Bandbreitenflexibilität für Benutzer und Betreiber von ATM-Netzen

Johannes Wissing und Firoz Kaderali, Hagen

1. Entwicklungen auf dem Weg zu ATM-basierenden Breitbandnetzen

Die Evolution der Kommunikationstechnik war lange Zeit geprägt von parallel existierenden und sich getrennt entwickelnden Technologien, Netzen und Diensten. Gleichzeitig bestand der Wunsch nach einer Vereinheitlichung, um die Anzahl der Schnittstellen zwischen Netzübergängen zu reduzieren, um Synergieeffekte, beispielsweise im Endgerätebereich, zu nutzen und um Kosten zu sparen.
Einer der wichtigsten Schritte auf dem Weg zu einem universellen Netz war die Digitalisierung der Sprachkommunikation. Es folgte mit dem ISDN-Gedanken die Integration von Diensten und Netzen auf Basis einer einheitlichen Benutzer-Netz-Schnittstelle. Einen anderen Integrationsprozeß stellte die Entwicklung der hierarchischen Zeitmultiplexsysteme und ihre Standardisierung innerhalb der Synchronen Digitalen Hierarchie (SDH) dar, die mehrere bestehende übertragungstechnische Standards auf einer einheitlichen Plattform zusammenfaßt. SDH basiert auf der Zeitmultiplextechnik und einer definierten Kanalstruktur.

Angesichts der Verschiedenartigkeit der Anwendungen im Bereich der Breitbandkommunikation und aufgrund der Schwierigkeiten, den Bandbreitebedarf zu prognostizieren, erschienen Konzepte mit festen Kanalstrukturen wenig geeignet. Es galt, die unterschiedlichsten Anwendungen zu integrieren, von Echtzeitanwendungen mit konstanter Datenrate bis hin zu Anwendungen mit stark schwankenden, verzögerungstoleranten Datenströmen.

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Nachfrage nach neuen Möglichkeiten zur schnellen Datenübertragung und Breitbandkommunikation für Echtzeitanwendungen wurden in den 80er Jahren verschiedene Konzepte untersucht, um die Nachteile der verschiedenen Übertragungs- und Vermittlungsverfahren zu überwinden. Entscheidende Beiträge zu diesem Entwicklungsprozeß kamen aus den USA [Kirt87], [Turn83] und Frankreich [Coud86], [Gone86]. Bei Bell Labs entstanden Anfang der 80er Jahre Konzepte und Technologien für eine Schnelle Paketvermittlungstechnik (FPS, *Fast Packet Switching*) während im CNET eine "intelligente" Zeitmultiplextechnik, die ATD-Technologie (*Asynchronous Time Division*) entwickelt wurde. FPS zielte vor allem auf die schnelle Datenkommunikation, während mit ATD die Integration von Datenkommunikation und Echtzeitanwendungen (HiFi-Audio) erprobt wurde. Beide Ansätze gelten als gemeinsame Vorläufer der ATM-Technologie.

2 Asynchroner Transfer Modus

2.1 Breitband-ISDN und ATM

Unter dem Begriff *Broadband ISDN* begannen in den 80er Jahren beim CCITT (heute: ITU-T) Standardisierungsarbeiten mit dem Ziel der Fortschreibung und Ergänzung der bestehenden ISDN-Standards für breitbandige Dienste. Gemäß dem ISDN-Prinzip, unterschiedliche Dienste über nur einen Netzzugang mit einheitlicher Schnittstelle zwischen Benutzer und Netzbetreiber abzuwickeln, konzentrierten sich die

Standardisierungsaktivitäten für das Breitband-ISDN (B-ISDN) auf die *User Network Interface* (UNI). Die Prinzipien der Integration von Audio- Video- und Datendiensten, die bereits dem Schmalband-ISDN zugrunde liegen, wurden in entsprechender Weise auf das Breitband-ISDN übertragen und in Grundzügen im *Blue Book* des CCITT (1988) festgelegt. Gleichzeitig wurde der Asynchrone Transfer Modus als Basis des B-ISDN empfohlen. Diese Entscheidung hat die stürmische Entwicklung des ATM stark begünstigt, wenngleich zum damaligen Zeitpunkt noch wichtige Festlegungen, z.B. die Größe und Struktur der ATM-Zelle, offen blieben.

