

Ste 93-5

Videodatenkompression für verteilte Multimedia-Anwendungen

Ralf Steinmetz

Technischer Bericht 43.9309

IBM European Networking Center
Vangerowstraße 18 • 69020 Heidelberg • Germany

Telefon: +49-6221-59-3000 • Fax: +49-6221-59-3300

steinmet @ dhdbml.bitnet
steinmet @ heidelbg.vnet

Zusammenfassung: Kommunikationsfähige Multimedia-Systeme und Anwendungen beinhalten die in einem Rechner integrierte Verarbeitung von Audiosignalen und/oder Bewegtbildern. Die hier entstehende Datenrate unkomprimierter Stereo-Audiosignale in CD-Qualität beträgt 1.41 Mbit/s, ein unkomprimiertes Fernsehsignal hat Datenraten über 140 Mbit/s. Dabei enthalten diese Daten eine hohe Redundanz, so daß eine Kompression von Audio- und Videodaten auf gemeinsam unter 2 Mbit/s erfolgen kann. Dies ermöglicht eine Bearbeitung, Speicherung und Darstellung in heutigen Rechnern und die simultane Übertragung vieler solcher Datenströme über Hochgeschwindigkeitsnetze. Man unterscheidet im Multimedia-Anwendungsbereich zwischen Kioskanwendungen, Anwendungen in der Fort- und Weiterbildung und Anwendungen im Bereich des Kooperativen Arbeitens. Alle diese Anwendungsbereiche benötigen sehr oft mehrere Rechner, die über Netze miteinander verbunden sind. Aus den Gemeinsamkeiten des Abfrage- und Dialog-Modus werden hier die Anforderungen an das Kommunikationssystem und an die Kompressionsverfahren abgeleitet. Diese Anforderungen spiegeln sich in den heute bekanntesten Kompressionsverfahren der Videotechnik – JPEG, MPEG, H.261 und DVI – wider. Eine in diesem Beitrag vorgestellte vergleichende Übersicht zeigt, daß heute noch keine eindeutige Aussage bezüglich des “besten” Verfahrens möglich ist, jedes Verfahren hat seine eigenen Schwerpunkte und positiven Aspekte.

Einleitung - eine globale Betrachtung multimedialer Systeme

„Multimedia“ wird in diesem Beitrag immer unter dem Gesichtspunkt „Audio und Video im Rechner“ gesehen werden: *Ein Multimedia-System ist durch die rechnergesteuerte, integrierte Verarbeitung, Speicherung Darstellung, Kommunikation, Erzeugung und Manipulation von unabhängigen Informationen mehrerer zeitunabhängiger (diskreter) und zeitabhängiger (kontinuierlicher) Medien gekennzeichnet [34; 37].*

„Multimedia“ bedeutet aus Benutzersicht, daß Informationen auch als Audiosignale und Bewegtbilder dargestellt werden können. Hiermit lassen sich beispielsweise Bewegungsabläufe im Sport oder ein ornithologisches Lexikon wesentlich besser als mit Text und nur Einzelbildern realisieren. Sie werden auf eine natürliche Weise dargestellt. Die Integration dieser Medien in einen Rechner ermöglicht zusätzlich, daß man die bestehende Rechnerverarbeitung beispielsweise für eine interaktive Präsentation der Informationen verwenden kann. Außerdem können diese Daten dann auch über Rechnernetze und Telekommunikationsnetze übertragen werden. Hiermit ergeben sich Anwendungen im Bereich der Informationsverteilung und des kooperativen Arbeitens [12]. „Multimedia“ ermöglicht ein Spektrum neuer Anwendungen, von denen sich viele heute noch in der Entstehungsphase befinden.

Um Multimedia-Anwendungen zu ermöglichen, müssen viele Komponenten der Hardware und Software in dem Rechner und Netzen geeignet verändert, erweitert bzw. ersetzt werden. Es werden hier wegen der stark steigenden Prozessorleistungen und der ausreichenden Verfügbarkeit von Speicherkapazitäten immer mehr Funktionen durch die Software ausgeführt. Dabei sind die zeitlichen Restriktionen bei der Datenverarbeitung in allen Komponenten aus technischer Sicht die größte Herausforderung. Die traditionelle Datenverarbeitung versucht hingegen, möglichst schnell die Verarbeitung zu bewältigen. Echtzeitsysteme sollen innerhalb fest vorgegebener Zeitschranken meistens als fehlertolerante Systeme arbeiten. Die Fehlertoleranz ist bei „Multimedia“ im allgemeinen nicht der wichtigste Aspekt. Bei „Multimedia“ müssen sowohl traditionelle Medien als auch Audio und Video bearbeitet werden. Dabei gilt es für beide Klassen, die jeweiligen Ziele „möglichst schnell“ bzw. „innerhalb einer festen Zeitschranke“ zu erreichen. Jedoch sind diese Systeme nicht unabhängig voneinander und stellen somit nicht nur die Integration bestehender Konzepte dar. In einem integrierten System müssen die verschiedenen Komponenten jeweils beide Arten der Daten betrachten, und zwischen den Daten dieser Medien können auch noch Beziehungen in Form der „Synchronisation“ bestehen.

In [35] entstand die Strukturierung von Multimedia-Systemen nach Abbildung 1. Sie zeigt schematisch die wesentlichen Gebiete im Bereich der Technik von Multimedia-Systemen. Diese Gebiete sollten sich in entsprechenden Komponenten eines kommunikationsfähigen Multimedia-Systems widerspiegeln. Der Darstellung liegt die Idee zugrunde, möglichst auch die stärksten Interaktionen zwischen den Komponenten durch eine räumliche Nähe auszudrücken. Dabei können die folgenden Bereiche unterschieden werden:

1. Die Grundlage für die Verarbeitung digitaler Audio- und Videodaten bilden das Abtasttheorem und die Puls-Code-Modulation mit ihrem jeweiligen mathematischen Hintergrund und den möglichen praktischen Realisierungen. Hieraus haben sich verschiedene Techniken entwickelt, die auf das jeweilige Medium spezialisiert sind. Die Audiotechnik beinhaltet die Musik- und die Sprachverarbeitung. Das Verständnis der Videotechnik beruht im wesentlichen auf den Entwicklungen der Fernsehtechnik inklusive einer digitalen Darstellung und HDTV. Die entstehenden Datenraten dieser Medien erfordern bei den heutigen Qualitätsansprüchen und der verfügbaren Technologie entsprechende Kompressionsverfahren. Die Realisierung dieser Verfahren kann sowohl in Hardware als auch in Software erfolgen.

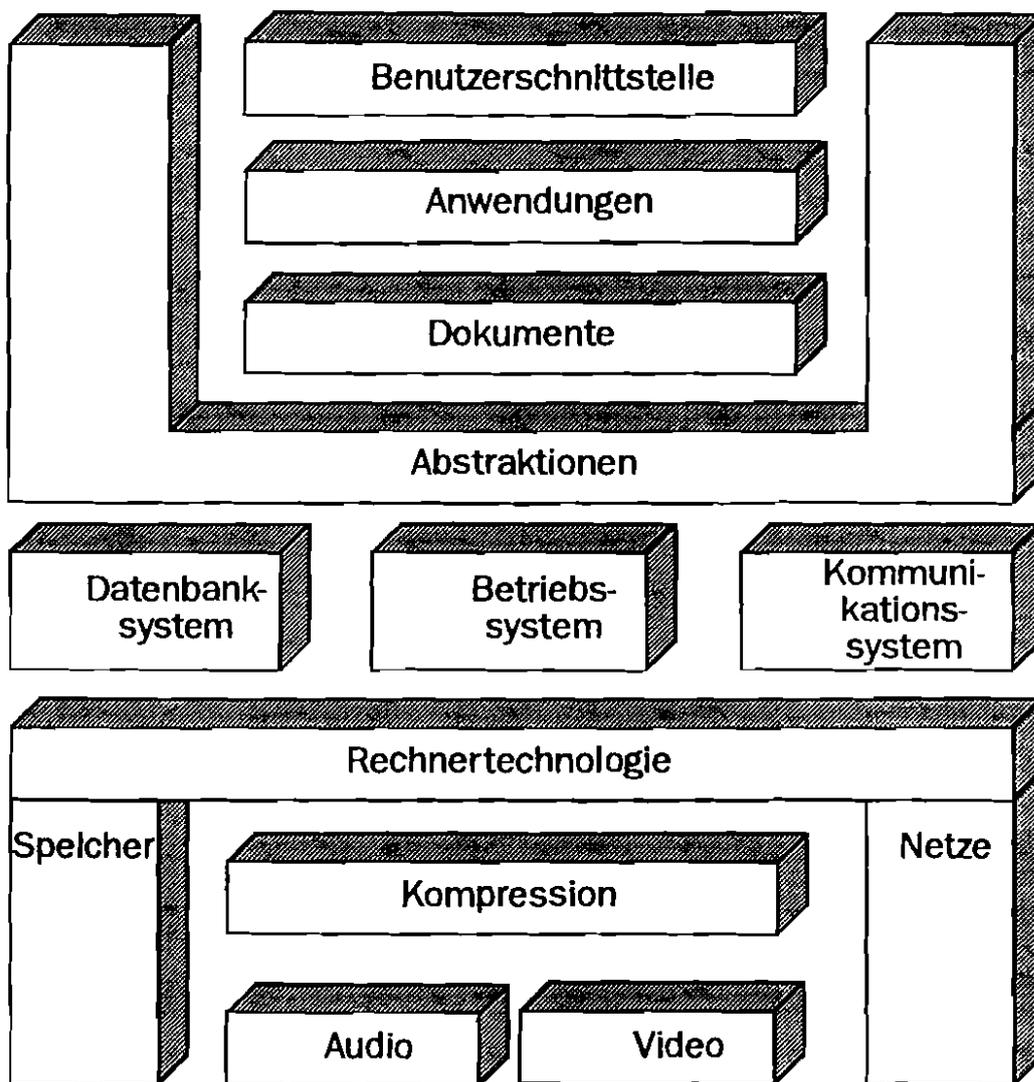


Abbildung 1. Ein Multimedia-System und seine Komponenten

- Bei der Rechnertechnologie hat insbesondere die kostengünstige Verfügbarkeit von optischen Speichermedien zu der heutigen Entwicklung von „Multimedia“ beigetragen. Fast alle Entwicklungen basieren auf der aus der Heimelektronik bekannten CD-DA („Compact Disk - Digital Audio“). Auf der anderen Seite haben die Lokalen und Weitverkehrs-Netze mit ihren höheren Bandbreiten und Möglichkeiten einer Übertragung aller Arten von Medien zu kommunikationsfähigen Multimedia-Systemen geführt. Lokale und verteilte Multimedia-Systeme haben bis vor kurzem noch aus einer vom Rechner gesteuerten Menge externer Geräte bestanden. Heute strebt man meistens voll digital arbeitende Systeme an.
- Auf Grund dieser Möglichkeiten der Speicher-, Rechner- und insbesondere Netztechnologien existieren drei grundlegende Dienste, die fast ausschließlich in Software realisiert werden. Das Betriebssystem dient als Schnittstelle zwischen der Rechner-Hardware und allen anderen Softwarekomponenten. Es stellt seinem Anwender eine Umgebung zur Ausführung von Programmen zur Verfügung, die möglichst einfach zu bedienen ist. Dabei muß die Rechner-Hardware effektiv genutzt werden. In dieser Schnittstellenfunktion werden verschiedene Dienste erbracht, die sich auf die

wesentlichen Betriebsmittel eines Rechners beziehen: Der Prozessor, der Hauptspeicher, der Sekundärspeicher, alle Ein- und Ausgabegeräte. Das Datenbankverwaltungssystem ermöglicht einen strukturierten Zugriff auf diese Daten und das Management großer Datenbestände. Das Kommunikationssystem ist für die Übertragung der Daten gemäß ihren zeitlichen Restriktionen und der erwarteten Zuverlässigkeit zuständig.

