeitet [Xia99].

Wesentlicher Nachteil des Ansatzes ist der hohe Verwaltungsaufwand. Der Umfang der Zustandsinformationen in einem Router wächst proportional mit der Anzahl der verwalteten Verkehrsflüsse, was insbesondere im Kernnetzbereich zu erheblichem Bearbeitungs- und Speicheraufwand führt. Deshalb hat sich dieser Ansatz in der Praxis nicht durchgesetzt.

Differentiated Services

Einer der wesentlichen Grundgedanken der in RFC 2475 [Car98] dokumentierten differentiated services-Architektur ist die Vorstellung, Dienstgüte in IP-Netzwerken bereitzustellen, ohne die Router im Kernnetzbereich mit hohem Verwaltungsaufwand für einzelne Verkehrsflüsse zu beladen.

Beim differentiated services-Ansatz wird Dienstgüte durch die Priorisierung von Datenpaketen erreicht [Xia99]. Dabei wird das *type of service*-Oktett (*TOS*) des IP-Paketkopfes (*DS-Feld*) als Klassifikationsmerkmal zur Unterscheidung von Paketen verschiedener Dienstgüteklassen genutzt. Das in RFC 2474 [Nic98] beschriebene Grundgerüst der differentiated services-Architektur definiert dabei keine festen Dienstgüteklassen. Vielmehr wird das DS-Feld als Prioritätsgröße zur Abgrenzung verschiedener Dienstgüteklassen gesehen, deren konkrete Ausgestaltung dem Netzbetreiber überlassen wird.

Einheitliche Dienstgüterichtlinien [*common service provisioning policies*] gelten dabei innerhalb abgeschlossener administrativer Netzbereiche, den so genannten *DS-Domänen*, wie z. B. dem Netzbereich eines Internet Service Providers (ISP) oder dem Intranet eines Industrieunternehmens.

⁷Dies sind die Anforderungen, die beim *guaranteed service* überprüft werden, vgl. [Whi97].

Netzknoten innerhalb einer DS-Domäne werden unterteilt in *Randknoten* und *Zentralknoten*. Die Umsetzung der Richtlinien zur Erreichung von Dienstgüte innerhalb einer DS-Domäne erfolgt durch

a) *Verkehrs-Konditionierung* [traffic conditioning]

Die Verkehrs-Konditionierung findet in den Randknoten einer DS-Domäne statt und besteht im Wesentlichen aus der *Markierung* [marking], der *Verkehrsformung* [shaping] und der *Policierung* [policing] eintreffender Pakete.

b) *Einzel-Knotenverhalten* [per hop behaviour, PHB]

Das Einzel-Knotenverhalten beschreibt, wie die Netzknoten die von ihnen verwalteten Ressourcen (Bandbreite, Puffer) Paketen verschiedener Dienstgüteklassen zur Verfügung stellen.

Durch das Zusammenspiel der Verkehrs-Konditionierung in den Randknoten und dem Einzel-Knotenverhalten der Zentralknoten wird eine Differenzierung innerhalb der Transportfunktionalität ermöglicht.

3.4 Bewertung der Verlässlichkeit von Netzwerken

Verfahren zur Verlässlichkeitsanalyse sind bezüglich des Ansatzpunktes bei der Ursache bzw. bei der Wirkung eines Ausfalls unterscheidbar:

- *Vorwärtsgerichteter oder induktiver Ansatz*

Dieser Ansatz entspricht der Vorgehensweise bei Analyse-Techniken wie der *Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse* [failure modes and effects analysis (FMEA)], [Lev95]. Gegenstand der Betrachtung ist hierbei die Beschreibung des kausalen Zusammenhangs zwischen dem Ausfallereignis und der dadurch hervorgerufenen Verlässlichkeitsbeeinträchtigung.

Diese Technik wird in dieser Arbeit benutzt.

- *Rückwärtsgerichteter oder deduktiver Ansatz*

Dieser Ansatz setzt ebenfalls beim eingetretenen Ausfallereignis an und verfolgt das Ziel, daraus die Ursache(n) für den Ausfall abzuleiten.

Das am weitesten verbreitete rückwärtsgerichtete Verfahren ist die *Fehlerbaum-Analyse* [fault tree analysis (FTA)], [Lev95].

Für die Bewertung der Verlässlichkeit sind verschiedene Blickwinkel der an der Diensterbringung involvierten Personen zu unterscheiden:

- *Benutzer*

Benutzer können Privatnutzer oder Firmenkunden wie z. B. kommerzielle Anwendungsdienst-Anbieter sein. Für den Benutzer erfolgt die Verlässlichkeitsbewertung aus dem Blickwinkel der Einhaltung der mit dem Netzbetreiber vertraglich vereinbarten Zusicherung zur Erbringung von Transportdiensten (bei Privatkunden: Geschäftsbedingungen; bei Firmenkunden: Dienstleistungsvereinbarungen (DLVs)).

- *Betreiber*

Aus der Sicht des Betreibers stellt sich die Verlässlichkeitsbewertung vor dem Hintergrund zweier konkurrierender Ziele dar: Der Erfüllung der vertraglich zugesicherten Verlässlichkeitsvereinbarungen und der Minimierung der Kosten des Netzbetriebs.

- **Ausrüster**

Aufgabe des Ausrüsters ist die Lieferung fehlerfreier, in der Regel gemäß Garantievereinbarungen spezifizierter Komponenten (Hardware, Software) bzw. Dienstleistungen (Humanware).

Für die folgenden Ausführungen kann die Sichtweise des Netzbetreibers unter dem Gesichtspunkt der Erbringung von Transportdiensten im Rahmen von Dienstleistungsvereinbarungen eingenommen werden. Finanzielle Erwägungen spielen dabei keine Rolle.

3.4.1 Ebenen der Verlässlichkeitsbewertung

Bei der Bewertung der Qualitätseigenschaften komplexer Systeme treten in der Regel große Mengen an Komponenten mit einer Vielzahl gegenseitiger Interaktionen auf. Um die Komplexität des Bewertungsprozesses in den Griff zu bekommen, ist es sinnvoll, verschiedene Abstraktionsebenen der Verlässlichkeitsbewertung zu betrachten (siehe Abbildung 3.6):

- **Komponenten-Ebene**

Auf dieser Ebene wird die Verlässlichkeit von Einzel-Komponenten eines Netzwerkes wie Brücken, Switches, Router, Gateways (Hardware), Protokollen (Software) oder von Handlungen des Netzwerk-Betriebes (Humanware) bewertet.⁸ Verlässlichkeit auf der Komponenten-Ebene bedeutet atomare Qualitätseigenschaften der Netzwerk-Komponenten wie z. B. die MTBF eines Switches.

Deren Zusammenspiel im Hinblick auf die Erbringung von Netzwerkdiensten wird dabei nicht bewertet. Eine Betrachtung auf dieser Ebene ist für die Kommunikation zwischen Netzbetreiber und Netzwerk-Ausrüster (Lieferant von Hardware und Software) sinnvoll. Die Bewertung der Architektur-Komponente Humanware besitzt auf dieser Ebene insbesondere dann eine Bedeutung, wenn das Personal für den Betrieb des Netzwerkes teilweise oder vollständig von einem externen Dienstleister gestellt wird.

- **Transportdienst-Ebene**

Verlässlichkeit auf der Transportdienst-Ebene bedeutet die Fähigkeit, Daten zwischen spezifizierten Referenzpunkten des Netzwerkes unter Einhaltung von Vorgaben bezüglich der Systemdienst-unabhängigen Verkehrs-Basiskenngrößen Bandbreite, Laufzeit und Paketverlustrate und daraus abgeleiteter Kenngrößen zu transportieren. Vorgaben sind in der Regel in Form von Schwellenwerten innerhalb einer Dienstleistungsvereinbarung gegeben.

Die in dieser Arbeit angestellten Simulations-Untersuchungen setzen auf der Transportdienst-Ebene an. Dabei werden die statistischen Eigenschaften von Verkehrsströmen in der Situation des Ausfalls von Netzwerk-Komponenten und deren Auswirkungen auf die genannten Verkehrs-Basiskenngrößen analysiert.

- **Anwendungsdienst-Ebene**

Verlässlichkeit auf der Anwendungsdienst-Ebene bedeutet die Bereitschaft zur Erbringung von Anwendungsdiensten wie z. B. Sprachübertragung, interaktiven Abfragen, Video-Streaming oder E-Mail mit spezifischen Dienstqualitäts-Anforderungen.

- **DLV-Ebene**

Verlässlichkeit auf den beiden Dienst-Ebenen bezieht sich auf die (zeitlich) *punktuelle* Fähigkeit

⁸Die Komponenten Hardware, Software und Humanware sind wesentliche Einflussfaktoren der Netzwerkverlässlichkeit und Teil der Netzwerk-Architektur, vgl. Abschnitt 5.1.

der Erbringung von Diensten. Verlässlichkeit auf DLV-Ebene bedeutet Qualitäts-Zusicherungen für einen Mix aus mehreren Diensten innerhalb eines *langfristigen* zeitlichen Rahmens. Dienstleistungsvereinbarungen können sich auf Transportdienste oder auf Anwendungsdienste beziehen (vgl. Abbildung 3.6). Auf die Kenngrößen, die im Rahmen von DLVs benutzt werden, wird in Abschnitt 3.4.2 eingegangen.

Auf der Transportdienst-Ebene werden Anwendungsdienst-unabhängige Anforderungen formuliert, die sich auf Verkehrsströme mehrerer gleichzeitig genutzter Anwendungsdienste mit unterschiedlichen Dienstqualitätsanforderungen beziehen können.

Beispiel: Ein Privatunternehmer mietet bei einem Telekommunikationsunternehmen (Netzbetreiber) zur Abwicklung seiner Geschäftstätigkeit über das Internet eine Standleitung mit 2048 kbps, die ihn über einen Übergangspunkt [gateway] des Netzbetreibers mit dem Internet verbindet. Damit wird eine Transportleistung beschrieben, die dem Unternehmer eine konstante Bandbreite zur Verfügung stellt. In diesem Fall bestehen die Referenzpunkte, an Hand derer die vertraglich vereinbarte Leistung zugesichert wird, aus dem Breitband-Anschluss des Kunden und dem Übergangspunkt des Netzbetreibers. Der Unternehmer nutzt den Breitbandanschluss gleichzeitig für mehrere Anwendungsdienste: Neben der Erreichbarkeit eines E-Mail-Servers und eines Web-Servers hängt auch ein Voice over IP-Dienst von der Verfügbarkeit der Standleitung ab.

Der Unterschied zwischen Transportdienst und den drei Anwendungsdiensten und die einseitige Abhängigkeit der Anwendungsdienste vom Transportdienst tritt hier klar in Erscheinung. Wesentlich ist dabei, dass der Transportdienst nicht auf die einzelnen Anwendungsdienste zugeschnitten ist. Die Unterteilung in die beiden Dienst-Ebenen ermöglicht somit einen von der Vielzahl der Qualitätsanforderungen verschiedener Dienste unabhängigen und flexiblen Zugang zur Verlässlichkeitsbewertung.

Die vorgenommene Ebenen-Unterteilung orientiert sich an den in [Zol94] und [Yur99] vorgestellten Rahmenwerken für *Mehrschicht-Verlässlichkeit* [multi-layer-survability]. Während diese Konzepte auf den *Entwurf* verlässlicher Netzwerke ausgerichtet sind, verfolgt die hier vorgenommene Unterteilung das Ziel der *Bewertung* und unterscheidet von den genannten Rahmenwerken durch die zusätzlich eingeführte DLV-Ebene. Beim Entwurf von Techniken für verlässliche Netzwerke stellt die Integration und Koordination von Methoden zur Steigerung der Verlässlichkeit auf verschiedenen Verlässlichkeits-Ebenen eine Herausforderung dar, deren Bewältigung zum aktuellen Zeitpunkt Gegenstand aktiver Forschungsarbeit ist [Ben00, Yur99].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird in Kapitel 7 auf einen speziellen verkehrstheoretischen Aspekt der Verlässlichkeit auf der Transportdienst-Ebene eingegangen; Kapitel 8 behandelt die Simulationsbasierte Verlässlichkeitsanalyse auf DLV-Ebene.

3.4.2 Metriken

Eine *Metrik* ist eine Funktion, die Systemzuständen eines Netzwerkes oder einer Netzwerk-Komponente reelle⁹ Zahlen zuordnet. Durch die Anwendung von Metriken werden folgende Bewertungsziele erreicht:

- *Gewinnung von Qualitätsangaben (Absolutbewertung)*
- *Vergleichbarkeit verschiedenartiger Systeme (Relativbewertung)*.

Die Orientierung an der im vorangehenden Abschnitt eingeführten Ebenen-Betrachtung legt eine Unterscheidung zwischen *Leistungs-Metriken* und *Verlässlichkeits-Metriken* nahe:

⁹In der Regel handelt es sich hierbei um positive reelle Zahlen.

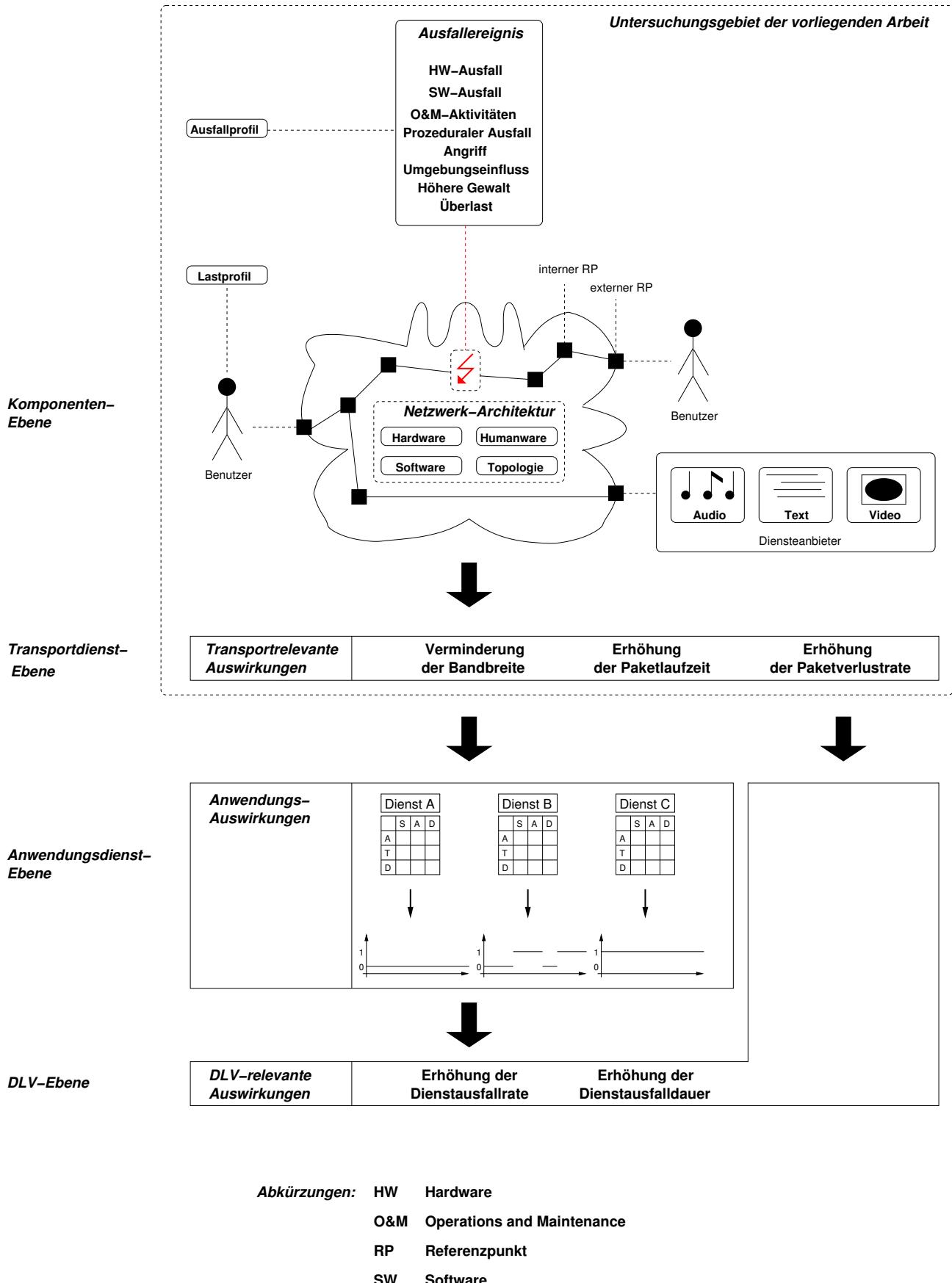


Abbildung 3.6: Vorwärtsgerichtete Verlässlichkeitsbewertung

- Leistungs-Metriken bewerten die Bereitschaft zur Erbringung spezifizierter Transport- bzw. Anwendungsdienste für einen aktuellen Systemzustand (*punktuelle Betrachtung*).
- Verlässlichkeits-Metriken stellen langfristige Aussagen über Leistungs-Anforderungen dar (*statische Betrachtung*).

Bezüglich der Wahl der Referenzpunkte, die der Anwendung von Metriken vorausgeht, ist eine Unterteilung nach *Benutzer-Metriken* und *System-Metriken* angebracht:

- Benutzer-Metriken sind Ende-zu-Ende-Metriken, d. h. hier wird eine Bewertung zwischen Benutzer-Schnittstellen bzw. zwischen Benutzer-Schnittstelle und Anwendungs-Schnittstelle vorgenommen (vgl. Abbildung 3.6). Dabei ist eine Überschreitung von Netzgrenzen möglich, was eine Bewertung im Allgemeinen erheblich erschwert.
- System-Metriken werden zur Bewertung des Netzwerk-Zustandes eingesetzt und verwenden Informationen, die aus netzinternen Knotenpunkten und aus Netzübergangs-Knotenpunkten gewonnen werden.

Aus dem Blickwinkel der Statistik ist der mit der Metrik verbundene *Bewertungszustand* interessant: Zum Beispiel richtet sich Verfügbarkeitszusicherung von 99 % an den *Intaktzustand*, während eine mittlere Ausfalldauer von 30 Minuten / Jahr eine Aussage über den *Defektzustand* darstellt. Der Bewertungszustand ist im Hinblick auf die Streuung, die statistischen Schätzverfahren zur Bewertung der Verlässlichkeit zugrunde liegt, von gewichtiger Bedeutung.

Abbildung 3.7 stellt die beschriebene Kategorisierung von Metriken graphisch dar, Tabelle 3.2 gibt dazu einige Beispiele.

| | Leistungs-Metrik | Verlässlichkeits-Metrik |
|------------------------|---|---|
| System-Metrik | Paketverlustrate (Transportdienst-Ebene) Durchsatz (Transportdienst-Ebene) | Mittlere Dienst-Restorationsdauer (Transportdienst-Ebene) |
| Benutzer-Metrik | (Ende-zu-Ende-) Laufzeit (Transportdienst-Ebene) | Dienstverfügbarkeit (Transportdienst-Ebene oder Anwendungsdienst-Ebene) |

Tabelle 3.2: Beispiele für Metriken

Für die Bewertung auf Transportdienst-Ebene sind drei **Basiskenngrößen** von besonderer Bedeutung, da der Großteil der zur Bewertung der Qualität von Kommunikationsdiensten eingesetzten Metriken auf diesen basiert [Whi97, Gue99]:

- **Verfügbare Bandbreite**
Die verfügbare Bandbreite definiert die Menge der pro Zeiteinheit zwischen einem Sender und einem (mehreren) Empfänger(n) übertragbaren Datenmenge (vgl. Abschnitt 3.3.1).
- **Paketverlustrate [packet loss rate]**
Die Paketverlustrate definiert für ein einzelnes Sender-Empfänger-Paar den Anteil der innerhalb einer festen Zeitspanne beim Empfänger angekommenen Pakete bezogen auf die Gesamtanzahl der vom Sender an den Empfänger geschickten Pakete (*Ende-zu-Ende-Sichtweise*) bzw. den Anteil der innerhalb einer festen Zeitspanne von einer Vermittlungseinrichtung verworfenen Pakete bezogen auf die Menge der insgesamt zur Vermittlung empfangenen Pakete (*Punkt-Sichtweise*).

- *Paketlaufzeit [delay]*

Durch die Paketlaufzeit wird die zeitliche Verzögerung zwischen dem Aussenden eines Paketes beim Sender und dem Empfang des Paketes beim Empfänger ausgedrückt. Der Begriff kann sowohl auf die Verzögerung benachbarter Knoten als auch auf Ende-zu-Ende-Knotenpaare bezogen werden. Die Paketlaufzeit wird von folgenden Faktoren beeinflusst [Ber87]:

- *Bearbeitungsverzögerung [processing delay]*

Die Bearbeitungsverzögerung umfasst alle Verzögerungen, die sich aus der Auswertung des Paket-Kopfes im vermittelnden Netzknoten ergeben. Dazu gehört z. B. die Wegewahl-Berechnungen oder die Entscheidung über das Verwerfen eines Paketes.

- *Warteschlangen-Verzögerung [queueing delay]*

Je nach Ausprägung der vermittelnden Netzknoten treten Warteschlangen in der Form von *Eingangs-Warteschlangen* und *Ausgangs-Warteschlangen* auf. Eingangs-Warteschlangen nehmen Pakete nach deren Ankunft im vermittelnden Netzknoten auf, bis sie von der verarbeitenden Einheit (Prozessor) des Knotens bearbeitet werden können. Ausgangs-Warteschlangen bilden einen Puffer zwischen Prozessor und Verbindungsleitung.

- *Sendeverzögerung [transmission delay]*

Die Sendeverzögerung beschreibt die Zeitspanne, die zwischen dem Senden des ersten und des letzten Paket-Bits vergeht.

- *Signallaufzeit [propagation delay]*

Die Signallaufzeit ist die Zeitspanne, die ein Paket zum Überqueren einer Verbindungsleitung benötigt. Die Signallaufzeit hängt im Wesentlichen von der Länge und der physikalischen Beschaffenheit der Verbindungsleitung (im Allgemeinen Kupfer oder Glasfaser) ab.

Aus diesen Basiskenngrößen abgeleitet sind z. B.

- *Laufzeitvariation [Jitter]*

Die Laufzeitvariation beschreibt die Stärke der Schwankungen der Laufzeit zwischen Sender und Empfänger [Man01].

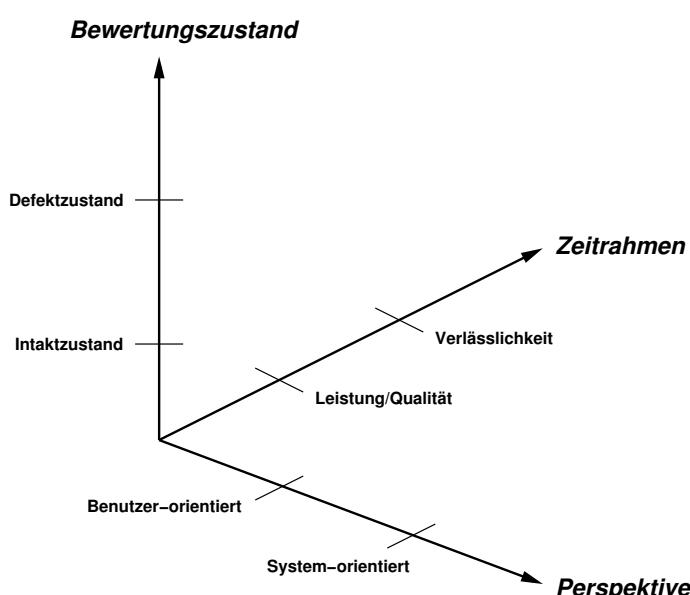


Abbildung 3.7: Klassifikation von Metriken

- **Durchsatz [Throughput]**

Hierbei wird unterschieden zwischen *Netto-Durchsatz* (Durchsatz der Nutzdaten) und *Brutto-Durchsatz* (Durchsatz inklusive Kontrollinformationen). Der Durchsatz kennzeichnet die Leistungsfähigkeit einer einzelnen Vermittlungseinrichtung (*Punkt-Sichtweise*) oder eines durch zwei Referenzpunkte definierten Netzsegmentes (*System-Sichtweise*) an Hand der pro Zeiteinheit vermittelnden Datenmenge.¹⁰

Bei der im weiteren Verlauf der Arbeit entwickelten Modellierung spielt der Begriff des Ausfalls in einem paketvermittelnden Netzwerk eine tragende Rolle. Nach den getroffenen Vorüberlegungen ist folgende Begriffsbildung sinnvoll (vgl. [Ell97] und Abb. 3.6):

Definition 3.2 Ein *Ausfall* ist ein Ereignis, das zur Nickerfüllung der spezifizierten Leistung einer System-Komponente oder eines Systems führt und durch Hardware-Fehler, Software-Fehler, menschliches Fehlverhalten (Bedienungsfehler, Unterlassungsfehler, etc.), Umgebungseinflüsse (Unterbrechung der Stromversorgung, Wasserschaden, mangelnde Temperierung, etc.), höhere Gewalt (Blitzschlag, Feuer, Erdbeben, etc.), bewussten Angriff oder Überlast hervorgerufen wird.

Ausfälle auf der Komponenten-Ebene werden als **Komponenten-Ausfälle**, Ausfälle auf der Transportdienst-Ebene als **Systemausfälle**, und Ausfälle auf der Anwendungsdienst-Ebene als **Anwendungs-Ausfälle** bezeichnet,

Hardware-bedingte Ausfälle, Software-bedingte Ausfälle und Ausfälle durch menschliches Fehlverhalten sind der Netzwerk-Architektur zuzuordnen, während Ausfälle durch Umgebungseinflüsse und durch höhere Gewalt durch die Netzwerk-Umgebung verursacht werden (vgl. Abschnitt 5.1).

Die Unterscheidung zwischen **Komponenten-Ausfall** und **Systemausfall** ist wesentlich: Abhängig von der Netzwerk-Architektur führt ein Komponenten-Ausfall nicht notwendigerweise zu einem Systemausfall und kann ggf. durch Verlässlichkeitsmaßnahmen (siehe Abschnitt 3.2.2) abgefangen werden.

3.4.3 Durchführung der Bewertung

Die Anwendung von Metriken innerhalb der Verlässlichkeitsbewertung erfolgt im Rahmen eines *Bewertungsverfahrens*. Die Hauptschritte sind dabei wie folgt gegeben [Can01]:

- **Festlegung von Referenzpunkten**

Generell sollte unterschieden werden zwischen *externen* und *internen* Referenzpunkten (vgl. Abbildung 3.6). Externe Referenzpunkte bilden die Schnittstelle des Transportnetzwerks zum Vertragspartner (Benutzer, Dienstleister, anderer Netzbetreiber) und sind für die vertraglich vereinbarten Zusicherungen des Netzbetreibers relevant. Interne Referenzpunkte dienen der Überwachung der Qualitätsparameter innerhalb des Netzwerkes mit dem Ziel der Erkennung von Störungen und Ausfällen, die eine Beeinträchtigung der Dienstqualität an den externen Referenzpunkten nach sich ziehen können.

- **Auswahl geeigneter Metriken**

Im Rahmen einer Dienstleistungsvereinbarung mit dem Vertragspartner ist zu entscheiden, welche Metriken zur Überwachung der vereinbarten Qualitätszusicherungen herangezogen werden. Dabei ist neben der Ermittlung relevanter Kenngrößen die *Bestimmung von Schwellenwerten*, welche akzeptierbare von nicht akzeptierbaren Qualitätseigenschaften trennen, vorzunehmen (vgl. Abschnitt

¹⁰Diese wird in der Regel in kpps [kilo packets per second] oder in Gbps gemessen.

3.4.2). Des Weiteren ist der Erfassungszeitraum bzw. die Länge und Häufigkeit der Zeitperioden, in denen Messungen zur Bewertung der Verlässlichkeit durchgeführt werden, zu spezifizieren.

Hersteller von Netzwerk-Komponenten und Netzbetreiber verwenden oft sehr unterschiedliche Metriken zur Bewertung der Verlässlichkeit von Komponenten und Dienstleistungen. Dies macht Verlässlichkeitsaussagen schwierig, insbesondere wenn Dienste über Netzzgrenzen hinweg erbracht werden und Ende-zu-Ende-Bewertungen vorgenommen werden sollen. Neben der Standardisierung der Verlässlichkeitsmetriken an sich ist in diesem Zusammenhang auch eine Standardisierung der Messverfahren bei der Anwendung von Metriken anzustreben.

- **Durchführung**

Die Verlässlichkeitsbewertung kann im *Wirkbetrieb* (empirische Untersuchung) oder im *Modell* vorgenommen werden. Empirische Untersuchungen sind in der Regel aufwändiger als Modellversuche. Um statistisch verwertbare Aussagen zu erhalten, müssen empirische Studien angesichts der Seltenheit von Netzwerk-Ausfällen eine angemessen lange Durchführungsduer besitzen.

Verlässlichkeitsanalysen im Wirkbetrieb werden in der Regel eingesetzt, um die innerhalb einer Dienstleistungsvereinbarung getroffenen Zusicherungen zu überwachen (*a posteriori-Bewertung*) und werden dabei in Form von Stichproben-Messungen durchgeführt.

Für *a priori-Bewertungen*, die dazu dienen, die Verlässlichkeit eines Systems vor der Inbetriebnahme zu evaluieren, können Modelle (*physikalische Modelle*, *analytische Modelle* oder *Simulationsmodelle*, vgl. Abschnitt 4.1) eingesetzt werden. Auf die Vor- und Nachteile analytischer Modelle und die spezielle Eignung von Simulationsmodellen für die Verlässlichkeitsanalyse von Netzwerken wird im folgenden Kapitel vertieft eingegangen.

Kapitel 4

Existierende Modellierungstechniken zur Verlässlichkeitsanalyse von Netzwerken

Das vorausgehende Kapitel entwickelte einen Leitfaden zur praktischen Durchführung von Netzwerk-Verlässlichkeitsanalysen. Im Gegensatz dazu beschäftigt sich diese Sektion mit den Modellierungsverfahren zur Verlässlichkeit- und Zuverlässigkeitssanalyse von Netzwerken.

Nachdem der einführende Abschnitt 4.1 die grundlegenden Probleme bei der Modellierung von Rechensystemen erörtert, wird anschließend auf die Modellierungstechniken eingegangen, die für die Leistungs- und Verlässlichkeitssanalyse von Netzwerken relevant sind. Eine Kritik bestehender Verfahren, durch die der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modellierungsansatz motiviert wird, schließt das Kapitel.

4.1 Modellierung von Systemen

Ein *Modell* ist ein Abbild eines realen Systems. Modelle dienen der *Entscheidung*, wenn es darum geht, eine von verschiedenen System-Alternativen auszuwählen; sie dienen der *Prognose*, wenn die Vorhersage zukünftiger Verhaltensweisen eines Systems angestrebt wird, oder sie werden als *Erklärungsmodelle* eingesetzt, wenn funktionale Zusammenhänge des realen Systems an Hand des Modells erklärt werden sollen.

Funktional betrachtet wird bei der modellgestützten Analyse eines Rechensystems eine Abbildung von *Modell-Eingabeparametern* auf eine Menge von *Modell-Ausgabegrößen* untersucht (vgl. [Syr97]).

In der Leistungs- und Verlässlichkeitssanalyse von Rechensystemen lässt sich unterscheiden zwischen

- *Physikalischen Modellen*

Physikalische Modelle bilden Rechensysteme oder Teile von Rechensystemen in ihrer physikalischen Ausprägung nach. Beispielsweise betreibt die Deutsche Telekom AG in Nürnberg ein Testzentrum für Vermittlungsstellen, in dem innerhalb einer im Vergleich zum deutschen Vermittlungsnetz verkleinerten Umgebung insbesondere Software-Änderungen vor der Übernahme in den Wirkbetrieb evaluiert und getestet werden.

Im weiteren Sinne soll in diesem Zusammenhang auch das Originalsystem als physikalisches Modell verstanden werden. Eine dem Originalsystem entspringende Messreihe über ein Leistungsmerkmal wird im Folgenden als *empirische Messreihe* bezeichnet.

Wesentliche Nachteile physikalischer Modelle sind der für ihre Erstellung hohe Aufwand bzw. die fehlende Möglichkeit, am Originalsystem Änderungen zum Zwecke der Leistungs- und Verlässlichkeitssanalyse vornehmen zu können. Haupthinderungsgründe für solche Änderungen sind die

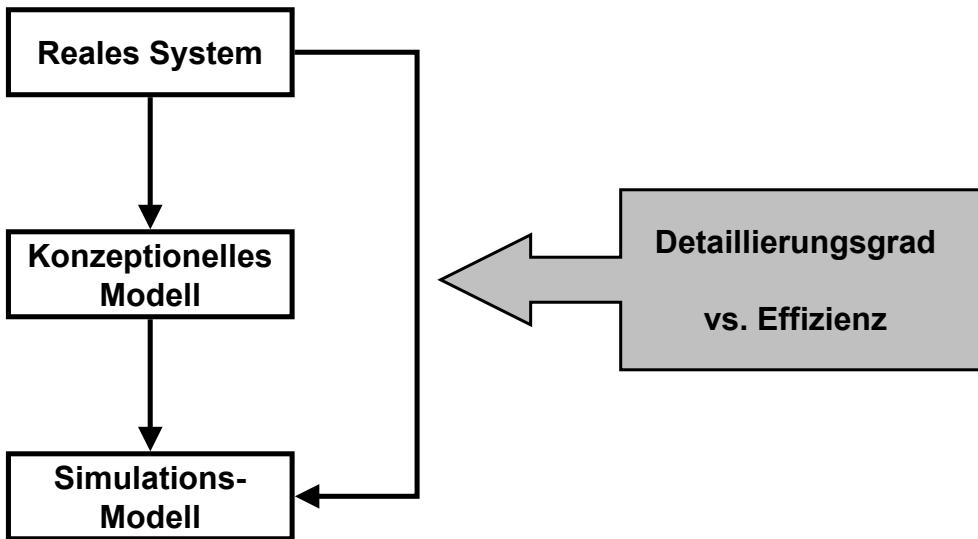


Abbildung 4.1: Reales System, konzeptionelles Modell und Simulationsmodell

Gefahr der Beeinträchtigung des Wirkbetriebs oder die für eine Leistungsanalyse zu hohe bzw. zu geringe Geschwindigkeit des Originalsystems.

Die Vorteile physikalischer Modelle im Vergleich zu analytischen Modellen und Simulationsmodellen liegen in der relativ hohen *Abbildungsgenauigkeit*, d. h. der Übereinstimmungsgrad zwischen realem System und Modell ist hier im Allgemeinen höher. Dies gilt in besonderer Weise für Realisierungen von Ausgangsgrößen, die sich aus empirischen Messungen ergeben.

- *Analytischen oder mathematischen Modellen*

Innerhalb der Entwurfsphase von Rechensystemen ist es oft sinnvoll, zur Erhöhung der Leistung und der Verlässlichkeit verschiedene Systementwürfe miteinander zu vergleichen und grundlegende Änderungen am bestehenden Entwurf vorzunehmen. Da bei physikalischen Modellen der finanzielle Aufwand für eine derartig flexible Modellierung aus der Ertragsperspektive zu hoch ist, eignen sich analytische Modelle und Simulationsmodelle hier in besonderem Maße.

Der Vorteil analytischer Modelle¹ liegt in deren unbegrenzter Skalierbarkeit, der Möglichkeit, Auswirkungen der Änderungen der *Eingabeparameter* (s. u.) zügig quantitativ bewerten zu können und der Schnelligkeit, mit der analytische Verfahren angewendet werden können. Die Schnelligkeitsvorteile gegenüber simulativen Verfahren machen sich insbesondere bei der *Sensitivitätsanalyse* von Eingabeparametern bemerkbar.

Einer der wesentlichen Nachteile ist die Anfälligkeit gegenüber Verletzungen von Voraussetzungen, welche für die Anwendbarkeit eines analytischen Modells notwendig sind. Darüber hinaus nehmen analytische Modelle im Gegensatz zu physikalischen Modellen in der Regel eine erhebliche Vereinfachung des realen Systems vor, wodurch die Abbildungsgenauigkeit gesenkt wird.

Analytische Verfahren weisen in der Regel einen höheren Abstraktionsgrad auf als simulative oder physikalische Verfahren.

- *Simulationsmodellen*

Bei steigender Komplexität von Rechensystemen ist die Anwendung analytischer Modelle oftmals nicht mehr möglich, was den Einsatz von Simulationsmodellen erfordert und rechtfertigt.

¹Vor- und Nachteile beziehen sich hier immer auf die beiden jeweils anderen Modellklassen.

Dabei wird ein *konzeptionelles Modell* des zu modellierenden realen Systems entworfen, dessen Abläufe innerhalb eines *Simulationsmodells* nachgebildet werden. Das Simulationsmodell läuft in Form eines *Simulationsprogramms* auf einem Rechner ab (vgl. Abb. 4.1). Die Abbildung des realen Systems auf ein konzeptionelles Modell wird im Rahmen dieser Arbeit in Kapitel 5 behandelt, der Übergang vom konzeptionellen Modell zum Simulationsmodell ist Inhalt von Kapitel 6.

Die *Abbildungsgenauigkeit* des Simulationsmodells wird dabei entscheidend von den konkurrierenden Größen Effizienz und Detaillierungsgrad bestimmt. Effiziente Modellbildung bedeutet, dass der Detaillierungsgrad des Modells sich auf die zur Beurteilung der Ausgabegrößen erforderlichen wesentlichen strukturellen und funktionalen Eigenschaften des realen Systems beschränkt. Dies geht in der Regel zu Lasten der Abbildungsgenauigkeit.

Vorteile von Simulationstechniken sind die hohe Flexibilität, die sich bezüglich des Detaillierungsgrades und der damit verbundenen Abbildungsgenauigkeit und bezüglich der Unabhängigkeit von den Voraussetzungen analytischer Modelle ergibt. Begrenzt werden die Einsatzmöglichkeiten von Simulationsmodellen durch die erforderliche Rechenzeit und durch den notwendigen Speicherbedarf. Außerdem sind die Entwicklungskosten für Simulationsmodelle im Allgemeinen um ein Vielfaches höher als bei analytischen Modellen.

Zusammenfassend lassen sich aus den Ausführungen über die drei genannten Modellierungstechniken von Rechensystemen folgende wesentlichen Auswahlkriterien bilden:

- *Abbildungsgenauigkeit*
- *Detaillierungsgrad*
- *Verallgemeinerbarkeit*
- *Kostenaufwand (Personalaufwand und Sachaufwand)*.
- *Rechenaufwand*²

Abbildung 4.2 gibt einen Überblick über die für den Bereich der Netzwerkverlässlichkeitsuntersuchung relevanten nicht-physikalischen Modellierungstechniken, die im Weiteren ausführlich beschrieben werden. Prinzipiell lassen sich als Ziele der Modellierung die beiden Grundaufgaben *Entwurf* neuer Systeme und *Analyse* bestehender Systeme unterscheiden.

4.2 Konnektivitäts-basierte Netzwerk-Zuverlässigkeitsanalyse

Die grundlegenden Arbeiten im Bereich der theoretischen Netzwerkzuverlässigkeitsanalyse [Col87, Rai90b, Rai90a, Bal92, Sto92, Gro95] bilden eine Synthese aus Graphentheorie und Stochastik. Dabei wird folgende Problemstellung untersucht:

In einem aus *Knoten* und *Verbindungsleitungen* bestehenden Netzwerk kann es zu Ausfällen der *Netzwerk-Komponenten* kommen. Dabei gehen einige Modelle davon aus, dass die Netzknoten ausfallsicher sind und dass lediglich die Verbindungen zwischen den Knoten ausfallen können, andere Modelle berücksichtigen ebenfalls den Ausfall der Knoten³.

²Dieser Aufwand ist nur bei Simulationsmodellen relevant.

³In gerichteten Netzwerken genügt es, den Ausfall von Kanten zu berücksichtigen. Probleme, in denen der Ausfall von Knoten angenommen wird, lassen sich durch eine einfache Transformation in Probleme umformen, in denen es nur „perfekte Knoten“ und mögliche Kantenausfälle gibt (vgl. [Bal92], Abschnitt 2.2).

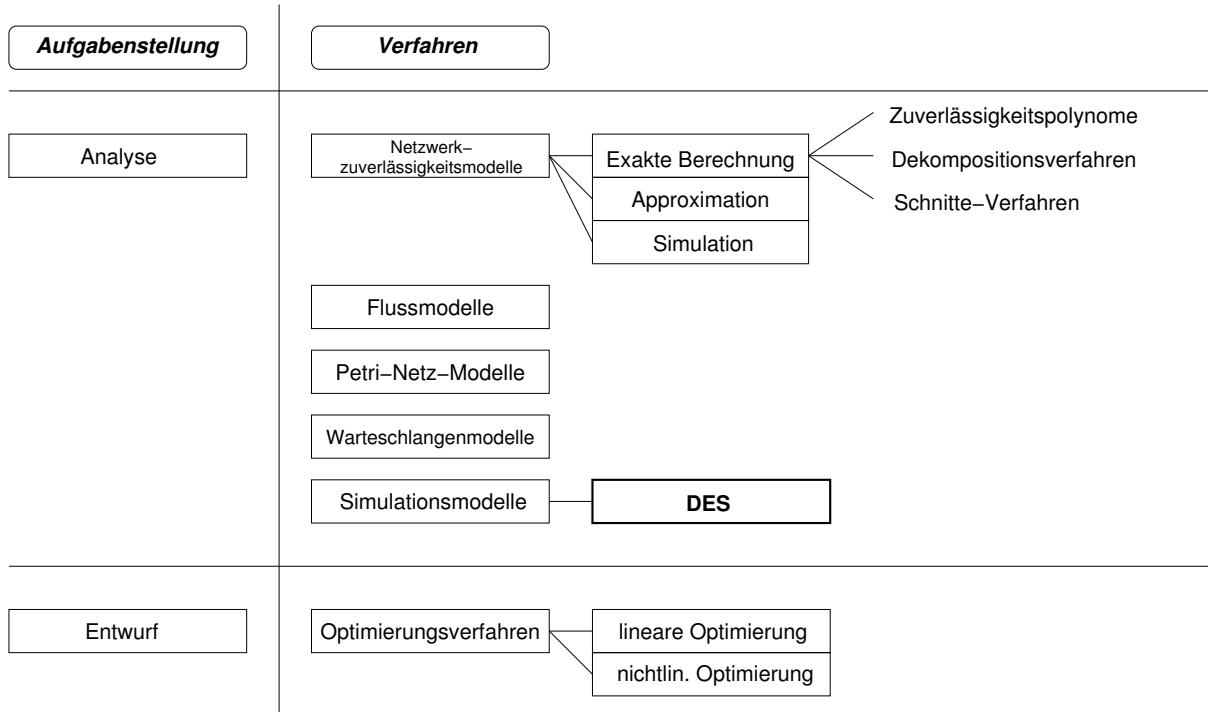


Abbildung 4.2: Zuverlässigkeitssmodelle für Netzwerke

Graphentheoretische Grundlage der Netzwerkzuverlässigkeitssproblems ist ein ungerichteter oder gerichteter Graph $G = (V, E)$. Ungerichtete Graphen werden im Allgemeinen zur Modellierung von Duplex-Betrieb eingesetzt, gerichtete Graphen (*Digraphen*) für Simplex-Betrieb. Dabei repräsentiert die Menge V die Knoten des Netzwerkes und die Menge E die Verbindungsleitungen zwischen den Knoten [Bal92, Bul97].

Das Fehlermodell des Netzwerkzuverlässigkeitssproblems basiert auf der Annahme, dass sich jede Netzwerk-Komponente stets in einem von mehreren Fehlerzuständen befindet. Am weitesten verbreitet sind binäre Fehlermodelle, in denen der Zustandsraum nur aus den beiden Zuständen {intakt, defekt} besteht, d.h. Zwischenzustände werden nicht betrachtet. In diesem Zusammenhang spricht man von *binären stochastischen Systemen* [*stochastic binary systems (SBS)*]. Jede Netzwerk-Komponente besitzt dann eine *Funktionswahrscheinlichkeit* bzw. eine *Ausfallwahrscheinlichkeit*, durch welche das Auftreten der beiden Zustände quantitativ beschrieben werden kann. Andere Fehlermodelle berücksichtigen Zwischenzustände und schaffen somit Abstufungen zwischen den Extremzuständen intakt und defekt.

Bezüglich der Frage, wie man die Zuverlässigkeit eines Netzwerkes quantitativ messen kann, lassen sich zwei große Klassen von Maßen unterscheiden: *konnektivitäts-orientierte Maße* und *leistungs-orientierte Maße* ([Bal92], Abschnitt 1.3). Die Untersuchung konnektivitäts-orientierter Maße soll in diesem Zusammenhang als *klassische Netzwerkzuverlässigkeitstheorie* [*network reliability*] bezeichnet werden [Col87, Bal92].

Konnektivitäts-orientierte Maße bewerten den Grad des Zusammenhangs eines Netzwerkes. Das Netzwerk gilt als zuverlässig, wenn von einer bestimmten Knotenmenge zu einer zweiten Knotenmenge eine funktionsfähige Verbindung existiert. Die betrachteten Knotenmengen können dabei aus einzelnen Knoten, einer (echten) Untermenge der Netzwerk-Knoten oder aber dem gesamten Netzwerk bestehen. Zu den am häufigsten untersuchten Metriken zählen:

- *Verlust des Zusammenhangs* [*loss of connectedness*]
- *Verlust der Kommunikationsfähigkeit eines Knotenpaares* (*s-t-Konnektivität* [*s-t reliability*])

- Verlust der Kommunikationsfähigkeit eines ausgezeichneten Knotens mit einer Menge von Knoten (k -Terminal-Konnektivität [k -terminal reliability])
- Verlust der Kommunikationsfähigkeit eines Knotens mit allen anderen Knoten ([all-terminal reliability])

Zielstellung der konnektivitäts-basierten Netzwerkzuverlässigkeitssanalyse ist die Untersuchung der durch die genannten Metriken induzierten Funktionswahrscheinlichkeiten des Gesamt-Netzwerkes (Netzwerk-Zuverlässigkeit) in Abhängigkeit der Funktionswahrscheinlichkeiten der Netzwerk-Komponenten.

Eines der Hauptprobleme bei der Berechnung der Netzwerkzuverlässigkeit ist die dabei auftretende Komplexität. Dies kann an folgender Überlegung verdeutlicht werden:

Es soll angenommen werden, dass ein ungerichtetes Netzwerk $G = (V, E)$ mit einer Knotenmenge V und einer Kantenmenge E zugrunde liegt, in dem lediglich die Kanten ausfallen können. Als Ausfallkriterium wird der Verlust des Zusammenhangs des Netzes [loss of connectedness] betrachtet. Ferner wird angenommen, dass alle Kanten dieselbe Funktionswahrscheinlichkeit p , d. h. die Ausfallwahrscheinlichkeit $1 - p$ besitzen. Es wird ferner davon ausgegangen, dass es keine Kantengewichtungen gibt. Die Anzahl der Kanten des Netzwerkes G sei $|E| = m$, die Anzahl der Knoten des Netzwerkes sei $|V| = n$.

Eine erste Annäherung an das Netzwerkzuverlässigkeitssproblem ergibt sich, wenn man alle möglichen Intakt-Defekt-Kombinationen der Kanten des Netzwerkes betrachtet. Die Funktionswahrscheinlichkeit des Netzes soll mit $Rel(G, p)$ bezeichnet werden. Sei $s \in \{0, 1\}^m$ ein Zustand des Netzwerkes. s gibt für jede Kante i an, ob diese intakt ($s(i) = 1$) oder defekt ($s(i) = 0$) ist. Sei $S = \{0, 1\}^m$ die Menge aller möglichen Zustände des Netzwerkes. Die Funktion

$$\varphi : S \rightarrow \{0, 1\}$$

gebe für jeden der Zustände an, ob das Netzwerk in diesem Zustand intakt oder defekt ist. Ferner gebe

$$u(s) : S \rightarrow \{0, m\}$$

die Anzahl der Kanten an, die im Zustand s intakt sind. Dann ist die Zuverlässigkeit des Netzwerkes gegeben durch

$$Rel(G, p) = \sum_{s \in S} \varphi(s)p^{u(s)}(1 - p)^{m - u(s)}. \quad (4.1)$$

Beispiel: Gegeben sei das in Abbildung 4.3 dargestellte Ringnetzwerk $G_{Ring,3}$. Wie man leicht einsieht,

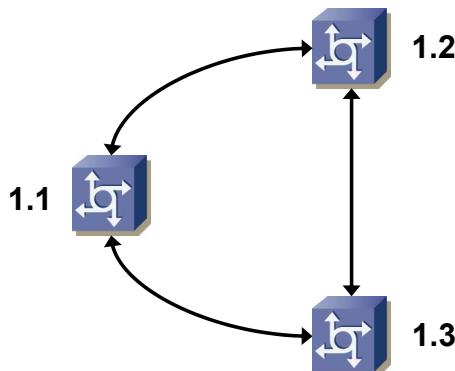


Abbildung 4.3: Drei-Knoten-Ringtopologie

ist das Netzwerk bezüglich des Kriteriums Zusammenhangsverlust intakt, sobald mindestens zwei der

drei Kanten intakt sind. Tabelle 4.1 dokumentiert hierzu die Berechnung der Summanden aus Gleichung (4.1).

Für die Netzwerkzuverlässigkeit erhält man nach Formel (4.1) das Ergebnis

$$Rel(G_{Ring,3}, p) = 3 \cdot p^2 \cdot (1 - p) + p^3. \quad (4.2)$$

Für die meisten der genannten Metriken wächst die Anzahl der notwendigen Rechenschritte wie im dargestellten Beispiel exponentiell mit der Anzahl der Netzwerk-Knoten, was die Berechnung bei großen Netzen erheblich erschwert oder verhindert (zu Einzelheiten siehe [Bal92], Abschnitt 2.4).

Den Schwerpunkt der traditionellen Netzwerkzuverlässigkeitsanalyse bildet die Untersuchung der genannten und daraus abgeleiteter Metriken mit den folgenden Aufgaben:

- Untersuchung spezieller Topologien und spezieller Randbedingungen, die eine vereinfachte Berechnung der Netzwerk-Zuverlässigkeit erlauben (z. B. vollständige Graphen mit einheitlichen Ausfall-Wahrscheinlichkeiten)
- Berechnung von oberen und unteren Schranken [bounds] für die Netzwerk-Zuverlässigkeit
- Generierung von Heuristiken zur Approximation der Netzwerk-Zuverlässigkeit.

Zur Beschreibung des Grades der Konnektivität eines Netzwerkes werden oft die Begriffe *Zusammenhangskomponente*, *minimaler Schnitt* [*minimal cut*] und *konnektiert* [*connected*] benutzt [Rai90b]. Eine Zusammenhangskomponente eines Graphen ist ein zusammenhängender Teilgraph, der mit dem Ein minimaler Schnitt definiert dabei die minimale Anzahl an Kanten (Knoten), die aus einem Graphen entfernt werden müssen, damit sich die Anzahl der Zusammenhangskomponenten des Graphen um eins erhöht. Ist diese Zahl durch $k \in \mathbb{N}$ gegeben, dann heißt der zugehörige Graph k -konnektiert⁴. Ein typisches Beispiel für eine 2-Kanten-konnektierte Topologie ist ein Ring.

Konnektivitäts-basierte Netzwerk-Zuverlässigkeitsuntersuchung gehört zu den abstraktesten Betrachtungsweisen des Forschungsgebietes und beschränkt sich auf den Einflussfaktor Topologie. Die Planung der topologischen Struktur eines Netzes ist oft der erste Schritt innerhalb der Gesamtnetz-Planung und wird in der Praxis zum Teil unabhängig von weiteren Planungsschritten betrachtet, bei denen weitere Determinanten wie Verkehrseinflüsse analysiert werden [Sto92].

Der hohe Abstraktionsgrad von Konnektivitäts-Modellen erlaubt die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsbereiche wie Straßen- und Schienennetze oder Versorgernetzwerke.

⁴Falls nicht klar ist, ob die Kanten- oder die Knoten-Konnektivität gemeint ist, sagt man auch, der Graph sei k -Kanten-konnektiert oder k -Knoten-konnektiert.

| s | $u(s)$ | $m - u(s)$ | $\varphi(s)$ | $\varphi(s) \cdot p^{u(s)} \cdot (1 - p)^{m-u(s)}$ |
|-----------|--------|------------|--------------|--|
| (0; 0; 0) | 0 | 3 | 0 | 0 |
| (0; 0; 1) | 1 | 2 | 0 | 0 |
| (0; 1; 0) | 1 | 2 | 0 | 0 |
| (0; 1; 1) | 2 | 1 | 1 | $p^2 \cdot (1 - p)$ |
| (1; 0; 0) | 1 | 2 | 0 | 0 |
| (1; 0; 1) | 2 | 1 | 1 | $p^2 \cdot (1 - p)$ |
| (1; 1; 0) | 1 | 2 | 1 | $p^2 \cdot (1 - p)$ |
| (1; 1; 1) | 3 | 0 | 1 | p^3 |

Tabelle 4.1: Berechnung der Netzwerkzuverlässigkeit für das Ringnetzwerk mit drei Knoten

4.3 Netzwerkflussmodelle

Im Gegensatz zu den vorgestellten, ausschließlich auf Konnektivität basierenden Metriken werden bei Netzwerkflussmodellen zusätzliche Kenngrößen der Netzwerk-Komponenten wie Kapazität der Kanten oder Puffergröße der Knoten in die Modellbildung integriert. Dabei wird in den meisten Modellen der maximale Fluss von einer Knotenmenge zu einer anderen Knotenmenge berechnet [For62]. Der Begriff Netzwerkzuverlässigkeit wird interpretiert als Wahrscheinlichkeit dafür, dass der Fluss von einer Menge von Knoten zu einer anderen Menge von Knoten eine bestimmte Schwelle übersteigt [Lee80, Deu82, Var94]. Unrealistischerweise wird davon ausgegangen, dass der Verkehr von der Quelle zum Ziel beliebig innerhalb des Netzwerkes verteilt werden kann. In der Praxis ist dies jedoch kaum möglich. Vielmehr liegt hier in der Regel die Situation vor, dass eine gewählte Route vom Sender zum Empfänger über einen längeren Zeitraum beibehalten wird. In leitungsvermittelnden Netzwerken entspricht dieser Zeitraum mindestens der Dauer einer Verbindung. Auch in paketvermittelnden Netzwerken findet nur sehr selten während der Dauer einer Verbindung eine Änderung der Route zwischen Sender und Empfänger statt (zur „Pfad-Beständigkeit“ bei der Übertragung der Segmente einer gemeinsamen TCP-Verbindung vgl. [Pax97a]). Bei Netzwerken, die die Technik der *virtuellen Pfade* benutzen, wird der zu Beginn der Verbindung generierte Pfad vom Sender zum Empfänger bis zum Ende der Verbindung beibehalten.

Die in Netzwerkflussmodellen verwendeten Fehlermodelle sind in der Regel binär (s.o.).

4.4 Petri-Netz-Modelle

Petri-Netze eignen sich in besondere Weise zur Untersuchung und Darstellung asynchroner Systeme und simultaner Abläufe, wie sie z. B. bei parallelen Prozessen vorkommen.

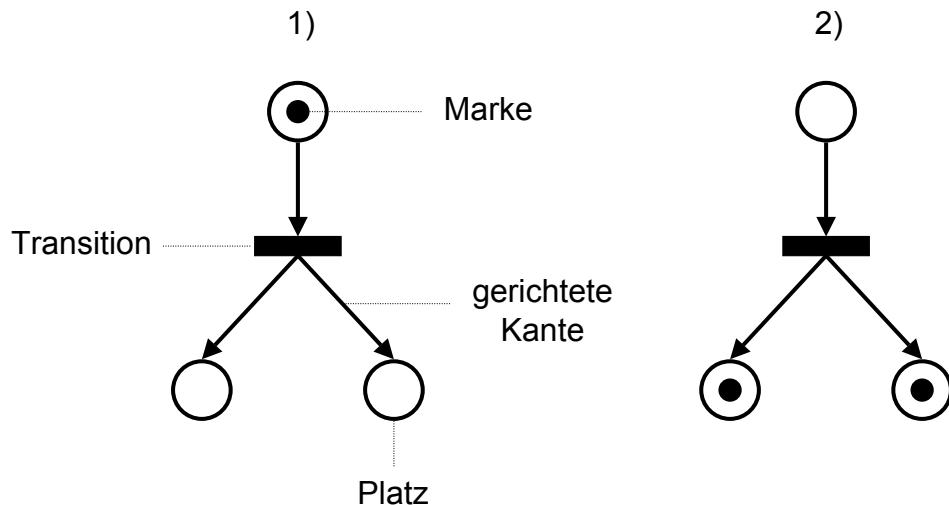


Abbildung 4.4: Schaltvorgang in einem Petri-Netz

Formal beschrieben wird ein *Standard-Petri-Netz* durch einen bipartiten Graphen, dessen Knotenmenge unterteilt wird in eine Menge von *Plätzen* und eine Menge von *Transitionen*. Plätze und Transitionen sind durch *gerichtete Kanten* miteinander verbunden.

Abbildung 4.4 zeigt die dynamische Zustandsentwicklung in einem Petri-Netz. Diese wird durch *Schaltvorgänge* bestimmt, welche die Bewegung von *Marken* innerhalb des Petri-Netzes verursachen. Voraus-

setzung für das Schalten einer Transition ist, dass alle Eingangsplätze der Transition mit einer⁵ Marke belegt sind. Der momentane Zustand des Petri-Netzes wird durch die Belegung der Plätze mit Marken definiert. Ein solcher Zustand wird auch als *Markierung* bezeichnet. Von besonderer Bedeutung für die Fortentwicklung des Petri-Netzes ist die *Anfangsmarkierung*, die den Ausgangszustand des Petri-Netzes beschreibt.

Hauptziele der Auswertung von Petri-Netzen sind einerseits die Entdeckung von unerwünschten Systemzuständen wie z. B. Verklemmungen (qualitative Analyse) und andererseits die Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten für bestimmte charakteristische Systemzustände, mit denen Leistungsaussagen über das modellierte System assoziiert werden können (quantitative Analyse). Für die qualitative Analyse genügt unter Umständen eine *strukturelle Analyse* des Petri-Netzes, bei der ausschließlich auf die topologischen Eigenschaften des bipartiten Graphen, durch den das Netz repräsentiert wird, zurückgegriffen wird. Für die quantitative Untersuchung ist eine *Analyse des Zustandsraumes* erforderlich. Diese kann auf analytischem Weg oder durch Simulation erfolgen. Dabei wird ausgehend von einer Anfangsmarkierung der Fortgang der Systemzustände analysiert.

Der Nachteil von Standard-Petri-Netzen, welcher darin besteht, dass Transitionen ohne zeitliche Verzögerung schalten, wird durch die verallgemeinerten Konzepte der *stochastischen Petri-Netze (SPN)* und der *generalisierten stochastischen Petri-Netze (GSPN)* behoben. In stochastischen Petri-Netzen besitzt ein Schaltvorgang eine Dauer, die durch eine in der Regel exponentialverteilte Zufallsvariable beschrieben wird (*stochastischer Zustandsübergang*), in GSPNs kann ein Schaltvorgang zusätzlich wie in Standard-Petri-Netzen ohne Verzögerung ablaufen (*deterministischer Zustandsübergang*). Detaillierte Einführungen in das Thema Petri-Netze und stochastische Petri-Netze geben [Rei85] und [Ajm95], die Anwendung von Petri-Netzen zur Verlässlichkeitssanalyse von Rechensystemen wird in [Sch99] behandelt.

Bei der kombinierten Verlässlichkeitss- und Leistungsanalyse kommen neben den genannten Techniken so genannte *stochastische Reward-Netze (SRN)* zum Einsatz [Tri93]. Reward-Netze erweitern die Funktionalität generalisierter stochastischer Petri-Netze durch die Einführung von Prioritäten bei zeitbehafteten Transitionen oder markierungsabhängige Kardinalitäten der gerichteten Kanten. Wesentlicher Unterschied zu den GSPNs ist die Einführung eines *Rewards*, der an den Systemzustand, also an die aktuelle Markierung gekoppelt ist. Der Reward beschreibt dabei meistens eine Ausgangskenngröße, wie z. B. die Auslastung oder den Durchsatz in einem vermittelnden Netzknoten, welche in Abhängigkeit von der aktuellen Markierung ermittelt wird. Beim Übergang vom GSPN zu einem äquivalenten SRN bleibt zwar die Größe des Zustandsraumes erhalten, jedoch kann im Allgemeinen eine erhebliche Reduzierung der Anzahl der zur Modellierung benötigten Knoten und Kanten erreicht werden, was zu wesentlich übersichtlicheren Modellen führt [Tri93]. Der dafür bezahlte Preis ist eine zusätzliche Menge von logischen Regeln, durch die die Abbildung des aktuellen Systemzustands auf den zugehörigen Reward definiert wird.

Eine der Hauptschwierigkeiten bei der gemeinsamen Untersuchung von Leistungs- und Verlässlichkeitssmerkmalen ist der gewaltige Unterschied der Größenordnungen von Zeitdauern relevanter Verlässlichkeitss- und Leistungs-Eingangsparameter. So übersteigt z. B. die Zeitspanne zwischen zwei Ausfällen einer Verbindungsleitung die Bedienzeit eines Paketes in einem vermittelnden Netzknoten um ein Vielfaches. Dies führt im Allgemeinen zu so genannten *steifen* Systemen, deren Behandlung spezieller numerischer Methoden bedarf.

⁵Bei gewichteten Petri-Netzen sind hierzu eventuell mehrere Marken notwendig.

4.5 Warteschlangenmodelle und Warteschlangennetze

Warteschlangensysteme und Warteschlangennetze [Bol98] sind prädestiniert für die Modellierung von Kommunikationsnetzwerken.

Abbildung 4.5 zeigt schematisch den Aufbau eines Warteschlangennetzes, welches aus einer Vernetzung von Warteschlangensystemen besteht. Ein einzelnes Warteschlangensystem setzt sich zusammen aus einer **Warteschlange** und einer oder mehrerer **Bedienstationen**. Kunden, die an der Bedienstation eintreffen, werden zunächst in die Warteschlange eingereiht, bis eine der Bedieneinheiten verfügbar ist. Die Zeitspanne, die der Kunde innerhalb der Warteschlange verbringt, wird als **Wartezeit** bezeichnet. Nach der Wartezeit findet die **Bedienung** des Kunden in einer freien Bedieneinheit statt. Die **Bedienzeit** beschreibt die Dauer dieses Vorganges. Die Gesamtdauer, die der Kunde im Warteschlangensystem verbringt, setzt sich aus der Wartezeit und der Bedienzeit zusammen und wird als **Verweildauer** bezeichnet.

Für die formale Beschreibung eines Warteschlangensystems wird im Allgemeinen die so genannte **Kendall-Notation** verwendet [Kle75], welche in ihrer elementaren Form die Verteilung des Zwischenankunftszeitdauer von Kunden, die Verteilung der Bediendauer und die Anzahl der Bedienstationen als Parameter enthält. So steht z. B. $M/D/1$ für ein Warteschlangensystem mit (stochastischer) exponentialverteilter Zwischenankunftszeit, deterministischer Bediendauer und einer einzigen Bedienstation.

Wesentlichen Einfluss auf die Leistungskenngrößen des Systems haben die **Bedienstrategie** und das **Warteschlangen-Management**. Durch die Bedienstrategie wird die Reihenfolge der Bedienung von Kunden in der Warteschlange festlegt. Das Warteschlangen-Management bestimmt, wie im Falle der Ankunft eines Kunden an einer gefüllten Warteschlange zu verfahren ist. Bedienstrategien und Warteschlangen-Management werden in Abschnitt 5.3.4 ausführlich behandelt.

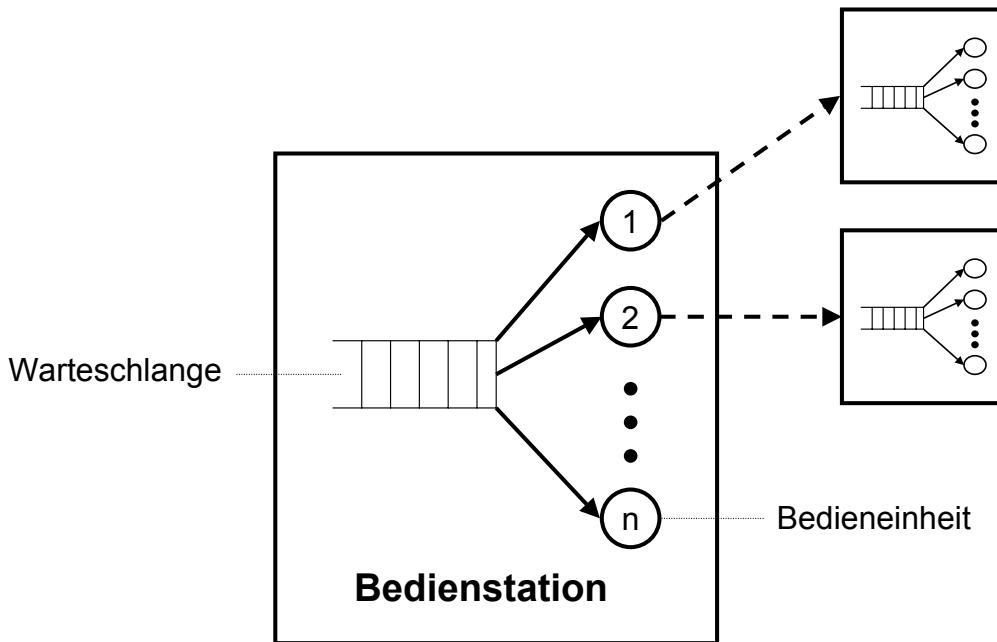


Abbildung 4.5: Warteschlangennetz

Der Großteil der Literatur zur Analyse von Warteschlangennetzen beschäftigt sich mit der Analyse der Ausgangs-Leistungskenngrößen

- Durchsatz
- mittlere Anzahl Kunden im Warteschlangensystem

- mittlere Verweildauer im System (Bediendauer + Wartedauer)
- Warteschlangen-Überlaufwahrscheinlichkeit⁶

Ein Warteschlangennetz entsteht durch die Verknüpfung der Ein- und Ausgänge mehrerer elementarer Warteschlangensysteme durch *Verbindungsleitungen*. In *geschlossenen Netzen* ist es nicht möglich, dass Kunden von außerhalb des Netzes in das Netz eindringen. Außerdem bleiben Kunden nach erfolgter Bedienung stets innerhalb des Netzes. In *offenen Netzen* ist ein Zustrom von außen und ein Abgang von Kunden nach außen möglich.

Bei den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit werden offene Warteschlangennetze verwendet. Dabei treten zusätzliche Erweiterungen der klassischen Warteschlangennetze auf, die eine analytische Behandlung erheblich erschweren. Diese sind

- Auftreten von Ausfällen (vgl. Abschnitt 5.6 und [Cha96])
- Verbindungsmodell (vgl. Abschnitt 5.5)

Traditionelle Warteschlangennetze beschreiben den Verkehrsfluss innerhalb des Netzwerkes durch *Verzweigungswahrscheinlichkeiten* $Q = (q_{i,j})$. Der Wert $q_{i,j}$ drückt die Wahrscheinlichkeit aus, dass ein Kunde nach der Bedienung in Station i zu Station j weiter wandert (*probabilistische Wegewahl einzelner Kunden*).

Essentiell für die Beschreibung von Verkehrsströmen in paketvermittelnden Netzwerken ist aber das im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigte Vorhandensein von *Verbindungen*, d. h. von Sequenzen aufeinander folgender Pakete (hier: Kunden), die mit Hilfe eines Routing-Verfahrens vom gleichen Sender zum gleichen Empfänger geleitet werden und dabei in der Regel den gleichen Pfad benutzen. Durch die Wegewahl auf einer hohen Granularitätsstufe (einzelne Pakete) wird die tatsächlich statt findende Wegewahl auf einer niedrigen Granularitätsstufe (Verbindungen) nicht angemessen beschrieben.

Im Gegensatz zu den genannten in der Literatur üblichen Leistungskenngrößen wird hier das Variabilitätsverhalten von Verkehrsströmen und die Laufzeit von Paketen untersucht (vgl. Kapitel 7). Diese Ausgangsgrößen charakterisieren im Gegensatz zu den etablierten Metriken nicht das Verhalten innerhalb einer Bedienstation, sondern beschäftigen sich mit den Verbindungsleitungen zwischen diesen (Variabilität) bzw. mit dem Gesamtnetz-Verhalten zwischen Paaren von Knotenpunkten (Laufzeit).

4.6 Software-Zuverlässigkeitsmodelle

In den letzten 20 Jahren hat der Software-Anteil der Entwicklungskosten in vermittelnden Netzknoten sowohl bei den leitungsvermittelnden Vermittlungsstellen als auch bei den paketvermittelnden Routern stetig zugenommen. Lag Anfang der achtziger Jahre der Hardware-Anteil bei ca. 90 % und der Software-Anteil bei ca. 10 %, so hat sich dieses Verhältnis bis heute nahezu umgekehrt [Dol94, Car95]. Diese wirtschaftliche Entwicklung geht einher mit einer zunehmenden Minderung der Verlässlichkeit von Netzwerken durch fehlerhafte Software. Die in Abschnitt 5.6 dokumentierte Erhebung über Ausfälle im BelWue, in der die Software-bedingten Ausfälle die größte Einzelgruppe darstellen, unterstreicht diese These.

Im Gegensatz zu Hardware-bedingten Ausfällen, die im Wesentlichen auf Alterung oder Verschleiß zurückzuführen sind, sind Software-bedingte Ausfälle immer die Folge von *Entwurfs-* oder *Implementierungsfehlern*. Die Grenzen der Testbarkeit komplexer Softwaresysteme liegen darin, dass in der Regel

⁶Diese korrespondiert mit der Paketverlustrate in paketvermittelnden Netzwerken.

nicht alle denkbaren *Pfade* innerhalb eines Softwaresystems innerhalb der Testphase durchlaufen werden können bzw. die Menge erlaubter Parameterbelegungen nicht vollständig getestet werden kann. Im Falle eines Software-bedingten Ausfalls lohnt sich die Verlagerung des ausfallverursachenden Prozesses nur dann, wenn auf dem Ersatz-System nicht dieselbe Software installiert ist und derselbe ausfallverursachende Pfad durchlaufen wird wie auf dem Originalsystem. Um dies zu vermeiden, ist *diversitäre* Software-Entwicklung notwendig, die erheblichen materiellen Aufwand verursacht und nur bei Anwendungen mit extrem hohen Sicherheitsanforderungen zu rechtfertigen ist. Der hier verfolgte Ansatz beruht auf der Überlegung, dass fehlerbehaftete Software unvermeidbar ist und dass die Dimensionierung eines Netzwerkes so vorgenommen werden muss, dass Software-bedingte Ausfälle toleriert werden können.

Für die Berücksichtigung der Qualitätseinschränkungen von Software innerhalb eines Modells sind die Ausfallcharakteristika Häufigkeit, Dauer und Menge der betroffenen Netzkomponenten (vgl. Abschnitt 5.6) relevant. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen dem Ausfallverhalten während der *Entwicklungsphase* und dem Ausfallverhalten im *Wirkbetrieb*. Legt man das *Wasserfall-Modell*⁷ mit den Phasen *Entwurf*, *Kodierung*, *Modultest*, *Integrationstest* und *Wirkbetrieb* (vgl. [Som01], ch. 3.1) für den Software-Lebensprozess zugrunde, so beschäftigt sich der Hauptteil der Forschung im Bereich der Software-Zuverlässigkeitss-Modellierung mit den *Testphasen*. Es wird dabei angenommen, dass durch systematische Tests die Menge der Software-Fehler reduziert und damit die Software-Zuverlässigkeit erhöht werden kann. Die Modellierung beschäftigt sich mit der Beschreibung der Zeitabstände zwischen Software-bedingten Ausfällen [Mus99]. Dabei hat sich die Zeiterfassung nach *Programm-Laufzeit* gegenüber der Erfassung nach *Kalenderzeit* durchgesetzt. Als Bewertungsmaßstab für die Software-Zuverlässigkeit wird das Laufzeitverhalten eines Software-Systems auf einer einzelnen Rechenmaschine zugrunde gelegt.⁸ Mathematisch wird das Software-Ausfallverhalten während der Testphase durch *inhomogene Poisson-Prozesse* dargestellt. Der Punkt-Prozess beschreibt dabei die Zeitpunkte des Ausfalls. Charakterisiert werden die in der Literatur vorhandenen und durch empirische Untersuchungen bestätigten verschiedenen Software-Zuverlässigkeitssmodelle durch den *Verlauf der Ausfallrate*, die *Ausfall-Intensität*. Die Zuverlässigkeit-Erhöhung während der Testphase äußert sich in einer abnehmenden Ausfall-Intensität.

Für die hier durchgeführte Modellierung ist nicht die Entwicklungsphase, sondern die Phase des Wirkbetriebs relevant. Dabei wird auf die in der Literatur etablierte Annahme zurückgegriffen, nach der sich Ausfälle durch einen *homogenen Poisson-Prozess* und eine damit verbundene konstante Ausfallrate modellieren lassen. Änderungen der Software-Zuverlässigkeit wie beispielsweise durch Software-Updates oder Patches werden dabei nicht berücksichtigt.

Aus der Sicht der Modellierung ist zu bemerken, dass zwar die Ursachen für Hardware- und Software-verursachte Ausfälle - und die damit verbundene Interpretation der Ausfallrate - sehr verschiedener Natur sind, die eingesetzten Modelle (für den Wirkbetrieb) sich aber kaum unterscheiden. Dies kann bei der in Abschnitt 5.6 beschriebenen Modellierung dahingehend ausgenutzt werden, dass ein und derselbe Punkt-Prozess für die Beschreibung der Ausfall-Zeitpunkte von Hardware und Software benutzt wird. Die Unterschiede zwischen Hardware-Ausfällen und Software-Ausfällen ergeben sich dann durch unterschiedliche Ausfallintensitäten und unterschiedliche Mengen ausgefallener Komponenten.

⁷Die Einschränkungen dieses Modells, insbesondere der lineare Fortlauf der einzelnen Phasen ohne Berücksichtigung notwendiger Rückkopplungen zwischen den Phasen, sind für die hier zugrunde gelegte Abstraktion nicht von Bedeutung.

⁸Bei mehreren Rechenmaschinen nimmt die Ausfall-Intensität linear zu und es sind entsprechende Bewertungsanpassungen vorzunehmen.

4.7 Simulationsmodelle

Simulationsmodelle dienen der Analyse des Verhaltens nicht trivialer dynamischer Systeme über der Zeit. Dabei muss unterschieden werden zwischen der *Systemzeit*, die sich am Zustand des realen Systems orientiert, der *Modellzeit*, welche der Systemzeit innerhalb des Modells entspricht und der *Rechenzeit*, welche die Ablaufdauer des Simulationsprogramms auf einem Rechner kennzeichnet.

Der Zustand eines Simulationsmodells ist dabei die Belegung der Ausgangsgrößen zu einem bestimmten Zeitpunkt. Ross [Ros97] unterteilt die Ausgangsgrößen⁹ in *Zustandsgrößen* wie z. B. die Anzahl der wartenden Kunden in einer Warteschlange und *Zählgrößen* wie z. B. die Anzahl der Zeitpunkte (auf einem diskreten Zeitraster), an denen einen Warteschlange leer ist.

Wesentliches Klassifizierungsmerkmal für Simulationsmodelle ist die Art der *Zustandsübergänge* des zugrunde liegenden konzeptionellen Modells (vgl. Abbildung 4.6). *Kontinuierliche Simulationsmodelle*

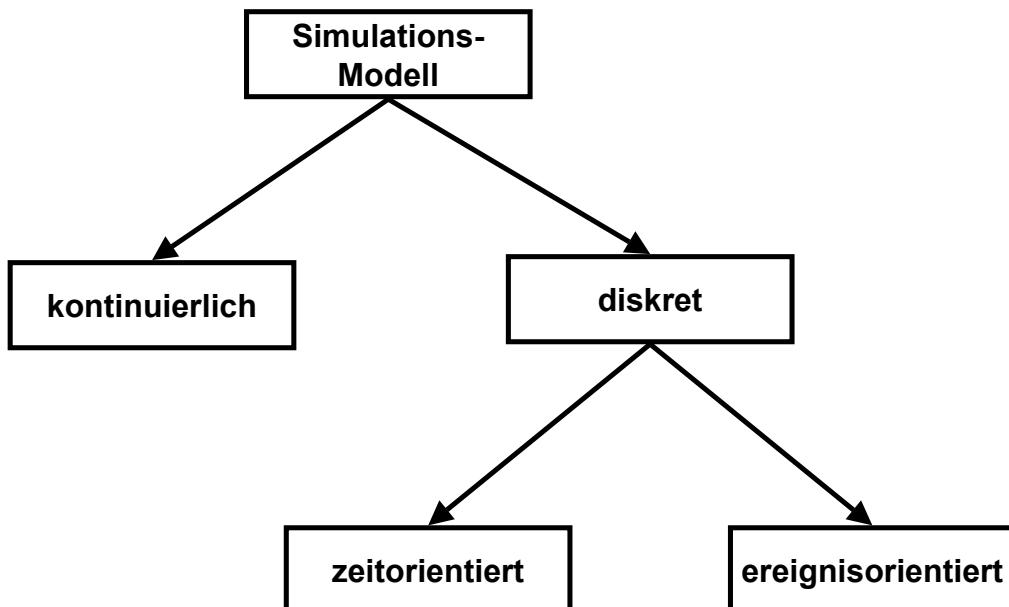


Abbildung 4.6: Klassifizierung von Simulationsmodellen nach Zustandsübergängen des zugrunde liegenden konzeptionellen Modells

eignen sich zur Analyse von Systemen, die ihren Zustand stetig über die Zeit ändern. Beispiele sind Modelle zur Wettervorhersage, Modelle für Strömungen im Windkanal oder Modelle zur Beschreibung physikalischer Vorgänge, insbesondere aus den Bereichen Mechanik und Elektrotechnik, die sich oft mit Hilfe von Differentialgleichungen beschreiben lassen. Der Übergang vom konzeptionellen Modell zum Simulationsmodell ist hierbei mit einer *Diskretisierung* verbunden, z. B. werden Differentialgleichungen dabei auf Differenzengleichungen abgebildet.

Diskrete Simulation wird im Allgemeinen bei Systemen eingesetzt, deren Zustand sich nicht permanent, sondern nur zu diskreten Zeitpunkten ändert¹⁰ Klassische Anwendungsbeispiele finden sich im Bereich der Warteschlangennetze. Hier sind die Zustandsübergänge mit Ereignissen wie der Ankunft eines Kunden an einer Warteschlange oder aber dem Abschluss der Bedienung eines Kunden verbunden.

⁹Diese sind eine Teilmenge der Systemgrößen (s. u.).

¹⁰Die Unterscheidung zwischen diskret und kontinuierlich bezieht sich demnach auf den Zeitparameterraum des Simulationsmodells, nicht hingegen auf den Zustandsraum der Ausgangsgrößen.

In *zeitorientierten* Simulationen findet ein Voranschreiten der Simulationszeit innerhalb eines fest vorgegebenen Taktes statt. Am Ende eines jeden Taktes werden die Zustandsübergänge der Ereignisse, die sich innerhalb des gerade abgelaufenen Taktes ereignet haben, durchgeführt. Dem gegenüber stehen *ereignisorientierte Simulationen*, bei denen die Zeitpunkte, an denen ein bestimmtes Ereignis eintritt, zu Zustandsänderungen führen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich diskrete ereignisorientierte Simulation eingesetzt.

4.7.1 Diskrete ereignisorientierte Simulation (DES)

Essentiell zur Beschreibung des Ablaufes eines diskreten ereignisorientierten Simulationsexperiments auf einem Rechner sind die *Simulationsuhr*, die *Systemgrößen* (Zustandsgrößen und Zählgrößen) und die *Ereignisse* [Ros97]. Aus den Systemgrößen werden nach Beendigung von Simulationsläufen Schätzwerte für die Ausgabegrößen abgeleitet. Die Menge der Ereignisse wird üblicherweise in einer *Ereignisliste* verwaltet.