Technologische Innovationen bei Speicherbausteinen und Prozessoren führten dazu, daß die Leistungsfähigkeit der Endsysteme stark zunahm. Der Preisverfall bei Komponenten und Systemen begünstigte gleichzeitig die weite Verbreitung der neuen Technologien und damit den wachsenden Bedarf nach schnellen Weitverkehrsverbindungen. Kommunikationsanwendungen mit hochauflösenden Grafiken, Bildern, HiFi-Audio und Video stellten hohe Anforderungen an die Übertragungskapazität, die die Grenzen der Leistungsfähigkeit des 64 kbit/s-ISDN aufzeigten. Diese Entwicklung deutete sich bereits während der CCITT-Studienperiode 1984-1988 an und es war offensichtlich, daß auch der Normungsprozeß in der Telekommunikation dem Bedarf entsprechend beschleunigt werden mußte. Während mit der Empfehlung I.121 im Jahre 1988 lediglich ein grober Rahmen abgesteckt wurde, entstanden, nach Maßgabe eines schnelleren Abstimmungsverfahrens, in den folgenden 2 Jahren 13 Normen zum ATM, die 1991 in Genf und 1993 in Helsinki erweitert und ergänzt wurden.

Einen besonderen Impuls erhielt die ATM-Entwicklung mit der Gründung des ATM Forums im Oktober 1991. Dieser Zusammenschluß von Firmen und Institutionen entstand mit der Zielsetzung, die Entwicklung im Bereich ATM-basierender Produkte und Dienste zu forcieren sowie die herstellerübergreifende Interoperabilität sicherzustellen und zu demonstrieren. Bereits nach einem Jahr zählte das ATM Forum 150 Mitglieder, darunter Hersteller, Anwender und Forschungseinrichtungen [Samm92]. Die Mitgliederzahl wuchs inzwischen auf mehr als 600 Unternehmen und Institutionen. Das ATM Forum versteht sich nicht als Normungsgremium, sondern arbeitet im Vorfeld der Standardisierung an Spezifikationen. Aufgrund der großen Mitgliederzahl des ATM Forums und ihrer Gewichtigkeit sind die veröffentlichten Spezifikationen allerdings bereits De-Facto-Standards. Die "*ATM User-Network Interface Specification*", die über die bisherigen Empfehlungen der ITU-T weit hinausgeht, hat praktisch die Bedeutung eines offenen Standards.

2.2 ATM-Übermittlungsprinzip

ATM ist ein paketorientiertes Übermittlungsverfahren auf Basis virtueller Verbindungen. In der folgenden kurzen Einführung wird zunächst der Aspekt "paketorientierte Übermittlung" erläutert und anschließend das Prinzip der "virtuellen Verbindungen" im ATM betrachtet.

Paketorientierte Übermittlung

Die Pakete im ATM haben eine feste Länge von 53 Bytes und werden als ATM-Zellen oder kurz Zellen bezeichnet. Das Absenden, Weiterleiten und Empfangen von Zellen erfolgt vom Prinzip her nach keinem festen Zeitraster sondern asynchron. Der

Zellentransport ist an kein bestimmtes physikalisches Übertragungsverfahren oder Multiplexsystem gebunden. Im sogenannten "reinen ATM" werden ATM-Zellen bitseriell und "lückenlos" übertragen. Häufig werden ATM-Zellen in Datenformate bestehender Übertragungssysteme eingebettet. Ein Beispiel ist der STM-1 Rahmen der Synchronen Digitalen Hierarchie (SDH) mit seiner Brutto-Übertragungskapazität von 155.520 Mbit/s, wovon 149.760 Mbit/s für den Zellentransport zur Verfügung stehen [I432-94]. Bild 1 zeigt den Ausschnitt einer Übertragungsstrecke und die bitserielle, "lückenlose" Übertragung von Leerzellen und Nutzzellen. Jede Zelle besteht aus einem Zellkopf (5 Bytes) und einem Informationsfeld (48 Bytes). Der Zellkopf (Header) enthält Informationen zur Identifikation des Zelltyps (z.B. Leerzellen, Nutzzellen, Zellen für bestimmte Steuerungs- oder Überwachungsaufgaben) sowie eine Verbindungskennzeichnung, die gleichzeitig der Adressierung der Zellen dient.