- 4 Diese Dienste werden über geeignete Abstraktionen in Programmierumgebungen den weiteren Komponenten zur Verfügung gestellt. Dabei kann eine solche Abstraktion heute beispielsweise Bestandteil des Multimedia-Betriebssystems, einer Programmiersprache oder einer objekt-orientierten Klassenhierarchie sein. Ein Dokument besteht aus einer Menge strukturierter Informationen, die als unterschiedliche Medien vorliegen und zum Präsentationszeitpunkt generiert oder eingespielt werden. Viele Anwendungen bedienen sich dieser Dokumente und präsentieren sie über eine Benutzerschnittstelle dem Menschen. Auch andere Daten können in den Anwendungen bearbeitet und anschließend dargestellt werden. Die Anwendungen stellen zusammen mit der Benutzerschnittstelle die von „Multimedia“ wahrnehmbaren Aspekte dar.

Die graphische Datenverarbeitung ist nach folgenden Gesichtspunkten in diese Darstellung integriert: Sie gehört in bezug auf ihre Hardware zur Videotechnik. Die höheren Schnittstellen werden über die Abstraktionen integriert, und die Benutzerschnittstelle übernimmt mit dem Window-System die konkrete Darstellung der Daten.

Im Kontext von Multimedia-Systemen findet man oft die Aussage, daß man für die Videoübertragung Kommunikationsnetze mit Übertragungsraten von 100 Mbits/s und mehr benötigt. Somit würden verteilte Multimedia-Anwendungen erst in Hochgeschwindigkeitsnetzen möglich. Diese Aussagen beruhen auf fehlendem Wissen und Annahmen bezüglich der eigentlichen Multimedia-Anwendungen und der heute verfügbaren Kompressionsverfahren und stimmen nur, wenn man unkomprimierte Videoströme voraussetzt. Bestehende Netze mit 4, 10 oder 16 Mbit/s Datenübertragungsrate reichen bei Verwendung geeigneter Protokolle und Kompressionstechniken für Multimedia-Anwendungen aus, siehe beispielsweise [8]. Allerdings ermöglichen erst Hochgeschwindigkeitsnetze die simultane Verfügbarkeit einer Vielzahl multimedialer Anwendungen mit unterschiedlichen zu kommunizierenden Daten. Trotz der Kompression ist deshalb ein Hochgeschwindigkeitsnetz durchaus sinnvoll und notwendig. Dabei ist bei der Datenübertragung eine garantierte Ende-zu-Ende-Verzögerung wichtig. Nur so kann den Echtzeitanforderungen entsprochen werden.

Deshalb werden in diesem Beitrag ausgehend von einer Übersicht multimedialer Anwendungen, die Anforderungen an das Kommunikationssystem und die Kompressionsverfahren abgeleitet. Anschließend werden die in diesem Gebiet relevanten Kompressionsverfahren (JPEG, H.261, MPEG und DVI) mit ihren Beziehungen zu den Kommunikationskomponenten vorgestellt. Der Ausblick faßt die wesentlichen Aussagen zur Interaktion zwischen Kommunikations- und Kompressionskomponenten in einem verteilten Multimedia-System zusammen.

Multimedia-Anwendungen

Die folgende pragmatische Sicht der Multimedia-Anwendungen orientiert sich an der Marktrelevanz. Hier kann man zwischen Kioskanwendungen, der Fort- und Weiterbildung und den Anwendungen im Bereich des Kooperativen Arbeitens unterscheiden.

Eine **Kioskanwendung** steht meistens in einem öffentlich zugänglichen Raum. Neben der primären Informationskomponente ist eine solche Anwendung oft an weitere Datenverarbeitungskomponenten über Netze angeschlossen, um beispielsweise eine Buchung auszuführen. Ein konkretes Beispiel ist der Kartenverkauf für amerikanische Football-Spiele. Die Informa-

tionskomponente erläutert mit Bewegtbild und Ton die nächsten Spiele. Sie zeigt während der Platzwahl die gewählte Perspektive als Bewegtbild. Kioskanwendungen sind durch die öffentliche Zugänglichkeit meistens für einen großen Anwenderkreis mit sehr unterschiedlichem Wissen zugänglich. Sie müssen für den ungeübten Benutzer leicht zu bedienen sein und innerhalb kürzester Zeit erste Informationen liefern. Die durchschnittliche Interaktionszeit eines Anwenders beträgt dabei meistens unter einer Minute. Hohe Datenmengen lassen sich auf Multimedia-Datei-Server speichern und über multimediafähige Kommunikationskomponenten bei Bedarf übertragen. Kioskanwendungen arbeiten in einem Abfrage-Modus.

Die **Aus- und Fortbildungsanwendungen** erhalten durch ihre integrierten Bewegtbild- und Audioinformationen eine höhere Benutzerakzeptanz. Viele Sachverhalte lassen sich über diese Medien einfacher oder überhaupt erst erläutern, Sprachkurse sind ein Beispiel dafür. Diese Anwendungen sind meistens auf eigenen Rechnern installiert und der Benutzer interagiert über einen längeren Zeitraum mit dem Programm. Meistens werden Informationen nicht als eine reine Präsentation dargestellt, sie werden in dem jeweiligen Kontext erarbeitet. Bei diesem Lernen werden meistens Lesepfade bestimmt und oft auch Lerninhalte wieder abgeprüft. Dabei wird die Information im Gegensatz zu Kioskanwendungen wesentlich gezielter dargeboten. Das Kursmaterial kann als CD zur Verfügung stehen, größere und aktuellere Informationen können auf zentralen System bereit stehen. Eine Interaktion mit Lehrern kann dabei über eine zusätzliche interaktive audiovisuelle Kommunikation erfolgen. Als primäres Merkmal steht jedoch auch hier der Abfrage-Modus im Vordergrund.

Viele Arbeitsvorgänge in den Verwaltungs-, in den Entwicklungs- und anderen Abteilungen der Groß- und Mittelständischen Unternehmen und Verwaltungen beruhen auf Arbeitsvorgängen, in denen mehrere Personen beteiligt sind. Abstimmungen und ein koordiniertes Vorgehen bestimmen wesentlich die Effektivität und damit die Leistungsfähigkeiten der Unternehmen und Institutionen. Auf der anderen Seite stehen heute allgemein vernetzte Arbeitsplatzrechner zur Verfügung. Diese Infrastruktur erleichtert mehreren Personen das gemeinsame Arbeiten durch ein "Überbrücken" von Zeit und Raum. Alle diese oft sehr unterschiedlichen Ausprägungen des gemeinsamen Arbeitens werden heute mit **Kooperativem Arbeiten** (CSCW, Computer Supported Cooperative Work) bezeichnet. In einer ersten genaueren Betrachtung unterscheidet man grob zwischen dem "asynchronen" und dem "synchronen" kooperativen Arbeiten. Das asynchrone kooperative Arbeiten kennzeichnet Arbeitsvorgänge, die nicht gleichzeitig stattfinden. Ein typisches Beispiel ist die Bearbeitung eines Versicherungsschadens durch mehrere Sachbearbeiter unterschiedlicher Funktion in einer Versicherung. Dabei sind die einzelnen Rollen im Rahmen der gesamten Vorgangsbearbeitung festgelegt. Im Gegensatz hierzu finden synchrone kooperative Arbeiten zeitgleich statt. Die rasante Entwicklung im Bereich Multimedia hat hier Audio-Video-Konferenzen als festen Bestandteil von CSCW-Systemen etabliert. Die kommerziellen CSCW-Anwendungen besitzen heute jedoch meistens noch wenige audiovisuelle Komponenten, oder sie sind explizit als Bildtelefon, Videokonferenz oder im Rahmen von „Desktop Conferencing“ entstanden. Bei CSCW steht der Dialog-Modus im Vordergrund.

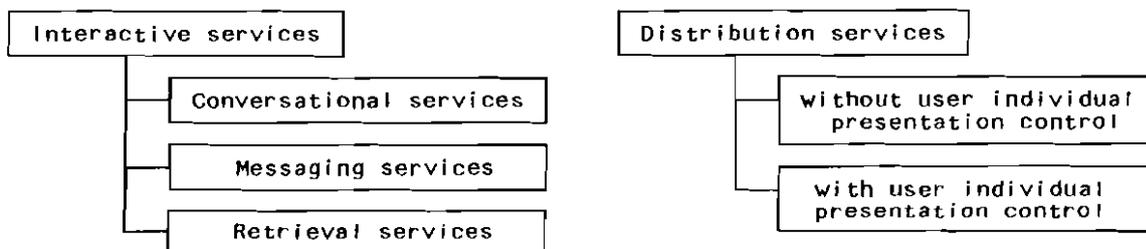


Abbildung 2. Strukturierung von Breitband-Diensten nach CCITT [5].

Eine aus der CCITT-Standardisierung resultierende Klassifikation von multimedialen Anwendungen ist im Rahmen der B-ISDN Diskussion entstanden, und ist in den CCITT Empfehlungen I.211 enthalten [7]. Mit der Verfügbarkeit hoher Bandbreiten über 140 Mbit/s in öffentlichen Netzen werden, entsprechend der ISDN-Terminologie, Breitband-Dienste beschrieben und meist Aussagen zu deren Auswirkung auf die unteren Kommunikationsschichten getroffen. Deshalb ist in diesen Untersuchungen immer ein Bezug zu Kommunikationsdiensten wie Telefon, Telefax, Btx und ISDN festzustellen, und es werden häufig auch die notwendigen Datenraten und geeignete Vermittlungstechniken diskutiert vgl. [4; 32; 41]. Hierfür wird bei CCITT die in Abbildung 2 vorgestellte Strukturierung verwendet, die Anwendungen in fünf verschiedene Dienstklassen aufteilt. Es sei dabei angemerkt, daß hier die Kommunikationsbeziehungen im Vordergrund stehen. Diese Art der Strukturierung ist für die Einteilung von kommunikationsorientierten Diensten geeignet. Sie erfaßt aber bei weitem nicht alle multimedialen Anwendungen und ist deshalb aus Anwendungssicht nur bedingt geeignet.