Abbildung 4.7 stellt den Ablauf eines DES-Simulationslaufes graphisch dar. Zu Beginn des Versuches

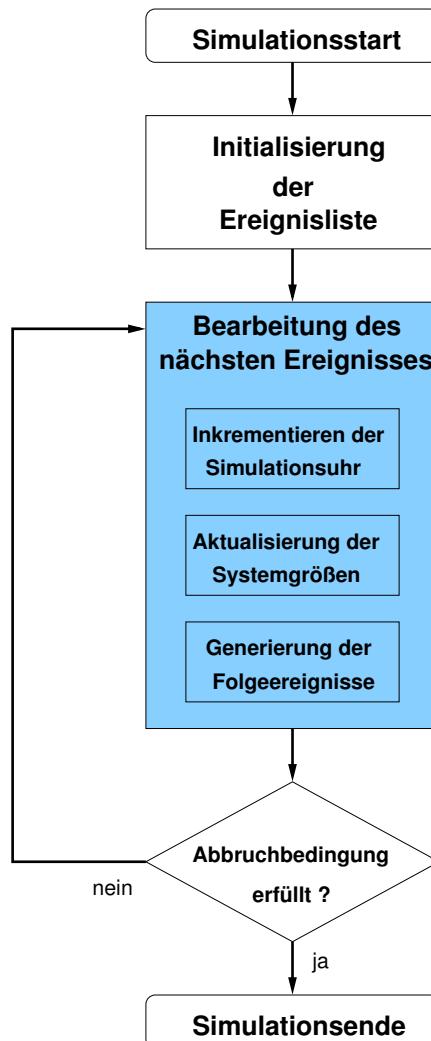


Abbildung 4.7: Ablauf eines DES-Versuches

wird die Simulationsuhr auf den Anfangswert 0 gesetzt und die Systemgrößen werden mit einem fest

definierten Anfangszustand belegt. Innerhalb der *Simulationsschleife* wird das jeweils aktuelle Ereignis bearbeitet. Dieser Schritt besteht aus der Fortschaltung der Simulationsuhr, der Aktualisierung der Systemgrößen und der Generierung der Folgeereignisse, die sich aus dem aktuellen Ereignis ergeben. An Hand einer Abbruchbedingung, die meist in konditionaler oder in temporaler Form vorliegt (vgl. Abschnitt 6.2.2), wird entschieden, ob das Simulationsende erreicht ist.

Wichtig für das Zeitverständnis bei diskreten ereignisorientierten Simulationen ist der folgende Zusammenhang [Mat89]:

Der Zustandsübergang des Simulationsmodells bei Eintritt eines Ereignisses erfordert Rechenzeit, aber keine Modellzeit. Der anschließende Übergang zum Eintrittszeitpunkt des nächsten Ereignisses überbrückt Modellzeit, kostet aber keine Rechenzeit.

4.7.2 Durchführung von Simulationsstudien

Für die Durchführung von Simulationsstudien eignet sich das folgenden Ablaufschema, welches als Leitfaden für die in Kapitel 7 beschriebenen Simulationsversuche dient:

- Spezifikation des Simulationsobjektes
- Erstellung des konzeptionellen Modells (Kapitel 5)
- Erstellung des Simulationsprogramms (Anhang A)
- Durchführen des Simulationsversuches (Kapitel 6)
- Auswertung der Simulationsergebnisse (Kapitel 6).

Vor dem Beginn der Simulationsuntersuchung ist die

- Verifikation der Simulationsumgebung (Anhang C)

und, falls möglich, eine

- Validierung des Simulationsmodells (vgl. [Pag91], Kap. 5)

durchzuführen. Bei der *Verifikation der Simulationsumgebung* wird sichergestellt, dass das eingesetzte Simulationswerkzeug in sich fehlerfrei arbeitet und das konzeptionelle Modell korrekt auf ein Simulationsmodell abbildet. Die *Validierung des Simulationsmodells* besteht aus der Prüfung der Übereinstimmung des Modells mit dem realen System.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit angestellten Ausfallsimulationen ist eine solche Validierung praktisch nicht durchführbar. Dies liegt daran, dass eine statistisch fundierte Analyse empirische Daten aus einer Vielzahl von Ausfallsituationen der jeweils selben Komponentenmenge erfordern würde. Die Erfassung der im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Zielgrößen wäre mit einer permanente Datenerfassung während des Wirkbetriebes bis zum Eintritt eines Ausfalls verbunden. Dies lässt sich für beliebige Netztopologien aus Kostengründen praktisch nicht realisieren.

4.8 Kritik der bestehenden Modellierungstechnik

Die beschriebenen Verfahren zur Verlässlichkeitssanalyse weisen unterschiedliche Vor- und Nachteile im Hinblick auf die Untersuchung von Verlässlichkeits- und Leistungs-Zielgrößen in Netzwerken auf. Im

Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde wegen der hohen Flexibilität des Modellierungsansatzes diskrete ereignisorientierte Simulation als Modellbeschreibungs-Formalismus gewählt. Diskrete ereignisorientierte Simulation erlaubt es, wesentliche Nachteile der anderen vorgestellten Techniken zu umgehen:

- **Beschränkung auf einzelne Einflussfaktoren**

Die genannten Modellierungstechniken sind für eine ganzheitliche Verlässlichkeitsbewertung, bei der die Determinanten *Topologie*, *Hardware*, *Software*, *Humanware*, das *Ausfallprofil* und das *Lastprofil* (vgl. Abschnitt 5.1) in ein Verlässlichkeitskonzept integriert werden, unzureichend.

Konnektivitäts-basierte Modelle beschränken sich auf den Einflussfaktor Topologie. Dies macht Sinn, wenn Bandbreite in ausreichendem Maß zur Verfügung steht und die Funktionalität der Netzwerk-Software und -Hardware über geeignete Restorations- oder Protektionstechniken verfügt, um redundante Kapazitäten bei Ausfalleintritt nutzen zu können.

Netzwerkflussmodellen erweitern die rein topologische Betrachtung um eine vereinfachte Modellierung des Lastverhaltens, die aber zentrale Aspekte der statistischen Eigenschaften von Verkehrsströmen in Netzwerken wie die Variabilität außer Acht lässt.

Mit analytischen Verfahren für Warteschlangennetze lassen sich Ausfälle von Netzwerk-Komponenten und die Langzeitabhängigkeit von Verkehrsströmen nicht hinreichend beschreiben. Software-Zuverlässigkeitssmodelle erfassen lediglich eine der genannten relevanten Determinanten.

Petri-Netze und deren Erweiterungen eignen sich gut für die Modellierung von Ausfall-Szenarien. Die Untersuchung der statistischen Eigenschaften von Verkehrsströmen mit Petri-Netzen ist prinzipiell möglich, führt jedoch zu einem Übermaß an Formalismus, welcher der Aufgabe nicht gerechtfertigt ist.

- **Voraussetzungen analytischer stochastischer Modellierungstechniken**

Einschränkungen analytischer stochastischer Verfahren ergeben sich vor allem bei der *Unabhängigkeitsannahme* und bei der *Voraussetzung von Verteilungsannahmen*.

Bei der Modellierung von Ausfällen tritt insbesondere bei Angriffen und Software-bedingten Ausfällen die Möglichkeit auf, dass mehrere System-Komponenten gleichzeitig betroffen sein können. Dies stellt die Unabhängigkeitsannahme aller analytischen Ausfall-Modellierungstechniken in Frage (siehe dazu [Sch01a]).

Bei den Verteilungen dominieren Exponentialverteilungen die Zuverlässigkeitstheorie (vgl. [Gae77]). Dabei hat die gute analytische Handhabbarkeit von Modellen, die auf diese und verwandte Verteilungsklassen¹¹ zurückgreifen, den Nährboden geschaffen, auf dem zahlreiche theoretische Modelle, insbesondere in den Bereichen Zuverlässigkeitstheorie und Verkehrsmodellierung, erwachsen sind. Dabei muss kritisch hinterfragt werden, ob die Annahme der Exponentialverteilung in allen Fällen die empirische Wirklichkeit treffend charakterisiert oder zumindest annähert: So kann z. B. im Bereich der Verkehrsmodellierung in paketvermittelnden Netzwerken die Annahme von Exponentialverteilungen für Verbindungsduuren inzwischen als widerlegt angesehen werden, obwohl die gesamte Verkehrstheorie bis in die frühen neunziger Jahre auf dieser Annahme basiert (zu Einzelheiten siehe Abschnitt 5.4.3).

Ein weiteres Beispiel stellt der Verbindungsgrad von Rechnern im Internet dar. Während die traditionelle Lehre von Gleichverteilungen oder Exponentialverteilungen ausgeht, haben neuere Untersuchungen gezeigt, dass Verteilungen mit der heavy-tailed-Eigenschaft (vgl. Anhang B.2.1) den Verbindungsgrad viel eher angemessen beschreiben [Wil02b].

¹¹Dies sind z. B. Hyperexponentialverteilungen, Erlangverteilungen, Phasenverteilungen oder Mischungen von Exponentialverteilungen, siehe [Sch96].

Der Hauptvorteil von Simulationsexperimenten - die hohe Flexibilität - bringt gleichzeitig Schwierigkeiten mit sich, die in der hohen Parametrisierbarkeit des Formalismus liegen. Da eine komplette Untersuchung des Zustandsraumes mangels Rechenzeit und Speicherbedarf in der Praxis niemals durchzuführen ist, ist es notwendig *Szenarien* mit voroptimierten *Parameterkonfigurationen* für die Eingangsgrößen zu bestimmen (vgl. dazu die Einleitung zu Kapitel 7).

Teil II

Durchführung

Kapitel 5

Modellierungsansatz zur Verlässlichkeitsanalyse paketvermittelnder Netzwerke

In diesem Kapitel wird der Modellierungsansatz, der den Simulationsversuchen in Kapitel 7 zugrunde liegt, dargestellt und motiviert.

Ziel der Modellierung ist es, das Verhalten aggrigerter Verkehrsströme in paketvermittelnden Netzwerken unter spezieller Berücksichtigung der Langzeitabhängigkeits-Eigenschaft in der Situation des Ausfalls von Netzwerk-Komponenten zu charakterisieren und damit eine Grundlage für die Dimensionierung fehlertoleranter paketvermittelnder Netzwerke und die Konstruktion fehlertoleranter Protokolle zu schaffen.

Der hier vorgestellte Modellierungs-Ansatz ist nicht auf eine spezielle Netzwerk-Architektur zugeschnitten. Im Sinne effizienter Modellbildung (vgl. Abschnitt 4.1) wird der Detaillierungsgrad realer Systeme im Modell soweit wie möglich reduziert, wobei die wesentlichen Einflussfaktoren für die hier untersuchten Zielgrößen (erste und zweite Momente von aggregierten Verkehrsströmen) im Modell nachgebildet werden. Dabei wird eine Aufteilung der Einflussfaktoren in die sechs Bereiche Topologie (Abschnitt 5.2), Hardware und Software (Abschnitt 5.3), Humanware¹, Lastprofil (Abschnitt 5.5) und Ausfallprofil (Abschnitt 5.6) vorgenommen.

Der Modellierung von Verkehr in paketvermittelnden Netzwerken wurde wegen des besonderen Stellenwertes selbstähnlichen Verkehrsverhaltens ein eigener Abschnitt 5.4 gewidmet.

5.1 Determinanten der Netzwerk-Verlässlichkeit

Topologie, Hardware, Software und Humanware definieren die *Netzwerk-Architektur*, Lastprofil und Ausfallprofil die *Netzwerk-Umgebung* (vgl. Abbildung 5.1):

- *Topologie*

Die Topologie eines Netzwerkes beschreibt die physikalische Anordnung der Netzwerk-Komponenten, der *Netzwerk-Knoten* und der *Netzwerk-Verbindungsleitungen*. Zur Nutzung topologischer Redundanzen ist entsprechende Hardware- oder Software-Funktionalität erforderlich.

¹Der Faktor Humanware wird im Rahmen der Simulationsversuche wegen der Schwierigkeit der Quantifizierung des Verlässlichkeit menschlicher Handlungen nicht untersucht.

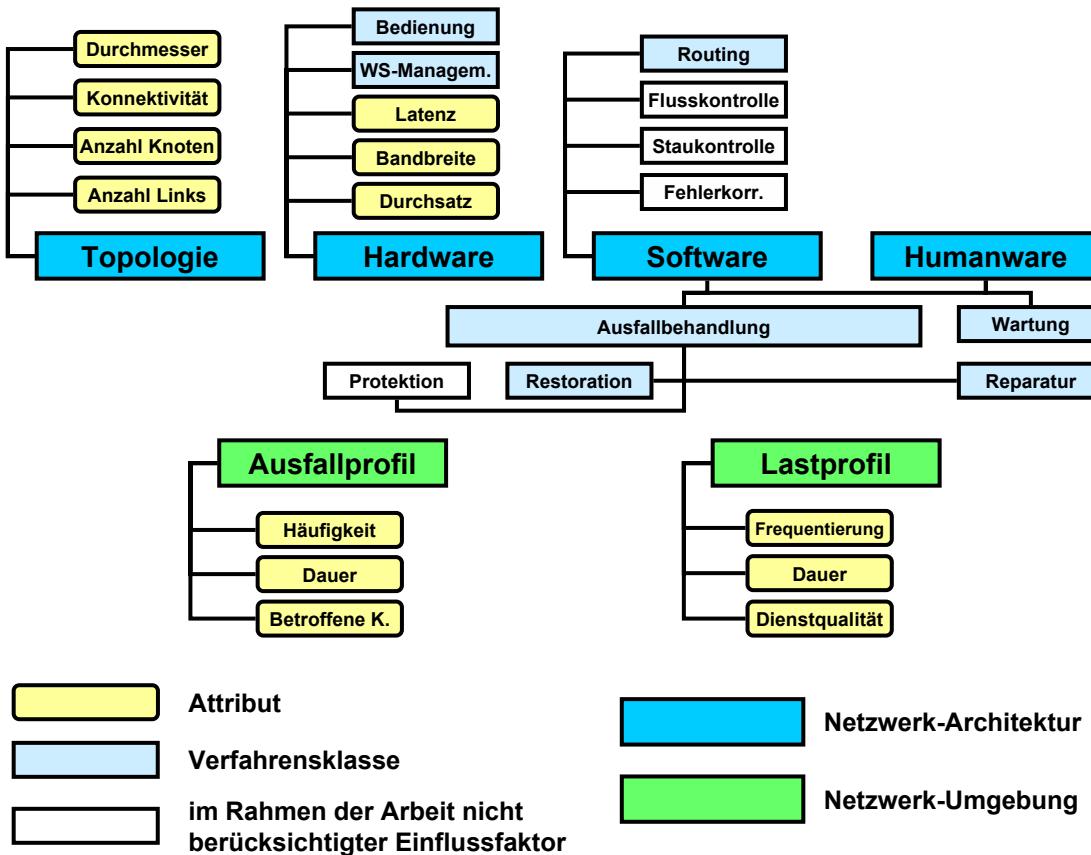


Abbildung 5.1: Determinanten der Netzwerkverlässlichkeit

- **Hardware und Software**

Hardware umfasst alle Einrichtungen mit physikalischer Ausdehnung, die an der Erbringung von Netzwerk-Dienstleistungen beteiligt sind. Die Netzwerk-Hardware setzt sich zusammen aus der *Kern-Hardware* und der *Peripherie*. Zur Kern-Hardware zählen z. B. Router, Switches, Vermittlungsstellen und Glasfaser- oder Kupferleitungen. Die Peripherie umfasst z. B. die Einrichtungen zur Stromversorgung oder die Gebäude, in denen die Kern-Hardware untergebracht ist.

Hardware im engeren Sinne der Verlässlichkeitsanalyse sind elektronische Bauteile und solche, die elektronische Bauteile enthalten (z. B. eingebettete Systeme).

Die Menge aller auf einem Rechensystem ablauffähigen Programme wird als *Software* bezeichnet.

In der Praxis sind Teile der Funktionalität eines VNKs, vorwiegend in der physikalischen Schicht, in der Sicherungsschicht und auch teils in der Netzwerk-Schicht durch Hardware realisiert, während oberhalb der Netzwerkschicht Software-Lösungen dominieren.

Besondere Bedeutung bei Eintritt eines Ausfalls kommt den Restorations- und Protektionsfähigkeiten der Software, und dabei insbesondere den Routing-Verfahren zu (vgl. Abschnitt 5.3.5).

Für die Verlässlichkeitsanalyse im Modell sind die *Leistungseigenschaften* und die *Funktionalität* von Hardware und Software relevant.

Die Rechenleistung der Knoten kann an Hand des Durchsatzes oder bei höherem Detaillierungsgrad wie hier durch Nachbildung von Routing-Verfahren, Warteschlangen-Management und Bedienung mit entsprechenden Verzögerungszeiten bewertet werden. Die Leistung der Verbindungsleitungen wird durch die Bandbreite und die Latenz definiert.

- **Humanware**

Der Einflussfaktor Humanware umfasst alle menschlichen Aktivitäten, die den Betrieb des Netzwerkes während der Betriebsdauer und der Ausfalldauer betreffen.

Eine wesentliche Teilaufgabe, die zu gleichen Teilen Software und Humanware betrifft, ist die **Ausfallbehandlung**. Die Maßnahmen, die beim Auftreten eines Ausfalls eingeleitet werden, setzen sich zusammen aus

- *automatisierten Maßnahmen (Software-Anteil der Ausfallbehandlung)*

Hierzu zählen Restorations- und Protektionsmaßnahmen wie z. B. das Umschalten vom Primärring auf den Sekundärring im einer FDDI-Umgebung nach dem Eintreten eines Hardware-Ausfalls.

- *durch den Netzwerkbetreiber initiierte Aktionen (Humanware-Anteil der Ausfallbehandlung)*
Handlungen wie der Austausch einer defekten Brücke (*Reparaturmaßnahme*), die menschlicher Unterstützung bedürfen, fallen in diese Kategorie.

- **Lastprofil**

Durch das Lastprofil der Benutzer wird der Verkehrsfluss innerhalb des Netzwerkes definiert. Das hier zugrunde gelegte Verkehrskonzept unterscheidet Verkehrsbewegungen nach *Mikro-Verhalten* und *Makro-Verhalten* (vgl. Abschnitt 5.5). Das Mikro-Verhalten beschreibt die Verkehrscharakteristika einzelner Verbindungen (Dauer, Dienstgüte). Anhand des Makro-Verhaltens wird beschrieben, wie sich Verkehrsströme über längere Zeiträume hinweg entwickeln. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die Verkehrsbelastung in Netzwerken über längere Perioden, z. B. im Laufe eines Tages, in der Regel stark variiert (vgl. z. B. [Wö90], 2.1.2.2.2, [Fil91]).

- **Ausfallprofil**

Durch ein Ausfallprofil wird definiert, in welcher Häufigkeit Ausfälle und Störungen auftreten und welche Komponenten von Ausfällen betroffen sind. Dabei müssen neben der unbeabsichtigten, durch Hardware-, Software- oder menschliche Fehler hervorgerufenen Beeinträchtigung der Netzwerkverlässlichkeit auch bewusste Angriffe in ein Gesamtverlässlichkeitskonzept miteinbezogen werden.

5.2 Topologische Struktur des Netzwerkes

Bei der Konzeption fehlertoleranter, zuverlässiger Netzwerke geht die Planung der Topologie oft als eigenständiger Schritt der Planung der restlichen Netzwerk-Architektur voraus [Sto92, Med94].

Die topologische Struktur eines Netzwerkes beschreibt die Anordnung der Netzwerk-Komponenten relativ zueinander. Im vorliegenden Modell besteht ein Netzwerk aus einem Verbund von *Subnetzen* (vgl. Abbildung 5.2).

Subnetze bestehen aus *Netzwerk-Komponenten*: Diese sind *vermittelnde Netzknoten (VNks)* und *Verbindungsleitungen*. Die Verbindungsleitungen innerhalb eines Subnetzes werden als *interne Verbindungsleitungen*, die Leitungen zwischen Subnetzen als *externe Verbindungsleitungen* bezeichnet.

Jedes Subnetz und jeder Knoten besitzt zur Identifizierung eine Adresse wie z. B. 1 . 2 . 0 (Subnetz-Adresse) oder 1 . 2 . 1 . 5 (Knoten-Adresse, vgl. Anhang A.2).

Mit der Verwendung von Subnetzen als Elementarbausteinen und dem eingeführte Adressierungsschema lassen sich folgende Ziele bei der Generierung von Netzwerk-Topologien realisieren:

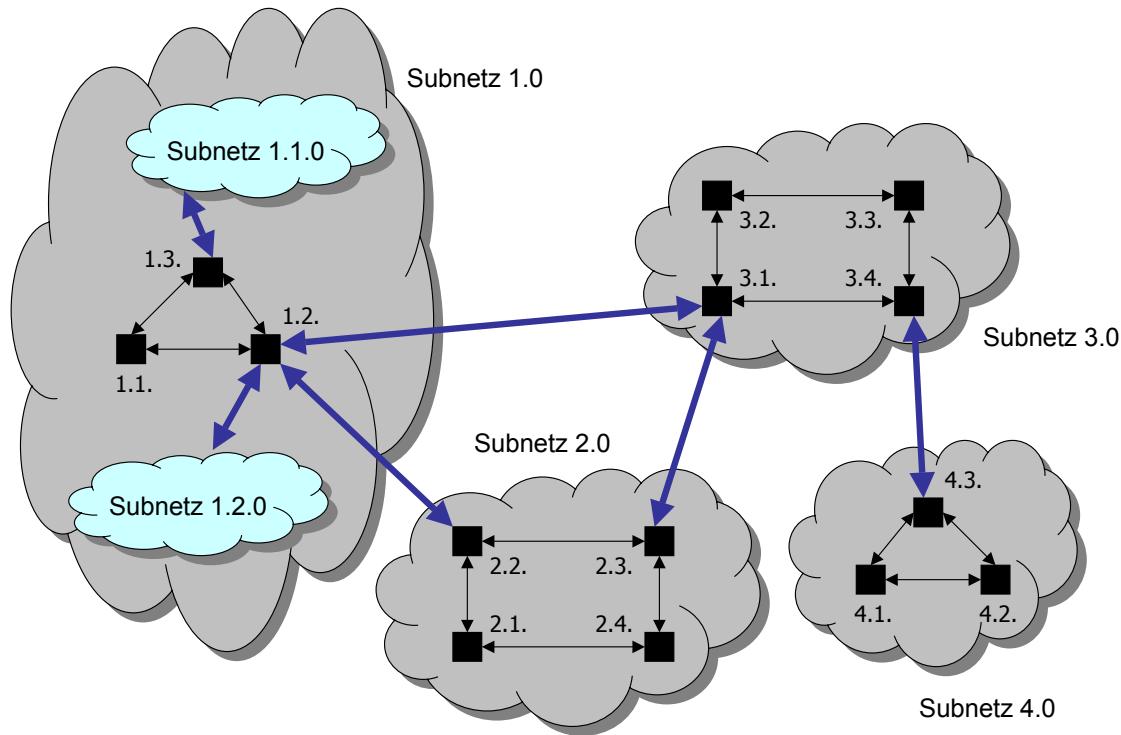


Abbildung 5.2: Aufbau der Topologie

- *modularer Aufbau*

Ab einer bestimmten Anzahl von Netzknoten ist eine strukturelle Unterteilung eines Netzwerkes aus organisatorischer Sicht unumgänglich.

Im Internet hat sich eine Modularisierung in so genannte *autonome Systeme* (AS) herauskristallisiert [Com00]. Ein autonomes System ist eine Menge von Netzwerken und Routern, die von einer gemeinsamen Instanz (z. B. Universität, privates Unternehmen) verwaltet werden. Die Hauptbedeutung autonomer Systeme im Hinblick auf die Modellierung liegt in deren Eigenständigkeit in Bezug auf die Verwendung von Routing-Verfahren und die Aktualisierung und Verwaltung von Routing-Informationen (vgl. Abschnitt 5.3.5).

- *strukturierter Aufbau*

Sowohl im Bereich der Fernsprechnetze als auch im Bereich der Datennetze [Zeg96] finden sich *Hierarchien*.

Die Verwendung des Adressierungsschemas mit einer geeigneten Semantik ermöglicht die hierarchische Untergliederung eines Netzwerkes, indem z. B. das Subnetz 1.2.0 als Teilnetz² des Subnetzes 1.0 oder das Subnetz 1.2.1.0 als Teilnetz des Subnetzes 1.2.0 interpretiert wird.

Zur besseren Referenzierung der Netzwerk-Komponenten eignet sich:

Definition 5.1 a) Ein Netzwerk $N = (G, c)$ besteht aus einem (gerichteten) Graphen $G = (V, E)$ mit $E \subset V \times V$ und einer Kapazitätsfunktion $c : E \rightarrow \mathbb{R}$.

Die Menge V bezeichnet die **vermittelnden Netzknoten** (VNks), die Menge E die **Verbindungsleitungen** zwischen diesen. Die Funktion c bestimmt die Kapazitäten der Verbindungsleitungen.

²Der Begriff Subnetz beschreibt hier eine eigenständige topologische Einheit, während der Begriff Teilnetz eine Relation zwischen Subnetzen ausdrückt.

- b) Eine Sequenz von (gerichteten) Verbindungsleitungen $p = (l_1, \dots, l_n) \subset E^n$, $n \in \mathbb{N}$, die eine (gerichtete) Verbindung zwischen zwei VNKs ermöglicht, wird als **Pfad** bezeichnet. Pfade stellen Verbindungswege zwischen einem **Anfangsknoten** und einem **Endknoten** dar.

Gerichtete Verbindungsleitungen werden in der Folge durch Adress-Paare mit runden Klammern gekennzeichnet, wie z. B. die Verbindungsleitungen

$$(1.1; 1.2) \text{ und } (2.3; 2.4)$$

in Abbildung 5.2. Zueinander entgegengesetzte gerichtete Verbindungsleitungen werden durch geschweifte Klammern dargestellt. Beispielsweise beschreibt

$$\{1.1; 1.2\}$$

das Paar der gerichteten Verbindungsleitungen $(1.1; 1.2)$ und $(1.2; 1.1)$.

Für die Beschreibung von Pfaden werden Sequenzen von Knoten benutzt, z. B.

$$(2.1 - 2.4 - 2.3 - 3.1 - 3.2 - 3.3)$$

für den Pfad, der den Anfangsknoten 2.1 mit dem Endknoten 3.3 in Abbildung 5.2 verbindet.

5.3 Funktionalität der Netzkomponenten

Während die Funktionalität von Verbindungsleitungen, deren Aufgabe in der Übermittlung elektrischer oder optischer Signale liegt, innerhalb eines Modells in naheliegender Weise beschrieben werden kann, lässt die Modellierung von vermittelnden Netzknoten bezüglich des Detaillierungsgrades einen weitaus größeren Spielraum zu. Bei der Simulation der Funktionalität eines VNKs stößt man dabei schnell an die Grenzen der durch die verfügbaren Rechenzeit gegebenen Ressourcen. Abstraktion ist aus diesem Grund unumgänglich.

Die in den VNKs realisierte Funktionalität ist zum Teil in Hardware und teils in Software realisiert. Die Unterschiede zwischen Hardware und Software sind im Hinblick auf die Modellierung der Funktionalität von untergeordneter Bedeutung und schlagen sich vorwiegend in der im Allgemeinen höheren Leistungsfähigkeit von Hardware gegenüber Software nieder. Betrachtet man das Ausfallverhalten, so zeigen sich jedoch in der Regel gravierende Unterschiede zwischen Hardware und Software, so dass hier eine getrennte Behandlung bei der Erstellung von Ausfall-Szenarien (vgl. Kapitel 8) vorzunehmen ist.

5.3.1 Modell für Verbindungsleitungen

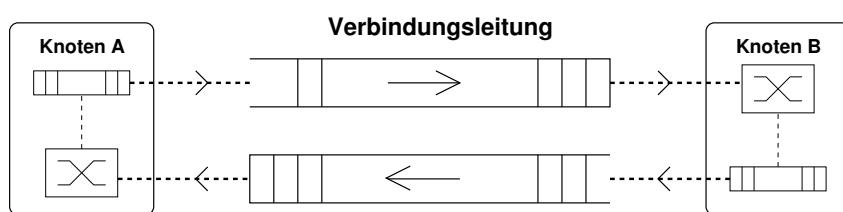


Abbildung 5.3: Modell für Verbindungsleitungen

Eine Verbindungsleitung besteht aus einem Paar aus unidirektionalen Verbindungen, die mit den VNKS verbunden sind (vgl. Abbildung 5.3).

Verbindungsleitungen werden durch endliche FIFO-Warteschlangen mit deterministischen Ankunfts- und Bedienzeiten modelliert.

Die Leistung einer Verbindungsleitung ist durch die beiden Parameter Bandbreite und Latenz³ bestimmt.

Unter der getroffenen Annahme konstanter Paketgröße ist die Länge l einer Warteschlange proportional zur Latenz einer Verbindungsleitung.

Zwischen den Größen Latenz δ_{link} [ms], Bandbreite b [kbps], Paketgröße s_p [Bit] und der (dimensionslosen) Länge der Warteschlange l besteht dann folgender Zusammenhang:

$$l = \frac{b \cdot \delta_{link}}{s_p} \quad (5.1)$$

Beispiel: Um eine Verbindungsleitung der Bandbreite $b = 5 \text{ Mbps}$ mit einer Latenz von $\delta_{link} = 50 \text{ ms}$ zu modellieren, benötigt man gemäß Formel 5.1 bei einer Paketgröße von $s_p = 500 \text{ Bit}$ eine Warteschlange der Länge

$$l = \frac{5 \text{ Mbps} \cdot 50 \text{ ms}}{500 \text{ Bit}} = \frac{5 \cdot 10^6 \text{ bps} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ s}}{500 \text{ Bit}} = 50.$$

5.3.2 Knotenmodell

Es werden zwei Typen von Knoten unterschieden: *Randknoten (aktive Knoten)* und *Zentralknoten (passive Knoten)*. Abbildung 5.4 zeigt den Aufbau der in der Simulation verwendeten Randknoten. Randknoten sind *aktive Einheiten*, d. h. dass diese Knoten Verkehr zu anderen Knoten erzeugen. Die hierbei generierten Verkehrsströme repräsentieren die Gesamtheit der aus externen Verkehrsquellen in den Randknoten hineinströmenden Verkehrsmenge. Damit wird eine aufwendige separate Modellierung solcher Verkehrsquellen umgangen.

Randknoten bestehen aus zwei Verkehrsgeneratoren (vgl. Abschnitt 5.4) und einer Senke: Die Verkehrsgeneratoren erzeugen langzeitabhängigen Verkehr (Gen-L) und kurzzeitabhängigen Verkehr (Gen-K). Die Senke bildet das Gegenstück zu den Generatoren und modelliert die Schnittstelle von Randknoten zu (netzexternen) Paketempfängern. Die *verarbeitende Einheit (VE)* stellt das funktionale Kernstück eines VNKS dar. Die Funktionalität der VE ist in Abbildung 5.5 schematisch dargestellt. Die drei Kernaufgaben der VE sind

- *Warteschlangen-Management [queue management]* (vgl. Abschnitt 5.3.4)
- *Bedienung [scheduling]* (vgl. Abschnitt 5.3.4)
- *Wegewahl [routing]* (vgl. Abschnitt 5.3.5).

Zentralknoten verfügen im Gegensatz zu Randknoten weder über Generatoren noch über Senken, da ihre einzige Aufgabe in der Vermittlung von Paketen besteht. Ein Zentralknoten besteht lediglich aus einer verarbeitenden Einheit.

³Der Begriff Latenz wird hier als die durch die physikalischen Eigenschaften der Signalübermittlung verursachte Verzögerung zwischen zwei **benachbarten** Knoten benutzt. Für Verzögerungen zwischen beliebigen Knoten innerhalb eines Netzwerkes, welche sich durch Summation mehrerer Verzögerungsarten (Bearbeitungsverzögerung, Warteschlangen-Verzögerung, und Latenz) ergeben, wird der Begriff **Laufzeit** verwendet.

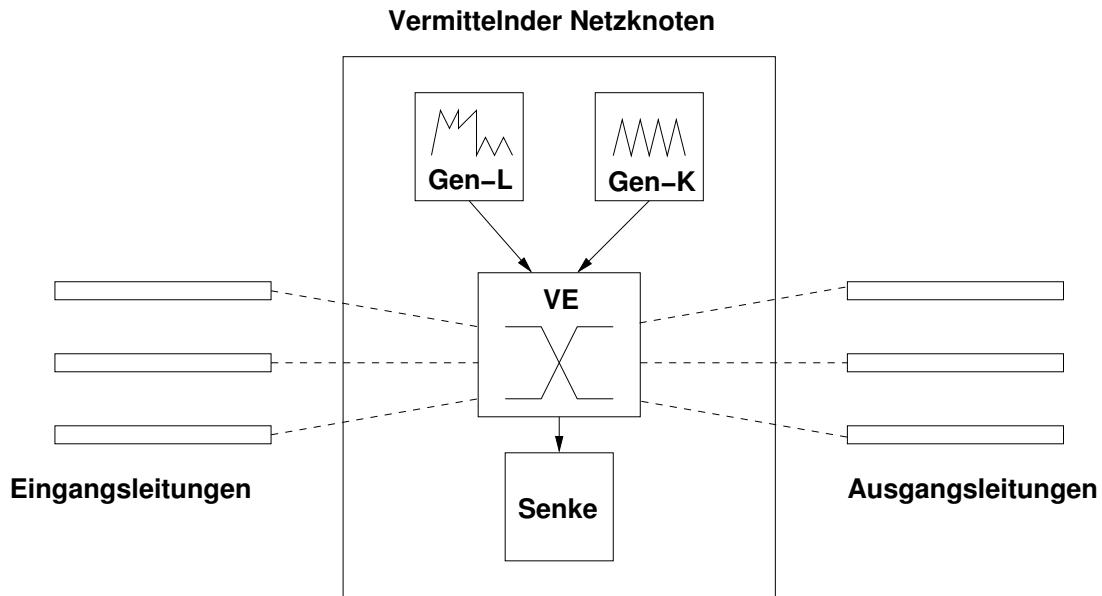


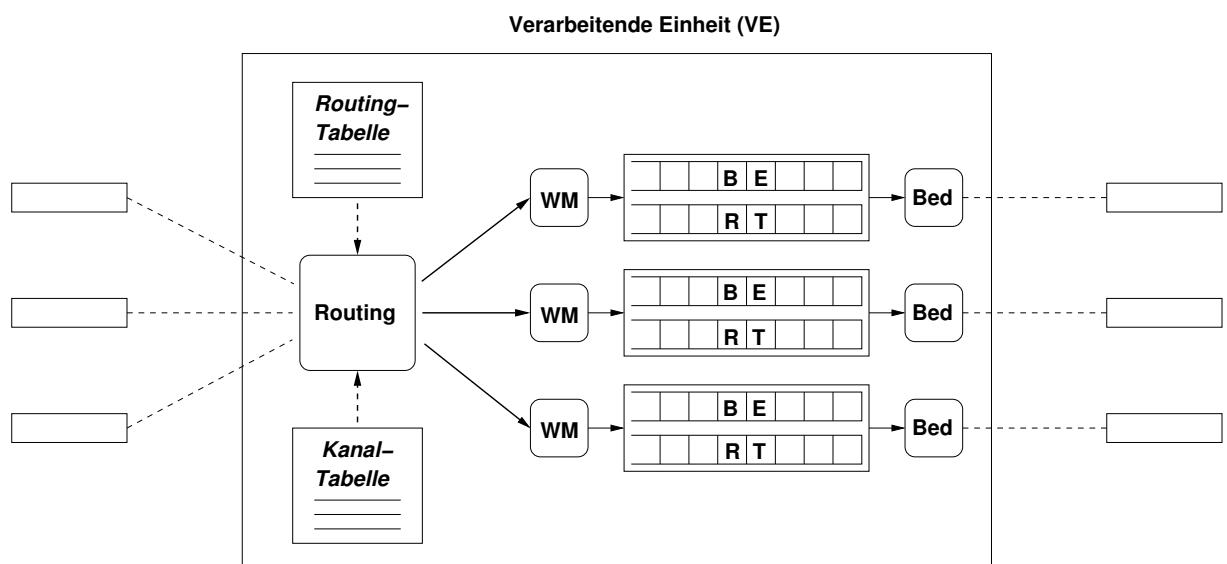
Abbildung 5.4: Knotenmodell für Randknoten

Wesentliches Leistungskriterium für Netzwerk-Knoten ist der *Durchsatz*, d. h. die Menge der pro Zeiteinheit fehlerfrei vermittelten Datenpakete [*kpps*] bzw. die pro Zeiteinheit vermittelte Datenmenge⁴ [*Gbps*].

Diese ist durch die Parameter

- Leistung der verarbeitenden Einheit und damit verbundene Bearbeitungsverzögerung [processing delay]
- Anzahl und Größe der Puffer

⁴Für eine genauere Definition ist die Berücksichtigung der Lastabhängigkeit und der Unterschiedlichkeit der Paketgröße notwendig, die hier aus Aufwandsgründen aber nicht durchgeführt werden soll.



Bed – Bedienung

BE – Best Effort

WM – Warteschlangen-Management

RT – Realtime

Abbildung 5.5: Funktionalität der verarbeitenden Einheit

- maximale Größe der Kanal- und Routing-Tabellen
- Verhalten des Paketankunftsprozesses (Lastabhängigkeit)
- Bandbreite der inzidenten Ausgangsleitungen

bestimmt.

Die Leistung der verarbeitenden Einheit, die Größe der Puffer, die anliegende Verkehrslast und die Bandbreite der Ausgangsleitungen bestimmen die *Warteschlangen-Verzögerung [queueing delay]* (vgl. Abschnitt 3.4.2).

5.3.3 Dienstgüteunterstützung

Innerhalb des vorliegenden Simulationsmodells wird ein vereinfachter Dienstgüte-Mechanismus eingesetzt, der zwei *Dienstgüteklassen* definiert:

- REALTIME (RT)

Diese Klasse repräsentiert verbindungsorientierte Übertragung in Echtzeit und ist vergleichbar mit den Klassen CBR in ATM und guaranteed service beim Integrated Services-Konzept in IP. Die Anforderungen nach fester zugesicherter Bandbreite werden durch Reservierung von Ressourcen beim Verbindungsaufbau sichergestellt (zu Einzelheiten vgl. Anhang A.4) Falls die angeforderte Bandbreite zwischen Sender und Empfänger nicht verfügbar ist, wird der Verbindungsaufbau abgebrochen. Informationen zu Verbindungen der Dienstgütekasse REALTIME werden innerhalb eines vermittelnden Knotens in einer *Kanaltabelle* gespeichert. Diese wird für das Routing von REALTIME-Paketen eingesetzt. Die beim Verbindungsaufbau geschalteten Pfade für eine REALTIME-Verbindung bleiben während der gesamten Verbindungsduer erhalten, es sei denn, ein Ausfall beeinträchtigt die Übertragung. In diesem Falle findet ein Verbindungsabbruch statt.

- BEST_EFFORT (BE)

Die Klasse BEST_EFFORT wird zur verbindungslosen Übertragung von Daten ohne Anforderungen an Laufzeit und Bandbreite eingesetzt. Pakete dieser Klasse werden ohne Überprüfung vorhandener Ressourcen vom Sender an den Empfänger los gesendet. Für das Routing von BEST_EFFORT-Paketen wird eine *Routing-Tabelle* verwendet, welche in periodischen Abständen aktualisiert wird.

Grundgedanke der vereinfachten Unterteilung ist es, durch eine Mischung von Dienstgüte-Extremen eine möglichst umfassende Abdeckung der Verkehrscharakteristika in paketvermittelnden Netzwerken zu erreichen. Dabei steht die Klasse BEST_EFFORT mit extrem weichen Anforderungen der Klasse REALTIME mit sehr harten Anforderungen gegenüber. Der Anteil der pro Verbindungsleitung verfügbaren Bandbreite, welcher für die Dienstgütekasse BEST_EFFORT eingesetzt werden kann, wird dabei durch einen variablen, aber innerhalb eines Simulationsversuches festen Schwellenwert begrenzt (vgl. nachfolgender Abschnitt).

5.3.4 Warteschlangen-Management und Bedienung

Pufferung oder Zwischenspeicherung ist zentraler Bestandteil der Vermittlung in paketvermittelnden Netzwerken. Auf Grund des indeterministischen Charakters der Ankunftsprozesse von Verkehrsströmen wird Pufferung benötigt und eingesetzt, um Verkehrsschwankungen auszugleichen und Paketverlust zu verhindern.

Warteschlangen-Management und Bedienung bestimmen die Nutzung der Ressourcen Puffer⁵ und Bandbreite [Gue99] und steuern damit das Multiplexen von Verkehrsflüssen. Während durch Warteschlangen-Management der Zugang und damit die Nutzung der Puffer gesteuert werden kann, beeinflusst die Bedienstrategie die Auswahl der aus den Puffern austretenden und über die Ausgangsleitungen übertragenen Pakete und dient damit als Kontrollinstrument für die Zuteilung der zur Verfügung stehenden Bandbreite.

Hauptaufgaben des Warteschlangen-Managements und der Bedienung sind die Umsetzung der Anforderungen verschiedenartiger Dienstqualitätsklassen, insbesondere in Überlastsituationen, und die Unterstützung der Stau- und Flusskontrolle, die z. B. bei der IP-Architektur durch Rückkopplung mit den Transportprotokollen mittels Anwendung des Random Early Detection-Verfahrens [Flo93, Bra98], erreicht wird (vgl. dazu Abschnitt 7.9.3).

Für die Auswahl von Algorithmen zur Umsetzung von Warteschlangen- und Bedienstrategien sind folgende Gesichtspunkte von Bedeutung:

- **Art der Dienstqualitäts-Zusicherung**

Bezugsobjekt für Zusicherungen können einzelne Verkehrsflüsse oder aggregierte Verkehrsströme sein. Im Hinblick auf den Aspekt der Skalierbarkeit ist die Verwaltung einzelner Verkehrsflüsse in der Regel zu aufwendig, so dass hier aggregierte Zusicherungen zu bevorzugen sind. Zusicherungen beziehen sich in der Regel auf die Basis-Kenngrößen Laufzeit und verfügbare Bandbreite, wobei zwischen festen quantitativen Zusicherungen in Form von Schwellenwerten und qualitativen Zusicherungen in Form von Prioritäten unterschieden werden muss. Von Bedeutung ist darüber hinaus, ob Zusicherungen auf Ende-zu-Ende-Basis oder für interne Netzbereiche getroffen werden.

Dienstqualitäts-Vereinbarungen auf Fluss-Ebene werden mit Hilfe so genannter *Verkehrs-Deskriptoren* [*traffic descriptors*] vorgenommen [Sai94, Gue99, ATM99].

- **Zeitaufwand und Informationsaufwand**

Zeitlicher Aufwand entsteht durch die Auswertung der für die Bedienung und das Warteschlangen-Management notwendigen Kontrollinformationen (*Informationsaufwand*) und schlägt sich in der Bearbeitungsverzögerung nieder (vgl. Abschnitt 3.4.2).

- **Effizienz**

Die Effizienz drückt die Qualität der Ausnutzung vorhandener Ressourcen in Form der Anzahl unterstützter Flüsse⁶ bei Vorgabe von Dienstqualitäts-Zusicherungen aus.

- **Fairness**

Fairness beschreibt, inwieweit die per Dienstqualitäts-Zusicherung vorgenommene Ressourcen-Verteilung im Falle des Verstoßes einzelner Verkehrsflüsse (z. B. Senden mit höherer Bandbreite als vereinbart) und im Falle des Vorhandenseins von Überkapazitäten umgesetzt wird. Im ersten Fall kann Fairness erreicht werden durch die verminderte Zuteilung von Ressourcen für Verkehrsflüsse, die gegen Zusicherungen verstößen. Im zweiten Fall ist die Verteilung der Ressourcen derart zu bewerkstelligen, dass Überkapazitäten gemäß der getroffenen Zusicherungen ohne Bevorzugung bestimmter Verkehrsströme, verteilt werden.

Beim Warteschlangen-Management wird die Auswahlentscheidung, welches Paket als nächstes gesendet werden soll, wesentlich durch die Lage zu verwerfender Pakete innerhalb der Warteschlange bestimmt [Bra98]. Dabei stehen

⁵Die Begriffe Puffer und Warteschlange werden hier gleichwertig eingesetzt.

⁶Der Begriff *Fluss* steht dabei für eine einzelne oder mehrere Verbindungen zwischen zwei VNPs, vgl. Abschnitt 2.3.

- *Drop Tail* für das zuletzt in die Warteschlange eingereihte Paket, Drop Tail-Warteschlangen sind das bei Internet-Routern am häufigsten implementierte Verfahren [Sik02] und werden auch in dieser Arbeit verwendet.
- *Drop Front* für das nächste zu sendende Paket am Kopf der Warteschlange und
- *Drop Random* für ein durch einen Zufallsmechanismus ausgewähltes Paket.

Bedienung

Eine ausführliche Diskussion verschiedener Dienstgüte-unterstützender Bedienstrategien wie z. B. *FIFO*, *weighted round robin*, *weighted fair queueing* und *priority queueing* findet sich in [Gue99]. Bei den



Abbildung 5.6: Bedienalgorithmus für Dienstqualitäts-unterstützende Vermittlung

Simulationsversuchen in Kapitel 7 werden folgende Verfahren verwendet und miteinander verglichen:

1. ein einfacher FIFO-Algorithmus, der Pakete unabhängig von deren Dienstgütekategorie pro Verbindungsleitung in eine gemeinsam von BE- und RT-Verkehr genutzte Warteschlange einreihrt.

2. der in Abbildung 5.6 dargestellte, Dienstgüte unterstützende Bedienalgorithmus für die beiden Dienstgüteklassen BEST_EFFORT und REALTIME. Pakete der beiden Klassen werden in zwei getrennten Warteschlangen zwischengespeichert. Das Verfahren nimmt eine feste statische Aufteilung der zur Verfügung stehenden Bandbreite in die beiden Dienstgüteklassen vor, bei der die Bandbreite im Verhältnis $n_{BE} : 1$ vergeben wird. Der Wechsel zwischen den beiden Dienstgüteklassen ist an den Zähler DG-Zähler gekoppelt und wird durch Inkrementieren und Zurücksetzen auf den Startwert 1 erreicht. Je nachdem, welche Dienstgütekasse den Sende-Zuschlag erhält (d. h. aktiv ist), wird entweder ein BE-Paket oder ein RT-Paket aus der jeweiligen Warteschlange über die Ausgangsleitung gesendet (vgl. Abbildung 5.5). Falls die aktive Warteschlange leer ist, wird kein Paket gesendet (Fall BE aktiv) bzw. der Versuch unternommen, ein BE-Paket zu senden (Fall RT aktiv), um Ressourcen bestmöglich zu nutzen.

5.3.5 Routing

Die Aufgabe des Routing innerhalb eines Netzwerkes umfasst die Hauptaufgaben

- **Verwaltung der Routing-Informationen innerhalb des Netzwerkes**
Dazu gehören
 - Speicherung der Routing-Informationen
Relevant für die Speicherung von Routing-Informationen sind die Orte und die Auswahl der zu speichernden Informationen.
 - Austausch der Routing-Informationen innerhalb des Netzwerkes
Beim Austausch der Routing-Informationen kann zwischen periodischen und ereignisorientierten Verfahren unterschieden werden. Bei den periodischen Verfahren findet der Austausch in regelmäßigen Zeitabständen statt, bei ereignisorientierten Verfahren wird nur im Falle des Auftretens eines außergewöhnlichen Ereignisses, wie z. B. dem Ausfall einer Netzwerk-Komponente, ein Informationsaustausch bzw. eine Aktualisierung der Routing-Informationen ausgelöst.
- **Bestimmung eines „günstigen“ Weges zwischen dem Sender und dem (den) Empfänger(n)**
Hierbei macht es Sinn, eine Trennung zwischen atomaren und globalen Zielen vorzunehmen. Atomare Ziele betreffen einzelne Verbindungen und sind z. B.
 - geringe Anzahl von Knoten zwischen Sender und Empfänger
Dieses Ziel trägt zur Minimierung der Netzbelaustung bei.
 - geringe Laufzeit
 - geringe Fehlerrate bzw. Paketverlustrate
 - geringe Transitkosten

Globale Ziele berücksichtigen den Zustand des Netzwerkes als Ganzes und stimmen die Wegewahl einzelner Verbindungen dahingehend ab. Beispiele sind:

- gleichmäßige Auslastung des Netzwerkes
- hohe Verfügbarkeit

Routing-Verfahren sind (vgl. [Hui00, Ben01])

- zentralisiert oder verteilt

| | RIP | OSPF | ISIS | BGP |
|-----------------------|--|---|-------------|--|
| intern/extern | intern | intern | intern | extern |
| LS / DV | DV | verfeinertes LS | LS | Pfadvektoren |
| Mehrpfad | ja | ja | ja | ja |
| Besonderheiten | Verteilung von Routing-Infos durch Broadcasting, basierend auf 'Anzahl der Hops' | Unterstützung hierarchischer Netzstrukturen, dynamische Lastverteilung, Berücksichtigung von Dienstgüte, Router-Kommunikation mit Authentisierung | | mehrere Pfade in Routing-Tabelle, Router baut Datenbank über alternative Pfade auf |

Tabelle 5.1: Routing-Protokolle im Internet

- *adaptiv (dynamisch) oder nicht adaptiv (statisch)*
- *Einpfad-Verfahren [single-path routing pattern] oder Mehrpfad-Verfahren [multi-path routing pattern]*
- *Distanz-Vektor-Verfahren oder Link-State-Verfahren*
Bei Distanz-Vektor-Verfahren wird die Wegewahl-Entscheidung mittels Distanzangaben getroffen, welche lediglich die Entfernung bzw. die Kosten zu anderen VNKs beschreiben. Im Gegensatz dazu verfügt ein VNK bei Anwendung eines Link-State-Verfahrens über Informationen, die die gesamte (Sub-)Netztopologie betreffen.
- *intern oder extern (bezüglich autonomer Systeme im Internet)*
Die Größe des Internet hat zu einer Separierung in selbständige Einheiten, so genannte *autonome Systeme* geführt [Com00]. Durch die Trennung von Routing *innerhalb* autonomer Systeme (*internes Routing*) und Routing zwischen autonomen Systemen (*externes Routing*) kann eine erhebliche Verringerung des Verwaltungsaufwands erreicht werden.

Tabelle 5.1 gibt einen Überblick⁷ über die bedeutendsten im Internet eingesetzten Routing-Verfahren RIP [Mal98], OSPF [Moy98], ISIS [Ora90] und BGP [Rek95], welche durchweg verteilt und adaptiv sind.

Für die Simulationsversuche in Kapitel 7 wird zur Reduzierung des Implementierungs- und Rechenaufwands ein vereinfachtes Routing-Verfahren verwendet, das sich zusammenfassend als **zentralisiertes periodisch-ereignisorientiertes Verfahren mit stochastischer Konvergenzzeit** beschreiben lässt. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

- *Speicherung von Routing-Informationen*
Relevant für die Berechnung von Pfaden sind *Verkehrsinformationen* über die aktuelle Auslastung des Netzwerkes und *Routing-Informationen* über die aus dem Blickwinkel eines VNKs für eine Zieladresse zu benutzende Ausgangsleitung. Verkehrsinformationen werden an zwei Stellen gespeichert: Innerhalb einer (nur in der Simulation vorhandenen) globalen zentralen Instanz, dem *Kontrollzentrum*, werden *globale Verkehrsinformationen*, d.h. Informationen bezüglich der Auslastung Subnetz-übergreifender Verbindungsleitungen aufgezeichnet; Subnetze besitzen ebenfalls Kontrollzentren, in denen *lokale Verkehrsinformationen*, d.h. Informationen über die Ausla-

⁷LS = Link State, DV = Distance Vector

stung innerhalb eines Subnetzes, gehalten werden. Aus den lokalen und den globalen Verkehrs-informationen werden durch Anwendung von Routing-Algorithmen lokale und globale Routing-Informationen generiert.

Für die Vermittlung von Paketen der beiden Dienstgüteklassen werden unterschiedliche Routing-Informationen verwendet: Für **BEST EFFORT**-Pakete werden *Routing-Tabellen* eingesetzt, für **REALTIME**-Pakete *Kanaltabellen*:

- Routing-Tabellen werden in VNKs verwaltet. Ein Routing-Tabellen-Eintrag besteht aus einer Zieladresse (*Index*) und aus der (*Identifikation*) der Ausgangsleitung, die den nächsten Knoten auf dem Weg zum Empfänger kennzeichnet. Es existieren zwei Arten von Einträgen: *Lokale Einträge* sind durch Knotenadressen indizierte Einträge zu Zielen innerhalb des Subnetzes. *Globale Einträge* beschreiben Wegewahl-Informationen zu Zielen in externen Subnetzen. Statt einzelner Knotenadressen werden hier zur Reduzierung des Verwaltungsaufwands (externe) Subnetz-Adressen als Index benutzt.
- Kanal-Tabellen dienen der Reservierung von Bandbreite für **REALTIME**-Verbindungen und werden in VNKs gespeichert. Ein Eintrag in einer Kanaltabelle enthält Angaben über *Sender*, *Empfänger*, *reservierte Bandbreite* und eine *Kanalnummer*. An Hand dieser Angaben ist eine eindeutige Identifizierung eines Kanals möglich.

- **Aktualisierung von Routing-Informationen**

Einträge in Kanaltabellen werden beim Aufbau einer Verbindung angelegt und nach Beendigung der Verbindung wieder gelöscht. Dabei ist der zum Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus festgestellte Auslastungszustand des Netzwerkes für die Berechnung der Pfade zwischen Sender und Empfänger ausschlaggebend.

Routing-Tabellen werden in periodischen Abständen und im Falle des Ausfalls einer Netzkomponente aktualisiert (vgl. Abbildung 5.7). Dabei wird wie folgt vorgegangen: Ein innerhalb des Kontrollzentrums angesiedelter globaler Taktgeber initiiert in periodischen Abständen Aktivitäten folgender unabhängiger Prozesse:

1. *Aktualisierung der globalen Verkehrsinformationen und Berechnung von Routing-Informationen*
2. *Aktivierung der Aktualisierung und Berechnung von Routing-Informationen in den Subnetzen*

Hierdurch wird eine Aktualisierung der lokalen Routing-Informationen in den VNKs angelegt. Um Oszillationen durch die Gleichzeitigkeit der Aktualisierung in verschiedenen Subnetzen zu vermeiden, werden Aktivierungssignale (RT_UPDATE in Abbildung 5.7) mit einer randomisierten Verzögerung an die Subnetze weitergegeben. Damit wird die Konvergenz der Routing-Tabellen in den VNKs einer stochastischen Verzögerungszeit unterworfen.

3. *Weiterleitung von globalen Routing-Informationen an die Subnetze*

Dieser Prozess wird in Abbildung 5.7 durch die Nachrichten RT_INFO_GLOBAL und RT_INFO_LOCAL eingeleitet. Globale und lokale Routing-Informationen werden so an die VNKs weitergegeben.

- **Routing-Algorithmen**

Hier wird ein Kürzeste-Wege-Algorithmus verwendet, bei dem die Entfernung an Hand der Anzahl der zwischen Sender und Empfänger liegenden Knotenpunkte gemessen wird. Dabei werden Verkehrsbelastungen und Laufzeiten auf den Verbindungsleitungen nicht berücksichtigt. Kürzeste Wege sind einfach zu implementieren und besitzen gegenüber anderen Verfahren den Vorteil, dass

die Netzbelastung sowohl im Hinblick auf die Anzahl der am Routing einer Verbindung beteiligten Knotenpunkte als auch im Hinblick auf die Verkehrsauslastung der Verbindungsleitungen minimal ist.

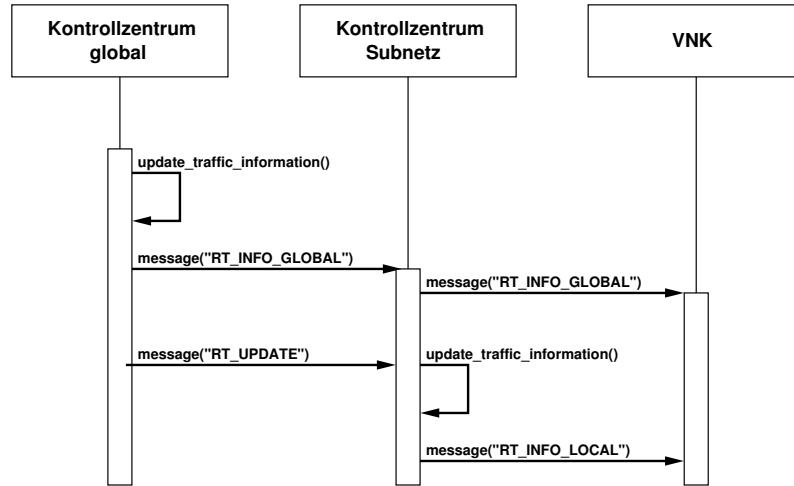


Abbildung 5.7: Aktualisierung von Routing-Informationen

Das eingesetzte Routing-Verfahren ist ein zentralisiertes, adaptives⁸ Einpfad-Verfahren.

Die beschriebene Approximation verteilter Routing-Verfahren ist wie folgt motiviert:

- *Einfache Implementierung*

Die Speicherung der Verkehrsinformationen innerhalb der Kontrollzentren dient der Vereinfachung der in der Praxis zur Bewerkstelligung des Routing notwendigen Signalisierungsabläufe. Die Kontrollzentren besitzen nach jeder periodischen Aktualisierung der Verkehrsauslastung einen vollständigen Überblick über die aktuelle Verkehrssituation zwischen den Subnetzen (globales Kontrollzentrum) bzw. innerhalb eines Subnetzes (lokales Kontrollzentrum). Durch die Vermeidung der Implementierung verteilter Verfahren soll eine Steigerung der Geschwindigkeit der Simulation erreicht werden, da nicht mehrfach von jedem Knoten einzeln Routing-Berechnungen durchgeführt werden, sondern dies zentral für das gesamte Netz bewerkstelligt wird. Gleichzeitig wird der Verwaltungsaufwand innerhalb der Knoten beschränkt, da die zur Berechnung von Pfaden notwendigen Informationen an zentraler Stelle und nicht in jedem Knoten gespeichert werden: Knoten besitzen lediglich Informationen über den jeweiligen Nachbarknoten, an den Pakete zur Erreichung einer bestimmten Zieladresse weitergeleitet werden müssen.

- *Zeitliche Granularität*

Die Unterschiede, die sich zwischen verteilten und zentralisierten Verfahren ergeben, sind für die Untersuchung der in der Simulation betrachteten Zielgrößen in Anbetracht des zeitlichen Granularitätsgrades nicht von Bedeutung: Die Konvergenzzeitspanne verteilter Wegewahl-Verfahren liegt abhängig vom Restorationsverfahren zwischen wenigen Millisekunden (z. B. bei SDH/SONET auf der physikalischen Schicht) und wenigen Minuten (z. B. bei IP auf der Netzwerk-Schicht, vgl. [Ben00]). Verglichen mit den durch die empirischen Untersuchungen in Anhang 5.6 belegten Ausfalldauern von Netzwerk-Komponenten, die sich im Bereich mehrerer Stunden bewegen, ist diese Zeitspanne vernachlässigbar gering. Die in dieser Arbeit angestellten Simulationsstudien fokussieren auf den stationären Verkehrseigenschaften im *Restorationszustand*, der dadurch gekennzeichnet ist, dass Verkehr auf Grund ausgefallener Netzwerk-Komponenten umgeleitet werden muss,

⁸Pfadänderungen finden bei Ausfallereignissen und bei Verkehrsänderungen statt.

und nicht auf den aus Fehlererkennung, Ausfall-Proklamation und Fehlerdiagnose bestehenden (durch transientes Verkehrsverhalten gekennzeichneten) *Ausfallzustand* (vgl. Abschnitt 3.2.2).

5.3.6 Ausfallbehandlung

Die im vorausgehenden Abschnitt getroffenen Aussagen über die zeitliche Granularität finden auch bei der Modellierung der Ausfallbehandlung Anwendung. Auf Grund der Vernachlässigung der Dauer des Ausfallzustandes gegenüber der Dauer des Restorationszustandes (vgl. auch Anhang 5.6) wird das in Abschnitt 3.2.2 vorgestellte Rahmenwerk hier reduziert auf die Schritte (vgl. Abbildung 5.8)

- *Ausfall-Proklamation und Ausfall-Erkennung*

Nach dem Eintreten eines Komponenten-Ausfalls (Verbindungsleitung oder Knoten) wird mit einer stochastischen zeitlichen Verzögerung eine Ausfallmeldung an das Kontrollzentrum des jeweiligen Subnetzes generiert.

- *Rekonfigurierung*

Innerhalb des Rekonfigurierungsprozesses wird dynamische Restoration als Fehlertoleranzverfahren eingesetzt. Nach dem Eintreffen der Ausfallmeldung im Kontrollzentrum werden alle RT-Verbindungen, welche die ausgefallene Ressource nutzen, abgebrochen. Gleichzeitig werden die Kanaltabellen und die Routing-Tabellen aktualisiert und der veränderten topologischen Struktur des Subnetzes angepasst. Aktualisierungen in Kanaltabellen werden Subnetz-übergreifend vorgenommen, d. h. in allen VNKs, die Einträge über geschaltete Pfade der ausgefallenen Ressource besitzen. Routing-Tabellen werden nur innerhalb des betreffenden Subnetzes aktualisiert; die Aktualisierung externer Routing-Tabellen erfolgt innerhalb der nach Eintreten des Ausfalls nächsten periodischen Aktualisierung (vgl. Abschnitt 5.3.5).

Während des Ausfalleintritts von der Ressource bearbeitete Pakete werden verworfen.

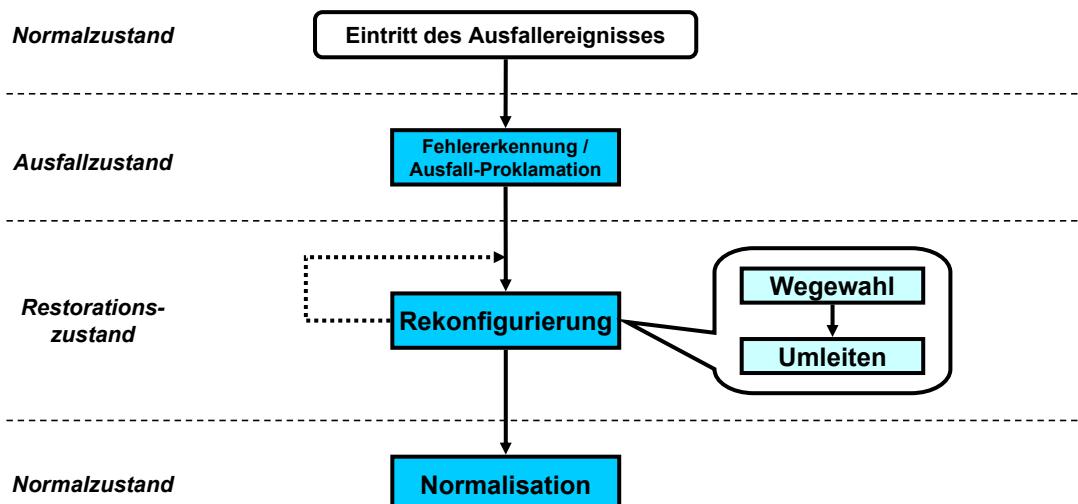


Abbildung 5.8: Vereinfachtes Modell für Ausfallbehandlung

5.4 Verkehrsmodellierung in Kommunikationsnetzen

Bei der Simulation von Verkehr in Telekommunikations- und Datennetzen haben sich verschiedene Arten von Modellen als angemessene Beschreibungen für reales Verkehrsaufkommen bewährt [Fro94]:

- *Poisson-artige Verkehrsmodelle* [Ber87, Pax95b, Sch87]

Poisson-artige Verkehrsmodelle eignen sich zur Modellierung von Sprachverkehr in Telekommunikationsnetzen. Unter dem Begriff *Poisson-Modell* soll im Folgenden ein Verkehrsmodell verstanden werden, das auf zwei Annahmen basiert:

1. Die Anzahl der in einem vermittelnden Netzknopen (VNK) eintreffenden Verbindungswünsche kann durch einen Poisson-Prozess angemessen beschrieben werden.
2. Die Verbindungsduern können durch exponentialverteilte Zufallsvariablen oder Verteilungstypen, die **nicht** die heavy-tailed Eigenschaft (vgl. Anhang B.2.1) besitzen, dargestellt werden.

Der Ankunftsprozess eines Poisson-artigen Modells, der das Eintreffen von Verbindungswünschen innerhalb eines VNPs beschreibt, sieht diese als zufällige, voneinander unabhängige Ereignisse an. Das beschriebene Modell soll *infinite source exponential Modell* (ISE) genannt werden.

Neben den homogenen Poisson-Modellen werden in der Verkehrsmodellierung auch *nichthomogene* Poisson-Prozesse eingesetzt, bei denen die Ankunftsrate einer zeitlichen Abhängigkeit unterliegt. Dadurch können zeitliche *Trends* innerhalb des Ankunftsverhaltens modelliert werden. Eine besondere Form der zeitlichen Variation der Ankunftsrate kann durch den *Markow-modulierten Poisson-Prozess* erreicht werden. Hierbei wird die Ankunftsrate λ_k , $k = 1, \dots, m$ durch den gerade aktiven Zustand eines Markow-Prozesses (z_t , $t \geq 0$) mit dem diskreten Zustandsraum $\{1, \dots, m\}$ dargestellt.

Der zunehmende Einsatz von Telekommunikationsnetzen als Zugangsnetz für Datennetze wie z. B. das Internet hat dazu geführt, dass sich das Verkehrsaufkommen und der Verkehrscharakter in Telekommunikationsnetzen gegenüber dem Zustand der ausschließlichen Nutzung für Sprachverkehr geändert hat. Die gemessenen empirischen Verteilungen der Dauer von Zugangsverbindungen zum Internet unterscheiden sich signifikant von den Verteilungen der Verbindungsduern beim Sprachverkehr. Dies führt z. B. dazu, dass die Blockierungswahrscheinlichkeiten erheblich höher sind, als dies bei reinem Sprachverkehr der Fall ist [Mor98].

- *Markow-Modelle*

Die Kerneigenschaft dieses Modell-Typs ist die *Markow-Eigenschaft*, welche besagt, dass der Zustand eines Markow-Prozesses (z_t , $t \geq 0$) zum Zeitpunkt $t^* > 0$ bei Kenntnis der Zustände zu den Zeitpunkten

$$0 < t_0 < t_1, \dots, < t_{n-1} < t_n < t^*$$

lediglich vom Zustand zum Zeitpunkt t_n abhängig ist und nicht von den Zuständen der von t_n aus betrachteten Vergangenheit t_0, \dots, t_{n-1} ([Gae77], Kap. 10).

Im Gegensatz zu Poisson-Modellen erlauben Markow-Modelle die Einführung von Abhängigkeiten innerhalb der zeitlichen Fortentwicklung eines Verkehrsstromes. Für die Modellierung von Verkehr werden i. d. R. *Markowsche Sprungprozesse*, d. h. Markow-Prozesse mit dem Zeitparameterraum $\{t \in \mathbb{R}, t \geq 0\}$ und dem diskreten Zustandsraum $\{k \in \mathbb{N}\}$ verwendet. Die Übergangszeitpunkte zwischen den Zuständen eines Markowschen Sprungprozesses repräsentieren dabei im Allgemeinen Ereignisse wie das Eintreffen eines oder mehrerer Verbindungswünsche in Telekommunikationsnetzen oder aber die Ankunft eines Paketes oder Paketblocks in Datennetzen.

- **Selbstähnliche Verkehrsmodelle** [Pax95b, Lel94, Wil98, Wil01]

Die für den Sprachverkehr eingesetzten Poisson-basierten Verkehrsmodelle wurden bis Mitte der neunziger Jahre zunächst auch für die Modellierung von Datenverkehr eingesetzt. Ausgehend von der in [Lel94] beschriebenen empirischen Erhebung über das Verhalten von Ethernet-Verkehr haben sich jedoch seitdem selbstähnliche Verkehrsmodelle für die Darstellung von Verkehr in Datennetzen durchgesetzt. Die Eigenschaft der Selbstähnlichkeit von Verkehrsströmen in Datennetzen ist durch eine ganze Reihe von Untersuchungen belegt, die sowohl lokale Netze als auch Weitverkehrsnetze betreffen (siehe [Wil97, Err02] und die darin enthaltenen Referenzen). Auf die Bedeutung der Entdeckung der beiden Eigenschaften Selbstähnlichkeit und Langzeitabhängigkeit im Hinblick auf die Modellierung von Verkehr in Datennetzen wird in Abschnitt 5.4.3 eingegangen. Die stochastischen Eigenschaften selbstähnlicher Prozesse sind in Anhang B.3 zusammengefasst.

Bezüglich der Granularität von Verkehrsmodellen lässt sich unterscheiden nach *Paket-Modellen*, *Verbindungs-Modellen* und *Fluid-Modellen*. Paket-Modelle werden durch die Zwischenankunftszeiten und die Größe von Paketen beschrieben, Verbindungsmodelle durch den Paket-Ankunftsprozess, die Länge und die angeforderte Bandbreite von Verbindungen. Fluid-Modellen liegt die Idee zu Grunde, dass das Verhalten eines einzelnen Paketes oder einer einzelnen Verbindung in einem Datennetz bzw. einer einzelnen Verbindung in einem Telekommunikationsnetz keinen oder nur sehr geringen Einfluss auf eine zu untersuchende Zielgröße wie z. B. die Verfügbarkeit eines Netzwerkes hat. Fluid-Modelle fassen Pakete und Verbindungen zu *Verkehrsströmen [fluids]* zusammen und reduzieren somit den DetAILlierungsgrad eines Verkehrsmodells. In der Regel werden stetige Annäherungen an diskrete Paket- oder Verbindungsmodelle benutzt, die sich analytisch besser handhaben lassen als diskrete Modelle.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeföhrten Simulationsversuchen werden ausschließlich Poisson-Verkehrsmodelle und selbstähnliche Verkehrsmodelle eingesetzt. Dabei wird Poisson-Verkehr zur Modellierung von Sprachverkehr und selbstähnlicher Verkehr zur Modellierung von Datenverkehr verwendet. Die Modellierung findet auf Verbindungs-Ebene statt. Die theoretischen Betrachtungen der eingesetzten Verkehrsmodelle werden anhand von Verbindungs- bzw. Fluid-Modellen durchgeführt.

5.4.1 Generierung von Verkehr mit konstanter Bandbreite

Sowohl für das Sprachverkehrsmodell als auch für das Datenverkehrsmodell wird die Generierung von Verkehr mit konstanter Bandbreite benötigt. Bei Vorgabe der zu generierenden Datenrate v [kbps] ergeben sich für die Parameter

- **Paketgröße s_p**

Die Paketgröße wird hier in *Bit* gemessen. Es wird angenommen, dass alle Pakete die gleiche Größe besitzen.

- **Paketrate n**

Die Paketraten definiert die Anzahl der pro Zeiteinheit generierter Pakete. Als Basiszeiteinheit dient hier 1 s . Die Größe n wird demnach in $1/\text{s}$ gemessen.

- **Paket-Zwischenankunftszeit δ_p**

Unter der Paket-Zwischenankunftszeit versteht man die Zeitspanne zwischen dem Aussenden aufeinander folgender Pakete. Sie wird in Millisekunden gemessen ($1 \text{ s} = 1000 \text{ ms}$).

folgende Zusammenhänge:

$$v = \frac{n \cdot s_p}{1000} = \frac{s_p}{\delta_p} \quad (5.2)$$

Zur Vereinfachung der Beziehungen bei numerischen Berechnungen soll dabei stets $1 \text{ kBit} = 1000 \text{ Bit}$ angenommen werden.

Bei der Modellierung der Paket-Zwischenankunftszeiten (ZAZ) werden zwei Verfahren eingesetzt

- konstant (*äquidistant*)

- *stochastisch*

Bei dieser Variante wird δ_p einer durch eine Rechteckverteilung gegebenen stochastischen Komponente ausgesetzt. Für die Paket-Zwischenankunftszeit gilt

$$D = \delta_p + R; R \sim U(-\kappa; \kappa). \quad (5.3)$$

κ wird so gewählt, dass $\kappa \ll \delta_p$ gilt. Damit werden die Schwankungen der Paket-Zwischenankunftszeit um den Wert δ_p begrenzt.

5.4.2 Verkehrsmodell für Sprachverkehr

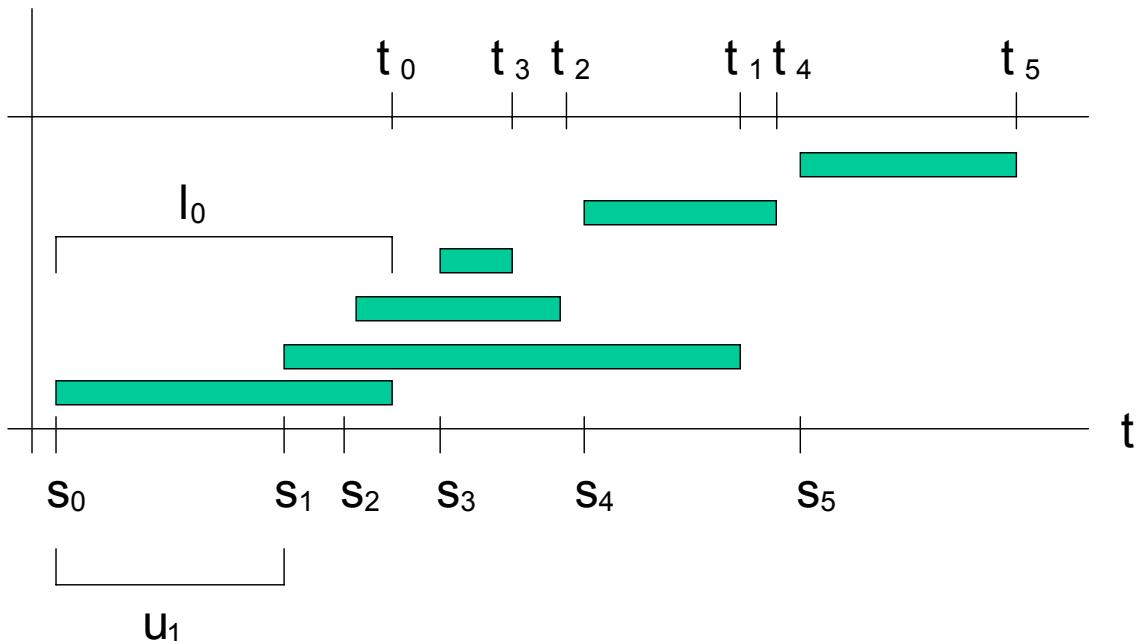


Abbildung 5.9: Verkehrsmodell für Sprachverkehr

Zur Modellierung von Sprachverkehr wird ein homogenes Poisson-Prozess-Modell benutzt. Abbildung 5.9 zeigt schematisch den zeitlichen Ablauf des Benutzerverhaltens für Sprachverbindungen. Die eingezeichneten Größen drücken dabei folgende Zeitpunkte bzw. Zeitintervalle aus:

- s_i : Beginnzeitpunkt einer Verbindung
- t_i : Endezeitpunkt einer Verbindung
- $u_i = s_i - s_{i-1}$: Zeitspanne zwischen den Beginnzeitpunkten zweier aufeinander folgender Verbindungen
- $l_i = t_i - s_i$ Dauer der Verbindung.

Die Anzahl der ab dem Zeitpunkt 0 ankommenden Verbindungswünsche werden durch den Zählprozess eines homogenen Poisson-Prozesses dargestellt. Das verwendete Modell hat folgende Eigenschaften:

- **Verbindungsduern**

Die Verbindungsduern l_i , $i \in \mathbb{N}$ werden durch unabhängige, identisch exponentialverteilte Zufallsvariablen mit dem gemeinsamen Parameter $\lambda_d > 0$ [1/s] dargestellt.

- **Zwischenankunftszeiten**

Die Zeitdauern zwischen zwei aufeinander folgenden, beim vermittelnden Netzknoten ankommenden Verbindungswünschen u_i , $i \in \mathbb{N}$ werden ebenfalls durch unabhängige, identisch exponentialverteilte Zufallsvariablen mit Parameter λ_a [1/s] modelliert. Die Homogenität des zugrunde liegenden Poisson-Prozesses gewährleistet, dass die Ankunftsrate nicht von der Zeit abhängt, d. h. es gilt $\lambda_a(t) = \lambda_a \forall t > 0$. Durch die genannte Konstruktion ist es möglich, dass sich mehrere Verbindungen gleichzeitig überlappen.

- **Angeforderte Bandbreite v_{ON}**

Während der Dauer des Bestehens einer Verbindung wird für diese eine konstante Bandbreite angefordert. v_{ON} wird in kbps gemessen.

Das Verkehrsvolumen im stationären Zustand wird beschrieben durch folgenden Zusammenhang:

$$v_{poi} = \frac{\lambda_a \cdot v_{ON}}{\lambda_d}. \quad (5.4)$$

5.4.3 Selbstähnlichkeit und Langzeitabhängigkeit

Die Entdeckung langzeitabhängiger und selbstähnlicher Verkehrsmuster in paketvermittelnden Netzwerken kann als eine Art Meilenstein der Verkehrstelematik angesehen werden. Der Grundstein für die Entstehung und weitere Entwicklung des Forschungsgebietes wird durch die in [Lel94] dokumentierten Arbeiten gelegt, in denen Ethernet-Verkehrsströme untersucht wurden. Ausgehend von der Entdeckung der Selbstähnlichkeit in lokalen Netzwerken wurde die Eigenschaft später auch in Weitverkehrsnetzen festgestellt [Pax95b, Pax97b]. Erstaunlicherweise tritt die zunächst als Phänomen erachtete Selbstähnlichkeit bei sehr unterschiedlichen Arten von Anwendungen wie z. B. bei Video-Datenströmen (siehe [Ber95, Ryu96a]) oder bei Anwendungen des World Wide Web [Cro95, Cro96, Cro98] auf. Die Hauptbedeutung der Selbstähnlichkeit von Datenströmen in paketvermittelnden Netzwerken ist in der *Invarianz gegenüber der Architektur von Netzwerken* zu sehen, d. h. die Eigenschaft stellt eine Charakterisierung von Netzwerk-Verkehr dar, die nach den genannten empirischen Untersuchungen unabhängig von der spezifischen Ausgestaltung eines paketvermittelnden Netzwerkes, und damit insbesondere unabhängig von der in der Regel hoch komplexen Netzwerk-Software ist. Diese Erkenntnis wird durch die Tatsache, dass Selbstähnlichkeit in verschiedenen Schichten des TCP/IP-Schichtenmodells (vgl. [Tan96]) festgestellt werden kann, untermauert.

In den weiteren Betrachtungen wird die *Sichtweise des Monitors auf einer Verbindungsleitung* benutzt [Lel94]. Dabei wird davon ausgegangen, dass auf einer physikalischen Verbindungsleitung ein Monitor installiert ist, der in periodischen Abtastintervallen der Länge δ_{trace} deren aktuelle Belastung misst und dabei protokolliert, wie viele Pakete innerhalb eines solchen Messintervalls über die Verbindungsleitung gesendet werden. Aufgrund der simulativen Betrachtungsweise kann eine aufwändige physikalische Messung im Rahmen der nachfolgenden Experimente entfallen. Statt dessen wird als Maß für die Auslastung einer Verbindungsleitung die Anzahl der in der zugehörigen Warteschlange befindlichen Pakete benutzt (vgl. Abschnitt 5.3.1). Aus einer Sequenz aufeinander folgender Messwerte ergibt sich eine

Zeitreihe

$$X := (X_k, k \in \mathbb{N}), \quad (5.5)$$

die einen Verkehrsstrom beschreibt und deren Eigenschaften nun genauer betrachtet werden sollen.