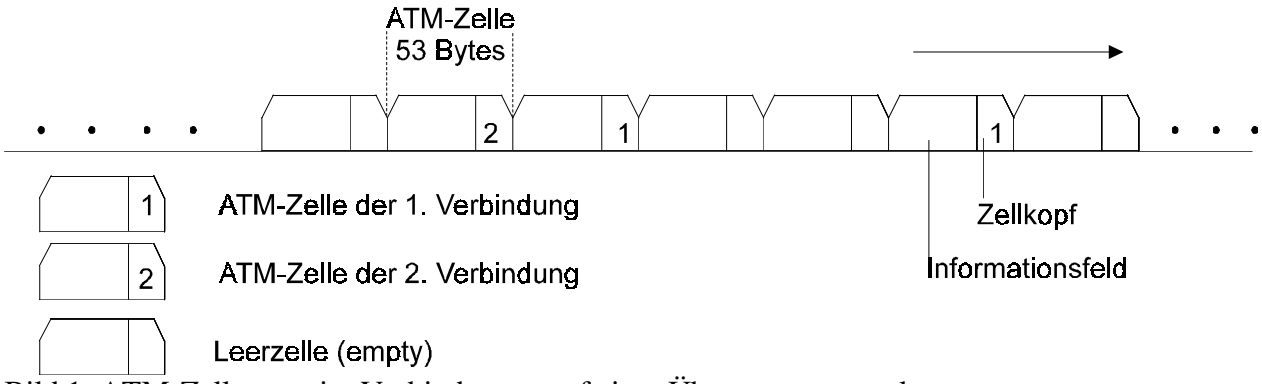

Bild 1: ATM-Zellen zweier Verbindungen auf einer Übertragungsstrecke.

Am Anfang der Übertragungsstrecke werden die Datenströme der beiden Verbindungen 1 und 2 Zelle für Zelle auf dem physikalischen Übertragungsmedium zusammengeführt (Multiplexen). Die Überlagerung mehrerer asynchroner Datenströme bezeichnet man als asynchrones Multiplexen oder auch statistisches Multiplexen. Bei mehreren gleichzeitig eintreffenden Übertragungswünschen erfolgt eine Pufferung und Abarbeitung des Zellenspeichers nach dem Prinzip *First In First Out* (FIFO). Bei leerem Zellenspeicher werden zur Unterstützung der Synchronisation sogenannte Leerzellen (ohne Nutzinformation) übertragen.

Virtuelle Verbindungen

Die Zellenübertragung im ATM ist stets verbindungsorientiert. Vor Beginn der Übertragung erfolgt ein Verbindungsaufbau, wobei ein physikalischer Weg zwischen Quelle und Ziel der ATM-Verbindung ermittelt wird. In jedem betroffenen Netzknoten erfolgt eine Registrierung der neuen Verbindung durch einen Tabelleneintrag von Adreßwerten für die kommende und gehende Übertragungsstrecke. Nach erfolgreichem Verbindungsaufbau sendet die Quelle Zellen an den ersten Netzknoten. Die Verbindungskennzeichnung der Zellen wird identifiziert und für die Weiterleitung an den nächsten Netzknoten umgewertet. Das Adreßfeld im Zellkopf wird dabei mit der Verbindungskennzeichnung der gehenden Übertragungsstrecke überschrieben. Auf diese Weise gelangen alle Zellen der betreffenden Verbindung über denselben physikalischen Weg zum Ziel. Da diese Verbindungen rein logischer Art und zunächst unabhängig von einer Reservierung von Übertragungskapazitäten sind, spricht man von virtuellen Verbindungen.

Die Adresse im Zellkopf besteht aus zwei Komponenten, dem *Virtual Path Identifier* (VPI) und dem *Virtual Channel Identifier* (VCI). Die Adreßumwertung in den Netzknoten kann sich auf beide Komponenten erstrecken oder sich allein auf den VPI beschränken, der VCI bleibt in diesem Fall bei der Adreßumwertung unverändert. Diese zunächst nur formale Unterscheidung hat große praktische Bedeutung für den Netzbetrieb.

Bild 2 zeigt einen Abschnitt eines physikalischen Übertragungsweges. Jeweils mehrere virtuelle Verbindungen (VC) gehören zu einem virtuellen Pfad (VP), so daß dieser einem Leitungsbündel ähnelt. Zwischen den Endpunkten eines virtuellen Pfades werden alle zugehörigen virtuellen Verbindungen über den gleichen physikalischen Weg geführt. In den dazwischen liegenden Netzknoten erfolgt eine Umwertung des VPI, die VCI-Werte bleiben unverändert (Bilder 3 und 4).