Neben dieser kommunikationsorientierten Sicht, sind auch oft Untersuchungen von Anwendungsgebieten für Multimedia-Systeme im Bereich Hypertext/Hypermedia zu finden [27]. Insbesondere handelt es sich hierbei um Anwendungen wie z.B. technische Anleitungen, Online-Dokumentationen und Lexika. Andere Aufteilungen richten sich nach den Anforderungen, die sich aus der Nutzung von neuen Telekommunikationsdiensten für die Anwender ergeben [9]. Diese Anforderungen werden aus Anwendungsbereichen (Unterhaltung und Spiele, Telemarketing, ...) abgeleitet.

Anforderungen an die Datenkommunikation und -kompression

Die Betrachtung der Anwendungsbereiche (Kiosk-, Lern- und kooperative Anwendungen) bestätigt, daß sich lokale Systeme zunehmend zu verteilten Lösungen entwickeln. Betrachtet man die Kioskanwendungen, so werden anfangs nur die nicht audiovisuellen Daten wie die Buchung einer Reise über Netze übertragen. Die Informationsvielfalt, die Notwendigkeit aktueller Datenbestände und die simultane Verfügbarkeit der gleichen Anwendung an vielen Orten führt heute schon zur Konzeption und Realisierung von Audio- und Videoservern. Der Einsatz dieser "Server" für Videodaten setzt entsprechende multimedialfähige Netze und Protokolle voraus, um mit den Kiosk-Endsystemen verbunden zu werden. Dabei werden zur selben Zeit eine Vielzahl von Datenströmen bestehen, um die Kioskanwendungen individuell in einem Abfrage-Modus bedienen zu können. Dies setzt sowohl Hochgeschwindigkeitsnetze als auch eine Kompression der Daten voraus. Die Multimedia-Anwendungen bestimmen die Anforderungen an die in einem verteilten Multimedia-System integrierten Komponenten. Als wesentliche Bestandteile werden im folgenden einige bestehende Ansätze zur Bestimmung von Anforderungen an das Kommunikationssystem und die Datenkompressionsverfahren aufgezeigt.

In einer ersten Näherung ist es nützlich, aus Kenntnis der verwendeten Medien einige grundlegende Werte für die verschiedenen Kommunikationsanforderungen herzuleiten. Hierfür können die in [13; 39] vorgestellten Arbeiten verwendet werden. Die Tabelle 1 stellt eine komprimierte Übersicht dar. Hierbei wird allerdings jeglicher Bezug zur Anwendung und anderen technologischen Aspekten wie dem verwendeten Kompressionsverfahren vernachlässigt.

Video (Bewegtbilder) erfordert eine wesentlich höhere Datenrate als Audio; Video hat die dominierende Rolle bezüglich der im Kommunikationssystem und Netz benötigten Datenrate. Auch nach einer Kompression der Daten bestimmt Video weitgehend die benötigte Bandbreite. Experimentelle Untersuchungen der subjektiv bestimmten Qualität komprimierter

Videodaten zeigen keinen linearen Zusammenhang zwischen der Qualität und dem erreichbaren Kompressionsfaktor: Bei heutiger Fernsehqualität erreicht man mit einer Kompression auf ca. 2 Mbit/s eine sehr gute Qualität (dies gilt für die bestmöglichen Kompressionsverfahren, ungeachtet des entstehenden Aufwands). Eine Kompression auf eine höhere Datenrate hat keine wesentliche subjektive Qualitätsverbesserung zur Folge.

Ein Jitter in der Videodatenübertragung kann dazu führen, daß Unregelmäßigkeiten bezüglich einer kontinuierlichen Wiedergabe auftreten. Diese Schwankungen werden jedoch nicht immer sofort vom Anwender bemerkt und können oft auch toleriert werden. Dabei muß die für Video verantwortliche System-Software und -Hardware in der Lage sein, dieselben einzelnen Bilder wiederholt anzuzeigen. Ein Jitter der Audiodaten kann auch zu Unregelmäßigkeiten der entsprechenden kontinuierlichen Wiedergabe führen. Dies wirkt sich jedoch sofort als ein sehr störendes "Knacksen" aus. Damit sind die Echtzeitanforderungen bezüglich Audio i.allg. härter als für Video.

Die bestehende Informationsmenge der Video- und Audioquelle hängt stark von dem eigentlichen Inhalt der Daten ab. Deshalb existieren heute eine Menge von Systemen, die mit einer "variablen Bitrate" arbeiten. Herkömmliche Netze (wie Schmalband-ISDN) und Rechnerkomponenten (wie das optische Speichermedium CD-ROM) basieren meistens auf einer kontinuierlichen, konstanten Datenrate. Hier werden Daten zu einem Strom mit "konstanter Bitrate" kodiert, komprimiert und übertragen.

Medium / Anforderung	Audio (Sprache)	Video		Daten
		unkomprimiert	komprimiert	
Datenrate	16-64kbit/s	~100Mbit/s	~1.5Mbit/s	~0.2-10Mbit/s
Ende-zu-Ende-Verzögerung	~250ms	~250ms	~250ms	~1s
tolerierbarer Jitter	~10ms	~10ms	~1ms	~1ms
Paketverlust	10^{-2}	10^{-2}	10^{-11}	10^{-11}

Tabelle 1. Medienbezogene Kommunikationsanforderungen (nach [39])

Aus dem Umstand, daß die Medien Audio oder Video in einem Konversationsdienst verwendet werden, wird oft die Anforderung für einem isochronen Datenübertragungsmodus abgeleitet. Auch dies hat sich im Rahmen der hier ausgeführten Untersuchungen als eine nicht immer gültige Verallgemeinerung herausgestellt. Um im Fall von Audio und/oder Video einen kontinuierlichen Datenstrom der Senke (Bildschirm oder Lautsprecher) zu liefern, darf eine maximale Ende-zu-Ende-Verzögerung nicht überschritten werden. Diese Ende-zu-Ende-Verzögerung bezieht sich eigentlich auf den Menschen als Signalquelle und -senke. Es ist demnach neben den reinen Kommunikationskomponenten die Verarbeitung im gesamten Multimedia-System zu berücksichtigen. Treffen Datenpakete „zu früh“ am empfangenden Rechner ein und ist dort genügend Zwischenspeicherplatz vorhanden, so kann eine kontinuierliche „Datenzustellrate“ an der Senke garantiert werden. Eine isochrone Kommunikation reduziert die Pufferanforderungen an der Senke (und ggf. auch bei weiteren Rechnern, die sich im Kommunikationspfad befinden). Dabei werden die Kosten der benötigten Endgeräte bei Verwendung einer isochronen Übertragung geringer. Dies trifft insbesondere bei einer qualitativ hochwertigen Videoübertragung mit hoher maximaler Ende-zu-Ende-Verzögerung (z.B. 1 s) zu, weil hier die Speicherplatzanforderungen gegenüber einer synchronen Kommunikation wesentlich geringer sind. Zusammenfassend sei angemerkt, daß ein

synchroner Übertragungsmodus benötigt wird, wohingegen ein isochroner Modus nicht erforderlich, aber oftmals nützlich und kostensparend ist.

Wie in [2; 3] ausgeführt, kann eine rein medienbezogene Ableitung der Systemanforderungen nur eine erste Näherung sein. Die Berücksichtigung einer sehr groben Einteilung von Diensten ist auch nur die zweite Näherung. Sie läßt sich keinesfalls auf alle Anwendungen mit dem gleichen Ausmaß anwenden. Bezüglich der tolerierten Ende-zu-Ende-Verzögerung ist es beispielsweise völlig unterschiedlich, ob Sprache im Dialog- oder Abfragemodus übertragen wird. Um den Gesprächsfluß zwischen Menschen natürlich zu gestalten, darf eine technisch bedingte Verzögerung nicht zu groß werden. Dies ist wesentlich unwichtiger, wenn man beispielsweise Information in Form von Sprache bei Datenbankabfragen empfängt.

Anwendungen kann man entsprechend den im vorherigen Abschnitt dargestellten CCITT-Dienstklassen [6; 7] gruppieren. Ähnlichkeiten innerhalb dieser Gruppen können zur Ableitung gemeinsamer Anforderungen verwendet werden [2]. Trotzdem können Anwendungen innerhalb der gleichen Dienstklasse unterschiedliche Anforderungen haben, wie z. B. der „high-speed telefax“ und Telefondienst. Die große Vielfalt an CCITT-Diensten und -Anwendungen innerhalb der einzelnen CCITT-Dienstklassen führt zu vielen unterschiedlichen Kommunikationsanforderungen. Daher können in einem weiteren Ansatz drei Gruppen nach ihren Leistungskriterien unterschieden werden [41]: „Verzögerungsempfindliche“, „verlustempfindliche“ und „verzögerungs- und verlustempfindliche“. Der Schwerpunkt dieser Klassifikation liegt auf der erforderlichen Zuverlässigkeit und der Ende-zu-Ende-Verzögerung. Andere wichtige Kriterien, wie beispielsweise die erforderliche Bandbreite, werden hier vernachlässigt. Außerdem ist diese Einteilung sehr grob.

Hochgeschwindigkeitsnetze, die zur Kommunikation multimedialer Informationen fähig sind, begünstigen und verwirklichen den Trend zu einem höheren Grad an Interaktion in verteilten Umgebungen. Eine Anwendung besteht nicht mehr aus einem einzelnen Dienst, sie stellt eine Kombination verschiedener Dienste dar. Daher ist es problematisch, für Anwendungen wie „verteiltes Lernen“ oder „gemeinsames Editieren“ die Anforderungen nach einer allgemein gültigen Medien-, Dienstklassifikation oder Leistungskriterien abzuleiten. Ein Dienst muß im Zusammenhang mit der Anwendung und der verwendeten Technologie betrachtet werden. Dabei müssen auch die Kodierung und die Kompression der Medien beachtet werden. Mit Hilfe einer geeigneten Modellierung von Multimedia-Anwendungen können diese Aspekte berücksichtigt werden. Dabei wurde beispielsweise in [38] ein Modell vorgestellt, das einzelne Funktionale Einheiten identifiziert, Datenströme charakterisiert, die Funktionalen Einheiten über einen gemeinsamen Kontext verbindet und eine örtliche Platzierung vornimmt.