Selbstähnliche Verkehrsströme zeichnen sich dadurch aus, dass die innerhalb des zeitlichen Verlaufes der Zeitreihe X auftretenden Schwankungsmuster sich in Zeitabschnitten größerer Ausdehnung wiederholen, die Zeitreihe besitzt also eine **Ähnlichkeit mit sich selbst**. Mathematisch wird diese Ähnlichkeit durch eine Beziehung zwischen der Zeitreihe X und der durch

$$X_i^{(m)} := \frac{1}{m} (X_{(i-1)m+1} + \dots + X_{i \cdot m}), \quad i \in \mathbb{N} \quad (5.6)$$

gegebenen, **zu X gehörigen skalierten Zeitreihe zum Skalierungsfaktor m** , ausgedrückt. Unter der zusätzlichen Annahme der Stationarität von zweiter Ordnung (vgl. Anhang B.1) heißt X **selbstähnlich mit Hurst-Parameter H von zweiter Ordnung**, falls die Zeitreihen X und $m^{1-H} X^{(m)}$ für alle $m > 0$ die gleichen Varianzen und die gleichen Autokorrelationen besitzen (zu Einzelheiten siehe Anhang B.3.2). Der Hurst-Parameter (auch Selbstähnlichkeits-Parameter) beschreibt dabei den Grad der Selbstähnlichkeit. Für die Analyse von Verkehrsströmen in paketvermittelnden Netzwerken ist lediglich der Bereich $[0.5, 1.0]$ von Bedeutung [Ber94]. In den meisten empirischen Untersuchungen treten Werte zwischen 0.7 und 0.9 auf [Lel94, Cro96].

Vergleicht man die Eigenschaften von Sprachverkehrsmodellen, die auf Poisson-Prozessen basieren mit den Eigenschaften selbstähnlicher und langzeitabhängiger Datenverkehrsmodelle, so ergeben sich wesentliche Unterschiede bezüglich folgender Aspekte:

- **Kurzzeitabhängigkeit und Langzeitabhängigkeit**

Die Begriffe Kurzzeitabhängigkeit und Langzeitabhängigkeit beziehen sich auf Abklingverhalten der Autokorrelationsfunktion einer Zeitreihe (siehe Anhang B.3.3). Während kurzzeitabhängige Verkehrsströme wie z. B. Verkehr in Poisson-Modellen eine exponentiell abnehmende Autokorrelationsfunktion besitzen, klingen die Autokorrelationen langzeitabhängiger Verkehrsströme hyperbolisch - und damit sehr viel langsamer - ab (vgl. Anhang B.3.3).

Liegt der Selbstähnlichkeitsparameter im Bereich $0.5 < H < 1$, so ist die Langzeitabhängigkeit eine Konsequenz aus der Selbstähnlichkeit (vgl. [Ber94], Abs. 2.3 und Anhang B.3.4)).

- **Variabilität**

Die Abklingeigenschaften der Autokorrelationen kurzzeitabhängiger und langzeitabhängiger Verkehrsströme gelten auch für die **Varianzen** skaliertes Messreihen.⁹ Diese nehmen bei langzeitabhängigen Verkehrsströmen mit steigender Skalierung *hyperbolisch* ab, bei kurzzeitabhängigen Verkehrsströmen hat man hingegen *exponentielles* Abklingverhalten (vgl. Anhang B.3.4 und [Ber94], Kap. 2.1). Der Unterschied macht sich dadurch bemerkbar, dass selbstähnlicher Verkehr über Zeiträume verschiedener Größenordnung und damit insbesondere über längere Zeiträume eine sehr viel höhere Schwankungsbreite besitzt als Poisson-Verkehr ([burstiness over a wide range of time scales]). Anders ausgedrückt gehen die Schwankungen kurzzeitabhängigen Verkehrs mit steigender Skalierung in *weißes Rauschen* über, während dies bei langzeitabhängigem Verkehr nicht der Fall ist.

Einen visuellen Eindruck der Unterschiedlichkeit hinsichtlich der Variabilität zeigt Abbildung 5.10. Beide Spalten zeigen simulierte Verkehrsdaten aus einem Netzwerk mit zwei Knoten, die durch Verbindungsleitungen mit einer Bandbreite von jeweils 5 Mbps verbunden sind (Zwei-Knoten-Elementar-Netzwerk, vgl. Anhang C.1). Die Schaubilder enthalten die Anzahl der übertragenen Pakete auf der Verbindungsleitung, die den ersten mit dem zweiten Knoten verbindet.

⁹Diese werden im Folgenden auch mit *skalierte Varianzen* bezeichnet, vgl. Abschnitt 6.3.2.

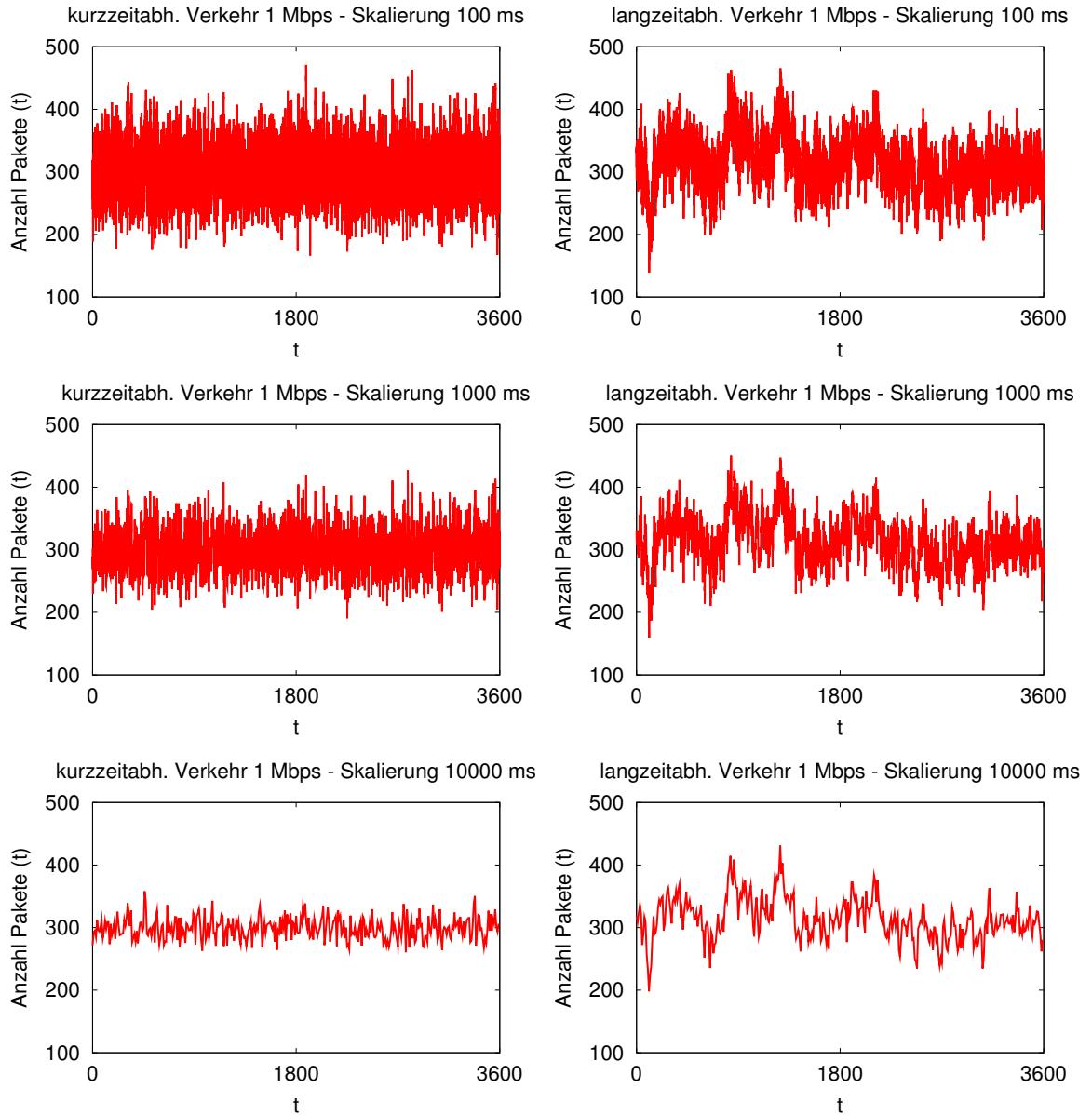


Abbildung 5.10: Vergleich kurzzeitabhängiger Verkehr/langzeitabhängiger Verkehr

Dabei wurde alle $\delta_{trace} = 10 \text{ ms}$ ein Wert gemessen. Das gesamte dargestellte Zeitintervall beträgt 3600 s, also eine Stunde.

Die drei Abbildungen der linken Spalte beinhalten Poisson-Verkehr, der gemäß dem Sprachmodell aus Abschnitt 5.4.2 generiert wurde. Dabei wurde eine Gesamt-Verkehrsmenge von 3 Mbps mit einer exponentialverteilten Verbindungsduer von $1/\lambda_d = 1.0 \text{ s}$, einer Ankunftsrate von $\lambda_a = 60 \cdot 1/\text{s}$, einer Varianz des Datenstroms von $\sigma_{poi}^2 = 150 (\text{Mbps})^2$ und einer Verbindungs-Bandbreite von $v_{ON} = 50 \text{ kbps}$ generiert.

Die rechte Spalte zeigt fraktalen Verkehr, der durch überlagerte ON-OFF-Prozesse generiert wurde (vgl. Abschnitt 5.4.4). Die generierte Datenrate $v_{ss} = 3 \text{ Mbps}$ und die Varianz $\sigma_{ss} = 150 (\text{Mbps})^2$ des Verkehrsstromes sind zur besseren Vergleichbarkeit wie im vorigen Fall gewählt. Dabei wurden $n = 60$ Prozesse mit Pareto-Verteilungen mit den Parametern $\alpha = 1.3$ und $\beta = 1.5$ (entspricht einem Hurst-Parameter von $H = (3 - \alpha)/2 = 0.85$) für die Aufenthaltsdauern in den beiden Zuständen und einer Datenrate für die ON-Perioden von $v_{ON} = 50 \text{ kbps}$ überlagert.

Die Zeilen spiegeln unterschiedliche Skalierungsfaktoren der simulierten Verkehrsströme wider. Die erste Zeile enthält die skalierten Testreihen zur Skalierung 10, die zweite für den Skalierungsfaktor 100 und die dritte für den Skalierungsfaktor 1000.

Ausschlaggebend für die Charakterisierung selbstähnlicher Verkehrsströme ist das *Langzeitverhalten*, welches durch die Entwicklung der Autokorrelation bzw. der (skalierten) Varianzen für “große“ Skalierungsfaktoren geprägt ist: Das im Gegensatz zu dem kurzzeitabhängigen Poisson-Verkehrsstrom sehr langsame Abklingenverhalten der selbstähnlichen Zeitreihe ist in Abbildung 5.11 deutlich zu erkennen.

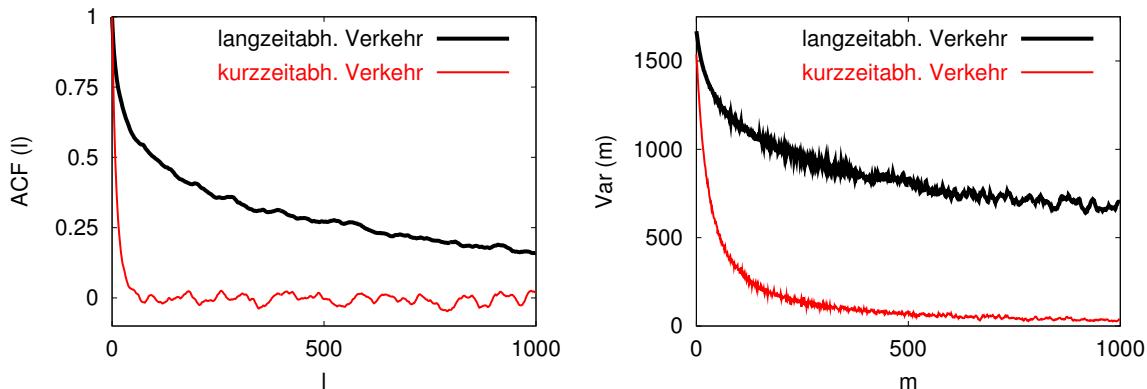


Abbildung 5.11: Vergleich der Autokorrelation und der skalierten Varianzen zwischen kurzzeitabhängigem Verkehr und langzeitfähigem Verkehr

- **Spektraldichte**

Die Spektraldichte $f(\lambda)$ (siehe Anhang B.1.2) einer langzeitabhängigen Zeitreihe besitzt bei $\lambda = 0$ einen Pol. Es gilt

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} f(\lambda)/[c_f |\lambda|^{-\beta}] = 1$$

für eine Konstante $c_f > 0$ und ein $0 < \beta < 1$ [Ber94].

Die Abbildungen 5.12, 5.13 und 5.14 verdeutlichen den Einfluss des Hurst-Parameters. Gezeigt werden Datenströme, die nach der infinite source heavy-tailed Methode mit gestützten Pareto-Verteilungen (ISHT, vgl. Anhang B.2.2) für die Verbindungsduern generiert wurden. Der Abklingparameter für die ON-Perioden wurde dabei so variiert, dass dies Hurst-Parametern von 0.5, 0.75, 0.85 und 0.95 entspricht.

Abbildung 5.13 zeigt die zugehörigen (normierten) skalierten Varianzen und die Verlangsamung des Abklingens für wachsenden Hurst-Parameter, Abbildung 5.14 stellt die gleiche Information mit jeweils logarithmierten Skalen für die Abszisse und die Ordinate dar. Mit wachsendem Lag l bzw. Skalierungsfaktor k nähern sich hier die Kurven an Geraden mit negativer Steigung an.

Erklärungen für Selbstähnlichkeit in paketvermittelnden Netzwerken

Für die Erklärung der Selbstähnlichkeit in paketvermittelnden Netzwerken spielen die so genannten **heavy-tailed**-Verteilungen eine zentrale Rolle.

Eine Verteilungsfunktion $F(x)$, $x \geq 0$, besitzt die **heavy tailed-Eigenschaft**, falls

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \bar{F}(x) = c \cdot x^{-\alpha}$$

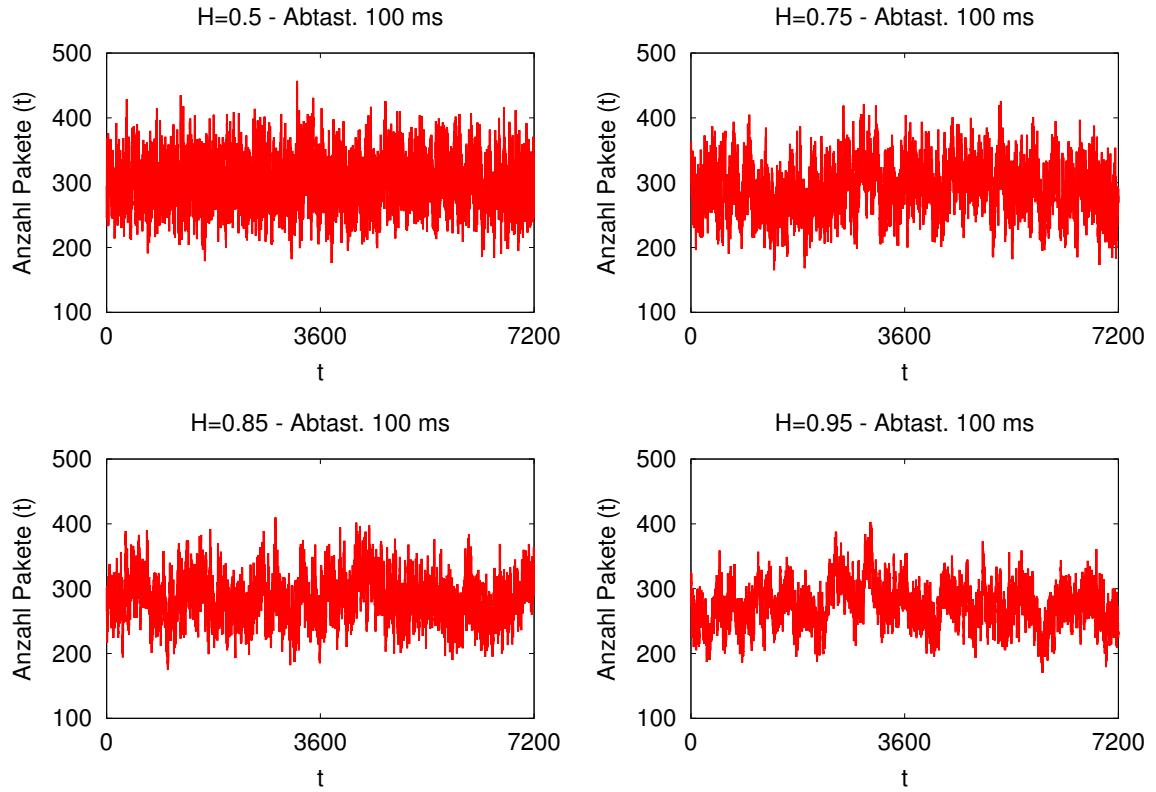


Abbildung 5.12: Verkehrsströme mit unterschiedlichem Hurst-Parameter

für ein $0 < \alpha < 2$ und ein $c > 0$ gilt [Cro98]. $\bar{F}(x) = 1 - F(x)$ steht dabei für die konjugierte Verteilungsfunktion. Entscheidend ist dabei das durch den Parameter α ausgedrückte (langsame) Abklingverhalten der Funktion für große x . Verteilungsfunktionen mit der genannten Eigenschaft zeichnen sich durch eine sehr hohe Variabilität aus, d. h. es treten sowohl kleine als auch extrem große Realisierungen mit nicht vernachlässigbarer Wahrscheinlichkeit auf. Diese Variabilitätseigenschaft wird mathematisch untermauert durch die Tatsache, dass heavy-tailed-Verteilungen für $\alpha < 2$ keine Varianz und für $\alpha < 1$ keinen Erwartungswert besitzen.

Die grundlegende Erkenntnis verschiedener empirischer Untersuchungen in LANs und WANs, durch welche selbstähnliches Verkehrsverhalten begründet werden kann, besteht darin, dass die zeitlichen Perioden der Sendeaktivität auf verschiedenen Schichten des Protokoll-Stapels durch Verteilungen mit der

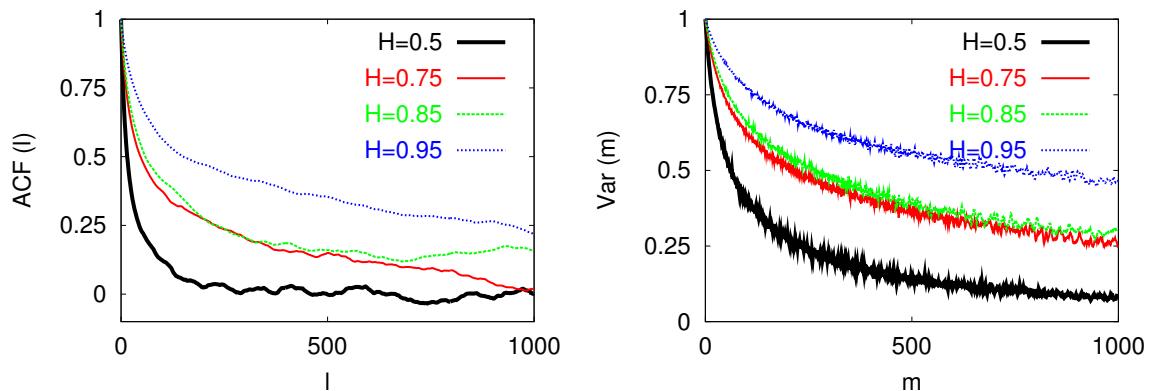


Abbildung 5.13: Autokorrelation und skalierte Varianzen von Verkehrsströmen mit unterschiedlichem Hurst-Parameter

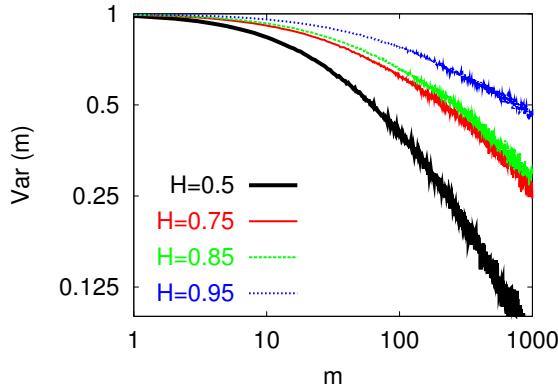


Abbildung 5.14: Logarithmierte Darstellung skalierter Varianzen von Verkehrsströmen mit unterschiedlichem Hurst-Parameter

heavy-tailed-Eigenschaft angemessen charakterisiert werden können. Dabei muss unterschieden werden zwischen lokalen Netzwerken und Weitverkehrsnetzwerken.

Die Sendeaktivität in lokalen Netzwerken wie z. B. Ethernet kann durch Sender-Empfänger-Paare beschrieben werden, die einen stetigen Wechsel zwischen Sendeperioden (*ON-Perioden*) und Sendepausen (*OFF-Perioden*) mit der heavy-tailed-Eigenschaft unterliegen [Wil97]. Durch die Überlagerung mehrerer solcher alternierender Prozesse kann selbstähnliches Verkehrsverhalten begründet werden. Dabei ist die heavy-tailed-Eigenschaft der Sendedauern für die Entstehung der Selbstähnlichkeit ausschlaggebend (siehe Anhang B.4).

Für die Erklärung der Selbstähnlichkeit in Weitverkehrsnetzen sind ebenfalls heavy-tailed-Verteilungen als bedeutendste Ursache anzusehen. Diese treten im Zusammenhang mit folgenden Kenngrößen von Informationen, die in Weitverkehrsnetzen übertragen werden, auf:

1. Dateigrößen von Dokumenten, die über HTTP oder FTP im World Wide Web übertragen werden [Pax95b, Cro96]
2. Dauer von HTTP- oder FTP-Sitzungen [Pax95b, Cro96]
3. Dauer und übertragene Datenmenge bei TCP-Verbindungen [Wil01, Err02]
4. Dauer und übertragene Datenmenge bei IP-Flüssen [Wil01, Err02]

Die Auflistung dokumentiert, dass heavy tails in verschiedenen Schichten des TCP/IP-Protokollstapels auftreten. Es besteht jedoch Grund zu der Annahme, dass die durch die heavy-tailed-Eigenschaft dominierte *Empirik* der Dateigrößen bzw. Zeitdauern, die über Weitverkehrsnetze übertragen werden, als Ursache für die heavy tails in den verschiedenen Protokollsichten anzusehen ist [Cro96]. Die starke Korrelation zwischen der Größe einer beispielsweise über FTP übertragenen Datei und der Dauer der zugehörigen FTP-Verbindung (Anwendungsschicht), TCP-Verbindung (Transportschicht) bzw. des zugehörigen IP-Flusses (Netzwerkschicht) führt dazu, dass sich die heavy-tailed-Eigenschaft auf die genannten Schichten überträgt.

Zusammenfassend kann man diesen Sachverhalt wie folgt schildern:

Heavy tails sind die passende Charakterisierung der Verteilung für die Größe von Informationsmengen, die über paketvermittelnde Netzwerke übertragen werden. Sie entstehen quasi oberhalb des Protokollstapels schichtenorientierter Kommunikations-Software und ziehen sich durch den gesamten Protokollstapel hindurch.

Charakteristisch für heavy-tailed-Verteilungen bei Dateigrößen, die in paketvermittelnden Netzwerk übertragen werden, ist die Tatsache, dass ein sehr kleiner Anteil der Dateien (etwa 10 %) einen sehr hohen Anteil der übertragenen Informationsmenge ausmacht (ca. 90 %, vgl. [Mol03], 1.5). Die „Langläufer“ unter den daraus resultierenden Verbindungsduern dominieren dabei die statistischen Eigenschaften aggregierter Verkehrsflüsse.

Wie bei den lokalen Netzwerken lässt sich auch für den Bereich der Weitverkehrsnetze eine mathematische Begründung für die Entstehung von Selbstähnlichkeit durch Überlagerung von Verkehrsflüssen mit der heavy-tailed-Eigenschaft liefern. Dafür ist das so genannte *infinite source Modell* mit Verbindungsduern mit der heavy-tailed Eigenschaft (ISH)¹⁰ geeignet (vgl. [Add99, Nea03] und Anhang B.4).

Einer der Aspekte, die Selbstähnlichkeit aus der Sicht der Modellierung besonders interessant macht, besteht darin, dass sich selbstähnliche Verkehrsströme auf einer Verbindungsleitung mit sehr wenigen Parametern beschreiben lassen ([parsimonious modeling]). Setzt man die Stationarität eines Verkehrsstromes voraus, so sind dies:

- die mittlere übertragene Datenrate
- die Streuung der mittleren übertragenen Datenrate
- der Selbstähnlichkeitsparameter

Mit Hilfe der drei genannten Parameter lässt sich ein selbstähnlicher Verkehrsstrom vollständig beschreiben [Err02].

5.4.4 Verkehrsmodell für Datenverkehr

Innerhalb der Modell-gestützten Untersuchung selbstähnlicher Verkehrsströme müssen zwei grundlegende Ansätze unterschieden werden [Joo01]:

- der “closed loop-Ansatz“

Der closed loop-Ansatz geht davon aus, dass die Sender innerhalb eines paketvermittelnden Netzwerkes ihre Aktivität permanent an die aktuellen Randbedingungen der Netzbelaistung anpassen. Im Falle des am weitesten verbreiteten Transportprotokolls TCP wird diese ständige Rückkopplung z. B. erreicht durch eine Anpassung der Sende- und Empfangsfenstergrößen des *sliding window*-Verfahrens [Tan96] und einen Zustandswechsel des TCP-Senders zwischen den Zuständen *slow start* und *congestion avoidance* [Joo01]. Der Begriff “closed loop“ bezieht sich auf die Periodizität der beiden Schritte

- Anpassung der Sendeaktivität und
- (explizite oder implizite) Erfassung und Weiterleitung von Informationen über die aktuelle Verkehrsbelastung zur Kontrolle der Sendeaktivität

und versucht, diese in das Modell zu integrieren.

- der “open loop-Ansatz“

Der open loop-Ansatz basiert auf den Eigenschaften empirisch gemessener oder durch Simulation generierter Verkehrsströme. Die daraus resultierenden Verkehrsbeschreibungen dienen als Eingangsparameter für das Modell (*[trace-driven analysis]*). Dabei wird davon ausgegangen, dass die

¹⁰In der Literatur wird der Spezialfall, in dem die Dauern der ON-Perioden Pareto-verteilt sind auch mit *M/Pareto-Modell* [Bod00] oder *Poisson Pareto Burst Process (PPBP)* [Nea03] bezeichnet.

Wechselwirkungen zwischen Verkehrsaufkommen und den Fluss- bzw. Staukontrollmechanismen der Protokolle bereits in den Eigenschaften der gemessenen bzw. simulierten Datenströme enthalten sind. Im Gegensatz zum closed loop-Ansatz beschreibt also das auf höherer Abstraktionsebene angesiedelte open loop-Modell den Effekt der Selbstähnlichkeit als Ganzes, ohne die Einzelheiten der Funktionalität von Netzwerk-Software zu berücksichtigen.

In der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich der open loop-Ansatz verwendet. Die Kerngedanken, die diese Vorgehensweise motivieren und rechtfertigen, sind

- *Detaillierungsgrad eines Modells*

Der Versuch, Vorgänge in paketvermittelnden Netzwerken in Modellen mit hohem Detaillierungsgrad nachzubilden, muss als fraglich eingestuft werden, da die in der Praxis auftretenden Wechselwirkungen zwischen Verkehrsbelastung und der Kommunikations-Software (insbes. Flusskontrolle und Staukontrolle) eine Dynamik entwickeln können, die sich im Modell nicht oder nur unzureichend erfassen lässt (z. B. chaotisches Verhalten der TCP-Staukontrolle, siehe [Ver00]). Dies spricht gegen einen closed loop-Ansatz.

- *Unabhängigkeit von Protokollen*

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Ziel verfolgt, eine protokollunabhängige Sichtweise bei der Untersuchung der Verlässlichkeit von Netzwerken zu erreichen. Dabei motiviert gerade die Architektur-Unabhängigkeit (vgl. Abschnitt 5.4.3) der Selbstähnlichkeit eine Betrachtungsweise, die über das Verhalten einzelner Protokolle oder Protokoll-Stapel hinausgeht.

- *zeitliche Granularität*

Für die Entscheidung zwischen dem closed loop und dem open loop-Ansatz spielt die Größenordnung der Zeiträume, für die eine Verkehrsbeobachtung durchgeführt wird, eine entscheidende Rolle. Dabei kann unterschieden werden zwischen *Kurzzeitverhalten* und *Langzeitverhalten* von Verkehr, wobei eine Dauer von 1 s als angemessene Trennlinie zwischen den beiden Zeitbereichen dient [Err02].

Während das Verkehrsverhalten im Kurzzeitbereich sehr stark durch die Funktionalität der Netzwerk-Protokolle wie Fehlerkorrektur, Staukontrolle oder Flusskontrolle beeinflusst wird und sich in diesem Zeitbereich eine Vielzahl von komplexen Wechselwirkungen ergeben, dominiert die durch die Selbstähnlichkeit hervorgerufene Langzeitabhängigkeit das Langzeitverhalten von Verkehrsströmen und ist dabei relativ robust gegenüber Verkehrs-Schwankungen im Kurzzeitbereich (vgl. [Ver00, Joo01, Err02]).

- *Stabilisierungseffekte*

Die Quintessenz empirischer Untersuchungen über das Verkehrsverhalten in paketvermittelnden TCP-Weitverkehrsnetzwerken¹¹ nach der Entdeckung der Langzeitabhängigkeit in [Lel94] besteht darin, dass aggregierte Verkehrsströme trotz der durch TCP hervorgerufenen ständigen Anpassungen der Sende-Datenrate Selbstähnlichkeit und Langzeitabhängigkeit aufweisen [Pax95b, Kli95, Cro96, Wil96]. Dies spricht für eine Annäherung an eine reale TCP-Verbindung durch eine Verbindung mit konstanter Datenrate. Die real existierenden Fluktuationen der Sende-Datenrate bei TCP-Verbindungen fallen bei den statistischen Eigenschaften der Überlagerung mehrerer Verbindungen nicht ins Gewicht. Hier dominiert statt dessen die heavy-tailed Eigenschaft der Verbindungsduer.

¹¹Wegen der Dominanz von TCP werden andere Transportprotokolle nicht betrachtet.

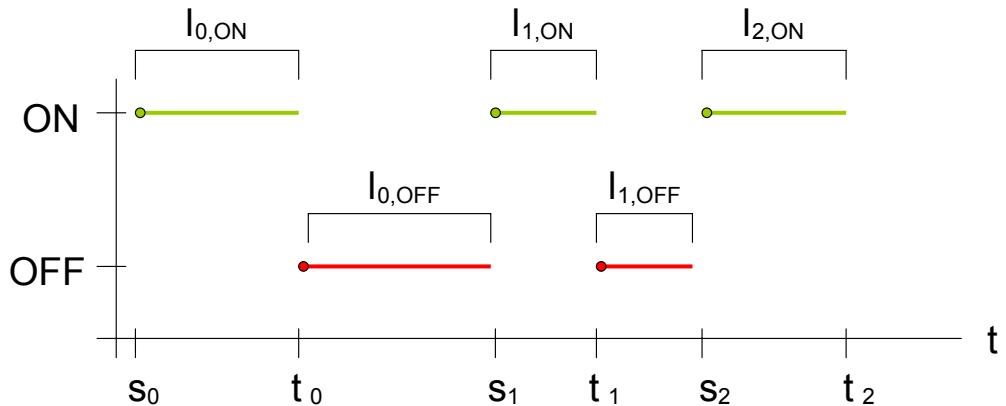


Abbildung 5.15: ON-OFF-Prozess

Generierung selbstähnlicher Verkehrsströme

Zur Generierung synthetischer selbstähnlicher Datenströme in paketvermittelnden Netzwerken gibt es eine Reihe von Techniken. Dazu zählen

- Überlagerung von ON-OFF-Erneuerungsprozessen (vgl. Anhang B.4)

Bei dieser Technik werden alternierende Erneuerungsprozesse überlagert. Ein alternierender Erneuerungsprozess besitzt genau zwei Zustände, die abwechselnd besucht werden (vgl. Abb. 5.15). Die Bezeichnungen sind dabei wie folgt zu interpretieren:

- s_i : Beginnzeitpunkt einer ON-Periode
- t_i : Beginnzeitpunkt einer OFF-Periode
- $l_{i,ON}$: Dauer einer ON-Periode
- $l_{j,OFF}$ Dauer einer OFF-Periode.

Die Verteilungen der Aufenthaltsdauern in den beiden mit **ON** und **OFF** bezeichneten Zuständen eines solchen Erneuerungsprozesses besitzen dabei die *heavy-tailed* Eigenschaft (vgl. Anhang B.2.1). Die zugehörigen Zufallsgrößen sind voneinander stochastisch unabhängig. Die Verteilung für den Zustand **ON** kann eine andere sein als die Verteilung für den Zustand **OFF**. Während der ON-Perioden wird Verkehr mit konstanter Bandbreite generiert. Durch Überlagerung von mehreren ON-OFF-Erneuerungsprozessen kann selbstähnliches Verkehrsverhalten simuliert werden [Ryu96b, Wil97].

- *infinite source heavy-tailed Modell (ISH)* (vgl. Anhang B.4)

Im Gegensatz zur Überlagerung einer (endlichen) Anzahl von ON-OFF-Prozessen geht das *infinite source Modell* davon aus, dass die Ankunft von Verbindungen an einem vermittelnden Netzknoten durch einen Poisson-Prozess beschrieben werden kann. Der Name resultiert aus der Vorstellung von der Ankunft einer unbegrenzten Anzahl von Verbindungen am Netzknoten. Im Gegensatz zu dem beschriebenen Poisson-Modell (ISE)¹² besitzen die Verbindungsduern hier die *heavy-tailed*-Eigenschaft (ISH). Im Spezialfall Pareto-verteilter ON-Perioden wird die Bezeichnung ISP (infinite source Pareto) verwendet. Eine Variation des ISH-Modells ergibt sich, wenn man die angeforderte Bandbreite der ON-Perioden nicht konstant lässt, sondern diese zusätzlich variiert. Abbildung 5.16 stellt den zeitlichen Verlauf der Bandbreiten-Nutzung des auf diese Weise erhaltenen ISHV-Modells schematisch dar.

¹²E steht dabei für *Exponential*.

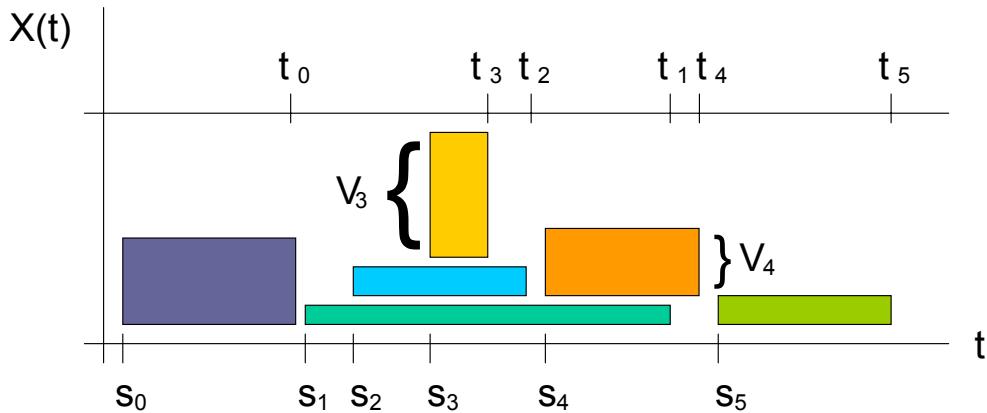


Abbildung 5.16: infinite source heavy-tailed Modell mit variierenden ON-Perioden (ISHV)

- *Deterministische chaotische Abbildungen [deterministic chaotic maps]*

Die Generierung selbstähnlichen Verkehrs durch deterministische chaotische Abbildungen ähnelt der Technik der ON-OFF-Erneuerungsprozesse. Auch hier wechseln sich Perioden, in denen Verkehr erzeugt wird mit verkehrslosen Perioden ab. Der Unterschied zur ersten beschriebenen Technik liegt im Auslöser für den Übergang vom ON-Zustand in den OFF-Zustand. Während im ersten Fall eine Zufallsvariable mit der heavy-tailed-Eigenschaft den Übergang steuert, wird dies im zweiten Fall durch eine chaotische Abbildung erledigt. Eine chaotische Abbildung ist durch die Beschreibung eines *Anfangszustandes* und eine Menge von *Entwicklungsregeln* eindeutig bestimmt [Err94]. Eine solche Abbildung $f(x)$ zeichnet sich durch die Eigenschaft der *sensitiven Abhängigkeit vom Anfangszustand* aus. Für zwei nahe beieinander liegende Anfangswerte x_0 und $x_0 + \epsilon$ weichen die sich aus der Vorschrift $x_{n+1} = f(x_n) = f^n(x_0)$ ergebende *Trajektorien* $x_0, f(x_0), f^2(x_0) \dots$ und $x_0 + \epsilon, f(x_0 + \epsilon), f^2(x_0 + \epsilon), \dots$ exponentiell voneinander ab, d. h. es gilt

$$|f^n(x_0) - f^n(x_0 + \epsilon)| = \epsilon \cdot e^{n \cdot \lambda(x_0)},$$

wobei $\lambda(x_0) > 0$ für fast alle Anfangszustände x_0 gilt.

Für die Generierung von Paketverkehr kann folgender Mechanismus verwendet werden: Es wird eine Schwelle d festgelegt, die die Grenze zwischen ON- und OFF-Zustand bildet. Je nachdem, ob $f_n(x) \leq d$ oder $f_n(x) > d$ gilt, befindet sich der Verkehrsgenerator zum Zeitpunkt n im ON- bzw. OFF-Zustand. Die Feinheit des diskreten Zeitrasters muss dabei der gewünschten Granularität angepasst werden.

Der Vorteil der chaotischen Abbildungen gegenüber der Technik der Erneuerungsprozesse liegt darin, dass während der Simulation nicht ständig Pseudozufallszahlen generiert werden müssen. Statt dessen kann die zeitliche Fortentwicklung der durch eine chaotische Abbildung bestimmten Trajektorie durch eine explizit gegebene analytische Formel bestimmt werden.

Die Technik chaotischer Abbildungen wird eingesetzt, um die Wechselwirkungen zwischen den Staukontrollmechanismen der Transportprotokolle wie TCP und der aktuellen Netzbelaistung zu berücksichtigen [Err02] und unterstützt somit den closed loop-Modellierungs-Ansatz.

- *Warteschlangenmodelle*

Durch Simulation eines $M/G/\infty$ -Warteschlangenmodells mit einer Bedienzeit, die eine Verteilung mit nicht endlicher Varianz besitzt, entsteht für die Warteschlangenlänge¹³ ein langzeitabhän-

¹³Die Warteschlangenlänge entspricht der Anzahl der gerade bedienten Kunden des Systems. Durch die unbegrenzte Anzahl von Bedienstationen besteht die Systemzeit eines Kunden nur aus der Bedienzeit, der Wartezeit-Anteil entfällt hingegen.

giger stochastischer Prozess. Durch diskretes Abtasten der Warteschlangenlänge kann eine Annäherung an einen selbstähnlichen stochastischen Prozess gewonnen werden [Err97].

Die Anzahl der bedienten Kunden in einem $M/G/\infty$ -Warteschlangensystem entspricht der Anzahl der aktiven ON-Perioden im infinite source heavy-tailed Modell (s. u.). Verglichen mit den zuvor beschriebenen Techniken ist der Aufwand hier vergleichsweise hoch, insbesondere dann, wenn das Verhältnis zwischen Abtastrate und Ankunftsrate sehr klein ist.

- **Approximation der fraktalen Brownschen Bewegung (FBM)**

Die fraktale Brownsche Bewegung tritt in bestimmten, für die Verkehrsmodellierung relevanten Spezialfällen bei steigender Frequentierung und wachsender Bandbreite der ON-Perioden als Grenzprozess des ARH-Modells und des ISHT-Modells auf (zu technischen Einzelheiten vgl. Anhang B.4.1).

Weitere Möglichkeiten zur Generierung selbstähnlicher Verkehrsströme finden sich in [Pax95a, Ryu96b]. Im Hinblick auf die Verwendung innerhalb eines Simulationsmodells sind folgende Kriterien bei der Auswahl einer Technik von Bedeutung:

- **Physikalische Erklärung**

Das ON-OFF-Modell und das infinite source heavy-tailed Modell erlauben im Gegensatz zu anderen genannten Modellierungstechniken eine physikalische Erklärung fraktalen Verkehrsverhaltens (vgl. Abschnitt 5.4.3). Der Vorteil gegenüber den anderen Modellen besteht darin, dass den Parametern des Modells in diesem Fall eine unmittelbare Bedeutung zugemessen werden kann. Ausschließlich aus den statistischen Eigenschaften einer gemessenen Zeitreihe abgeleitete Modelle (*Black Box-Modelle*) hingegen entbehren einer schlüssigen Begründung für das Zustandekommen fraktalen Verkehrsverhaltens und bieten somit einen begrenzten Spielraum für die Verallgemeinerung der in ihnen enthaltenen Mechanismen zur Generierung synthetischer selbstähnlicher Verkehrsströme, sowie einen eingeschränkten Gehalt der Prognosefähigkeit von Modellen, die Black-Box-Modelle benutzen.

- **Beherrschbarkeit der Technik**

Unter Beherrschbarkeit soll hier verstanden werden, dass die Auswirkungen von Änderungen an den Parametern einer Technik und die daraus resultierenden Effekte bekannt sind. Dadurch soll eine Verfälschung des Simulationsergebnisses vermieden werden.

- **Einfache und effiziente Implementierung**

Mit ansteigender Komplexität eines Simulationsmodells nimmt die Bedeutung einer effizienten Implementierung einzelner Simulationsmodule im Hinblick auf eine möglichst geringe Beanspruchung von Rechenzeit zu. Da die Verkehrsgenerierung eines der am häufigsten aufgerufenen Simulationsmodule ist, gilt diese Aussage für dieses Modul in besonderer Weise.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden aggregierte ON-OFF-Prozesse (ARH), das infinite source heavy-tailed Modell (ISH), und fraktales Gaußsches Rauschen (FGN) als Basisinstrumente zur Simulation von Datenverkehr gewählt. Alle Techniken sind bezüglich der genannten Auswahlkriterien als geeignet einzustufen:

- Auf die Erklärung selbstähnlichen Verkehrsverhaltens wurde bereits in Abschnitt 5.4.3, Unterabschnitt "Erklärungen für Selbstähnlichkeit in paketvermittelnden Netzwerken" eingegangen.
- Die mathematischen Eigenschaften der Techniken und deren Bedeutung in Bezug auf die Simulation von Verkehr in Datennetzen sind in ausreichendem Maße untersucht (vgl. [Ryu98, Wil97]).

- Die Implementierung des ON-OFF-Modells ist mit geringem Aufwand möglich. Ein einzelner ON-OFF-Erneuerungsprozess kann mit Hilfe zweier Ereignistypen START_ON_PERIOD und START_OFF_PERIOD, welche für das Wechseln vom ON-Zustand in den OFF-Zustand benutzt werden, realisiert werden. Zur Generierung von Verkehr mit konstanter Bandbreite während der ON-Perioden kann die in Abschnitt 5.4.1 benutzte Technik verwendet werden. Ein weiterer Vorteil des ON-OFF-Modells besteht in dessen Eignung im Hinblick auf eine Parallelisierung der Verkehrsgenerierung [Taq97].

Für die Implementierung der infinite source heavy-tailed Methode ist ein Signalgeber, der den Beginn einer neuen Verbindung anzeigen, und für jede Verbindung die Generierung einer Zufallszahl für die Verbindungsduer notwendig, d. h. die Methode lässt sich ebenfalls effizient implementieren. Bei den praktischen Simulationsversuchen wurde die Verteilungsduer leicht modifiziert. Dabei wurde der Träger der Pareto-Verteilung einerseits verschoben und andererseits auf eine beschränkte Menge gestutzt (vgl. dazu Anhang B.2.2).

Zur Approximation der fraktalen Brownschen Bewegung wird das in [Pax95a] dokumentierte Verfahren benutzt, welches die schnelle Fourier-Transformation einsetzt, um den generierten stochastischen Prozess vom Frequenz- in den Zeitbereich zu transformieren. Die Vor- und Nachteile der Technik werden in [Jeo98] und [Jeo02] ausführlich diskutiert.

Eigenschaften der Überlagerung von ON-OFF-Prozessen

Das aus Überlagerung mehrerer ON-OFF-Prozesse bestehende Verkehrsmodell wird durch vier voneinander unabhängige Parameter bestimmt:

- Die Anzahl n überlagerter Prozesse.
- Die Verteilungsfunktion F_{ON} der Aufenthaltsduer für den ON-Zustand mit dem Abklingparameter α_{ON}
- Die Verteilungsfunktion F_{OFF} der Aufenthaltsduer für den OFF-Zustand mit dem Abklingparameter α_{OFF}
- Die von einem einzelnen ON-OFF-Prozess während einer ON-Periode generierte (konstante) Datenrate v_{ON} [$kbps$]

Sei $(W_{i,t}, t \geq 0)$, $1 \leq i \leq n$ eine Menge von ON-OFF-Prozessen, wobei im Zustand ON eine konstante Datenrate von v_{ON} generiert wird.

Die Überlagerung der n Prozesse ist gegeben durch

$$W_t^n = \sum_{i=1}^n W_{i,t}.$$

Für die durch W_t^n generierte mittlere Datenrate im stationären Zustand ergibt sich folgender Zusammenhang¹⁴:

$$\mu_{AR} := \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbb{E}(W_t^n) = \sum_{i=1}^n \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbb{E}(W_{i,t}) = n \cdot \frac{\mu_{ON}}{\mu_{ON} + \mu_{OFF}} \cdot v_{ON}. \quad (5.7)$$

Dabei bezeichnet μ_{ON} [μ_{OFF}] den Erwartungswert der Verteilung der Dauer des ON-[OFF]-Zustandes.

¹⁴ AR steht in diesem Zusammenhang für *Alternating Renewal*.

Eines der zentralen Resultate über selbstähnliche Verkehrsströme besagt, dass die kumulierte, durch Überlagerung von ON-OFF-Prozessen generierte Last eine asymptotische Annäherung an einen exakt selbstähnlichen stochastischen Prozess bildet, die fraktale Brownsche Bewegung (vgl. Anhang B.4).

Wie beschrieben sind die statistischen Eigenschaften exakt selbstähnlicher Prozesse durch die drei Parameter mittlere Datenrate, Varianz der mittleren generierten Datenrate und Hurst-Parameter festgelegt (siehe [Err02] und Anhang B.4). Innerhalb des ON-OFF-Modells entsprechen diese drei Parameter den folgenden drei Größen, die das Verkehrsverhalten im stationären Zustand charakterisieren:

- *Erwartungswert* μ_{AR} (siehe Gleichung (5.7))
- *Varianz* $\sigma_{AR}^2 = \lim_{t \rightarrow \infty} \text{Var}(W_t^n)$
- *Hurst-Parameter* H .

Für die Varianz σ_{AR}^2 erhält man

$$\sigma_{AR}^2 = n \cdot \pi(1 - \pi) \cdot v_{ON}^2, \quad (5.8)$$

wobei

$$\pi := \frac{\mu_{ON}}{\mu_{ON} + \mu_{OFF}}.$$

Dies kann wie folgt einsehen: Für einen einzelnen ON-OFF-Prozess $(W_{i,t}, t \geq 0)$ mit dem Erwartungswert $\mu_i := \lim_{t \rightarrow \infty} \mu_{i,t} := \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbb{E}(W_{i,t}) = \pi v_{ON}$ hat man

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \text{Var}(W_{i,t}) &= \lim_{t \rightarrow \infty} E([W_{i,t} - \mu_{i,t}]^2) \\ &= \pi \cdot (v_{ON} - \mu_i)^2 + (1 - \pi) \cdot (0 - \mu_i)^2 \\ &= \pi \cdot (v_{ON} - \pi v_{ON})^2 + (1 - \pi) \cdot (0 - \pi v_{ON})^2 \\ &= \pi \cdot (1 - \pi)^2 \cdot v_{ON}^2 + (1 - \pi) \cdot \pi^2 \cdot v_{ON}^2 \\ &= \pi \cdot (1 - \pi) \cdot v_{ON}^2. \end{aligned}$$

Dabei wird die Überlegung ausgenutzt, dass $W_{i,t}$ im stationären Zustand mit Wahrscheinlichkeit π gerade aktiv ist und mit Wahrscheinlichkeit $1 - \pi$ nicht aktiv ist (Bernoulli-Experiment).

Unter der Annahme der Unabhängigkeit der überlagerten ON-OFF-Prozesse hat man

$$\text{Var}(W_t^n) = \text{Var}(W_{1,t}) + \dots + \text{Var}(W_{n,t})$$

und erhält sofort die Behauptung.

Als Annäherung an den Parameter H ergibt sich mit Hilfe des zentralen Resultats aus Anhang B.4

$$H = \frac{3 - \min\{\alpha_{ON}, \alpha_{OFF}\}}{2} \quad (5.9)$$

(vgl. [Taq97]). Dabei ist zu bemerken, dass die Überlagerung von ON-OFF-Prozessen selbst nur eine Näherung an einen exakt selbstähnlichen Prozess darstellt. Der Parameter H muss in diesem Sinne interpretiert werden.

Eigenschaften des infinite source heavy-tailed Modells

Die mittlere Datenrate, deren Varianz und der Hurst-Parameter sollen nun für das infinite source heavy-tailed Modell hergeleitet werden.

Da das Modell bis auf die Verteilung der Verbindungsduern¹⁵ dem in Abschnitt 5.4.2 vorgestellten Sprachverkehrsmodell entspricht, ergibt sich für das im stationären Zustand generierte mittlere Verkehrsvolumen eine analoge Beziehung:

$$\mu_{IS} = \lambda_a \cdot v_{ON} \cdot \mu_{ON}. \quad (5.10)$$

Dabei bezeichnen

- λ_a die Ankunftsrate¹⁶ für ON-Perioden (Verbindungen)
- v_{ON} die während einer einzelnen ON-Periode generierte (konstante) Bandbreite
- μ_{ON} den Erwartungswert der Dauer einer einzelnen ON-Periode.

Die Berechnung der Varianz des infinite source Modells basiert auf der Anzahl der in einem $M/G/\infty$ -Warteschlangensystem bedienten Kunden im stationären Zustand. Das Resultat ist direkt auf das kurzzeitabhängige Sprachmodell übertragbar. Der Kunden-Ankunftsprozess der Warteschlange entspricht dabei den Verbindungswünschen im Verkehrsmodell. Ankommende Kunden werden auf Grund der unbeschränkten Anzahl der Bedienstationen sofort bedient.

Sei N die Anzahl von Kunden im System im stationären Zustand. Die Zufallsvariable D mit dem Erwartungswert $\mu_{ON} = \mathbb{E}(D)$ beschreibe die Bedienzeit. Nach dem Gesetz von Little [Kle75] hat man

$$\rho := \mathbb{E}(N) = \lambda_a \cdot \mu_{ON}.$$

Die Zufallsvariable N ist Poisson-verteilt mit Parameter ρ . Die Varianz der Anzahl der Kunden im System beträgt demzufolge

$$Var(N) = \rho.$$

und man erhält für die Varianz des Gesamtprozesses

$$\sigma_{IS}^2 = v_{ON}^2 \cdot \rho \quad (5.11)$$

Das infinite source heavy-tailed Modell erzeugt bei geeigneter Skalierung und Grenzwertbildung eine asymptotische Annäherung an einen exakt selbstähnlichen stochastischen Prozess mit Parameter

$$H = (3 - \alpha)/2 \quad (5.12)$$

(vgl. Anhang B.3). α bezeichnet dabei den Abklingparameter der Verteilung der Aufenthaltsdauer des ON-Zustandes.

5.5 Lastprofil

Verkehrsbewegungen innerhalb eines Netzwerkes können auf verschiedenen Granularitätsebenen beschrieben werden:

- *Zell-Ebene*
- *Burst-Ebene*

¹⁵Beim Sprachmodell hat man eine Exponentialverteilung als Verbindungsduer, hier eine Verteilung mit der heavy-tailed-Eigenschaft.

¹⁶Diese entspricht der Anzahl der aktiven ON-Perioden im Überlagerungsmodell.

- **Verbindungsebene**

Ein *Mikroprofil* beschreibt das Verkehrsverhalten einzelner Benutzer auf Verbindungsebene an Hand von *Sitzungen* und *Verbindungen*¹⁷. Sitzungen können mehrere Verbindungen umfassen. Ein einzelne Verbindung ist gekennzeichnet durch die Angaben

- *Dauer*
- *Quelle*
- *Ziel*
- *angeforderte Bandbreite.*

- **Überlagerungsebene**

Die Beschreibung aggregierter Verkehrsströme geschieht durch *Makroprofile*. Makroprofile drücken aus, wie sich die Überlagerung von Verbindungen innerhalb eines Netzwerkes verhält. Dabei ist zu unterscheiden zwischen *Verkehrsflüssen*, die den Paketstrom zwischen einem dedizierten Paar von vermittelnden Netzknoten beschreiben, und *Verkehrsströmen*, welche die Gesamtheit der auf einer Verbindungsleitung übertragenen Pakete repräsentieren und sich aus der Überlagerung einer Vielzahl von Verkehrsströmen und Verbindungen ergeben.

Innerhalb der hier durchgeführten Simulationsstudien werden einzelne Verbindungen mit konstanter Zellrate als Basisinstrument zur Generierung von Verkehr benutzt. Verkehrsströme ergeben sich aus Verbindungen durch Überlagerung und werden durch folgende Faktoren beeinflusst:

- **Zielverhalten**

Das *Zielverhalten* drückt aus, zu welchen Zielen innerhalb des Netzwerkes Verbindungen aufgebaut werden. Hierbei werden zwei Strategien umgesetzt: Bei der *lokalen Zielstrategie* werden Verbindungen zu aktiven Knoten eines einzelnen zufällig ausgewählten Subnetzes aufgebaut; bei der *globalen Zielstrategie* werden hingegen alle aktiven Knoten innerhalb der vorliegenden Netztopologie angesteuert. Beide Generatoren bauen ausschließlich Verbindungen zu (aktiven) Randknoten auf.

- **Lastparameter**

Die Charakteristik der simulativ generierten Last wird auf Mikro-Ebene durch die Verteilung der Dauern von Verbindungen und die angeforderte Bandbreite und auf Makro-Ebene an Hand der Frequentierung von Verbindungen festgelegt.

Um die Simulationsergebnisse von Versuchen mit verschiedenen Verkehrsmodellen vergleichbar zu machen, ist es notwendig, die Lastparameter anzupassen. Dabei wird wie folgt vorgegangen: Für jeden *aktiven Knoten* werden die *insgesamt generierte mittlere Datenrate* μ , die *Varianz* σ^2 und bei langzeitabhängigem Verkehr der *Hurst-Parameter* H fest vorgegeben. Angepasst werden die *mittlere Datenrate pro Verbindung* (AR und IS) und die *Anzahl überlagerter ON-OFF-Prozesse* (AR) bzw. die *Frequentierung* (IS).

Dabei werden folgende Beziehungen ausgenutzt, die sich unmittelbar aus den Gleichungen (5.7), (5.8), (5.4), (5.10) und (5.11) ergeben.

¹⁷Der Begriff Verbindung entspricht hier dem in [ITU] definierten Begriff der Transaktion, vgl. Abschnitt 3.3.

Für das AR-Modell hat man

$$\begin{aligned} v_{ON}(\mu_{AR}, \sigma_{AR}^2, H) &= \frac{\sigma_{AR}^2}{\mu_{AR}(1 - \pi)} \\ n_{AR}(\mu_{AR}, \sigma_{AR}^2, H) &= \frac{\mu_{AR}^2(1 - \pi)}{\pi \sigma_{AR}^2}. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Die Parameter der IS-Verkehrsgeneratoren ISE und ISHT werden wie folgt adaptiert:

$$\begin{aligned} v_{ON}(\mu_{IS}, \sigma_{IS}^2, H) &= \frac{\sigma_{IS}^2}{\mu_{IS}} \\ \lambda_a(\mu_{IS}, \sigma_{IS}^2, H) &= \frac{\mu_{IS}^2}{\sigma_{IS}^2 \mu_{IS}}. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Der Hurst-Parameter tritt in keiner der Gleichungen auf. Dieser wird durch die Wahl des Abklingparameters der Verteilung der ON-Perioden mit Hilfe der Beziehung

$$H = (3 - \alpha)/2$$

gesteuert.

5.6 Ausfallprofil

Ein Ausfallprofil dient der quantitativen Modellierung von Ausfällen innerhalb eines Netzwerkes. Dabei sind pro eintretendem Ausfallereignis folgende Angaben über das Ausfallverhalten relevant (vgl. auch Abschnitt 3.1.2):

- Zeitpunkt des Ausfalls
- Ausfalldauer
- Menge der betroffenen Netzkomponenten und Grad der Beeinträchtigung
- Menge der betroffenen Netzdienste
- Menge der betroffenen Benutzer

Auf die Menge der betroffenen Benutzer und die betroffenen Netzdienste wird hier nicht eingegangen, da eine detaillierte Untersuchung einzelner Dienste und deren Beeinträchtigung durch Ausfälle von Netzwerkkomponenten nicht Ziel dieser Arbeit ist (vgl. Abschnitt 5.4). Das gleiche gilt für die durch Ausfälle hervorgerufene Beeinträchtigung der Benutzer des Netzwerkes, welche im Wesentlichen von dem wahrgenommenen Dienst und dessen aus Benutzersicht wünschenswertem Grad der Verfügbarkeit sowie der Anzahl der zur Zeit gerade das Netzwerk in Anspruch nehmenden Benutzer abhängt.

Die Ausfallbeschreibung beschränkt sich somit auf die drei Einflussgrößen *Zeitpunkt des Ausfalls*, *Ausfalldauer* und *Menge der betroffenen Netzkomponenten*.

Empirische Ausfallerhebung im BelWue

Die folgende Dokumentation fasst Erkenntnisse aus der Auswertung von Störungsmeldungen des Hochschulnetzes des Landes Baden-Württemberg (BelWue) zusammen [Bela]. Die zu Grunde liegenden Ausfallmeldungen überdecken einen Zeitraum von ca. 10 Monaten (17. Mai 2002 bis 22. März 2003) und bestehen aus frei über das Internet erhältlichen Störungsmeldungen, die von den Netzwerk-Administratoren der angebundenen Subnetze emmitiert werden [Belb].

Im genannten Zeitraum traten insgesamt 91 Störungsmeldungen auf. Nur 63 Ausfälle enthalten sowohl eine verlässliche Zeitangabe über die Dauer des Ausfalls als auch eine treffende Beschreibung der Ausfallursache und sind für eine statistische Erhebung verwendbar (siehe Tabelle 5.2). Ausgewertet werden Angaben über

- **Ausfallursache**

An Hand der in Abschnitt 3.2 vorgenommenen Klassifizierung wird unterschieden zwischen

- **Kategorie I: Ausfall durch Hardware-Fehler**

Festgestellte Hardware-Ausfälle waren *Kabelausfälle* wie z. B. Glasfaserkabelbrüche und *Knoten-Ausfälle*.

- **Kategorie II: Ausfall durch Software-Fehler**

- **Kategorie III: Ausfall durch menschliches Fehlverhalten (Humanware-bedingter Ausfall)**

- **Kategorie IV: Ausfall durch Umgebungseinfluss**

Als einzige Ausfallursache trat hierbei die Unterbrechung der Stromversorgung auf.

- **Kategorie V: Ausfall durch höhere Gewalt**

- **Ausfalldauer**

| Kategorie | Anzahl der Ausfälle | kumulierte Dauer [h] | durchschnittliche Dauer [h] |
|-----------|---------------------|----------------------|-----------------------------|
| I | 16 | 44.1 | 2.8 |
| II | 22 | 45.2 | 2.1 |
| III | 9 | 32 | 3.6 |
| IV | 10 | 81.3 | 8.1 |
| V | 6 | 11.3 | 1.9 |

Tabelle 5.2: Ausfälle im BelWue - Zusammenfassung

Tabelle 5.2 enthält eine Zusammenfassung der ausgewerteten Ausfallereignisse.

Der Anspruch der Vollständigkeit des analysierten Datenmaterials kann hier nicht erhoben werden. Es ist z. B. denkbar, dass Ausfälle, die sich in relativ kurzer Zeit beobachten ließen, erst gar nicht von den zuständigen Netzwerkadministratoren bekanntgemacht wurde. Andererseits fehlen Meldungen über bewusste Angriffe auf das Netzwerk und Überlast-Situationen komplett. Bei den Angriffen lässt sich die Informationszurückhaltung mit der Vermeidung der Bekanntgabe von Schwachstellen der Netzwerk-Architektur begründen, wodurch Nachahmerangriffe vermieden werden sollen.

Andererseits ist die Anzahl der im Erhebungszeitraum festgestellten Ausfallereignisse für eine fundierte statistische Analyse zu gering. Für die vorliegende Arbeit lassen sich dennoch wichtige Erkenntnisse gewinnen:

- **Dauer von Ausfällen**

Die gemeldeten Störungen belegen, dass sich die Ausfalldauern durchweg in Größenordnungen oberhalb einer Stunde bewegen. Für die Verlässlichkeitssmodellierung bedeutet dies, dass die Phase des Ausfallzustandes gegenüber der Restorationsphase vernachlässigbar ist und rechtfertigt somit die in Abschnitt 5.3.6 vorgenommene Vereinfachung.

- **Unabhängigkeit und identische Verteilung von Ausfällen**

Eine genauere Inspektion der Ausfalldaten ergibt, dass die Annahme der stochastischen Unabhängigkeit des Ausfalls einzelner Komponenten und die Annahme identischer Verteilungen für die Ausfalldauern bei der Modellierung von Ausfällen nicht aufrecht erhalten werden kann.

Insbesondere bei den hier nicht dokumentierten Angriffen mit dem Ziel der gleichzeitigen Störung ganzer Teilnetze muss die Unabhängigkeit des Ausfalls verschiedener Netzkomponenten als fraglich eingestuft werden.

Beide Aspekte finden innerhalb des hier vorgestellten Ausfallsmodells Berücksichtigung.

Modellierung von Ausfällen

Im Modell werden ausschließlich *Zusammenbrüche [crash failures]* untersucht, bei denen eine vollständige Unterbrechung der Funktionalität einer Netzkomponente eintritt. Die Modellierung weiterer Ausfallarten wie *Unterlassung [omission]*, *zeitbedingte Ausfälle [timing]*, *durch byzantinische Fehler verursachte Ausfälle [byzantine failure]* oder *Berechnungsausfälle [computation failure]* (vgl. [Jal94]) wird im Rahmen des Abstraktionsgrades des hier verwendeten Modellierungsansatzes nicht angestrebt.

Zur Beschreibung von Ausfällen wird folgende Terminologie verwendet:

Definition 5.2 Gegeben sei ein Netzwerk $N = (G, c)$ mit einem gerichteten Graphen $G = (V, E)$ nach Definition 5.1.

- a) Ein **Ausfall** in N ist ein Tripel $F = (t, M, d)$. Dabei bezeichnet $t \in \mathbb{R}$ den **Ausfallzeitpunkt**, $M \subset V \cup E$ die **Menge der beeinträchtigten Netzkomponenten** und d die **Ausfalldauer**.
- b) Eine **Ausfallstatistik** ist ein Tripel $A = (M, f, \bar{d})$, wobei M die Menge der ausgefallenen Komponenten, f den Erwartungswert der Anzahl der Ausfälle innerhalb eines Jahres und \bar{d} die mittlere Ausfalldauer beschreibt.

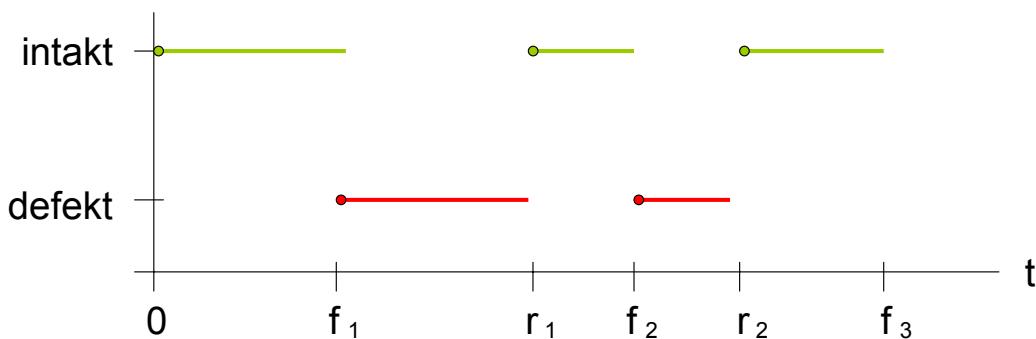


Abbildung 5.17: Ausfallmodell

Abbildung 5.17 zeigt schematisch die zeitliche Fortentwicklung des Betriebszustandes der Komponentenmenge des Gesamtnetzwerkes. Im Zustand **intakt** sind alle Komponenten betriebsbereit, im Zustand **defekt** ist ein Teil der Netzwerk-Komponenten, die **Ausfallmenge**, beeinträchtigt.

Die Zeitpunkte f_i , $i \in \mathbb{N}$ markieren Ausfälle von Netzwerk-Komponenten, die Zeitpunkte r_j , $j \in \mathbb{N}$ hingegen stellen die Wiederaufnahme des Betriebes nach erfolgreicher Fehlerdiagnose und Fehlerbehandlung dar.

Der dargestellte Ausfall-Prozess lässt sich mathematisch durch einen alternierenden Erneuerungsprozess beschrieben.

Das hier eingesetzte Ausfallprofil weicht von den in der Literatur angegebenen üblichen Profilen insofern ab, als Ausfälle verschiedener Netzwerk-Komponenten nicht unabhängig voneinander auftreten. Damit ist es möglich, Ausfälle zu modellieren, bei denen mehrere Komponenten gleichzeitig betroffen sind. Damit wird die Möglichkeit der Korrelation von Ausfällen, die insbesondere bei Angriffen (vgl. [Yur99]) und Software-bedingten Ausfällen unterstellt werden kann, im Modell berücksichtigt (siehe auch Definition 3.2).

Bei den Simulationsversuchen im Rahmen der Leistungsanalyse in Kapitel 7 werden zwei Strategien zur Modellierung von Ausfällen umgesetzt:

- **Einzelzyklus**

Bei dieser Variante wird die Versuchsdauer in zwei Hälften zerlegt und nur ein einzelner Intakt-Defekt-Zyklus untersucht. Ziel dieser Variante ist es, das Verkehrsverhalten vor dem Ausfall und *nach* dem Ausfall in getrennten Analysen gegenüberzustellen.

- **Mehrfach-Zyklus**

Bei der zweiten Strategie werden mehrere Perioden aufeinander folgender Betriebs- und Ausfalldauern innerhalb eines Versuches untersucht.

Bei dieser Strategie wird das Verhalten der Zielgrößen über den Gesamttraum der Versuchsdauer analysiert.

Für die an statistischen Aussagen orientierte Verlässlichkeitsanalyse auf DLV-Ebene ist die simulative Betrachtung von Mehrfach-Zyklen wegen zu hohen Rechenzeitbedarfs ungeeignet.¹⁸

Eine *Importance Sampling-Strategie*, die darauf basiert, die Simulationsdurchführung auf die Ausfallereignisse zu beschränken und über die probabilistische Gewichtung verschiedener *Ausfall-Szenarien* zu einer Verlässlichkeitsaussage zu gelangen, ist im Sinne effizienter Modellbildung vielversprechender (siehe Kapitel 8).

Zur besseren Beschreibung der Verkehrsbewegungen innerhalb eines Netzwerkes bei der Injektion von Ausfällen von Netzwerk-Komponenten werden folgende Begriffe benutzt:

Definition 5.3 Sei $N = (G, c)$ ein Netzwerk mit einem gerichteten Graphen $G = (V, E)$ und sei $F = (t, M, d)$ ein Ausfall einer Menge M von Komponenten von N .

- a) Ein Pfad $p = (l_1, \dots, l_n) \subset E^n$, $n \in \mathbb{N}$, heißt **beeinträchtigt durch den Ausfall F** , falls dieser eine Verbindungsleitung enthält oder mit einem Knoten inzidiert, der beim Ausfall vom Intaktzustand in den Defektzustand wechselt.
- b) Ein Pfad heißt **Restorationspfad bei Eintritt von F** , falls dieser eine Verbindungsleitung enthält, über die nach Eintritt des Ausfalls Verkehr eines beeinträchtigten Pfades umgeleitet wird.

¹⁸Die analytische Betrachtung von Mehrfach-Zyklen hingegen macht hier durchaus Sinn.

| Beeinträchtigter Pfad | Restorationspfad |
|-----------------------|-------------------------|
| (1.1 – 1.2) | (1.1 – 1.2 – 1.4 – 1.3) |
| (1.1 – 1.2 – 1.4) | (1.1 – 1.3 – 1.4) |
| (1.2 – 1.1) | (1.2 – 1.4 – 1.3 – 1.1) |
| (1.2 – 1.1 – 1.3) | (1.2 – 1.4 – 1.3) |
| (1.3 – 1.1 – 1.2) | (1.3 – 1.4 – 1.2) |
| (1.4 – 1.2 – 1.1) | (1.4 – 1.3 – 1.1) |

Tabelle 5.3: Restorationspfade im Vier-Knoten-Ring-Netzwerk

Beispiel: Betrachtet werden soll das in Abbildung 5.18 dargestellte Ausfall-Szenario. Innerhalb eines Ringnetzwerkes mit vier Knoten 1.1, 1.2, 1.3 und 1.4 fällt die Verbindungsleitung {1.1; 1.2} aus. Alle Knoten sind aktiv, d. h. jeder Knoten generiert Verkehr zu den jeweils übrigen anderen drei Knoten.

Tabelle 5.3 stellt die durch den Ausfall der Verbindungsleitung hervorgerufenen beeinträchtigten Pfade und die zugehörigen Restorationspfade dar. Dabei wird unterstellt, dass sowohl im Ausfallzustand als auch im Restorationszustand ein Kürzeste Wege Routing-Verfahren eingesetzt wird.¹⁹

Exemplarisch soll die zweite Zeile der Tabelle genauer untersucht werden. Verkehr, der vom Sender 1.1 ausgeht und für den Empfänger 1.4 bestimmt ist, wird im Normalzustand auf dem Pfad

$$(1.1 - 1.2 - 1.4)$$

übertragen (vgl. Abbildung 5.18). Durch den Ausfall der Verbindungsleitung {1.1; 1.2} wird dieser Pfad zum beeinträchtigten Pfad. Im Restorationszustand wird als Ersatz der Pfad

$$(1.1 - 1.3 - 1.4)$$

verwendet.

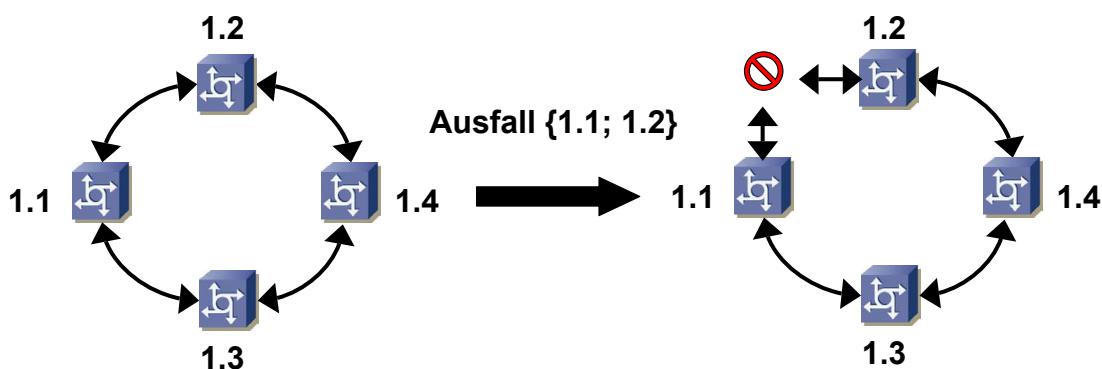


Abbildung 5.18: Ausfall in einem Vier-Knoten-Ring-Netzwerk

Verkehr, der im Normalzustand über beeinträchtigte Pfade übertragen wird, muss bei Eintritt eines Ausfalls über Restorationspfade umgeleitet werden. Die Analyse der statistischen Eigenschaften von Verkehrsströmen im Restorationszustand ist Hauptinhalt der Simulationsversuche in Kapitel 7.

¹⁹Dabei sind die im vorliegenden Szenario relevanten Einträge in der Tabelle nicht zwingend, sondern nur eine von mehreren Möglichkeiten.

Kapitel 6

Übergang vom Modell zur Simulation

Auf der Grundlage des im vorausgehenden Kapitel 5 erstellten konzeptionellen Modells ist die Durchführung von Simulationsversuchen möglich.

Der Weg vom konzeptionellen Modell bis zum interpretierbaren Simulationsergebnis (vgl. Abschnitt 4.7.2) führt über die Erstellung des Simulationsprogramms, welche in Anhang A beschrieben ist, über die Verifikation der Simulationsumgebung (Abschnitt 6.1), die Durchführung von Versuchsreihen (Abschnitt 6.2.2) und die Auswertung der Simulationsergebnisse (Abschnitt 6.3).

Im letztgenannten Abschnitt werden die beiden Hauptzielgrößen der Simulationsversuche dieser Arbeit, die Autokorrelation und die skalierten Varianzen, eingeführt (Abschnitt 6.3.2). Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse werden mit den durch Simulation ermittelten Messreihen drei Transformations- und Rechenschritte durchgeführt: Innerhalb der *Transienz-Reduktion* (Abschnitt 6.3.1) werden transiente Teile von Messreihen entfernt. Der Schritt *Verdünnung von Messreihen* (Abschnitt 6.3.3) dient der Verringerung des Aufwands bei der Berechnung der Autokorrelation und der skalierten Varianzen. Die in Abschnitt 6.3.4 dargestellte *Segmentierung der skalierten Varianzen* verfolgt das Ziel, die Schätzwerte für die skalierten Varianzen gegenüber Ausreißern robust zu machen.

6.1 Verifikation der Simulationsumgebung

Die Verifikation der Simulationsumgebung wird in zwei Schritten durchgeführt:

- *Verifikation der Verkehrsgeneratoren*
- *Verifikation der Netzwerksimulation*.

Sie ist in Anhang C beschrieben.

6.2 Durchführung von Versuchsreihen

Zur Beschreibung einer Simulationsstudie verwendet werden die Begriffe

- **Versuchsreihe**
Eine Versuchsreihe umfasst mehrere Experimente mit unterschiedlichen Modellparametern; z. B. bildet das Verkehrsverhalten auf einer Verbindungsleitung in einer vollvermaschten Topologie mit verschiedenen Verkehrsarten eine Versuchsreihe.

- **Experiment**

Ein Experiment beschreibt einen Teil einer Versuchsreihe mit spezifischer Parameterbelegung; z. B. ist der Ausfall eines Knotens in einem Ringnetzwerk, in dem alle Knoten Verkehr mit einer mittleren Datenrate von 5 Mbps und einer Streuung von 1 Mbps zu allen anderen Knoten des Rings generieren, ein Experiment. Der Begriff *Versuch* wird als Synonym für Experiment verwendet.

- **Simulationslauf**

Ein Simulationslauf besteht aus der Durchführung eines Experiments mit einem bestimmten Simulations-Startwert [seed]. Ein Experiment kann in mehrere Simulationsläufe gespreizt werden.

Der Ablauf eines Experiments ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Er gliedert sich in die fünf Hauptschritte

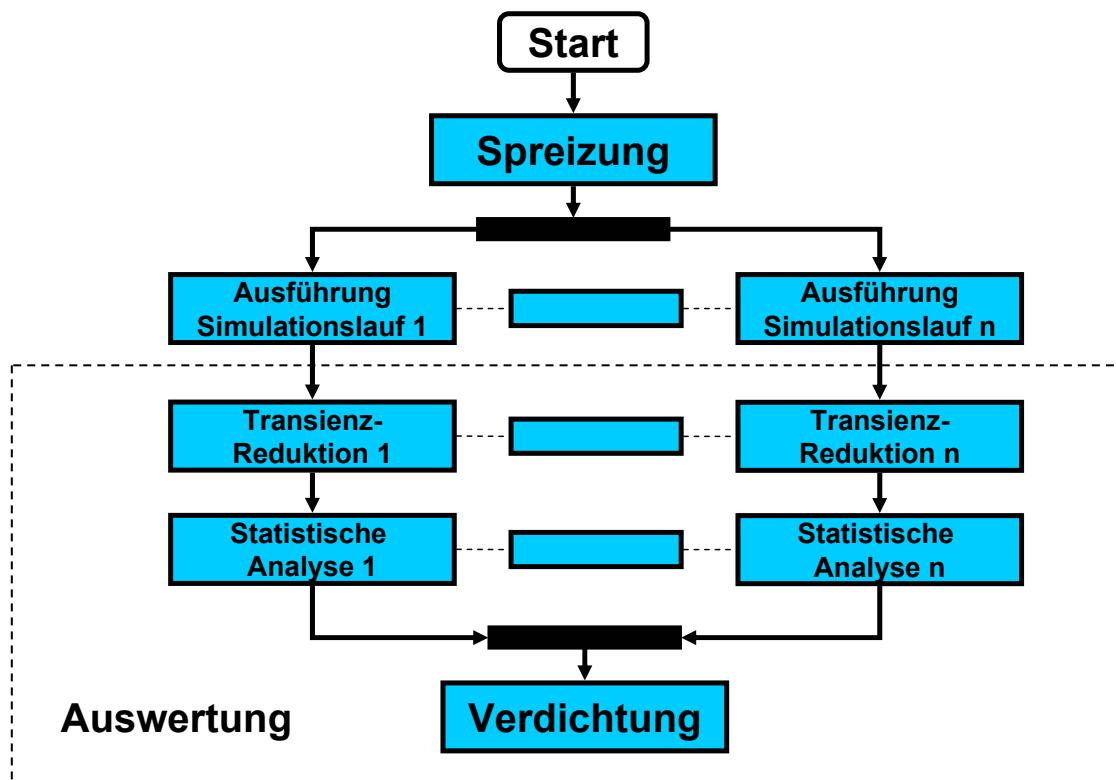


Abbildung 6.1: Ablauf der Simulationsversuche

te *Spreizung* (Abschnitt 6.2.1), *Ausführung* (Abschnitt 6.2.2), *Transienz-Reduktion* (Abschnitt 6.3.1), *statistische Analyse* (Abschnitte 6.3.2, 6.3.3 und 6.3.4) und *Verdichtung* (Abschnitt 6.2.1).

6.2.1 Spreizung des Simulationsversuches und Verdichtung

Bei der *Spreizung* des Simulationsversuches wird ein Experiment in mehrere Simulationsläufe unterteilt. Diese besitzen unterschiedliche Startwerte [seeds] für die in den Simulationsläufen verwendeten Zufallszahlengeneratoren. Seien

$$y_1, \dots, y_n$$

die Schätzwerte für die Zielgröße eines Experiments aus n Simulationsläufen.

Im Verdichtungsschritt wird dann das arithmetische Mittel

$$\bar{y} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (6.1)$$

als Schätzwert für die Zielgröße¹ verwendet.

Der Sinn der Spreizung des Simulationsversuches liegt in der Minderung des Standardfehlers der Schätzvariablen (6.1) gegenüber Schätzern, die aus Einzelversuchen mit sehr langer Versuchsdauer gewonnen werden² (vgl. dazu auch Anhang C). Mathematisch motiviert ist die Spreizung durch das *starke Gesetz der großen Zahlen*, welches besagt, dass für eine unabhängige Folge von identisch verteilten Zufallsvariablen Y_1, Y_2, \dots , für die der gemeinsame Erwartungswert μ existiert, die Beziehung

$$P \left\{ \lim_{n \rightarrow \infty} (\bar{Y}_{(n)} - \mu) = 0 \right\} = 1 \quad (6.2)$$

gilt [Weg92]. Dabei bezeichnet $\bar{Y}_{(n)} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$ das arithmetische Mittel der ersten n Glieder der Folge. Der Mittelwert der Schätzwerte der Zielgrößen in den einzelnen Simulationsläufen bildet demzufolge einen geeigneten Schätzer für die Zielgröße.

6.2.2 Durchführung der Simulation

Die Durchführung der Simulation besteht aus dem Ablauf des Simulationsprogramms auf einem Rechner. Der Ablauf wird beeinflusst durch

- *Initialisierung des Simulationsversuches*

Zunächst werden die Startwerte für den Zufallszahlengenerator festgelegt.

