

Untersuchung von Dienstqualitäten bei echtzeitorientierten multimedialen Datenübertragungen

F. Dressler, U. Hilgers, S. Nägele–Jackson, K. Liebl

Regionales Rechenzentrum der Universität Erlangen–Nürnberg
Martensstraße 1, 91058 Erlangen

1 Einleitung

Mit dem zunehmenden Einsatz von Multimedia–Systemen und der Diskussion zur Übertragungsqualität in Netzwerken steigt die Notwendigkeit, die qualitativen Anforderungen von Video– und Audio–Applikationen zu untersuchen. Dabei sind besonders die Ergebnisse solcher Tests interessant, wenn keine Qualität vom zugrundeliegenden Netzwerk garantiert werden kann (z.B. bei IP oder bei ATM Verbindungen ohne Reservierung). In der vorliegenden Untersuchung werden Videoübertragungen durchgeführt und die Auswirkungen von unterschiedlichen Verkehrsbelastungen untersucht.

Bei Videoqualitätsmessungen unterscheidet man objektive und subjektive Meßmethoden [Wolf]. Subjektive Meßmethoden haben den Nachteil, daß sie meist nur in gut ausgestatteten Labors durchgeführt werden können. Da kein Zugriff auf ein solches besteht, werden in diesem Zusammenhang nur subjektive Messungen angewendet, die das Ergebnis nach gut zu sehenden bzw. zu hörenden Fehlern bewerten. Objektive Messungen werden für die folgenden Tests hauptsächlich auf der Netzwerkebene (Transportprotokoll) durchgeführt.

Im zweiten und dritten Kapitel werden die bei den Messungen verwendeten Übertragungsprotokolle und Kodierungsverfahren beschrieben. Dabei wird bei letzteren ein wesentliches Augenmerk auf die Unterschiede und Vorteile für verschiedene Einsatzbereiche gelegt. Im vierten Kapitel wird mit Hilfe von zwei Encodern und Decodern der Einfluß von Überlast in ATM–Netzwerken auf die Übertragung von Video und Audio untersucht. Im fünften Kapitel werden MBONE–Werkzeuge analysiert.

2 Transportprotokolle

Das Real–time Transport Protocol (RTP), welches auf dem IP–Protokoll aufbaut, definiert einen End–To–End–Übertragungsservice für Daten mit

Echtzeitcharakteristiken wie z.B. Audio oder Video. Dieser Service beinhaltet eine Identifikation des Inhaltes, eine Sequenznummerierung, Zeitstempel und Untersuchungen über die empfangenen Daten. Typischerweise wird UDP als Transportprotokoll genutzt, welches Multiplexing von verschiedenen Datenströmen und Prüfsummen unterstützt, aber prinzipiell ist jedes beliebige Transportprotokoll nutzbar. Multimedia Applikationen, die RTP nutzen (wie z.B. das in Kapitel 6 beschriebene Tool *vic*), sollten in der Lage sein, die Übertragungsrate den Fähigkeiten des Empfängers bzw. des Netzes anzupassen [RTP], [RTP-WWW].

Asynchronous Transfer Mode (ATM) ist ein standardisiertes Übertragungsprotokoll, bei dem ein Bitstrom in einzelnen Zellen fester Länge übertragen wird. Eine besondere Eigenschaft von ATM ist eine garantierte Dienstqualität (Quality of Service, QoS), die durch Verkehrs-Management-Funktionen zur Verfügung gestellt wird. ATM besteht in Anlehnung an das OSI-Referenz-Modell aus mehreren Schichten, wobei die ATM-Anpassungsschicht (AAL) die Dateneinheiten der Applikationen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Anforderungen in ATM-Zellen umsetzt [Kyas].

Der AAL-1-Typ dient dazu, Daten mit konstanten Bitraten zu übertragen und dieselbe Bitrate — taktsynchron zur Sendefrequenz — beim Empfänger wieder zur Verfügung zu stellen. Mit Hilfe der im Header befindlichen Taktinformation kann die ursprüngliche Datenrate der Sendestation synchron regeneriert werden. Verlorene oder fehlerhaft übertragene Daten werden nicht korrigiert oder wiederholt.