Viele Multimedia-Anwendungen basieren auf der Interaktion zwischen mehreren Partnern und/oder Rechnern. Als wesentliche Anforderungen an das Kommunikationssystem ergeben sich hieraus die Unterstützung von Multicast- und Broadcast-Verbindungen. Nur so kann die Bandbreite effektiv genutzt werden. Diese Anforderung trifft sowohl für Lokale Netze wie auch Weitverkehrsnetze zu. Außerdem muß über das Kommunikationssystem oder/und die Systemsoftware der Endsysteme eine Synchronisation verschiedener Verbindungen möglich sein [30]. Diese Synchronisation dient beispielsweise zur Erhaltung der Lippsynchronisation, wenn Audio- und Videodaten über unterschiedliche Verbindungen übertragen werden.

Aus den Erfahrungen mit den unterschiedlichsten Multimedia-Anwendungen und den Kommunikationssystemen kann jedoch in einer allgemeinen Klassifikation am besten zwischen dem Abfrage- und dem Dialog-Modus unterschieden werden. Der Dialog-Modus entspricht dem „Conversational Service“, der Abfrage-Modus dem „Retrieval Service“ und zum Teil dem „Distribution Service with User Individual Control“.

Hieraus lassen sich am besten die Anforderungen für die Kompressionsverfahren ableiten. Die Qualität der komprimierten und anschließend wieder dekomprimierten Daten soll möglichst gut sein. Dabei soll die Komplexität des verwendeten Verfahrens gering sein, um somit eine effektive Realisierung zu ermöglichen. Die Algorithmen sollen zur Dekompression und ggf. auch bei der Kompression bestimmte Zeitschranken nicht überschreiten. Diese Anforderungen werden in den verschiedenen Entwicklungen unterschiedlich berücksichtigt (siehe u.a. Anforderungen aus [23]). Manche Verfahren sind eher auf die eine Art der Dialog-Anwendung abgestimmt (mit symmetrischem Aufwand zur Kompression und Dekompression und stark beschränkter Verzögerung), andere versuchen mit hohem Aufwand bei der Kompression den Einsatz in Abfrage-Systemen zu optimieren.

Für den Dialog-Modus ist folgende Anforderung zu berücksichtigen:

- Die Ende-zu-Ende Verzögerung für ein im Dialogsystem eingesetztes Verfahren soll für die reine Kompression und Dekompression nicht über 150 ms dauern. Werte im Bereich 50 ms sollten angestrebt werden, um den Dialog in einer natürlichen Weise zu führen.

Für den Abfrage-Modus sind folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

- Es soll sowohl ein schneller Vorlauf als auch ein schneller Rücklauf mit gleichzeitigem Anzeigen (bzw. Abspielen) der Daten möglich sein. Hiermit können einzelne Passagen gesucht und schneller gefunden werden.
- Ein wahlfreier Zugriff sollte auf Einzelbilder und Audiopassagen innerhalb eines Bereiches von ca. 0.5 s im Datenstrom realisierbar sein. Dieser Zugriff sollte schneller als bei einem CD-DA-Gerät erfolgen, um dem interaktiven Charakter gerecht zu werden.
- Die Dekompression von Einzelbildern, Video- oder Audiopassagen sollte ohne Interpretation aller vorheriger Daten möglich sein. Damit lassen sich solche Passagen nach einem wahlfreien Zugriff editieren.

Für den Dialog- und den Abfrage-Modus sind folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

- Es ist ein Format unabhängig von der Bildschirmgröße und Bildwiederholfrequenz zu definieren. Damit können dieselben Daten auf unterschiedlichen Systemen angezeigt werden.
- Für Audio und Video sind verschiedene Datenraten mit unterschiedlicher Qualität erwünscht. Damit kann die Datenrate ggf. den jeweiligen Gegebenheiten angepaßt werden.
- Audio und Video sollten exakt synchronisierbar sein. Auch sollte eine Synchronisation mit anderen Medien von einem Systemprogramm realisierbar sein.
- Eine Realisierung sollte heute in Software oder mit wenigen hochintegrierten Bausteinen durchgeführt werden. Dies ermöglicht eine kostengünstige Lösung.
- Das Verfahren sollte eine Kooperation verschiedener Systeme ermöglichen. Damit können die auf einem lokalen Multimedia-System erstellten Daten auf anderen Systemen wiedergegeben werden. Dies ist beispielsweise im Fall von Schulungsunterlagen relevant, die in Form einer CD vorliegen. Nur so können viele Teilnehmer an ihrem jeweiligen System von unterschiedlichen Herstellern diese Daten lesen. Man kann ebenso davon ausgehen, daß viele Anwendungen Multimedia-Daten über Netze austauschen. Hier muß eine Kompatibilität der Kompressionsverfahren auf den unterschiedlichen Systemen bestehen. Über de-jure (CCITT, ISO, ECMA, ..) und/oder de-facto Standards läßt sich dieser Punkt in Griff bekommen.

Aus diesen Anforderungen heraus wurden die verschiedenen im folgenden beschriebenen Kompressionsverfahren entwickelt, die bei der Entwicklung von Hochgeschwindigkeitsnetzen und ihren Protokollen berücksichtigt werden müssen. Dafür wird im nächsten Abschnitt kurz die prinzipielle Struktur dieser Verfahren erläutert.

Kodierungsverfahren in der Übersicht

Einzelbilder sind gegenüber dem Medium „Text“ durch einen relativ hohen Speicherplatzbedarf gekennzeichnet. Audio und insbesondere Video haben diesbezüglich noch höhere Anforderungen. Auch die entstehenden Datenraten bei der Verarbeitung und Übertragung kontinuierlicher Medien sind nicht unerheblich. Die Verarbeitung unkomprimierter Datenströme in einem integrierten Multimedia-System bedeutet für Bewegtbilder Speicherplatz im Gigabyte-Bereich, Zwischenpuffer im Megabyte-Bereich. Sie bedingt auch Datenübertragungsraten um die 140 Mbit/s innerhalb des Systems und über die systemverbindenden Netze (je unidirektionaler Verbindung). Dies ist mit heutiger Technologie und auch in den nächsten Jahren nicht kostengünstig realisierbar. Mit Hilfe von geeigneten Kompressionsverfahren lassen sich diese Werte jedoch erheblich reduzieren [26; 29]. Die Forschung, Entwicklung und Standardisierung hat in diesem Bereich in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht [1]. Diese Techniken sind Bestandteile der Multimedia-Systeme.

Dabei lassen sich alle Kompressionsverfahren in verschiedene Kategorien einteilen. Es wird zwischen der **Entropiekodierung**, der **Quellenkodierung** und der **hybriden Kodierung** unterschieden. Dabei arbeitet die Entropiekodierung verlustfrei und die Quellenkodierung meistens verlustbehaftet. Die hybriden Ansätze werden in den meisten Multimedia-Systemen eingesetzt, sie sind aber eigentlich immer „nur“ Kombinationen der Quellen- und Entropiekodierung, keine verfahrenstechnisch neue Algorithmen.

Die **Entropiekodierung** wird auf die verschiedenen Medien, ungeachtet deren medienspezifischer Eigenschaften angewendet. Die zu komprimierenden Daten werden nur als eine Sequenz digitaler Datenwerte gesehen, deren Bedeutung hier nicht beachtet wird. Die „Verlustfreiheit“ bezieht sich auf den Vergleich der zu kodierenden mit den dekodierten Daten; diese Daten sind identisch, es geht keine Information verloren. So kann beispielsweise eine Lauflängenkodierung bei der Kompression von Daten beliebiger Natur in einem Dateisystem, bei Texten, Einzelbildern wie bei Faksimile oder als Teil einer Bewegtbild- oder Audiokodierung eingesetzt werden.

Die **Quellenkodierung** verwendet die Semantik der zu kodierenden Informationen [33]. Diese meistens verlustbehafteten Verfahren sind bezüglich des erreichbaren Kompressionsgrads abhängig von dem jeweiligen Medium. Bei einer „verlustbehafteten Kodierung“ werden die zu kodierenden Daten mit den dekodierten Daten in Beziehung gesetzt; diese Daten sind meistens ähnlich aber nicht gleich. Hier können die Spezifika der Medien gut ausgenutzt werden. Bei Einzelbildern können örtliche Redundanzen über eine Prädiktion des Inhalts zur Kompression eingesetzt werden. In einem anderen Verfahren kann hier eine Transformation von dem Ortsraum in den zweidimensionalen Frequenzraum mit Hilfe der Diskreten Kosinus-Transformation (DCT) erfolgen. Tiefe Frequenzen sind hier wesentlich wichtiger als die auftretenden höheren Frequenzen. Dies kann man sich bei einer Kompression zu Nutze machen.

In bezug auf die verschiedenen Medien werden in der Literatur und in den Produkten immer wieder einige hybride Verfahren genannt: „JPEG“ ist für Einzelbilder gedacht. „H.261“ (px64) betrachtet Videosequenzen mit einer geringen Auflösung. Komplementär können hierzu bekannte Verfahren aus dem ISDN-Bereich zur Audio-Kodierung verwendet werden, die auch innerhalb von CCITT standardisiert wurden. „MPEG“ beinhaltet sowohl Bewegtbilder als

innerhalb von CCITT standardisiert wurden. „MPEG“ beinhaltet sowohl Bewegtbilder als auch Audio. „DVI“ betrachtet neben Einzelbildern auch kontinuierliche Medien. Es besteht zur Videokodierung aus zwei grundsätzlich unterschiedlichen Modi (PLV und RTV).