Bei der Umsetzung des in Kapitel 5 eingeführten konzeptionellen Modells in ein Simulationsmodell wird eine *Standard-Parameterkonfiguration* verwendet, die als Grundlage für die meisten Versuche dient. Abweichungen von der Standard-Parameterbelegung werden explizit erläutert.

Tabelle 6.1 enthält eine Übersicht über die Standard-Parameterbelegung³.

- *Terminierung des Simulationsversuches*

Mögliche Terminierungskriterien eines Simulationslaufs sind:

- *Eintreten einer bestimmten Bedingung bezüglich der zu untersuchenden Zielgröße(n)* (konditionales Terminierungskriterium)
- *Ablauf einer bestimmten Zeitspanne* (temporales Terminierungskriterium)

Hier wird die zweite Variante benutzt. Die Dauer des Simulationsversuches ist an der Erreichung stationären Verhaltens orientiert (siehe folgender Abschnitt).

¹Die Zielgrößen sind hier die Autokorrelation und die skalierten Varianzen, siehe Abschnitt 6.3.2.

²Solche Schätzer machen nur bei *ergodischen* Zeitreihen Sinn.

³Die Abkürzungen ARH, ISHT und FGN stehen für *Alternating Renewal Heavy-tailed*, *Infinite Source Heavy-tailed* und für *Fractional Gaussian Noise* (vgl. Abschnitt 5.4).

| Parameter | Standard-Wert |
|---|-----------------------------|
| Allgemein | |
| Laufzeit für Simulation | 7200 s (2 h) |
| Paketgröße | 500 Bit |
| QoS-Unterstützung | aus |
| Knoten | |
| Puffergröße | 500 Pakete |
| Verbindungsleitungen | |
| Latenz δ_{link} | 50 ms |
| Abtastintervall δ_{trace} | 10 ms |
| Verdünnungsfaktor r | 10 |
| Routing | |
| dynamisches Routing | ein |
| Routing-Verfahren Best Effort (global/lokal) | kürzeste Wege |
| Routing-Verfahren Realtime (global/lokal) | kürzeste Wege |
| Verkehr | |
| Allgemeine Parameter | |
| Zielknotenmenge | alle aktiven Knoten im Netz |
| Parameter für Poisson-Verkehr | |
| Datenrate einzelner Verbindungen v_{ON} | 50 kbps |
| Gesamtdatenrate aktiver Knoten | 3000 kbps |
| Varianz der Gesamtdatenrate aktiver Knoten | (150 kbps) ² |
| Verbindungsduer (λ_d) ⁻¹ | 1 s |
| Ankunftsrate λ_a | adaptiert |
| Parameter für fraktalen Verkehr | |
| Verkehrsgenerator | ARH / ISHT / FGN |
| Datenrate für ON-Perioden v_{ON} | adaptiert |
| Gesamtdatenrate aktiver Knoten | 3000 kbps |
| Varianz der Gesamtdatenrate aktiver Knoten | (150 kbps) ² |
| Abklingparameter α für ON-Perioden | 1.1/ 1.3 /1.5 |
| Shape-Parameter β für ON-Perioden | 1.5 |
| Anzahl ON/OFFs (AR) | adaptiert |
| Ankunftsrate λ_a (IS) | adaptiert |
| stochastische Paket-Zwischenankunftszeiten | aus |
| Ausfall-Generierung | |
| Ausfallzeitpunkt | Hälften der Versuchsdauer |
| Abbruch von Echtzeit-Verbindungen bei Ausfall | ein |

Tabelle 6.1: Zusammenfassung wesentlicher Parameter des Simulationsmodells

6.3 Auswertung der Simulationsergebnisse

6.3.1 Abgrenzung transienter und stationärer Systemzustände

Die nach der Ausführung der Simulationsversuche erhaltenen Verkehrs-Messreihen werden gestutzt, d. h. die Anlaufphasen der Verkehrsgeneratoren werden abgeschnitten. Für das stationäre Verhalten der Zeitreihe ist die Anlaufphase nicht relevant. Abbildung 6.2 zeigt den Simulationsstart für kurzzeitab-

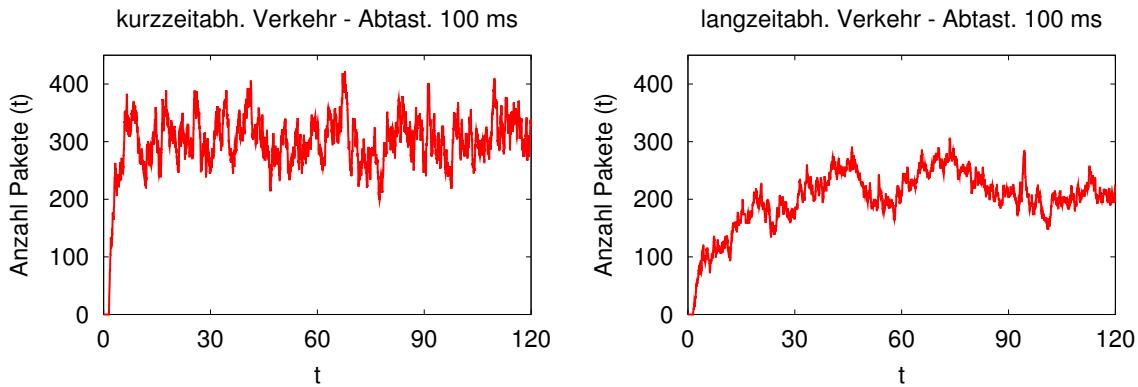


Abbildung 6.2: Anlaufphase bei Simulationsläufen

hängigen⁴ und langzeitabhängigen Verkehr.⁵ Die Abbildung zeigt die ersten 120 Sekunden der beiden Simulationsläufe. Der durch die Grafik nahe gelegte Schluss, dass der Einschwingvorgang bei langzeitabhängigem Verkehr (rechte Spalte) in der Regel länger dauert als bei kurzzeitabhängigem Verkehr (linke Spalte), kann durch die Simulationsversuche bestätigt werden, wobei bei langzeitabhängigem Verkehr mit wachsendem Hurst-Parameter die Dauer der Einschwingphase zunimmt.

Die Bestimmung der Länge der Einschwingphase wird mittels der Verifikationsversuche (siehe Anhang C) vorgenommen. Dabei werden die Versuche herangezogen, bei denen die generierte Verkehrsmenge mit dem Wert in der Standard-Parameterkonfiguration (vgl. Abschnitt 6.2.2) der Simulationsversuche übereinstimmt.

Dabei wird ein gleitendes Zeitfenster der Länge 10 s verwendet. Innerhalb des Fensters werden die mittlere generierte Datenrate (an Hand der Menge der gesendeten Pakete) und die Stichproben-Varianz der Messwerte berechnet.⁶ Seien $\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2, \dots$ die Zeitfenster-Schätzwerte für die mittlere generierte Datenrate und $\hat{\sigma}_1^2, \hat{\sigma}_2^2, \dots$ die entsprechenden Varianz-Schätzwerte bei ansteigendem fortlaufendem Zeitfenster-Index.

In der Anlaufphase nähern sich bei ansteigender Zeit die Schätzwerte für die mittlere generierte Datenrate von unten und für die Varianz von oben an die theoretischen (und in diesem Fall bekannten) Zielwerte μ und σ^2 an. Die Einschwingphase wird als beendet angesehen bei dem Zeitfenster-Index

$$\max \left\{ \min_{i \in \mathbb{N}} \{ \hat{\mu}_i | \hat{\mu}_i \geq \mu \}, \min_{j \in \mathbb{N}} \{ \hat{\sigma}_j^2 | \hat{\sigma}_j^2 \leq \sigma_j^2 \} \right\},$$

d. h. sobald sowohl der theoretische Erwartungswert überschritten als auch die theoretische Varianz unterschritten wurde. Die an Hand des Verifikationsnetzwerkes ermittelten Dauern werden für alle Simulationsversuche verwendet.

⁴ $\mu_{poi} = 3000 \text{ kbps}$, $v_{ON} = 50 \text{ kbps}$, $\sigma_{poi}^2 = (150 \text{ kbps})^2$

⁵ ARH-Modell mit $\mu_{ss} = 3000 \text{ kbps}$, $v_{ON} = 50 \text{ kbps}$, $\sigma_{poi}^2 = (150 \text{ kbps})^2$

⁶ Bei einem Abtastintervall von 10 ms entspricht ein Zeitfenster von 10 s einem Umfang von 1000 Messwerten.

6.3.2 Berechnung der Autokorrelation und der skalierten Varianzen

Hauptzielgrößen der in Kapitel 7 angestellten Simulationsversuche sind die Autokorrelation und die Variabilität von Verkehrsströmen in Form der skalierten Varianzen. Diese sollen im Folgenden als *zweite Momente* bezeichnet werden.

Sei

$$x_1, \dots, x_n$$

eine Messreihe, welche im Abstand von δ_{trace} abgetastet wurde. Als Standard-Schätzwert für die Autokorrelation der Messreihe zum Lag l hat man

$$\hat{\rho}(l) = \frac{\frac{1}{n-l-1} \sum_{k=1}^{n-l} (x_k - \bar{x})(x_{k+l} - \bar{x})}{\hat{\sigma}^2}, \quad (6.3)$$

wobei \bar{x} das arithmetische Mittel über alle n Messwerte und $\hat{\sigma}^2$ den Schätzwert für die Varianz der Messreihe bezeichnen.

Aus der *Original-Messreihe*

$$x_1, \dots, x_n, n \in \mathbb{N}$$

wird aus jeweils m aufeinander folgenden Messwerten durch Mittelwertbildung ein neuer Wert erzeugt (vgl. Abschnitt 5.4.3). Die so erhaltene *skalierte Messreihe zum Skalierungsfaktor m* wird gemäß⁷

$$x_i^{(m)} := \frac{1}{m} (x_{(i-1)m+1} + \dots + x_{i \cdot m}), \quad i \in [1..n/m]$$

gebildet. Als Schätzwert für die skalierte Varianz zum Skalierungsfaktor m wird der Standard-Schätzer

$$\hat{\sigma}^2(m) := \frac{1}{n/m - 1} \sum_{i=1}^{n/m} (x_i^{(m)} - \bar{x}^{(m)})^2 \quad (6.4)$$

verwendet. Dabei sollte $n \gg m$ gelten, damit eine ausreichende Anzahl von Messwerten der skalierten Varianzen zur Verfügung steht.

6.3.3 Wahl der Abtastfrequenz und Verdünnung von Messreihen

Bei der Untersuchung von Zeitreihen, die das Verkehrsaufkommen auf einer Verbindungsleitung beschreiben, entsteht die Frage, wie häufig Versuchswerte gemessen (empirische Untersuchung) bzw. abgetastet (Simulation) werden, d. h. es muss ein Abtastintervall [sampling interval] festgelegt werden.

Bei der Wahl der Abtastfrequenz spielen folgende Kriterien eine Rolle:

- *Rechenaufwand und Speicherbedarf*

Bei der Berechnung der Autokorrelation und der skalierten Varianzen für verschiedene Lags $l \in [0..l_{max}]$ bzw. verschiedene Skalierungsfaktoren $m \in [0..m_{max}]$ steigt der Speicherbedarf linear mit der Abtastfrequenz, während der Rechenaufwand quadratisch mit der Anzahl der Messwerte zunimmt.

⁷Zur Vereinfachung wird oBdA angenommen, dass n durch m teilbar ist.

- Zielgröße und kritischer Zeitbereich [critical time scale, engineering time scale of interest]

Die hier betrachteten Zeitreihen stellen Verkehrsströme auf Verbindungsleitungen in paketvermittelnden Netzwerken dar. Diese stochastischen Prozesse sind Eingangsprozesse für die Puffer in VNKs, welche die Wartezeiten (Laufzeiten) und die Paketverlustrate determinieren. Aufgrund der endlichen Größe der Puffer sind nicht alle Zeitbereiche auf der Abszisse der skalierten Varianzen für die Zielgrößen Wartezeit und Paketverlustrate relevant, sondern nur ein Ausschnitt - der *kritische Zeitbereich* [Nei98]. Der kritische Zeitbereich kann an Hand der Puffergröße, des Durchsatzes eines VNK und der Bandbreite von Verbindungsleitungen abgeschätzt werden.

Für die Abtastfrequenz innerhalb der Simulation ergibt sich eine obere Schranke durch die minimale Paket-Zwischenankunftszeit

$$\delta_{IAT} = \frac{s_p}{b}$$

(Quotient aus Paketgröße und Bandbreite), da die Paket-Prozesse auf den Verbindungsleitungen keine Veränderung erfahren in Zeiträumen, die kleiner als die minimale Paket-Zwischenankunftszeit sind. Nach unten begrenzt werden sollte die Abtastrate durch einen Wert, der deutlich über dem Kehrwert des Maximalwerts des kritischen Zeitbereichs liegt.

Bei der Berechnung der Autokorrelation und der skalierten Varianzen nach den Formeln (6.3) und (6.4) entsteht ein erheblicher Rechenaufwand.

In den folgenden Betrachtungen soll untersucht werden, ob und unter welchen Bedingungen eine Verdünnung der Original-Messreihe zur Reduktion des Rechenzeitbedarfes durchgeführt werden kann.

Dabei wird das Abtastraster von δ_{trace} auf $r \cdot \delta_{trace}$ erhöht. Zur Vereinfachung der weiteren Betrachtungen gelte oBdA $n = r \cdot n^*$ mit $r, n^* \in \mathbb{N}$. Die dem größeren Raster entsprechende *verdünnte Messreihe* ist gegeben durch

$$x_k^* := x_{r \cdot k}, \quad k \in [1..n^*] \quad (6.5)$$

und entsteht aus der Original-Messreihe

$$x_1, \dots, x_n$$

durch *Verdünnung* mit dem *Verdünnungsfaktor* r .

Als Schätzwert für die Autokorrelation hat man

$$\begin{aligned} \hat{\rho}^*(l) &= \frac{\frac{1}{n^*-l-1} \sum_{k=1}^{n^*-l} (x_k^* - \bar{x}^*)(x_{k+l}^* - \bar{x}^*)}{(\hat{\sigma}^*)^2} \\ &= \frac{\frac{1}{n^*-l-1} \sum_{k=1}^{n^*-l} (x_{r \cdot k} - \bar{x}^*)(x_{r \cdot (k+l)} - \bar{x}^*)}{(\hat{\sigma}^*)^2}, \end{aligned} \quad (6.6)$$

wobei \bar{x}^* und $(\hat{\sigma}^*)^2$ die auf die verdünnte Messreihe angewandten Standard-Schätzer für den Mittelwert und die Varianz bezeichnen.

Wie man dem Vergleich von (6.3) und (6.6) entnimmt, ist die Approximation

$$\hat{\rho}^*(l) \approx \hat{\rho}(r \cdot l)$$

gut, falls

1. die Zeitreihe $X := (X_k, k \in \mathbb{N})$, welche der Messreihe x_1, \dots, x_n zugrunde liegt, stationär ist.
2. die Anzahl der Summanden in Gleichung (6.6) ausreichend groß ist.

Die erste Bedingung kann bei dem hier verwendeten konzeptionellen Modell im ausfallfreien Fall aufgrund der Konstruktion der Verkehrsmodelle vorausgesetzt werden, da alle verwendeten Verkehrsgeneratoren stationären Verkehr produzieren (vgl. Abschnitte 5.4.2 und 5.4.4).

Zur Einhaltung der zweiten Bedingung wird das Kriterium

$$n^* > 10 \cdot l_{max} \quad (6.7)$$

verwendet, welches in allen durchgeführten Versuchen erfüllt ist. l_{max} beschreibt dabei den größten Lag, für den die Autokorrelation berechnet wird.

Eine analoge Überlegung für die Berechnung der skalierten Varianzen ergibt, dass die genannten Kriterien (Stationarität des Verkehrsmodells und ausreichende Größe der Messreihe) eine gute Approximation durch die verdünnte Messreihe ermöglichen.

Zur Reduzierung des Rechenaufwands werden die Autokorrelation und die skalierten Varianzen in allen folgenden Versuchen auf Basis der mit dem Faktor $r = 10$ verdünnten Messreihen berechnet.⁸ Abbildung 6.3 verdeutlicht die Güte der beschriebenen Approximation anschaulich. Dargestellt ist die (vorzeichenbehaftete) Abweichung zwischen der Original-Messreihe und der verdünnten Messreihe. Diese wird durch die *relativen Abweichungen*

$$\frac{\hat{\rho}(r \cdot l) - \hat{\rho}^*(l)}{(\hat{\rho}(r \cdot l) + \hat{\rho}^*(l))/2} \quad (6.8)$$

(Autokorrelation) und

$$\frac{\hat{\sigma}^2(r \cdot m) - (\hat{\sigma}^*)^2(m)}{(\hat{\sigma}^2(r \cdot m) + (\hat{\sigma}^*)^2(m))/2} \quad (6.9)$$

(skalierte Varianzen) ausgedrückt.

Alle Abbildungen entstammen Simulationsversuchen im Zwei-Knoten-Elementarnetzwerk (vgl. Anhang C.1). Der zugrunde liegende Verkehr besitzt eine mittlere Datenrate von 3000 $k\text{bps}$ und eine Varianz des Datenstroms von $\sigma^2 = (150 \text{ kbps})^2$.

Die linke Spalte stellt die Abweichungen der Autokorrelationen gemäß Gleichung (6.8) dar, die rechte Spalte zeigt die Abweichungen für die skalierten Varianzen nach Gleichung (6.9). Die erste Zeile zeigt die genannten Abweichungen für Verkehr, der dem Sprachmodell aus Abschnitt 5.4.2 entspricht. Die unteren drei Zeilen beinhalten die entsprechenden Abweichungen für Verkehr, der nach dem M/Pareto-Modell mit gestützten ON-Perioden und den (angenäherten) Hurst-Parametern $H \in \{0.75, 0.85, 0.95\}$ erzeugt wurde. Der maximale Lag [maximale Skalierungsfaktor] beträgt bei einem Verdünnungsfaktor von $r = 10$ hierbei $r \cdot l = 10000$ [$r \cdot m = 10000$], was bei einer Abtastrate der Original-Messreihe von $\delta_{trace} = 10 \text{ ms}$ einer zeitlichen Verschiebung um 100 s entspricht. Die Abbildungen zeigen das Ergebnis einzelner Simulationsläufe, sind aber auf das jeweils ganze Experiment übertragbar.

Grundsätzlich lässt sich eine gute *punktweise* Übereinstimmung zwischen unverdünnten und verdünnten Messreihen feststellen. Mit Ausnahme der Autokorrelation beim Poisson-Verkehr beträgt die festgestellte relative Abweichung weniger als 4%. Damit wird die Verdünnung von Messreihen zur Schätzung von Autokorrelation und skalierten Varianzen als gerechtfertigt angesehen. Auffällig ist, dass die Schwankungen zwischen Original-Messreihe und verdünnter Messreihe bei den Autokorrelationen mit steigendem Lag zunehmen, während bei den skalierten Varianzen hier eine Abnahme zu verzeichnen ist.

Die Zunahme bei den Autokorrelationen lässt sich wie folgt erklären: Mit wachsendem Lag nähert sich die Autokorrelationskurve bei allen Verbindungsleitungen der Nulllinie an, d. h. der Absolutbetrag der gemessenen Autokorrelationen wird für wachsenden Lag sehr klein. Dasselbe passiert mit dem Nenner in Gleichung (6.8), die daraus resultierende „Division nahe Null“ führt zu heftigen Ausschlägen der relativen Abweichungen.

⁸Abweichungen von dieser Vorgehensweise sind explizit gekennzeichnet.

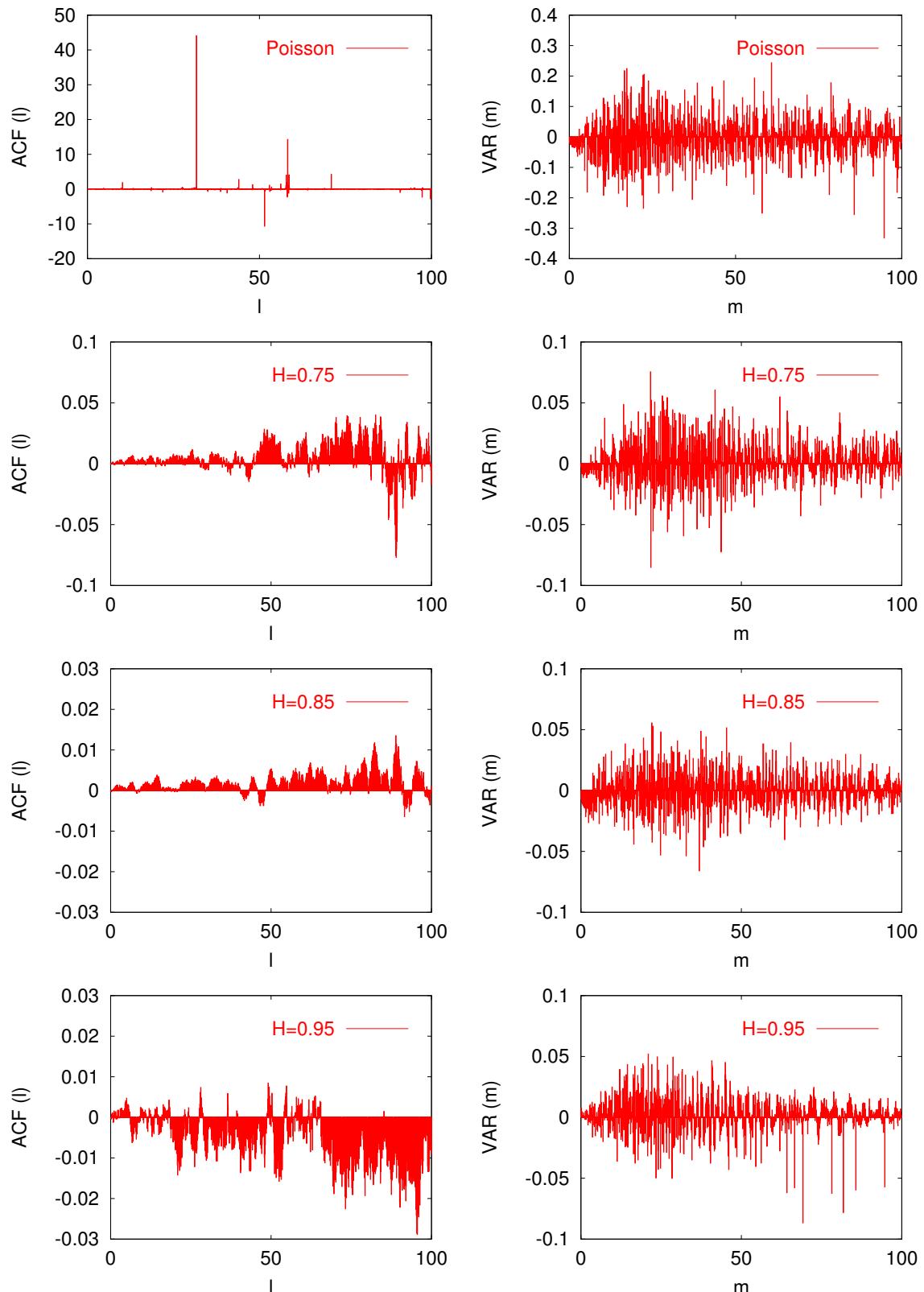


Abbildung 6.3: Abweichungen zwischen unverdünnten und verdünnten Messreihen

6.3.4 Segmentierung der skalierten Varianzen

Um die Variabilität eines Verkehrsstromes zu beschreiben, wird in dieser Arbeit statt der durch die Varianz der Messreihe gegebenen Punktinformation das gesamte Abklingverhalten der skalierten Varianzen

(vgl. Abschnitt 6.3.2) benutzt. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass zur Vermeidung von Puffer-Überlauf bei selbstähnlichen Verkehrsströmen die Varianz alleine⁹ als Dimensionierungsinformation nicht ausreicht, da der Überlauf entscheidend von skalierten Varianzen höherer Skalierungsfaktoren mitbestimmt wird.

Um die Messgenauigkeit von Punktschätzern gegen Ausreißer abzusichern, wird eine *Segmentierung der skalierten Varianzen* durchgeführt (siehe Abbildung 6.4). Dabei werden die nach Formel (6.4) berechneten skalierten Varianzen

$$\hat{\sigma}^2(m), m \in [1 \dots m_{max}]$$

in Segmente der Länge h gruppiert.¹⁰ Anschließend werden die Werte eines Segmentes gemittelt:

$$\bar{\sigma}_{Seg,i}^2 := \frac{1}{h} \sum_{k=0}^h \hat{\sigma}^2(i \cdot h + k), i \in [1..n_{Seg}]. \quad (6.10)$$

Der Wert $\bar{\sigma}_{Seg,i}^2$ wird mit *i-te Segmentvariabilität* bezeichnet. Für einen Vergleich der Variabilität verschiedener Messreihen, z. B. bei der Gegenüberstellung der Variabilität vor und nach einem Ausfall, werden die durch Formel (6.10) gegebenen Segmentwerte paarweise miteinander verglichen.

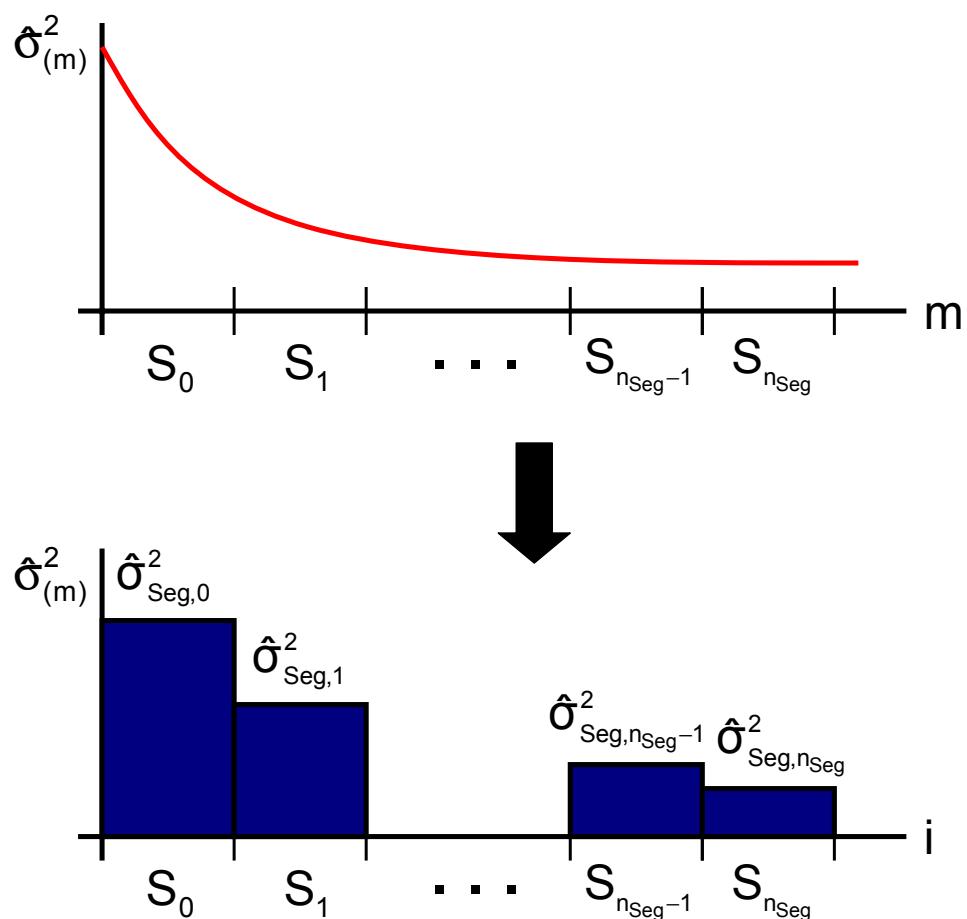


Abbildung 6.4: Segmentierung der skalierten Varianzen

⁹Für den Skalierungsfaktor $m = 1$ erhält man gerade die Varianz.

¹⁰Zur Vereinfachung wird oBdA $m_{max} = n_{Seg} \cdot h$ angenommen.

6.3.5 Messung der Variabilitätsänderung

Für den Variabilitätsvergleich zweier Zeitreihen

$$x_{1,1}, \dots, x_{1,n_1} \text{ und } x_{2,1}, \dots, x_{2,n_2}$$

mit den im vorausgehenden Abschnitt beschriebenen zugehörigen Segmentfolgen für die skalierten Varianzen

$$\bar{\sigma}_{Seg1,i}^2 \text{ und } \bar{\sigma}_{Seg2,i}^2, i \in [1..n_{Seg}].$$

werden folgende beiden Maße verwendet:

- **Variabilitätsquotient**

Die Variabilitätsquotienten sind gegeben durch

$$q_{Seg,i} := \frac{\sqrt{\bar{\sigma}_{Seg2,i}^2}}{\sqrt{\bar{\sigma}_{Seg1,i}^2}}, i \in [1..n_{Seg}] \quad (6.11)$$

Der i -te Variabilitätsquotient beschreibt den prozentualen Anteil der Variabilität von Messreihe 2 bezogen auf die Variabilität von Messreihe 1 im Segment i . Ein Wert von $q_{Seg,i} > 1$ drückt also eine Zunahme der Variabilität in Messreihe 2 gegenüber Messreihe 1 aus, ein Wert von $q_{Seg,i} < 1$ eine Abnahme.

- **Quotient der Variationskoeffizienten**

Der Variationskoeffizient einer Zeitreihe x_1, \dots, x_n ist gegeben durch

$$a := \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\bar{x}}. \quad (6.12)$$

Er beschreibt das Verhältnis der Streuung der Zeitreihe zu ihrem Mittelwert. Der Quotient der Variationskoeffizienten zweier Messreihen

$$q^* := \frac{a_1}{a_2} \quad (6.13)$$

mit zugehörigen Variationskoeffizienten a_1 und a_2 beschreibt die Zu- oder Abnahme der Variabilität bezogen auf den jeweiligen Mittelwert der Zeitreihen. Im Kontext von Verkehrsströmen drückt q^* eine Zu- oder Abnahme der Variabilität der pro Zeiteinheit übertragenen Datenmenge aus.

Motiviert durch die vorgenommene Segmentierung werden neben a zusätzlich der *Segment-Variationskoeffizient*

$$a_{Seg,i} := \frac{\sqrt{\bar{\sigma}_{Seg,i}^2}}{\bar{x}}, i \in [1..n_{Seg}]. \quad (6.14)$$

und der *Segment-Quotient der Variationskoeffizienten*

$$q_{Seg,i}^* := \frac{a_{Seg2,i}}{a_{Seg1,i}}, i \in [1..n_{Seg}]. \quad (6.15)$$

benutzt.

Die Größen $q_{Seg,i}$, $q_{Seg,i}^*$ und $a_{Seg,i}$, $i \in [1..n_{Seg}]$ dienen dazu, die Variabilitätsänderung auf einer Verbindungsleitung vor und nach dem Eintritt eines Ausfalls zu analysieren. Sie vereinigen die Variabilitätsänderungen, die durch das Ausfallereignis und durch Multiplexing hervorgerufen werden.

Die vorgestellten Verfahren zur Transienz-Reduktion, zur Verdünnung von Versuchsreihen zur Segmentierung der skalierten Varianzen als auch die vorgestellten Metriken werden bei der Durchführung der Simulationsversuche im nächsten Kapitel verwendet.

Teil III

Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

Kapitel 7

Simulationsergebnisse

Auf den Grundsteinen zur Modellierung und simulativen Untersuchung, die in den beiden vorausgehenden Kapiteln gelegt worden sind, bauen in diesem Kapitel verschiedene Untersuchungen von Verkehrsströmen in paketvermittelnden Netzwerken auf.

Im Eingangs-Abschnitt 7.1 werden zunächst die Topologien eingeführt, die im weiteren Verlauf des Kapitels bei den Simulationsversuchen verwendet werden. Abschnitt 7.2 vergleicht die statistischen Eigenschaften der im Rahmen der Simulationsversuche eingesetzten Verkehrsgeneratoren miteinander.

Die anschließenden beiden Sktionen 7.3 und 7.4 beschreiben die Lastveränderungen innerhalb eines Netzwerkes bei Eintritt eines Ausfalls an Hand der ersten und zweiten Momente von Verkehrsströmen. In Abschnitt 7.5 wird das Verkehrsverhalten langzeitabhängiger Verkehrsströme bei hoher Last [heavy load] untersucht. Die nachfolgenden Abschnitte 7.6 und 7.7 beschäftigen sich mit dem Einfluss der Verbindungsduer und der Bedienstrategien auf das Verkehrsverhalten.

Abschnitt 7.8 beschreibt, wie durch die Unterteilung von Verbindungen und die Übertragung einzelner Verbindungsabschnitte auf disjunkten Pfaden eine Reduktion der Autokorrelation und der Variabilität von Verkehrsströmen erreicht werden kann.

Abschnitt 7.9 gibt einen Ausblick auf interessante Fragestellungen, die im Rahmen der Arbeit nicht untersucht werden konnten und als Ansatzpunkt für weiterführende Forschungsarbeiten dienen können. Darüber hinaus wird eine analytische Alternative zur simulativen Untersuchung von Paketlaufzeiten im Restorationszustand dargestellt.

Der abschließende Abschnitt 7.10 interpretiert die gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf die Dimensionierung fehlertoleranter paketvermittelnder Netzwerke und die Konzeption fehlertoleranter Netzwerk-Protokolle.

7.1 Auswahl der untersuchten Topologien

Bei den Untersuchungen dieses Kapitels werden die statistischen Eigenschaften von Verkehrsströmen analysiert. Dabei werden folgende Topologien eingesetzt:

- *Zwei-Knoten-Elementarnetzwerk (siehe Anhang C.1)*

Mit dem Zwei-Knoten-Elementarnetzwerk werden die statistischen Eigenschaften der Verkehrsgeneratoren untersucht (Abschnitt 7.2) und verifiziert.

Für die Verifikation der Verkehrsgeneratoren ist es notwendig, das Verhalten des unmittelbar vom Generator emittierten Verkehrsstromes heranzuziehen, d. h. der für die Verifikation verwendete

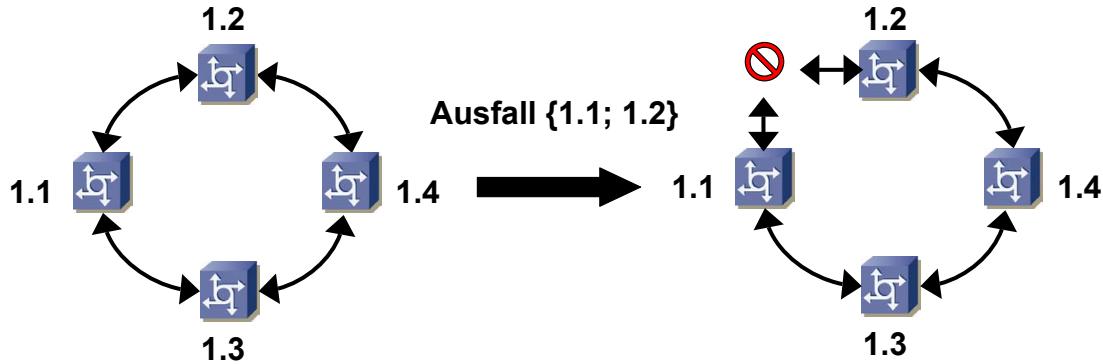


Abbildung 7.1: Vier-Knoten-Ringtopologie

Verkehrsstrom sollte nicht durch Multiplexen mehrerer Verkehrsströme entstanden sein und er sollte nicht bereits durch mehrfache Pufferung in seinen statistischen Eigenschaften verändert worden sein. Diese Voraussetzungen sind in der Zwei-Knoten-Elementartopologie erfüllt.

- **Vier-Knoten-Elementernetzwerk (Abbildung 7.1)**

Der aus vier aktiven Knoten bestehende Ring wird hier als Basis-Topologie für die Verkehrsanalyse bei Ausfall von Netzkomponenten benutzt. Dabei wird der Ausfall einer einzelnen Verbindungsleitung simuliert.

Der Ring wird sowohl für die Untersuchung eines einzelnen Ausfallereignisses (Abschnitt 7.4) als auch für die Situation des mehrfachen Wechsels zwischen Intakt- und Defektzustand (Abschnitt 7.4.3) eingesetzt.

Der Vier-Knoten-Ring ist mit geringem Aufwand zu simulieren und das Verhalten der ersten Mo-

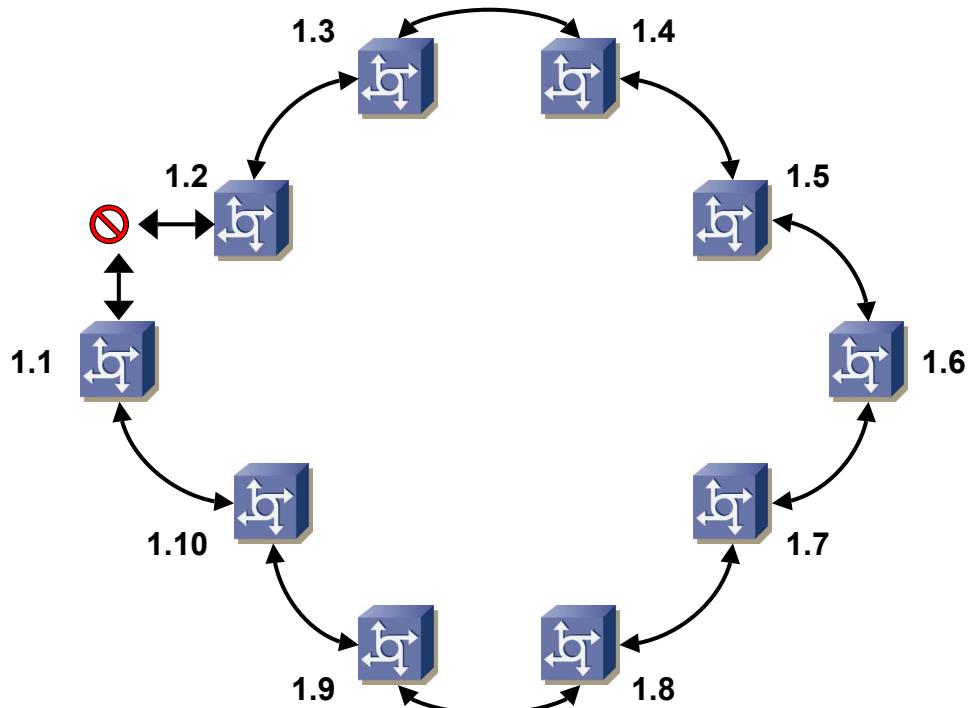


Abbildung 7.2: Zehn-Knoten-Ringtopologie

mente¹ von Verkehrsströmen im Normal- und im Restorationszustand ist analytisch mit Hilfe erweiterter Netzwerkflussmodelle einfach prognostizierbar (vgl. Abschnitt 7.3).

Trotz der Einfachheit der Topologie lassen sich die Verkehrsveränderungen, die durch Ausfall von Netzkomponenten hervorgerufen werden, und die für die Dimensionierung fehlertoleranter Netzwerke relevant sind, an Hand der Topologie untersuchen.

- **Zehn-Knoten-Ringtopologie (Abbildung 7.2)**

In dem aus zehn Knoten bestehenden Ringnetzwerk wird ein Ausfall einer einzelnen Verbindungsleitung injiziert. Damit soll die Veränderung der ersten Momente von Verkehrsströmen bei Eintritt eines Netzwerk-Komponenten-Ausfalls veranschaulicht werden.

- **Hauptnetzwerk (Abbildung 7.3)**

Die in Abbildung 7.3 dargestellte und im Folgenden mit *Hauptnetzwerk* bezeichnete Topologie besteht aus einer Menge von Subnetzen, die über ein Kernnetz (Knoten 1.1, 2.1, 3.1 und 4.1) miteinander verbunden sind.

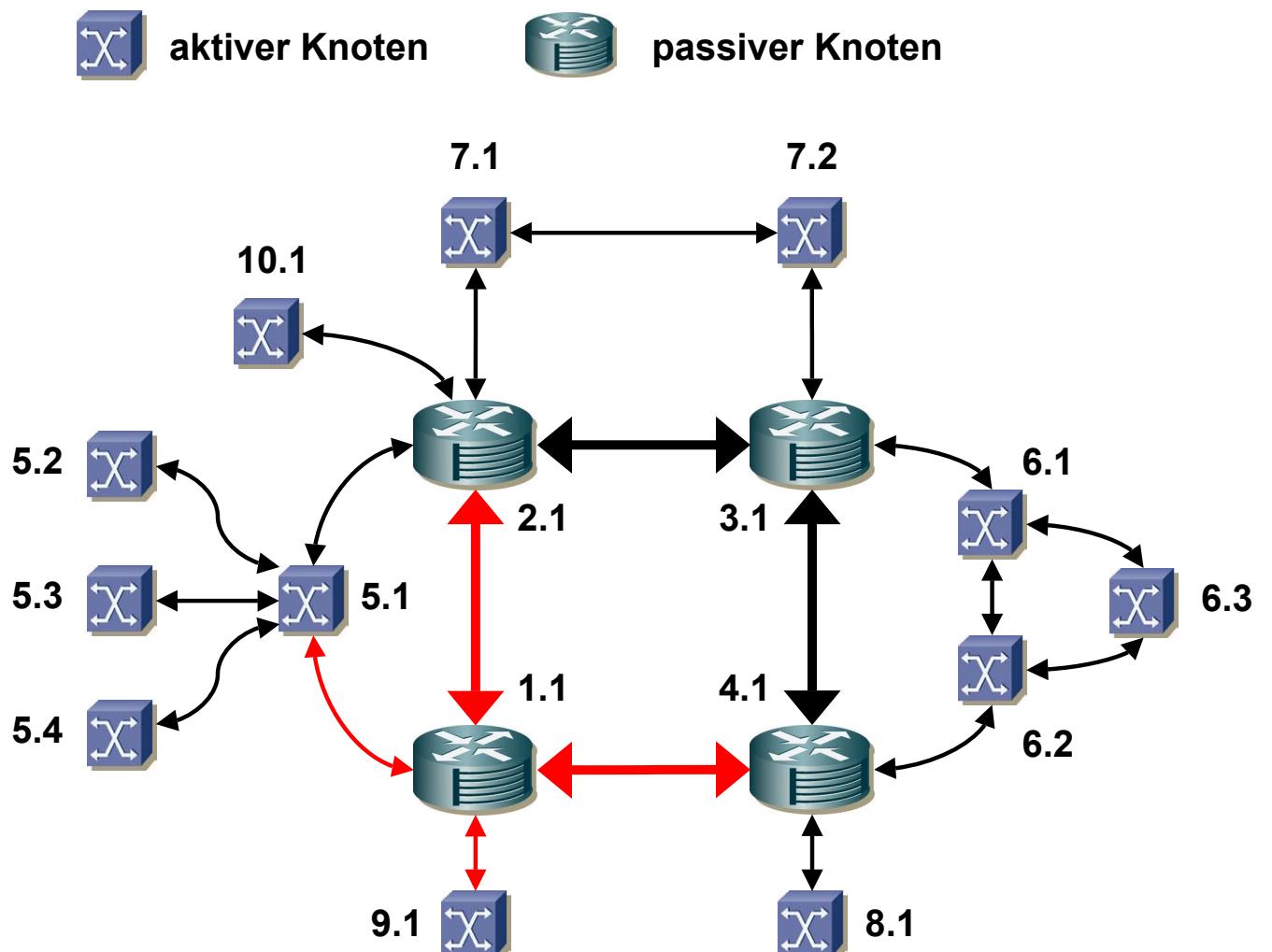


Abbildung 7.3: Hauptnetzwerk

¹Mit dem ersten Moment eines (stationären) Verkehrsstromes ist hier die mittlere Datenrate gemeint, vgl. Abschnitt 7.3.

Durch die Simulation des Ausfalls eines einzelnen Knotens (hier: Knoten 1.1) sollen die Erkenntnisse über das Verkehrsverhalten auf Restorationspfaden, die sich aus den Versuchen mit der kleineren Vier-Knoten-Ring-Topologie ergeben, verglichen bzw. bestätigt werden.

- **Stern-Topologie (Abbildung 7.15)**

Mit dem Begriff hohe Last [heavy load] wird in der Warteschlangen- und Verkehrstheorie die Annäherung der Ankunftsrate an die Bedienrate beschrieben. Konsequenz ist bei den meisten Warteschlangensystemen eine drastische Erhöhung der Paketverlustrate und der Puffer-Überlaufwahrscheinlichkeit.

In Abschnitt 7.5 wird untersucht, wie sich die Unterschiede zwischen niedriger und hoher Last auf die zweiten Momente von Verkehrsströmen auswirken. Dabei werden die Ausgangs-Verkehrsströme von Knoten mit unterschiedlicher anliegender Last gemultiplext.

Falls nicht ausdrücklich gekennzeichnet, kann angenommen werden, dass es sich bei den Knoten in den folgenden Simulationsversuchen um aktive Knoten (Randknoten) handelt. Aktive Knoten generieren Verkehr. Im Gegensatz dazu besteht die Aufgabe passiver Knoten, wie z. B. den VNKs 1.1, 2.1, 3.1 und 4.1, die das Kernnetz des in Abbildung 7.3 dargestellten Hauptnetzwerkes bilden, ausschließlich in der Vermittlung von Paketen (zu Einzelheiten vgl. Abschnitt 5.3.2).

7.2 Vergleich der Verkehrsgeneratoren ISE, ARH, ISHT und FGN

Bei den Simulationsversuchen werden vier Verkehrsgeneratoren verwendet (vgl. Abschnitt 5.4):

- **Poisson-Generator (ISE)**

Der Poisson-Generator dient der Erzeugung von kurzzeitabhängigem Sprachverkehr. Die Ankunft von Verbindungen an einem VNK kann hier durch einen Poisson-Prozess beschrieben werden. Die Verbindungsduern selbst sind exponentialverteilt. Der Name ISE steht für *Infinite Source Exponential* und beschreibt dieses Modell.

- **Überlagerung von ON-OFF-Prozessen (ARH)**

Das ARH-Modell (*Alternating Renewal Heavy-tailed-Modell*) wird im Allgemeinen als Basismodell für die Modellierung von Verkehr in lokalen Kommunikationsnetzen verwendet. Verkehr wird durch Überlagerung mehrerer Sendeprozesse generiert. Ein einzelner Sendeprozess setzt sich dabei aus ständig abwechselnden Sendeperioden (ON-Perioden) und Pausen zusammen (ON-OFF-Modell). Die Dauern der Sendeperioden und der Pausen werden durch heavy-tailed Verteilungen (vgl. Anhang B.2.1) beschrieben.

- **Infinite source heavy-tailed Modell (ISH)**

Der ISH-Generator wird zur Modellierung von Verkehr in Weitverkehrsnetzen eingesetzt (vgl. [Add99]) und ähnelt dem ISE-Generator. Der einzige Unterschied besteht in der Verteilung der Verbindungsduern. Beim ISE-Generator hat man hierfür eine Exponentialverteilung, beim ISH-Generator hingegen eine heavy-tailed Verteilung. Wegen der Schwierigkeiten der Erreichung stationären Verhaltens bei der Simulation von Verkehrsströmen mit heavy-tailed Verteilungen wird im Rahmen dieser Arbeit eine gestutzte heavy-tailed Verteilung für die Verbindungsduer des infinite source Generators benutzt (vgl. Anhang C.1). Der auf diese Weise konstruierte Verkehrsgenerator wird mit ISHT-Generator (*Infinite Source Heavy-tailed Truncated*) bezeichnet.

- **Fraktales Gaußsches Rauschen [Fractional Gaussian Noise (FGN)]**

Fraktales Gaußsches Rauschen ist der Zuwachsprozess der fraktalen Brownschen Bewegung (vgl. Anhang B.4.2). Die fraktale Brownsche Bewegung tritt bei wachsender Anzahl Sender und steigender Betrachtungsdauer (ARH) bzw. bei steigender Frequentierung und zunehmender Betrachtungsdauer (ISH) als Grenzprozess des kumulierten Ankunftsprozesses für die Verkehrsmodelle ARH und ISH auf (vgl. Anhang B.4.1) und wird daher oft als Ersatz für beide Modelle benutzt.

Als FGN-Verkehrsgenerator wird das in [Pax95a] beschrieben Verfahren verwendet.

Abbildung 7.4 stellt die vier Verkehrsgeneratoren ARH, FGN, ISHT für langzeitabhängigen Verkehr und den Poisson-Verkehrsgenerator für kurzzeitabhängigen Verkehr gegenüber.

Die simulierten Daten entstammen Versuchsreihen mit dem Zwei-Knoten-Elementarnetzwerk (vgl. Anhang C) bei Verwendung der in Abschnitt 6.2.2 beschriebenen Standard-Parameterkonfiguration. Die mittlere generierte Datenrate und die Varianz der Verkehrsgeneratoren der aktiven Knoten sind dabei zum Zwecke der Vergleichbarkeit der verschiedenen Verkehrsmodelle identisch (vgl. Abschnitt 5.5). Aus demselben Grund werden zusätzlich die Datenraten einzelner ON-Perioden des ARH-, des ISE- und des ISHT-Generators auf gleiches Niveau angepasst.

Die linke Spalte zeigt den Verlauf der Autokorrelationsfunktionen, die rechte Spalte die logarithmierte Darstellung der normierten skalierten Varianzen für die (approximierten) Hurst-Parameterwerte 0.75, 0.85 und 0.95 (von oben nach unten). Die Abszissen umfassen dabei den in allen weiteren Versuchen untersuchten Verschiebungs- bzw. Skalierungsbereich² von 0 bis 100 s. Bei den Varianzen lässt sich dabei oberhalb von 1 s die für das Abklingverhalten charakteristische Annäherung an eine Gerade beobachten.

Vergleicht man das Abklingverhalten einzelner Generatoren für verschiedene Hurst-Werte H , so zeigt sich eine Zunahme der Korrelation und der Variabilität mit steigendem Parameter H .

Im Vergleich verschiedener Verkehrsgeneratoren ist der Unterschied zwischen den drei langzeitabhängigen Generatoren ARH, FGN und ISHT und dem kurzzeitabhängigen Sprach-Generator ISE deutlich zu erkennen: Sowohl die Autokorrelation als auch die skalierten Varianzen klingen beim ISE-Generator erkennbar schneller ab als bei den langzeitabhängigen Generatoren.

Dabei ergibt sich für die Stärke der Korrelation und der Variabilität mit zunehmendem Lag bzw. Skalierungsfaktor von schwach nach stark gleichermaßen die Reihenfolge

1. Poisson (ISE)
2. FGN
3. ARH
4. ISHT.

Diese Reihenfolge ist sowohl bei den Autokorrelationen als auch bei den skalierten Varianzen für alle Hurst-Werte identisch.

Der ISHT-Generator weist demnach bei zunehmendem Lag stärkere Korrelation und bei zunehmendem Skalierungsfaktor stärkere Variabilität auf als die beiden Generatoren ARH und FGN. Bemerkenswert ist dabei insbesondere der Unterschied zwischen den Generatoren ARH und ISHT. Trotz der Gleichheit der mittleren generierten Datenrate, der Varianz und der Sende-Datenrate einzelner Verbindungen zeigt der ARH-Generator deutlich langsameres Abklingen als der ISHT-Generator, was auf eine „bessere Durchmischung“ der durch Überlagerung von ON-OFF-Prozessen generierten Verkehrsströme gegenüber ISHT-ähnlichen Verkehrsströmen hindeutet.

²Bei einer Abtastrate von $\delta_{trace} = 10 \text{ ms}$ und der in Kapitel 6 besprochenen Verdünnung mit dem Faktor $r = 10$ entspricht ein Abszissen-Wert von 1000 gerade einem Zeitintervall von 100 s.

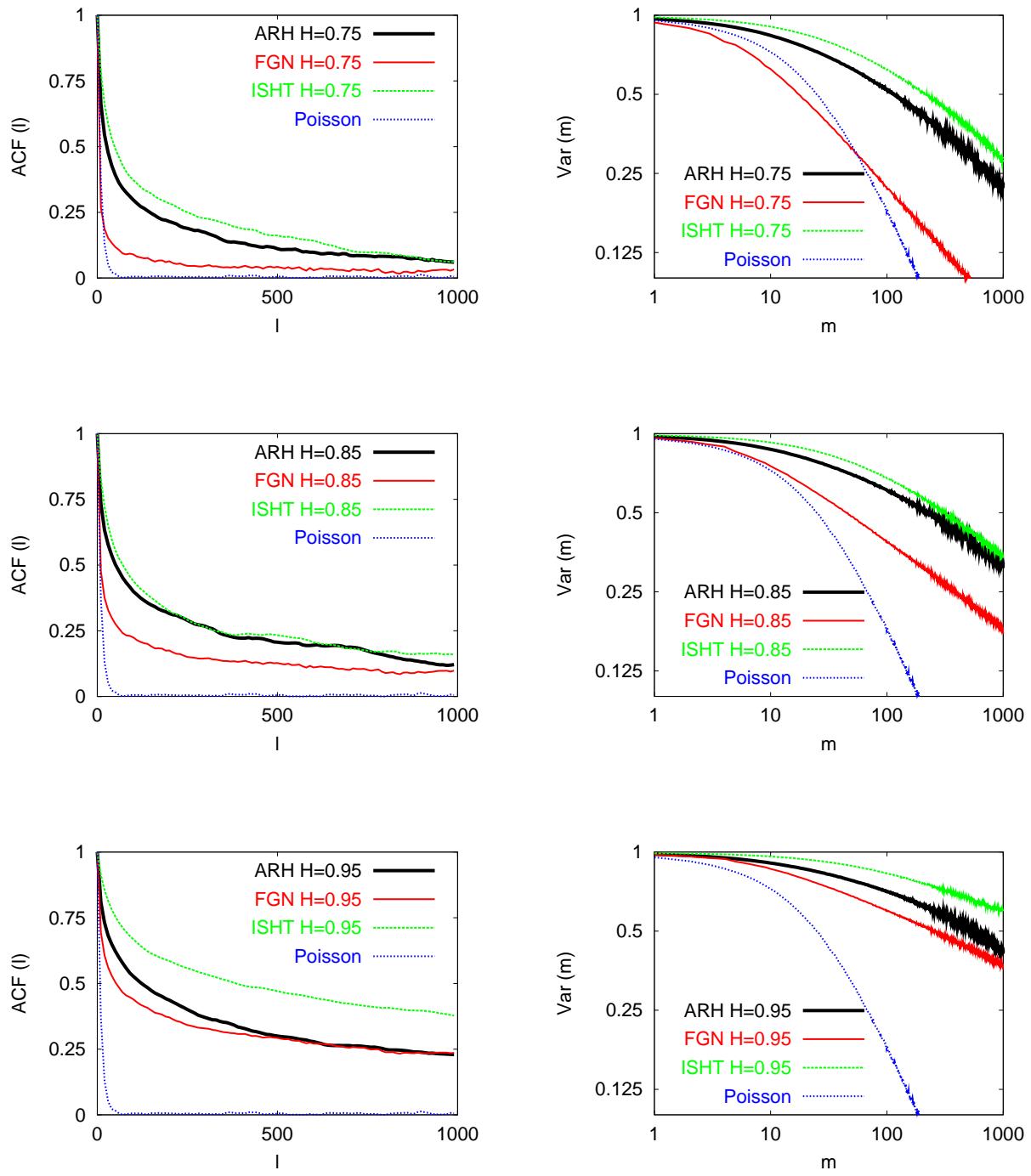


Abbildung 7.4: Vergleich der Verkehrsgeneratoren ARH, FGN, ISE und ISHT

7.3 Veränderung der ersten Momente von Verkehrsströmen durch Ausfalleintritt

Die beiden wesentlichen Veränderungen der statistischen Eigenschaften von Verkehrsströmen, die sich nach Eintritt eines Ausfalls einer Netzwerk-Komponente und dem Inkrafttreten der Ausfallbehandlung (vgl. Abschnitt 5.3.6) in einem paketvermittelnden Netzwerk ergeben, sind die **Veränderung der ersten Momente** (Veränderung der mittleren Datenrate auf Verbindungsleitungen), die in diesem Abschnitt an

Hand zweier Simulationsversuche besprochen wird, und die *Veränderung der zweiten Momente* (Veränderung der Autokorrelation und der skalierten Varianzen³), die in Abschnitt 7.4 erörtert wird.

Die Prognose der ersten Momente von Verkehrsströmen in einem Netzwerk ist eine wesentliche Grundlage für die Dimensionierung fehlertoleranter Netzwerke. Fehlertoleranz wird durch die Bereitstellung redundanter Leitungskapazitäten erreicht. Bei Eintritt eines Komponentenausfalls müssen ausreichend dimensionierte Reservepfade für die Übertragung des Verkehrs, der im Normalzustand auf den durch Ausfall beeinträchtigten Pfaden übertragen wird, zur Verfügung stehen. Gleichzeitig muss der Verkehr so geleitet werden, dass redundante Leitungskapazitäten effizient genutzt werden.

Szenario 1: Ausfall einer Verbindungsleitung im Vier-Knoten-Ringnetzwerk

Zur Veranschaulichung der Veränderung der ersten Momente von Verkehrsströmen als Konsequenz eines Ausfalls und als Dimensionierungs-Beispiel wird das aus vier Knoten bestehende, in Abbildung 7.1 dargestellte Netzwerk für die Dauer von 7200 s betrachtet. In der Mitte der Versuchsdauer zum Zeitpunkt $f_1 = 3600$ s tritt ein Ausfall ein, der nicht durch Reparatur behandelt wird. Alle Verbindungsleitungen verfügen über eine Kapazität von 5000 kbps. Das Netzwerk besteht aus aktiven Knoten mit symmetrischer Verkehrsgenerierung, die durch den ISHT-Generator mit Parameterwerten der Standardkonfiguration erfolgt, d. h. das generierte Verkehrsvolumen pro Knoten beträgt 3000 kbps bei einer Varianz von (150 kbps)². Der Abklingparameter α der Verbindungsduern wird zwischen den Werten 1.1, 1.3 und 1.5 variiert, was (approximierten) Hurst-Parameterwerten von 0.95, 0.85 und 0.75 entspricht (vgl. Anhang C.1).

Abbildung 7.5 zeigt die ausgefallene Verbindungsleitung (1.1; 1.2) und die Restorations-Verbindungsleitung (1.1; 1.3) vor und nach dem Ausfall. Wie man deutlich erkennt, nimmt die mittlere Datenrate auf der Restorations-Verbindungsleitung nach Eintritt des Ausfallereignisses durch den umgeleiteten Verkehr zu. Die Restorations-Verbindungsleitung (1.1; 1.3) tritt nach Ausfalleintritt innerhalb verschiedener Restorationspfade auf. Tabelle 7.1 fasst diese zusammen.⁴ Um eine detaillierte

| Beeinträchtigter Pfad | Restorationspfad |
|-----------------------|-------------------------|
| (1.1 – 1.2) | (1.1 – 1.3 – 1.4 – 1.2) |
| (1.1 – 1.2 – 1.4) | (1.1 – 1.3 – 1.4) |
| (1.2 – 1.1) | (1.2 – 1.4 – 1.3 – 1.1) |
| (1.2 – 1.1 – 1.3) | (1.2 – 1.4 – 1.3) |
| (1.3 – 1.1 – 1.2) | (1.3 – 1.4 – 1.2) |
| (1.4 – 1.2 – 1.1) | (1.4 – 1.3 – 1.1) |

Tabelle 7.1: Restorationspfade im Vier-Knoten-Ring-Netzwerk

Abschätzung für die Last auf einer Verbindungsleitung vor und nach Ausfalleintritt vornehmen zu können, kann ein erweitertes Netzwerkflussmodell genutzt werden, in dem alle Flüsse zwischen Sender-Empfänger-Paaren und zusätzlich das Routing-Verfahren berücksichtigt werden.

Die Tabellen 7.2 und 7.3 zeigen die Lastverteilung innerhalb des Netzwerkes vor und nach dem Ausfall. Die erste Spalte enthält die aktiven Knoten, die zweite Zeile die pro aktivem Knoten emittierte mittlere Datenrate $\mu_{v,gesamt}$ und die nachfolgenden Spalten enthalten die mittlere Datenrate, die durch die Emission des Senders v auf jeder der Verbindungsleitungen des Netzwerkes verursacht wird. Beispielsweise erzeugt der Knoten 1.1 auf der Verbindungsleitung (1.1; 1.3) im Normalzustand eine mittlere Last

³Für die skalierten Varianzen werden in der Folge auch synonym die Begriffe Schwankung und Variabilität benutzt.

⁴Zugrunde gelegt ist die Annahme, dass das Kürzeste-Wege Routing-Verfahren eingesetzt wird; die Tabelle spiegelt die Pfade des hier beschriebenen Versuches wider.

| Sender v | $\mu_{v, \text{gesamt}}$ | $\mu_{v, (1.1; 1.2)}$ | $\mu_{v, (1.2; 1.1)}$ | $\mu_{v, (1.1; 1.3)}$ | $\mu_{v, (1.3; 1.1)}$ |
|------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1.1 | 3000 kbps | 2000 kbps | 0 kbps | 1000 kbps | 0 kbps |
| 1.2 | 3000 kbps | 0 kbps | 2000 kbps | 1000 kbps | 0 kbps |
| 1.3 | 3000 kbps | 1000 kbps | 0 kbps | 0 kbps | 2000 kbps |
| 1.4 | 3000 kbps | 0 kbps | 1000 kbps | 0 kbps | 0 kbps |
| Sender v | $\mu_{v, \text{gesamt}}$ | $\mu_{v, (1.2; 1.4)}$ | $\mu_{v, (1.4; 1.2)}$ | $\mu_{v, (1.3; 1.4)}$ | $\mu_{v, (1.4; 1.3)}$ |
| 1.1 | 3000 kbps | 1000 kbps | 0 kbps | 0 kbps | 0 kbps |
| 1.2 | 3000 kbps | 1000 kbps | 0 kbps | 0 kbps | 0 kbps |
| 1.3 | 3000 kbps | 0 kbps | 0 kbps | 1000 kbps | 0 kbps |
| 1.4 | 3000 kbps | 0 kbps | 2000 kbps | 0 kbps | 1000 kbps |

Tabelle 7.2: Auslastung von Verbindungsleitungen im Normalzustand (Vier-Knoten-Ring)

von 1000 kbps. Dies ist gerade der Verkehr, der für den Empfänger 1.4 bestimmt ist und nach dem Kürzeste-Wege-Verfahren über die Verbindungsleitung (1.1; 1.3) übertragen wird. Die Verkehrslast auf

| Sender v | $\mu_{v, \text{gesamt}}$ | $\mu_{v, (1.1; 1.2)}$ | $\mu_{v, (1.2; 1.1)}$ | $\mu_{v, (1.1; 1.3)}$ | $\mu_{v, (1.3; 1.1)}$ |
|------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1.1 | 3000 kbps | 0 kbps | 0 kbps | 3000 kbps | 0 kbps |
| 1.2 | 3000 kbps | 0 kbps | 0 kbps | 0 kbps | 1000 kbps |
| 1.3 | 3000 kbps | 0 kbps | 0 kbps | 0 kbps | 1000 kbps |
| 1.4 | 3000 kbps | 0 kbps | 0 kbps | 0 kbps | 1000 kbps |
| Sender v | $\mu_{v, \text{gesamt}}$ | $\mu_{v, (1.2; 1.4)}$ | $\mu_{v, (1.4; 1.2)}$ | $\mu_{v, (1.3; 1.4)}$ | $\mu_{v, (1.4; 1.3)}$ |
| 1.1 | 3000 kbps | 0 kbps | 1000 kbps | 2000 kbps | 0 kbps |
| 1.2 | 3000 kbps | 2000 kbps | 0 kbps | 0 kbps | 2000 kbps |
| 1.3 | 3000 kbps | 0 kbps | 1000 kbps | 2000 kbps | 0 kbps |
| 1.4 | 3000 kbps | 0 kbps | 1000 kbps | 0 kbps | 2000 kbps |

Tabelle 7.3: Auslastung von Verbindungsleitungen im Restorationszustand (Vier-Knoten-Ring)

einer bestimmten Verbindungsleitung erhält man durch Summation aller Spalten-Einträge, z. B. ergibt sich die Belastung der Verbindungsleitung (1.1; 1.3) als

$$\mu_{(1.1; 1.3)} = \mu_{1.1, (1.1; 1.3)} + \mu_{1.2, (1.1; 1.3)} + \mu_{1.3, (1.1; 1.3)} + \mu_{1.4, (1.1; 1.3)}.$$

Beispielsweise ergibt sich mit Hilfe von Tabelle 7.2 für diese Verbindungsleitung im Normalzustand eine mittlere Datenrate von

$$\mu_{(1.1; 1.3)} = \mu_{1.1, (1.1; 1.3)} + \mu_{1.2, (1.1; 1.3)} = 1000 \text{ kbps} + 1000 \text{ kbps} = 2000 \text{ kbps}.$$

Entsprechend hat man im Restorationszustand

$$\mu_{(1.1; 1.3)} = \mu_{1.1, (1.1; 1.3)} = 3000 \text{ kbps}.$$

Die Veränderung nach dem Eintritt des Ausfalls schlägt sich in Abbildung 7.5 in einer Erhöhung der mittleren Anzahl gesendeter Paket von 200 auf 300 nieder.

Der Zusammenhang zwischen der mittleren Anzahl beobachteter Pakete \bar{p} und der mittleren Last μ_l in Form der mittleren Datenrate auf einer Verbindungsleitung ist dabei gegeben durch

$$\bar{p} = \frac{\mu_l \cdot \delta_{link}}{b \cdot s_p} \quad (7.1)$$

(vgl. Abschnitt 5.3.1). Dabei bezeichnet δ_{link} die Latenz der Verbindungsleitung, b deren Bandbreite und s_p die Paketgröße.⁵

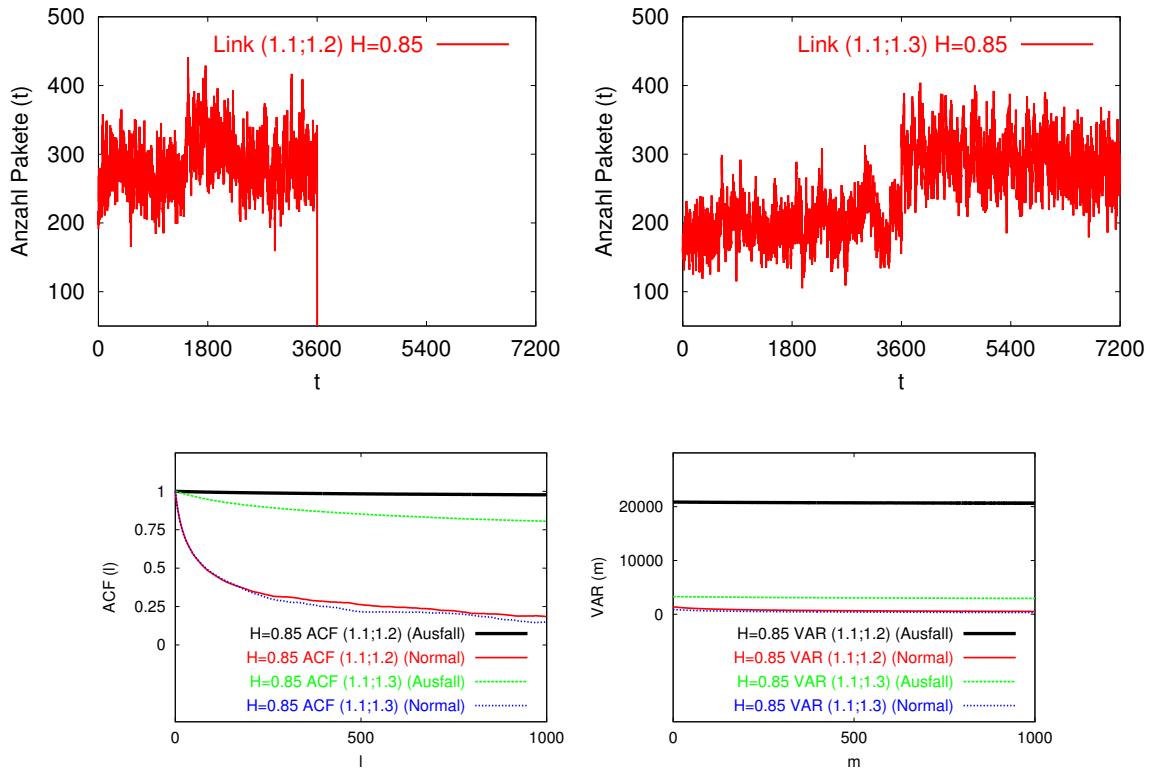


Abbildung 7.5: Ausgefallene Verbindungsleitung und Restorations-Verbindungsleitung im Vier-Knoten-Ringnetzwerk mit zugehörigen Autokorrelationsfunktionen und skalierten Varianzen ($H=0.85$)

Szenario 2: Ausfall einer Verbindungsleitung im Zehn-Knoten-Ringnetzwerk

Abbildung 7.2 zeigt einen Ring mit zehn aktiven Knoten, die mit 1.1 bis 1.10 bezeichnet sind. Alle (unidirektionale) Verbindungsleitungen besitzen eine Kapazität von 5000 kbps . Die Verkehrsgenerierung geschieht *symmetrisch*, d. h. jeder (aktive) Knoten erzeugt die gleiche Menge Verkehr für alle anderen (aktiven) Knoten des Netzwerkes. Insgesamt generiert jeder Knoten ein Verkehrsvolumen von 900 kbps nach dem ARH-Generator. Als Routing-Verfahren wird das Kürzeste-Wege-Verfahren eingesetzt. Die Versuchsdauer beträgt 1800 s . Zum Zeitpunkt $f_1 = 800 \text{ s}$ wird für eine Dauer von $\Delta_t = 300 \text{ s}$ ein Ausfall der Verbindungsleitung $\{1.1; 1.2\}$ injiziert, d. h. zum Zeitpunkt $r_1 = 1100 \text{ s}$ findet die Rückkehr in den Normalzustand statt.

Abbildung 7.6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Auslastung der Verbindungsleitungen über die gesamte Versuchsdauer. Deutlich erkennbar sind dabei die Auslastungs-Sprünge, die durch den Ausfall verursacht werden.

Im Hinblick auf fehlertolerante Kapazitätsplanung lässt sich die durch den Ausfall bedingte Lastveränderung innerhalb des Ringnetzwerkes wie folgt charakterisieren: Nach Eintritt des Ausfalls und erfolgter Ausfallbehandlung wird Verkehr entsprechend des Routing-Verfahrens umgeleitet. So werden z. B. Datenpakete mit Sender 1.10 und Empfänger 1.2 vor dem Ausfall über den Pfad $(1.10 - 1.1 - 1.2)$ übertragen, der im Sinne von Definition 5.3 ein durch den Ausfall der Verbindungsleitung beeinträchtigter Pfad ist. Nach Eintritt des Ausfalls wird hierzu der Restorationspfad $(1.10 - 1.9 - 1.8 - 1.7 - 1.6 - 1.5 - 1.4 - 1.3 - 1.2)$ benutzt. Durch den Ausfall wird eine Erhöhung bzw. eine Verringerung

⁵Diese wird hier als konstant angenommen, vgl. Abschnitt 5.4.1.

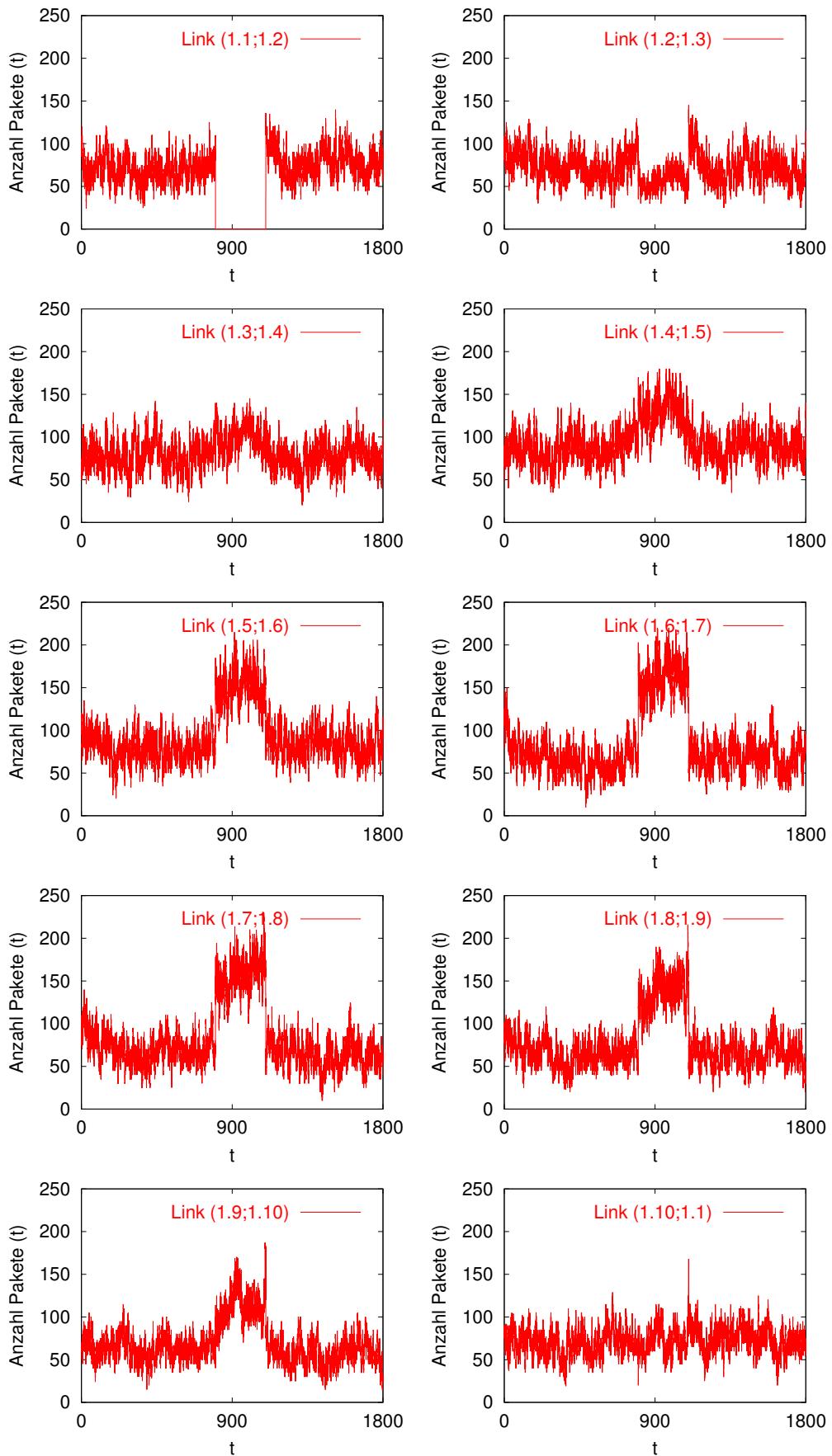


Abbildung 7.6: Ausfall einer Verbindungsleitung im Zehn-Knoten-Ringnetzwerk

der Last auf den Verbindungsleitungen hervorgerufen, die im Wesentlichen vom Routing-Verfahren abhängig ist. So nimmt beispielsweise die Last auf der Verbindungsleitung (1.2; 1.3) während der Ausfalldauer ab, während auf den Verbindungsleitungen (1.3; 1.4), (1.4; 1.5), (1.5; 1.6), (1.6; 1.7), (1.7; 1.8) und (1.8; 1.9) eine Zunahme zu verzeichnen ist. Die Abnahme lässt sich damit erklären, dass nach dem Ausfall weniger Sender-Knoten die Verbindungsleitung (1.2; 1.3) nutzen, um Pakete zu Empfängern zu übertragen als vor dem Ausfall. Eine Zunahme, wie z. B. auf der Verbindungsleitung (1.5; 1.6), entsteht, wenn mehr Sender-Knoten eine Verbindungsleitung nutzen als vor dem Ausfall. Im Falle einer Zunahme hängt die Stärke der Veränderung von der Anzahl der Sender-Empfänger-Paare ab, deren kürzester Weg nach dem Ausfallereignis genau diese Verbindungsleitung enthält, sie aber vor dem Ausfallereignis nicht enthalten hat.

Eine wesentliche Beobachtung besteht darin, dass die Gesamtlast innerhalb des hier betrachteten Netzwerkes durch das Ausfallereignis zunimmt. Dies kommt dadurch zustande, dass Verkehr, der vor dem Ausfallereignis über wenige Verbindungsleitungen vom Sender zum Empfänger übertragen werden kann (z. B. beim Sender 1.1 und Empfänger 1.2; hier ist im Normalzustand genau eine Verbindungsleitung erforderlich) nach Eintritt des Ausfalls über einen wesentlich längeren Pfad übertragen werden muss (z. B. beim Sender 1.1 und Empfänger 1.2 über den Restorationspfad (1.1 – 1.10 – 1.9 – 1.8 – 1.7 – 1.6 – 1.5 – 1.4 – 1.3 – 1.2)). Dadurch wird erheblich mehr Last innerhalb des Netzwerkes erzeugt.

Das in Anhang B.5 beschriebene Konzept der effektiven Bandbreite [Gue91, Kel96, Pat97a, Bod00, Fon00] erlaubt es, Verkehrsströme mir inhärenter Schwankung durch „glatte“ Verkehrsströme zu approximieren. Wesentlicher Vorteil des Konzepts sind die einfachen Rechenregeln, die sich für die Überlagerung von Verkehrsströmen ergeben, essentielle Nachteile sind die mögliche Ungenauigkeit der Approximation und die Nichtberücksichtigung des Multiplexing-Verlustes (vgl. Abschnitt 7.4.2), der bei der Überlagerung von Verkehrsströmen entstehen kann.

Zusammen mit dem in Abschnitt 7.9.2 beschriebenen Verfahren zur Approximation von langzeitabhängigen Verkehrsströmen durch fraktales Gaußsches Rauschen und den dort genannten Rechenregeln für die Überlagerung exakt selbstähnlicher Verkehrsströme ist eine Nutzung des Konzepts der effektiven Bandbreite für die Abschätzung des Bandbreitenbedarfes im Restorationszustand denkbar. Dazu ist in einem ersten Schritt die Ermittlung der Verkehrs-Deskriptoren für den Restorationszustand erforderlich (vgl. Abschnitt 7.9.2). Der zweite Schritt besteht dann in der Ermittlung der Kapazitäten der Verbindungsleitungen mit Hilfe effektiver Bandbreite auf Grundlage der im ersten Schritt geschätzten Verkehrs-Deskriptoren. Der Ansatz kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit aus Aufwandsgründen nicht weiterverfolgt werden und ist als Ansatzpunkt für weitergehende Forschungsarbeiten zu sehen.

7.4 Veränderung der zweiten Momente von Verkehrsströmen durch Ausfalleintritt

In den weiteren Betrachtungen dieses Kapitels liegt das Hauptaugenmerk nicht auf den bisher betrachteten ersten Momenten von Verkehrsströmen, sondern auf den zweiten Momenten, und dabei insbesondere auf der Variabilität, die durch die skalierten Varianzen gegeben ist.

Der Begriff *zweite Momente* von Verkehrsströmen wird im Folgenden für die Autokorrelation und die skalierten Varianzen (vgl. Abschnitt 6.3.2) benutzt. Für die Varianz zum Skalierungsfaktor 1 ergibt sich dabei gerade die *Stichprobenvarianz*. Die Autokorrelation und das Abklingverhalten skaliert Varianzen werden dabei als *qualitative Indikatoren* der Variabilität bezeichnet, die absoluten Werte der skalierten Varianzen als *quantitativer Indikator*.

Bei den nachfolgenden Versuchen dieses Abschnitts werden Ausfälle einzelner Netzwerk-Komponenten

simuliert und die zweiten Momente von Verkehrsströmen untersucht. Dabei werden zwei unterschiedliche Betrachtungen vorgenommen:

- *Betrachtung über die gesamte Versuchsdauer*

Bei dieser Variante werden die Autokorrelationen und die skalierten Varianzen der untersuchten Verkehrsströme für die Zeitreihe berechnet, die sich über die gesamte Versuchsdauer erstreckt, d. h. das Ausfallereignis ist in den Zeitreihen, für die statistische Kenngrößen berechnet werden, enthalten.