Der AAL-5-Typ ist sowohl für die verbindungsorientierte als auch die verbindungslose Übertragung geeignet. Alle Zellen, die zu einer AAL-5-PDU (Protocol-Data-Unit) gehören, werden in einem sequentiellen Zellstrom übertragen. Ideal ist AAL-5 für die Übertragung großer Datenmengen, da die maximale PDU-Größe 65535 Byte beträgt. Große PDUs haben den Vorteil, daß nur wenige Kopieroperationen zwischen der Anwendung und der Hardware, welche meist die Aufgaben der ATM-Anpassungsschicht übernimmt, nötig sind [dePrycker].

3 Kodierungsverfahren M-JPEG/MPEG2/H.261

Die Qualität eines kodierten, übertragenen und dekodierten Videosignals definiert sich durch die Bitrate, die Qualität des Kanals, die Fähigkeit des Protokolls mit einem schlechten Kanal zurechtzukommen und natürlich der Art der Kodierung.

Motion-JPEG (M-JPEG) nutzt für die Kodierung eines Videostroms das von ISO und ITU-T standardisierte digitale Komprimierungsverfahren JPEG für bewegungslose Bilder [JPEG]. Ein Einzelbild wird bei JPEG in zu komprimierende Blöcke von 8x8 Pixeln aufgeteilt, die jeweils durch eine Diskrete Kosinus Transformation umgewandelt werden. Der Kompressionsfaktor wird immer für das ganze Bild festgelegt und gilt für jeden der 8x8-Pixel-Blöcke. D.h. je nach Beschaffenheit des Bildes sind unterschiedlich hohe Kompressionsraten möglich. Es gibt keine Referenzen zu vorhergegangenen bzw. nachfolgenden Bildern. Dies hat den Vorteil, daß sich das Format für Videoschnittsysteme sehr gut eignet, da ohne weiteres Wissen auf jedes Einzelbild direkt zugegriffen werden kann. Die Auflösung ist im Prinzip frei wählbar, aber praktisch nur für PAL (NTSC) und 1/4PAL (1/4NTSC) definiert und genutzt (entsprechende Software implementiert meist nicht den vollen Standard). Das Kodieren des Videostroms ist aufwendiger als das Dekodieren.

Für die Komprimierung eines Bildes im MPEG-Format (Moving Picture Experts Group), werden die einzelnen Bildpunkte in Helligkeit (Luminanz, Y) und zwei Farbkomponenten (Chrominanz, Cr und Cb) aufgeteilt. Das Abtastverhältnis definiert sich durch die Anteile der einzelnen Komponenten Y:Cr:Cb. Ein mögliches Verhältnis ist z.B. 4:2:2, d.h. alle Helligkeitswerte gehen in die Kodierung ein und alle 2 Bildpunkte die Farbwerte für Rot (Cr) und Blau (Cb). MPEG definiert auch eine Bewegungskompensation, um höhere Komprimierungsstufen zu erreichen. Es gibt 3 Kategorien von Bildern im MPEG-Strom: I(Interframe)-Frames = volles Bild, restaurierbar ohne weitere Informationen; P(Prediction)-Frames = Kodierung mit Referenz auf vorhergehende I- oder P-Frames; B(bidirectional)-Frames = Interpoliertes Bild mit Referenz auf vorhergehende und folgende Bilder. Einzelbilder werden in sogenannten GoPs (Group-of-Pictures) zusammengefaßt. Eine GoP beginnt immer mit einem I-Frame und endet mit einem I-Frame oder einem P-Frame. Eine GoP ist ohne Referenz auf weitere Bilder dekodierbar. Es ist aber auch I-Frame-Only-Kodierung möglich, d.h. die Länge einer GoP wird auf 1 gesetzt. Dies macht MPEG für Videoschnittsysteme interessant, da jedes Einzelbild ohne weitere Informationen dekodierbar ist. Die Qualität eines MPEG-Filmes hängt vom Abtastverhältnis (4:2:0 vs. 4:2:2 vs. 4:4:4) und von der möglichen Bitrate ab. Auch bei MPEG wird mit 8x8-Pixel-Blöcken gearbeitet, aber im Gegensatz zu M-JPEG ist die Wahl des Kompressionsfaktors für jeden Block einzeln wählbar. Dies führt zu einem wesentlich besseren Kompressionsverhältnis. Das Kodieren ist bei MPEG wesentlich aufwendiger als Dekodieren [MPEG-WWW].