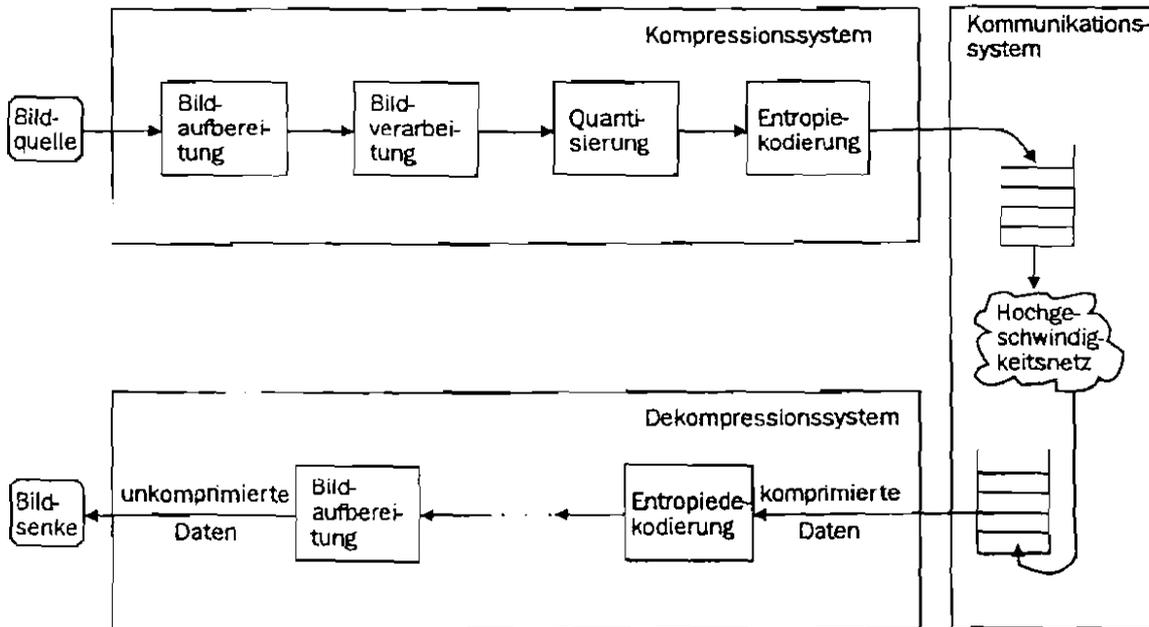


Abbildung 3. Die Datenkompression und -dekompression in einem verteilten Multimedia-System

Abbildung 3 zeigt exemplarisch das allgemeine Vorgehen bei einer Kompression von Einzelbildern. Es ist auch bei Video- und Audiodatenströmen gültig. Als Beispiel geht man in den folgenden vier Schritten von einem Bewegtbild aus:

1. Die **Datenaufbereitung** (hier „Bildaufbereitung“) erzeugt eine geeignete digitale Darstellung der Information des zu verarbeitenden Mediums. Ein Bild wird dafür beispielsweise in Blöcken zu 8x8 Pixel mit einer festgelegten Anzahl von Bits pro Pixel zerlegt.
2. Die **Datenverarbeitung** (hier „Bildverarbeitung“) führt den eigentlich ersten Schritt der Kompression durch. Es können verschiedene Verfahren verwendet werden. So kann beispielsweise eine Transformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich mit Hilfe der Diskreten Kosinus-Transformation erfolgen. Bei einer Interframe-Kodierung können hier Bewegungsvektoren bestimmt werden, die für jeweils einen Block mit 8x8 Pixel gelten.
3. Die **Quantisierung** erfolgt im Anschluß an die mathematisch exakt ausgeführte Bildverarbeitung. Ein in dieser vorherigen Stufe ermittelter Wert kann und soll nicht mit seiner vollen Genauigkeit weiterverarbeitet werden, er wird gemäß einer bestimmten Auflösung und einer Kennlinie quantisiert. So können in dem transformierten Raum die

ermittelten Werte auch gemäß ihrer Wichtigkeit unterschiedlich behandelt werden (beispielsweise mit unterschiedlicher Anzahl von Bits quantisiert werden).

4. Die **Entropiekodierung** geht von einem linearen Datenstrom einzelner Bits und Bytes aus. Hier erfolgt mit verschiedenen Verfahren eine abschließende verlustfreie Kompression. Beispielsweise können häufig auftretende längere Folgen von Nullern mit einer Angabe der Anzahl der folgenden Zeichen und anschließend dem Zeichen selbst komprimiert werden.

Die Bildverarbeitung und die Quantisierung können dabei mehrfach iterativ durchlaufen werden. Hier kann entweder eine „Rückkopplung“ erfolgen, oder es können mehrere Verfahren hintereinander auf die Daten angewendet werden.

Im Anschluß an diese vier Kompressionsschritte werden die digitalen Daten in einem zu definierenden Format als Datenstrom zusammengefaßt. Dabei werden beispielsweise Bildanfang und Art der Kompression als Teil des Datenstroms integriert. Hier kann auch ein Fehlerkorrekturcode eingebracht werden. Der Dekompressionsvorgang erfolgt invers zur Kompression. Die Realisierung einzelner Kodierer und Dekodierer kann jedoch sehr unterschiedlich aussehen. Eine symmetrische Kodierung zeichnet sich durch einen vergleichbaren Aufwand bei der Kodierung und Dekodierung aus. Dies ist insbesondere bei Dialoganwendungen anzustreben. Ein asymmetrisches Verfahren ermöglicht eine Dekodierung mit wesentlich weniger Aufwand als bei der Kodierung. Dies ist für Anwendungen gedacht, bei denen die Kompression einmal erfolgt und die Dekompression sehr häufig stattfindet. Die Erstellung einer audiovisuellen Lerneinheit wird einmal vorgenommen. Viele Lernende werden im Anschluß diese Daten oft dekodieren. Die prinzipielle Anforderung liegt hier in der Dekompression in Echtzeit. Über diesen Mechanismus kann die Qualität der komprimierten Bilder gesteigert werden.

JPEG

Seit Juni 1982 wurde in der Working Group 8 (WG8) der ISO an Standards zur Kompression und Dekompression von Standbildern gearbeitet [14]. Im Juni 1987 standen 10 unterschiedliche Verfahren für Einzelbildkodierung vieler Farben und Grautöne zur Auswahl. Diese wurden verglichen und 3 davon vertiefend untersucht. Eine adaptive Transformationskodierung basierend auf der Diskreten Kosinus-Transformation (DCT) hat subjektiv die besten Resultate erhalten [18; 42]. Das beste Verfahren wurde anschließend unter Beachtung der anderen beiden Methoden weiterentwickelt. Diese unter dem Namen „JPEG“ („Joint Photographic Experts Group“) bekannte Kodierung, ist eine gemeinsame Aktivität der ISO/IEC JTC1/SC2/WG10 und der Kommission Q.16 der CCITT SGVIII.

Die prinzipiell in Abbildung 3 vorgestellten Schritte bei der Kompression sind auch in JPEG vorhanden. Hiernach lassen sich verschiedene Zusammenstellungen definieren, die jeweils als ein Modus bezeichnet werden. JPEG unterscheidet **4 Modi**, die selbst noch verschiedene Varianten enthalten:

- Der **verlustbehaftete sequentielle DCT-basierte Modus** („Baseline Process“, Basis Mode) muß von jedem JPEG Dekoder unterstützt werden.
- Der **erweiterte verlustbehaftete DCT-basierte Modus** stellt eine Menge weiterer Alternativen zu dem Basis Modus zur Verfügung.

- Der **verlustfreie Modus** zeichnet sich durch einen wesentlich geringeren Kompressionsfaktor aus und ermöglicht eine fehlerfreie Rekonstruktion des Originalbildes.
- Der **hierarchische Modus** beinhaltet Bilder verschiedener Auflösungen und verwendet dazu Algorithmen, die in den anderen drei Modi definiert wurden

JPEG ist der Standard für die Einzelbildkodierung in der Zukunft. Er läßt über seine sehr weitgefächerte Definition eine große Menge von Freiheitsgraden zu. Hier können beispielsweise bis zu 255 Bildkomponenten, d.h. Ebenen, existieren. Als Leistungsfähigkeits-Koeffizient läßt sich hier ein Maßstab in Bits pro Pixel angeben. Er ist ein Mittelwert, der sich als Quotient aus der Anzahl in kodierter Form enthaltener Bits und der Anzahl im Bild enthaltener Pixel ergibt. Hiermit läßt sich folgende Aussage für DCT kodierte Einzelbilder treffen [40]: Eine Kompression kann bis auf 0,25 bit/pixel mit mäßiger Qualität erfolgen, eine ausgezeichnete Qualität wird bei 2,00 bit/pixel erreicht. Diese Werte entsprechen bei einer Kodierung mit 24 bit je Pixel einem Kompressionsgrad zwischen 96:1 und 12:1. Im verlustfreien Modus wird trotz der erstaunlichen Einfachheit des Verfahrens im Mittel ein Kompressionsgrad von ca. 2:1 erreicht.

JPEG wird auf farbige und grauskalierte Standbilder angewendet [19; 22; 40]. Man kann über eine schnelle Kodierung und Dekodierung von Einzelbildern auch eine Bewegtbildsequenz bearbeiten. Dies wird häufig auch als „Motion JPEG“ bezeichnet. Motion JPEG eignet sich sehr gut für die Kommunikation multimedialer Daten, weil sich typische Burst-Fehler bei der Übertragung immer nur auf ein Bild auswirken. Folgefehler treten nicht auf. Außerdem kann sich ein Empfänger auf einen bestehenden Datenstrom aufschalten und sofort mit der Anzeige des nächsten verfügbaren Bildes beginnen.

Teile von JPEG sind heute schon als reines Softwarepaket oder mit spezieller Hardwareunterstützung verfügbar. Dabei ist zu beachten, daß bisher meistens nur die unbedingt notwendigen Algorithmen in den Produkten unterstützt werden; d.h. es ist zur Zeit nur ein Teil von JPEG kommerziell erhältlich. Dies ist der im weiteren beschriebene Basis Modus mit einer bestimmten Vorgabe der Bildaufbereitung (begrenzte Anzahl der Bildebenen und Farbkodierung).

H.261

Die treibende Kraft hinter dem für Kommunikationssysteme ausgelegten H.261-Bewegtbildstandard war und ist ISDN. Im ISDN stehen dem Teilnehmer beim Basisanschluß an der Teilnehmerschnittstelle neben dem D-Kanal zwei B-Kanäle mit je 64kbit/s zur Verfügung. Daneben ermöglicht die ISDN-Hierarchie auch einen Anschluß mit 30 B-Kanälen. Wenn hier im weiteren von „B-Kanal“ die Rede ist, dann bezieht sich das auch auf den Fall der Zusammenfassung mehrerer Kanäle. Auf einem oder zwei B-Kanälen eines Schmalband ISDN-Anschlusses können außer Sprachdaten auch Videodaten übertragen werden. Das bedingt, daß die über diesen B-Kanal verbundenen Partner dieselbe Kodierung der Videodaten verwenden. Die primäre Anwendung während dieser Überlegungen waren das Bildtelefon und die Videokonferenzsysteme. In diesen Dialoganwendungen muß die Kodierung und Dekodierung in Echtzeit erfolgen. Wegen der notwendigen Unterstützung von Schmalband-ISDN wurde die Videokompression auf $p \times 64\text{kbit/s}$ mit $p = 1, 2, \dots, 30$ festgelegt. Es entstand die CCITT-Empfehlung H.261 „Video Codec for Audiovisual Services at $p \times 64\text{kbit/s}$ “ [28] (Codec = Coder/Decoder, d.h. Kodierung und Dekodierung bzw. Kompression und Dekompression), die im Dezember 1990 verabschiedet wurde. Wegen der Betrachtung

einer komprimierten Datenrate mit $p \times 64$ kbit/s wird diese Empfehlung bzw. das Verfahren auch „px64“ genannt.