Ziel der Betrachtung ist es, die Auswirkungen der durch einen Ausfall verursachten Lastveränderung auf die zweiten Momente von Verkehrsströmen zu untersuchen.

- *Getrennte Betrachtung der Perioden vor dem Ausfall und nach dem Ausfall*

Hierbei werden die untersuchten Zeitreihen zum Ausfallzeitpunkt in der Mitte der Versuchsdauer geteilt und die zweiten Momente getrennt für die Perioden vor und *nach* Eintritt des Ausfalls berechnet und miteinander verglichen.

7.4.1 Betrachtung über die gesamte Versuchsdauer

Szenario 1: Ausfall einer Verbindungsleitung im Vier-Knoten-Ringnetzwerk

Zunächst soll eine Variabilitätsanalyse in dem bereits im vorausgehenden Abschnitt als Szenario 1 behandelten und in Abbildung 7.1 veranschaulichten Versuch durchgeführt werden.

Abbildung 7.5 zeigt den Verlauf der skalierten Varianzen und der Autokorrelationen der ausgefallenen Verbindungsleitung (1.1; 1.2) und der Restorations-Verbindungsleitung (1.1; 1.3) über die gesamte Versuchsdauer von 7200 s. Zum Vergleich ist außerdem der Verlauf der entsprechenden Kurven für die beiden Verbindungsleitungen im ausfallfreien Betrieb⁶ bei gleichen Lastverhältnissen dargestellt.

Die Variabilität der dargestellten Verkehrsströme lässt sich in zwei Teile zerlegen:

- *inhärente Variabilität*

Dieser Anteil ist auch bei Verkehrsströmen im ausfallfreien Zustand zu beobachten und wird durch folgende Einflüsse erzeugt:

- *Schwankungen der Zwischenankunftszeiten („bursts“) bei Paketen einzelner Verbindungen (Zellprozess-Einfluss)⁷*
- *unterschiedliche Datenrate einzelner Verbindungen (Verbindungseinfluss, siehe Abschnitt 7.9.3 und Anhang B.4, Lemma B.1)*
- *unterschiedliche Dauer von Verbindungen (Verbindungseinfluss)*

- *ausfallbedingte Variabilität*

Die durch Ausfall von Netzkomponenten hervorgerufenen Laständerungen innerhalb eines Netzwerkes verursachen Variabilitätsänderungen, die im Wesentlichen durch das Routing-Verfahren und die Flusskontroll-Eigenschaften der Transportprotokolle⁷ bestimmt werden.

Im vorliegenden Ausfall-Szenario dominiert die ausfallbedingte Variabilität den inhärenten Variabilitätsanteil. Bei den Autokorrelationskurven und den skalierten Varianzen spiegelt sich diese Dominanz in einem im Vergleich zum ausfallfreien Fall kaum wahrnehmbaren Abklingen der Kurven der zweiten Momente innerhalb des betrachteten Zeitfensters wider:

⁶Diese sind mit der Bezeichnung „Normal“ gekennzeichnet.

⁷Diese werden hier innerhalb der Modellierung vernachlässigt, vgl. dazu auch Abschnitt 7.9.3.

1. Autokorrelation

Die Autokorrelationskurve der ausgefallenen Verbindungsleitung (1.1; 1.2) verharrt nahezu im gesamten Verlauf bei der Konstante 1, welche lineare Abhängigkeit bedeutet. Die Ursache für dieses extreme Verhalten ist das Absacken der auf der Verbindungsleitung übertragenen Datenrate auf den (konstanten) Wert 0.

Die Autokorrelation der Restorations-Verbindungsleitung (1.1; 1.3) zeigt im Restorationszustand im Vergleich mit den Autokorrelationen der Verbindungsleitungen im Normalzustand ein leichtes Abklingenverhalten. Der in Abbildung 7.5 dargestellte Anstieg der mittleren Datenrate dominiert hier das inhärente Korrelationsverhalten des betrachteten Verkehrsstromes.

2. skalierte Varianzen

Betrachtet man den Verlauf der skalierten Varianzen für die ausgefallene Verbindungsleitung (1.1; 1.2) und für die Restorations-Verbindungsleitung (1.2; 1.3), so ist ein Abklingen innerhalb des hier dargestellten Zeitfensters nicht wahrnehmbar. Der durch den Ausfall bedingte Sprung der mittleren übertragenen Datenrate dominiert das durch die inhärente Variabilität der Verkehrsströme gegebene Abklingenverhalten. Sowohl bei der ausgefallenen Verbindungsleitung als auch bei der Restorations-Verbindungsleitung ist ein nahezu konstanter Verlauf der skalierten Varianzen und eine deutliche Zunahme der Variabilität im Vergleich zum ausfallfreien Zustand⁸ zu beobachten.

Szenario 2: Ausfall eines Knotens im Hauptnetzwerk

Abbildung 7.3 stellt das Szenario für den zweiten Versuch zur Variabilitätsanalyse bei Ausfall von Netzkomponenten dar: Im Hauptnetzwerk wird zur Hälfte der Versuchsdauer von 7200 s ein Ausfall des Knotens 1.1 simuliert.

Die Verbindungsleitungen des Kernnetzes, das aus den (passiven) Knoten 1.1, 2.1, 3.1 und 4.1 besteht, besitzen dabei eine Bandbreite von jeweils 10000 kbps, alle übrigen Verbindungsleitungen eine Bandbreite von 5000 kbps.

Die Verkehrsgenerierung erfolgt nach der Standard-Parameterkonfiguration. Als Verkehrsgenerator wird der ISHT-Generator eingesetzt. In diesem Abschnitt wird nur das Ergebnis des Simulationslaufs für den (approximierten) Hurst-Parameter $H = 0.85$ betrachtet. Die Ergebnisse der Läufe für andere Hurst-Werte weisen keinen signifikanten tendenziellen Unterschied zum hier dargestellten Verhalten auf.

Gegenstand der Betrachtung sind die beeinträchtigte Verbindungsleitung (1.1; 2.1) und die Restorations-Verbindungsleitung (2.1; 3.1). Im Vergleich mit dem im vorigen Abschnitt betrachteten Vier-Knoten-Ringnetzwerk hat man hier auf der betrachteten Restorations-Verbindungsleitung eine Durchmischung einer viel größeren Anzahl von Verkehrsflüssen. Diese werden im Einzelnen nicht detailliert untersucht, sondern es wird statt dessen der aus mehreren Verkehrsflüssen aggregierte Verkehrsstrom in seiner Gesamtheit analysiert.

Die erste Zeile der Abbildung 7.7 zeigt die Verläufe der Paketprozesse auf der ausgefallenen Verbindungsleitung (1.1; 2.1) und auf der Restorations-Verbindungsleitung (2.1; 3.1).

In der zweiten Zeile sind die zweiten Momente für die beiden Links im Restorationszustand dargestellt. Zum Vergleich werden die zweiten Momente im Normalzustand⁹ bei gleichen Lastverhältnissen abgebildet.

⁸Durch die gegebene Skalierung ist das Abklingen der skalierten Varianzen im Normalzustand nicht zu erkennen. Aufgrund der weiteren Betrachtungen dieses Kapitels sollte jedoch klar sein, dass hier eine Abnahme der Variabilität mit zunehmendem Skalierungsfaktor zu verzeichnen ist, vgl. Abschnitt 7.4.2.

⁹Diese sind hier mit der Bezeichnung „Normal“ gekennzeichnet.

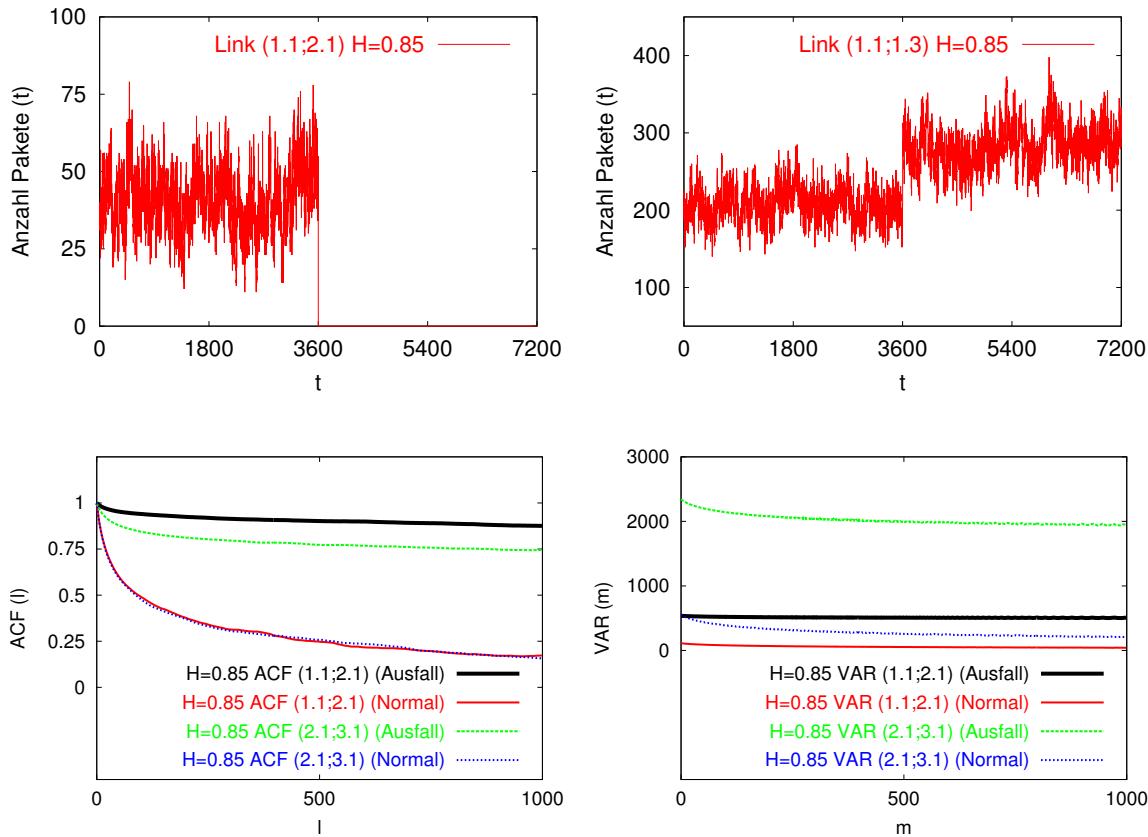


Abbildung 7.7: Ausgefallene Verbindungsleitung und Restorations-Verbindungsleitung im Hauptnetzwerk mit zugehörigen Autokorrelationsfunktionen und skalierten Varianzen ($H=0.85$)

Das Verhalten der zweiten Momente bestätigt die im ersten Szenario dieses Abschnittes getroffenen Aussagen. Der dominante Einfluss des Ausfalls führt zu einem nahezu konstanten Verlauf der Autokorrelation und der skalierten Varianzen - sowohl bei der ausgesunkenen Verbindungsleitung als auch bei der Restorations-Verbindungsleitung.

Vergleicht man die skalierten Varianzen auf dem ausgesunkenen Link und dem Restorations-Link im Ausfall-Zustand miteinander (Abbildungen 7.5 und 7.7), so wird deutlich, dass die absolute Größe der skalierten Varianzen maßgeblich von der Differenz zwischen der vor dem Ausfall auf der Verbindungsleitung übertragenen mittleren Datenrate und der *nach* dem Ausfall übertragenen mittleren Datenrate abhängt.

Die Bedeutung der hier dargestellten Kurvenverläufe der zweiten Momente liegt in der Erkennung der Tendenz des Kurvenverlaufes bei Eintritt eines Ausfalls im Vergleich zum ausfallfreien Zustand. In einem gleitenden Zeitfenster, welches in äquidistanten periodischen Zeitabständen die zweiten Momente auf einer Verbindungsleitung misst, schlägt sich eine ausfallbedingte Lasterhöhung (oder -erniedrigung) in einer Verlangsamung des Abklingens der Autokorrelationen und der skalierten Varianzen nieder. Bei letztergenannter ist zusätzlich ein absoluter Anstieg gegenüber dem ausfallfreien Fall zu verzeichnen.

Von Interesse im Hinblick auf weitergehende Untersuchungen ist die Frage, ob es möglich ist, die ausfallverursachte Änderung der zweiten Momente zur Fehlererkennung in Kommunikationsnetzen einzusetzen. Dies gilt insbesondere dann, wenn der Anstieg oder Abfall der mittleren übertragenen Datenrate gering ausfällt, so dass ein (mit erheblich weniger Aufwand zu implementierendes) rein Mittelwert-basiertes Verfahren (erste Momente) die eingetretene Laständerung als nicht signifikant einstuft.

7.4.2 Getrennte Betrachtung der Perioden vor dem Ausfall und nach dem Ausfall

Es werden zwei Versuche durchgeführt: Als erstes wird der bereits in Abschnitt 7.3 geschilderte und in Abbildung 7.1 dargestellte Verbindungsleitungs-Ausfall im Vier-Knoten-Elementarring betrachtet. In einem zweiten Versuch wird der in Abbildung 7.3 dargestellte Knoten-Ausfall im Hauptnetzwerk analysiert.

Szenario 1: Ausfall einer Verbindungsleitung im Vier-Knoten-Ringnetzwerk

Ein Vergleich der Autokorrelationsfunktionen und der skalierten Varianzen für das beschriebene Szenario ist durch die Schaubilder 7.8 und 7.9 gegeben. Die dargestellten Kurven zeigen die zweiten Momente vor und *nach* dem Ausfalleintritt. Bemerkenswert ist dabei der Unterschied zwischen *qualitativer* und *quantitativer* Änderung: Bei den Autokorrelationsfunktionen ist eine Paarbildung für die drei (approximierten) Hurst-Werte¹⁰ zu erkennen, d. h. für jeden festen Hurst-Wert liegen die Kurven „Vor Ausfall“ und „Nach Ausfall“ dicht beieinander, was darauf hinweist, dass sich das Abklingverhalten der Autokorrelationen nach dem Ausfallereignis nicht ändert. Für die Autokorrelationskurven verschiedener Hurst-Werte hingegen ist eine klare Diskrepanz erkennbar.

Quantitativ zeigt Abbildung 7.9 einen deutlichen Anstieg der Variabilität nach Eintritt des Ausfalls. Bezieht man allerdings die Schwankung auf die mittlere übertragene Datenrate und misst so die *relative Schwankung*, dann findet jedoch in dem beschriebenen Szenario kein Anstieg der Variabilität statt, wie sich später zeigen wird (vgl. dazu Abschnitt 7.4).

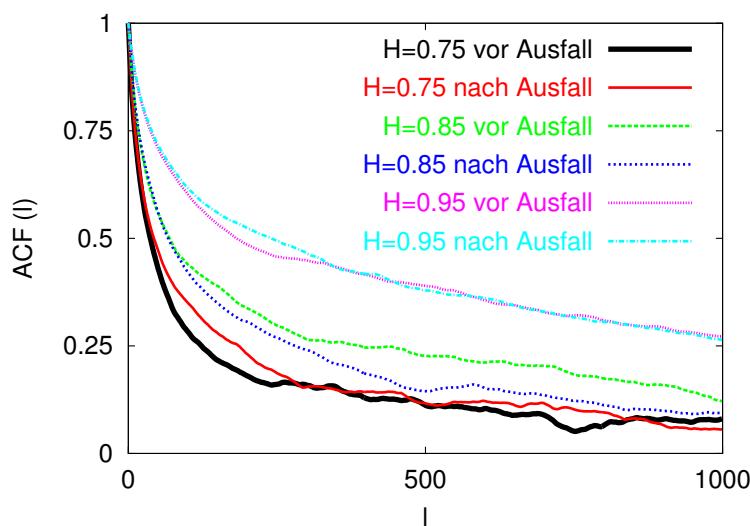


Abbildung 7.8: Autokorrelation bei Verbindungsleitungsausfall im Vier-Knoten-Ringnetzwerk

Abbildung 7.10 zeigt die Segmentdarstellung (vgl. Abschnitt 6.3.5) des Variabilitätsquotienten (linke Spalte) und der Quotienten der Variationskoeffizienten (rechte Spalte) für die Restorations-Verbindungsleitung (1.1; 1.3). In Erinnerung gerufen sei an dieser Stelle, dass für beide Quotienten ein Wert kleiner als Eins eine Abnahme und ein Wert größer Eins eine Zunahme der Variabilität nach dem Ausfall gegenüber der Variabilität vor dem Ausfall darstellt (vgl. Abschnitt 6.3.5).

Zwei wichtige Beobachtungen lassen sich machen:

¹⁰Zur Approximation der Hurst-Werte durch das benutzte Verkehrsmodell siehe Anhang C.1.

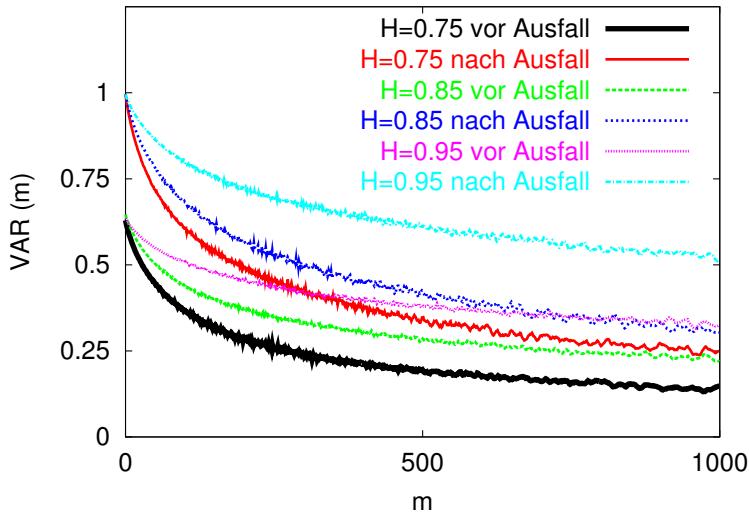


Abbildung 7.9: Skalierte Varianzen bei Verbindungsleitungs ausfall im Vier-Knoten-Ringnetzwerk (normierte Darstellung)

- *Gleichmäßigkeit der Variabilitätsänderung in verschiedenen Segmenten*

Wesentliche Erkenntnis der Abbildungen 7.10 ist die Gleichmäßigkeit der Variabilitätsänderung in verschiedenen Segmenten.

Bemerkt werden muss hierbei, dass die simulierte am Netzwerk anliegende Last in dem Sinne als *homogen* angesehen werden muss, als die Verkehrsgeneratoren alle dieselben statistischen Eigenschaften besitzen. Die durch Ausfall verursachte Verkehrsvolumenerhöhung auf den Restorations- bzw. Protektionspfaden entspringt somit Elementarströmen gleicher statistischer Charakteristik zweiter Ordnung, wobei jeder einzelne Verkehrsgenerator bereits eine Überlagerung von Verkehrsströmen generiert.

Berücksichtigt man, dass sich die Anzahl der durchlaufenen Knoten in Intakt- und im Defektzustand stark unterscheidet, so ist die in Abbildung festgestellte *Persistenz der Streuung* dennoch erstaunlich, und legt den Schluss nahe, dass die Variabilitätseigenschaften innerhalb eines homogenen Netzes gegenüber variierender Anzahl Knoten außerordentlich robust ist. Die Robustheit äußert sich hier in der Konstanz der Variabilitäts erhöhung in verschiedenen Segmenten, die in Abbildung 7.10 veranschaulicht ist. Unter den genannten Voraussetzungen kann das Abklingverhalten der Variabilität des Restorations-Verkehrsstromes demnach mit dem Abklingverhalten der im Netzwerk vorhandenen Verkehrsströme im ausfallfreien Betrieb als identisch angesehen werden. Die festgestellte Streuungs-Persistenz wird untermauert durch die in [Wis99] angestellten Untersuchungen, bei denen die Invariabilität der statistischen Eigenschaften von Verkehrsströmen nach dem Durchlaufen von paketvermittelnden Knotenpunkten präzisiert wird.

In Weitverkehrsnetzen, in denen große Mengen an Verkehrsströmen gemultiplext werden, ist die Annahme der Homogenität des Verkehrs innerhalb des Netzes realistisch, sofern die Vielfalt der Anwendungen, welche die statistischen Eigenschaften der an den Randknoten anliegenden Last bestimmen, keine lokalen Unterschiede aufweist.

Unterschiede der genannten Art können in lokalen Netzen entstehen, wenn Randknoten als Transitpunkte für spezifische Anwendungen dienen, z. B. wenn ein Randknoten A als Transitpunkt für eine Menge von Datei-Servern und ein Randknoten B als Übergangspunkt für ein lokales Subnetz mit einer Menge von Benutzerrechnern mit einem hohem Anteil interaktiven Verkehrs genutzt wird. Die sich aus einem solchen Szenario ergebenden Konsequenzen der Unterschiede der statistischen Eigenschaften der an den Randknoten anliegenden Last für die Restoration und Protektion

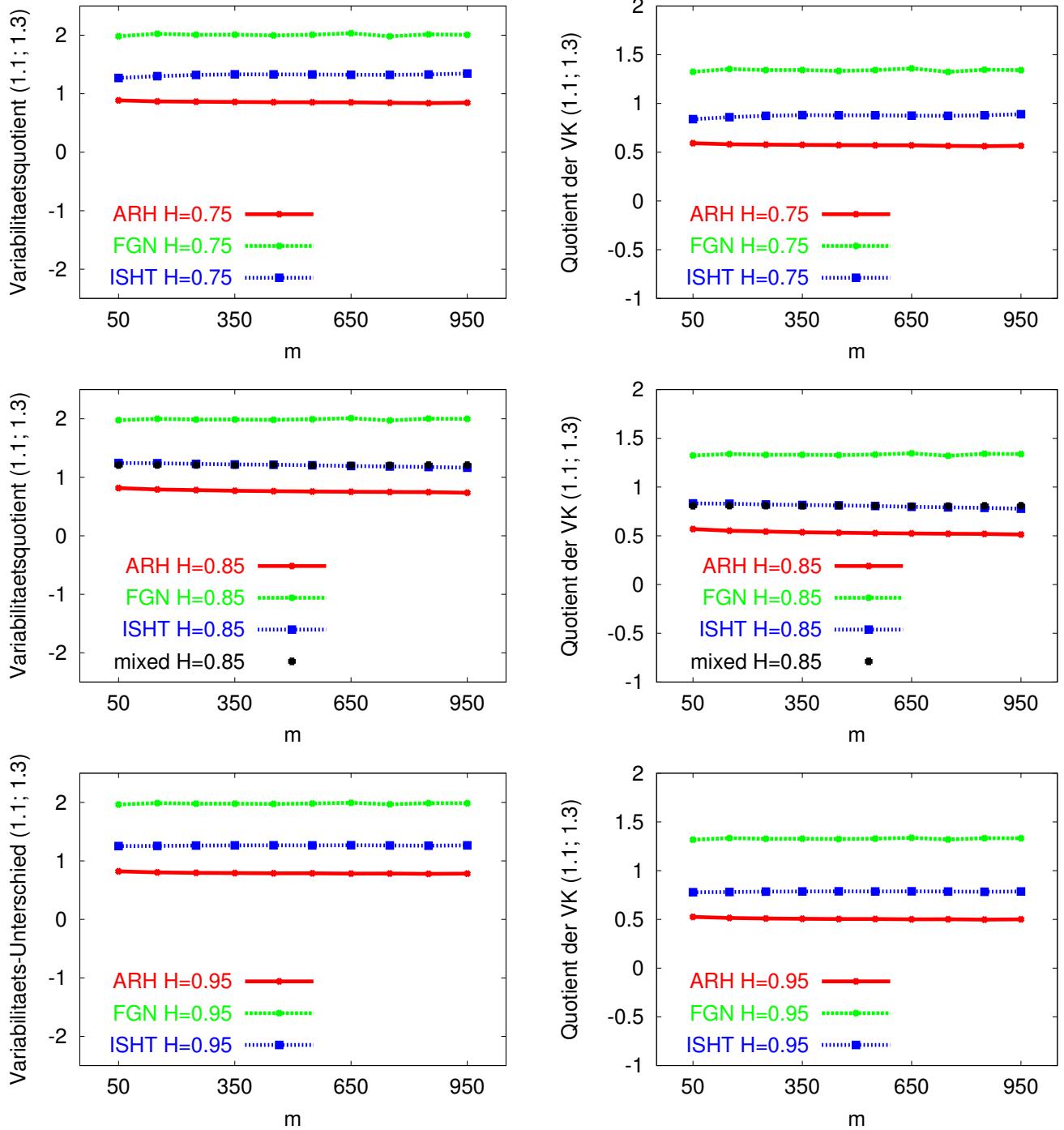


Abbildung 7.10: Veränderung der Variabilität durch Ausfall einer Verbindungsleitung im Vier-Knoten-Ringnetzwerk (Segmentdarstellung, VK=Variationskoeffizient))

sind ein Ansatzpunkt für weitere Forschungsarbeiten.

- **Unterschied verschiedener Verkehrsmodelle**

Auffällig ist darüber hinaus der klar zu erkennende Variabilitäts-Unterschied zwischen den Verkehrsmodellen ARH, FGN und ISHT.

Das FGN-Modell zeigt sowohl absolut (Variabilitätsquotient, linke Spalte) als auch relativ (Quotient der Variationskoeffizienten, rechte Spalte) eine Zunahme der Variabilität.

Beim ISHT-Modell ist zwar eine absolute Zunahme der Variabilität zu verzeichnen, betrachtet

man die Streuung pro übertragenem Verkehrsvolumen, dann hat man hier eine leichte Abnahme der Variabilität nach Ausfalleintritt.

Das ARH-Modell zeigt sowohl absolut als auch relativ eine Verringerung der Schwankung.

Das ARH- und das ISHT-Modell zeigen demnach einen *Multiplexing-Verlust* von Variabilität, der beim FGN-Modell nicht in Erscheinung tritt. Vergegenwärtigt man sich, dass dem ARH-Modell ein Abwechseln von ON-Perioden („Last“) und OFF-Perioden („Löchern“) zugrunde liegt, dann lässt sich die hier festgestellte Abnahme der Variabilität durch das „Stopfen der Löcher“ in Folge einer guten Durchmischung alternierender Erneuerungsprozesse erklären. Die nach dem FGN-Verfahren generierten Verkehrsströme hingegen sind in sich bereits so „dicht“, dass eine solche Durchmischung nicht mehr möglich ist.

Die zweite Spalte in Abbildung 7.10 enthält neben den drei genannten Verkehrsmodellen einen zusätzlichen Versuch mit einer Mischung aus kurz- und langzeitabhängigem Verkehr. Dabei erzeugt jeder Verkehrsgenerator zur einen Hälfte Poisson-Verkehr und zur anderen Hälfte ISHT-Verkehr mit dem (approximierten) Hurst-Parameter $H = 0.85$. Auffällig ist die gute Annäherung der Variabilitätswerte des gemischten Szenarios an den (reinen) ISHT-Versuch, d. h. bei der Verkehrs-Mischung ist der Einfluss des Poisson-Anteils nicht wahrnehmbar und der langzeitabhängige ISHT-Anteil dominiert das Variabilitätsverhalten.

Szenario 2: Ausfall eines Knotens im Hauptnetzwerk

Es sollen nun die Auswirkungen eines Knoten-Ausfalls bei getrennter Betrachtung der Perioden vor und nach dem Ausfalleintritt betrachtet werden.

Dabei wird der im vorangehenden Abschnitt beschriebene Versuch herangezogen, in dem innerhalb des in Abbildung 7.3 dargestellten Hauptnetzwerkes in der Mitte der Versuchsdauer von 7200 s ein Ausfall des Knotens 1.1 injiziert wird. Die Verkehrserzeugung erfolgt mit dem ISHT-Generator.

Abbildung 7.11 zeigt das Verkehrsverhalten auf der Restorations-Verbindungsleitung (2.1; 3.1) und die zugehörigen Segmentdarstellungen des Variabilitätsquotienten (zweite Zeile links) und der Quotienten der Variationskoeffizienten (zweite Zeile rechts). Dargestellt sind die Versuchsergebnisse für den (approximierten) Hurst-Parameter $H = 0.85$.

An wesentlichen Beobachtungen festzuhalten sind:

- *Vergleich verschiedener Verkehrsmodelle*

Wie im Vier-Knoten-Ring ist beim FGN-Modell eine absolute und eine relative Zunahme der Variabilität nach dem Ausfall zu verzeichnen. Der ARH-Generator und der ISHT-Generator liefern eine absolute Zunahme und eine relative Abnahme der Variabilität, was durch den bereits ange deuteten Multiplexing-Verlust zu erklären ist.

Bei der Variabilitäts-Reihenfolge herrscht Übereinstimmung mit dem Vier-Knoten-Ring.

Betrachtet man die relative Variabilität, dann sind die Abweichungen zwischen den verschiedenen Verkehrsmodellen weitaus geringer als im Vier-Knoten-Ring und liegen allesamt näher an der Gerade mit dem konstanten Wert 1.

- *Zunahme der absoluten und relativen Variabilität beim FGN-Modell bei zunehmender Skalierung*
Das FGN-Modell zeigt darüber hinaus eine Besonderheit: Mit steigender Skalierung ist hier absolut und relativ eine Zunahme der Variabilität festzustellen.

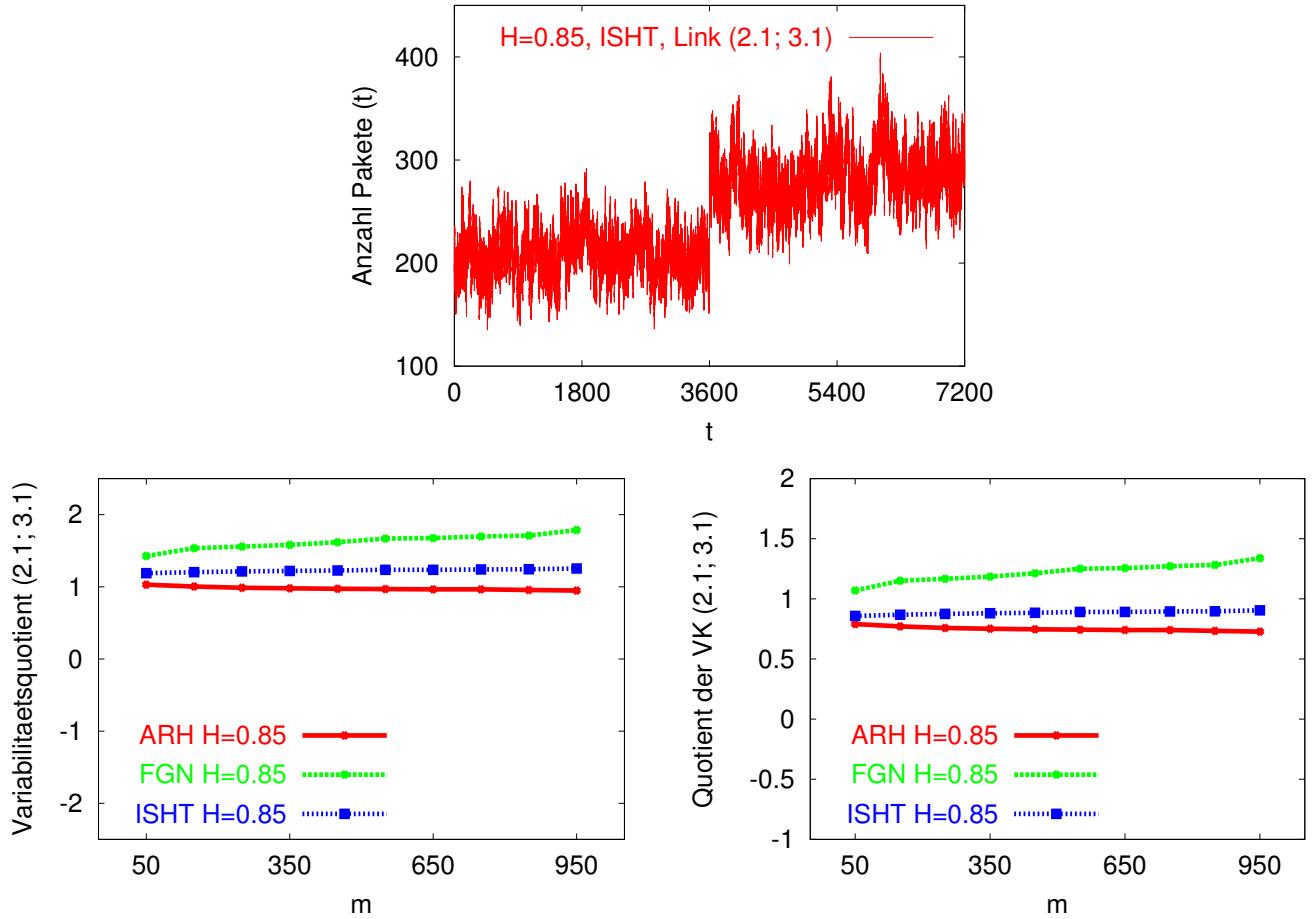


Abbildung 7.11: Veränderung der Variabilität durch Ausfall eines Knotens im Hauptnetzwerk (VK=Variationskoeffizient)

7.4.3 Verkehrsverhalten bei hochfrequenten Ausfallzyklen

Ein Fehler einer Komponente in einem technischen System wird als *intermittierend* bezeichnet, wenn dieser dazu führt, dass sich der Betriebszustand und der Defektzustand der Komponente in unregelmäßigen Zeitabständen abwechseln, d. h. wenn die Komponente von Zeit zu Zeit ausfällt und zwischen den Ausfällen für eine bestimmte Dauer funktioniert. Diese Art von Ausfällen soll nun betrachtet werden.

Wie im vorhergehenden Abschnitt wird das Vier-Knoten-Ringnetzwerk betrachtet, in dem Mehrfach-Zyklen (vgl. Abschnitt 5.6) von Ausfällen der Verbindungsleitung (1.1; 1.2) injiziert werden. Die Ausfall- und Restorationsdauern innerhalb eines Versuches sind dabei fest und identisch. Die Restorationsvorgänge und insbesondere die Lastumverteilung treten hier bei Ausfalleintritt genauso in Kraft wie bereits im vorausgehenden Abschnitt geschildert, allerdings wird nun ein häufiger Wechsel zwischen Intakt- und Defektzustand provoziert. Als Verkehrsgenerator wird das ISHT-Verfahren mit einem (approximierten) Hurst-Parameter von $H = 0.85$ verwendet.

Abbildung 7.12 zeigt den Verkehr auf der beeinträchtigten Verbindungsleitung (1.1; 1.2), Abbildung 7.13 den Verkehr auf dem Restorationspfad (1.1; 1.3). Die Dauern der Intakt- bzw. Defektzyklen betragen dabei jeweils 20 s, 50 s, 100 s und 200 s. Wie man deutlich erkennt, tritt zusätzlich zu der inhärenten Schwankung der Verkehrsströme eine starke ausfallbedingte Schwankung auf.

Ähnliche zyklische Schwankungen der Verkehrsbelastung wie die hier dargestellten können durch die Transport-Protokolle verursacht werden, wenn ein abruptes „Abreißen“ der Sende-Bandbreite als Gegenmaßnahme zur Staubekämpfung eingesetzt wird (siehe hierzu z. B. [Joo01]). Abbildung 7.14 zeigt

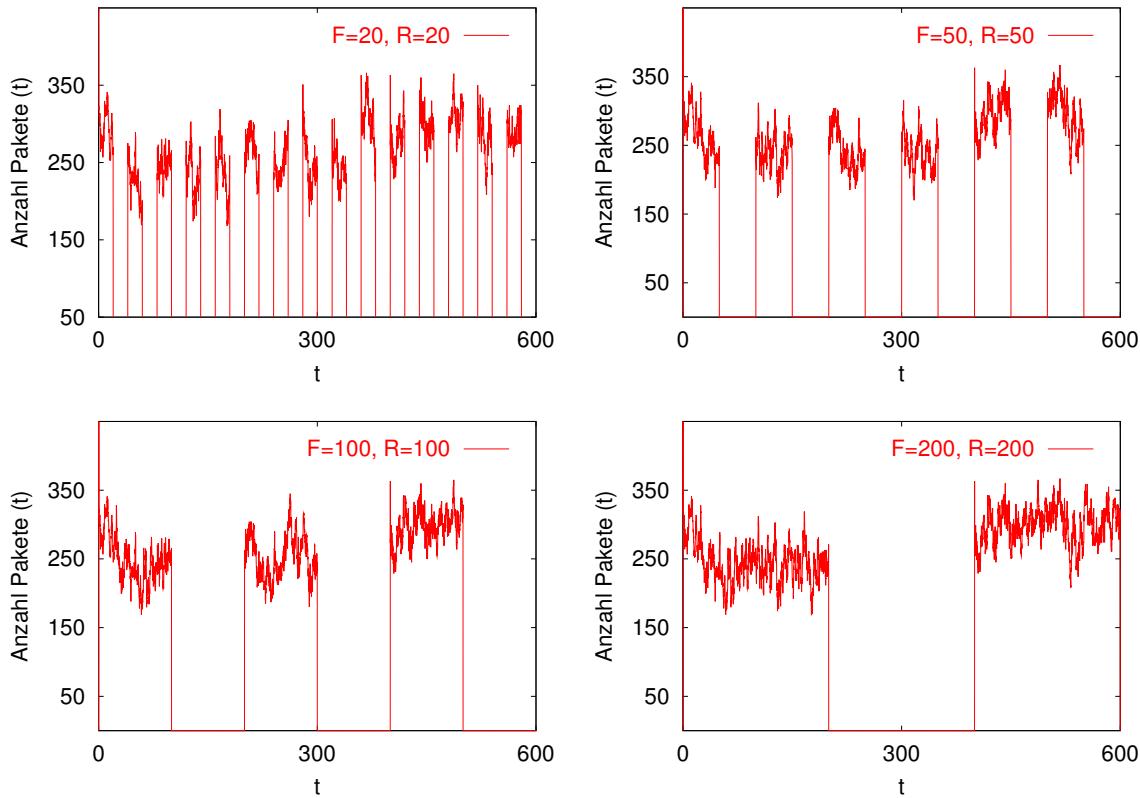


Abbildung 7.12: Ausfallpfad bei hochfrequenten Ausfallzyklen

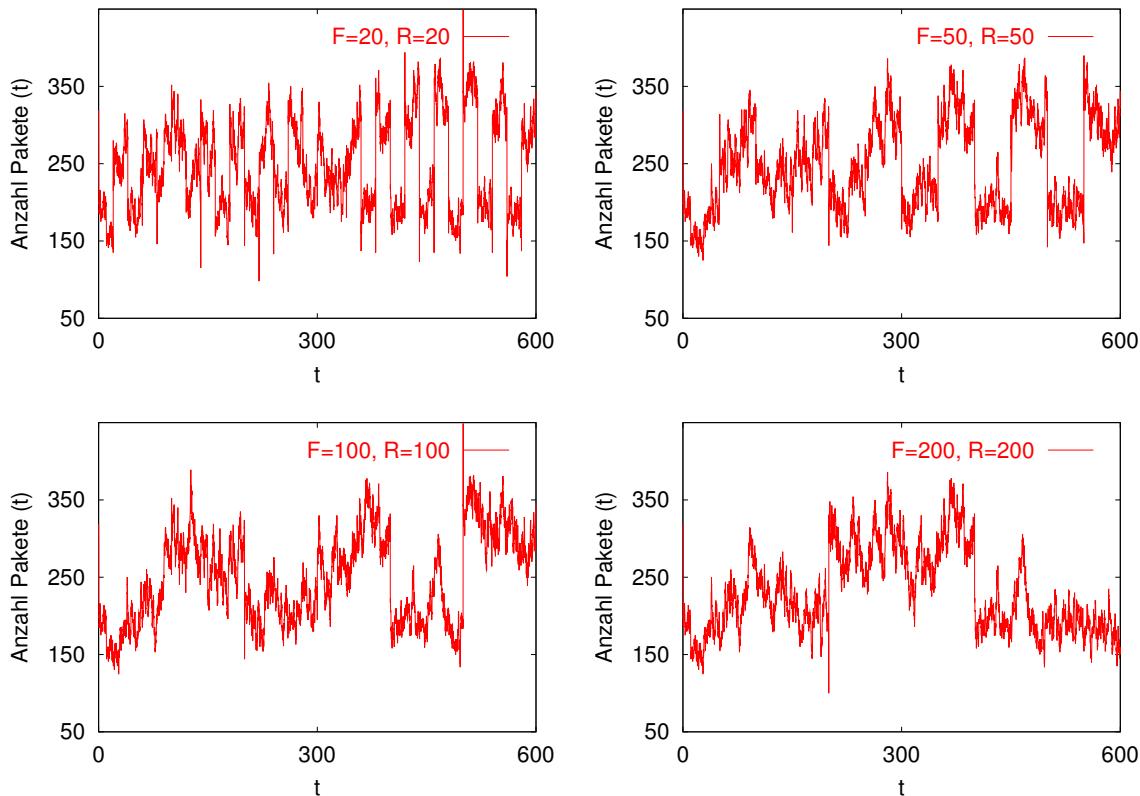


Abbildung 7.13: Restorationspfad bei hochfrequenten Ausfallzyklen

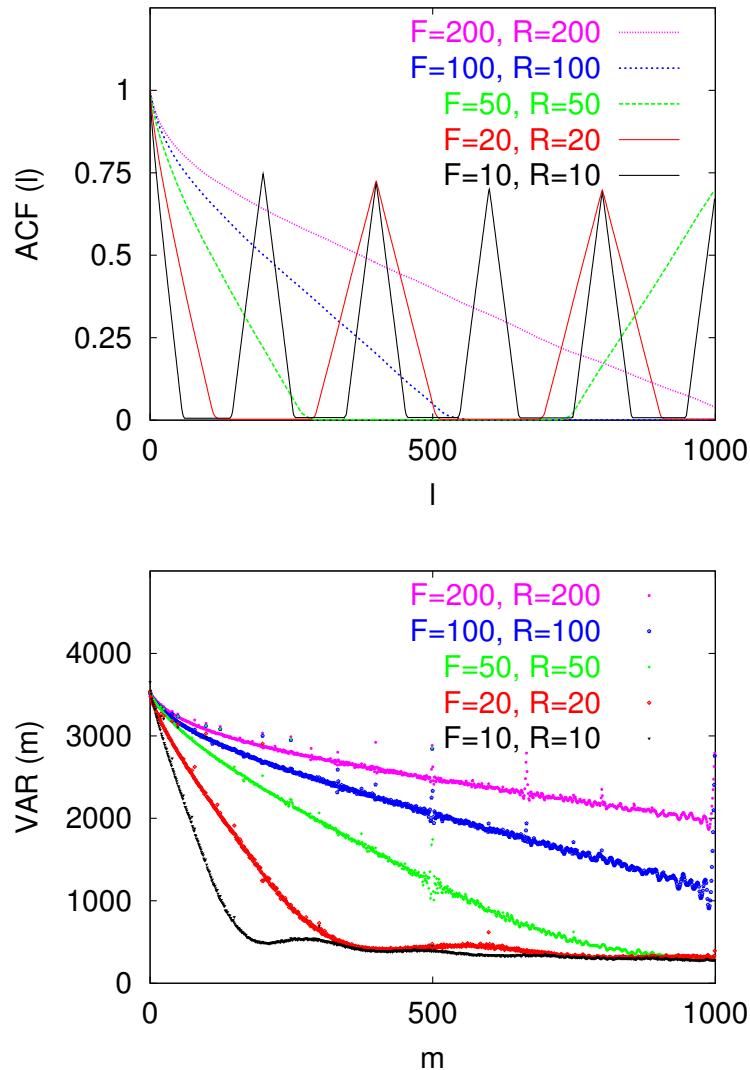


Abbildung 7.14: Autokorrelation und skalierte Varianzen bei hochfrequenten Ausfallzyklen

die Autokorrelationskurven und die skalierten Varianzen der Restorations-Verbindungsleitung (1.1; 1.3) für die vier geschilderten Szenarien und für einen weiteren Versuch, in dem für den Intaktzustand und den Defektzustand jeweils eine Dauer von 10 s gewählt wurde.

Das Verhalten der zweiten Momente lässt sich wie folgt beschreiben:

- **Autokorrelationen**

Die Autokorrelationen streben mit zunehmendem Lag zunächst gegen die Nulllinie und erreichen diese bei der Hälfte der Länge einer einzelnen zugehörigen Intakt- bzw. Defektdauer. So geht z. B. die Kurve für das Experiment $F = 100, R = 100$ bei $l = 500$ in die Nulllinie über. Die graphische Darstellung lässt ein nahezu *lineares* Abklingen vermuten. Diese Vermutung wurde jedoch nicht genauer untersucht.

Im weiteren Verlauf zeigen die Autokorrelationen ein zyklisches Schwankungsverhalten. Ein Zyklus besteht dabei aus dem linearen Anstieg zu einem Spitzenwert, dem linearen Abstieg von diesem Spitzenwert, die zusammen einen „Peak“ ergeben, und einem Verharren entlang der Nulllinie („Break“). Peaks und Breaks besitzen jeweils die Länge der zugehörigen Intakt- bzw. Defektdauer, z. B. erkennt man im Bereich [300; 500] für das Experiment $F = 20, R = 20$ einen Peak, und im Zeitraum [500; 700] für dasselbe Experiment ein Break.

Aus dem Abfallen der Autokorrelation in der Nähe des Lags 0 lässt sich eine Idee zur Reduktion der Langzeitabhängigkeit ableiten, die darauf beruht, die in der Abbildung dargestellte Situation hochfrequenten Wechsels der Sendepfade gezielt herbeizuführen. Die Idee wird in Abschnitt 7.8 ausführlich beschrieben.

- **skalierte Varianzen**

Die skalierten Varianzen zeigen ebenfalls ein nahezu lineares Abklingverhalten. Hier findet eine Annäherung an einen unteren Schwellenwert statt. Eine präzise Aussage über einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Dauer des Intakt-/Defektzyklus und einem Skalierungsfaktor auf der Abszisse, der den Winkelpunkt des „Knicks“ der skalierten Varianzen beschreibt, ist im Gegensatz zu den Autokorrelationen auf Grund der graphischen Darstellung jedoch nicht möglich.

Die Variabilität klingt mit zunehmender Frequenz der Intakt-/Defektzyklen erkennbar schneller ab. Der bereits erwähnte untere Schwellenwert wird im Versuch $F = 10, R = 10$ bereits nahe des Skalierungsfaktors $k = 20$ erreicht; im Versuch $F = 20, R = 20$ hingegen ist dies erst nahe $k = 40$ der Fall, bei noch niedrigerer Ausfallfrequenz verschiebt sich der Knickpunkt der Kurve der skalierten Varianzen offenbar nichtlinear nach oben.

7.5 Variabilitätsanalyse bei hoher Last

In diesem Abschnitt wird das Variabilitätsverhalten bei Annäherung der Last auf Verbindungsleitungen an deren maximale Kapazität untersucht. Dabei wird das Netzwerk der in Abbildung 7.15 dargestellten

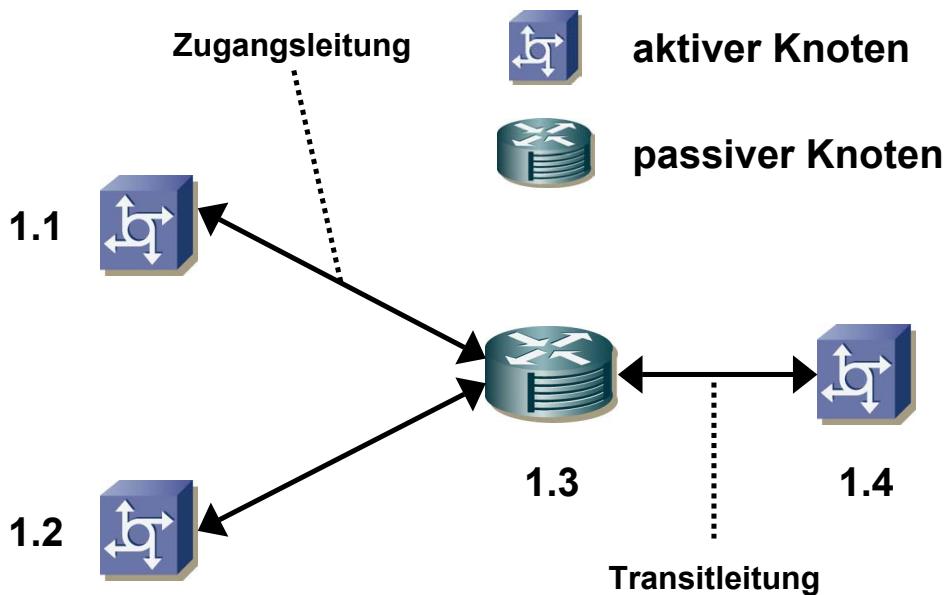


Abbildung 7.15: Topologie zur Analyse hoher Last

Topologie analysiert. Die Verkehrsgenerierung erfolgt nach der Standard-Parameterkonfiguration mit dem ISHT-Generator.

Die Annäherung der anliegenden Last an die Kapazität der Verbindungsleitungen wird nicht durch eine Erhöhung der Last, sondern durch eine Erniedrigung der Kapazität erreicht. Die *Zugangs-Verbindungsleitungen* (1.1; 1.3) und (1.2; 1.3) werden hierbei als „Flaschenhals“ eingesetzt, d. h. hier wird eine Verknappung der Bandbreite von 5000 $kbps$ auf 3000 $kbps$ durchgeführt, wobei der kleinere

| Szenario | Bandbreite (1.1; 1.3) | Bandbreite (1.2; 1.3) |
|---------------|-----------------------|-----------------------|
| Hohe Kap. | 5000 kbps | 5000 kbps |
| Mittlere Kap. | 5000 kbps | 3000 kbps |
| Niedrige Kap. | 3000 kbps | 3000 kbps |

Tabelle 7.4: Szenarien zur Analyse hoher Last

Wert gerade der von den aktiven Knoten 1.1 und 1.2 in der Standard-Parameterkonfiguration festgelegten generierten Gesamt-Datenrate entspricht. Die *Transit-Verbindungsleitung* (1.3; 1.4) ist ausreichend dimensioniert. Abbildung 7.16 zeigt das Verkehrsverhalten und die zweiten Momente für die Zugangsleitungen. Die erste Zeile zeigt die Zugangs-Verbindungsleitungen bei niedriger (3000 kbps, links) und hoher Kapazität (5000 kbps, rechts). Die zweite Zeile stellt die dazugehörigen Autokorrelationen und skalierten Varianzen dar. Deutlich erkennbar ist dabei die Deckelung der Kapazität (obere linke Grafik). Die Autokorrelationskurven weisen keine signifikanten Unterschiede auf, bei der Variabilität hingegen führt die Deckelung zu einer deutlichen Abnahme im Vergleich mit der großzügig dimensionierten Zugangsleitung.

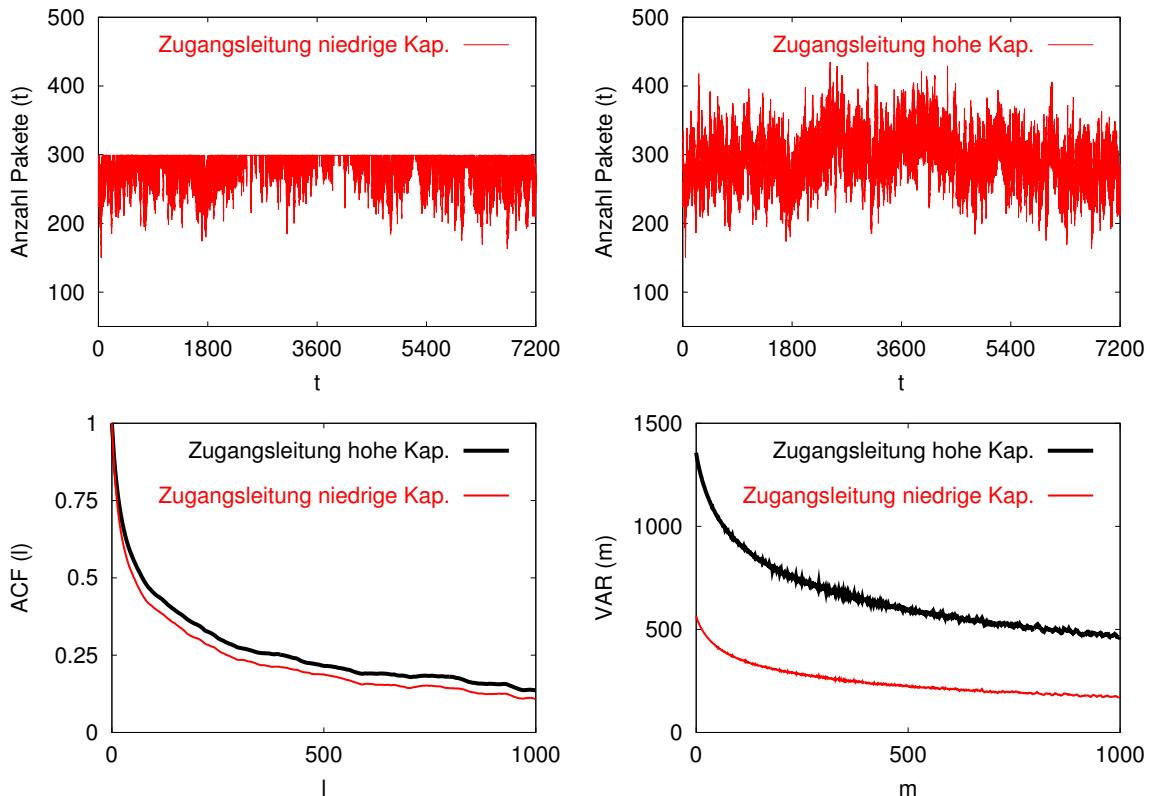


Abbildung 7.16: Zugangsleitungen bei hoher Last

Es werden drei Szenarien betrachtet, die in Tabelle 7.4 dargestellt sind. Abbildung 7.17 stellt das Verkehrsverhalten und die zweiten Momente für die Transitleitung in den drei genannten Szenarien grafisch dar. Die Autokorrelationskurven der drei Verkehrsströme auf der Transitleitung zeigen erstaunlicherweise eine starke Annäherung, d. h. die Deckelung führt hier zu keiner signifikanten Veränderung des Kurvenverlaufs und somit auch zu keiner Verringerung der Langzeitabhängigkeit.

Je stärker der Einfluss kapazitätsbeschränkter Zugangsleitungen ist, desto geringer fällt die Variabilität auf der Transitleitung aus. Im Versuch mit niedriger Kapazität lässt sich bereits an Hand der

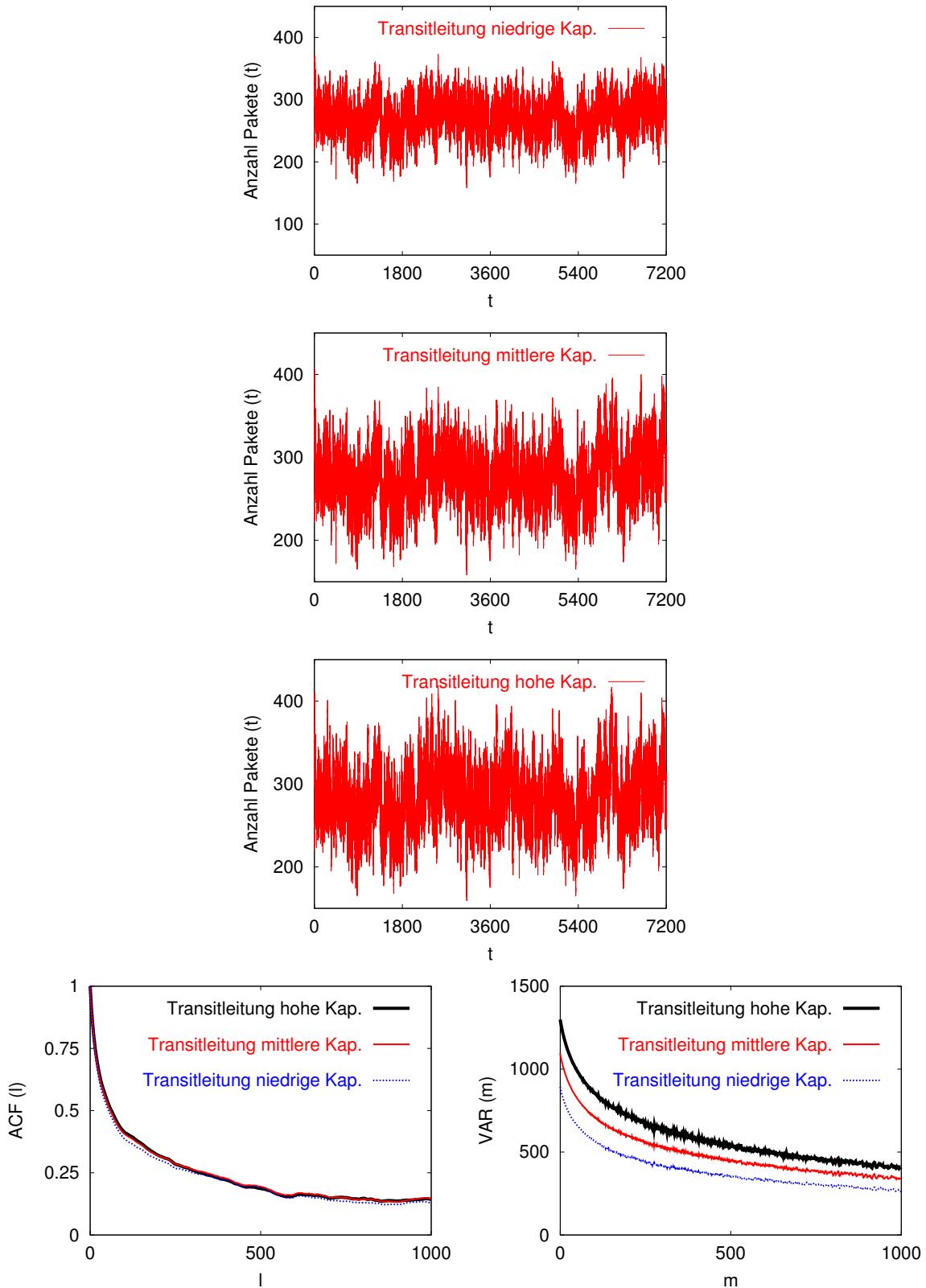


Abbildung 7.17: Transitleitung bei hoher Last

Verbindungsleitungs-Grafik eine deutliche Mäßigung der Streuung im Vergleich zum Versuch mit hoher Kapazität erkennen. Die skalierten Varianzen liefern eine Bestätigung dieser Beobachtung.

7.6 Variation der Verteilung der Dauern der ON-Perioden

Die Verteilung der Dauern der Sendeperioden von Verbindungen ist die Hauptursache für die Langzeitabhängigkeit. Wie sich eine Änderung dieser Dauern auf die Variabilität bei gleichbleibender Last auswirkt, wird nun untersucht. Ziel der Analyse ist es, den Vorgang der Herabsenkung der Verbindungs-Datenrate zu bewerten. Diese Absenkung tritt z. B. durch die Transportprotokolle bei Eintritt einer Stausituation ein. Der hier durchgeführte Vergleich stellt dabei insofern eine starke Vereinfachung der Realität dar, als verschiedene stationäre Verhaltensmuster gegenübergestellt werden. In der Praxis verläuft die Bewältigung von Stausituationen hingegen als dynamischer Prozess, bei dem eine permanente Anpassung der Verbindungs-Datenrate durch die Transportschicht statt findet. Untersuchungen mit dem Transportprotokoll TCP geben Anhaltspunkte dafür, dass dieser Anpassungsprozess zyklisches Verhalten aufweist [Ver00, Joo01], welches hier nicht im Detail nachgebildet wird.

Die durchgeführten Versuche unterscheiden sich durch die Dauer und die Datenrate der ON-Perioden. Dabei ist die pro ON-Periode übertragene Datenmenge, das Produkt aus Dauer und Verbindungs-Datenrate, in allen Versuchen gleich. Damit wird die vom Netzwerk übertragene Last und insbesondere auch die mittlere Belastung der Verbindungsleitungen konstant gehalten. Die Dauer der ON-Perioden wird im *Ausgangs-Szenario* zunächst durch eine gestutzte Pareto-Verteilung repräsentiert. Im *Zweifach-Szenario* und im *Vierfach-Szenario* werden die Dauern verdoppelt (vervierfacht) und die Datenraten halbiert (geviertelt).

Es wird das Vier-Knoten-Ring-Netzwerk aus Abbildung 7.1 verwendet. Die Veränderung der zweiten

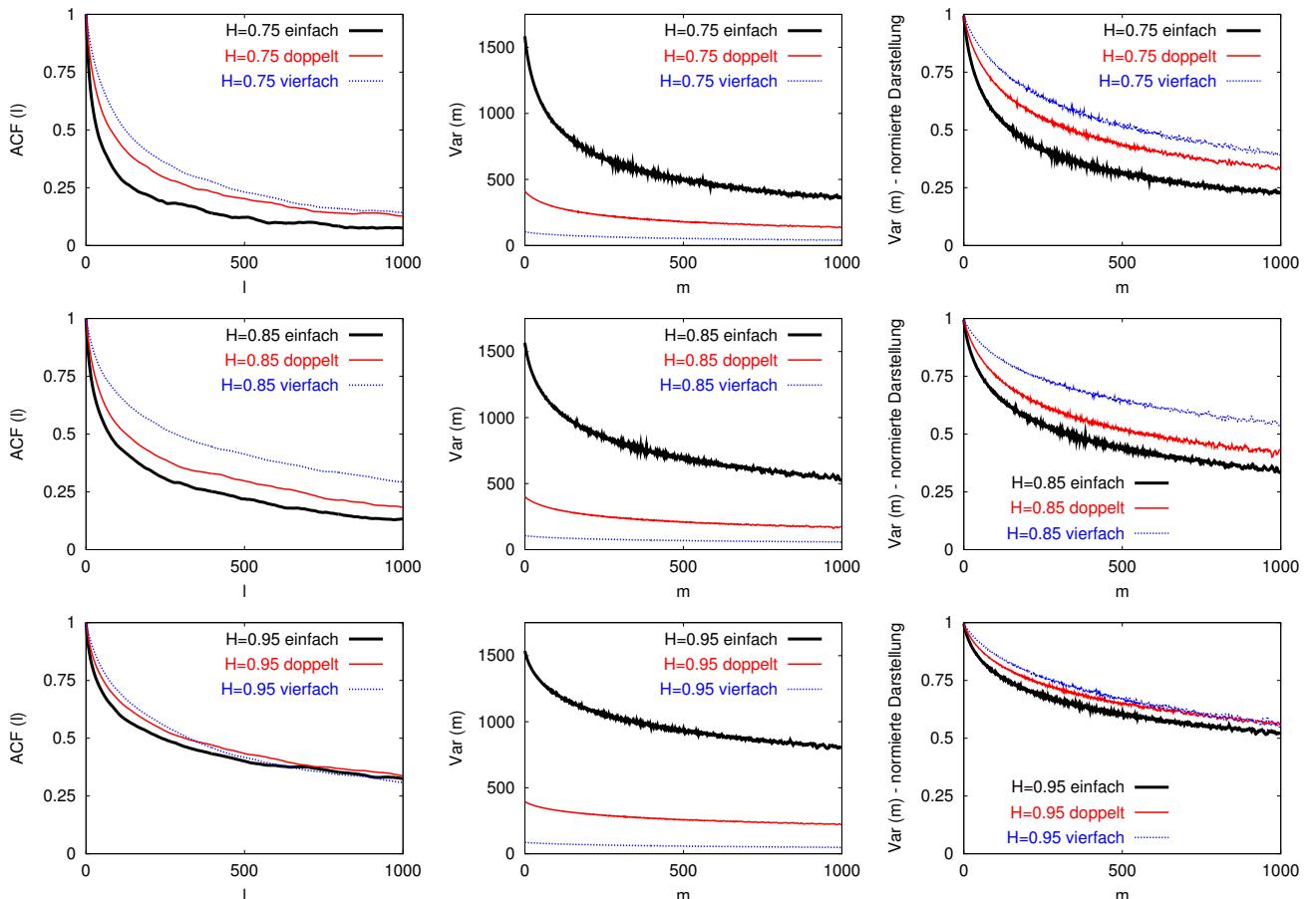


Abbildung 7.18: Variation der Dauern der ON-Perioden (ARH-Modell)

Momente als Folge der Verlängerung der ON-Perioden ist in den Abbildungen 7.18 (ARH-Modell) und

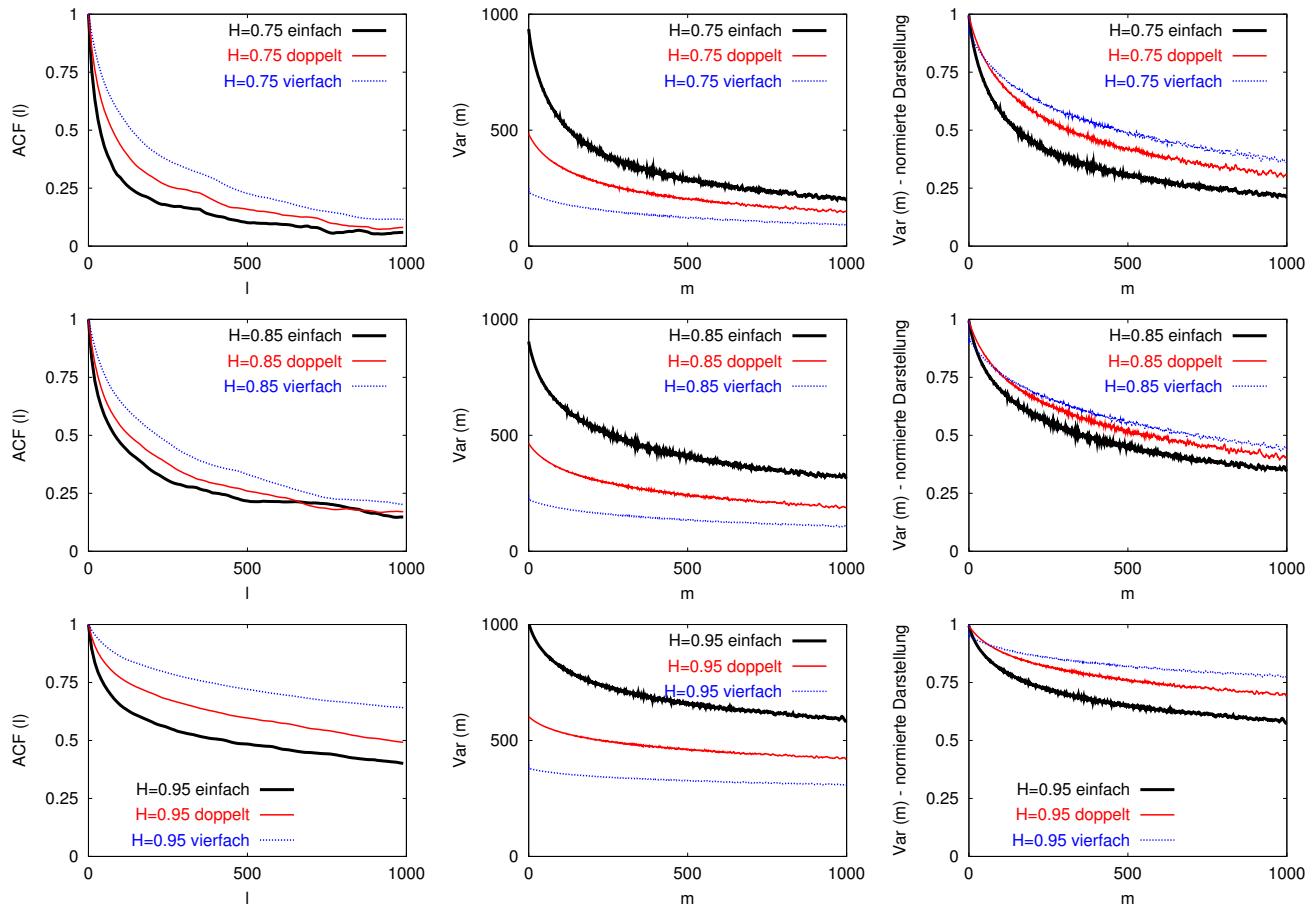


Abbildung 7.19: Variation der Dauern der ON-Perioden (ISHT-Modell)

7.19 (ISHT-Modell) für die Verbindungsleitung (1.1; 1.3) dargestellt. Die jeweils linke und mittlere Spalte bilden die skalierten Varianzen in nicht-normierter und in normierter Darstellung ab, die rechte Spalte zeigt die zugehörigen Autokorrelationsfunktionen.

Festzuhalten sind folgende wichtige Beobachtungen:

- **Quantitatives Variabilitätsverhalten**

Die rechte Spalte zeigt eine deutliche Abnahme der Variabilität bei zunehmender Verbindungsduer. Beide Verkehrsmodelle weisen diesbezüglich einen eindeutig monotonen Verlauf der Variabilität über den gesamten hier betrachteten Skalierungsbereich auf.

- **Qualitatives Variabilitätsverhalten**

Die mittlere und die rechte Spalte geben Aufschluss über das qualitative Variabilitätsverhalten. Hier zeigt sich eine Umkehrung der Reihenfolge der quantitativen Betrachtung, die sich sowohl bei den skalierten Varianzen als auch bei den Autokorrelationen bemerkbar macht.

Für praktische Abschätzungen von Bedeutung ist die Frage, ob sich der Unterschied zwischen qualitativem und quantitativem Abklingverhalten derart niederschlägt, dass die skalierten Varianzen zweier Verkehrsströme mit unterschiedlichen Verteilungen für die Dauern der ON-Perioden und gleichem Datenrate-Dauer-Produkt einen Schnittpunkt aufweisen, der innerhalb des kritischen Zeitbereichs (vgl. Abschnitt 6.3.3) liegt. Dies würde bedeuten, dass eine Lastherabsenkung der beschriebenen Art nicht notwendigerweise zu einer Verringerung des Puffer-Überlaufes führt, je nachdem, an welcher Stelle sich der Schnittpunkt befindet. Die nichttriviale Beantwortung dieser Frage kann als Ansatzpunkt für weitergehende Forschungsarbeiten aufgefasst werden.

7.7 Verkehrsverhalten bei unterschiedlichen Bedienstrategien

Um den Einfluss der Bedienstrategien auf die Zielgröße Variabilität zu untersuchen, werden die beiden in Abschnitt 5.3.4 erläuterten Verfahren gegenübergestellt.

Es handelt sich dabei zum einen um einen einfachen FIFO-Algorithmus, der Pakete unabhängig von der Dienstgütekasse in der Reihenfolge ihrer Ankunft nacheinander in eine einzelne Ausgangs-Warteschlange einreicht (Strategie NONQOS). Zum anderen wird ein Dienstgüte-unterstützender Algorithmus benutzt, der pro Knoten für die beiden Dienstgüteklassen BEST EFFORT und REALTIME zwei unterschiedliche Ausgangs-Warteschlangen bereit hält und für die REALTIME-Klasse feste Bandbreiten-Anteile reserviert. Vor Aufbau einer REALTIME-Verbindung wird jeweils geprüft, ob ein Pfad zwischen Sender und Empfänger mit ausreichender Bandbreite existiert. Falls dies nicht der Fall ist, wird der Verbindungsauflauf abgebrochen (Strategie QOS). Falls der reservierte REALTIME-Anteil der Bandbreite nicht ausgeschöpft wird, können BEST EFFORT-Datenpakete diesen nutzen (Strategie NONQOS, zu Einzelheiten siehe Abschnitt 5.3.4).

Es wird das in Abbildung 7.1 dargestellte Vier-Knoten-Ringnetzwerk analysiert. Die Parameterwerte entsprechen mit Ausnahme der generierten Verkehrsmenge der Standardkonfiguration. Diese wird so aufgeteilt, dass jeweils die Hälfte des generierten Verkehrs auf die Dienstgüteklassen BEST EFFORT und REALTIME entfällt. Dabei werden die Varianzen der Verkehrsströme unterschiedlicher Dienstgüteklassen im Vergleich zur Standardkonfiguration halbiert. Durch die Unabhängigkeit der BEST EFFORT- und REALTIME-Verkehrsströme entspricht die Varianz des aus beiden Klassen zusammengesetzten Verkehrsstromes dem Ausgangswert der Standardkonfiguration.

Um die Auswirkungen der Unterschiede zwischen den beiden Bedienstrategien auf die zweiten Momente aggregierter Verkehrsströme zu analysieren, werden die *relativen Abweichungen*

$$\frac{\hat{\rho}_Q(l) - \hat{\rho}_{NQ}(l)}{[\hat{\rho}_Q(l) + \hat{\rho}_{NQ}(l)]/2} \quad (7.2)$$

(Autokorrelationen) und

$$\frac{\hat{\sigma}_Q^2(k) - \hat{\sigma}_{NQ}^2(k)}{[\hat{\sigma}_Q^2(k) + \hat{\sigma}_{NQ}^2(k)]/2} \quad (7.3)$$

(skalierte Varianzen) zwischen den beiden Bedienstrategien QOS und NONQOS für den Zeitparameterbereich $k, l \in [0; 100]$ berechnet. Diese sind in Abbildung 7.20 für die Gesamtheit der Verbindungsleitungen des Vier-Knoten-Netzwerkes dargestellt.

Werte, die größer als 0 sind, deuten an, dass die Strategie QOS auf der untersuchten Verbindungsleitung zu einer größeren Autokorrelation bzw. skalierten Varianz führt als die Strategie NONQOS. Bei Werten kleiner als 0 ist der umgekehrte Fall zu beobachten.

Sowohl die Autokorrelationen als auch die skalierten Varianzen zeigen keine signifikante einseitige Abweichung, d. h. die Hypothese, dass durch eine Änderung der Bedienstrategie der vorgenommenen Art eine Veränderung der Variabilität ausgelöst wird, kann durch die Simulationsergebnisse nicht gefestigt werden.

Bei den Autokorrelationen liegen die relativen Abweichungen im Bereich des Zeitfensters $[0; 50]$ unterhalb von 20%, bei den skalierten Varianzen ist dies im gesamten untersuchten Skalierungsbereich der Fall.

Für die vergleichsweise hohen Ausschläge der Autokorrelations-Differenzen im Vergleich zu den Variabilitäts-Differenzen bei zunehmender Zeitdauer zeichnet die bereits in Abschnitt 6.3.3 diskutierte Division nahe Null verantwortlich.

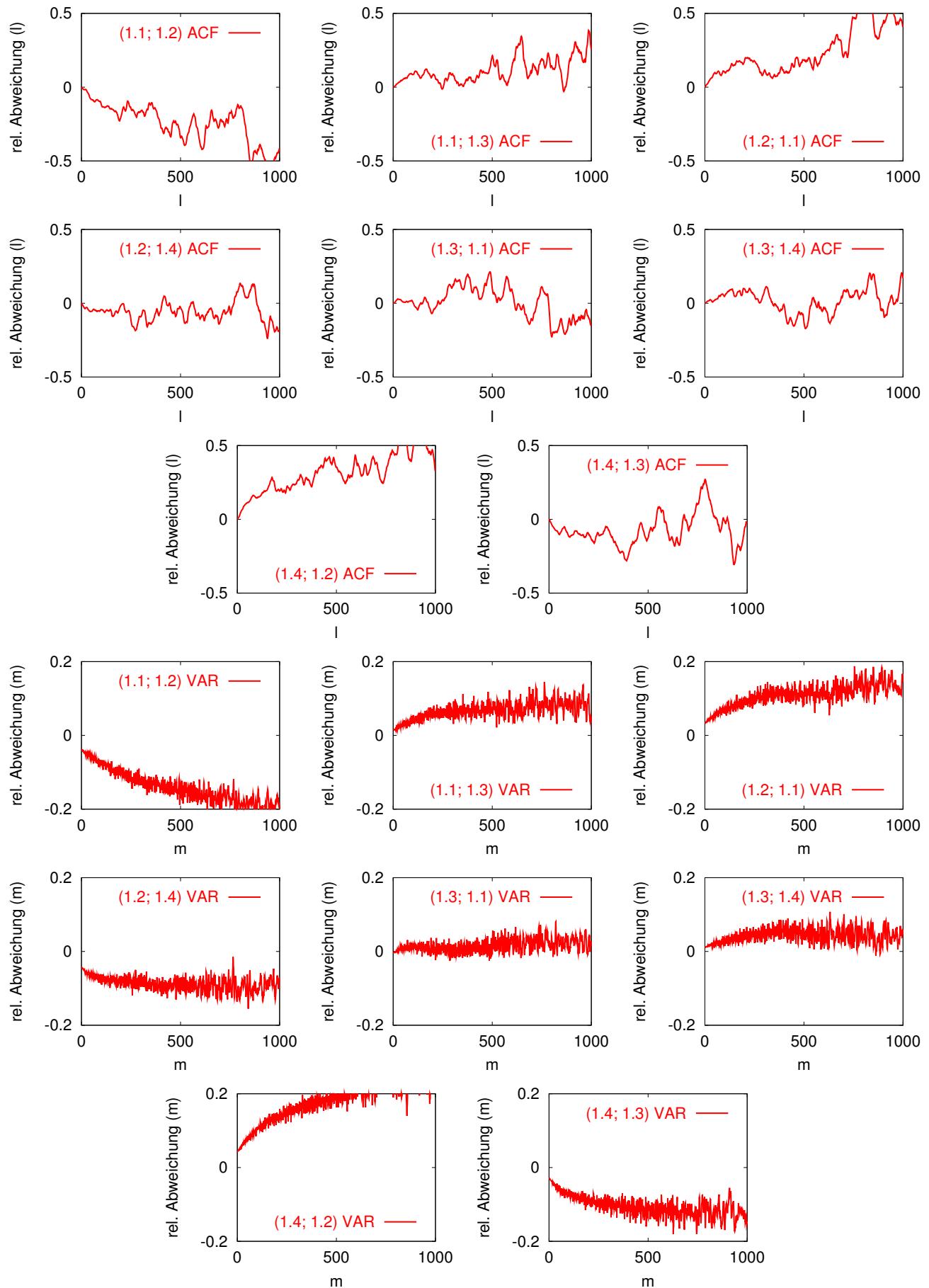


Abbildung 7.20: Abweichungen der zweiten Momente bei unterschiedlichen Bedienstrategien

7.8 Reduktion der Langzeitabhängigkeit

In Abschnitt 7.4.3 wurde das Verkehrsverhalten bei hochfrequenten Ausfallzyklen untersucht. Die dabei beobachteten Oszillationen auf den Verbindungsleitungen sind durch häufiges Wechseln einer Netzwerk-Komponente zwischen Intakt- und Defektzustand und der unmittelbaren Reaktion des Routing-Verfahrens zu erklären. In der Praxis sind Routing-Protokolle auf die Vermeidung solcher Oszillationen ausgerichtet [Kad95].

Aus dem Verhalten der Autokorrelationsfunktion bei hochfrequenten Ausfallzyklen lässt sich eine Idee zur Reduktion der Langzeitabhängigkeit ableiten. Der steile Abfall der Autokorrelation der Umgebung des Lags 0 entspricht dort gerade dem aus Ingenieursperspektive gewünschten Verhalten und ist verursacht durch ausfallbedingtes häufiges Wechseln des Übertragungskanals *innerhalb einer Verbindung*.

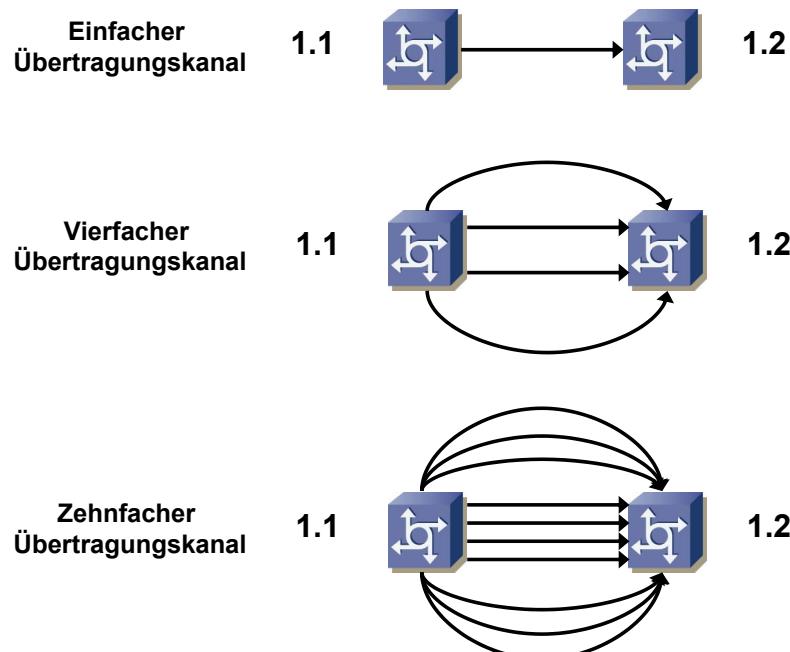


Abbildung 7.21: Disjunkte Übertragungskanäle

Falls mehrere disjunkte Übertragungswege zwischen Sender und Empfänger existieren, dann kann durch bewusst (d. h. nicht durch Ausfall) herbeigeführte alternierende Nutzung verschiedener Wege innerhalb einer Verbindung eine Verstärkung des Abklingens der zweiten Momente erreicht werden.