MPEG2 ist im wesentlichen für zwei sehr unterschiedliche Qualitätsstufen definiert. Dies sind MP@ML (Main Profile @ Main Level — 4:2:0) mit 3 bis 15 MBit/s, genutzt z.B. für DVD (5 bis 9 MBit/s) und ausgestrahltes digitales Fernsehen. Die GoP ist meist relativ lang. Das zweite Profil ist 4:2:2P@ML, welches für Rückspielung in Studios benötigt wird. Typisch sind Datenraten von bis zu 50 MBit/s. Hochqualitative Videoübertragungen werden I-Frame-Only übertragen.

Das Protokoll H.261 wurde entwickelt für Bewegtbildübertragungen über Kanäle mit niedriger Bitrate (64 kBit/s bis 1920 kBit/s) [H.261]. H.261 definiert eine eigene Auflösung, das CIF-Format (Common Intermediate Format) mit 352x288 Pixel bei 30 Bildern/s. H.261 verwendet eine Abtastung im Verhältnis 4:2:2 und Pixelgruppen von 8x8 Pixeln pro Block. Eine wesentliche Anwendung von H.261 sind Videokonferenzen. Der Encoder muß hierbei gleichzeitig auch Dekodieren können. Das Verhältnis des Aufwandes beim Kodieren zu dem beim Dekodieren ist daher fast ausgeglichen.

Für die Kodierung des Videosignals sind von den Abläufen im Encoder nur die im Source Coder/Decoder von Interesse. Dieser hat folgende Aufgaben: Bewegungsschätzung (Prediction), Bewegungskompensation (Motion Compensation), Blocktransformation (Transformation), Quantisierung (Quantization). Durch die Kodierungssteuerung wird ein 8x8-Block als für die Übertragung essentiell bzw. nicht-essentiell gekennzeichnet. Nur die zu übertragenden Blöcke werden auch wirklich transformiert, quantisiert und mit einem Code variabler Bitlänge ausgegeben.

4 Tests mit ATM-Codecs

Mit zwei ATM-Codecs, die mit unterschiedlichen Verfahren die Datenkodierung durchführen, soll untersucht werden, wie sich Video- und Audio-Ströme bei Überbuchung einer Verbindung verhalten.

4.1 MPEG-Codecs

Bei den getesteten Geräten von der Firma Tektronix handelt es sich um sogenannte M2T Series Video Edge Devices (Version 1.5.2). Diese können Videostreams kodieren und über ein ATM-Netz über AAL-5 versenden. Bei diesen Geräten ist die Videokomprimierung konfigurierbar und kann auf MPEG2 MP@ML oder 4:2:2P@ML eingestellt werden.

Bild und Ton werden über zwei PVCs der Qualität **ubr** vom Encoder über eine 155 MBit/s ATM-Leitung, die beiden ATM-Switches (einen

LS1010 der Firma Cisco und einen LE155 der Firma Fore) zum Decoder geleitet. Um den Einfluß von Überlast auf die Audio- und Video-Übertragung zu untersuchen, wird über die Verbindung zwischen LS1010 und LE155 zusätzlicher Verkehr (Störverkehr) gesendet. Dazu wird ein ATM-Monitor der Firma HP (HP4200B) verwendet. Sein sendendes Interface wird an den LE155 angeschlossen und das empfangende an den LS1010. Da für die Tests ein bewegtes Bild übertragen werden soll, wird als Bildquelle ein schlagendes Metronom verwendet. Für die Audio-Messungen wird Musik über die Teststrecke übertragen.

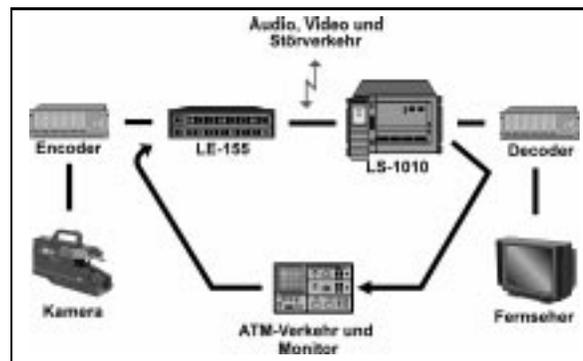


Abbildung 1. Testumgebung

Voruntersuchungen haben gezeigt, daß die durch die beiden Switches entstandene Verzögerung (Delay) zu vernachlässigen ist. Nun kann untersucht werden, wie die Übertragung der Daten zwischen den beiden Codern durch Störverkehr vom ATM-Monitor beeinflusst wird. Dazu wird der Lastverkehr des Monitors kontinuierlich erhöht, so daß am ausgehenden Interface des LE155 eine Überlast auftritt und dort Zellen verworfen werden müssen.