Die CCITT Empfehlung H.261 der Study Group XV entstand unter Beachtung der Echtzeitverarbeitung bei Kodierung und Dekodierung. Kompression und Dekompression dürfen zusammen nicht über 150ms Signalverzögerung erzeugen. Bei einer zu großen Ende-zu-Ende-Verzögerung ist der Dialog einer Anwendung, die diesen Standard verwendet, nämlich subjektiv wesentlich beeinträchtigt.

H.261 definiert im Gegensatz zu JPEG das Format des zu kodierenden Bildes sehr genau. Zur Bildaufbereitung nach Abbildung 3 ist das Bild als Luminanzsignal (Y) und Chrominanzdifferenzsignale C_b, C_r (nach der in CCIR 601 definierten Unterabtastung) kodiert. Dies wurde später vom MPEG so übernommen. Es sind zwei Auflösungsformate mit jeweils einem 4:3 Seitenverhältnis spezifiziert worden: In dem sogenannten „Common Intermediate Format“ **CIF** werden in der Luminanzkomponente 288 Zeilen mit je 352 Pixel definiert. Die Chrominanzebenen werden entsprechend der 2:1:1 Vorgabe mit 144 Zeilen und 176 Pixel je Zeile abgetastet. Das „Quarter-CIF“ **QCIF** hat genau die halbe Auflösung in allen Komponenten (d.h. 176×144 Pixel für die Luminanz und 88×72 Pixel für die anderen Ebenen). Alle H.261-Implementierungen müssen das QCIF kodieren und dekodieren können, CIF ist hier optional.

Der notwendige Kompressionsgrad, um ein Bild selbst mit der geringen Auflösung von QCIF auf die Bandbreite eines ISDN B-Kanals zu komprimieren, wird mit folgendem Beispiel deutlich: Der unkomprimierte QCIF-Datenstrom hat bei 29.97 Bildern pro Sekunde eine Datenrate von ca. 9.115 Mbit/s. Das zu komprimierende Bild sei mit 10 Bildern pro Sekunde zu komprimieren. Hier ist der hohe Kompressionsgrad von ca. 1:47,5 notwendig. Dies ist heute technisch sehr gut realisierbar, und die Qualität ist für Szenen mit einem Sprecher vor einem nicht bewegten Hintergrund akzeptabel.

Bei H.261 kann die Kodierung eines Bildes als „Intraframe“ oder „Interframe“ erfolgen. Bei „Intraframe“ werden zur Kodierung nur Daten aus dem jeweilig betrachteten Bild verwendet. Bei „Interframe“ werden zur Kodierung Daten aus anderen Bildern verwendet. Die Norm schreibt nicht die Verwendung des einen oder anderen Modus in Abhängigkeit bestimmter Parameter vor. Die Entscheidung muß beim Kodieren getroffen werden und hängt somit von der jeweiligen Implementierung ab.

Der H.261-Quantisierer nach Abbildung 3 arbeitet linear. Seine Schrittweite wird in Abhängigkeit des Füllstandes eines Übertragungsspeichers geregelt, so daß eine konstante Datenrate am Ausgang des Kodierers gewährleistet ist. Über diese Rückkopplung wird damit auch die Bildqualität beeinflusst.

H.261 ist ein schon etablierter Standard, der vor allem von den Betreibergesellschaften der Telefon- und Weitverkehrsnetze gefördert wird. Über eine sehr beschränkte Auflösung im QCIF-Format und mit reduzierter Bildwechselfrequenz bereiten die Realisierungen von H.261 Kodierern und Dekodierern heute keine größeren technischen Probleme. Dies gilt besonders auch dann, wenn die Bewegungskompensation und der optische Tiefpaß nicht Bestandteil der Implementierung sind. Die Qualität ist dann jedoch nicht immer zufriedenstellend. Wenn man das Bild im CIF-Format bei 25 Bildern pro Sekunde mit einer Bewegungskompensation komprimiert, dann ist die Qualität jedoch durchaus akzeptabel. Für Multimedia-Anwendungen im Dialog-Modus ist H.261 wegen der festgelegten maximalen Ende-zu-Ende-Verzögerung sehr interessant. Hier gibt es bei Realisierungen anderer Standards oft erheblich höhere Verzögerungen.

MPEG

MPEG („Moving Picture Expert Group“) wird heute in der ISO/IEC JTC1/SC 29/WG 11 entwickelt bzw. definiert. Zusammen mit der Bewegtbild- wird hier auch die Audiokodierung bearbeitet. Unter Berücksichtigung des heutigen Entwicklungsstandes digitaler Massenspeicher aus der CD-Technologie wird hier eine Datenrate des komprimierten Stroms von ca. 1,4 Mbits/s angestrebt. MPEG schreibt eine konstante Datenrate von maximal 1856 kbit/s vor. Diese „sollte“ nicht überschritten werden [23]. Hier ist jeder Audiokanal in Schritten zu je 16 kbit/s wahlweise zwischen 32 und 448 kbit/s enthalten. Diese Datenrate ermöglicht eine Video- und Audiokompression mit akzeptabler Qualität. Im Vergleich zu JPEG sind die kommerziell verfügbaren MPEG-Produktentwicklungen noch nicht so weit fortgeschritten. MPEG berücksichtigt explizit die Entwicklungen der anderen Normungsaktivitäten JPEG und H.261.

MPEG ist sowohl für symmetrische als auch für asymmetrische Kompression geeignet. Eine asymmetrische Kompression erfordert zum Kodieren einen wesentlich höheren Aufwand als zur Dekodierung. Anwendungen führen den Kompressionsvorgang einmal durch, die Dekompression wird jedoch sehr häufig erfolgen. Der Abfrage-Modus ist hierfür ein typischer Anwendungsbereich. Eine symmetrische Kompression bedeutet einen ähnlichen Aufwand zur Kompression und Dekompression. Interaktive Dialoganwendungen benötigen diese Art des Kodierungsverfahrens, das auch eine begrenzte Verzögerung in diesem Prozeß voraussetzt.

Die Bildaufbereitung von MPEG legt im Gegensatz zu JPEG und ähnlich zu H 261 den Aufbau eines Bildes sehr genau fest. Ein Bild muß aus drei Ebenen (Komponenten) bestehen. Neben der Luminanz Y sind dies die Farbdifferenzkomponenten C_r und C_b (ähnlich dem YUV-Format). Die Luminanzkomponente hat in horizontaler und vertikaler Richtung die doppelte Auflösung wie die anderen beiden Ebenen („Color-Subsampling“). Dabei sollte die Luminanzkomponente die Anzahl von 768×576 Pixel nicht überschreiten. Es wird mit einer Tiefe von 8 bit/pixel in jeder Ebene gearbeitet.

Zur Bildverarbeitung müssen in MPEG vier Arten der Kodierung eines Bildes unterschieden werden. Der Grund liegt hier in der widersprüchlichen Anforderung einer effizienten Kodierung und eines wahlfreien Zugriffs. Um einen hohen Kompressionsgrad zu erreichen, müssen zeitliche Redundanzen aufeinanderfolgender Bilder ausgenutzt werden. Der schnelle wahlfreie Zugriff bedingt eine Einzelbildkodierung. Bei verteilten Multimedia-Anwendungen kann sich ein Videodatenempfänger bei einer reinen Einzelbildkodierung sofort auf eine bestehende Übertragung umschalten. Im einzelnen werden folgende Bilder unterschieden (ein „Bild“ wird hier als Synonym zu „Einzelbild“ bzw. „Frame“ verwendet):

- **I-Bilder** („Intra coded pictures“) werden ohne zusätzliche Informationen anderer Einzelbilder kodiert (Intraframe-Kodierung). Ein I-Bild wird wie ein Standbild behandelt; hier wurde in MPEG auf die Ergebnisse von JPEG zurückgegriffen. Die Kompression muß jedoch im Gegensatz zu JPEG auch in Echtzeit möglich sein. Die Kompressionsrate ist deshalb am geringsten. I-Bilder bilden die Anker für den wahlfreien Zugriff und das Umschalten auf eine bestehende Datenübertragung.
- **P-Bilder** („predictive coded pictures“) benötigen zur Kodierung und Dekodierung Informationen vorangegangener I- oder P-Bilder. Zur Dekodierung ist hier die Dekompression des vorherigen I-Bildes und aller evtl. noch dazwischenliegender P-Bilder nötig. Dafür ist die Kompressionsrate gegenüber I-Bildern erheblich höher. Ein P-Bild läßt den Zugriff auf das folgende P-Bild zu, wenn dazwischen kein I-Bild liegt.
- **B-Bilder** („bidirectionally predictive coded pictures“) benötigen zur Kodierung und Dekodierung Informationen vorangegangener und später auftretender I- oder P- Bilder. Die höchste Kompressionsrate ist durch die Kodierung als B-Bild erreichbar. Es entsteht

als Differenzbild zur Prädiktion aus einem vorherigen und einem nachfolgenden I- oder P-Bild. Es kann niemals als Referenz zu anderen Bildern dienen.

- **D-Bilder** („DC coded picture“) sind Intraframekodiert und werden für einen schnellen Vorlauf verwendet.

Es sei angemerkt, daß sich wegen der B-Bilder in einem MPEG-kodierten Videostrom die Reihenfolge der zu präsentierenden Bilder von der eigentlichen Dekodierungs-Reihenfolge unterscheidet. Die Gesetzmäßigkeit einer Folge von I-, P- und B-Bildern wird von der MPEG-Anwendung bestimmt. Eine extreme Auflösung in bezug auf die Forderung nach wahlfreiem Zugriff würde am besten durch eine Kodierung des gesamten Stroms als I-Bilder erreicht. Die höchste Kompressionsrate ist über eine Kodierung mit möglichst vielen B-Bildern zu erzielen. Für praktische Anwendungen hat sich die Folge von „IBBPBBPBB IBBPBBPBB ...“ als sinnvoll herausgestellt: Ein wahlfreier Zugriff hat dann eine Auflösung von neun Einzelbildern (d.h. ca. 330 ms) bei einer sehr guten Kompressionsrate.