Eine Verbindung wird dabei in mehrere *Abschnitte* unterteilt. Dabei sind zwei Unterteilungs-Strategien denkbar:

- *Unterteilung in äquidistante Zeitabschnitte*

Diese Strategie führt zu dem in Abschnitt 7.4.3 für zwei disjunkte Wege skizzierten Abklingverhalten der zweiten Momente. Dabei wird zwar in der Umgebung des Lags 0 ein beschleunigtes Abklingverhalten der Autokorrelation erreicht. Durch den *periodischen* Wechsel wird jedoch ein einzelner Übertragungskanal innerhalb einer Verbindung mehrfach genutzt. Dies führt bei den

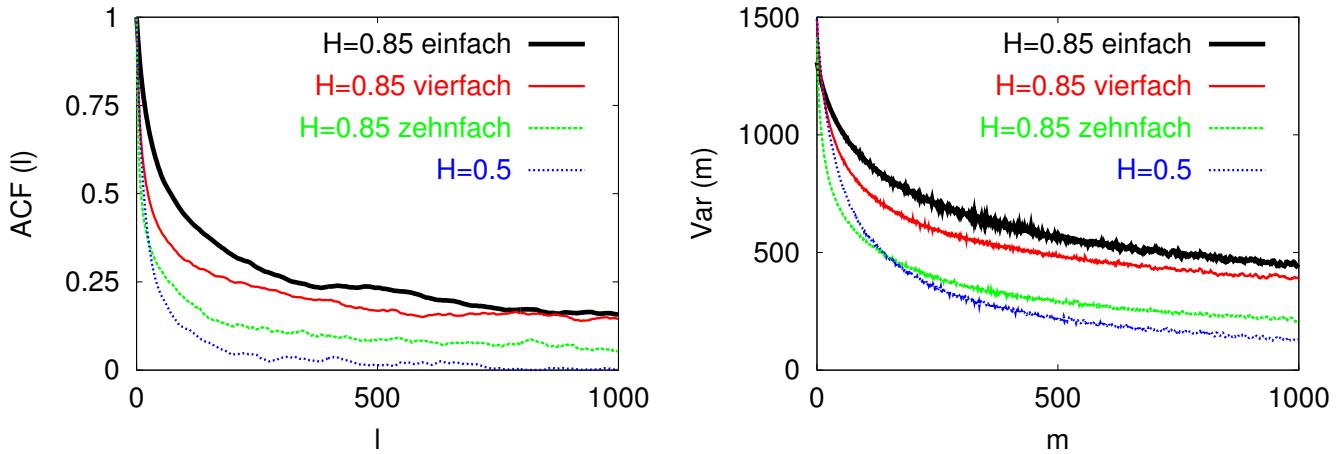


Abbildung 7.22: Reduktion der Langzeitabhängigkeit durch disjunktes Mehrpfad-Routing

Autokorrelationen zu dem in Abbildung 7.14 dargestellten „Zick-Zack-Verhalten“, welches zu periodischen Lücken, aber nicht zu beschleunigtem Abklingen führt.

- *Unterteilung in Bruchteile der Übertragungsdauer*

Wechselt man den Übertragungskanal hingegen nicht in äquidistanten Zeitabschnitten, sondern zu einem Bruchteil der Gesamt-Verbindungsduer einer Verbindung, so dass ein einzelner Übertragungskanal innerhalb einer Verbindung nur einmal genutzt wird, so kann eine Veränderung der Verteilungseigenschaften der Dauern der ON-Perioden herbeigeführt werden.

Abbildung 7.22 stellt die Beschleunigung des Abklingens der zweiten Momente für diese Strategie graphisch dar. Dabei werden innerhalb des Zwei-Knoten-Elementarnetzwerkes in Abbildung 7.21 Pakete auf mehreren (einem, vier oder zehn) disjunkten Wegen vom Sender an den Empfänger gesendet. Die Verkehrsgenerierung erfolgt nach der Standard-Parameterkonfiguration mit dem ISHT-Generator. Die vom Sender generierte Datenrate wurde dabei zum Zwecke der Vergleichbarkeit so angepasst, dass in allen drei Szenarien die mittleren Datenraten auf einer einzelnen Verbindungsleitung gleich groß sind. Die Abnahme der Variabilität und die Beschleunigung des Abklingens der Autokorrelationskurve mit steigender Anzahl disjunkter Übertragungswege sind deutlich zu erkennen. Zum Vergleich sind die zweiten Momente für einen einzelnen Übertragungskanal mit ISHT-Verkehr und (approximiertem) Hurst-Parameter 0.5 angegeben.

Nachteil des Verfahrens ist, dass die Gesamt-Verbindungsduer vor der Unterteilung in die Übertragungsabschnitte bekannt sein muss. Für Sprach-Übertragungen ist ein solches Verfahren daher nicht einsetzbar.¹¹ Bei Datenübertragungen, bei denen die Größe der Datenmenge und die Übertragungsduer vor Beginn der Übertragung bekannt sind oder abgeschätzt werden können, ist ein Einsatz möglich.

Der zusätzliche Verwaltungsaufwand für das Separieren und das Zusammenführen der einzelnen Abschnitte lohnt sich im Allgemeinen nur unter speziellen Randbedingungen. Denkbar ist eine solche Technik z. B. bei Übertragungskanälen mit hoher Fehlerrate, wenn ein Mehrpfad-Routing-Verfahren und ein Pfadwechsel innerhalb einer Verbindung aus Fehlertoleranz-Erwägungen in Betracht zu ziehen ist.

¹¹Da die Dauern von Sprachverbindungen nach gesicherten Erkenntnissen zu kurzzeitabhängigem Verkehr führen, wäre der Einsatz einer solchen Technik hier ohnehin nicht anzustreben. Wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, zeichnen im Wesentlichen Datei-Übertragungen mit langer Übertragungsduer für die Langzeitabhängigkeit von Verkehrsströmen in paketvermittelnden Netzwerken verantwortlich.

7.9 Weiterführende Untersuchungen

7.9.1 Routing-Verfahren

Die Fähigkeit eines Netzwerkes, in der Situation des Ausfalls von Netzkomponenten eine bestimmte Transport-Dienstleistung erbringen zu können, hängt in entscheidendem Maß von den eingesetzten Routing-Verfahren ab. Routing-Verfahren machen die topologische Redundanz nutzbar. Bei Eintreten eines Ausfallereignisses muss der Verkehr, der im ausfallfreien Zustand über beeinträchtigte Pfade fließt, über Restorationspfade umgeleitet werden.

Von besonderem Interesse in Erweiterung der vorliegenden Versuche, bei denen stets ein einzelner Restorationspfad als Ersatz für beeinträchtigte Pfade diente, sind *Mehrpfad-Routing-Verfahren*, welche Verkehr von einem Sender zu einem Empfänger über eine Vielzahl von (disjunkten oder nicht-disjunkten) Pfaden leiten. Dabei sind folgende Themenpunkte von Interesse:

- **Variabilität**

Abbildung 7.23 veranschaulicht den Einfluss des Routing-Verfahrens auf die Variabilität auf den Netzwerk-Verbindungsleitungen im Restorationszustand:

Im Normalzustand wird der Verkehr von Knoten 1.1 auf drei disjunkten Verbindungsleitungen a, b und c zu Knoten 1.2 geleitet, wobei jeweils gleiche Anteile mit einer mittleren Datenrate von 100 MBit/s und einer Streuung von (10 MBit/s)² auf jede der drei Verbindungsleitungen entfallen.

Bei Ausfall der Verbindungsleitung c hat das in Szenario A dargestellte Mehrpfad-Routing-Verfahren, welches die Last auf c im Restorationszustand auf a und b verteilt, Variabilitätsvorteile gegenüber dem Einpfad-Routing-Verfahren in Szenario B, welches auf der Verbindungsleitung a eine deutlich höhere Variabilität erzeugt.¹²

Da im vorliegenden Beispiel keine Pufferung und kein Multiplexing erfolgt, lassen sich die Variabilitäten der einzelnen Teilströme addieren. Bei komplexeren Topologien führt der Ausfall von Netzkomponenten in der Regel dazu, dass mehrere Pfade gleichzeitig beeinträchtigt werden und eine komplexe Lastumverteilung innerhalb des Netzwerkes statt findet, so dass im Einzelfall simulativ abgewogen werden muss, ob ein Mehrpfad-Verfahren Variabilitäts-Vorteile gegenüber einem Einpfad-Verfahren bringt. Dies gilt insbesondere dann, wenn Beschränkungen bezüglich der Paketlaufzeit gefordert sind (siehe folgender Punkt).

- **Paketlaufzeit**

Beim Einsatz von Mehrpfad-Routing-Verfahren bestimmt der langsamste Pfad zwischen Sender und Empfänger die im Rahmen einer Dienstleistungsvereinbarung zusicherbare Paket-Laufzeit („Liebig-Fass-Effekt“). Dies ist ein Nachteil gegenüber Einpfad-Routing-Verfahren.

7.9.2 Paketlaufzeit

Die Paketlaufzeit zwischen beliebigen Netz-Knotenpunkten setzt sich zusammen aus

- *Latenz der Verbindungsleitungen (deterministische Größe)*
- *Verzögerung der VNKs (stochastische Größe).*

¹² Die Unabhängigkeit der Verkehrsströme auf a, b und c sowie eine unabhängige Aufteilung des Verkehrsstromes auf c im Restorationszustand wird hier vorausgesetzt, damit sich die Streuungsparameter wie dargestellt verhalten.

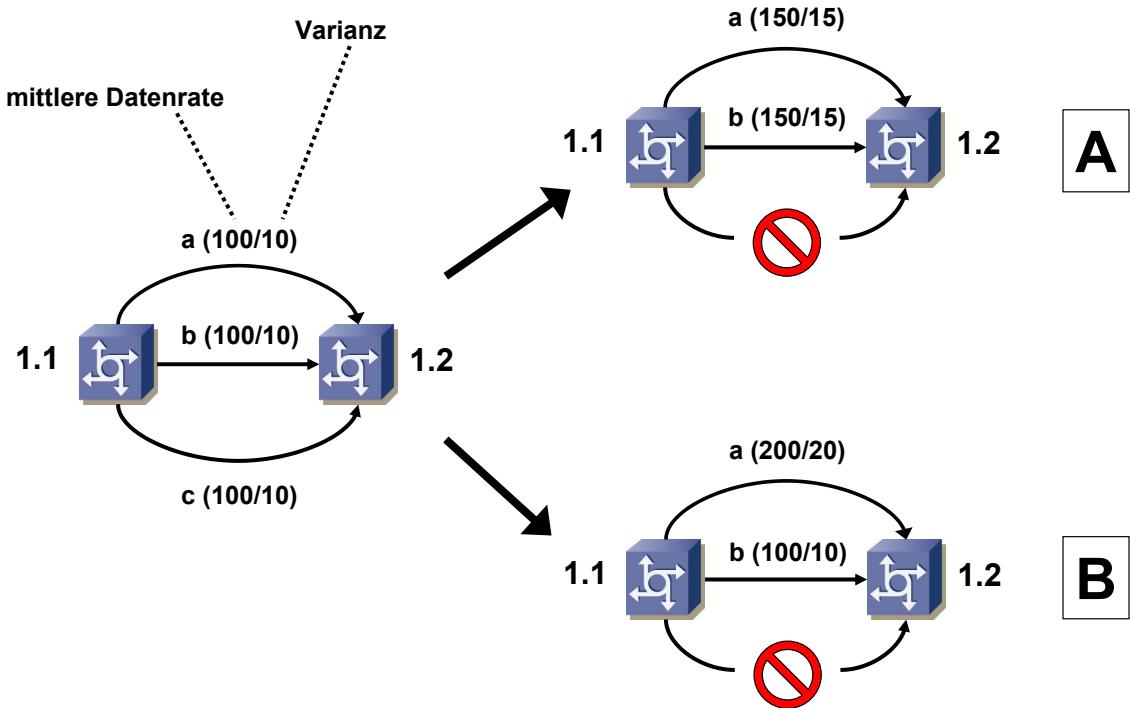


Abbildung 7.23: Variabilität bei Einpfad-Routing und Mehrpfad-Routing im Vergleich

Analytischer Ansatz zur Abschätzung der Paketlaufzeit

Zur Abschätzung der Paketlaufzeit im Restorationszustand bei selbstähnlichem Verkehr lässt sich der in [NG,03] beschriebene analytische Ansatz ausbauen. Wesentlich für die dort vorgenommene Laufzeitabschätzung ist die Erkenntnis, dass sich die statistischen Eigenschaften eines asymptotisch selbstähnlichen Verkehrsstromes unter bestimmten in der Praxis als gegeben anzusehenden Voraussetzungen durch das Durchlaufen eines VNKs nicht ändern.

Bei der Laufzeitabschätzung in [NG,03] wird der Paket-Ankunftsprozess eines VNK durch die fraktale Brownsche Bewegung (FBM)

$$A(t) = mt + \sigma Z(t) \quad (7.4)$$

angenähert. Dabei stehen m für die mittlere Ankunftsrate, σ^2 für die Varianz des Ankunftsprozesses und $Z(t)$ für die normalisierte fraktale Brownsche Bewegung (vgl. Anhang B.4.2).

Die fraktale Brownsche Bewegung wird durch einen Mantelprozess [envelope process]

$$\hat{A}(t) = mt + k\sigma t^H \quad (7.5)$$

approximiert. Der Parameter k muss dabei so gewählt werden, dass für eine vorgegebene Approximationsschranke ε und eine vorgegebene Approximationstiefe b die Beziehung

$$P(A(t) \leq \hat{A}(t), t = 1, \dots, b) \geq 1 - \varepsilon \quad (7.6)$$

gilt. Ein Verfahren dafür ist in [NG,03] angegeben. Der Mantelprozess verfügt über einfache statistische Eigenschaften und ist analytisch einfacher handhabbar als sein korrespondierender Originalprozess. Der Mantelprozess führt darüber hinaus zu pessimistischeren Abschätzungen über die hier relevante Zielgröße Verzögerung als der Originalprozess. Mit Hilfe des Mantelprozesses wird eine obere Schranke für

die Verzögerung eines einzelnen VNK gewonnen. Der stochastische Anteil der Ende-zu-Ende-Laufzeit bestimmt sich dann aus der Summe aller Knoten-Verzögerungen auf dem Pfad zwischen Sender und Empfänger.

Für die Nutzung der Ergebnisse aus [NG,03] im Hinblick auf die Laufzeitanalyse bei Ausfalleintritt sind folgende Schritte notwendig:

1. Bestimmung der Mantelprozesse im Restorationszustand für alle Verbindungsleitungen
2. Anwendung der Laufzeitabschätzungen aus [NG,03]

Die Schwierigkeit im ersten Schritt besteht darin, für jede Verbindungsleitung e die Parameter m_e , σ_e und H_e zu bestimmen, welche die Verkehrsströme auf den Verbindungsleitungen im (stationären) Restorationszustand angemessen charakterisieren:

Definition 7.1 Ein Tripel $V = (m, \sigma^2, H)$ heißt **Verkehrs-Deskriptor**. Dabei steht m für die mittlere Datenrate, σ^2 für die Varianz und H für den Hurst-Parameter.

An Hand eines Beispiels soll nun eine analytische Lösung dieses Problems erarbeitet werden:

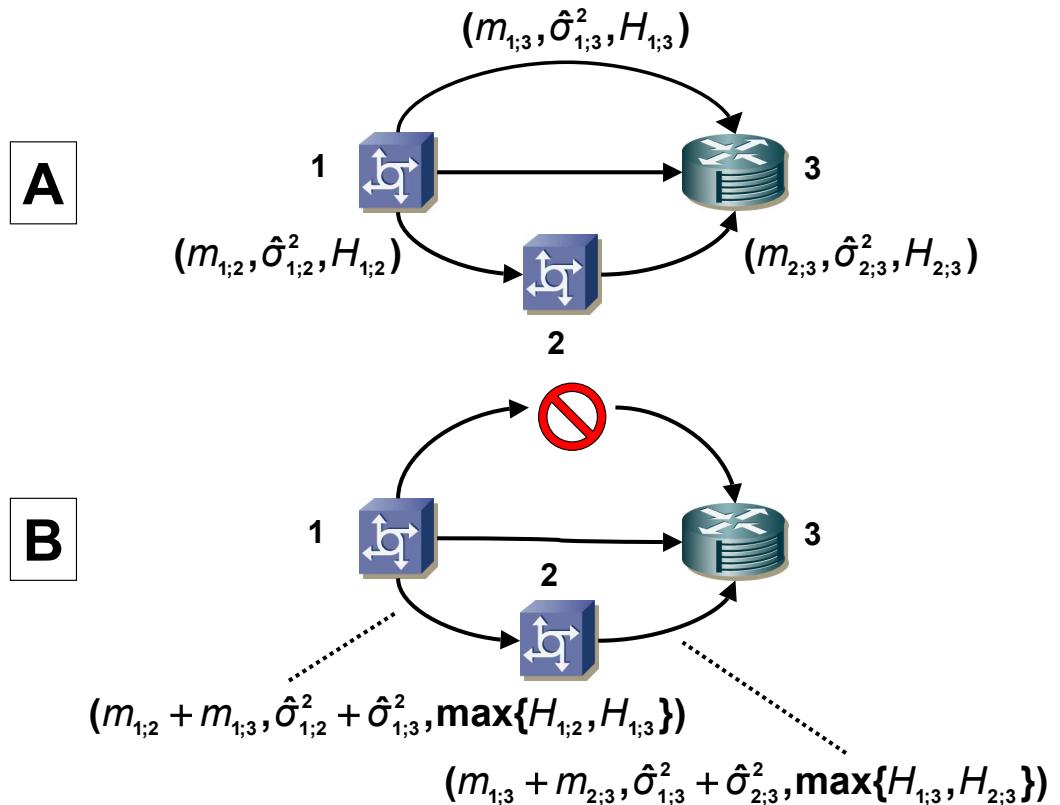


Abbildung 7.24: Kapazitätsplanung auf der Basis von FBM

Der folgenden Beispielrechnung liegen folgende Annahmen zu Grunde:

- **Grenzverteilungsannahme**

Die von den aktiven Knoten generierten selbstähnlichen Verkehrsflüsse können durch fraktale Brownsche Bewegungen angemessen beschrieben werden.

- **Transparenz der VNKs**

Das Durchlaufen eines Verkehrsflusses durch einen VNK führt zu keiner maßgeblichen Änderung der statistischen Eigenschaften des Flusses. Eine ausführliche Untersuchung der Gültigkeit dieser Annahme durch Betrachtung der Grenzwerte momenterzeugender Funktionen von Verkehrsströmen findet sich in [Wis99]. Hier wird diese Annahme ausgenutzt, indem die Knoten-Ausgangsprozesse wieder durch fraktale Brownsche Bewegungen dargestellt werden.

Beim Multiplexing von Verkehrsströmen finden die in [Pat97b] aufgeführten Regeln für exakt selbstähnliche Verkehrsströme Anwendung:

- **Hurst-Parameter-Regel**

Werden zwei unabhängige, exakt selbstähnliche Verkehrsströme mit Hurst-Parametern H_1 und H_2 miteinander gemultiplext, dann besitzt der aggregierte Verkehrsstrom¹³ den Hurst-Parameter $\max\{H_1, H_2\}$.

- **Moment-Regeln**

Werden zwei unabhängige, exakt selbstähnliche Verkehrsströme mit den mittleren Datenraten m_1, m_2 und den Varianzen σ_1^2, σ_2^2 miteinander gemultiplext, dann besitzt der aggregierte Verkehrsstrom die mittlere Datenrate $m_1 + m_2$ und die Varianz $\sigma_1^2 + \sigma_2^2$.

- **Stochastische Unabhängigkeit der Verkehrsflüsse, die den Verkehrsströmen zugrundeliegen.**

Um für Mehrpfad-Routing-Verfahren zu praktisch verwertbaren einfachen Rechenregeln zu kommen, ist eine zusätzliche Annahme erforderlich:

- **Unabhängige Trennung**

Wird der Verkehrsfluss mit den Parametern (m, σ^2, H) auf den Pfaden p_1, \dots, p_n vom Sender zum Empfänger geleitet, dann geschieht dies durch eine Trennung des Gesamtflusses in n unabhängige Teilflüsse mit den Parametern (m_i, σ_i^2, H) , $i = 1, \dots, n$ und den Eigenschaften

$$\sum_{i=1}^n m_i = m \text{ und } \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 = \sigma^2.$$

Die Beispielrechnung orientiert sich an dem in Abbildung 7.24 dargestellten Netzwerk:

Knoten 1 generiert Verkehr mit den Parametern $(m_{1;2}, \sigma_{1;2}^2, H_{1;2})$ für Knoten 2 und $(m_{1;3}, \sigma_{1;3}^2, H_{1;3})$ für Knoten 3. Knoten 2 generiert Verkehr mit den Parametern $(m_{2;3}, \sigma_{2;3}^2, H_{2;3})$ für Knoten 3. Knoten 1 und 2 sind aktiv, Knoten 3 ist passiv. Szenario A stellt die Verkehrsparameter im ausfallfreien Zustand dar.

Bei Ausfall der Verbindungsleitung (1; 3) wird der Verkehr von 1 nach 3 über den Pfad (1 – 2 – 3) umgeleitet (Szenario B). Dann ergeben sich auf der Basis der vorgestellten Rechenregeln für Verkehrsströme die Parameter

$$(m_{1;2} + m_{1;3}, \sigma_{1;2}^2 + \sigma_{1;3}^2, \max\{H_{1;2}, H_{1;3}\})$$

und

$$(m_{1;3} + m_{2;3}, \sigma_{1;3}^2 + \sigma_{2;3}^2, \max\{H_{1;3}, H_{2;3}\})$$

für die Verbindungsleitungen (1; 2) und (1; 3).

Die geschilderte Vorgehensweise ist auf größere Topologien übertragbar. Um den Verkehrs-Deskriptor (m, σ^2, H) eines Verkehrsstroms auf einer Verbindungsleitung im Restorationszustand zu schätzen, sind zwei Strategien denkbar:

¹³Eine verallgemeinerte Regel für unkorrelierte, asymptotisch selbstähnliche Prozesse findet sich in [NG,03], Theorem 2.1.

- Schätzung auf der Grundlage der Verkehrs-Deskriptoren der Verkehrsströme im Normalzustand
- Schätzung auf der Grundlage der Verkehrs-Deskriptoren von Verkehrsflüssen zwischen aktiven vermittelnden Knoten.

Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist dabei die Kenntnis der jeweiligen Verkehrs-Deskriptoren und des Routing-Verfahrens.

Die Einfachheit der analytischen Approximation wird hier mit einem Mangel an Präzision erkauft, der durch die Annäherungen

- realer Verkehrsströme durch FBM
- FBM durch Mantelprozess
- Knoten-Verzögerung durch obere Schranke

und die in vielen Publikationen getroffene zusätzliche Annahme unbegrenzter Puffergröße zustande kommt. Die Untersuchung der Güte der vorgenommenen Abschätzung ist als Ausgangspunkt für weitere Forschungsarbeiten zu sehen.

Simulativer Ansatz zur Abschätzung der Paketlaufzeit

Zur simulativen Analyse bei Einpfad-Routing-Verfahren führt folgender Ansatz zu verwertbaren Ergebnissen über die Paketlaufzeit:

Sei (l_1, \dots, l_n) ein (beeinträchtigter) Pfad zwischen dem Sender A und dem Empfänger B und sei (l_1^*, \dots, l_m^*) der zugehörige Restorationspfad, der nach Eintritt des Ausfallereignisses für die Datenübertragung von A nach B genutzt wird.

Die (bedingten) Zufallsvariablen, welche die Knotenverzögerung auf dem beeinträchtigten Pfad (unter der Bedingung des Normalzustandes) und dem Restorationspfad (unter der Bedingung des Restorationszustandes) beschreiben, werden mit $R_A, R_2, \dots, R_{n-1}, R_B$ und mit $R_A, R_2^*, \dots, R_{m-1}^*, R_B$ bezeichnet.

Dann beschreibt die Zufallsvariable

$$\begin{aligned} D_{A,B} &:= R_A + \delta_{l_1} + R_2 + \delta_{l_2} + \dots + R_{n-1} + \delta_{l_{n-1}} + R_B \\ &= R_A + \sum_{i=2}^{n-1} R_i + R_B + \sum_{k=1}^{n-1} \delta_k \end{aligned} \quad (7.7)$$

die Paketlaufzeit von A nach B im ausfallfreien Zustand und

$$\begin{aligned} D_{A,B}^* &:= R_A + \delta_{l_1^*} + R_2^* + \delta_{l_2^*} + \dots + R_{m-1}^* + \delta_{l_{m-1}^*} + R_B \\ &= R_A + \sum_{i=2}^{m-1} R_i^* + R_B + \sum_{k=1}^{m-1} \delta_k \end{aligned} \quad (7.8)$$

deren Analogon im Restorationszustand.

Die Größen δ_{l_i} , $i = 1, \dots, n-1$ und $\delta_{l_j^*}$, $j = 1, \dots, m-1$, definieren die (deterministischen) Latenzen der zu den Pfaden gehörenden Verbindungsleitungen.

Die Verteilungen der Zufallsvariablen R_i , $i = 2, \dots, n-1$, und R_j^* , $j = 2, \dots, m-1$, bestimmen das Laufzeitverhalten zwischen A und B. Da sich eine Änderung der Verzögerung eines Knotens durch die lokale Nähe und die Vernetzung auch auf dessen Nachbarn auswirkt, ist eine Abhängigkeit zwischen den Verzögerungs-Zufallsvariablen vorhanden, was eine analytische Behandlung erschwert und simulative Analyse rechtfertigt.

Zum Zwecke der mathematischen Modellbildung ist interessant, inwieweit die in den Gleichungen (7.7) und (7.8) dargestellten Zufallsvariablen-Summen durch Summen *unabhängiger* Zufallsvariablen angenähert werden können, da sich aus der Behandlung unabhängiger Zufallsvariablen viel einfacher Aussagen über die hier relevanten Quantile der Gesamtverzögerung ableiten lassen, als dies durch eine simulative Analyse unter Berücksichtigung der Abhängigkeiten der Fall ist. Bei langen Übertragungswegen mit einer Vielzahl von durchlaufenden Knoten eröffnet die Unabhängigkeit der beteiligten Summanden darüber hinaus die Möglichkeit, *large deviations-Techniken* (vgl. [Lew96]) zur Laufzeitanalyse einzusetzen.

7.9.3 Erweiterungen des Verkehrsmodells

Heterogene Netzwerk-Umgebungen und heterogene Verkehrslast

Bei den dargestellten Simulationsversuchen werden *homogene* Verkehrsströme modelliert, d. h. alle aktiven Knoten des Netzwerkes generieren Verkehr mit den gleichen statistischen Eigenschaften für die ersten und die zweiten Momente. Darüber hinaus sind die untersuchten Netzwerk-Umgebungen in dem Sinne homogen, als die Leistungseigenschaften der VNKs und der Verbindungsleitungen hier identisch gewählt wurden.

Für beide Aspekte ist eine Erweiterung der hier angestellten Betrachtungen angebracht:

- **Verkehrslast**

Für breitbandige Netze mit einer Durchmischung von großen Mengen an Einzelverbindungen von verschiedenartigen Anwendungen erscheint die qualitative Homogenität der zweiten Momente angemessen. Für lokale Netze, bei denen die vermittelnden Netzknoten mit Rechensystemen verbunden sind, auf denen unterschiedliche Anwendungen wie z. B. ein WWW-Server und ein FTP-Server laufen, ist eine Untersuchung von Verkehrsgeneratorn mit *heterogenen* statistischen Eigenschaften anzustreben, die hier nicht durchgeführt wurde.

- **Leistungseigenschaften der Netzwerk-Komponenten**

Die Annahme gleicher Leistungseigenschaften der Netzwerk-Komponenten ist angemessen für abgeschlossene Netzwerk-Umgebungen, deren Komponenten von ein und demselben Hersteller bereitgestellt werden wie z. B. in einem ATM-Backbone mit identischen ATM-Switches.

Sobald Netzgrenzen überschritten werden, treten Unterschiede bei den Leistungscharakteristika auf, die einer separaten Betrachtung bedürfen.

Variation der Datenrate von ON-Perioden

Die Annahme fester konstanter Datenraten von Verbindungen ist eine Vereinfachung, für die insbesondere bei der Modellierung der Verkehrsströme in paketvermittelnden Weitverkehrsnetzen eine Verfeinerung anzustreben ist. Tabelle 7.5 enthält eine Aufstellung der in Deutschland am weitesten verbreiteten (Brutto-)Bandbreiten im Zugangsnetz- und Transitnetz-Bereich.¹⁷

¹⁴Die theoretisch zur Verfügung stehende Bandbreite ist im Mobilbereich in der Praxis wegen der im Vergleich zum Festnetz höheren Fehleranfälligkeit der Übertragung nicht vollständig nutzbar. Die hier angegebenen Werte basieren auf Schätzungen.

¹⁵Hier sind 128 kbps bei Kanalbündelung möglich.

¹⁶Mit *upstream* wird die Richtung von der Endeinrichtung zur Vermittlungsstelle bezeichnet, die Gegenrichtung nennt man auch *downstream*.

¹⁷Mit Ausnahme der Mobilfunk-Werte sind alle Zahlenangaben auf ganze Zahlen gerundet.

| Leitungstyp | Klassifizierung | max. Bandbreite | mittl. Bandbreite ¹⁴ |
|------------------------------|-----------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Anschlussleitung im Festnetz | analog | 56 kbps | |
| | ISDN | 64 kbps ¹⁵ | |
| | DSL | 768 kbps (Upstream) ¹⁶ | |
| Mobilfunk | GSM | 9,6 kbps | 9,6 kbps |
| | GPRS | 160 kbps | 60 kbps |
| | UMTS (FDD) | 384 kbps | 240 kbps |
| | UMTS (TDD) | 2 Mbps | 1 Mbps |
| Ethernet-Segment | | 10 Mbps | |
| | | 100 Mbps | |
| ATM-Verbindungsleitung | | 155 Mbps | |
| SONET-Verbindungsleitung | OC-1 | 52 Mbps | |
| | OC-3/STM-1 | 155 Mbps | |
| | OC-12/STM-4 | 622 Mbps | |
| | OC-48/STM-16 | 2488 Mbps | |

Tabelle 7.5: Bandbreiten von Verbindungsleitungen nach [Tan96]

Die Unterschiede der Datenraten von Verbindungen lassen sich durch das in Abschnitt 5.4.4 vorgestellte ISHV-Modell in ein Simulationsmodell integrieren, welches aus einer zeitlichen (Verbindungsduer) und eine räumlichen (Datenrate) stochastischen Komponente besteht.

Die in Anhang B.4 hergeleitete Formel für die Varianz des ISHV-Modells liefert einen ersten Ansatzpunkt für die Untersuchung des Variabilitätsverhaltens bei variierenden Datenraten der ON-Perioden. Sie belegt die Vermutung, dass bei identischer Gesamt-Datenrate und identischer mittlerer Datenrate der ON-Perioden die Variabilität des ISHV-Modells im Vergleich zur Variabilität des ISHT-Modells noch zunimmt.

Bei der Umsetzung des Ansatzes aus Abschnitt 5.5, der darauf beruht, die Vergleichbarkeit verschiedener Verkehrsmodelle durch Vorgabe fester Werte für die mittlere generierte Datenrate und die Varianz durch Anpassung der restlichen Modellparameter herzustellen, treten beim ISHV-Modell zusätzliche Schwierigkeiten auf. Explizite analytische Ausdrücke für die angepassten Parameter sind dann nicht mehr möglich. Benutzt man Pareto-Verteilungen als heavy-tailed Verteilungen, so sind bei der erforderlichen Anpassung die Ankunftsrate und jeweils zwei Parameter für die Pareto-Verteilungen der Dauern und der Datenrate der ON-Perioden einzubeziehen. Falls gestutzte Verteilungen benutzt werden, kommt jeweils noch ein Parameter für den Maximalwert des Trägers hinzu. Sowohl die mittlere generierte Datenrate als auch die Varianz des ISHV-Modells hängen von den genannten sieben Parametern ab, deren Abhängigkeiten untereinander durch die in Anhang B.2.2 hergeleiteten Formeln (B.6) und (B.7) für die ersten beiden Momente der Pareto-Verteilung gegeben sind.

Gegenstand von Untersuchungen des ISHV-Modells in Fortführung der vorliegenden Arbeit sollten das Abklingverhalten der Autokorrelationsfunktion und der skalierten Varianzen im ausfallfreien Zustand und bei Ausfall von Netzkomponenten und ein Vergleich mit den dargestellten Eigenschaften des ARH- und des ISHT-Modells sein.

Closed loop Untersuchungen

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen werden Wechselwirkungen zwischen den Flusskontroll-Mechanismen in den Endeinrichtungen und dem Warteschlangen-Management in den vermittelnden Netzknoten ignoriert. Wegen der dominanten Stellung des Transmission Control Protocol und

des Internet Protocol innerhalb der paketvermittelnden Netzwerk-Welt soll an dieser Stelle nur auf deren Eigenschaften eingegangen werden.

Bei ansteigender Netzlast und daraus folgender stärkerer Belastung der Warteschlangen in den VNKs sorgen IP-basierte vermittelnde Netzknoten für ein gezieltes Verwerfen von Paketen. Ein Meilenstein dieses Warteschlangen-Managements ist der so genannte *Random Early Detection*-Algorithmus, dessen Grundidee darauf beruht, bereits vor dem Eintritt der vollständigen Füllung einer Warteschlange mit dem Verwerfen von Paketen zu beginnen (zu Einzelheiten siehe [Flo93]). Die Folge verworfener Pakete für den TCP-Sender sind ausbleibende Bestätigungen [acknowledgements] für bereits gesendete Pakete, was zu einer Verkleinerung des TCP-Sendefensters (zu Fenster-Techniken vgl. [Tan96], Kap. 3.4) und damit zu einer Herabsetzung der pro Zeiteinheit zum Empfänger übertragenen Datenmenge führt. Fällt die Netzbelastung daraufhin, so vergrößert der Sender sein Fenster schrittweise mit jeder eintreffenden Bestätigung und erhöht die Senderate exponentiell. Einzelheiten dazu sowie die Vermutung, dass der geschilderte Mechanismus zu zyklischem Sendeverhalten führen kann, finden sich in [Ver00, Joo01].

Die Analyse des Einflusses der beschriebenen Wechselwirkungen auf die Selbstähnlichkeit von Verkehrsströmen und der nächste sich daraus ergebende Schritt – die Modellierung von Verkehrsströmen unter deren Berücksichtigung – ist zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.

Über den Einfluss der Transportprotokolle auf die Langzeitabhängigkeit gibt es widersprüchliche publizierte Schlussfolgerungen, die zum Teil eine Verstärkung und zum Teil eine Abschwächung des fraktalen Charakters feststellen (vgl. [Err02]).

Vielversprechende Ansätze zur Modellierung von Verkehrsströmen unter Berücksichtigung des TCP-Einflusses ergeben sich durch die bereits in Abschnitt 5.4.4 erwähnte Technik der *chaotischen Abbildungen* [Err02]. Diese liefern jedoch noch zum aktuellen Zeitpunkt noch keine wissenschaftlich fundierte Grundlage auf der Simulationsstudien über die statistischen Eigenschaften von TCP-Verkehr bei Ausfällen von Netzwerk-Komponenten aufgebaut werden können. Sobald die Forschung in diesem Bereich weiter fortgeschritten sein sollte, ist ein Überdenken der hier beschriebenen Erkenntnisse angebracht, welche ausschließlich den Basis-Effekt für die Langzeitabhängigkeit - die heavy-tailed-Eigenschaft - nachbilden.

7.10 Erkenntnisse für die Dimensionierung fehlertoleranter paketvermittelnder Netzwerke und die Konzeption fehlertoleranter Netzwerk-Protokolle

Wesentliches Ziel der Kapazitätsplanung fehlertoleranter Netzwerke ist es, den Ressourcen-Bedarf für eine möglichst große Menge potentieller Ausfall-Szenarien so abzuschätzen, dass der Ausfall ohne Beeinträchtigung der Benutzer toleriert werden kann.

Wesentliche Ziele für die Konzeption von Netzwerk-Protokollen im Hinblick auf die zweiten Momente aggregierter Verkehrsströme sind die *Geringhaltung der Variabilität* und die *Vermeidung von Langzeitabhängigkeit*. Wünschenswert sind Verkehrsströme mit geringer absoluter Variabilität und schnell abklingenden Autokorrelationen und skalierten Varianzen.

Zusammenfassend lassen sich im Hinblick auf die genannten Ziele folgende wesentliche Erkenntnisse aus den in diesem Kapitel durchgeführten Simulationsversuchen gewinnen:

- **Verkehrsmodelle ARH und ISH (Abschnitt 7.2 und 7.4)**

Es ist bekannt, dass sowohl das ARH- als auch das ISH-Verkehrsmodell bei steigender Anzahl ON-Perioden (ARH) bzw. steigender Frequentierung (ISHT) unter geeigneter Normierung gegen die fraktale Brownsche Bewegung streben (vgl. Anhang B.4.1).

Betrachtet man die Überlagerung alternierender ON-OFF-Perioden, dann ist dieses asymptotische Verhalten auch dann noch gültig, wenn die ON-Perioden anstatt der hier untersuchten konstanten Datenraten variabel sind und durch eine heavy-tailed-Verteilung approximiert werden können [Lev00]. Ein entsprechendes Resultat für das infinite source heavy-tailed Modell mit variierenden Datenraten (ISHV) ist zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht bewiesen.

Um quantitative Abschätzungen im Hinblick auf die Dimensionierung paketvermittelnder Netzwerke zu erhalten, rechtfertigt das Grenzverhalten den Einsatz bekannter Ergebnisse über die Autokorrelation, die Variabilität und die effektive Bandbreite von FBM-Modellen als Ersatz für entsprechende Erkenntnisse für die verbindungsorientierten Verkehrsmodelle ARH und ISHT.

Die in Abschnitt 7.2 und 7.4 durchgeführten Versuche bieten darüber hinaus einen interessanten Vergleich der qualitativen Entwicklung der zweiten Momente der Modelle ARH und ISHT. So zeigen aggregierte Verkehrsströme, die nach dem ARH-Modell generiert wurden, bei gleicher mittlerer generierter Datenrate, vergleichbarer Datenrate der ON-Perioden und gleicher Varianz der mittleren generierten Datenrate sowohl ein stärkeres Abklingen der Autokorrelationen und der skalierten Varianzen als auch einen höheren Multiplexing-Verlust.

- **Einfluss von Ausfällen auf die zweiten Momente (Abschnitt 7.4)**

Die durch den Ausfall einer Netzwerk-Komponente auf einer Restorationsleitung hervorgerufene Lasterhöhung führt innerhalb eines Zeitfensters, das den Ausfallzeitpunkt enthält, zu einem Anstieg der Korrelation und einem Anstieg der Variabilität.

Die relative Variabilität auf Restorationspfaden nimmt bei homogener Netzbelaistung im Restorationszustand im Vergleich mit dem Normalzustand bei einer Lasterhöhung durch umgeleiteten Verkehr wegen des Multiplexing-Effektes nicht zu.

Für die Dimensionierung von Restorationspfaden ist die Abschätzung des Bandbreiten-Bedarfs im Restorationszustand von gewichtiger Bedeutung. Schätzt man die Variabilität auf einer Restorationsleitung im Restorationszustand durch Summation der Variabilität im Normalzustand und der Variabilität des umgeleiteten Verkehrs im Restorationszustand ab, so führt dies wegen des variabilitätsmindernden Einflusses des Multiplexing-Effektes zu pessimistischen Abschätzungen, d. h. der

Bandbreiten-Bedarf wird tendenziell überschätzt. Im Sinne ausreichender Dimensionierung von Verbindungsleitungen ist dies ein Vorteil gegenüber optimistischen Abschätzungen.

- *Verminderung der Datenrate von Verbindungen (Abschnitt 7.6)*

Werden die Datenraten von Verbindungen in Folge eines Ausfallereignisses und damit verbundener Verknappung der verfügbaren Bandbreite gedrosselt, so verlängert sich z. B. bei einer Herabsenkung der Datenrate von 100 kbps auf 50 kbps die Übertragungsdauer einer 1000 kb großen Datei von 10 s auf 20 s . Auf aggregierte Verkehrsströme wirkt sich eine Herabsenkung der beschriebenen Art variabilitätsmindernd aus und besitzt somit einen positiven Effekt auf das Verkehrsverhalten des Gesamtnetzes.

- *Einfluss der Bedienstrategien (Abschnitt 7.7)*

Der im Rahmen der Arbeit durchgeföhrte Versuch zur Analyse des Einflusses der Bedienstrategien auf die zweiten Momente zeigt trotz der Extreme der untersuchten Strategien keine signifikante Abweichung der Autokorrelationen und der skalierten Varianzen und bestätigt damit in der Literatur etablierte Erkenntnisse über die Persistenz der Langzeitabhängigkeit [Err02].

- *Reduktion der Langzeitabhängigkeit (Abschnitt 7.8)*

Werden Verbindungen in mehrere hintereinanderfolgende Abschnitte geteilt und die einzelnen Abschnitte auf disjunkten Pfaden vom Sender zum Empfänger gesendet, dann kann dadurch eine Beschleunigung des Abklingens der zweiten Momente und damit eine Reduktion der Langzeitabhängigkeit erreicht werden.

Kapitel 8

Einbettung von Simulationsversuchen in die Verlässlichkeitsbewertung

Während in den bisherigen Betrachtungen dieser Arbeit das Systemverhalten in speziellen, einzeln ausgewählten System- und Ausfallkonfigurationen untersucht wurde, steht in diesem Kapitel die Gewinnung statistischer Verlässlichkeitsaussagen im Vordergrund der Betrachtung.

Simulationsversuche, wie sie in Kapitel 7 durchgeführt wurden, stellen dabei die atomaren Bestandteile der Verlässlichkeitsanalyse dar. Jeder Versuch entspricht einem *Ausfall-Szenario* (vgl. Abschnitt 8.1), in dem das Systemverhalten für eine spezifische Beeinträchtigungs-Situation wie einen Hardwarebedingten Ausfall, Software-bedingten Ausfall oder einen Angriff nachgebildet und untersucht wird. In jedem einzelnen Szenario wird eine *Leistungsanalyse* auf der Transportdienst-Ebene (vgl. Abschnitt 3.4.1) durchgeführt. Dabei sind in der Praxis andere Zielgrößen relevant als die in Kapitel 7 untersuchten zweiten Momente von Verkehrsströmen – in der Regel ist man statt dessen an den Basiskenngrößen verfügbare Bandbreite, Paketverlustrate und Paketlaufzeit (vgl. Abschnitt 3.4.2) interessiert.

Für die Verlässlichkeitsanalyse eines Netzwerkes auf der DLV-Ebene (vgl. Abschnitt 3.4.1) genügt es nicht, das Systemverhalten wie seither in *einzelnen* Beeinträchtigungs-Situationen zu prognostizieren, sondern es ist notwendig, die *Gesamtheit* relevanter Bedrohungspotentiale in Form möglicher Ausfälle in Bezug auf die Verlässlichkeit zu erfassen.

Der hier vorgestellte Ansatz zur Verlässlichkeitsanalyse gliedert den Vorgang der Verlässlichkeitsanalyse in einen zweistufigen Prozess:

- *Leistungsanalyse*

In der *Leistungsanalyse* wird das Systemverhalten in einzelnen Ausfall-Szenarien (vgl. Abschnitt 8.1) simulativ untersucht.

- *statistische Analyse*

Die *statistische Analyse* besteht aus der Zusammenführung verschiedener simulativ untersuchter Ausfall-Szenarien zu einer Gesamt-Verlässlichkeitsaussage (vgl. Abschnitt 8.2).

Die Verlässlichkeitsbewertung erfolgt auf der Basis probabilistischer Gewichtung mehrerer als relevant eingestufter Ausfall-Szenarien, wobei sich das Gewicht an der Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. -häufigkeit und der Schwere des Ausfalls in einem Szenario orientiert.

Abschnitt 8.1 geht zunächst auf die Problematik der Auswahl relevanter Beeinträchtigungs-Situationen für eine simulative Analyse ein. In Abschnitt 8.2 wird ein Verfahren zur Verlässlichkeitsbewertung vorgestellt, das auf der Untersuchung einzelner Ausfall-Szenarien aufbaut. Der abschließende Abschnitt 8.3

verdeutlicht das vorgestellte Verfahren an Hand eines Anwendungsbeispiels. Sinn der exemplarischen Betrachtung ist es, die Schwierigkeiten der Zusammenführung von Simulationsergebnissen zwecks Verlässlichkeitsanalyse zu erörtern und damit weitergehende Forschungsarbeiten zu motivieren, die zu praktiktauglichen Verlässlichkeitsanalysen führen.

8.1 Behandlung des Zustandsraumes möglicher Ausfälle

Der Zustandsraum eines Fehlermodells in einem Netzwerk mit N Knoten und M Verbindungsleitungen, welches allen Netzwerk-Komponenten die beiden Zustände 0 (defekt) und 1 (intakt) zuordnet, besitzt bereits die Größe 2^{N+M} . Entsprechend größere Zustandsräume ergeben sich, wenn man weitere Abstufungen hinsichtlich des Grades der Funktionstüchtigkeit der Komponenten vornimmt.

Offensichtlich können mit wachsender Größe eines Netzwerkes aufgrund mangelnder Rechenzeit nicht alle theoretisch möglichen Ausfall-Szenarien (vgl. Abschnitt 8.2) durch Simulation bewertet und analysiert werden. Abbildung 8.1 stellt die Grundproblematik der Auswahl von Szenarien dar: *Relevante Schadens-Szenarien* sind ausgewählt, während *irrelevante Szenarien* abgelehnt werden.

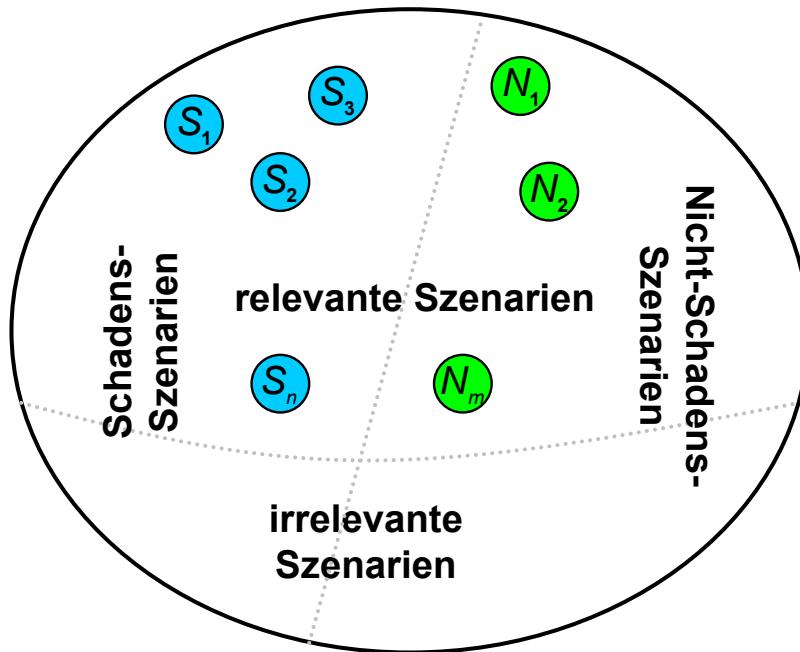


Abbildung 8.1: Auswahl von Szenarien

Szenarien sind solche, die eine hohe Eintrittshäufigkeit (*empirische Grundlage der Untersuchung*) bzw. eine große Eintrittswahrscheinlichkeit (*theoretische Grundlage der Untersuchung*) besitzen.

Schadens-Szenarien zeichnen sich dadurch aus, dass der eingetretene Ausfall zu einer Beeinträchtigung der vom Netzwerk im Rahmen einer DLV zugesicherten Transportdienstleistung führt. Bei *Nicht-Schadens-Szenarien* wird der Ausfall durch Fehlertoleranzverfahren abgefangen.

Für die Verlässlichkeitsanalyse von Bedeutung ist die Schnittmenge der Schadens-Szenarien mit den relevanten Szenarien. Diese wird mit **bewertete Szenarien** bezeichnet.

Zur Bestimmung der bewerteten Szenarien ist folgende Zwei-Stufen-Vorgehensweise sinnvoll: Im Rahmen der *probabilistischen Vorauswahl* werden alle relevanten Szenarien bestimmt. Grundlage dafür sind

Erfahrungswerte eingetretener Schadensfälle (*empirische Grundlage*) oder Schätzungen, die auf Expertenwissen, den Zuverlässigkeitssangaben der Komponenten-Hersteller oder probabilistischen Überlegungen, wie z. B. der *Ein-Fehler-Annahme*,¹ basieren (*theoretische Grundlage*).

Die probabilistische Vorauswahl erfordert keine Simulation.

Der zweite Schritt, die *Auswahl der bewerteten Szenarien*, wird analytisch oder simulativ durchgeführt. Analytische Abschätzungen eignen sich zur *Grobanalyse* und zur Aussortierung von Fällen, in denen die Tolerierung eines Ausfallereignisses aufgrund redundanter Kapazitäten ohne simulative Unterstützung festgestellt werden kann, z. B. wenn der Ausfall einer Verbindungsleitung durch eine kalte Reserve mit gleicher Bandbreite wie die Original-Leitung abgedeckt werden kann. Alle im Rahmen der Grobanalyse nicht behandelbaren Szenarien werden in der *Feinanalyse* simulative untersucht.

8.2 Eine Szenario-basierte Verlässlichkeitsmetrik

Die Verlässlichkeit beschreibt den Grad der Vertrauenswürdigkeit in die durch eine Dienstleistungsvereinbarung (Spezifikation) zugesicherte System-Leistung (vgl. Abschnitt 3.1). Eine Dienstleistungsvereinbarung besteht dabei aus einer Menge von *Bewertungskriterien*.

Beispiel: Gegeben sei ein Netzwerk $N = (G, c)$ mit einem gerichteten Graphen $G = (V, E)$. $A, B \in V$ seien Knoten des Netzwerks mit $A \neq B$. Innerhalb einer Dienstleistungsvereinbarung werden folgende Bewertungskriterien vereinbart:

- **Kriterium I:** Die Gesamt-Paketverlustrate innerhalb des Netzsegmentes N beträgt pro Minute weniger als 1 %.
- **Kriterium II:** Die Laufzeitschwankung zwischen Knoten A und Knoten B übersteigt 5 % nicht.
- **Kriterium III:** Zwischen Knoten A und Knoten B ist eine Mindestbandbreite von 5 MBit/s verfügbar.

Die Netzwerkverlässlichkeit wird durch die Einhaltung von Bewertungskriterien über bestimmten Zeiträumen definiert. Um die Netzwerkverlässlichkeit mit Hilfe simulativer Methoden quantitativ fassen zu können, ist folgende Begriffsbildung hilfreich:

Definition 8.1 Gegeben sei ein Netzwerk $N = (G, c)$ mit einem gerichteten Graphen $G = (V, E)$ nach Definition 5.1. Ein **Ausfall-Szenario** besteht aus einem Paar

$$S = (A, \vec{z}). \quad (8.1)$$

Hierbei ist $A = (f, M, \bar{d})$ eine Ausfallstatistik und $\vec{z} := (z_1, \dots, z_h)$ ein Vektor von Zielmesswerten.

Die Menge aller Ausfall-Szenarien für ein gegebenes Netzwerk N wird mit \mathbb{S}_N bezeichnet.

¹Die Ein-Fehler-Annahme unterstellt, dass wegen der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ausfallereignisses unter der Unabhängigkeitsannahme für Ausfälle die gleichzeitige Störung von mehr als einer Komponente aus wahrscheinlichkeits-theoretischer Sicht zu vernachlässigen ist. Die Ein-Fehler-Annahme entstammt dem Bereich der Hardware-Zuverlässigkeits-Modellierung. Bei der Modellierung von Angriffen, bei denen mehrere Netzwerk-Komponenten *gleichzeitig* ausfallen können, ist die Ein-Fehler-Annahme als unangemessen einzustufen.

Ein Ausfall-Szenario setzt sich demnach aus zwei Teilen zusammen:

- Die Ausfallstatistik $A = (f, M, \bar{d})$ beschreibt das Ausfallereignis des Szenarios. Sie umfasst die Menge M der ausgefallenen Komponenten,² den Erwartungswert f der Anzahl der Ausfälle der Menge M innerhalb eines Jahres und die mittlere Ausfalldauer \bar{d} (vgl. Abschnitt 5.6).
- Der Vektor \vec{z} beschreibt das Systemverhalten im Restorationszustand. Er ist das Ergebnis eines Simulationslaufes, in dem der Ausfall der Komponentenmenge M simuliert wird und enthält Angaben über Kenngrößen, die der Überprüfung der Bewertungskriterien dienen.

Die gekapselte, aus Ausfallstatistik und Systemverhalten bestehende Information bildet den atomaren Bestandteil für die statistische Verlässlichkeitsanalyse. Ein Ausfall-Szenario enthält Angaben über das Systemverhalten für eine einzelne Ausfallsituation.

Durch Einbeziehung der Zielmesswerte eines Simulationslaufes kann an Hand einer Zielfunktion z

$$z : \mathbb{S}_N \rightarrow \{0, 1\}$$

festgestellt werden, ob die in der Dienstleistungsvereinbarung festgelegte Verlässlichkeitsbedingung im jeweiligen Ausfall-Szenario erfüllt ist oder nicht. Die Verlässlichkeitsbedingung hängt dabei von den getroffenen Bewertungskriterien ab.

Beispiel: Gegeben seien das Netzwerk $N = (G, c)$ und die Bewertungskriterien des Eingangs-Beispiels dieses Abschnitts. Bei der Simulation des Ausfalls des Knotens K , $K \neq A$, $K \neq B$, werden die Gesamt-Paketverlustrate innerhalb des Netzsegmentes und die Laufzeitschwankung und die minimale verfügbare Bandbreite zwischen dem Knoten A und dem Knoten B simulativ ermittelt. Der Zielvektor \vec{z} liefert die Zielmesswerte (1.5 %, 2.8 %, 15 MBit/s).

Durch die Zielfunktion z wird die die Verlässlichkeitsbedingung unter Zugriff auf Bewertungskriterien festgelegt, z. B. für $S \in \mathbb{S}_N$ durch

$$z(S) = \begin{cases} 0, & \text{falls die Kriterien I-III gleichermaßen erfüllt sind,} \\ 1, & \text{andernfalls.} \end{cases}$$

Da die simulativ ermittelte Paketverlustrate im vorliegenden Szenario S_K (Ausfall des Knotens K) größer ist als in der Dienstleistungsvereinbarung vorgesehen, hat man hier

$$z(S_K) = 1,$$

also eine Verletzung der Dienstleistungsvereinbarung.

Bei der statistischen Bewertung der Netzwerkverlässlichkeit werden die Zielfunktionswerte aller als relevant eingestuften Ausfall-Szenarien zusammengefasst. Dies geschieht durch Gewichtung jedes einzelnen Szenarios unter Verwendung einer *Bewertungsfunktion*.

Definition 8.2 Eine **Bewertungsfunktion** $B : \mathfrak{P}(\mathbb{S}_N) \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ordnet der Menge von (relevanten) Ausfall-Szenarien $\mathbb{S}_{N,\text{rel}} = \{S_1, \dots, S_n\} \subset \mathbb{S}_N$ des Netzwerks N und einer Menge von Gewichten $w = (w_1, \dots, w_n)$ eine **Verlässlichkeitbewertung**

$$B(w_1, \dots, w_n, z(S_1), \dots, z(S_n)) \tag{8.2}$$

zu. $\mathfrak{P}(\mathbb{S}_N)$ beschreibt dabei die Potenzmenge von \mathbb{S}_N .

²Die Definition ist allgemein gehalten, so dass im Prinzip jede beliebige Unterlage der Komponentenmenge des Netzwerkes N als Ausfallmenge M in Frage kommt. In der Praxis ist allerdings nur eine relativ kleine Anzahl von Komponentenkombinationen für einen Ausfall relevant, vgl. dazu das Beispiel in Abschnitt 8.3.

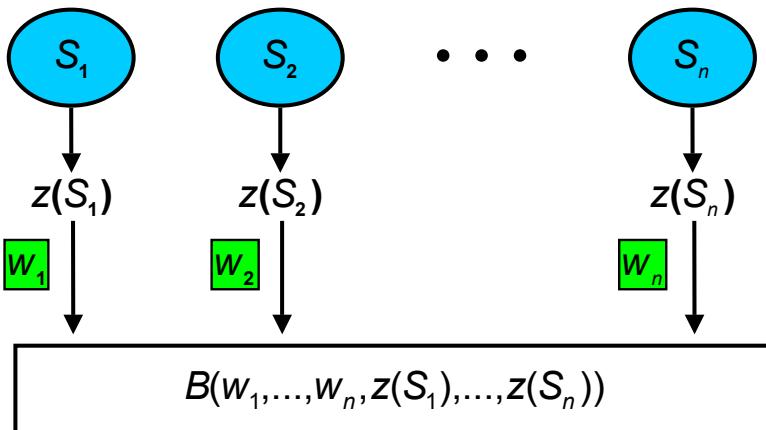


Abbildung 8.2: Berechnung der Netzwerkverlässlichkeit

Die Bewertungsfunktion enthält ein aus einer Dienstleistungsvereinbarung abgeleitetes *statistisches Verlässlichkeitsmaß* wie z. B. die mittlere jährlichen Ausfalldauer für einen bestimmten Dienst oder einen durch Bewertungskriterien gegebenen Dienste-Mix.

Abbildung 8.2 stellt den Vorgang der Verlässlichkeitsbewertung an Hand von Ausfall-Szenarien graphisch dar. Die Gewichte w_1, \dots, w_n korrespondieren mit der (empirisch beobachteten) Eintrittshäufigkeit bzw. mit der (statistisch geschätzten) Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ausfall-Szenarios (siehe Beispiel im folgenden Abschnitt).

8.3 Bewertungsbeispiel

Gegeben sei das in Abbildung 8.3 dargestellte Netzwerk. Bewertungsziel der Beispielbetrachtung soll die Schätzung der mittleren jährliche Ausfalldauer eines Dienstepaketes sein, das im Rahmen einer DLV für die Übertragung zwischen den Knoten 5.3 und 6.3 folgende Zusicherungen macht: Dienstgütekasse 1 beschreibt Echtzeitübertragungen mit einer permanent zur Verfügung stehenden Bandbreite von 10000 kbps bei einer maximalen Paketlaufzeit von 50 ms und einer (Ende-zu-Ende-)Laufzeitschwankung von maximal 5 %. Dienstgütekasse 2 ist für Dateiübertragungen vorgesehen und garantiert eine mittlere Datenrate von 5000 kbps bei einer maximalen Paketlaufzeit von 100 ms ohne Garantie der Laufzeitschwankung. Da die Randnetze 7.0, 8.0, 9.0 und 10.0 auf die Erfüllung der DLV-Zusicherung keinen Einfluss besitzen, werden Ausfälle in diesen Netzteilen als nicht relevant bewertet. Für die übrigen Netzteile (Knoten 1.1, 2.1, 3.1 und 4.1 und die zugehörigen Verbindungsleitungen im Kernnetz-Bereich; Knoten 5.1, 5.3, 6.1, 6.2, 6.3 und zugehörige Verbindungsleitungen im Randnetz-Bereich) werden folgende Ausfälle als relevant eingestuft:

- *Ausfälle einzelner Verbindungsleitungen*
Leitungsunterbrechungen wie z. B. Glasfaserkabelbrüche sind in der Regel auf Hardware-Fehler zurückzuführen und treten deshalb einzeln auf. Dies führt zu den Ausfall-Szenarien

$$S_{\{1.1;2.1\}} = ((f_{\{1.1;2.1\}}, \{\{1.1;2.1\}\}, \bar{d}_{\{1.1;2.1\}}), \vec{z}_{\{1.1;2.1\}}), S_{\{1.1;4.1\}}, S_{\{2.1;3.1\}} \text{ und } S_{\{3.1;4.1\}}$$

im Kernnetz und

$$S_{\{1.1;5.1\}}, S_{\{2.1;5.1\}}, S_{\{5.1;5.3\}}, S_{\{3.1;6.1\}}, S_{\{4.1;6.2\}}, S_{\{6.1;6.2\}}, S_{\{6.1;6.3\}} \text{ und } S_{\{6.2;6.3\}}$$

in den Randnetzen.

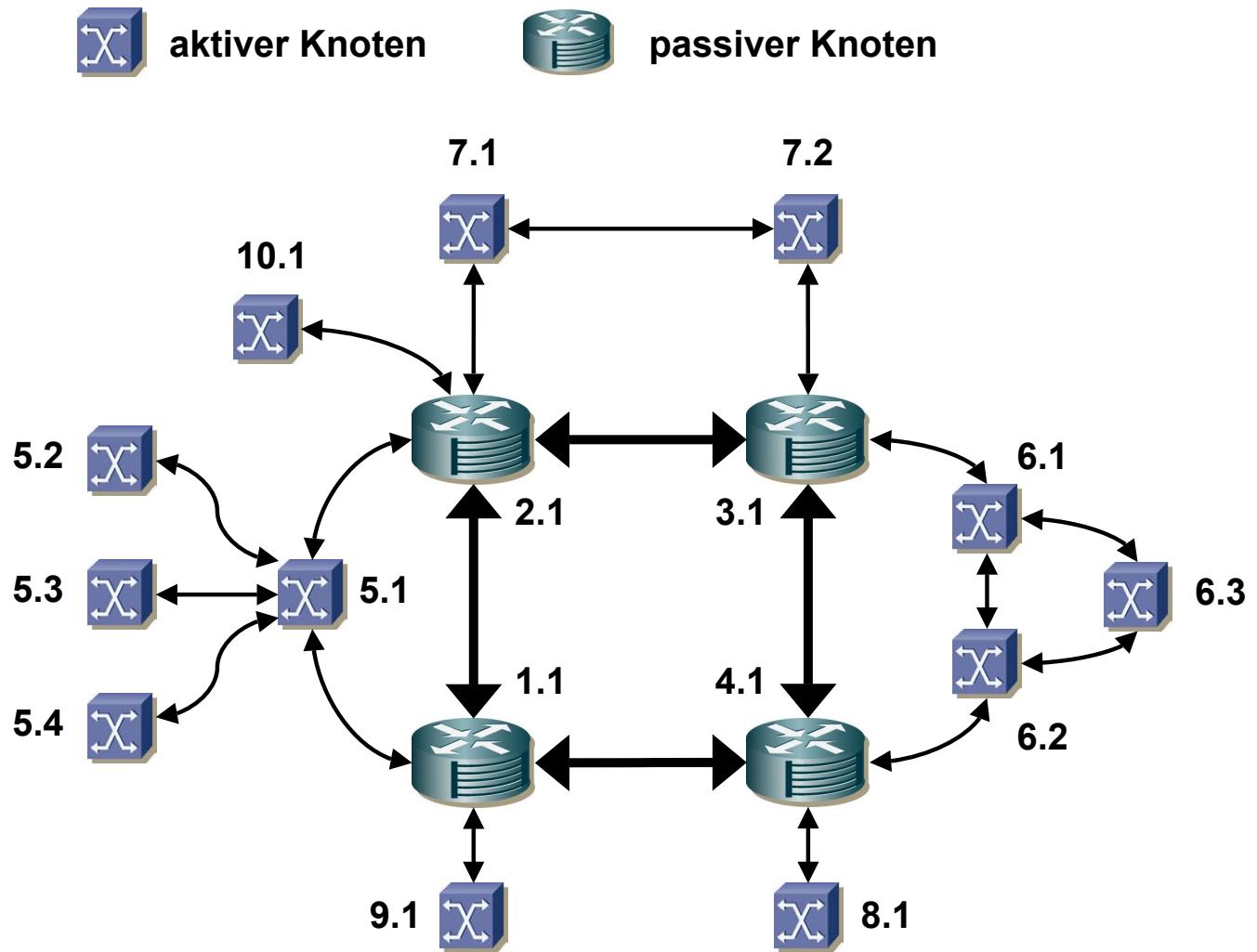


Abbildung 8.3: Beispielnetz für Verlässlichkeitsanalyse

- **Ausfälle einzelner VNKs**

Ausfälle einzelner Knoten werden in der Regel durch Hardware-Fehler oder durch Software-Fehler, Wartungsarbeiten, etc. ausgelöst. Relevant sind die Ausfall-Szenarien $S_{\{1.1\}}, S_{\{2.1\}}, S_{\{3.1\}}, S_{\{4.1\}}$ und $S_{\{5.1\}}, S_{\{5.3\}}, S_{\{6.1\}}, S_{\{6.2\}}, S_{\{6.3\}}$.

- **Ausfälle mehrerer VNKs**

Bei Angriffen mit dem Ziel der Beeinträchtigung der Transport-Funktionalität besteht die Möglichkeit, dass mehrere Knoten gleichzeitig ausfallen. Unterstellt man, dass ein Angriff über Netzgrenzen hinweg abgefangen werden kann und Angriffe auf Knoten eines Subnetzes beschränkt bleiben, dann hat man im vorliegenden Beispiel³

$$\binom{4}{4} + \binom{4}{3} + \binom{4}{2} = 1 + 4 + 6 = 11$$

Ausfall-Szenarien im Kernnetz und nach der gleichen Rechnungsweise 11 Ausfall-Szenarien im Subnetz 5.0 und $1 + 3 = 4$ Ausfall-Szenarien im Subnetz 6.0.

³Die Einzelausfälle sind hier nicht mitgerechnet.

Insgesamt ergibt sich nach der probabilistischen Vorauswahl damit

$$\begin{array}{rcl}
 & 4 & (\text{einzelne Verbindungsleitungen Kernnetz}) \\
 + & 8 & (\text{einzelne Verbindungsleitungen Randnetze}) \\
 + & 9 & (\text{einzelne Knoten}) \\
 + & 11 & (\text{Mehrfach-Ausfälle im Kernnetz}) \\
 + & 11 & (\text{Mehrfach-Ausfälle im Randnetz 5.0}) \\
 + & 4 & (\text{Mehrfach-Ausfälle im Randnetz 6.0}) \\
 \hline
 = & 47 & (\text{Gesamtzahl relevanter Ausfall-Szenarien})
 \end{array}$$

Die Grobanalyse aufgrund analytischer Abschätzungen ergibt, dass ein Ausfall einer einzelnen Komponente für das zugrunde gelegte Lastmodell und Routing-Verfahren bei Einsatz vorhandener redundanter Kapazitäten nicht zu einer Verletzung der Dienstleistungs-Vereinbarung führt.⁴ Ausnahmen sind die Einzel-Ausfälle der Knoten 5.1, 5.3 und 6.3, durch die ein Konnektivitätsverlust zwischen den in der DLV bewerteten Knoten 5.3 und 6.3 entsteht, der zwangsläufig zu einer Verletzung der DLV führt. Eine aufwendige simulative Untersuchung dieser drei Schadens-Szenarien ist somit nicht notwendig. Ein Großteil der Mehrfach-Ausfall-Szenarien kann als Schadens-Szenarien klassifiziert werden, da ein Konnektivitätsverlust zu einer Nichterfüllung der DLV führt. Eine simulative Untersuchung ist für diese Szenarien nicht erforderlich. Dazu zählen

- alle Szenarien des Subnetzes 5.0, welche mindestens einen der Knoten 5.1 oder 5.3 enthalten. Dies sind zehn Szenarien S_1, \dots, S_{10} .
- alle Szenarien des Subnetzes 6.0, welche den Knoten 6.3 enthalten. Hier erhält man drei Szenarien S_{11}, \dots, S_{13} .
- die Szenarien des Kernnetzes mit den Ausfall-Knotenmengen $\{2.1; 4.1\}$, $\{1.1; 3.1\}$, $\{1.1; 2.1\}$ und $\{3.1; 4.1\}$. Dies sind vier Szenarien S_{14}, \dots, S_{17} .
- alle Szenarien des Kernnetzes, in denen mindestens drei Knoten ausgefallen sind. Zusammen sind dies fünf Szenarien S_{18}, \dots, S_{22} .
- das Szenario mit der Knoten-Ausfallmenge $\{6.1; 6.2\}$ (Szenario S_{23}).

Nach der Vorauswahl mit den genannten Regeln bleiben folgende Szenarien für die (simulative) Feinanalyse übrig:

$$\begin{aligned}
 S_{24} &= ((f_{24}, \{5.2; 5.4\}, \bar{d}_{24}), \vec{z}_{24}) \\
 S_{25} &= ((f_{25}, \{1.1; 4.1\}, \bar{d}_{25}), \vec{z}_{25}) \\
 S_{26} &= ((f_{26}, \{2.1; 3.1\}, \bar{d}_{26}), \vec{z}_{26})
 \end{aligned}$$

Szenario S_{24} führt zu einer Lastverringerung innerhalb des Gesamtnetzwerkes, beeinträchtigt somit die zwischen 5.3 und 6.3 geschlossene DLV nicht und kann als Nicht-Schadens-Fall bewertet werden. Damit verbleiben für eine simulative Analyse die Szenarien S_{25} und S_{26} . Für die Berechnung der mittleren jährlichen Ausfalldauer müssen die Zielgrößen der Simulationsläufe dieser beiden Szenarien so gewählt

⁴Die zur Einhaltung der DLV notwendige Konnektivität bei Eintritt eines Einzel-Ausfalls macht man sich an Hand der Beispiel-Abbildung schnell klar. Für die Überprüfung der Bandbreiten-, Laufzeit und Paketverlust-Vereinbarungen ist eine detaillierte Last- und Routing-Modellierung notwendig, die hier aus Aufwandsgründen nicht durchgeführt werden soll.

werden, dass diese die (binäre) Entscheidung widerspiegeln, ob die Dienstgütevereinbarung im betreffenden Szenario verletzt wurde oder nicht:

$$z(S_i) \in \{0; 1\}, i = 25, 26.$$

Ein Zielfunktionswert von 1 entspricht hierbei der Einhaltung der DLV-Zusicherungen (Intakt-Zustand), ein Zielfunktionswert von 0 einer Verletzung (Defekt-Zustand). Für die durch die Grobanalyse ermittelten Schadens-Szenarien hat man

$$z(S_j) = 1, j = 1, \dots, 24.$$

Der Verlässlichkeit-Schätzwert für die mittlere jährliche Ausfalldauer ergibt sich durch Wahl der Gewichte

$$w_i := f_i \cdot \bar{d}_i, i = 1, \dots, 26$$

(Produkt aus mittlerer Anzahl von Ausfällen und mittlerer Dauer eines Ausfalls) als

$$B(w_1, \dots, w_{26}, z(S_1), \dots, z(S_{26})) = \sum_{i=1}^{26} w_i \cdot [1 - z(S_i)]. \quad (8.3)$$

Wie das Beispiel verdeutlicht, kann die Menge der durch Simulation bewerteten Szenarien durch Konnektivitätsanalyse erheblich eingegrenzt werden. Eine weitere Maßnahme zur Reduktion kann durch die *Lokalitätsannahme* erreicht werden, die davon ausgeht, dass bei Mehrfach-Ausfällen stets benachbarte Knoten betroffen sind. Für die rechnergestützte Automatisierung der Eingrenzung der durch Simulation bewerteten Szenarien bieten sich regelbasierte Verfahren an.

Die Güte der erhaltenen Verlässlichkeitssage kann dabei durch folgende Fehler beeinträchtigt werden:

- **Konzeptioneller Fehler**

Ein *konzeptioneller Fehler* liegt vor, falls das konzeptionelle Modell das Verhalten des realen Systems nicht angemessen widerspiegelt (vgl. dazu Kap. 5).

- **Simulationsfehler**

Bei einem *Simulationsfehler* liefert das Simulationsprogramm fehlerhafte Zielmesswerte für bewertete Szenarien. Dies kann zum einen daran liegen, dass bei der Abbildung des konzeptionellen Modells auf ein Simulationsprogramm ein Fehler eingetreten ist (*externer Simulationsfehler*, vgl. Kap. 6) oder aber daran, dass das Simulationsprogramm in sich fehlerhaft arbeitet (*interner Simulationsfehler*).

- **Bewertungsfehler**

Ein *Bewertungsfehler* tritt ein, wenn durch falsche Wahl der Gewichte eine Unter- oder Überbewertung von Szenarien eintritt.

- **Unterlassungsfehler**

Bei einem *Unterlassungsfehler* werden relevante Szenarien nicht als solche erkannt.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

Die Verlässlichkeitsanalyse technischer Systeme verfolgt das Ziel, Aussagen über die Bereitschaft zur Erbringung spezifizierter Leistungen zu gewinnen. Ausgangspunkt der Bewertung der Verlässlichkeit ist in der Regel ein Fehlermodell, das auf empirischen Häufigkeitsangaben oder theoretischen Schätzwerten aufbaut und die Menge der potentiellen Fehler des Systems zusammenfasst. Ausgehend von Prognosen über das Systemverhalten im Ausfallzustand, die wiederum auf empirischem oder auf theoretischem Weg gewonnen werden müssen, können dann durch den Einsatz statistischer Verfahren Aussagen über die Systemverlässlichkeit gewonnen werden.

Die vorliegende Arbeit zeigt, wie Simulationsmethoden zur Verlässlichkeitsanalyse paketvermittelnder Netzwerke eingesetzt werden können. Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Bewertungsverfahren unterteilt den Bewertungsvorgang in zwei Schritte, die *Leistungsanalyse* und die *statistische Analyse*.

Im Rahmen der Leistungsanalyse wird das Systemverhalten mit Hilfe eines Systemmodells nachgebildet und in speziellen *Ausfall-Szenarien* analysiert. Durch den Einsatz simulativer Methoden kann eine aufwändige und kostspielige physikalische Modellierung und Untersuchung umgangen werden. Im Rahmen der Arbeit wird ein neues konzeptionelles Modell erarbeitet, das die Einflussfaktoren für die Verlässlichkeit paketvermittelnder Netzwerke in sechs *Determinanten der Netzwerkverlässlichkeit* gliedert: Die *Topologie*, die *Hardware*, die *Software* und der Faktor *Humanware* bilden die *Netzwerk-Architektur*, die Determinanten *Lastprofil* und *Ausfallprofil* bilden die *Netzwerk-Umgebung*.

Innerhalb der statistischen Analyse werden die einzeln untersuchten Ausfall-Szenarien zusammengeführt und aus ihnen eine System-Verlässlichkeitsaussage abgeleitet. Besondere Beachtung muss hierbei der Auswahl der simulativ untersuchten Ausfall-Szenarien und damit der Behandlung des Zustandsraumes potentieller Ausfälle gewidmet werden. Im Rahmen der Arbeit wird an Hand der eingeführten Klassifizierung in *relevante* und *irrelevante Szenarien*, in *Schadens-Szenarien* und *Nicht-Schadens-Szenarien* und in *bewertete* und *nicht bewertete Szenarien* eine Vorgehensweise zur Auswahl von Szenarien nahegelegt.

Mit Hilfe des geschaffenen Simulationswerkzeugs wird in dieser Arbeit ein spezieller, für die Dimensionierung paketvermittelnder Netzwerke relevanter Aspekt der Leistungsanalyse vertieft untersucht: Das Verhalten langzeitabhängiger Verkehrsströme in der Situation des Ausfalls von Netzwerk-Komponenten. Damit wird eine Brücke zwischen dem Telematik-Teilgebiet Traffic Engineering (Langzeitabhängigkeit und Selbstähnlichkeit von Verkehrsströmen) und der stochastischen Netzwerkverlässlichkeitsanalyse geschaffen.

Die Entdeckung der Langzeitabhängigkeit von Verkehrsströmen in Datennetzen geht zurück auf Untersuchungen in lokalen Netzen aus dem Jahr 1993 und stellt einen Meilenstein der Telematik dar. Aus heutiger Sicht kann man sagen, dass Langzeitabhängigkeit eine dominante Eigenschaft von Verkehrs-

träumen in paketvermittelnden Netzwerken darstellt, die in praktisch jeder paketvermittelnden Netzwerk-Architektur beobachtet werden kann. Die Entdeckung der Eigenschaft war verbunden mit weitreichenden Konsequenzen im Hinblick auf die Prognosefähigkeit von analytischen Modellen und von Simulationsmodellen für die Leistungskenngrößen paketvermittelnder Netzwerke wie Paketverlustrate, Paketlaufzeit und verfügbare Bandbreite: So resultieren die vor Entdeckung der Langzeitabhängigkeit verwendeten Erlang-Modelle aus dem Bereich der Sprachtelefonie in der Regel in viel zu optimistischen Prognosen bezüglich der genannten Kenngrößen und sind auf Datennetze daher nicht ohne Einschränkung anwendbar.

Bei den im Rahmen der Arbeit durchgeführten Untersuchungen werden Verkehrsströme auf Netzwerk-Verbindungsleitungen untersucht. Die Kerneigenschaft der Verkehrsgeneratoren, die bei den Simulationsversuchen eingesetzt werden, ist dabei die statistische Verteilung der Verbindungsduern, die in Form einer heavy-tailed-Eigenschaft vorliegt. Diese Eigenschaft ist der wesentliche Unterschied zwischen den klassischen Erlang-Modellen für Sprachverkehr in leitungsvermittelnden Telekommunikationsnetzen und den Verkehrsmodellen in Datennetzen.

Neben den ersten Momenten von Verkehrsströmen, die eine Antwort auf die Frage geben, wieviel Bandbreite im Mittel auf einer Verbindungsleitung benötigt wird, werden bei den Simulationsversuchen schwerpunktmäßig die Autokorrelation und die skalierten Varianzen, ein Maß für die Variabilität eines Verkehrsstromes über der Zeit, untersucht. Diese zweiten Momente von Verkehrsströmen sind wichtige Indikatoren für das Schwankungsverhalten von Verkehrsströmen und besitzen unmittelbare Auswirkungen auf die bereits genannten Leistungskenngrößen Paketverlustrate, Paketlaufzeit und verfügbare Bandbreite.

Die wesentlichen Erkenntnisse im Rahmen der Arbeit durchgeführten Simulationsversuche betreffen die Punkte

- *Veränderung der Autokorrelation und der skalierten Varianzen innerhalb eines Netzwerks bei Eintreten eines Ausfalls*
- *Multiplexing-Verlust an Variabilität bei Überlagerung von Verkehrsströmen durch Pufferung*
- *Minderung der Variabilität von Verkehrsströmen durch Herabsetzung der mittleren Sende-Datenrate*
- *Reduktion der Langzeitabhängigkeit durch Unterteilung von Verbindungen in mehrere Abschnitte und disjunktes Mehrpfad-Routing für die einzelnen Abschnitte*

und sind in Kapitel 7 im Detail erläutert.

Die Untersuchungen, die in dieser Arbeit durchgeführt wurden, eröffnen den Zugang zu einer Reihe weiterführender Fragestellungen. Neben den bereits in Abschnitt 7.9 aufgeführten Themenpunkten, dem *Einfluss von Routing-Verfahren auf die zweiten Momente*, der *simulativen Untersuchung der Leistungskenngrößen Paketlaufzeit und Paketverlustrate im Rahmen von Gesamtnett-Betrachtungen*, dem *Einfluss der Transportprotokolle auf die Langzeitabhängigkeit und der Erweiterung des Verkehrsmodells in Bezug auf Heterogenität* soll abschließend auf einen weiteren interessanten Punkt eingegangen werden, die *Bildung stochastischer Ausfallprofile für Angriffe*. Erfahrungen aus dem Betrieb paketvermittelnder Netzwerke haben gezeigt, dass deren Verlässlichkeit in zunehmendem Maße durch bewusste Angriffe beeinträchtigt wird. Charakteristisch für das Systemverhalten als Folge eines Angriffs ist die gleichzeitige Nichtverfügbarkeit einer ganzen Reihe von Netzwerk-Komponenten. Dieser Umstand wird von den etablierten stochastischen Modellen für Ausfälle in Netzwerken nicht angemessen berücksichtigt. Die Frage, welche Komponentenmengen von Angriffen betroffen sind und wie sich solche Mengen mit Hilfe stochastischer Methoden beschreiben lassen, stellt einen lohnenswerten Ansatzpunkt für weitergehende Forschungsaktivitäten dar.