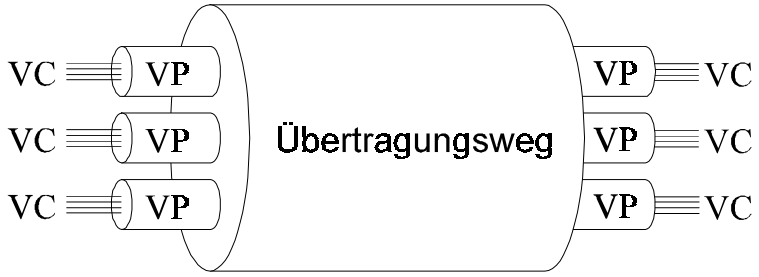

Bild 2: Übertragungsweg mit virtuellen Pfaden (VP) und virtuellen Verbindungen (VC).

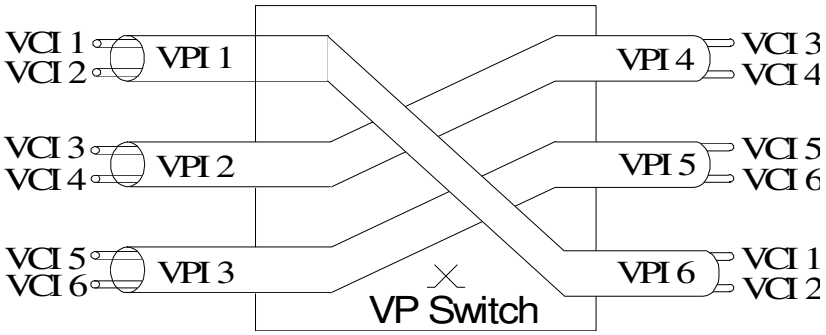

Bild 3: VP-Switching

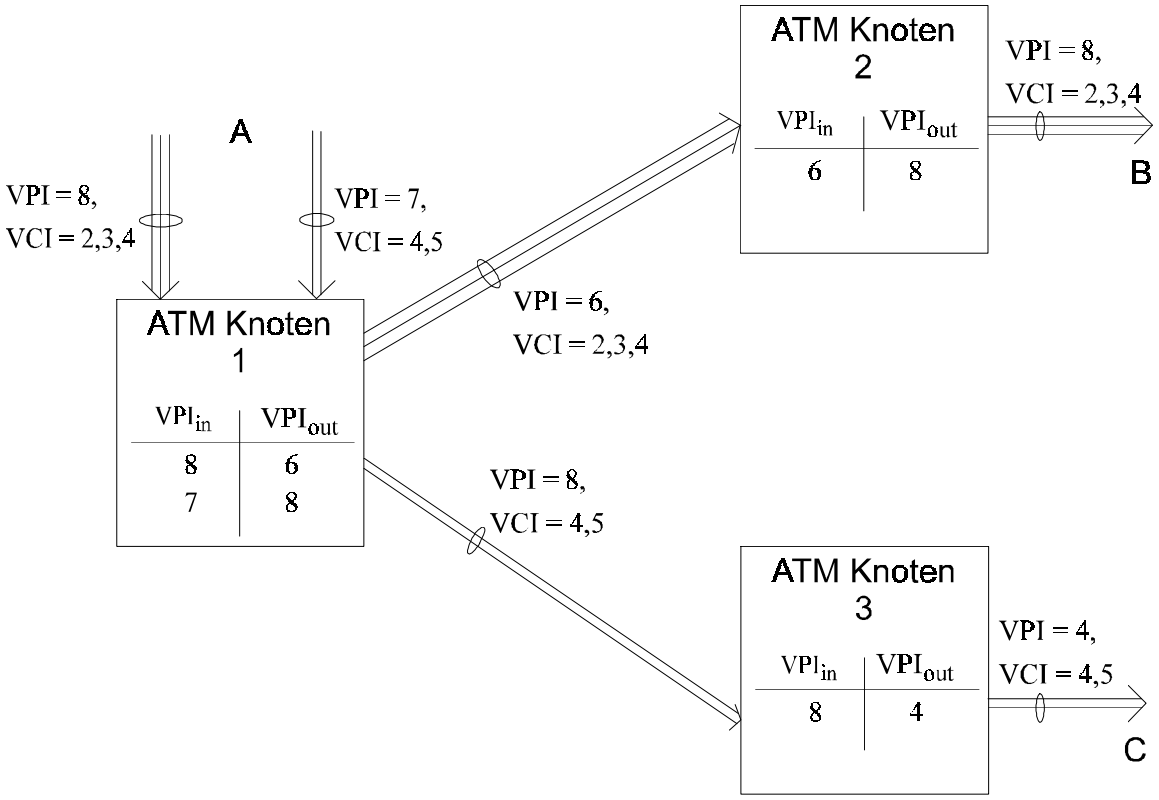

Bild 4: Adreßumwertung beim VP-Switching

Der Vorteil einer VPI-bezogenen Vermittlung liegt zunächst darin, daß nur ein Teil der Adresse des Zellkopfs betrachtet wird und der Aufwand in der Verwaltung der Verbindungen und bei der Umwertung gegenüber der VPI/VCI-bezogenen Vermittlung geringer ist. Ein entscheidender Vorteil der virtuellen Pfade besteht in ihrer Bündelungseigenschaft. Auf häufig frequentierten Streckenabschnitten bietet sich die Einrichtung von virtuellen Pfaden an. Dies hat den Vorteil, daß beim Auf- und Abbau von virtuellen Verbindungen (VCC), die über diese Pfade gehen, die zugehörigen Netzknoten nicht involviert werden und sich somit der Aufwand beim Verbindungsaufbau reduziert. Dies wird besonders im Fall eines virtuellen Pfades zwischen Quelle und Ziel deutlich: Der Netzbetreiber richtet zwischen Quelle und Ziel einen (semipermanenten) virtuellen Pfad ein. Der anschließende Aufbau von virtuellen Verbindungen und die Verwaltung der VCI-Werte bleiben dem Benutzer überlassen. Im Unterschied zu physikalischen Leitungsbündeln ist mit der Einrichtung eines virtuellen Pfades nicht notwendig eine Reservierung von Betriebsmitteln (Bandbreite, Verarbeitungskapazitäten) verbunden. Ein virtueller Pfad zwischen Quelle und Ziel kann zunächst ohne eine Bandbreitenreservierung eingerichtet werden. Beim Aufbau und Abbau der virtuellen Verbindungen (VCC) wird Bandbreite angemeldet bzw. eine Anmeldung aktualisiert. Des weiteren besteht die Möglichkeit, die Bandbreitenreservierung für bestehende VCC dynamisch anzupassen.