Man geht heute davon aus, daß sich die Qualität einer nach MPEG optimal komprimierten Videosequenz bei der vorgegebenen maximalen Datenrate von ca. 1,5 Mbit/s nicht mehr wesentlich verbessern läßt. Hier soll nur das Ergebnis (der Kompressionsfaktor und die Qualität) zählen, der Aufwand wird nicht berücksichtigt. Die Qualität von MPEG-Video bei etwa 1.2 Mbits/s (ohne Ton) ist nach [16] vergleichbar mit VHS-Aufzeichnungen. Der Algorithmus ist im Zusammenhang mit der erforderlichen Kompression sehr gut für eine Auflösung von ca. 360 x 240 Pixel. Selbstverständlich sind auch höhere Auflösungen dekodierbar, bei beispielsweise 625 Zeilen geht dies jedoch auf Kosten der Qualität. Im Bereich der Bewegtbild-Kodierung wird deshalb an Verfahren der Kompression für einen Bereich über 4 Mbit/s gearbeitet. Dies wird mit „MPEG-2“ [24] bezeichnet, MPEG-1 kennzeichnet die bisher etablierten Verfahren. MPEG-2 zielt hier auch auf eine höhere Bildauflösung, ähnlich der digitalen Videostudionorm CCIR 601. MPEG-2 betrachtet – ähnlich zu dem hierarchischen Modus in JPEG – eine Skalierungsmöglichkeit der komprimierten Bewegtbilder [10]. Hier werden bei der Kodierung Bewegtbilder in verschiedenen „Qualitäten“ komprimiert, so daß bei einer Dekompression derselben Daten verschiedene Alternativen zur Verfügung stehen [17]. Bei einer Datenübertragung kann damit die Rate des Senders an die verfügbare Bandbreite der Netze dynamisch (während einer Verbindung) angepaßt werden. Diese Skalierung kann sich auf unterschiedliche Parameter auswirken:

- Eine räumliche Skalierung ermöglicht die Dekompression von Bildsequenzen mit unterschiedlicher horizontaler und vertikaler Auflösung.
- Eine Skalierung der Rate ermöglicht bei der Wiedergabe eine Darstellung unterschiedlicher Anzahl von Vollbildern pro Sekunde.
- Unter einer Amplituden-Skalierung kann eine unterschiedliche Bittiefe, bzw. Auflösung der Quantisierung der DCT-Koeffizienten verstanden werden. Dies führt dann auch zu einem „layered Coding“ und der Möglichkeit eines progressiven Bildaufbaus.

Bei MPEG-2 wird auch der Verlust einzelner Zellen eines MPEG-2 kodierten ATM-Datenstromes betrachtet, um die Auswirkungen auf die Anwendung zu minimieren. Es sollen definierte Sequenzen verschiedener Bildarten (I, P, B) bestimmt werden, die eine minimale Ende-zu-Ende-Verzögerung bei gegebener Datenrate ermöglichen.

DVI

Digital Video Interactive (DVI) ist eine Technologie und eigentlich kein konkretes System, die heute von Intel weiterentwickelt wird. Die wesentlichen Bestandteile sind ein „VLSI Chip Set“ für das Video Subsystem, ein festgelegtes Datenformat (für Audio- und Videodateien), eine Benutzerschnittstelle (des Audivisual Kernel AVK) und Kompressions- und Dekompressionsalgorithmen [11; 20; 21; 31]. DVI betrachtet die Medien „Daten“, „Text“, „Graphik“, „Einzelbild“, „Bewegtbilder“ und „Audio“.

DVI unterscheidet für die Bewegtbildkodierung zwei prinzipiell verschiedene Verfahren unterschiedlicher Qualität und Zielsetzung:

- **Presentation Level Video (PLV)** ist durch eine hohe Qualität gekennzeichnet. Dies wird auf Kosten einer sehr aufwendigen asymmetrischen Kompression erreicht, die von speziellen Kompressionslabors durchgeführt wird. Dies Verfahren eignet sich besonders für fertiggestellte Anwendungen, die auf CD-ROMs verteilt werden können oder sich auf Video-Servern in Hochgeschwindigkeitsnetzen befinden.
- **Real-Time Video (RTV)** ist ein symmetrisch arbeitendes Kompressionsverfahren, das in Echtzeit mit heute verfügbarer Hard- und Software arbeitet. Der RTV-Algorithmus kann auch mit einer bestimmten Parametrisierung auf anderen Prozessoren wie Intel 386/486 in Echtzeit ablaufen, hierbei wird die Bildqualität reduziert. Mit diesem Verfahren kann der Ersteller von DVI-Anwendungen seine Bewegtbildsequenzen mit einer verminderten Qualität schon während der Erstellungsphase begutachten. Anschließend schickt er die Videobänder zur Kompression nach dem PLV-Modus ein und erhält dann eine mit höherer Qualität komprimierte Bewegtbildsequenz. Heute wird RTV auch im Dialog-Modus wie px64 eingesetzt [25].

DVI definiert eine Audio- und Einzelbildkompression mit sehr guter Qualität. Bei Einzelbildern wird eine bestimmte Parametrisierung des JPEG-Formates unterstützt. Die Videoqualität im PLV-Modus ist sehr gut, der RTV-Modus ist gut und für die meisten Anwendungen durchaus überzeugend. Auf Grund der Standardisierung (von H.261, JPEG und MPEG) und der Forderung nach austauschbaren Formaten ist zu erwarten, daß in Zukunft auch hier eine Kompatibilität als Teil von RTV oder PLV angestrebt wird.

Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurden aus den bestehenden Bereichen verteilter Multimedia-Anwendungen die Anforderungen an das Kommunikationssystem und an die Kompressionsverfahren abgeleitet. Kompressionsverfahren sind beim Einsatz von Hochgeschwindigkeitsnetzen notwendig, um den gleichzeitigen Datentransfer mehrerer unterschiedlicher Audio- und Video-Datenströme zu ermöglichen. Die in verteilten Multimedia-Systemen wichtigen Video-Kompressionsverfahren (JPEG, H.261, MPEG und DVI) stellen alle eine Kombination vieler bekannter Algorithmen dar. Sie sind jedoch keine zueinander alternativ dastehenden Verfahren, die Zielsetzungen der einzelnen Entwicklungen sind unterschiedlich und zum Teil komplementär, obwohl die meisten verwendeten Algorithmen sehr ähnlich sind. Zur Kodierung von Audio-Daten existiert eine Menge weiterer Entwicklungen, die hier nicht im Detail aufgezeigt wurden. Diese Verfahren entstanden meistens in einem anderen Kontext – wie dem Mobilfunkbereich –, sie sollten aber auch Einsatz in Multimedia-Systemen finden. Sowohl die erzielbare Audio- und Video-Qualität in Abhängigkeit des Kompressionsfaktors als auch die Verfügbarkeit auf dem Markt bestimmen die in zukünftigen Multimedia-Systemen zu verwendenden Verfahren. Dies wird nach Meinung des Autors zu einer „Kooperation“ und „Konvergenz“ der Verfahren führen. So könnte ein zukünftiger Multimedia-Rechner bei-

spielsweise Einzelbilder in JPEG generieren, in einer Videokonferenz H.261 verwenden und zum Lesen abgespeicherter Multimedia-Informationen sowohl MPEG-1 als auch DVI-PLV benötigen. Dies bedeutet für die Protokolle in Hochgeschwindigkeitsnetzen, daß die sehr unterschiedlichen Eigenschaften der Datenströme berücksichtigt werden müssen. Leider läßt sich bisher nicht das beste Kompressionsverfahren eindeutig bestimmen, und es besteht von Anwenderseite her eine große Unsicherheit bezüglich der Wahl des jeweiligen Verfahrens. Multimedia-Anwendungen stehen heute nämlich oft in einem engen Zusammenhang mit der verwendeten Kompression, dabei sollte diese Anwendungsentwicklung jedoch möglichst unabhängig von der verwendeten Datenkodierung und -kompression erfolgen. Hierzu dienen die Abstraktionsebenen wie sie u. a. in [36] beschrieben sind.

Bei der Forschung und Entwicklung im Bereich der Kommunikations- und anderen Komponenten eines Multimedia-Systems spielt die Kompression oft eine wichtige Rolle, die bisher nicht genügend beachtet wurde. Dies führt dazu, daß zum Beispiel auf der einen Seite die Daten unabhängig von den Eigenschaften des Übertragungskanals (ggf. werden nur die optischen Speichermedien betrachtet) komprimiert werden und auf der anderen Seite -ohne Kenntnis der Dateninhalte- über Fehlerkorrekturverfahren eine Redundanz hinzugefügt wird. Die Integration mit Kommunikationskomponenten zur Definition der Fehlerbehandlung und der Möglichkeit einer Skalierung erfordert, neben der Einstellung der Datenrate, eine Parametrisierung der Kompression bezüglich der Anzahl von Referenzbildern in einem solchen Datenstrom. Verteilte Anwendungen können sich damit sehr schnell auf einen bestehenden Audio- oder Videostrom aufschalten. Diese exemplarische abschließende Betrachtung verdeutlicht, daß Hochgeschwindigkeitsnetze und Protokolle zwar eine Voraussetzung für einen breiten Einsatz von Multimedia-Anwendungen sind, aber eine Reihe weiterer in diesem Beitrag betrachteter Merkmale existieren, die von einem solchen Netz und den Kommunikationsprotokollen erfüllt werden müssen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Kollegen, die in den verschiedensten Multimedia-Kommunikations- und Anwendungsprojekten in Heidelberg tätig sind. Außerdem haben vielfältige wertvolle Kommentare von Herrn Prof. Eberspächer wesentlich zu der vorliegenden Arbeit beigetragen. Vielen Dank.

Literaturverzeichnis

- [1] *Communications of the ACM, Special Section on Digital Multimedia Systems*, vol.34, no 4, April 1991.
- [2] *Heinrich Armbrüster; Applications of Future Broad-Band Services in the Office and Home*. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, vol.4 no.4, Jul. 1986, pp. 429-437.
- [3] *Heinrich Armbrüster. Weiterentwicklung der Telekommunikation: Universalnetz Breitband-ISDN*. ntz, vol.40, No.8, 1987, pp. 564-569.
- [4] *Heinrich Armbrüster, Hans Jörg Rothamel; Breitbandanwendungen und -dienste: Qualitative und quantitative Anforderungen an künftige Netze*; ntz, Bd. 43, Heft 3, 1990, pp. 150-159.
- [5] *The International Telegraph and Telephone Consultative Committee; I.121 Broadband Aspects of ISDN; Integrated Services Digital Network - General Structure and Service Capabilities*, Blue Book, Volume III - Facsicle III.7, Melbourne Nov. 1988. pp 34-61.
- [6] *The International Telegraph and Telephone Consultative Committee; Broadband Aspects of ISDN*; CCITT Study Group XVIII Recommendation I.121, Temporary Document 49, 1988.
- [7] *International Telegraph and Telephone Consultative Committee; B-ISDN Service Aspects*; CCITT Study Group XVIII, Draft Recommendation I.211, Geneva. 23-25 May 1990.