Teil IV

Anhang

Anhang A

Aufbau der eigenen Simulationsumgebung mit OMNET++

Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Simulationsexperimente wurden mit Hilfe der Simulationsumgebung OMNET++ (**O**bjective **M**odular **N**etwork **T**estbed in C++) realisiert [Tec01]. Bei OMNET++ handelt es sich um eine objekt-orientierte Simulationsumgebung für diskrete ereignisorientierte Simulation, die im Besonderen für die Modellierung von Kommunikationsprotokollen, Computer-Netzwerken, Multiprozessor-Anlagen und verteilten Systemen geeignet ist.

Ein OMNET++-Simulationsmodell besteht aus einer Menge von hierarchisch geordneten *Modulen*. Es gibt drei Arten von Modulen: Das *System-Modul*, zusammengesetzte Module [compound modules] und *einfache* Module [simple modules]. Das System-Modul beschreibt die oberste Hierarchieebene des Simulationsmodells. Es enthält zusammengesetzte Module und einfache Module. Zusammengesetzte Module dienen ausschließlich der Strukturierung von Simulationsmodellen, die Funktionalität der simulierten Komponenten ist hingegen in den einfachen Modulen enthalten.

Die Kommunikation zwischen Modulen findet durch *Nachrichtenaustausch* statt. Nachrichten werden entweder über einen vordefinierten Weg oder aber direkt vom Sendermodul zum Empfängermodul übertragen. Wege bestehen dabei aus *Verbindungsleitungen* [links] und *Pforten* [gates]. Pforten sind richtungsgesunden und stellen die Ein- und Ausgangsschnittstellen eines Moduls dar. Nachrichten werden durch Eingangspforten empfangen und durch Ausgangspforten abgesendet.

A.1 Modulstruktur

Abbildung A.1 zeigt die Modulstruktur der in dieser Arbeit verwendeten Simulationsmodelle in einem Klassendiagramm. Jedes Modul entspricht einer *Klasse*. Die Klassen `Base_Generator` und `Base_Control` sind Oberklassen und beinhalten gemeinsame Funktionalität der Unterklassen `Generator_BE/Generator_RT` bzw. `Control/System_Control`.

Die Funktionalität der Module lässt sich im Einzelnen wie folgt beschreiben:

- **System**

Das System-Modul ist ein zusammengesetztes Modul und enthält alle anderen Module des Simulationsmodells.

- **Globales Kontrollzentrum [System_Control]**

Die Aufgabe dieses Moduls ist die Verwaltung von Subnetz-übergreifenden, d. h. globalen Verkehrs- und Routing-Informationen (vgl. Abschnitt 5.3.5).

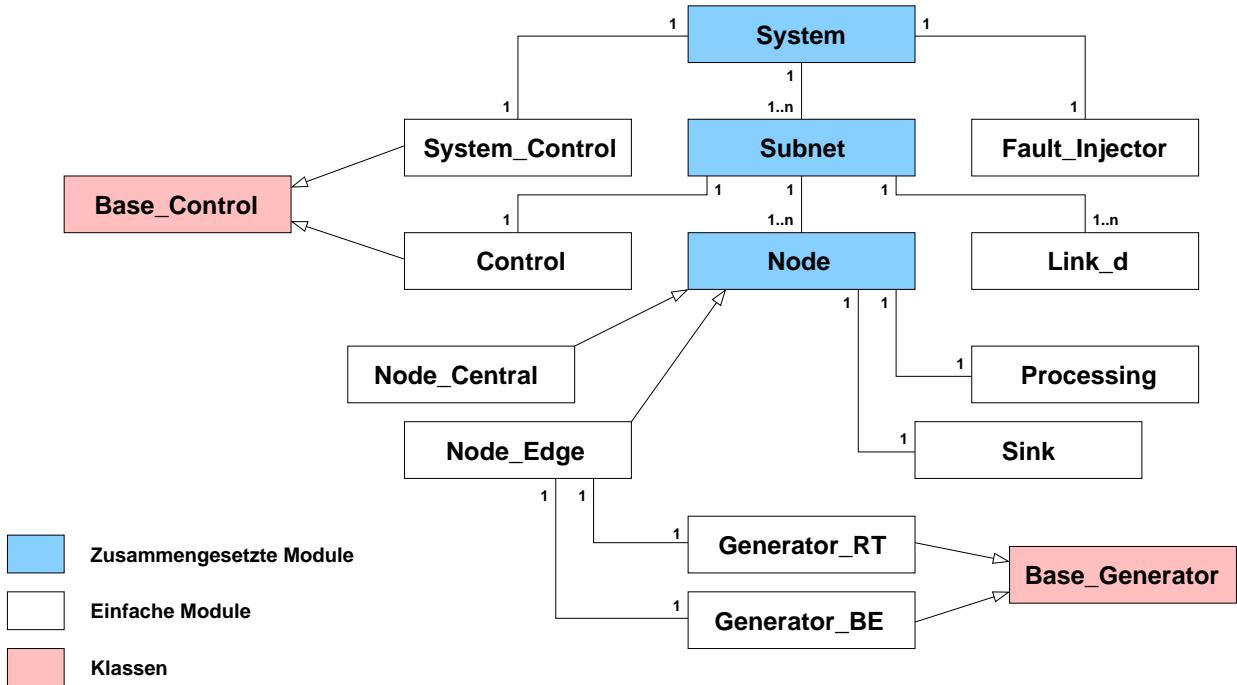


Abbildung A.1: OMNET++ Module

- **Subnetz [Subnet]**

Subnetz-Module dienen der Modularisierung des Simulationsmodells und sind zusammengesetzte Module. Die Ein- und Ausgangspforten eines Subnetzes werden mit `phy_in[0] ... phy_in[m]` bzw. `phy_out[0] ... phy_out[n]` bezeichnet (vgl. auch Abbildung A.3).

- **Lokale Kontrollzentren [Control]**

In lokalen Kontrollzentren werden Subnetz-interne Verkehrs- und Routing-Informationen verwaltet (vgl. Abschnitt 5.3.5).

- **Knoten [Node]**

Knotenmodule sind einfache Module und repräsentieren die VNKs des Netzwerkes. Die Ein- und Ausgangspforten von Knoten tragen die Bezeichnungen `log_in[0] ... log_in[m]` bzw. `log_out[0] ... log_out[n]` (vgl. auch Abbildung A.2).

- **Verbindungsleitungen [Link]**

Verbindungsleitungen sind einfache Module. OMNET++ stellt standardmäßig Verbindungsleitungen mit den drei Parametern Bandbreite [datarate], Fehlerrate [error] und Latenz [delay] zur Verfügung ([Tec01], Kap. 4). Die in diesem Standard vorgesehene Modellierung reicht jedoch für die in dieser Arbeit durchgeführten statistischen Verkehrsmessungen nicht aus. Deshalb werden Verbindungsleitungen als separate (einfache) OMNET++-Module eingeführt.

- **Generatoren [Generator_BE, Generator_RT]**

Die Generator-Module `Generator_BE` und `Generator_RT` dienen der Erzeugung von kurzzeitabhängigem und langzeitabhängigem Verkehr. Dabei werden Datenpakete generiert, die dann anschließend durch das Netzwerk zum Empfänger-Modul gesendet werden. Über die erzeugten Pakete werden statistische Angaben aufgezeichnet und nach Abschluss eines Simulationslaufes ausgewertet.

- **Fehler-Injektor [Fault_Injector]**

Die Simulation von Ausfällen ist Aufgabe des Fehler-Injektors. Dabei werden zu deterministi-

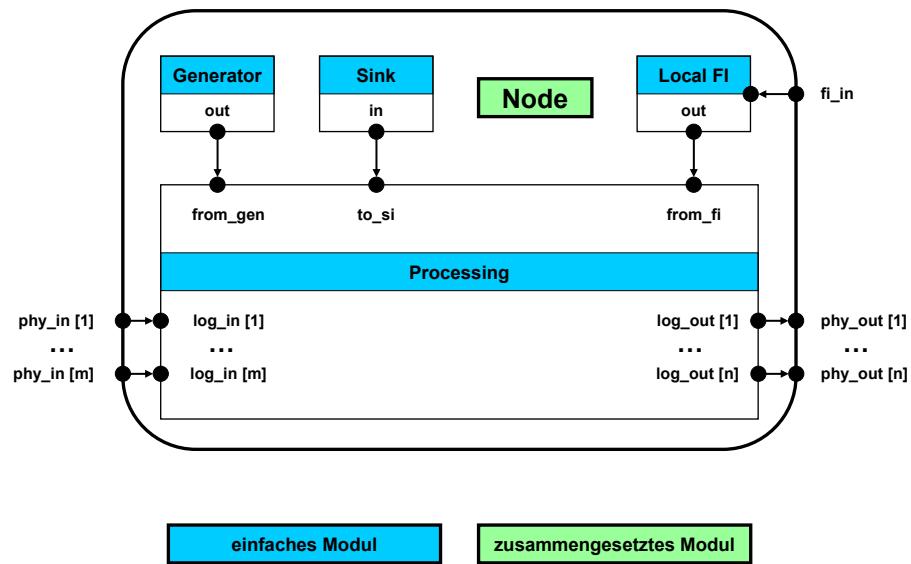


Abbildung A.2: OMNET++ Knotenmodule

schen oder zufallsabhängigen Zeitpunkten Ausfälle von Knoten und Verbindungsleitungen injiziert. Nach erfolgter Reparatur werden zuvor ausgefallene Komponente wieder in Betrieb genommen, d. h. Betriebsdauern und Störungsdauern wechseln einander ab (vgl. Abschnitt 5.6).

- **Verarbeitung [Processing]**

Im Verarbeitungs-Modul werden folgende Aufgaben durchgeführt:

- *Bearbeitung von Signalen*
Zu den bearbeiteten Signalen gehören Signale für den Verbindungsaufbau und -abbau (Generatoren), Signale zur Aktualisierung von Routing-Informationen (durch Kontrollzentren generiert) und Signale für das Eintreten von Ausfällen und die Beendigung einer Reparatur (Signale des Fehler-Injektors, vgl. auch Abschnitt A.4).
- *Verkehrslenkung [Routing]*
- *Warteschlangen-Management [Queueing]*
- *Bedienung [Service]*

- **Senke [Sink]**

Senken bilden das Gegenstück zu Generatoren und dienen dazu, Pakete aufzunehmen und statistische Angaben über das Verhalten des empfangenen Verkehrs aufzuzeichnen.

A.2 Adressierungsschema

Zur Identifikation der Netzwerk-Knoten wird ein Adressierungsschema verwendet, welches jedem Knoten und jedem Subnetz eine eindeutige Adresse zuordnet (vgl. Abb. A.4). Adressen sind ähnlich wie IP-Adressen (vgl. [Com00]) aufgebaut. Eine Adresse ist ein n -Tupel positiver ganzer Zahlen, dessen Elemente durch Punkte voneinander getrennt werden. Beispiele für eine Knoten- bzw. eine Subnetz-Adresse sind

1.2.1.5 und 2.3.0.

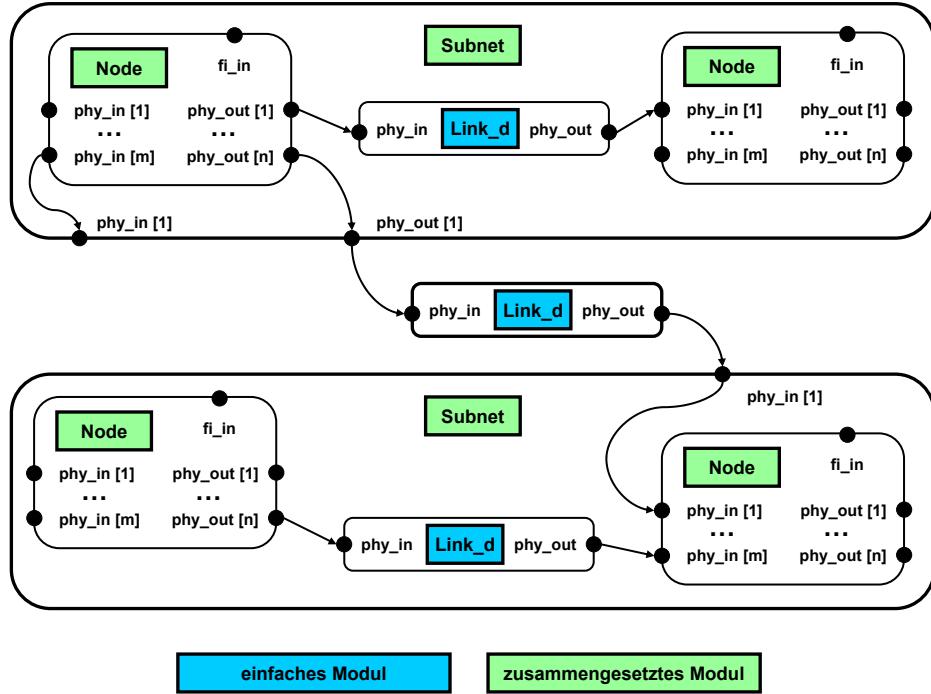


Abbildung A.3: OMNET++ Modulverbindungen

Subnetz-Adressen zeichnen sich dadurch aus, dass die letzte Stelle eine Null enthält. Zugehörige Subnetz-Knoten enthalten statt der Null eine positive ganze Zahl. So gehören z. B. die Knoten

1.2.1, 1.2.2 und 1.2.3

zum Subnetz 1 . 2 . 0. Im Gegensatz zu IP-Adressen ist die Anzahl der Adressstellen nicht fest. Aus der Anzahl der Adressstellen können direkt die Hierarchieebene und die hierarchische Eingliederung des Subnetzes bzw. Knotens in das Gesamtnetz abgelesen werden. Beispielsweise ist das Subnetz 1 . 2 . 0 ein Teilnetz des Subnetzes 1 . 0 und das Subnetz 1 . 3 . 1 . 0 ist ein Teilnetz des Subnetzes 1 . 3 . 0.

A.3 Generierung des Netzwerkes

Der Ablauf der Erstellung eines Simulationsmodells in OMNET++ ist in den Abbildungen A.5 und A.6 dargestellt: Ausgangspunkt ist hierbei die formale Beschreibung der Netzwerk-Topologie. Der eigent-

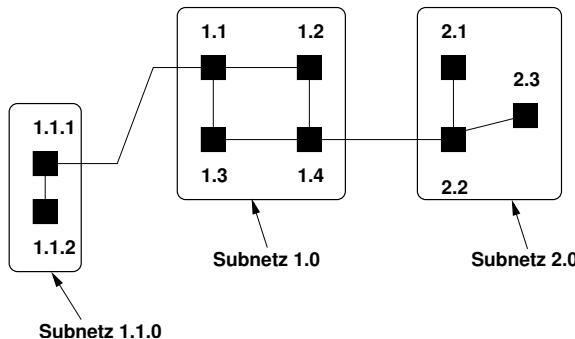


Abbildung A.4: Adressierungsschema

liche Aufbau des Netzwerkes, d. h. die Erzeugung der im Netzwerk enthaltenen Module, kann zu zwei verschiedenen Zeitpunkten erfolgen:

- zur Übersetzungszeit
- zur Laufzeit.

A.3.1 Beschreibung der Netzwerk-Topologie

Die Netzwerk-Topologie wird mit Hilfe von *Subnetz-Beschreibungs-Dateien (SBDs)* formuliert, wobei jedes Subnetz durch eine SBD dargestellt wird. Eine SBD umfasst folgende Angaben:

- *Topologie des Subnetzes*

Die Topologie beinhaltet die Anzahl der Knoten und die Menge der Subnetz-internen Verbindungsleitungen zwischen den Knoten sowie deren Leistungseigenschaften (Latenz, Bandbreite).

- *Typ der Netzknoten*

Jedem Netzknoten kann ein vordefinierter Typ zugeordnet werden, mit dem die Leistungsparameter des Knotens und die Information, ob es sich um einen Randknoten (aktiven Knoten) oder einen Zentralknoten (passiven Knoten) handelt, näher spezifiziert werden können (vgl. Abschnitt 5.3.2).

- *Menge der externen Verbindungen*

Neben den internen Verbindungsleitungen (Verbindungsleitungen zwischen Knoten des Netzwerkes) können externe Verbindungsleitungen zu anderen Subnetzen definiert werden.

Nachfolgendes Beispiel einer SBD beschreibt das Subnetz 1 . 0 aus Abbildung A.4

```
BEGINDEF
NODETYPES
0 1 0 0
TOPOLOGY
0 100 100 0
100 0 0 100
100 0 0 100
0 100 100 0
EXTERNALLINKS
1.1 1.1.1 1000
1.4 2.2 1000
ENDDEF
```

Der Inhalt der SBD wird von den Literalen BEGINDEF und ENDDEF eingeschlossen. Im Abschnitt NODETYPES werden die Typen der Knoten (hier aktiv oder passiv) angegeben. Die im darauf folgenden Abschnitt TOPOLOGY angegebene Matrix legt die Subnetz-Topologie und die Bandbreiten der Subnetz-Verbindungsleitungen fest. Der letzte Abschnitt EXTERNALLINKS definiert die externen Verbindungsleitungen und die dazugehörigen Bandbreiten.

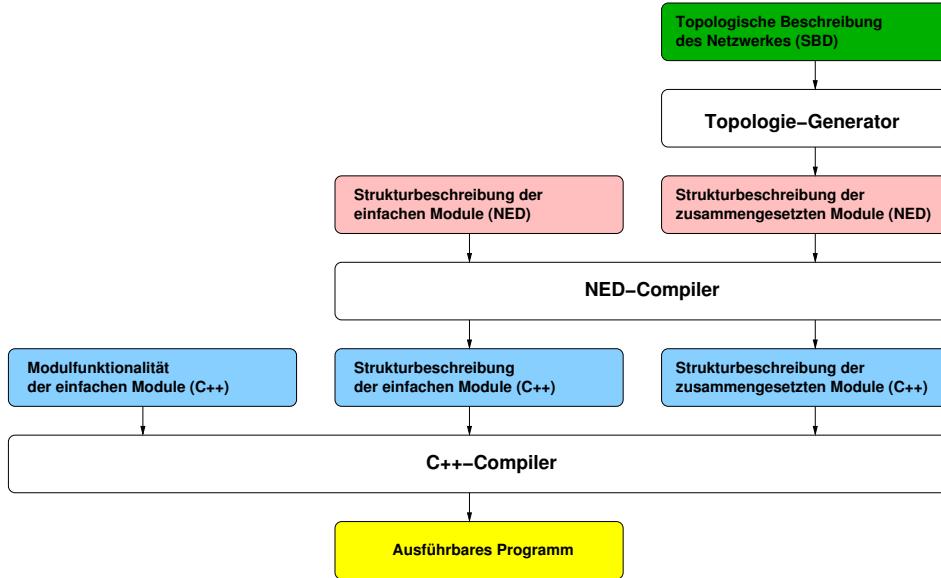


Abbildung A.5: OMNET++ Topologie-Generierung zur Übersetzungszeit

A.3.2 Generierung des Netzwerkes zur Übersetzungszeit

Bei der Generierung des Netzwerkes zur Übersetzungszeit werden die SBDs der Subnetze in eine *Strukturbeschreibung* übersetzt, die aus zusammengesetzten Modulen besteht. Diese Strukturbeschreibung wird in der Sprache NED (NEtwork Description) abgefasst [Tec01]. Die NED-Strukturbeschreibung besteht aus den in einem Modul enthaltenen Submodulen und den Schnittstellen eines Moduls. Bei den vorliegenden Untersuchungen wird diese Übersetzung mit Hilfe eines Skriptes in der Programmiersprache Perl vorgenommen. Die Strukturbeschreibung der einfachen Module wird direkt in NED verfasst (vgl. Abbildung A.5).

Die NED-Strukturbeschreibungen für die einfachen und die zusammengesetzten Module werden vom NED-Compiler nach C++ übersetzt. Neben den strukturellen Beschreibungen wird für die einfachen Module eine *Funktionalitätsbeschreibung* benötigt. Diese ist in C++ implementiert. Da die zusammengesetzten Module nur der Gliederung des Simulationsmodells dienen, ist eine Funktionalitätsbeschreibung für diese Modularart nicht erforderlich.

Bei der Generierung zur Übersetzungszeit existieren sowohl die einfachen Module als auch die zusammengesetzten Module des simulierten Netzwerkes bereits zum Zeitpunkt der Übersetzung der in C++ gegebenen Beschreibung der Simulation.

A.3.3 Generierung des Netzwerkes zur Laufzeit

Die Netzwerk-Generierung zur Laufzeit ist in Abbildung A.6 dargestellt. Die SBDs werden bei dieser Variante erst zur Laufzeit gelesen und verarbeitet. Vergleicht man die Generierung zur Übersetzungszeit mit der Generierung zur Laufzeit, so sind folgende Eigenschaften beider Varianten von Bedeutung:

- Größe des erzeugten C++-Quellcodes
- Dauer der Übersetzung
- Benötigter Hauptspeicher während des Versuchslaufes
- Leistung des erzeugten Simulationsprogrammes

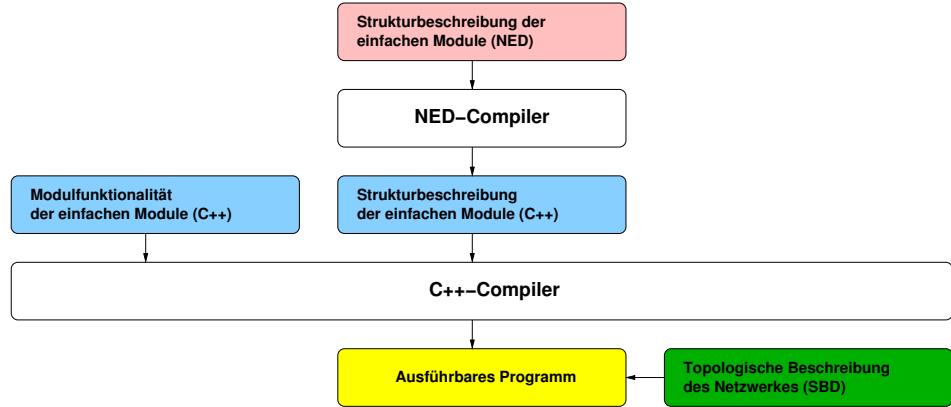


Abbildung A.6: OMNET++ Topologie-Generierung zur Laufzeit

Die praktischen Simulations-Erfahrungen belegen, dass die Generierung zur Laufzeit für kleine und mittlere Simulationsversuche bis zu einer Größe von ca. 10 Netzknopen keine wesentlichen Vorteile gegenüber der Generierung zur Übersetzungszeit bietet. Für eine skalierbare Simulationsumgebung hingegen ist die Generierung zur Laufzeit unverzichtbar.

A.4 Signalisierungsabläufe

Bei Leistungsanalysen in Netzwerken spielen die Laufzeiten von Signalen in der Regel eine gewichtige Rolle. Bei den hier durchgeföhrten Simulationsversuchen wird eine Vereinfachung vorgenommen, die darin besteht, dass die Signallaufzeiten gleich Null betragen. Diese Vereinfachung ist gerechtfertigt im Hinblick auf das Verhältnis der Größe von Laufzeiten zu den Verbindungsduern und den unerheblichen Einfluss, den die Signallaufzeiten auf die im Rahmen der Simulation untersuchten Zielgrößen besitzen.

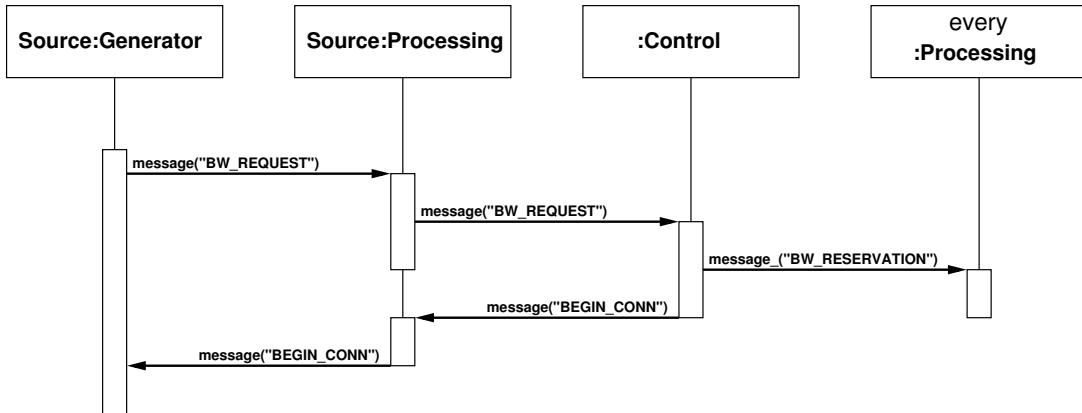


Abbildung A.7: Erfolgreicher Verbindungsaufbau bei Echtzeitverbindungen

Die Abbildungen A.7 bis A.9 zeigen den Verbindungsaufbau bei Echtzeitverbindungen. Dabei wird geprüft, ob eine Verbindung mit der vom Sender angeforderten Bandbreite zum Empfänger verfügbar ist. Der Generator sendet eine BW_REQUEST-Anfrage über die verarbeitende Einheit an das lokale Kontrollzentrum. Falls eine Subnetz-externe Verbindung aufgebaut werden soll, wird das Signal an das globale Kontrollzentrum gesendet, woraufhin zunächst eine globale Ressourcenprüfung durchgeführt wird, an die sich bei Erfolg eine lokale Prüfung in den beteiligten Subnetzen anschließt (in der Abbildung nicht

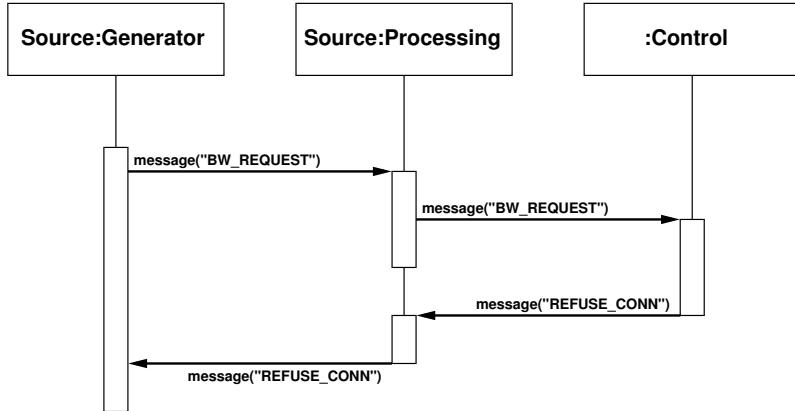


Abbildung A.8: Erfolgloser Verbindungsaufbau bei Echtzeitverbindungen

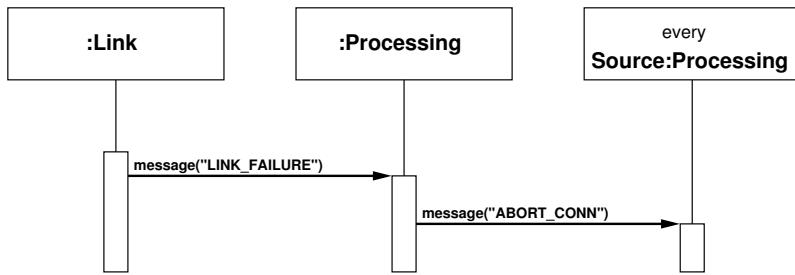


Abbildung A.9: Verbindungsabbruch bei Echtzeitverbindungen

dargestellt). Nach erfolgreicher Prüfung der vorhandenen Ressourcen erhalten alle verarbeitenden Einheiten auf dem Pfad zwischen Sender und Empfänger ein **BW_RESERVATION**-Signal, mittels dem die Kanaltabellen entsprechend angepasst werden können. Ist ein Etablieren eines Pfades mit der geforderten Bandbreite nicht möglich, so sendet das Kontrollzentrum ein **REFUSE_CONN**-Signal an den Sender-Generator und der Verbindungsauftau findet nicht statt. Dieser Vorgang kann mit dem Blockieren in einem leitungsvermittelnden Telefonnetz verglichen werden.

Der Ablauf bei der Aktualisierung von Routing-Tabellen ist in Abbildung A.10 dargestellt. Das globale Kontrollzentrum sendet Signale zur Aktualisierung der Routing-Tabellen in den Subnetzen (**RT_UPDATE**) und eigene globale Routing-Informationen (**RT_INFO_GLOBAL**) an die Subnetze. In beiden Fällen werden die in den Subnetzen gehaltenen Routing-Informationen daraufhin aktualisiert.

A.5 Komplexitätsabschätzung

Bei der praktischen Durchführung von Simulationsversuchen ist eine Abwägung des *Rechenzeitbedarfes* sinnvoll. Auf einem Rechner, der mit einer CPU des Typs AMD Thoroughbred 2400+ und ausreichender Hauptspeicherkapazität ausgestattet ist, wird für einen einzelnen Simulationslauf für einen Ring aus vier Knoten bei der in Abschnitt 6.2.2 eingeführten Standard-Parameterkonfiguration eine Rechenzeit von ca. 2 h gemessen; ein Simulationslauf des Hauptnetzwerkes benötigt hingegen ca. 30 h.

Ziel der nachfolgenden Betrachtungen ist die Abschätzung der Rechenzeit in Abhängigkeit der Netzgröße, welche hier durch die Anzahl der Knotenpunkte ausgedrückt wird. Die Rechenzeit setzt sich im Wesentlichen aus drei Komponenten zusammen:

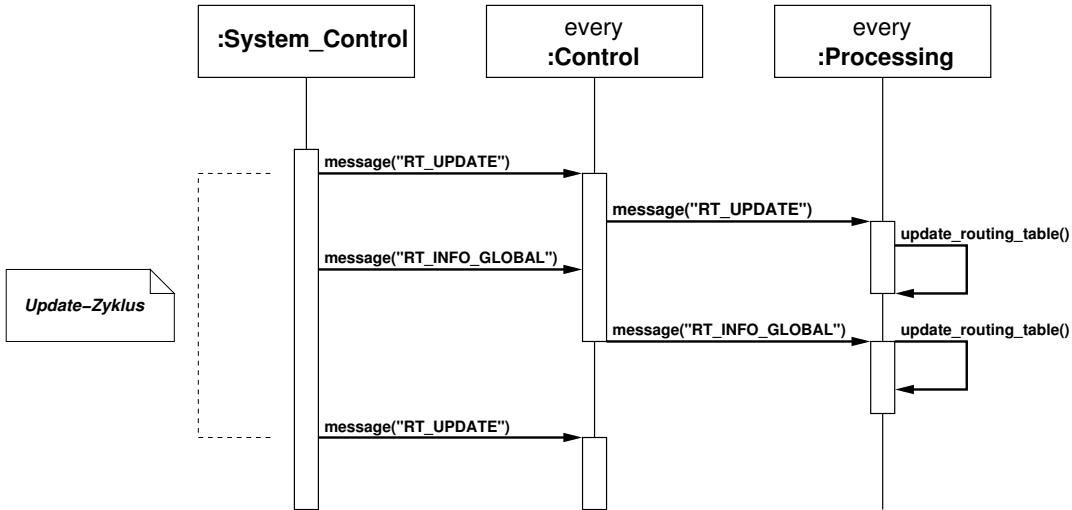


Abbildung A.10: Aktualisierung der Routing-Tabellen

- **Verkehrsgenerierung**

Der Generierungsaufwand kommt durch das dynamische Erzeugen von Paketobjekten in den Generatoren zustande und lässt sich durch die Formel

$$n \cdot f \cdot \gamma$$

beschreiben, wobei n die Anzahl aktiver verkehrsgenerierender Knoten, f die Paktfrequenz¹ und γ den Generierungsaufwand für ein einzelnes Paket darstellt.

Der Vernichtungsaufwand, d. h. der Aufwand, der in den Senken bei der Freigabe des Speicherplatzes der dynamisch generierten Paketobjekte anfällt, besitzt dieselbe Größenordnung $O(n)$ wie der Generierungsaufwand.

- **Paketbearbeitung**

Sei α der atomare Paketbearbeitungsaufwand, d. h. der Aufwand, der für die Weiterleitung eines einzelnen Paketes von der Ankunft an der Eingangsleitung eines VNKs zur Ankunft an der Eingangsleitung des benachbarten VNKs notwendig ist. Dieser setzt sich zusammen aus dem **Vermittlungsaufwand** in den VNKs und dem **Warteschlangen-Aufwand** in den Verbindungsleitungen. Die einzelnen Bestandteile sind die Auswertung des Paketkopfes, das Auslesen der Routing- bzw. Kanaltabelle, das Verschieben des Paketes innerhalb der Ausgangs-Warteschlange und das Verschieben des Paketes innerhalb der Ausgangs-Verbindungsleitung.

Der Aufwand für die Paketbearbeitung hängt vom Routing-Verfahren, vom Zielverhalten (vgl. Abschnitt 5.5) und von der Topologie ab. Bei einem Kürzeste Wege Routing-Verfahren und einer globalen Zielstrategie nimmt die Rechenzeit für die Paketbearbeitung in einem vollvermaschten Netzwerk linear mit der generierten Verkehrsmenge zu. In weniger dichten Topologien steigt der Rechenzeitbedarf für die Paketbearbeitung unter den getroffenen Annahmen mit der Anzahl der Knoten superlinear, da ein Paket auf dem Weg vom Sender zum Empfänger im Vergleich zu einem vollvermaschten Netzwerk mehrere Knotenpunkte durchläuft und der Vorgang der Paketbearbeitung in jedem Knoten erneut anfällt. Dabei kann die **mittlere Anzahl durchlaufener Knotenpunkte vom Sender zum Empfänger m** zur Abschätzung des Rechenzeitbedarfes (vgl. dazu die in Anhang C beschriebenen Abschätzungen für Ringtopologien) eingesetzt werden und man hat in

$$n \cdot f \cdot \alpha \cdot m$$

¹Die Paktfrequenz beschreibt die Menge der pro Zeiteinheit generierten Pakete; diese ist durch v/s gegeben, wenn v die pro Zeiteinheit generierte Verkehrsmenge und s die Paketgröße ist.

eine Näherung für den Paketbearbeitungsaufwand. Ersetzt man den Wert m durch den Durchmesser der untersuchten Topologie, so gelangt man zu einer oberen Schranke für den Paketbearbeitungsaufwand.

- **Berechnung der Routing-Tabellen**

Die Berechnung der Routing-Tabellen erfordert in periodischen Abständen Rechenzeit. Sei ρ_i , $i = 1, \dots, n_{Sub}$ der erforderliche Aufwand für die Berechnung der Routing-Tabelle in Subnetz i und F die Berechnungs-Frequenz, d. h. die Anzahl der Routing-Tabellen-Berechnungen pro Zeiteinheit.

Dann ist der Routing-Aufwand gegeben durch

$$F \cdot \sum_{i=1}^{n_{Sub}} \rho_i.$$

Zur Berechnung der kürzesten Wege innerhalb von Subnetzen wird ein modifiziertes Dijkstra-Verfahren mit einer Komplexität von $O(n_i^3)$ verwendet, wobei n_i , $i = 1, \dots, n_{Sub}$ die Anzahl der Knotenpunkte des Subnetzes i beschreibt. Damit hat man $O(n_{max}^3)$ als obere Schranke für die Abschätzung des Routing-Aufwands, wenn n_{max} die maximale Größe eines Subnetzes innerhalb der untersuchten Topologie bezeichnet.

A.6 Praktische Erfahrungen beim Erstellen des Simulationswerkzeuges

Bei der Durchführung von Simulations-basierten Untersuchungen entfällt ein nicht zu vernachlässigender Anteil des zeitlichen Aufwands auf die *Implementierung*, das *Testen* und das *Ändern* des erzeugten Programmcodes. Bei der Programmierung von Simulationsmodellen kommt der *Performanz* des lauffähigen Programms im Hinblick auf die Geringhaltung der Laufzeit eine besondere Bedeutung bei.

Innerhalb der drei genannten Phasen der Erstellung des Simulationswerkzeuges (vgl. Abschnitt 4.7.2) haben einige Gesichtspunkte der *Organisation der Programmentwicklung* eine besondere Berücksichtigung erfahren, die sich während der Implementierungsarbeiten aus praktischen Erfahrungen ergeben haben:

- *Einbeziehung von Hilfskräften in den Software-Entwicklungsprozess*

Die im Rahmen der Arbeit erforderlichen Implementierungsarbeiten wurden zum Teil mit Hilfe studentischer Hilfskräfte durchgeführt. Dabei haben sich eine Reihe von Regeln der Organisation der Zusammenarbeit herauskristallisiert, welche die *inhaltliche Abgrenzung der Implementierungsarbeiten* betreffen.

Die Arbeitszeit studentischer Entwickler kann untergliedert werden in die Phase der *Einarbeitung* und die Phase der *aktiven Programmentwicklung*. In Anbetracht der im Allgemeinen geringen Programmiererfahrung und des reduzierten Hintergrundwissens studentischer Hilfskräfte ist es sinnvoll, Arbeiten mit geringem Schwierigkeitsgrad erledigen zu lassen. Der Schwierigkeitsgrad aus Sicht des Entwicklers ist dabei im Wesentlichen bestimmt durch die Menge der für das Verständnis der Anbindung an das Gesamt-Softwaresystem erforderlichen Information, die programmiertechnischen Erfordernisse und das technische Hintergrundwissen zur Erledigung der gestellten Aufgabe. Bei diesen drei Kernkomponenten lässt sich jeweils unterscheiden zwischen der *Schwierigkeitsbreite*, die die Menge der erforderlichen Informationen beschreibt und der *Schwierigkeitstiefe*, welche deren Komplexität kennzeichnet.

Die Gefahr eines zu niedrig angesetzten Schwierigkeitsgrades besteht in der *Unterforderung*, dem entgegen steht die Möglichkeit, bei geringem Schwierigkeitsgrad die Motivation des Programmierers durch rasch eintretende Erfolgsergebnisse zu steigern was im Allgemeinen zu einer besseren Ausnutzung der Arbeitskraft führt.

Für die Abgrenzung der zu erledigenden Implementierungsarbeiten sind zwei zentrale Aspekte von Bedeutung: Die *Definition* von Schnittstellen und die *Modularisierung* des Gesamt-Softwaresystems. Dabei hat es sich als produktivitätsfördernd erwiesen, vor Durchführung der Implementierung eine präzise Beschreibung der Schnittstellen für die zu implementierenden Programm-Module zu definieren, anstatt eine rein funktionale Beschreibung (formal oder informell) vorzugeben, so dass der Programmierer die Schnittstellen im Verlauf der Entwicklung selbst definiert. Die Vorgabe geeigneter Schnittstellen ist im Allgemeinen nur durch das Verständnis großer Teile des Gesamt-Softwaresystems zu erreichen, was die Schwierigkeitsbreite für ein Studentenprojekt übersteigt. Weiterer entscheidender Schritt zur Reduzierung der Schwierigkeitsbreite ist die Modularisierung des Gesamt-Softwaresystems. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden z. B. der Fehler-Injektor und die Routinen zur Topologie-Generierung für die Erledigung von studentischen Hilfskräften ausgewählt. Beide Teile können aufgrund der vorgenommenen Modularisierung ohne Kenntnis der technisch anspruchsvolleren Kernfunktionalität des Simulators in den Modulen Verarbeitung und den Kontrollzentren implementiert werden.

- *Benutzung einer Versionskontrolle*

Änderungen innerhalb des erstellten Programmcodes sind im Verlauf der Entwicklung unabdingbar. Dabei tritt häufig der Fall ein, dass bereits vorgenommene Änderungen wieder revidiert werden müssen. Da eine manuelle Aufzeichnung vorgenommener Änderungen in der Regel zu aufwendig und zu fehleranfällig ist, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf das CVS-System [Con03] zurückgegriffen.

- *Automatisierung der Code-Generierung*

Moderne Entwicklungsumgebungen unterstützen den Programmierer in Vielerlei Hinsicht im unmittelbaren Umgang mit dem Programmtext wie z. B. durch die Bereitstellung der Signatur für benutzte Klassen, Prüfung und farbliche Hervorhebung der syntaktischen Struktur oder automatisches Formatieren des Programmtextes. Darüber hinaus sorgt eine automatische Prüfung der Abhängigkeiten zwischen den Quelltext-Modulen und den vom Kompilator daraus übersetzten Objekt-Modulen zur Beschleunigung des Übersetzungsvorganges. Damit wird erreicht, dass infolge einer Änderung des Programmtextes und anschließender Übersetzung nicht der gesamte Quelltext, sondern nur das geänderte Modul neu übersetzt werden muss. Dies gilt sowohl für den Übersetzungs- als auch für den Bindevorgang. Innerhalb der bei dieser Arbeit eingesetzten Linux-Umgebungen (redhat 7.2 und SuSE 8.2) wurde dazu das Kommando `make` verwendet [Rob99].

Zu einer wesentlichen Steigerung der Leistungsfähigkeit haben im Verlauf der Programmierung folgende vorgenommenen Änderungen am Programmcode beigetragen, wobei der Performanz-Gewinn jeweils durch einen Verlust an Information erkauft wird:

- *Minimierung der Laufzeitinformationen*

Während des Ablaufes des Simulationsprogramms lassen sich Informationen über den aktuellen Simulationszustand erzeugen und auf dem Bildschirm anzeigen. Dies ist insbesondere für die Entdeckung und Beseitigung von Programmfehlern zweckmäßig. Nach Beendigung der Testphase wurde die Ausgabe von Informationen über die Signalisierung komplett unterdrückt und die Menge der statistischen Informationen pro Verbindung derart reduziert, dass nicht jede einzelne, sondern nur jede hundertste Verbindung dokumentiert wird. Dadurch konnte auf einem AMD

Athlon 1700+-Rechner beim Zwei-Knoten-Elementarnetzwerk (vgl. Anhang C.1) in der Standard-Parameterkonfiguration eine Steigerung der Simulationsleistung von

$$1.2 \frac{s \text{ Simulationszeit}}{s \text{ Laufzeit}} \text{ auf } 1.9 \frac{s \text{ Simulationszeit}}{s \text{ Laufzeit}},$$

erreicht werden.

- **Verwendung schlanker Datenstrukturen**

Mit *schlank* sollen in diesem Zusammenhang Datenstrukturen verstanden werden, bei denen der *Darstellungsaufwand* (in kB) und der *Bearbeitungsaufwand* (in ms Rechenzeit) gering gehalten wird. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen.

*Im Verlauf der Untersuchungen wurde der Datentyp der Sender- und der Empfängeradresse innerhalb des Paketkopfes von const char * nach int (vgl. [Str91]) abgeändert. In der ersten Variante werden die Adressen als Zeichenketten mit dem Paket gespeichert. Die zweite Variante benutzt statt dessen die systemweit eindeutigen Identifikationsnummern des Sender- bzw. Empfängermoduls zur Addressierung.*

Da die Auswertung der Paketköpfe zwecks Routing innerhalb der Simulation zu den am häufigsten durchgeführten Operationen gehört und da die Bearbeitung einer Zeichenkette ein Vielfaches der Rechenzeit der Auswertung einer Integer-Zahl benötigt, konnte bei der im vorigen Punkt beschriebenen Standard-Konfiguration eine Steigerung der Simulationsleistung von

$$1.9 \frac{s \text{ Simulationszeit}}{s \text{ Laufzeit}} \text{ auf } 9.5 \frac{s \text{ Simulationszeit}}{s \text{ Laufzeit}},$$

also eine Beschleunigung um den Faktor ≈ 5 , erzielt werden.

Anhang B

Stochastische Hilfsmittel

B.1 Kenngrößen von Zufallsvariablen und Zeitreihen

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Begriffe und Zusammenhänge basieren auf [Sch01b] und sind den in dieser Arbeit verwendeten Bezeichnungen angepasst.

B.1.1 Kenngrößen von Zufallsvariablen

Definition B.1 Seien X und Y reelle Zufallsvariablen mit den Erwartungswerten $\mathbb{E}(X)$ und $\mathbb{E}(Y)$. Dann heißt der Wert

$$\text{Cov}(X, Y) := E([X - \mathbb{E}(X)] \cdot [Y - \mathbb{E}(Y)])$$

Kovarianz von X und Y .

Die Größe

$$\rho(X, Y) := \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\text{Var}(X) \cdot \text{Var}(Y)}$$

nennt man **Korrelation von X und Y** .

Die Korrelation zweier Zufallsvariablen ist ein Maß für die Tendenz zur linearen Abhängigkeit. Aus der Unabhängigkeit zweier Zufallsvariablen folgt deren Unkorreliertheit, die Umkehrung gilt im Allgemeinen nicht.

B.1.2 Kenngrößen von Zeitreihen

Definition B.1 Sei

$$X := (X_k, k \in \mathbb{N})$$

eine Zeitreihe.

a) Besitzen die Erwartungswerte von X die Eigenschaft

$$\mathbb{E}(X_k) = \mu \quad \forall k \in \mathbb{N}, \tag{B.1}$$

dann heißt X **mittelwertstationär**.

b) Verfügt X über die Eigenschaft

$$\text{Var}(X_k) = \sigma^2 \quad \forall k \in \mathbb{N}, \quad (\text{B.2})$$

so nennt man X **varianzstationär**.

c) Gilt für die Kovarianzen von X die Eigenschaft

$$\text{Cov}(X_k, X_{k+l}) = \text{Cov}(X_0, X_l) \quad \forall k \in \mathbb{N} \quad \forall l \in \mathbb{N}, \quad (\text{B.3})$$

so heißt X **kovarianzstationär**.

d) Eine Zeitreihe, welche die Eigenschaften a) - c) besitzt, heißt **stationär von zweiter Ordnung**.

Stationäre Zeitreihen zweiter Ordnung zeichnen sich dadurch aus, dass sowohl die Erwartungswerte als auch die Varianzen und Kovarianzen der Messwerte unabhängig vom Zeitpunkt k der Beobachtung sind.

Zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung von Zeitreihen werden häufig die beiden folgenden Abhängigkeitsmaße verwendet:

Definition B.2 Sei

$$X := (X_k, k \in \mathbb{N})$$

eine Zeitreihe, die stationär von zweiter Ordnung ist. Für $k \in \mathbb{N}$ gelte

$$\mathbb{E}(X_k) = \mu \text{ und } \text{Var}(X_k) = \sigma^2.$$

a) Dann heißt für $l \in \mathbb{N}$ der Wert

$$R(l) := E([X_k - \mu][X_{k+l} - \mu])$$

Autokovarianz von X zum Lag l

b) Der Wert

$$\rho(l) := \frac{R(l)}{R(0)} = \frac{R(l)}{\sigma^2}$$

heißt **Autokorrelation von X zum Lag l** .

Definition B.3 Sei

$$X := (X_k, k \in \mathbb{N})$$

eine Zeitreihe, die stationär von zweiter Ordnung ist und deren Autokorrelationsfunktion absolut summierbar ist. Sei $\sigma^2 := \text{Var}(X_k)$, $k \in \mathbb{N}$. Als **Spektraldichtefunktion** oder **Spektrum** von X wird die Fourier-Transformierte der Autokorrelationsfunktion bezeichnet, die durch

$$f(\lambda) = \frac{\sigma^2}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \rho(k) e^{i\lambda k}$$

gegeben ist [Ber94].

B.2 Verteilungen von Zufallsgrößen

B.2.1 Die heavy-tailed-Eigenschaft

Definition B.4 (heavy-tailed-Eigenschaft)

Eine Verteilungsfunktion $F(x)$, $x \geq 0$, besitzt die **heavy-tailed-Eigenschaft**, falls es ein $0 < \alpha < 2$ und ein $c > 0$ gibt, so dass

$$\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = c \cdot x^{-\alpha}$$

gilt [Cro98].

B.2.2 Pareto-Verteilungen

Die Verteilungsfunktion der Pareto-Verteilung mit den Parametern α und β mit $\alpha, \beta > 0$ ist gegeben durch [Cro98]

$$F_{par}(x) = 1 - \left(\frac{\beta}{x} \right)^\alpha, \quad x \geq \beta.$$

Eine zugehörige Dichtefunktion ist

$$f_{par}(t) = \frac{\alpha \beta^\alpha}{t^{\alpha+1}}, \quad t \geq \beta.$$

Für den Erwartungswert gilt

$$\mu_{par} = \frac{\alpha \beta}{\alpha - 1}.$$

Der Träger der beschriebenen Pareto-Verteilung ist $[\beta, \infty)$, d. h. es werden nur Werte größer als β angenommen. Um die Dauern von Verbindungen zu simulieren, ist diese Einschränkung störend. Deswegen kann hier die *verschobene* Pareto-Verteilung mit dem Träger $[0, \infty)$ benutzt werden. Die zugehörige Verteilungsfunktion ist gegeben durch

$$F_{par*}(x) = 1 - \left(\frac{\beta}{x + \beta} \right)^\alpha, \quad x \geq 0$$

und eine dazu passende Dichte ist

$$f_{par*}(t) = \frac{\alpha \beta^\alpha}{(t + \beta)^{\alpha+1}}, \quad t \geq 0.$$

Für den Erwartungswert der verschobenen Verteilung erhält man

$$\mu_{par*} = \mu_{par} - \beta = \frac{\beta}{\alpha - 1}.$$

Für $\alpha \leq 2$ besitzt die Pareto-Verteilung keine Varianz, für $\alpha \leq 1$ besitzt sie außerdem keinen Erwartungswert [Cro96].

Bei Simulationsexperimenten mit heavy-tailed-Verteilungen ist die Erreichung stationären Verhaltens unter Umständen von Schwierigkeiten begleitet, die durch das langsame Abklingverhalten der Verteilungsfunktion begründet ist (vgl. Anhang C.1).

Durch das *Stutzen* der heavy-tailed-Verteilung kann diesem Effekt begegnet werden. Dabei wird eine obere Schranke x_{max} bestimmt, die als Grenze für die Größe der Ausprägungen der Zufallsvariablen¹ angesehen werden kann. Der Träger der ursprünglichen Verteilungsfunktion wird dabei auf das Intervall $[0, x_{max}]$ gestutzt und die ursprüngliche Dichte durch einen konstanten Faktor so modifiziert, dass für die Dichte der gestutzten [truncated] Verteilung

$$\int_0^\infty f_{par,trunc}(t) dt = \int_\beta^{x_{max}} \frac{1}{c_{trunc}} \cdot f_{par}(t) dt = 1 \quad (\text{B.4})$$

gilt.²

Wie man sich leicht überzeugt, muss der Skalierungsfaktor c_{trunc} in Gleichung (B.4) gleich

$$c_{trunc} := \int_\beta^{x_{max}} f_{par}(s) ds$$

gewählt werden. Als eine Dichte der gestutzten Pareto-Verteilung erhält man

$$f_{par,trunc}(t) dt = \begin{cases} 0 & : t < \beta \\ \frac{f_{par}(t)}{c_{trunc}} & : \beta \leq t \leq x_{max} \\ 1 & : t > x_{max} \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

Als Erwartungswert der gestutzten Zufallsvariablen $X_{par,trunc}$ hat man

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(X_{par,trunc}) &= \int_0^\infty t \frac{f_{par,trunc}(t)}{c_{trunc}} dt \\ &= \frac{1}{c_{trunc}} \cdot \int_\beta^{x_{max}} t \frac{\alpha \beta^\alpha}{t^{\alpha+1}} dt \\ &= \frac{1}{c_{trunc}} \cdot \int_\beta^{x_{max}} \frac{\alpha \beta^\alpha}{t^\alpha} dt \\ &= \frac{1}{c_{trunc}} \cdot \alpha \beta^\alpha \left[\frac{x^{1-\alpha}}{1-\alpha} \right]_{x=\beta}^{x_{max}} \\ &= \frac{1}{c_{trunc}} \cdot \frac{\alpha \beta^\alpha}{1-\alpha} \left[x_{max}^{1-\alpha} - \beta^{1-\alpha} \right] \\ &= \frac{1}{c_{trunc}} \cdot \frac{\alpha \beta}{\alpha-1} \left[1 - x_{max}^{1-\alpha} \beta^{\alpha-1} \right] \\ &= \mathbb{E}(X_{par}) \cdot \frac{1}{c_{trunc}} \left[1 - \left(\frac{\beta}{x_{max}} \right)^{\alpha-1} \right] \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

Analog erhält man

$$\mathbb{E}(X_{par,trunc}^2) = \frac{1}{c_{trunc}} \cdot \frac{\alpha \beta^\alpha}{2-\alpha} \left[x_{max}^{2-\alpha} - \beta^{2-\alpha} \right]. \quad (\text{B.7})$$

Bemerkenswert ist dabei, dass für die gestutzte Verteilung sowohl Erwartungswert als auch Varianz existieren.

¹In diesem Fall sind dies Verbindungsduern.

²Der folgende Rechengang wird für die nicht verschobene Pareto-Verteilung durchgeführt. Gegenüber der verschobenen Dichte ergeben sich gravierende Vorteile bei der Berechnung des Erwartungswertes.

B.3 Selbstähnliche Zeitreihen und selbstähnliche stochastische Prozesse

B.3.1 Selbstähnliche stochastische Prozesse

Die folgende Definition stammt aus [Ber94].

Definition B.5 (Selbstähnlicher stochastischer Prozess)

Der stochastische Prozess $(X_t, t \geq 0)$ heißt **selbstähnlich mit Selbstähnlichkeits-Parameter H** , falls für alle Dehnungsfaktoren $c > 0$ der skalierte stochastische Prozess

$$(c^{-H} X_{ct}, t \geq 0) \quad (\text{B.8})$$

dieselbe Verteilung besitzt wie der Prozess $(X_t, t \geq 0)$. Der Parameter H wird auch **Hurst-Parameter** genannt und beschreibt den Grad der Selbstähnlichkeit des Prozesses.

B.3.2 Selbstähnliche Zeitreihen

Die folgenden Definitionen sind aus [Wil01] entnommen.

Definition B.6 (Gemittelte Zeitreihe, skalierte Varianz) Sei

$$X := (X_k, k \in \mathbb{N})$$

eine Zeitreihe.

a) Die aus X gebildete Zeitreihe

$$X_i^{(m)} := \frac{1}{m} (X_{(i-1)m+1} + \dots + X_{im}), \quad i \in \mathbb{N}$$

heißt **zu X gehörige gemittelte Zeitreihe zum Skalierungsfaktor m** .

b) Die Varianz der gemittelten Zeitreihe

$$\sigma^{(m)} := \text{Var}(X_i^{(m)}), \quad i \in \mathbb{N}$$

wird als **skalierte Varianz zum Skalierungsfaktor m** bezeichnet.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen kann vorausgesetzt werden, dass

$$X = (X_k, k \in \mathbb{N})$$

stets eine Zeitreihe ist, die stationär von zweiter Ordnung ist. Diese Annahme gilt für alle weiteren Betrachtungen dieses Kapitels. Sei

$$\sigma^2 = \text{Var}(X_k), \quad \forall k \in \mathbb{N}.$$

die Varianz der Zeitreihe X .

Definition B.7 (Selbstähnlichkeit zweiter Ordnung)

X heißt asymptotisch selbstähnlich von zweiter Ordnung mit Hurst-Parameter H, $0 < H < 1$, falls für die zweiten Momente der Zeitreihe $(m^{1-H} X_i^{(m)}, i \in \mathbb{N})$ für alle $m \in \mathbb{N}$ folgende beiden Bedingungen gelten:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \text{Var}(m^{1-H} X_i^{(m)}) = \sigma^2, \quad 0 < \sigma < \infty, \quad i \in \mathbb{N} \quad (\text{B.9})$$

und

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \rho^{(m)}(l) = \frac{1}{2} [(l+1)^{2H} - 2l^{2H} + (l-1)^{2H}], \quad l \in \mathbb{N} \quad (\text{B.10})$$

Dabei bezeichnet $(\rho^{(m)}(l), l \in \mathbb{N})$ die Autokorrelation der gemittelten Zeitreihe $(X_i^{(m)}, i \in \mathbb{N})$ zum Lag l.

Die Zeitreihe X heißt exakt selbstähnlich von zweiter Ordnung mit Hurst-Parameter H, $0 < H < 1$, falls in den Gleichungen (B.9) und (B.10) statt der Grenzbeziehung das Gleichheitszeichen gilt.

B.3.3 Langzeitabhängigkeit und Kurzzeitabhängigkeit

Definition B.8 (Kurzzeit-Abhängigkeit und Langzeit-Abhängigkeit)

Sei $\rho(l)$, $l \in \mathbb{N}$ die Autokorrelationsfunktion der Zeitreihe $X := (X_k, k \in \mathbb{N})$.

- a) X heißt kurzzeit-abhängig, falls es ein $0 < \gamma < 1$ und eine Konstante $0 < c < \infty$ gibt, so dass die Autokorrelationsfunktion für $l \rightarrow \infty$ die Form

$$\rho(l) \sim c \cdot \gamma^l \quad (\text{B.11})$$

besitzt.

- b) X heißt langzeit-abhängig, falls es ein $0 < \beta < 1$ und eine Konstante $0 < c < \infty$ gibt, so dass die Autokorrelationsfunktion für $l \rightarrow \infty$ von der Form

$$\rho(l) \sim c \cdot l^{-\beta} \quad (\text{B.12})$$

ist.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden genannten Eigenschaften ergibt sich bezüglich der Summierbarkeit der Autokorrelationen. Während für kurzzeitabhängige Zeitreihen

$$\sum_{l=0}^{\infty} \rho(l) < \infty$$

gilt, hat man für langzeitabhängige Zeitreihen keine Summierbarkeit mehr. Es gilt dann

$$\sum_{l=0}^{\infty} \rho(l) = \infty$$

(vgl. [Wil01]).

B.3.4 Eigenschaften selbstähnlicher Zeitreihen

Für die Modellierung von Verkehrsströmen in Datennetzen ist für den Hurst-Parameter ausschließlich der Bereich $0.5 < H < 1$ von Bedeutung. Es gelten dann folgende wichtigen Eigenschaften (vgl. [Ber94], Kap. 2):

Satz B.1 (Eigenschaften exakt selbstähnlicher Zeitreihen)

Sei

$$X = (X_k, k \in \mathbb{N})$$

eine Zeitreihe, die stationär von zweiter Ordnung und exakt selbstähnlich ist mit Hurst-Parameter $0.5 < H < 1$. Dann gilt

- a) Aus der Selbstähnlichkeit folgt die Langzeitabhängigkeit. Insbesondere gilt für die Autokorrelationsfunktion $\rho(k)$, $k \in \mathbb{N}$

$$\sum_{k=0}^{\infty} \rho(k) = \infty. \quad (\text{B.13})$$

- b) Für die Varianzen der gemittelten Zeitreihe $(X_i^{(m)}, i \in \mathbb{N})$ gilt

$$\text{Var}(X^{(m)}) = \sigma^2 \cdot n^{2H-2}, \quad (\text{B.14})$$

wobei $\sigma^2 = \text{Var}(X_k)$, $k \in \mathbb{N}$.

B.4 Verkehrsmodelle für paketvermittelnde Netzwerke

Momente des Zuwachsprozesses für das ISHV-Modell

Als Dimensionierungs-Richtgrößen für das infinite source heavy-tailed varying bandwidth Modell (siehe Abschnitt 5.4.4) sollen nun die ersten beiden zentralen Momente des Zuwachsprozesses (vgl. Abschnitt B.4.2) hergeleitet werden.

Seien

- λ_a die Ankunftsrate der ON-Perioden
- μ_{ON} der Erwartungswert der Dauer einer einzelnen ON-Periode
- $V_{i,ON}$ die (variable) Sende-Datenrate während der i-ten ON-Periode, $V_{i,ON} \sim V_{ON}$.
- N_t , $t \in \mathbb{R}$ der Prozess der aktiven ON-Perioden zum Zeitpunkt t
- A_t , $t \in \mathbb{R}$ der kumulierte Lastprozess [workload process] (vgl. Abschnitt B.4.2)
- $X_t := A_t - A_{t-1}$, $t \in \mathbb{R}$ der Zuwachsprozess
- $\mu_{ISHV} := \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbb{E}(X_t)$ die mittlere Datenrate der stationären Verteilung des Zuwachsprozesses
- $\sigma_{ISHV}^2 := \lim_{t \rightarrow \infty} \text{Var}(X_t)$ die Varianz der stationären Verteilung des Zuwachsprozesses

Bei der nachfolgenden Berechnung wird der Zeitindex t wegen der stationären Betrachtung weggelassen, d. h. statt N_t wird N verwendet.

Lemma B.1 Es gilt

a)

$$\mu_{ISHV} = \mathbb{E}(V_{ON}) \cdot \mathbb{E}(N)$$

b)

$$\sigma_{ISHV}^2 = Var(V_{ON}) \cdot \mathbb{E}(N) + \mathbb{E}(V_{ON})^2 \cdot Var(N)$$

Beweis: Teil a) folgt unmittelbar aus der Wald'schen Gleichung (vgl. z. B. [Med93], Abschnitt 6.4.2). Dabei wird vorausgesetzt, dass der Zählprozess N und die Zufallsvariablen $V_{i,ON}$ stochastisch unabhängig sind.

Für b) gilt

$$\sigma_{ISHV}^2 = Var\left(\sum_{i=1}^N V_{i,ON}\right). \quad (\text{B.15})$$

Seien

$$W_{i,ON} = V_{i,ON} - \mathbb{E}(V_{i,ON})$$

bzw.

$$W_{ON} = \sum_{i=1}^N W_{i,ON} = \sum_{i=1}^N V_{i,ON} - N \cdot \mathbb{E}(V_{ON})$$

die zu $V_{i,ON}$ und V_{ON} zentrierten Zufallsvariablen. Nach [Cho97], S. 144, Theorem 3, gilt unter der Annahme der stochastischen Unabhängigkeit von N und $V_{i,ON}$

$$Var(W_{ON}) = Var(V_{ON}) \cdot \mathbb{E}(N). \quad (\text{B.16})$$

Man hat

$$\begin{aligned} Var(V_{ON}) &= Var\left\{V_{ON} - \underbrace{N \cdot \mathbb{E}(V_{ON})}_{=0} + \underbrace{N \cdot \mathbb{E}(V_{ON}) - \mathbb{E}(N) \cdot \mathbb{E}(V_{ON})}_{\text{const.}}\right\} \\ &= Var\{W_{ON} + [N - \mathbb{E}(N)] \cdot \mathbb{E}(V_{ON})\} \\ &= Var(W_{ON}) + Var\{[N - \mathbb{E}(N)] \cdot \mathbb{E}(V_{ON})\} - 2 Cov\{W_{ON}, [N - \mathbb{E}(N)] \cdot \mathbb{E}(V_{ON})\} \\ &= Var(W_{ON}) + \mathbb{E}(V_{ON})^2 \cdot Var(N) - 2 \mathbb{E}(V_{ON}) \cdot \underbrace{Cov\{W_{ON}, N - \mathbb{E}(N)\}}_{=0 (!)} \end{aligned} \quad (\text{B.17})$$

Dass der Kovarianzterm in Gleichung (B.17) wegfällt, sieht man wie folgt ein:

$$\begin{aligned} Cov\left(\underbrace{W_{ON}}_{\mathbb{E}(\dots)=0}, \underbrace{N - \mathbb{E}(N)}_{\mathbb{E}(\dots)=0}\right) &= \mathbb{E}(W_{ON} \cdot [N - \mathbb{E}(N)]) \\ &= \mathbb{E}\left(\sum_{i=1}^{\infty} [V_{i,ON} - \mathbb{E}(V_{i,ON})] \cdot \mathbb{I}_{\{N \geq i\}} \cdot [N - \mathbb{E}(N)]\right) \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \mathbb{E}\left(\underbrace{[V_{i,ON} - \mathbb{E}(V_{i,ON})]}_A \cdot \underbrace{[\mathbb{I}_{\{N \geq i\}} \cdot (N - \mathbb{E}(N))]}_B\right) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Die letzte Behauptung folgt aus der Unabhängigkeit von A und B . Dabei bezeichnet \mathbb{I} die Indikatorfunktion.

Aus (B.16) und (B.17) erhält man

$$\begin{aligned} \text{Var}(V_{ON}) &= \text{Var}(W_{ON}) + \mathbb{E}(V_{ON})^2 \cdot \text{Var}(N) \\ &= \text{Var}(V_{ON}) \cdot \mathbb{E}(N) + \mathbb{E}(V_{ON})^2 \cdot \text{Var}(N) \end{aligned}$$

■

Korollar B.1 Mit $\rho = \lambda_a \cdot \mu_{ON}$ (vgl. Abschnitt 5.4.4) gilt

$$\sigma_{ISHV}^2 = \rho \cdot \mathbb{E}(V_{ON})^2. \quad (\text{B.18})$$

Beweis: Die Behauptung folgt unmittelbar aus

$$\text{Var}(N) = \mathbb{E}(N) = \rho$$

und dem Verschiebungssatz

$$\text{Var}(Z) = \mathbb{E}(Z^2) - \mathbb{E}(Z)^2.$$

■

Bemerkung: Für den Fall konstanter Datenraten verschwindet der Term $\text{Var}(V_{ON})$ in Lemma B.1 b) und man erhält das Resultat (5.11) aus Abschnitt 5.4.4.

B.4.1 Grenzbetrachtungen für Verkehrsmodelle

Die beiden nachstehenden Abschnitte fassen zwei zentrale Resultate über Selbstähnlichkeit in paketvermittelnden Netzwerken zusammen. Die vorhandenen Grenzbetrachtungen stellen den Zusammenhang zwischen den beiden Modellen ARH und ISH auf der einen Seite und exakt selbstähnlichen Prozessen auf der anderen Seite her.

Grenzbetrachtung für das ARH-Modell

Sei $(W(t), t \geq 0)$ eine einzelne ON-OFF-Quelle, die sich entweder im Zustand 1 (Senden eines Paketes) oder im Zustand 0 (Leerlauf) befindet. Die beiden Zustände wechseln sich gegenseitig ab. Die Aufenthaltsdauern in den beiden Zuständen seien durch die Verteilungsfunktionen $F_{ON}(x)$, $x \geq 0$ und $F_{OFF}(x)$, $x \geq 0$ gegeben, welche die heavy-tailed-Eigenschaft, die Abkling-Parameter α_{ON} und α_{OFF} und die Erwartungswerte μ_{ON} und μ_{OFF} besitzen.

Sei n die Anzahl der überlagerten ON-OFF-Prozesse $(W_i(t), t \geq 0)$. Die aus der Überlagerung der Prozesse gesendete Anzahl von Paketen ist gegeben durch $\sum_{i=1}^n W_i(t)$, $t \geq 0$. Die Einführung eines Skalierungsfaktors T für die Zeit führt zu der Größe

$$A_{Tt}^{n,*} = \int_0^{Tt} \left(\sum_{i=1}^n W_i(u) \right) du,$$

durch die die kumulierte Anzahl von gesendeten Paketen innerhalb des Intervalls $[0, Tt]$ ausgedrückt wird.

Dann gilt folgendes wichtige Resultat [Taq97]:

Satz B.2 Für große n und T verhält sich der aggregierte stochastische Prozess

$$(A_{Tt}^{n,*}, t \geq 0)$$

statistisch wie

$$T \cdot n \cdot \frac{\mu_{ON}}{\mu_{ON} + \mu_{OFF}} \cdot t + T^H \sqrt{n} \cdot \sigma_{lim} \cdot B_H(t).$$

Es gilt für eine Konstante $\sigma_{lim} > 0$

$$\mathfrak{L} \lim_{T \rightarrow \infty} \mathfrak{L} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{A_{Tt}^{n,*} - T \cdot n \cdot \frac{\mu_{ON}}{\mu_{ON} + \mu_{OFF}} \cdot t}{T^H \cdot n^{1/2}} = \sigma_{lim} \cdot B_H(t), \quad t \geq 0$$

mit

$$H = \frac{3 - \min\{\alpha_{ON}, \alpha_{OFF}\}}{2}.$$

Dabei stehen \mathfrak{L} für die Konvergenz im Sinne endlichdimensionaler Verteilungen und $B_H(t)$ für die fraktale Brownsche Bewegung [fractional Brownian motion] (vgl. Abschnitt B.4.2). ■

Beweis: siehe [Taq97], Theorem 1. ■

Satz B.2 bezieht sich auf den Fall, in dem alle Sender während einer ON-Periode mit der gleichen Datenrate senden. Insbesondere in Weitverkehrsnetzen ist diese Annahme auf Grund der Unterschiedlichkeit der Bandbreiten, die einzelne Verbindungen innerhalb eines Verkehrsstromes besitzen, unrealistisch.³ Für das ARH-Modell gibt [Lev00] eine Abschätzung für die Situation, in der die Datenrate verschiedener ON-Perioden variiert und durch eine heavy-tailed-Verteilung beschrieben werden kann. Bezeichnen α_{dur} und α_{rate} die Abklingparameter der Dauer der ON-Perioden und der Bandbreite verschiedener ON-Perioden, dann ist der Grenzprozess⁴ ein so genannter α_{rate} -stabiler selbstähnlicher stochastischer Prozess (zu Einzelheiten vergleiche [Lev00]).

Grenzbetrachtung für das ISH-Modell

Ein ähnliches Resultat gilt für das *infinite source heavy-tailed Modell*. Demnach kommen Sendewünsche (ON-Perioden) mit einer Ankunftsrate $\lambda(T)$ gemäß einem (inhomogenen) Poisson-Prozess an einer Verbindungsleitung an. Die ON-Perioden selbst besitzen wie im vorhergehenden Fall eine Länge, die durch eine heavy-tailed-Verteilung beschrieben werden kann. Sei $F_{ON}(x)$, $x \geq 0$ die Verteilungsfunktion der ON-Perioden mit der Eigenschaft

$$F_{ON}(x) \sim l \cdot x^{-\alpha} \text{ für große } x, \quad 0 < \alpha < 2.$$

Die ON-Perioden seien darüber hinaus unabhängig. Im Gegensatz zum in Satz B.2 geschilderten Fall beendet eine ON-Periode nach Ablauf der Aufenthaltsdauer im ON-Zustand ihre Aktivität und kehrt nicht wieder in diesen Zustand zurück. Alle ON-Perioden besitzen die gleiche Datenrate.

Sei $W(u)$ die Anzahl aktiver ON-Perioden zum Zeitpunkt $u > 0$ und sei $A_t := \int_0^t W(u)du$ das im Zeitintervall $[0, t]$, $t > 0$ aggregierte Verkehrsvolumen.

³So treten hier z. B. Verbindungen eines Modems mit einer maximalen Datenrate von 56 kbps gleichermaßen auf wie Verbindungen eines DSL- oder Fast Ethernet-Anschlusses mit Datenraten im Bereich von 1 Mbps.

⁴Die Reihenfolge der Grenzbetrachtung wird wie in Satz B.2 vorgenommen.

Satz B.3 Falls die Bedingung

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\lambda(T)}{T^{\alpha-1}}$$

erfüllt ist, dann gilt mit

$$H = (3 - \alpha)/2$$

und für eine Konstante $c > 0$:

$$\mathfrak{L} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{A_{Tt} - \mathbb{E}(A_{Tt})}{\lambda^{1/2} T^{(3-\alpha)/2}} = c \cdot B_H(t), \quad t \geq 0.$$

Dabei stehen \mathfrak{L} lim für die Konvergenz im Sinne endlichdimensionaler Verteilungen und $B_H(t)$ für die fraktale Brownsche Bewegung (vgl. Anhang B.4.2).

Beweis: siehe [Kur96] ■

Ein Resultat über das Grenzverhalten für das infinite source heavy-tailed Modell mit variierenden Bandbreiten der ON-Perioden (ISHV) gibt es zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit noch nicht und ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.

B.4.2 Erläuterungen zu selbstähnlichem Verkehr

Zusammenhang zwischen selbstähnlichen stochastischen Prozessen und selbstähnlichen Zeitreihen

Für die Beschreibung der Verkehrslast in Netzwerken werden üblicherweise stochastische Prozesse eingesetzt, die das an einer Netzwerk-Komponente ankommende kumulierte Verkehrsvolumen (in Kilobyte oder in Anzahl Paketen) beschreiben. Sei $(A_t, t \geq 0)$ ein solcher stochastischer Prozess. Selbstähnliche Prozesse zeichnen sich dadurch aus, dass die Verteilungseigenschaften des Prozesses bezüglich verschiedener Skalierungsstufen (bei geeigneter Skalierung, vgl. Formel (B.8)) identisch sind. Grob gesprochen kann man sagen, dass sich eine gestauchte oder gestreckte Version des Prozesses genauso verhält wie der Prozess selbst. Selbstähnliche Prozesse sind⁵ nicht stationär [Wil00].

Neben der Analyse des kumulierten Verkehrsaufkommens ist die Betrachtung der innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls ankommenden Verkehrsmenge von Bedeutung. Diese ergibt sich aus dem kumulierten Prozess durch die Zeitreihe der Zuwächse

$$X_k := A_k - A_{k-1}, \quad k \in \mathbb{N}. \quad (\text{B.19})$$

Dabei sind ausschließlich Prozesse A_t mit stationären Zuwächsen X_k von Interesse, da sich nichtstationäre Zuwächse für die Modellierung von Verkehr innerhalb von Leistungsanalysen in den meisten Fällen⁶ nicht eignen.

Die Selbstähnlichkeit des stochastischen Prozesses A_t schlägt sich in der Zeitreihe X_k durch die in Formel (B.10) gegebene spezifischen Gestalt der Autokorrelationsfunktion nieder.⁷

Selbstähnlichkeit ist eine sehr starke Eigenschaft, durch welche insbesondere die höheren Momente eines stochastischen Prozesses oder einer Zeitreihe vollständig festgelegt sind. Die Erwartung, dass sich Verkehrsströme in Netzwerken exakt in das enge mathematische Rahmenwerk der Selbstähnlichkeit

⁵Dies gilt mit Ausnahme des degenerierten Prozesses $A_t \equiv 0$, $t \geq 0$.

⁶Ausnahmen sind Modelle, in denen transientes Verkehrsverhalten untersucht wird.

⁷Eine Herleitung findet sich z. B. in [Wil00], Abschnitt 1.4.

einpassen, ist offensichtlich unrealistisch. Die durch Definition B.7 gegebene Begriffsbildung lockert deswegen das strenge Rahmenwerk der Selbstähnlichkeit auf und orientiert sich an den für die Beschreibung von Verkehrsströmen essentiellen statistischen Eigenschaften zweiter Ordnung. Charakteristisch ist dabei das durch die Formeln (B.12) und (B.14) ausgedrückte „langsame“ Abklingverhalten der Autokorrelationen und der Varianzen der zugehörigen skalierten Zeitreihen. Die durch diese beiden Effekte ausgedrückte Langzeitabhängigkeit ist eine Folge der Selbstähnlichkeit für Hurst-Parameter im Bereich $0.5 < H < 1$. Zahlreiche empirische Verkehrsmessungen in paketvermittelnden Netzwerken belegen, dass sich die durch die Selbstähnlichkeit abgeleiteten statistischen Eigenschaften zweiter Ordnung eine für die Praxis angemessene Beschreibung für reales Verkehrsaufkommen darstellen [Lel94, Ber95, Pax95b, Par96, Cro96].

Fraktale Brownsche Bewegung

Die fraktale Brownsche Bewegung ist ein exakt selbstähnlicher stochastischer Prozess (vgl. [Ber94]). Die Bedeutung der Sätze B.2 und B.3 im Hinblick auf die in dieser Arbeit untersuchte Auslastung von Verbindungsleitungen lässt sich wie folgt darstellen: Beide Resultate beziehen sich auf das in einem Zeitintervall der Länge Tt auf einer Verbindungsleitung aggregierte Verkehrsvolumen. Betrachtet man statt dessen die Zeitreihen der Zuwächse, die durch

$$X_k := A_{k \cdot t_0}^{n,*} - A_{(k-1) \cdot t_0}^{n,*} \text{ (ON-OFF-Modell)}$$

bzw.

$$X_k := A_{k \cdot u_0} - A_{(k-1) \cdot u_0} \text{ (infinite source heavy-tailed Modell)}$$

für $k \geq 1$ und $t_0, u_0 > 0$ gegeben sind und das während einer Periode der Länge u_0 bzw. t_0 durch Überlagerung von ON-OFF-Prozessen generierte Verkehrsvolumen beschreiben, dann ist die Zeitreihe $(X_k, k \in \mathbb{N})$ wegen der Eigenschaften der fraktalen Brownschen Bewegung eine Annäherung an eine gemäß Definition B.7 exakt selbstähnliche Zeitreihe. Dies folgt aus der Selbstähnlichkeit der fraktalen Brownschen Bewegung und deren stationären Zuwächsen (vgl. [Ber94]).

Interpretation der Erklärungen für Selbstähnlichkeit

Satz B.2 und Satz B.3 bilden eine Erklärung für das Zustandekommen selbstähnlicher Verkehrsströme in paketvermittelnden Netzwerken. Die Rolle der Anzahl überlagerter ON-OFF-Prozesse in Satz B.2 wird in Satz B.3 von der Ankunftsrate λ übernommen. Zu bemerken ist, dass beide Sätze Situationen der unmittelbaren Emission von Verkehr beschreiben. Dabei wird der Einfluss der Puffer in den vermittelnden Netzknoten, durch die eine Glättung der Variabilitätseigenschaften selbstähnlichen Verkehrs erzielt werden kann, nicht berücksichtigt. Des Weiteren muss angemerkt werden, dass beide Aussagen eine Grenzbetrachtung enthalten. Über die Genauigkeit der Annäherung werden dabei keine Aussagen gemacht.

B.5 Effektive Bandbreite

Verbindungen verschiedener Dienstgüteklassen in paketvermittelnden Netzwerken besitzen unterschiedliche Anforderungen bezüglich der Basiskenngrößen Bandbreite, Paketverlustrate oder Paketlaufzeit (vgl. Abschnitt 3.3).

Durch statistisches Multiplexen von Verbindungen mit variabler Bandbreite lässt eine effiziente Nutzung der Ressource Bandbreite erreichen. Um die bereitgestellte Bandbreite den Anforderungen der anliegenden Verkehrslast anzupassen sind Abschätzungen über das Verkehrs volumen notwendig.

Ursprünglich ging der Begriff *effektive Bandbreite* [effective bandwidth, equivalent bandwidth] aus Untersuchungen über die Zugangskontrolle [call admission control (CAC)] in ATM-Netzwerken hervor [Gue91], ein Einsatz zur Abschätzung des Bandbreitenbedarfes gemutliplexer Verbindungen variabler Bitrate ist jedoch ebenfalls möglich und sinnvoll [Bod00].

Definition B.2 Der stochastische Prozess $A = (A_t, t \in \mathbb{R}, t \geq 0)$ mit stationären Zuwächsen beschreibe das aggregierte Verkehrs volumen einer Verkehrsquelle. Dann heißt die Größe

$$eb_A(\theta, \tau) := \frac{1}{\theta \cdot \tau} \log \mathbb{E} [e^{\theta A_\tau}] \quad (\text{B.20})$$

effektive Bandbreite von A . Dabei gilt $0 < \theta, \tau < \infty$.

Die beiden Parameter sind Skalierungsparameter: θ steht für räumliche Skalierung, τ repräsentiert Zeit-Skalierung. Sie hängen im Wesentlichen von folgenden Determinanten ab:

- Größe des zugeordneten Puffers
- statistische Eigenschaften der Verkehrsquelle
- Bedienstrategie
- Warteschlangen-Management
- Dienstgüte-Anforderungen (Paketverlustrate, Laufzeit).

Für die Modellierung von Verkehr und die Dimensionierung von Netzwerken bietet der Begriff der effektiven Bandbreite eine mathematisch gut handhabbare Größe, welche den Vorzug aufweist, die genannten Determinanten eines Verkehrsstromes in sich zu vereinigen. Darüber hinaus kann durch den Einsatz von effektiver Bandbreite eine Brücke zu Methoden des Entwurfs leitungsvermittelnder Netzwerke geschlagen werden [Fon00].