Für die Tests wird 4:2:2P@ML gewählt. Der Testaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Zwischen der analogen Videoquelle (Kamera) und dem Encoder bzw. dem Decoder und dem Fernseher ist jeweils ein Analog-Digital-Wandler geschaltet, der den analogen Videostrom in einen digitalen umwandelt und umgekehrt. Der Grund für den Einsatz dieser Wandler liegt darin, daß nur digitale Videostrome von dem Tektronix-Codec im 4:2:2-Modus bearbeitet werden können. Die verwendeten A/D-Wandler erzeugen einen Signal-Delay von ca. 5ns (D/A-Wandler: ca.

20ns). Der Audiostrom wurde auf eine Rate von 128 kBit/s eingestellt, der Videostrom auf 47 MBit/s. Zusätzlich wurde der Codec auf I-Frame-Only-Kodierung konfiguriert.

Messungen ohne Störverkehr ergeben eine konstante PDU-Rate des MPEG2-Verkehr (Video und Audio) von 332 PDUs pro Sekunde. Dies entspricht bei 18800 Bytes/PDU einer reinen Datenrate von 50 MBit/s bzw. ca. 55.3 MBit/s nativem ATM-Verkehr incl. Header. Die entsprechende Zellrate bleibt konstant, selbst wenn beim Videobild starke Änderungen zu erkennen sind.

Im Laufe der Messungen zeigt sich, daß bei einer Absenkung des MPEG2-Verkehrs auf 55.256 MBit/s aufgrund des Störverkehrs erste PDU-Fehler in einer Größenordnung von 0.1% an der gesamten PDU-Rate auftreten. Diese Rate der fehlerhaften PDUs erhöht sich auf etwa 3,3% bei 55.25 MBit/s MPEG2-Verkehr und erreicht rasch annähernd 98% der gesamten PDU-Rate bei 52.26 MBit/s.

Unabhängig von den Bewegteilen im Videobild sind bereits bei einzelnen PDU-Verlusten (0.1%) störende Rauten zu erkennen. Gleichzeitig beginnt der übertragene Ton zu leiern und leichte Aussetzer sind ebenfalls zu hören. Auch sind leichte Laufzeitschwankungen des Bildes zu erkennen. Die Beeinflussungen erfolgen allerdings höchstens in einem leicht störendem Ausmaß. Man kann den Bildern und der Musik ohne weiteres folgen.

Bei einem Anteil von 3.3% fehlerhafter PDUs sind bereits viele Rauten und starke Laufzeitschwankungen sichtbar. Der Ton setzt zehntel Sekunden lang aus und "leiert" stark. Die Bild- und Tonstörungen werden rasch schlimmer und bei 98% fehlerhafter PDUs fällt die Ton- und Bildübertragung komplett aus.

Man sieht, daß bereits geringe Sprünge beim Störverkehr starke Beeinträchtigungen hervorrufen. Außerdem ist zu erkennen, daß sich objektive Ergebnisse sofort in entsprechenden subjektiven Eindrücken äußern.

4.2 K-Net-Tests

Die in dem Test verwendeten Encoder/Decoder "CellStack" von der Firma K-Net Limited übertragen die komprimierten Video- und Audio-Daten in einem AAL-5 ATM-Zellstrom. Für die Kodierung des Videostroms wird M-JPEG verwendet [K-Net].