- [8] *Andreas Cramer, Manny Farber, Brain McKellar Ralf Steinmetz; Experiences with the Heidelberg Multimedia Communication System: Multicast, Rate Enforcement and Performance*; European High Performance Workshop (ehpn'92), Liege, Belgium, December 1992.
- [9] *Warren E. Falconer, John A. Hooke; Telecommunication services in the Next Decade*. Proceedings of the IEEE, vol.74, no.9, Sept. 1986, pp.1246-1261.
- [10] *Cesar Gonzales, Eric Viscito; Flexible Scalable Digital Video Coding*; submitted to Image Communication.
- [11] *Kevin Harney, Mike Keith, Gary Lavelle, Lawrence D. Ryan, Daniel J. Stark; The i750 Video processor: A Total Multimedia Solution*; Communications of the ACM, vol.34, no.4, April 1991, pp.64-78.
- [12] *Ralf Guido Herrtwich, Ralf Steinmetz; Towards Integrated Multimedia Systems: Why and How*; IBM ENC Technical Report no.43.9101, March 1991.
- [13] *Dietmar Hehmann, Michael Salmony, Heinrich Stüttgen; Transport Services for Multimedia Applications*; Proceedings of the IFIP WG 6.1/WG 6.4 Workshop on Protocols for High Speed Networks, North Holland, 1989, 303-321
- [14] *G. Hudson, H. Yasuda, and I. Sebestyen; The International Standardization of a Still Picture Compression Technique*; Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference, November 1988, pp. 1016-1021.
- [15] *ISO IEC JTC 1; Information Technology - Digital Compression and Coding of Continuous-Tone still Images -*; Draft International Standard ISO/IEC DIS 10918, 1992.
- [16] *Didler Le Gall; MPEG: A Video Compression Standard for Multimedia Applications*; Communications of the ACM, vol.34, no.4, April 1991, pp.46-58.
- [17] *Andrew Lippman; Feature Sets for Interactive Images*; Communications of the ACM, vol.34, no.4, April 1991, pp.92-101.
- [18] *A. Leger, J. Mitchell, and Y. Yamazaki; Still Picture Compression Algorithm Evaluated for International Standardization*; Proc of IEEE Global Telecommunications Conference, November 1988, pp.1028-1032.
- [19] *A. Leger, T. Omachi, and G. K. Wallace; JPEG Still Picture Compression Algorithm*; Optical Engineering, Vol. 30, No. 7, July 1991, pp. 947-954.
- [20] *Arch C. Luther. Digital Video in the PC Environment*. Intertext Publications McGraw-Hill Book Company New York.
- [21] *Arch C. Luther; Digital Video In the PC Environment*; Intertext Publications McGraw-Hill Book Company New York, 1991.
- [22] *J. L. Mitchell and W. B. Pennebaker; Evolving JPEG Color Data Compression Standard*; M. Nier, M. E. Courtot (eds.); Standards for Electronic Imaging systems, SPIE Vol. CR37, 1991, pp. 68-97.
- [23] *ISO IEC JTC 1; Information Technology - Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital Storage Media up to about 1.5 Mbit/s*; Draft International Standard ISO/IEC DIS 11172, 1992.
- [24] *ISO IEC JTC 1; Information Technology - Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital Storage Media, Test Model 1*; Draft, MPEG 92/160, May 1992.
- [25] *Harald Müller; Bewegtbildkommunikation über LAN und WAN*; GI+ITG Workshop "Verteilte Multimedia-Systeme" Stuttgart, Februar 1993.
- [26] *A. N. Netravali and B. G. Haskell; Digital Pictures: Representation and Compression*; Plenum Press, New York, 1988.
- [27] *Jakob Nielsen; Hypertext and Hypermedia*; Academic Press, 1990.

- [28] *International Telecommunication Union, the International Telegraph and Telephone Consultative Committee; Line Transmission on non-Telephone Signals: Video Codec for Audiovisual Services at p x 64 kbit/s*; CCITT Recommendation H.261, Geneva, 1990.
- [29] *M. Rabbani and P. Jones; Digital Image Compression Techniques*; Tutorial Texts in Optical Engineering, vol. TT7, SPIE Press, 1991.
- [30] *Kaliappa Ravindran, Ralf Steinmetz; Transport-level Abstractions for Multimedia Systems*; Workshop "ICCC Multimedia Communications '93", Banff, Kanada, April 1993, erste Version in GI + ITG Workshop "Verteilte Multimedia-Systeme" Stuttgart, Februar 1993.
- [31] *G. David Ripley. DVI-A Digital Multimedia Technology*. Communications of the ACM, vol.32, no.7, Jul. 1989, pp.811-822.
- [32] *Michael Salmony. The Potential of Broadband ISDN*. Computer Standards & Interfaces 8, 1988, pp. 15-21.
- [33] *Sharad Singhal, Didier Le Gall, Cheng-Tie Chen; Source Coding of Speech and Video Signals*; Proceedings of the IEEE, Vol.78, No.7, July 1990.
- [34] *Ralf Steinmetz, Johannes Rückert, Wilfried Racke; Multimedia-Systeme*; Informatik Spektrum, Springer Verlag, vol.13, no.5, 1990, pp 280-282.
- [35] *Ralf Steinmetz; Multimedia-Technologie: Grundlagen, Komponenten und Systeme* Springer-Verlag, September 1993.
- [36] *Ralf Steinmetz, Christian Fritzsche; Abstractions for Continuous-Media Programming*; 2nd International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video, Heidelberg, Nov. 18-19, 1991; and in Computer Communications, vol. 15, no. 4, July/August 1992.
- [37] *Ralf Steinmetz, Ralf Guido Herrtwich; Integrierte verteilte Multimedia-Systeme*; Informatik Spektrum, Springer Verlag, vol.14, no.5, October 1991, pp 280-282.
- [38] *Ralf Steinmetz, Thomas Meyer; Modelling Distributed Multimedia Applications*; IEEE Int. WS on Advanced Communications and Applications for HS Networks, München, March 1992, pp.337-349.
- [39] *Yasukazu Terada; High Speed, Broadband Communications and OSI*; North-Holland, Computer Standards & Interfaces 7, 1988, pp. 23-28.
- [40] *Gregory K. Wallace; The JPEG Still Picture Compression Standard*; Communications of the ACM, vol.34, no.4, April 1991. pp.30-44.
- [41] *David J. Wright, Michael To; Telecommunication Applications of the 1990s and their Transport Requirements*; IEEE Network Magazine, vol.4, no.2, March 1990, pp.34-40.
- [42] *G. Wallace, R. Vivian, and H. Poulsen; Subjective Testing Results for Still Picture Compression Algorithms for International Standardization*; Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference, November 1988, pp. 1022-1027.

List of European Networking Center Technical Reports

TR 43.9007	Günter Müller Lothar Mackert	European Networking Center Annual Report 1989
TR 43.9101	Ralf Guido Herrtwich Ralf Steinmetz	Towards Integrated Multimedia Systems: Why and How
TR 43.9102	Dietmar Heilmann Ralf Guido Herrtwich Ralf Steinmetz	Creating HeiTS: Objectives of the Heidelberg High-Speed Transport System
TR 43.9103	Andre Schaff Oliver Festor Jürgen M. Schneider Georg Zörntlein	The Standards Environment for Distributed Transaction Processing (TP): An Overview
TR 43.9104	Kurt Geihs Andreas Mann	ODP Viewpoints of IBCN Service Management
TR 43.9201	Ramesh Nagarajan Carsten Vogt	Guaranteed-Performance Transport of Multimedia Traffic over the Token Ring
TR 43.9202	Martin Bever Ulrich Schäffer	Coding Rules for High Speed Networks
TR 43.9203	Kurt Geihs	The DACNOS Project: A Final Report
TR 43.9204	Brigitte Schott Alexander Clemm Ulf Hollberg	An ISO/OSI based Approach for Modeling Heterogeneous Networks
TR 43.9205	Ralf Guido Herrtwich	Summary of the Second International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video
TR 43.9206	Ralf Guido Herrtwich	TheProjects: Support for Distributed Multimedia Applications
TR 43.9207	Thomas Schütt Emanuel Farber	PASS Graphical Editor User's Guide
TR 43.9208	Thomas Schütt Emanuel Farber	High-Speed Protocol Implementations: An Experience with PASS
TR 43.9209	Olivier Festor Jürgen M. Schneider Georg Zörntlein	Formal Description of the OSI Distributed Transaction Processing Protocol in CRS
TR 43.9211	Jürgen M. Schneider Lothar F. Mackert Ulrich Scheere Udo Bär	About the Integration of ASN.1 into Formal Description Techniques and Programming Languages

TR 43.9212	Andreas Cramer; Manny Farber; Dietmar Hellmann; Christiane Jungius Norbert Luttenberger Frank Markgraf; Brian McKellar; Stefan Mengler; Thomas Meyer, Kurt Reinhardt, Peter Sander; Joehen Sandvoss; Thomas Schütt; Werner Schulz; Werner Steinbeck; Ralf Steinmetz; Heiner Stüttgen; Carsten Vogt;	The Heidelberg Multimedia Communication System: Multicast, Rate Enforcement and Performance on Single User Workstations
TR 43.9213	Carsten Vogt Ralf Herrtwich Ramesh Nagarajan	HeiRAT: The Heidelberg Resource Administration Technique Design Philosophy and Goals
TR 43.9214	Andreas Mauthe Werner Schulz Ralf Steinmetz	Inside the Heidelberg Multimedia Operating System Support: Real-Time Processing of Continuous Media in OS/2
TR 43.9215	Emanuel Farber Thomas Schütt	The Heidelberg High Speed Transport System: First Performance Results
TR 43.9301	R. Oechsle M. Graf	The Internet Protocol Family over ATM
TR 43.9302	Luca Delgrossi Frank O. Hoffmann	A Detailed Tour of ST-II for the Heidelberg Transport System
TR 43.9303	Luca Delgrossi Ralf G. Herrtwich Frank O. Hoffmann	An Implementation of ST-II for the Heidelberg Transport System
TR 43.9304	Derick Jordaan Martin Paterok Carsten Vogt	Layered Quality of Service Management in Heterogeneous Networks
TR 43.9305	L. Delgrossi; Ch. Halstrick D. Hellmann; R. Herrtwich O. Krone; J. Sandvoss; C. Vogt	Media Scaling for Audiovisual Communication with the Heidelberg Transport System
TR 43.9306	Barbara Twachtmann Ralf G. Herrtwich	Multicast in the Heidelberg Transport System
TR 43.9307	R. Steinmetz	Compression Techniques in Multimedia Systems: A Survey
TR 43.9308	Martin Bever Ulrich Schäffer Claus Schottmüller	ISO OSI FTAM and High Speed File Transfer: No Contradiction
TR 43.9309	Ralf Steinmetz	Videodatenkompression für verteilte Multimedia-Anwendungen