Nach [Kel96], Abschnitt 2.2, gilt

$$\frac{\mathbb{E}[A_\tau]}{\tau} \leq eb_A(\theta, \tau) \leq \frac{\tilde{A}_\tau}{\tau}, \quad (\text{B.21})$$

wobei $\tilde{A}_\tau = \sup\{x : \mathbb{P}\{A(\tau) > x\} > 0\}$, d. h. die effektive Bandbreite liegt immer zwischen der Peak-Bandbreite und der durchschnittlichen Bandbreite eines Verkehrsstromes.

Die wohl bedeutendste Eigenschaft der effektiven Bandbreite ist die *Additivität* bei unabhängigen Verkehrsströmen. Diese wird jedoch damit bezahlt, dass sich der durch statistisches Multiplexen ergebende Gewinn mit dem Konzept der effektiven Bandbreite nicht erfassen lässt [Nea01].

Hauptschwierigkeit bei der praktischen Nutzung effektiver Bandbreite zur Abschätzung von Verkehrs volumina ist die angemessene Bestimmung der beiden Skalierungsparameter [Bod00]. In der Praxis werden deshalb häufig statt (B.20) direkt an einem Zielkriterium abgeleitete Angaben für effektive Bandbreite benutzt. Das am häufigsten verwendete Zielkriterium orientiert sich an der Puffer Überlaufwahrscheinlichkeit [Gue91, Kes93, Nor95, Bod00, Ore01]. Bei Vorgabe der oben genannten Determinanten beschreibt die effektive Bandbreite eines Verkehrsstromes dann die zur Einhaltung des Zielkriteriums

$$P\{B > \xi\} < \varepsilon \quad (\text{B.22})$$

größtmögliche Bandbreite. Dabei sind die Puffergröße ξ und die Schranke für die Überlaufwahrscheinlichkeit ε vorgegeben. Die Zufallsvariable B beschreibt die aktuelle Pufferbelegung.

Anhang C

Verifikation der Simulationsumgebung

C.1 Verkehrsgeneratoren

Für die Simulationsversuche wird der von OMNET++ zur Verfügung gestellte Zufallszahlen-Generator benutzt [Tec01]. Es handelt sich dabei um ein lineares Kongruenzverfahren, das wie folgt beschrieben werden kann:

- Wertebereich: $[0..2^{31} - 2]$
- Periodenlänge: $2^{31} - 2$
- Generatormethode:

$$z_{k+1} := z_k \cdot 7^5 \pmod{2^{31} - 1} \quad (\text{C.1})$$

(vgl. [Jai91], pp. 441-445).

Die durch die Spreizung der Simulationsversuche erforderlichen verschiedenen Startwerte („seeds“) werden mit Hilfe des `seedtool`-Werkzeuges [Tec01] ermittelt.

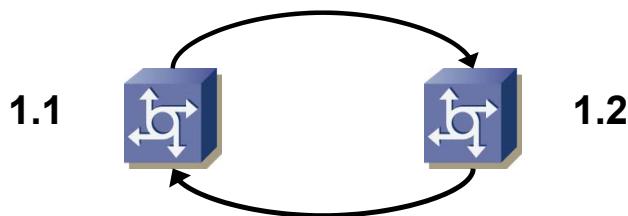


Abbildung C.1: Verifikationsnetzwerk

Abbildung C.1 zeigt das Netzwerk, das zur Verifikation der Verkehrsgeneratoren eingesetzt wird. Es besteht aus zwei Knoten, die über Verbindungsleitungen mit einer Bandbreite von jeweils 5000 kbps miteinander kommunizieren. Die angestellten Verifikationsversuche werten den Verkehrsstrom auf den Verbindungsleitungen aus. Das abgebildete Netz wird als *Zwei-Knoten-Elementarnetzwerk* bezeichnet.

Die Simulationsversuche werden dabei nach dem in Abschnitt 6.2 erläuterten Ablaufschema durchgeführt. Dabei werden die Simulationsläufe einem Abschneiden der transienten Anteile unterzogen und jeder Simulationsversuch wird auf eine Anzahl von 5 Simulationsläufen gespreizt.

Die Tabellen C.2, C.3 und C.4 fassen die numerischen Ergebnisse der Verifikationsversuche zusammen. Die mit * gekennzeichneten Tabellenzeilen enthalten durch arithmetische Mittelwertbildung über die Simulationsläufe verdichtete Angaben, alle anderen Angaben beziehen sich auf Einzelläufe, d. h. diese dokumentieren das Ergebnisse jeweils eines einzelnen Simulationsversuches.

Die mit einem Dach markierten Kenngrößen stellen die in der Simulation ermittelten Werte dar, Kenngrößen ohne Dach bezeichnen die theoretischen Referenzwerte, die an Hand der in Abschnitt 5.4 hergeleiteten Formeln ermittelt wurden.

Die mit r. F. gekennzeichneten Spalten enthalten Angaben über den relativen Fehler zwischen simulativ ermittelten und theoretischen Werten der Kenngrößen.

Allen dokumentierten Angaben liegen Simulationsläufe mit einer Dauer von $3600 \text{ s} = 1 \text{ h}$ zugrunde.

Es werden folgende Größen überprüft:

- *Erwartungswert der generierten Datenrate*

Dieser Wert ist in den Tabellen mit $\mu_{V,p}$ gekennzeichnet,¹ wobei $V \in \{\text{Poi}, \text{AR}, \text{IS}\}$ das Verkehrsmodell bezeichnet. Er beschreibt die Anzahl der pro Zeiteinheit auf der Verbindungsleitung gesendeten Pakete. Bei fester Paketgröße ist diese proportional zur generierten Gesamtdatenrate v und ergibt sich aus

$$\mu_{V,p} = v \cdot \frac{\delta_{link}}{s}.$$

Dabei bezeichnet δ_{link} die Latenz der Verbindungsleitung und s die Paketgröße.

- *Varianz der mittleren generierten Datenrate*

- *Abklingverhalten der skalierten Varianzen*

Zur Überprüfung des Abklingverhaltens skaliert der Varianzen der Verkehrsgeneratoren werden log-log-Diagramme erstellt. Die Abbildungen C.2, C.3, und C.4 zeigen die Resultate der Gegenüberstellung der gemessenen skalierten Varianzen mit den Geraden, die exakt selbstähnliche Prozesse repräsentieren. Der theoretische (negative) Steigungswert der Geraden beträgt

$$\beta = 2 - 2 \cdot H \quad (\text{C.2})$$

(vgl. [Wil01], Abschnitt 2.2).

Der Abklingparameter α der Verteilung der Dauern der ON-Perioden ergibt sich aus

$$H = \frac{3 - \alpha}{2} \quad (\text{C.3})$$

(vgl. [Wil01], Abschnitte 3.2 und 3.3).

| H | 0.5 | 0.75 | 0.85 | 0.95 |
|----------|-----|------|------|------|
| α | 2.0 | 1.5 | 1.3 | 1.1 |
| β | 1.0 | 0.5 | 0.3 | 0.1 |

Tabelle C.1: Abklingparameter der Dauern der ON-Perioden und Steigungswerte der Geraden skaliert der Varianzen im log-log-Diagramm für exakt selbstähnliche Prozesse

Demnach hat man für die hier verwendeten (approximierten) Hurst-Parameter die in Tabelle C.1 dargestellten Steigungswerte und Abklingparameter.

| $\mu_{Poi,p}$ [1/s] | λ_a [1/s] | λ_d [1/s] | v_{ON} [kbps] | $\sigma_{Poi,p}^2$ [1/s ²] | $\hat{\mu}_{Poi,p}$ [1/s] | $\hat{\sigma}_{Poi,p}^2$ | r. F. $\mu_{Poi,p}$ | r. F. $\sigma_{IS,p}^2$ |
|------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|---|------------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|
| 100 | 20 | 1.0 | 50 | 500 | 99.2 | 506.3 | < 1 % | 1.3 % |
| 100 | 20 | 1.0 | 50 | 500 | 99.8 | 492.4 | < 1 % | 1.5 % |
| 100 | 20 | 1.0 | 50 | 500 | 99.4 | 481.2 | < 1 % | 3.8 % |
| 100 | 20 | 1.0 | 50 | 500 | 100.2 | 476.6 | < 1 % | 4.7 % |
| 100 | 20 | 1.0 | 50 | 500 | 100.6 | 477.7 | < 1 % | 4.5 % |
| 100 (*) | 20 | 1.0 | 50 | 500 | 99.8 | 486.8 | < 1 % | 2.6 % |
| 200 (*) | 40 | 1.0 | 50 | 1000 | 199.2 | 975.3 | < 1 % | 2.5 % |
| 300 (*) | 60 | 1.0 | 50 | 1500 | 299.4 | 1442.3 | < 1 % | 3.8 % |

Tabelle C.2: Verifikation des Poisson-Verkehrsgenerators

| $\mu_{AR,p}$ [1/s] | H | v_{ON} [kbps] | π | $\sigma_{AR,p}^2$ [1/s ²] | $\hat{\mu}_{AR,p}$ [1/s] | $\hat{\sigma}_{AR,p}^2$ [1/s ²] | r. F. $\mu_{AR,p}$ | r. F. $\sigma_{AR,p}^2$ |
|-----------------------|------|--------------------|-------|--|-----------------------------|--|--------------------|-------------------------|
| 100 | 0.75 | 50 | 0.5 | 250 | 101.1 | 253.7 | 1 % | 1.5 % |
| 100 | 0.75 | 50 | 0.5 | 250 | 100.4 | 248.1 | < 1 % | < 1 % |
| 100 | 0.75 | 50 | 0.5 | 250 | 104.0 | 275.0 | 4 % | 10.0 % |
| 100 | 0.75 | 50 | 0.5 | 250 | 99.8 | 245.8 | < 1 % | 1.7 % |
| 100 | 0.75 | 50 | 0.5 | 250 | 105.9 | 240.3 | 5.9 % | 3.9 % |
| 100 (*) | 0.75 | 50 | 0.5 | 250 | 102.1 | 252.6 | 2.1 % | 1.0 % |
| 200 (*) | 0.75 | 50 | 0.5 | 500 | 199.1 | 482.9 | < 1 % | 3.4 % |
| 300 (*) | 0.75 | 50 | 0.5 | 750 | 299.8 | 712.4 | < 1 % | 5.0 % |
| 100 (*) | 0.85 | 50 | 0.5 | 250 | 99.5 | 261.1 | < 1 % | 4.4 % |
| 200 (*) | 0.85 | 50 | 0.5 | 500 | 200.2 | 479.8 | < 1 % | 4.0 % |
| 300 (*) | 0.85 | 50 | 0.5 | 750 | 294.6 | 479.8 | < 1 % | 1.5 % |
| 100 (*) | 0.95 | 50 | 0.5 | 250 | 95.8 | 246.4 | 4.2 % | 1.4 % |
| 200 (*) | 0.95 | 50 | 0.5 | 500 | 203.0 | 462.1 | 1.5 % | 7.6 % |
| 300 (*) | 0.95 | 50 | 0.5 | 750 | 297.6 | 687.4 | < 1 % | 8.3 % |

Tabelle C.3: Verifikation des ARH-Verkehrsgenerators

Schwierigkeiten bei der simulativen Generierung selbstähnlicher Verkehrsströme

Die hohe Variabilität von Verteilungen mit der heavy-tailed-Eigenschaft führt zu Schwierigkeiten bei der Erreichung stationärer Zustände innerhalb von Simulationsversuchen. Diese treten dadurch in Erscheinung, dass einerseits im Vergleich mit Versuchen, die auf schnell abklingenden Zufallsvariablen basieren, extrem lange Versuchsdauern benötigt werden und andererseits selbst bei Erreichung des stationären Zustandes eine sehr hohe Variabilität der in der Simulation untersuchten Zielgrößen vorliegen kann, sofern diese von heavy-tailed-Zufallsvariablen abhängen [Cro00, Gro02]. Bei Pareto-Verteilungen treten diese Schwierigkeiten auf, sobald sich der Abklingparameter α von oben dem Wert 1 nähert. Anstatt auf lange Versuchsdauern zu setzen, werden in der vorliegenden Arbeit kurze Versuchsdauern mit einer Spreizung der Simulationsversuche in mehrere Simulationsläufe mit verschiedenen Startwerten [seed] für den Zufallszahlengenerator benutzt (vgl. auch Abschnitt 6.2). Wie die Verifikationsversuche der Verkehrsgeneratoren zeigen, sind die Abweichungen zwischen simulativ ermittelten Messwerten und

¹Der index 'p' erinnert daran, dass hier die Anzahl der Pakete und nicht die Datenrate gemessen wird.

| $\mu_{IS,p}$ [1/s] | H | λ_a [1/s] | α_{ON} | v_{ON} [kbps] | $\sigma_{IS,p}^2$ [1/s ²] | $\hat{\mu}_{IS,p}$ [1/s] | $\hat{\sigma}_{IS,p}^2$ [1/s ²] | r. F. $\mu_{IS,p}$ | r. F. $\sigma_{IS,p}^2$ |
|-----------------------|------|----------------------|---------------|--------------------|--|-----------------------------|--|--------------------|-------------------------|
| [1/s] | | [1/s] | | [kbps] | [1/s ²] | [1/s] | [1/s ²] | | |
| 100 | 0.75 | 6.6 | 1.5 | 50 | 500 | 97.9 | 551.3 | 2.0 % | 10.3 % |
| 100 | 0.75 | 6.6 | 1.5 | 50 | 500 | 99.7 | 541.1 | < 1 % | 8.2 % |
| 100 | 0.75 | 6.6 | 1.5 | 50 | 500 | 91.0 | 470.1 | 9 % | 6.0 % |
| 100 | 0.75 | 6.6 | 1.5 | 50 | 500 | 99.0 | 530.5 | 1 % | 6.1 % |
| 100 | 0.75 | 6.6 | 1.5 | 50 | 500 | 88.6 | 460.7 | 11.4 % | 7.9 % |
| 100 (*) | 0.75 | 6.6 | 1.5 | 50 | 500 | 95.2 | 510.7 | 4.8 % | 2 % |
| 200 (*) | 0.75 | 13.3 | 1.5 | 50 | 1000 | 188.9 | 917.8 | 5.6 % | 8.2 % |
| 300 (*) | 0.75 | 20 | 1.5 | 50 | 1500 | 291.6 | 1423.2 | 2.8 % | 5.1 % |
| 100 (*) | 0.85 | 4 | 1.3 | 50 | 500 | 89.5 | 418.4 | 10.5 % | 16.3 % |
| 200 (*) | 0.85 | 8 | 1.3 | 50 | 1000 | 174.5 | 784.6 | 12.6 % | 21.5 % |
| 300 (*) | 0.85 | 12 | 1.3 | 50 | 1500 | 256.2 | 1291.9 | 14.6 % | 13.8 % |
| 100 (*) | 0.95 | 1.3 | 1.1 | 50 | 500 | 49.1 | 202.3 | 50.9 % | 59.5 % |
| 200 (*) | 0.95 | 2.6 | 1.1 | 50 | 1000 | 98.6 | 516.1 | 50.7 % | 48.3 % |
| 300 (*) | 0.95 | 4 | 1.1 | 50 | 1500 | 145.7 | 598.1 | 51.4 % | 60.1 % |

Tabelle C.4: Verifikation des ISH-Verkehrsgenerators

| $\mu_{IS,p}$ [1/s] | H | λ_a [1/s] | α_{ON} | v_{ON} [kbps] | $\sigma_{IS,p}^2$ [1/s ²] | $\hat{\mu}_{IS,p}$ [1/s] | $\hat{\sigma}_{IS,p}^2$ [1/s ²] | r. F. $\mu_{IS,p}$ | r. F. $\sigma_{IS,p}^2$ |
|-----------------------|------|----------------------|---------------|--------------------|--|-----------------------------|--|--------------------|-------------------------|
| 100 | 0.75 | 6.75 | 1.5 | 50 | 500 | 103.2 | 422.6 | 3.2 % | 15.5 % |
| 100 | 0.75 | 6.75 | 1.5 | 50 | 500 | 95.5 | 442.2 | 4.5 % | 11.6 % |
| 100 | 0.75 | 6.75 | 1.5 | 50 | 500 | 100.3 | 461.4 | 0.3 % | 7.7 % |
| 100 | 0.75 | 6.75 | 1.5 | 50 | 500 | 108.1 | 463.7 | 8.1 % | 7.3 % |
| 100 | 0.75 | 6.75 | 1.5 | 50 | 500 | 8.1 | 459.5 | 0.8 % | 2 % |
| 100 (*) | 0.75 | 6.75 | 1.5 | 50 | 500 | 100.7 | 466.3 | 4.8 % | 2 % |
| 200 (*) | 0.75 | 13.5 | 1.5 | 50 | 1000 | 196.0 | 878.5 | 2.0 % | 12.2 % |
| 300 (*) | 0.75 | 20.2 | 1.5 | 50 | 1500 | 294.6 | 1484.8 | 1.8 % | 1.0 % |
| 100 (*) | 0.85 | 4.3 | 1.3 | 50 | 500 | 97.9 | 435.7 | 2.1 % | 12.8 % |
| 200 (*) | 0.85 | 8.6 | 1.3 | 50 | 1000 | 194.0 | 886.4 | 3.0 % | 11.3 % |
| 300 (*) | 0.85 | 12.9 | 1.5 | 50 | 1500 | 289.5 | 1482.8 | 3.5 % | 1.1 % |
| 100 (*) | 0.95 | 2.3 | 1.1 | 50 | 500 | 89.9 | 423.8 | 10.0 % | 15.2 % |
| 200 (*) | 0.95 | 4.6 | 1.3 | 50 | 1000 | 181.3 | 822.4 | 9.5 % | 17.8 % |
| 300 (*) | 0.95 | 6.9 | 1.5 | 50 | 1500 | 275.5 | 1405.3 | 8.1 % | 6.3 % |

Tabelle C.5: Verifikation des ISHT-Verkehrsgenerators

theoretischen Werten der Zielgrößen² zwar bei kurzer Versuchsdauer höher als bei langer Versuchsdauer, eine arithmetische Mittelung über mehrere Versuchsläufe mit verschiedenen Startwerten für die Zufallszahlengeneratoren bringt jedoch eine bessere Annäherung an die theoretischen Werte als ein einzelnes sehr langes Experiment.

In den Verifikationsversuchen wird eine Größe des relativen Fehlers von 10 % als tolerierbar angesehen. Zum Zwecke der Erreichung quantitativer Aussagen ist eine höhere Präzision anzustreben, die mit

²Bei den Verifikationsversuchen sind dies der Erwartungswert der mittleren generierten Datenrate und deren Varianz.

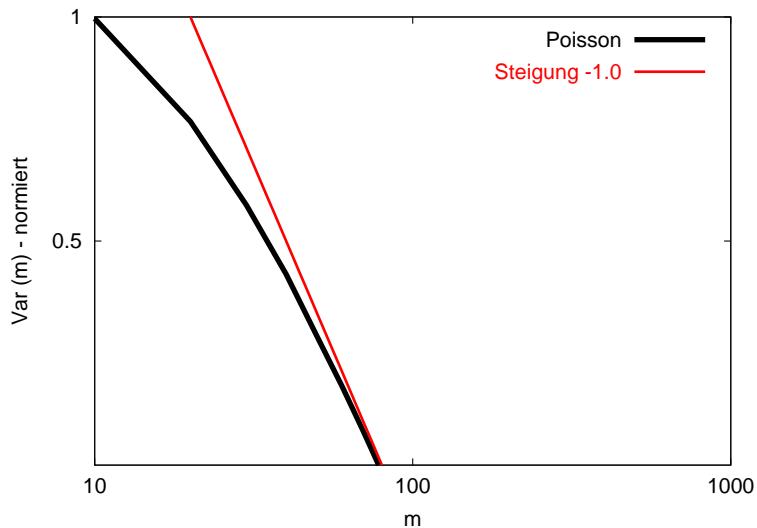


Abbildung C.2: Verifikation des Poisson-Generators

erheblich längeren Simulationsdauern verbunden wäre. Für die im Rahmen dieser Arbeit getroffenen qualitativen Aussagen reicht die vorgegebene Schranke allerdings aus.

Wie die Einträge in Tabelle C.2 belegen, zeigt der Poisson-Verkehrsgenerator bei der mittleren generierten Datenrate als auch bei deren Varianz eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen gemessenen und theoretischen Werten. Bei den mittleren Datenraten liegt der relative Fehler hier durchweg unter 1 %, bei den Varianzen unter 5 %.

Beim ARH-Generator zeigen die zu verifizierenden Größen relative Fehler zwischen 6 % (mittlere Datenrate) und 10 % (Varianz) und liegen damit im vorgegebenen Toleranzbereich.

Anders verhält es sich beim ISH-Generator. Mit steigendem Hurst-Parameter werden die relativen Fehler der zu verifizierenden Größen unakzeptabel groß. Deshalb wird in den Simulationsversuchen in Kapitel 7 bei der Modellierung des M/Pareto-Modells an Stelle des ISH-Generators der ISHT-Generator benutzt.

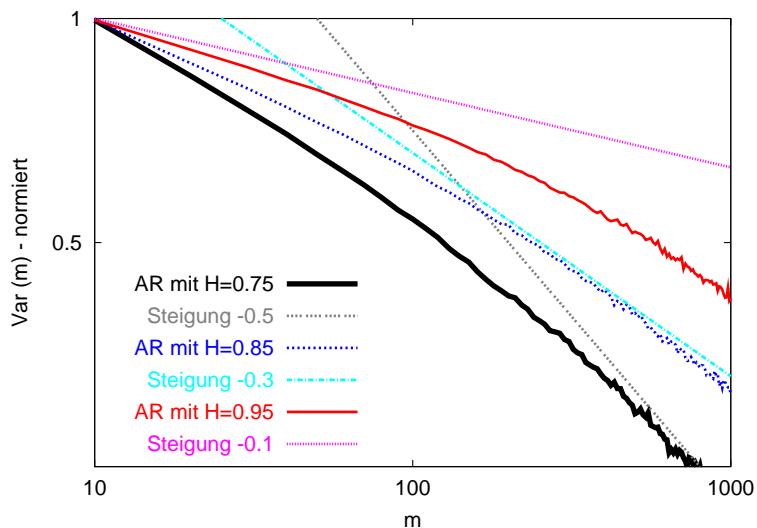


Abbildung C.3: Verifikation des ARH-Generators

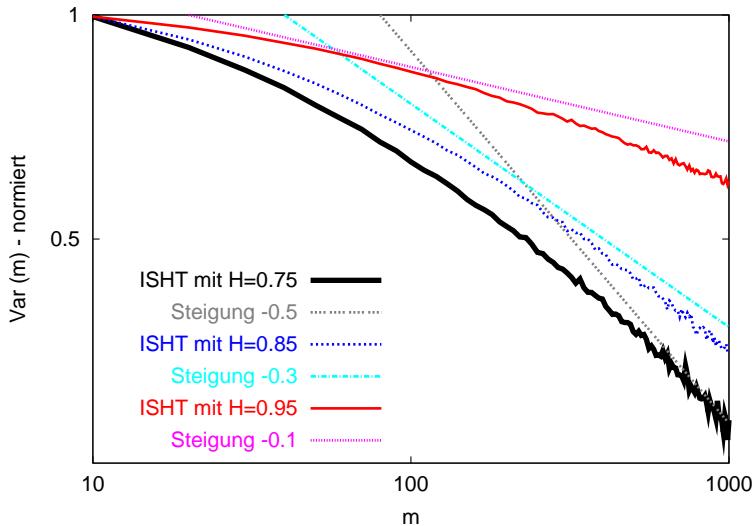


Abbildung C.4: Verifikation des ISHT-Generators

Bezahlt wird der damit verbundene Übergang zu gestutzten heavy-tailed-Verteilungen bei den Verbindungsduern mit einem Verlust der Approximationsgenauigkeit beim Abklingverhalten der skalierten Varianzen für Hurst-Werte nahe 1 (vgl. Abbildung C.4). Die Varianzen zeigen beim ISHT-Generator bei geringen mittleren Datenraten (1000 kbps , 2000 kbps) einen unakzeptabel hohen relativen Fehler. Bei der Durchführung der Simulationsversuche wird daher stets eine mittlere Datenrate von mindestens 3000 kbps generiert, da der relative Fehler für die zu verifizierenden Zielgrößen hier im vorgegebenen Toleranzbereich liegt.

Ein Vergleich der Tabellen C.3 und C.4 zeigt, dass der ISH-Generator auf Grund der Variabilitätseigenschaften der heavy-tailed-Verteilung dazu neigt, zu wenig Verkehr zu generieren. Lange ON-Perioden sind hier verhältnismäßig unterrepräsentiert. Beim AR-Generator tritt dieser Effekt bei gleicher Verteilung für ON- und OFF-Perioden nicht auf, da sowohl der ON- als auch der OFF-Zustand von der genannten Minderung langer Perioden betroffen sind.

Neben den beiden verbindungsorientierten Generatoren ARH und ISHT wird das in [Pax95a] dokumentierte Verfahren zur Approximation der fraktalen Brownschen Bewegung benutzt, welches die Eigenschaften der FBM im Frequenzbereich nachbildet und die schnelle Fourier-Transformation (FFT) zur Rücktransformation in den Zeitbereich einsetzt.

C.2 Netzwerksimulation

Zur Verifikation der Gesamtfunktionalität des Simulators werden weitere Versuche mit einer Ring-Topologie und einem vollvermaschten Netz durchgeführt. Dabei werden die Mittelwerte der gemessenen Datenraten auf den Verbindungsleitungen untersucht. Aufgrund der Symmetrie der Topologien und der eingesetzten Routing-Verfahren sind für diese beiden Spezialfälle die theoretischen Datenraten einfach zu bestimmen (s. u.) und ein Abgleich mit den zugehörigen simulierten Werten ist möglich.

Es werden folgende Bezeichnungen verwendet:

- n_v = Anzahl der Knoten
- n_e = Anzahl der Verbindungsleitungen
- $v_{i,j}$ = mittleres Verkehrsvolumen von Knoten i für Knoten j
- v_v = mittleres insgesamt pro Knoten emittiertes Verkehrsvolumen; $v_v = \sum_{i \neq j} v_{ij}$
- d_{avg} = mittlere Anzahl überbrückter Verbindungsleitungen zwischen Sender und Empfänger

Unter der Prämisse statischer Pfade zwischen den Knoten ist die Belastung einer einzelnen Verbindungsleitung gegeben durch

$$u_{i,j} = \sum_{(k,l): \text{Pfad von } k \text{ nach } l \text{ enthält } (i,j)} v_{i,j} \quad (\text{C.4})$$

Sowohl im Ring als auch im voll vermaschten Netzwerk können die Symmetrie-Eigenschaften ausgenutzt werden, so dass die Betrachtung einzelner Pfade entfallen kann.

Unter Annahme der beiden Voraussetzungen

- **Routing**

Als Routing-Verfahren wird das Kürzeste-Wege-Verfahren eingesetzt (vgl. Abschnitt 5.3.5).

- **Lastprofil**

Jeder Knoten des Netzwerkes generiert Verkehr zu jedem anderen Knoten. Dabei wird jeder mögliche Empfänger mit der gleichen Häufigkeit ausgewählt.

lässt sich die mittlere Datenrate auf einer Verbindungsleitung mit Hilfe der mittleren Anzahl überbrückter Verbindungsleitungen zwischen einem Empfänger und einem Sender wie folgt ausdrücken:

$$u_{i,j} = \frac{n_v \cdot v_v \cdot d_{avg}}{n_e}.$$

Es ergeben sich für die beiden Topologien

- **Ring**

$$\begin{aligned} d_{avg} &= \frac{1}{n_v-1} \begin{cases} 2 \cdot 1 + 2 \cdot 2 + \dots + 2 \cdot \left(\frac{n_v}{2} - 1\right) + \frac{n_v}{2}, & \text{falls } n_v \text{ gerade} \\ 2 \cdot 1 + 2 \cdot 2 + \dots + 2 \cdot \left(\frac{n_v-1}{2}\right), & \text{falls } n_v \text{ ungerade} \end{cases} \\ &= \frac{1}{n_v-1} \begin{cases} \frac{1}{4}n_v(n_v-2) + \frac{n_v}{2}, & \text{falls } n_v \text{ gerade} \\ \frac{1}{4}(n_v+1)(n_v-1), & \text{falls } n_v \text{ ungerade} \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{C.5})$$

- **Vollvermaschtes Netzwerk**

Auf Grund der Tatsache, dass es zwischen je zwei Knoten eine Verbindung gibt, hat man hier $d_{avg} = 1$.

Zur Verifikation werden vier Topologien betrachtet: zwei Ring-Topologien und zwei vollvermaschte Netze, jeweils mit 5 und mit 10 Knoten. Dabei werden der Poisson-Generator und der ARH-Generator verwendet (vgl. Abschnitt 5.4). Insgesamt ergeben sich somit 8 Szenarien.

Der für die Verkehrsgenerierung maßgebliche Parameter v_v wird so angepasst, dass die (theoretische) Belastung der Verbindungsleitungen $u_{i,j}$ in allen Szenarien gleich ist (vgl. Tabelle C.6).

Die Laufzeit der Simulationsversuche beträgt in allen Fällen 2000 s.

| n_v | Topologie | Verkehrstyp | v_v | d_{avg} | $u_{i,j}$ | $\hat{u}_{i,j}$ | r. F. |
|-------|-----------|-------------|-------|-----------|-----------|-----------------|-------|
| 5 | Ring | Poisson | 1000 | 1.5 | 750 | 743.7 | 0.8 % |
| 5 | Ring | SS | 1000 | 1.5 | 750 | 730.8 | 2.6 % |
| 5 | Voll | Poisson | 3000 | 1 | 750 | 751.5 | 0.2 % |
| 5 | Voll | SS | 3000 | 1 | 750 | 733.8 | 2.2 % |
| 10 | Ring | Poisson | 540 | 2.777 | 750 | 753.9 | 0.5 % |
| 10 | Ring | SS | 540 | 2.777 | 750 | 752.5 | 0.3 % |
| 10 | Voll | Poisson | 6750 | 1 | 750 | 745.9 | 0.5 % |
| 10 | Voll | SS | 6750 | 1 | 750 | 742.8 | 1.0 % |

Tabelle C.6: Verifikation der Netzwerksimulation

Die Größen v_v , $u_{i,j}$ und $\hat{u}_{i,j}$ besitzen allesamt die Einheit $kbps$. Der gewonnene Schätzwert $\hat{u}_{i,j}$ wird durch das arithmetische Mittel der Einzelwerte der in der Simulation gemessenen Belastungen der Verbindungsleitungen ermittelt:

$$\hat{u}_{i,j} = \frac{1}{n_e} \sum_{\text{alle } (i,j)} u_{i,j}.$$

Die Spalte r. F. enthält den relativen Fehler zwischen theoretischer und in der Simulation gemessener Belastung der Verbindungsleitungen an, der sich aus

$$\frac{u_{i,j} - \hat{u}_{i,j}}{u_{i,j}}$$

ergibt.

Die gemessenen Werte zeigen eine hinreichend genaue Approximation der entsprechenden theoretischen Werte.

Symbolverzeichnis

Konnektivitäts-basierte Verlässlichkeitsbewertung

| | |
|------------------------------------|-------------------------|
| $\varphi : S \rightarrow \{0; 1\}$ | Systemfunktion |
| $Rel(G, p)$ | Zuverlässigkeitspolynom |

Beschreibung von Netzwerken

| | |
|--------------------------------|--------------------|
| $G = (V, E)$ | Graph |
| $c : E \rightarrow \mathbb{R}$ | Kapazitätsfunktion |
| $N = (G, c)$ | Netzwerk |
| $p = (l_1, \dots, l_n)$ | Pfad |

Beschreibung von Verbindungsleitungen

| | |
|-----------------|--|
| b | Bandbreite [$k\text{bps}, M\text{bps}$] |
| l | Warteschlangenlänge der Verbindungsleitung im Modell |
| δ_{link} | Latenz [ms] |

Verkehrsmodelle

| | |
|-----------------|---|
| n | Paketrate [$1/s$] |
| s_p | Paketgröße [bit] |
| δ_p | Paket-Zwischenankunftszeit [ms] |
| v | Datenrate einer Verkehrsquelle [$k\text{bps}, M\text{bps}$] |
| H | Hurst-Parameter |
| $A_t, t \geq 0$ | kumulierter Ankunftsprozess |

Sprachverkehrsmodell

| | |
|-----------------------|--|
| s_i | Beginnzeitpunkt einer Verbindung |
| t_i | Endezeitpunkt einer Verbindung |
| $u_i = s_i - s_{i-1}$ | Zeitdauer zwischen den Beginnzeitpunkten zweier aufeinander folgender Verbindungen |
| $l_i = t_i - s_i$ | Dauer einer Verbindung |
| λ_a | Verbindungs-Ankunftsrate |
| λ_d | Parameter der exponentialverteilten Dauer von Verbindungen |
| v_{ON} | (konstante) Datenrate einer einzelnen Verbindung [$k\text{bps}, M\text{bps}$] |

ARH-Modell

| | |
|---|--|
| s_i | Beginnzeitpunkt einer ON-Periode |
| t_i | Endezeitpunkt einer ON-Periode |
| $l_{i,ON}$ | Dauer einer ON-Periode |
| $l_{i,OFF}$ | Dauer einer OFF-Periode |
| n | Anzahl überlagerter ON-OFF-Prozesse |
| $F_{ON} : [0, \infty) \rightarrow [0; 1]$ | Verteilungsfunktion für Dauern der ON-Perioden |
| α_{ON} | Abklingparameter von F_{ON} |
| $F_{OFF} : [0, \infty) \rightarrow [0; 1]$ | Verteilungsfunktion für Dauern der OFF-Perioden |
| α_{OFF} | Abklingparameter von F_{OFF} |
| v_{ON} | von einem ON-OFF-Prozess |
| $(W_{i,t}, t \geq 0), 1 \leq i \leq n$ | während der ON-Periode generierte Datenrate [$kbps, Mbps$] |
| $W_t^n = \sum_{i=1}^n W_{i,t}$ | Menge von ON-OFF-Prozessen |
| $\mu_{AR} = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbb{E}(W_t^n)$ | Überlagerung von ON-OFF-Prozessen |
| $\sigma_{AR}^2 = \lim_{t \rightarrow \infty} \text{Var}(W_t^n)$ | mittlere generierte Datenrate von W_t^n im stationären Zustand |
| | Varianz des Überlagerungsprozesses im stationären Zustand |

ISH-Modell

| | |
|------------------------|--|
| λ_a | Ankunftsrate von Verbindungen bei IS-Modellen |
| v_{ON} | von einer Verbindung generierte (konstante) Datenrate [$kbps, Mbps$] |
| μ_{ON} | Erwartungswert der Dauer einer Verbindung [s] |
| N | Anzahl aktiver Verbindungen im stationären Zustand |
| $\rho = \mathbb{E}(N)$ | Erwartungswert von N |
| μ_{IS} | mittlere generierte Datenrate im stationären Zustand |
| σ_{IS}^2 | Varianz des aggregierten ISH-Prozesses im stationären Zustand |
| α | Abklingparameter der Verteilung der Verbindungsduer |

ISHV-Modell

| | |
|-------------------|--|
| V_{ON} | von einer Verbindung generierte Datenrate [$kbps, Mbps$] |
| μ_{ISHV} | mittlere generierte Datenrate im stationären Zustand |
| σ_{ISHV}^2 | Varianz des aggregierten ISHV-Prozesses im stationären Zustand |

Zeitreihenanalyse

| | |
|-----------------------------------|--|
| x_1, \dots, x_n | (empirische) Zeitreihe |
| $(X_k, k \in \mathbb{N})$ | (theoretische) Zeitreihe |
| $(X_i^{(m)}, i \in \mathbb{N})$ | skalierte Zeitreihe zum Skalierungsfaktor m |
| δ_{trace} | Abtastintervall auf Verbindungsleitungen [ms] |
| $\rho(l), l \in \mathbb{N}$ | Autokorrelation der Zeitreihe |
| $\hat{\rho}(l), l \in \mathbb{N}$ | Schätzwert für die Autokorrelation der Zeitreihe |
| $\sigma^2(m)$ | skalierte Varianz zum Skalierungsfaktor m |
| $\hat{\sigma}^2(m)$ | Schätzwert für die skalierte Varianz zum Skalierungsfaktor m |
| n_{Seg} | Anzahl der Segmente bei Segmentierung der skalierten Varianzen |
| $\bar{\sigma}_{Seg,i}^2$ | segmentierte skalierte Varianz |
| $q_{Seg,i}$ | Segment-Variabilitätsquotient |
| $a_{Seg,i}$ | Segment-Variationskoeffizient |
| $q_{Seg,i}^*$ | Segment-Quotient der Variationskoeffizienten |

Pareto-Verteilungen

| | |
|--------------------|--|
| $F_{par}(x)$ | Verteilungsfunktion der Pareto-Verteilung |
| $f_{par}(t)$ | Dichte der Pareto-Verteilung |
| $F_{par*}(x)$ | Verteilungsfunktion der verschobenen Pareto-Verteilung |
| $f_{par*}(t)$ | Dichte der verschobenen Pareto-Verteilung |
| $f_{par,trunc}(t)$ | Dichte der gestutzten verschobenen Pareto-Verteilung |

Effektive Bandbreite

| | |
|---|------------------------------|
| $A = (A_t, t \in \mathbb{R}, t \geq 0)$ | kumulierter Ankunftsprozess |
| $eb_A(\theta, \tau)$ | effektive Bandbreite von A |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------|--|
| ACF | Autocorrelation Function |
| ARE | Alternating Renewal Exponential |
| ARH | Alternating Renewal Heavy-tailed |
| ARP | Alternating Renewal Pareto |
| AS | Autonomous System |
| ATM | Asynchronous Transfer Mode |
| BGP | Border Gateway Protocol |
| BZE | Basis-Zeiteinheit |
| CBR | Constant Bit Rate |
| CTD | Cell Transfer Delay |
| CVS | Concurrent Versions System |
| DES | Diskrete ereignisorientierte Simulation Discrete Event Simulation |
| DLV | Dienstleistungsvereinbarung |
| DS | Differentiated Services |
| DV | Distance Vector |
| FBM | Fractional Brownian Motion |
| FFT | Fast Fourier Transform |
| FGN | Fractional Gaussian Noise |
| FIFO | First In, First Out |
| FMEA | Failure Mode and Effect Analysis |
| FTA | Fault Tree Analysis |
| FTP | File Transfer Protocol |
| Gbps | Giga bits per second |
| GSPN | Generalized Stochastic Petri Net |
| HTTP | Hypertext Transfer Protocol |
| IETF | Internet Engineering Task Force |
| IP | Internet-Protokoll |
| ISE | Infinite Source Exponential |
| ISH | Infinite Source Heavy-tailed |
| ISHT | Infinite Source Heavy-tailed Truncated |
| ISHV | Infinite Source Heavy-tailed Varying Bandwidth |
| ISP | Internet Service Provider |
| kbps | kilo bits per second |
| kpps | kilo packets per second |
| LRD | Long-Range Dependent |
| LS | Link State |
| Mbps | Mega bits per second |

| | |
|-------|--|
| NED | Network Description |
| NNI | Network Network Interface |
| O & M | Operations and Maintenance |
| oBdA | ohne Beschränkung der Allgemeinheit |
| OMNET | Objective Modular Network Testbed in C++ |
| OSPF | Open Shortest Path First |
| PCR | Peak Cell Rate |
| PHB | Per Hop Behaviour |
| PP | Poisson-Prozess |
| PPBP | Poisson Pareto Burst Process |
| RCS | Revision Control System |
| RFC | Request for Comments |
| RIP | Routing Information Protocol |
| RP | Referenzpunkt |
| RSVP | Resource Reservation Setup Protocol |
| SBD | Subnetz-Beschreibungs-Datei |
| SLA | Service Level Agreement |
| SPN | Stochastic Petri Net |
| SRN | Stochastic Reward Net |
| SRD | Short-Range Dependent |
| SSQ | Single Server Queue |
| SWR | Software Reliability |
| SONET | Synchronous Optical Network |
| TCP | Transmission Control Protocol |
| TOS | Type of Service |
| UNI | User Network Interface |
| VBR | Variable Bit Rate |
| VK | Variationskoeffizient |
| ZAZ | Zwischenankunftszeit |

Literaturverzeichnis

- [Add99] ADDIE, R. G.; NEAME, T. D.; ZUKERMAN, M.: *Modeling Superposition of Many Sources Generating Self-similar Traffic*. In: *ICC '99, Vancouver, Canada, June 1999*, Seiten 387–391, 1999.
- [Ajm95] AJMONE, M.: *Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets*. John Wiley & Sons, London, 1995.
- [ATM99] ATM FORUM: *Traffic Management Specification 4.1*, 1999.
- [Bal92] BALL, M. O.; COLBOURN, C. J.; PROVAN, J. S.: *Network Reliability*. Technical Report 92-74, Institute for Systems Research, University of Maryland, 1992.
- [Bela] BELWUE: *Das Landeshochschulnetz Baden-Württembergs - <http://www.belwue.de>*.
- [Belb] BELWUE: *Störungsmeldungen im BelWue - <http://www.belwue.de/netzprobleme/>*.
- [Ben00] BENNETT, J.; GROTEFELD, G; KOCATURK, M.; MANSEUR, B.; MAKRIS, S. (EDITORS): *Enhanced Network Survivability Performance (Draft)*. Technical Report 2000-001R43, Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS), Working Group T1A1.2, 2000.
- [Ben01] BEN-AMEUR, W.; LIAU, B. AND MICHEL, N.: *Routing Strategies for IP networks*. Telektronik Magazine, 2:145–158, 2001.
- [Ben02] BENNETT, R.; MAKRIS, S.; NGUYEN, A.; PATERSON, R.; WEBSTER, A. (EDITORS): *Reliability Aspects of Next Generation Networks (Draft)*. Technical Report 2002-001R1, Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS), Working Group T1A1.2, 2002.
- [Ber87] BERTSEKAS, D.; GALLAGER, R.: *Data Networks*. Prentice Hall, London, 1987.
- [Ber94] BERAN, J.: *Statistics for Long-memory Processes*. Chapman & Hall, New York, 1994.
- [Ber95] BERAN, J.; SHERMAN, R.; TAQQU, M. S.; WILLINGER, W.: *Long Range Dependence in Variable Bit-rate Video Traffic*. IEEE Transactions on Communications, 43:1566–1579, 1995.
- [Bir88] BIROLINI, A.: *Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme*. Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [Bod00] BODAMER, S.; CHARZINSKI, J: *Evaluation of Effective Bandwidth Schemes for Self-similar Traffic*. In *Proceedings of the 13th ITC Specialist Seminar on IP Traffic Measurement, Modeling and Management, Monterey, CA, 2000*, pages 1–10, 2000.
- [Bol98] BOLCH, G.; GREINER, S.; DE MEER, H.; TRIVEDI, K.: *Queueing Networks and Markov Chains*. John Wiley & Sons, New York, 1998.

- [Bra94] BRADEN, R.; CLARK, D.: *RFC 1633: Integrated Services in the Internet Architecture: An Overview*. *Informational*, 1994.
- [Bra98] BRADEN, B. ET AL: *RFC 2309: Recommendations on Queue Management and Congestion Avoidance in the Internet (Internet Draft)*. *Informational*, 1998.
- [Bul97] BULTEAU, S.: *Étude Topologique des Réseaux de Communication: Fiabilité et Vulnérabilité*. PhD thesis, Université de Rennes, 1997.
- [Can01] CANADAY, R.; NGUYEN, A.; MAKRIS, S.; PATERSON, R.; WEBSTER, A. (EDITORS): *Reliability/Availability Framework for IP-based Networks and Services (Draft)*. Technical Report 2001-002R5, Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS), Working Group T1A1.2, 2001.
- [Car95] CARMAN, D. W.; DOLINSKY, A. A.; LYU, M. R.: *Software Reliability Engineering Study of a Large-scale Telecommunications Software System*. In *Proceedings of ISRE*, 1995.
- [Car98] CARLSON, M.; DAVIES, E.; WANG, Z.; WEISS, W.: *RFC 2475: An Architecture for Differentiated Services*. *Informational*, 1998.
- [Cha96] CHAKKA, R.; MITRANI, I.: *Stochastic Networks - Theory and Applications*, chapter Approximate Solutions for Open Networks with Breakdowns and Repairs. Oxford Science Publications, New York, 1996.
- [Cho97] CHOW, Y.; TEICHER, H.: *Probability Theory (3rd edition)*. Springer-Verlag, New York, 1997.
- [Col87] COLBOURN, C. J.: *The Combinatorics of Network Reliability*. Oxford University Press, New York, 1987.
- [Com00] COMER, D.: *Internetworking with TCP/IP (4th edition)*. Prentice Hall, 2000.
- [Con02] CONTE, G.; LISTANTI, M.; SABELLA, R.; SETTEMBORE, M.: *Protection and Restoration Strategies in WDM Mesh Networks*. In *Proceedings of ONDM*, February 2002.
- [Con03] CONCURRENT VERSIONS SYSTEM: *Concurrent Versions System (CVS)* - <http://www.csvhome.org>, 2003.
- [Cro95] CROVELLA, M.; BESTAVROS, A.: *Explaining World Wide Web Traffic Self-Similarity*. Technical Report 1995-015, Computer Science Department, Boston University, 1995.
- [Cro96] CROVELLA, M.; BESTAVROS, A.: *Self-Similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes*. In *Proceedings of SIGMETRICS'96: The ACM International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, Philadelphia, Pennsylvania, May 1996. Also, in *Performance evaluation review*, May 1996, 24(1):160-169.
- [Cro98] CROVELLA, M. E.; TAQQU, M. S.; BESTAVROS, A.: *A Practical Guide To Heavy Tails*, chapter Heavy-Tailed Probability Distributions in the World Wide Web, pages 3–26. Chapman & Hall, New York, 1998.
- [Cro00] CROVELLA, M.; LIPSKY, L.: *Self-similar Network Traffic and Performance Evaluation*, chapter Simulations with Heavy-tailed Workloads. John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [Det02] DETKEN, K.-O.: *Echtzeitplattformen für das Internet*. Addison-Wesley, München, 2002.

- [Deu82] DEUERMEYER, B. L.: *A New Approach for Network Reliability Analysis*. IEEE Transactions on Reliability, R-31:350–354, 1982.
- [Dol94] DOLINSKY, A. A.; GLICKMAN, S. E.: *Software Reliability Estimations for Telecommunications Products*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 12:292–301, 1994.
- [DRC00] *Proceedings of the Second International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*. Herbert Utz Verlag, München, 2000.
- [Ell97] ELLISON, R.; FISHER, D.; LINGER, R.; LIPSON, H.; LONGSTAFF, T. AND MEAD, N.: *Survivable Network Systems: An Emerging Discipline*. Technical Report 013, Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 1997.
- [Err94] ERRAMILLI, A.; SINGH, R. P.; PRUTHI, P.: *Chaotic Maps As Models of Packet Traffic*. Proc. 14th Int. Teletraffic Cong., 6-10 June 1994 North-Holland Elsevier Science B.V., 1:329–338, 1994.
- [Err97] ERRAMILLI, A.; PRUTHI, P.; WILLINGER, W.: *Fast and Physically-based Generation of Self-similar Network Traffic with Applications to ATM Performance Evaluation*. In *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, pages 997–1004, 1997.
- [Err02] ERRAMILLI, A.; ROUGHAN, M.; WILLINGER, W.: *Self-similar Traffic and Network Dynamics*. Proceedings of the IEEE, 90(5):800–819, 2002.
- [Fil91] FILIPIAK, J.: *Analysis of Automatic Network Management Controls*. IEEE Transactions on Communications, 39(12):1776–1786, 1991.
- [Flo93] FLOYD, S.; JACOBSON, V.: *Random early Detection Gateways for Congestion Avoidance*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1(4):397–413, 1993.
- [Fon99] FONSECA, N. L. S.; MAYO, G. S.; NETO, C. A. V.: *Connection Admission Management of Self Similar Traffic*. In *Latin America Network Operations and Management Symposium*, 1999, pages 320–332, 1999.
- [Fon00] FONSECA, N. L. S.; MAYOR, G. S.; NETO, C. A. V.: *On the Equivalent Bandwidth of Self-similar Sources*. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, 2:104–124, 2000.
- [For62] FORD, L. R.; FULKERSON, D. R.: *Flows in Networks*. Princeton University Press, 1962.
- [Fro94] FROST, V. S.: *Traffic Modeling for Telecommunications Networks*. IEEE Communications Magazine, 3:70–79, 1994.
- [Gae77] GÄDE, K. W.: *Zuverlässigkeit. Mathematische Modelle*. Carl Hanser Verlag, München, 1977.
- [Gro95] GROETSCHEL, M.; MONMA, C. L.; STOER, M.: *Design of Survivable Networks*, volume 7 of *Handbooks in Operations Research and Management Science, Network Models*. Elsevier, Amsterdam, 1995.
- [Gro02] GROSS, D.; SHORTLE, J.: *Difficulties in Simulating Queues with Pareto Service*. In *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, pages 407–415, 2002.

- [Gue91] GUERIN, R.; PERIS, V.: *Equivalent Capacity and its Application to Bandwidth Allocation in high-speed Networks*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 9(7):968–981, 1991.
- [Gue99] GUERIN, R.; PERIS, V.: *Quality-of-Service in Packet Networks: Basic Mechanisms and Directions*. Computer Networks, 31(3):169–189, 1999.
- [Heg99] HEGERING, H.-G.; ABECK, S.; NEUMAIR, B.: *Integrated Management of Networked Systems*. Morgan Kaufman Publishers, San Francisco, 1999.
- [Hui00] HUITEMA, C.: *Routing in the Internet*. Prentice Hall, London, 2000.
- [Inf81] INFORMATION SCIENCES INSTITUTE, UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA: *RFC 791: Internet Protocol. DARPA Internet Program Protocol Specification*, 1981.
- [ITU] ITU: *Recommendation I.350: General Aspects of Quality of Service and Network Performance in Digital Networks, Including ISDNs*.
- [Jai91] JAIN, G.: *The Art of Computer Systems Performance Analysis*. John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [Jal94] JALOTE, P.: *Fault Tolerance in Distributed Systems*. Prentice Hall, New Jersey, 1994.
- [Jeo98] JEONG, H.; McNICKLE, D.; PAWLIKOWSKI, K.: *A Comparative Study of Generators of Synthetic Self-Similar Teletraffic*. Technical Report 3/98, Department of Computer Science, University of Canterbury, 1998.
- [Jeo02] JEONG, H.-D. J.: *Modelling of Self-similar Teletraffic for Simulation*. PhD thesis, Department of Computer Science, University of Canterbury, 2002.
- [Joo01] JOO, Y.; RIBEIRO, V.; FELDMANN, A.; GILBERT, A. C.; WILLINGER, W.: *TCP/IP Traffic Dynamics and Network Performance: A Lesson in Workload Modeling, flow control, and trace-driven simulations*. Computer Communications Review, 31:25–36, 2001.
- [Kad95] KADERALI, F., POGUNTKE, W.: *Graphen, Algorithmen, Netze - Grundlagen und Anwendungen in der Nachrichtentechnik*. Vieweg Verlag, 1995.
- [Kau95] KAUFFELS, F.-J.: *Netzwerk- und System-Management*. DATACOM Buchverlag, Bergheim, 1995.
- [Kaw99] KAWAMURA, R.; OHTA, H.: *Architectures for ATM Network Survivability and their Field Deployment*. IEEE Communications Discrete Applied Mathematics, August 1999:88–94, 1999.
- [Kel96] KELLY, F.: *Notes on Effective Bandwidths*. Stochastic Networks: Theory and Applications, 4:141–168, 1996.
- [Kes93] KESIDIS, G.; WALRAND, J.; CHANG, C.-S.: *Effective Bandwidths for Multiclass Markov Fluids and other ATM Sources*. IEEE Transactions on Networking, 1(4):424–428, 1993.
- [Kle75] KLEINROCK, L.: *Queueing Systems, Vol. 1: Theory*. John Wiley & Sons, New York, 1975.
- [Kli95] KLIVANSKY, S.; MUKHERJEE, A.; SONG, C.: *On Long-Range Dependence in NSFNET Traffic*. Technical Report 25, Georgia Institute of Technology, 1995.

- [Kur96] KURTZ, T.G.: *Stochastic Networks: Theory and Applications*, chapter Limit Theorems for Workload Input Models. Clarendon Press, Oxford, 1996.
- [Lap92] LAPRIE, J.-C.: *Dependability: Basic Concepts and Terminology*. Springer-Verlag, New York, 1992.
- [Lee80] LEE, S. H.: *Reliability Evaluation of a Flow Network*. IEEE Transactions on Reliability, 29(1):24–26, 1980.
- [Lel94] LELAND, W. E.; TAQQU, M. S.; WILLINGER, W.; WILSON, V.: *On the Self-similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)*. IEEE Transactions on Networking, 2:1–15, 1994.
- [Lev95] LEVESON, N.: *Safeware - System Safety and Computers*. Addison-Wesley, New York, 1995.
- [Lev00] LEVY, J. B.; TAQQU, M. S.: *Renewal Reward Processes with Heavy-tailed Inter-renewal Times and Heavy-tailed Rewards*. Bernoulli, 6(1):23–44, 2000.
- [Lew96] LEWIS, J. AND RUSSELL, R.: *An Introduction to Large Deviations for Teletraffic Engineers*. <ftp://www.stp.dias.ie/DAPG/LDtut96.ps>, 1996.
- [Mal98] MALKIN, G.: *RFC 2453: RIP Version 2. Standard*, 1998.
- [Man01] MANSOUR, Y.; PATT-SHAMIR, B.: *Jitter Control in QoS Networks*. IEEE Transactions on Networking, 9:492–502, 2001.
- [Mat89] MATTERN, F.; HEHL, H.: *Diskrete Simulation - Prinzipien, Probleme der Effizienzsteigerung durch Parallelisierung*. Informatik Spektrum, 12(4):198–210, 1989.
- [Med93] MEDHI, J.: *Stochastic Processes*, (2nd edition). John Wiley & Sons, New York, 1993.
- [Med94] MEDHI, D.: *A Unified Approach to Network Survivability for Teletraffic Networks: Models, Algorithms and Analysis*. IEEE Transactions on Communications, 42(4):534–548, 1994.
- [Mol03] MOLINERO-FERNANDEZ, P.: *Circuit Switching in the Internet*. PhD thesis, Department of Electrical Engineering, Stanford University, 2003.
- [Mor98] MORGAN, S.: *The Internet and the Local Telephone Network: Conflicts and Opportunities*. IEEE Network Magazine, January 1998, pages 42–48, 1998.
- [Moy98] MOY, J.: *RFC 2328: OSPF Version 2. Standard*, 1998.
- [Mus87] MUSA, A.: *Software Reliability - Measurement, Application, Prediction*. McGraw-Hill, New York, 1987.
- [Mus99] MUSA, A.: *Software Reliability Engineering*. McGraw-Hill, New York, 1999.
- [Nea01] NEAME, T. D.; ZUKERMAN, M.; ADDIE, R.G.: *A Tradeoff between Increased Network Speed and Reduced Effective Bandwidths*. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, 2001. ICC 2001.*, volume 4, pages 979–984, 2001.
- [Nea03] NEAME, T. D.; ZUKERMAN, M.; ADDIE, R.G.: *Internet Traffic Modeling and Future Technology Implications*. In *Proceedings of IEEE INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. 30 March - 3 April 2003.*, volume 1, pages 587–596, 2003.

- [Nei98] NEIDHARDT, A. L.; WANG, J. L.: *The Concept of Relevant Time Scales and Its Application to Queuing Analysis of Self-Similar Traffic (or Is Hurst Naughty or Nice?)*. In *Measurement and Modeling of Computer Systems*, pages 222–232, 1998.
- [Net02] NETWORK RELIABILITY INTEROPERABILITY COUNCIL V: *Focus Group 2 Subcomitee 2.B2 Final Report - Data Reporting and Analysis for Packet Switching*, 2002.
- [NG,03] NG, J. K.-Y.; SONG, S.; TANG, B.; ZHAO, W.: *The Statistical End-to-end Delay Guarantee for Networks with Self-similar Traffic*. Technical report, Department of Computer Science, Hong Kong Baptist University, 2003.
- [Nic98] NICHOLS, K.; BLAKE, S.; BAKER, F.; BLACK, D.: *RFC 2474: Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers. Standard*, 1998.
- [Nor94] NORROS, I.: *A Storage Model with Self-Similar Input*. Queueing Systems, 16:387.396, 1994.
- [Nor95] NORROS, I.: *On the Use of Fractional Brownian Motion in the Theory of Connectionless Networks*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 13(6):953 –962, 1995.
- [Ora90] ORAN, D.: *RFC 1142: OSI IS-IS Intra-domain Routing Protocol*, 1990.
- [Ore01] ORENSTEIN, P; KIM, H; LAU, C. L.: *Bandwidth Allocation for Self-similar Traffic Consisting of Multiple Traffic Classes with Distinct Characteristics*. In *Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM '01, November 2001*, volume 4, pages 2576–2580, 2001.
- [Pag91] PAGE, BERND: *Diskrete Simulation*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1991.
- [Par96] PARK, K.: *On the Relationship Between File Sizes, Transport Protocols, and Self-Similar Network Traffic*. In: *Proc. IEEE International Conference on Network Protocols*, Seiten 171–180, 1996.
- [Pat97a] PATEL, A.; WILLIAMSON, C.: *Effective Bandwidth of Self-Similar Traffic Sources: Theoretical and Simulation Results*. In: *Proceedings of the IASTED Conference on Applied Modeling and Simulation, Banff, July 1997*, 1997.
- [Pat97b] PATEL, A.; WILLIAMSON, C.: *Statistical Multiplexing of Self-Similar Traffic: Theoretical and Simulation Results*, 1997.
- [Pax95a] PAXSON, V.: *Fast Approximation of Self Similar Network Traffic*. Technischer Bericht LBL-36750, Lawrence Berkeley Laboratory and EECS Division, University of California, 1995.
- [Pax95b] PAXSON, V.; FLOYD, S.: *Wide Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling*. IEEE Transactions on Networking, 3(3):226–244, 1995.
- [Pax97a] PAXSON, V.: *End-to-end Routing Behavior in the Internet*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 5(5):601–615, 1997.
- [Pax97b] PAXSON, V.; FLOYD, S.: *Why we do not Know how to Simulate the Internet*. In *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, 1997.
- [Qia99] QIAO, C.; YOO, M.: *Optical Burst Switching (OBS) - A New Paradigm for an Optical Internet*. High Speed Networks (JHSN), 8(1):69–84, 1999.

- [Rai90a] RAI, S.; AGRAWAL, D. P.: *Advances in Distributed System Reliability*. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, 1990.
- [Rai90b] RAI, S.; AGRAWAL, D. P.: *Distributed Computing Network Reliability*. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, 1990.
- [Rei85] REISIG, W.: *Petri Nets*. Springer-Verlag, New York, 1985.
- [Rek95] REKHTER, Y.; LI, T.: *RFC 1654: Border Gateway Protocol 4 (BGP-4). Standard*, 1995.
- [Rob99] ROBBINS, A.: *UNIX in a Nutshell (3rd edition)*. O'Reilly, Sebastopol, 1999.
- [Ros97] ROSS, S. M.: *Simulation*. Academic Press, San Diego, 1997.
- [Ryu96a] RYU, B. K. AND ELWALID, A.: *The Importance of Long-Range Dependence of VBR Video Traffic in ATM Traffic Engineering: Myths and Realities*. In *SIGCOMM*, pages 3–14, 1996.
- [Ryu96b] RYU, B. K.; LOWEN, S. B.: *Point Process Approaches to Modeling and Analysis of Self-Similar Traffic - Part 1: Model Construction*. In *INFOCOM (3)*, pages 1468–1475, 1996.
- [Ryu98] RYU, B.; LOWEN, S.: *Point Process Models for Self-similar Network Traffic with Applications*. *Stochastic Models*, 14(3):735–761, 1998.
- [Saa94] SAADWI, T. N., AMMAR, M. H.: *Fundamentals of Telecommunication Systems*. John Wiley & Sons, New York, 1994.
- [Sai94] SAITO, H.: *Teletraffic Technologies in ATM Networks*. Artech House, Norwood, 1994.
- [Sch87] SCHWARTZ, M.: *Telecommunication Networks - Protocols, Modeling and Analysis*. Addison-Wesley, 1987.
- [Sch96] SCHÄFER, A.: *Phasenverteilungen und das 3-Moment-Matching-Problem, Diplomarbeit von Andreas Schäfer am Fachbereich Mathematik, Technische Universität Darmstadt*, 1996.
- [Sch99] SCHNEEWEISS, W.: *Petri Nets for Reliability Modeling*. LILoLe-Verlag, 1999.
- [Sch01a] SCHÄFER, A.: *A Probabilistic Failure Modeling Approach for Network Reliability Analysis. Fast Abstract. The International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN), Göteborg*, 2001.
- [Sch01b] SCHLITTGEN, R.: *Zeitreihenanalyse*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2001.
- [Sik02] SIKDAR, B.; VASTOLA, K. S.; KALYANARAMAN, S.: *Queue Management Algorithms and Network Traffic Self-Similarity*. In: *Proceedings of IEEE HPSR, May 2002.*, Seiten 319–323, 2002.
- [Som01] SOMMERVILLE, I.: *Software Engineering (6th edition)*. Addison-Wesley, 2001.
- [Sto92] STOER, M.: *Design of Survivable Networks*. Springer-Verlag, 1992.
- [Str91] STROUSTRUP, B.: *The C++ Programming Lanuage (3rd edition)*. Addison-Wesley, 1991.
- [Syr97] SYRJAKOW, M.: *Verfahren zur effizienten Parameteroptimierung in Simulationsmodellen*. Doktorarbeit, Institut für Rechnerentwurf und Fehlertoleranz, Universität Karlsruhe, 1997.
- [Tan96] TANENBAUM, A. S.: *Computer Networks (3rd edition)*. Prentice Hall, 1996.

- [Taq97] TAQQU, M.; WILLINGER, W.; SHERMAN, R.: *Proof of a Fundamental Result in Self-Similar Traffic Modeling*. ACMCCR: Computer Communications Review, 27, 1997.
- [Tec01] TECHNICAL UNIVERSITY OF BUDAPEST, DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS, ANDRAS VARGA: *OMNET++ Discrete Event Simulator* - <http://www.hit.bme.hu/phd/vargaa/omnetpp.htm>, 2001.
- [Tri93] TRIVEDI, K. S.; CIARDO, G.; MALHOTRA, M.; SAHNER, R. A.: *Performance Evaluation of Computer and Communication Systems. Joint Tutorial Papers Performance '93 and Sigmetrics '93, LNCS 729*, chapter Dependability and Performability Analysis, pages 587–612. Springer, New York, 1993.
- [Tsy97] TSYBAKOV, B.: *On Self-similar Traffic in ATM Queues: Definitions, Overflow Probability Bound and Cell Delay Distribution*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 5:397–409, 1997.
- [Var94] VARSHNEY, P. K., JOSHI, A. R.: *Reliability Modeling and Performance Evaluation of Variable Link Capacity Networks*. IEEE Transactions on Reliability, 43:378–382, 1994.
- [Ver00] VERES, A., BODA, M.: *The Chaotic Nature of TCP Congestion Control*. In *INFOCOM (3)*, pages 1715–1723, 2000.
- [Weg92] WEGMANN, H.; LEHN, J.: *Einführung in die Statistik (2. Aufl.)*. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1992.
- [Whi97] WHITE, P. P.: *RSVP and Integrated Services in the Internet: A Tutorial*. IEEE Communications Magazine, 5:100–106, 1997.
- [Wil96] WILLINGER, W., TAQQU, M., ERRAMILLI, A.: *Stochastic Networks - Theory and Applications*, chapter A Bibliographical Guide to Self-similar Traffic and Performance Modeling for Modern High-speed Networks. Oxford Science Publications, New York, 1996.
- [Wil97] WILLINGER, W.; TAQQU, M. S.; SHERMAN, R.: *Self-similarity through High-Variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 5:71–86, 1997.
- [Wil98] WILLINGER, W.: *Where Mathematics meets the Internet*. Notices of the American Mathematical Society, 45:961–970, 1998.
- [Wil00] WILLINGER, W.; PARK, K.: *Self-similar Network Traffic and Performance Evaluation*, chapter Self-similar Network Traffic: An Overview. John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [Wil01] WILLINGER, W.; PAXSON, V.; REIDI, R. AND TAQQU, M.: *Data Network Traffic. Long-range Dependence: Theory and Applications*, chapter Long-Range Dependence and Data Network Traffic. Birkhäuser, 2001.
- [Wil02a] WILLINGER, W; DOYLE, J: *Robustness and the Internet: Design and Evolution*, 2002.
- [Wil02b] WILLINGER, W.; GOVINDAN, R.; JANMIN, S.; PAXSON, V.; SHENKER, S.: *Scaling Phenomena in the Internet: Critically examining Criticality*. In *Proceedings of Natl. Acad. Sci. USA*, volume 99, pages 2573–2580, 2002.
- [Wis99] WISCHIK, D.: *The Output of a Switch, or, Effective Bandwidths for Networks*. Queueing Systems, 32:383–396, 1999.

- [Wö90] WÖHLBIER, G. (HRSG.): *Planung von Telekommunikationsnetzen, Band 1, Fernsprechnetze*. v. Dekker's Verlag, Heidelberg, 1990.
- [Wur01] WURM, A.: *Qualitätsmanagement versus Bandbreite*. Networkworld, 2001(21), 2001.
- [Xia99] XIAO, X.; NI, L. M.: *Internet QoS: A Big Picture*. IEEE Network, 13(2):8–18, Mar 1999.
- [Yur99] YURCIK, B.: *Adaptive Multi-Layer Network Survivability: A Unified Framework for Countering Cyber-Terrorism*, 1999.
- [Zeg96] ZEGURA, E. W.; CALVERT, K. L.: *Modeling Internet Topology*. In *Proceedings of IEEE Infocom '96*, 1996.
- [Zol94] ZOLFAGHARI, A.; KAUDEL, F. J.: *Framework for Network Survivability Performance*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 12:46–51, 1994.

Index

- Abbildungsgenauigkeit, 36
Abklingverhalten
 der skalierten Varianzen, 184
 der zweiten Momente, 109, 134
Abtastfrequenz, 96
Abtastraster, 97
Adresse, 55
Adressierung, 159
Anfangsmarkierung, 42
Angriff, 49, 87, 89
asynchrone Datenübertragung, 12
ATM, 25
Ausfall, 18, 33, 88, 143
 -Intensität, 45
 -Szenario, 90, 146, 147
 -behandlung, 22, 67
 -dauer, 20, 88
 -eintritt, 111
 -erkennungsphase, 19
 -profil, 86
 -statistik, 88, 147
 -ursache, 87
 -wahrscheinlichkeit, 38
Komponenten-, 33
System-, 33
Ausfallbehandlung, 55
Ausfalldauer, 88
Autokorrelation, 96, 170
Autokovarianz, 170
autonomes System, 56
Bearbeitungsverzögerung, 23, 32
Bedienstation, 43
Bedienstrategie, 43, 131, 144
Bedienung, 60
Bedienzeit, 43
beeinträchtigter Pfad, 89
BelWue, 87
Benutzermetrik, 31
Berechnungsfehler, 88
Betriebsdauer, 20
bewertetes Szenario, 146
Bewertungsfehler, 152
Bewertungsfunktion, 148
Bewertungskriterium, 147
BGP, 64
Broadcasting, 13
byzantinischer Fehler, 88
closed loop-Ansatz, 77, 141
Datagramm-Übertragung, 12
Datennetz, 12
Defektzustand, 31
deterministische chaotische Abbildung, 80
Dichte, 171
Dienst
 -Attribut, 25
 -geber, 14
 -nehmer, 14
 Netzwerk-, 24
 System-, 24
 Träger-, 24
 Transport-, 24
 verbindungsloser, 12
 verbindungsorientierter, 11
Dienstgüte, 23, 60
Dienstgütekasse, 25, 131
Dienstleistungsvereinbarung, 19
Differentiated Services, 26
Distanz-Vektor-Verfahren, 64
DLV, *siehe* Dienstleistungsvereinbarung
drahtloses Netzwerk, 13
Durchsatz, 33, 59
effektive Bandbreite, 115, 180
Effizienz, 61
Ein-Fehler-Annahme, 147
Endeinrichtung, 15
Entwurfsfehler, 44
Ereignis, 47
Ereignisliste, 47
Erklärungsmodell, 35
Experiment, 92

- Exponentialverteilung, 49
Fairness, 61
Fehler, 18
 -Injektor, 158
 -behebungsphase, 19
 -diagnosephase, 19
 -injektion, 89
 -ursache, 18
 -wirkung, 19
Berechnungs-, 88
Bewertungs-, 152
byzantinischer, 88
Entwurfs-, 44
Implementierungs-, 44
intermittierender, 123
konzeptioneller, 152
Simulations-, 152
Unterlassungs-, 88, 152
Fehlerbaumanalyse, 27
Fehlermodell, 86
Fehlzustand, 18
Festnetz, 13
Fluid-Verkehrsmodell, 69
FMEA, 27
Fourier-Transformation, 170
fraktale Brownsche Bewegung, 81, 136, 180
FTA, *siehe* Fehlerbaumanalyse
Funktionswahrscheinlichkeit, 38
gemittelte Zeitreihe, 173
Graph, 56
GSPN, 42

Hardware, 54
heavy-tailed-Eigenschaft, 49, 75, 78, 171, 185
hochfrequenter Ausfallzyklus, 123
hohe Last, 126
Humanware, 55
Hurst-Parameter, 72, 83, 119, 138, 173

IETF, 26
Implementierungsfehler, 44
Importance Sampling, 89
Intaktzustand, 31
Integrated Services, 26
IP, 25
ISE-Modell, 68
ISH-Modell, 77
ISHT-Modell, 79

ISIS, 64
ISO-OSI-Schichtenmodell, 14

Jitter, 32

Kanaltabelle, 60, 65
Kendall-Notation, 43
Komplexität, 164
Komponenten-Ausfall, 33
konnektivitätsbasierte Verlässlichkeitsanalyse, 37
Kontrolldaten, 11, 14
Kontrollzentrum, 66
konzeptioneller Fehler, 152
Korrelation, 169
Kovarianz, 169
kovarianzstationär, 170
kritischer Zeitbereich, 97
Kurzzeitabhängigkeit, 72, 174

Lag, 170
LAN, *siehe* lokales Netzwerk
Langzeitabhängigkeit, 71, 133, 144, 174
Lastparameter, 85
Lastprofil, 84
Latenz, 58, 184
Laufzeit, 58, 162
Laufzeitvariation, 32
Leistungsanalyse, 145
Leistungsmetrik, 31
Leitungsvermittlung, 11
Link, 13
Link-State-Verfahren, 64
lokales Netzwerk, 13
Luftschnittstelle, 13

Makroprofil, 85
MAN, *siehe* Stadtnetzwerk
Mantelprozess, 136
Markow-Eigenschaft, 68
Markow-Modell, 68
Markow-modulierter Poisson-Prozess, 68
Markowscher Sprungprozess, 68
Mehrpfad-Routing, 135
Messreihe
 empirische, 35
Metrik, 29
 Benutzer-, 31
 Leistungs-, 31
 System-, 31

- Verlässlichkeits-, 31
- Mikroprofil, 85
- minimaler Schnitt, 40
- mittelwertstationär, 169
- Modell, 35
 - analytisches, 36
 - Erklärungs-, 35
 - generalisiertes stochastisches Petri-Netz-, 42
 - Markow-, 68
 - Netzwerkfluss-, 41
 - Petri-Netz-, 41
 - physikalisches, 35
 - Prognose-, 35
 - Simulations-, 36, 46
 - diskretes, 46
 - kontinuierliches, 46
 - Software-Zuverlässigkeit-, 44
 - Verkehrs-, 68
 - Warteschlangen-, 43
 - Wasserfall-, 45
- Modellzeit, 46, 48
- Modul, 157
 - einfaches, 157
 - zusammengesetztes, 157
- MTBF, 20
- MTDD, 20
- MTDR, 20
- MTFD, 20
- MTFR, 20
- Multicasting, 13
- Multiplexing-Verlust, 122
- Nachrichtenaustausch, 157
- Netzwerk, 11
 - adresse, 55
 - ausrüster, 28
 - benutzer, 27
 - betreiber, 27
 - knoten, 158
 - pfad, 57, 89
 - topologie, 161
 - Broadcast-, 13
 - Datennetz, 12
 - drahtloses, 13
 - Festnetz, 13
 - lokales, 13
 - Multicast-, 13
 - Punkt-zu-Punkt-, 13
- Stadt-, 13
- Telekommunikations-, 12
- Weitverkehrs-, 13
- Netzwerk-Verlässlichkeit, 20
 - Ebenen-Modell, 28
 - Mehrschicht-, 29
- Netzwerk-Zuverlässigkeitssanalyse, 37
- Netzwerkdienst, 24
- Netzwerkflussmodell, 41
- Netzwerkschicht, 14, 76
- Nicht-Schadens-Szenario, 146
- NNI, 25
- Nutzdaten, 11, 14
- OMNET, 157
- ON-OFF-Erneuerungsprozess, 79
- open loop-Ansatz, 77
- OSPF, 64
- Paket, 11
 - Kopf, 11
- Paketlaufzeit, 32, 135
- Paketverlustrate, 31
- Paketvermittlung, 11
 - Datagramm-Übertragung, 12
 - virtuelle Verbindungen, 12
- Pareto-Verteilung, 82, 171
 - gestutzte, 172
 - verschobene, 171
- Pfad, 57
- Pforte, 157
- Poisson-Prozess, 68
- Prognosemodell, 35
- Protektion, 22
 - dedizierte, 22
 - geteilte, 22
- Protokoll-Schicht, 14
- Pufferung, 60
- Qualität, 17
- Randknoten, 58
- random early detection, 142
- Rechenzeit, 46, 48, 164
- Referenzpunkt
 - externer, 33
 - interner, 33
- Rekonfigurierung, 67
- relative Abweichung, 131
- relevantes Szenario, 146

- Reparatur, 20
Restoration, 20, 22
Reward-Netz, 42
RIP, 64
Routing, 63, 135
Routing-Tabelle, 60, 65, 164

SBS, 38
Schadens-Szenario, 146
Schichtenmodell, 14
 ISO-OSI-, 14
 Netzwerkschicht, 14
 TCP/IP-, 14
 Transportschicht, 14
seed, 183
Segmentierung der skalierten Varianzen, 100
selbstähnliche Zeitreihe, 175
selbstähnlicher stochastischer Prozess, 173
Selbstähnlichkeit, 71, 74, 84
 asymptotische, 174
 exakte, 174
 zweiter Ordnung, 174
Sender-Empfänger-Relation, 13
Sendeverzögerung, 32
Senke, 58
Sicherheit, 18
Signalisierung, 163
Signallaufzeit, 32
Simulation
 diskrete, 46
 ereignisorientierte, 47
 zeitorientierte, 46
Simulationsfehler, 152
Simulationslauf, 92
Simulationsmodell, 36, 46
 Validierung, 48
 Verifikation, 48
Simulationsschleife, 48
Simulationsuhr, 47
Simulationsversuch, 183
skalierte Varianz, 72, 96, 173
SLA, *siehe* Dienstleistungsvereinbarung
Software, 54
Software-Zuverlässigkeit, 44
Spektraldichte, 74, 170
Spektrum, 170
Sprachverkehr, 70
Spreizung, 92, 183
Störungsmeldung, 87

Stadtnetzwerk, 13
Standard-Parameterkonfiguration, 93
starkes Gesetz der großen Zahlen, 93
stationär von zweiter Ordnung, 170
Stationarität, 66, 169, 185
statistische Analyse, 145
statistisches Multiplexen, 12, 181
Stutzen, 172
synchrone Datenübertragung, 11
Systemausfall, 33
Systemdienst, 24
Systemgröße, 47
Systemmetrik, 31
Szenario
 Ausfall-, 146, 147
 bewertetes, 146
 Nicht-Schadens-, 146
 relevantes, 146
 Schadens-, 146

TCP, 77, 80, 142
TCP/IP-Schichtenmodell, 14
Telekommunikationsnetzwerk, 12
Testphase, 45
Topologie, 53, 57, 161
TOS, 25
Träger, 171
Trägerdienst, 24
Transaktionsmodell, 24
Transienz, 67
Transienz-Reduktion, 95
Transitnetz, 15
Transportdienst, 24
Transportschicht, 14, 76

Überlaufwahrscheinlichkeit, 181
Übersetzungszeit, 162
UNI, 25
Unklardauer, 20
Unterlassungsfehler, 152

Variabilität, 72, 135, 143
Variabilitätsquotient, 101, 119
varianzstationär, 170
Variationskoeffizient, 101, 119
verarbeitende Einheit, 58
Verbindung, 11, 15
Verbindungsauflaufbau, 163
Verbindungsduauer, 68, 71, 77, 84
Verbindungsleitung, 13, 15, 55, 57, 158

- Verdünnung, 97
 Verfügbarkeit, 18
 Verifikation der Simulationsumgebung, 91, 183
 Verkehrs-Konditionierung, 27
 Verkehrsfluss, 15, 85
 Verkehrsgenerator, 58, 158, 183
 Verkehrsmodell, 68, 108, 121, 143, 175
 alternating renewal heavy-tailed, 82, 177, 187
 Burst-Ebene, 84
 Fluid-, 69
 fraktale Brownsche Bewegung, 81, 180
 Grenzbetrachtung, 177
 infinite source exponential, 68
 infinite source heavy-tailed, 77, 79, 178, 188
 infinite source heavy-tailed truncated, 79, 188
 infinite source heavy-tailed varying band-width, 175
 Poisson-artiges, 68
 selbstähnliches, 69
 Verbindungsebene, 85
 Zellebene, 84
 Verkehrsstrom, 15, 85
 Verlässlichkeit, 17
 Präventivmaßnahmen, 21
 reaktive Maßnahmen, 21
 Verlässlichkeitsanalyse, 145
 konnektivitätsbasierte, 37
 Verlässlichkeitsmetrik, 31
 vermittelnder Netzknoten, 11, 15
 Vermittlung
 Leitungs-, 11
 Paket-, 11
 Vermittlungstechnik, 11
 Versuchsreihe, 91
 Vertraulichkeit, 18
 Verweildauer, 43
 Verzögerung
 Bearbeitungs-, 32
 Sende-, 32
 Warteschlangen-, 32, 60
 virtuelle Verbindungen, 12
 VNK, *siehe* vermittelnder Netzknoten
 WAN, *siehe* Weitverkehrsnetzwerk
 Warteschlange
 Ausgangs-, 32
 Eingangs-, 32
 Warteschlangen-Management, 43, 60
 Warteschlangenmodell, 43, 80
 Warteschlangennetz, 43
 geschlossenes, 44
 offenes, 44
 Warteschlangenverzögerung, 32, 60
 Wartezeit, 43
 Wasserfall-Modell, 45
 Wegewahl, 63
 weißes Rauschen, 72
 Weitverkehrsnetzwerk, 13
 Wirkbetrieb, 34
 Zählgröße, 46, 47
 Zeitreihe, 72, 169
 gemittelte, 173
 selbstähnliche, 175
 Zentralknoten, 58
 Zieladresse, 12
 Zielfunktion, 148
 Zielmesswert, 147
 Zielverhalten, 85
 Zufallsvariable, 169
 Zugangsnetz, 15
 Zugangsnetz-Transitnetz-Schnittstelle, 15
 Zusammenbruch, 88
 Zusammenhangskomponente, 40
 Zustandsgröße, 46, 47
 Zuverlässigkeit, 18
 Zuwachsprozess, 175, 179
 zweite Momente, 96, 115
 Zwischenankunftszeit, 71
 Zwischenspeicherung, 60

Lebenslauf

Andreas Schäfer

geboren am 27. Dezember 1970
in Bensheim

wohnhaft in der
Blütenstraße 22
64385 Reichelsheim

| | |
|---------------|---|
| 07/77 – 06/90 | Schulausbildung |
| 06/90 | <i>Abitur an der Martin-Luther-Schule in Rimbach</i> |
| 10/90 – 01/97 | Studium der Mathematik und Informatik an der Technischen Universität Darmstadt |
| 01/97 | <i>Diplom in Mathematik</i> |
| 03/97 – 04/97 | Systemplaner im Informationstechnischen Zentrum der Deutschen Telekom AG, Darmstadt |
| ab 05/97 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Rechnerentwurf und Fehlertoleranz der Universität Karlsruhe (TH) |