Der Versuchsaufbau entspricht dem, der in Kapitel 4.1 vorgestellt wurde. Zunächst wird untersucht, wie sich das Erhöhen der Last vom Monitor auf die Anzahl zerstörter AAL-5-PDUs des Video- und Audio-Stroms

zwischen den Codern auswirkt. In Abbildung 2 ist das Ergebnis der Messung dargestellt. Auf der Abszisse ist die Höhe des Lastverkehrs in der Einheit MBit/s aufgetragen. Die Ordinate enthält die Anzahl fehlerhafter PDUs. Dargestellt sind in der Abbildung die Testergebnisse sowohl für den Video- als auch für den Audio-Strom. Zu erkennen ist, daß Video, für dessen Übertragung 6800 PDUs/s benötigt werden, bei einem Lastverkehr von 137 MBit/s keinerlei zerstörte PDUs aufweist. Bei zunehmender Last beginnt die Zahl fehlerhafter AAL-5-Rahmen ab 139 MBit/s konstant anzusteigen und bei 144 MBit/s Last erhält man 301 zerstörte PDUs. Dann erreichen nur 6499 fehlerfreie PDUs/s den Decoder. Die Messung des Audio-Strom dagegen zeigt, daß von den 407 PDUs/s bei einer Last von 144 MBit/s nur 381 PDUs/s fehlerfrei beim Decoder ankommen. Prozentual werden beim Video-Strom mit 4.4% weniger PDUs zerstört als bei den Audio-Daten mit 6.3%. Zusätzlich ist festzustellen, daß schon bei 139.5 MBit/s 3.9% der Audio-PDUs fehlerhaft sind.

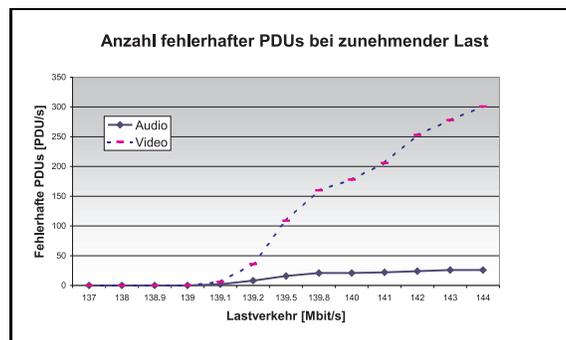


Abbildung 2. Einwirkung des Lastverkehrs auf zerstörte AAL-5-PDUs

Die Video-Übertragung wird bereits beim Verlust einzelner PDUs beeinträchtigt. Das Bild enthält dann vereinzelt Rauten, indem die sich bewegenden Teile des Metronoms erscheinen (siehe Abbildung 3, Bild 1). Steigt die Last weiterhin an, wird das Bild in der unteren Hälfte, in der sich das Pendel des Metronoms bewegt, nicht mehr dargestellt (siehe Abbildung 3, Bild 2). Bereits da ist für den Beobachter die Bildqualität nicht mehr akzeptabel. Stehen für die Bildübertragung nur noch 4.4 MBit/s zur Verfügung, ist auf dem Fernseher, der am Decoder angeschlossen ist, nur noch ein Standbild zu sehen.



Abbildung 3. Bild 1: erste Übertragungsfehler bei 8.57 MBit/s Bandbreite für Video-Daten und einem Lastverkehr von 139.5 MBit/s; Bild 2: grobe Übertragungsfehler bei 7.18 MBit/s Bandbreite für Video-Daten, Lastverkehr von 141 MBit/s

Auch für die Audiodaten, die 1.72 MBit/s Bandbreite für die Übertragung benötigen, kann beobachtet werden, daß bereits bei Zerstörung einzelner PDUs der Hörer Einbußen bei der Übertragung erkennt: Knacken im Ton. Bis zu einer Bandbreite des Störverkehrs von 1.68 MBit/s ist das Knacken zwar eine Beeinträchtigung, man kann aber der Musik folgen. Bei größerer Last und damit reduzierter Übertragungsbandbreite nehmen die Störungen so zu, daß es für den Zuhörer nicht mehr akzeptabel ist.

Es hat sich gezeigt, daß subjektive und objektive Messungen analoge Ergebnisse erbringen. Bei der Übertragung mit den K-Net-Codecs wird jeder Verlust einer PDU sowohl bei den Audio- als auch bei den Video-Daten sofort subjektiv vom Beobachter erkannt. Bei Audio ist es durch ein Knacken, bei Video durch eine Raute im dargestellten Bild zu erkennen.

Die Messungen zeigen, daß bei den ATM-Codecs ein deterministisches Verhalten zu erkennen ist. Bei einer Leitungsauslastung größer 100% beginnen die Qualitätseinbußen der Audio- und Video-Übertragung.

5 Mbone-Tests

Da das Internet mittlerweile sehr verbreitet ist, kommt die Nutzung dieser Infrastruktur für Videoübertragungen immer mehr in Mode. Hier soll das Tool vic untersucht werden, das auf UNIX-Workstations zur Verfügung steht. Vic nutzt das Übertragungsprotokoll RTP und bietet die Grundlage für eine optimale Videoübertragung über schmalbandige Leitungen. Vic stellt Encoder und Decoder u.a. für die Protokolle M-JPEG und H.261 zur Verfügung.

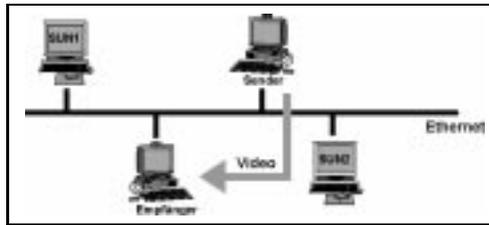


Abbildung4. Testaufbau für die Mbone-Messungen

Abbildung 4 beschreibt den Versuchsaufbau. Die Videoübertragung erfolgt zwischen Sender- und Empfängerstation. Die beiden weiteren Sun-Workstations (Sun1 und Sun2) werden als Sender bzw. Empfänger für einen Stördatenstrom genutzt.

Vic nutzt die Möglichkeiten des Transportprotokolls RTP weitgehend aus und bietet adaptive Verfahren für eine bestmögliche Videoübertragung. Es wird ein Videostrom im H.261-Format erzeugt und über das Testnetz geschickt. Die Datenrate des Senders wird auf 500 kBit/s eingestellt, da die Software bei höheren Raten leider etwas instabil ist. Paketverluste, Delay und Jitter (Variation des Delays) werden vom Programm ausgewertet und dargestellt. Diese Werte dienen der objektiven Qualitätsanalyse des Videokanals. Für subjektive Tests wird an der Empfängerstation das Bild in voller Auflösung angezeigt und ausgewertet.

Der erste Test wird in einem 10 MBit/s-non-switched-Ethernet durchgeführt. Damit wird versucht, dem "Best Effort"-Verkehrsverhalten und der begrenzten Bandbreite im Internet am nächsten zu kommen.

Durch die beiden Workstations Sun1 und Sun2 wird auf dem Ethernet ein Stördatenstrom erzeugt und so ein schlechter Kanal simuliert. Dieser Hintergrundverkehr wird mit einem Tool push erzeugt, das über eine UDP-Verbindung Daten mit einstellbarer Paketgröße und konfigurierbarer Datenrate überträgt. Im Grenzlasterbereich des Netzes (ab ca. 8MBit/s) steigt der Jitter der Videoübertragung extrem an. Ab einem gewissen Delay der Videopakete werden Pakete vom vic verworfen. Da aber die Videobandbreite durch das RTP-Protokoll schnell herunterregelt wird, ist trotzdem eine Videoübertragung möglich, allerdings mit geringerer Qualität.

Im Gegensatz zu den Messungen in Kapitel 4 sind bei diesen Tests schon bei einer Netzauslastung von 80% Qualitätseinbußen zu erkennen.

Eine zweite Messung wird in einem 100 MBit/s-Ethernet (durch einen Ethernetswitch realisiert) durchgeführt. Hier zeigt der Störverkehr zwischen Sun1 und Sun2 keinen Einfluß. Allerdings führt ein zusätzlicher

Stördatenstrom zwischen Sender und Empfänger zu Qualitätseinbußen. Dies liegt an der gemeinsamen (nicht-exklusiven) Nutzung des Interfaces des Rechners. Ab ca. 800 kBit/s steigt der Jitter der Videoübertragung an, wodurch es kurzzeitig auch zu Paketverlusten bei der Videoübertragung kommt. Dank des eingesetzten Transportprotokolls (RTP) wird die gesendete Bandbreite schnell reduziert und so den neuen Bedingungen angepasst. Je größer die Pakete des Störverkehrs sind, desto höher ist die Übertragungsrate (sowohl Video- als auch Störverkehr). Dies liegt an der Konstruktion des UNIX-IP-Stacks. Große Datenblöcke lassen sich im Hauptspeicher wesentlich besser kopieren. Ab ca. 40 MBit/s Datenrate am Interface der Workstation ist kein sinnvoller Videoempfang mehr möglich. Dies gilt vor allem bei kleinen Paketgrößen.

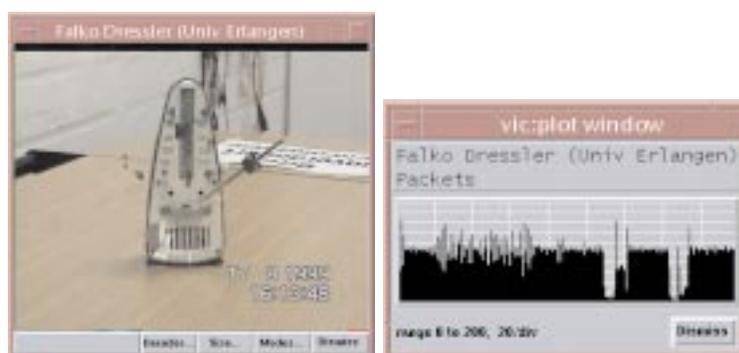


Abbildung 5. Bild 1: Snapshot des vic bei Fehlern in der Übertragung; Bild 2: Paketrate bei den Fehlern

Die beiden Bilder in Abbildung 5 zeigen zwei Einbrüche in der Übertragung. Verursacht werden diese durch den genannten Störverkehr zwischen Sender und Empfänger. Das erste Bild zeigt einen Snapshot der Videoübertragung. Gut zu sehen sind Fehler im Bild. Das zweite Bild zeigt die vic-interne Auswertung der Übertragungsleistung. Es sind die empfangenen Pakete gegenüber der Zeit aufgetragen.

6 Zusammenfassung

Die Messungen mit den Codecs der Firmen K-Net Limited und Tektronix haben ergeben, daß bei geringsten Datenverlusten auf Grund von Überlast

bei der Übertragung subjektiv Qualitätsminderungen zu erkennen sind. Es sind keine Beeinträchtigungen festzustellen, solange noch ausreichend Bandbreite für die Video- und Audio-Übertragung zur Verfügung steht.

Dank der adaptiven Verfahren und des eingesetzten Übertragungsprotokolls RTP sind mit dem Tool vic eine Videoübertragung bzw. Videokonferenzen möglich, allerdings bei reduzierter Bandbreite mit geringerer Qualität. Bei Überlast an Sender, an Empfänger oder im Netzwerk sind im ersten Moment die Leistungseinbrüche während des Einschwingvorgangs — ein Effekt, der im Internet "immer" auftritt — gut zu erkennen. Dies gilt sowohl für den subjektiven Eindruck, als auch für qualitative objektive Aussagen der programminternen Auswertungsmöglichkeiten.

Literatur

- [K-Net] CellStack Video: Operating Manual. K-Net Limited, November 1995.
- [Partridge] C. Partridge: Gigabit Networking. Addison-Wesley Publishing Company 1993.
- [RTP] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, V. Jacobson: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. Internet Draft, Internet Engineering Task Force, Request for Comments 1889, Januar 1999.
- [RTP-WWW] <http://www.cs.columbia.edu/hgs/rtp/> — Homepage der RTP and Audio-Video Transport Working Group, Stand 20.8.1999.
- [Kyas] O. Kyas: ATM-Netzwerke. DATACOM Buchverlag GmbH, 1996.
- [dePrycker] M. de Prycker: Asynchronous Transfer Mode. Prentice Hall, München, 1996.
- [Fromme] M. Fromme: Multimedia-Konferenzen in der Wissenschaft, Szenarien, Technologie, Werkzeuge. Studienarbeit, Universität Hannover, 1995.
- [JPEG] Pennebaker, Mitchel: JPEG — Still Image Data Compression Standard. Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
- [MPEG-WWW] <http://www.mpeg.org/MPEG/> — Homepage der Moving Picture Experts Group, Stand 20.8.1999.
- [H.261] Video Codec for Audiovisual Services at p x 64 kbits. ITU-T Recommendation H.261, ITU-T, 1993.
- [Wolf] S. Wolf, M. H. Pinson, A. A. Webster, G. W. Cermak, E. Paterson: Objective and Subjective Measures of MPEG Video Quality, 139th SMPTE Technical Conference, New York, 21-24 November, 1997.