2.3 ATM-Standards

ATM-Zellstruktur

Im Vergleich zu anderen paketorientierten Übertragungs- und Vermittlungsverfahren ist ATM durch relativ kleine Pakete fester Länge gekennzeichnet. Der Zellkopf beansprucht gut ein Zehntel der Übertragungskapazität (5/53), ein im Vergleich zu den konventionellen Paketvermittlungsverfahren relativ großer Overhead-Anteil. Die Festlegung der Informationsfeldgröße auf 48 Byte ist das Resultat eines Kompromisses: Der Forderung nach einem hohen Nutzdatenfeld stand die große Paketierverzögerung entgegen. Beispielsweise beträgt bei einer 64kbit/s-Sprachübertragung die Zeit zum vollständigen Füllen des 48-Byte Informationsfeldes $(48 \cdot 8\text{bit}/64\text{kbit})\text{s} = 6\text{ms}$. Es besteht somit die grundsätzliche Schwierigkeit, mit nur einem Zellformat die gegensätzlichen Forderungen der Daten- und Sprachkommunikation (geringer Overhead vs. geringe Paketierverzögerung) befriedigend zu erfüllen. Der Kompromiß bei der Festlegung der Informationsfeldlänge auf den Wert 48 Byte ergab sich schließlich als Mittelwert zwischen den beiden zuletzt diskutierten Alternativen 32 Byte und 64 Byte [Minz89].
Die Struktur des Zellkopfs unterscheidet sich an der Teilnehmer-Netz-Schnittstelle UNI geringfügig vom Format an der Netz-Netz-Schnittstelle NNI (Bild 5). An der UNI kann das 4-Bit-Feld GFC zum Beispiel für Flußkontrollfunktionen in einem ATM-basierenden Teilnehmerbereich verwendet werden. Auch nicht auf ATM-basierende Medienzugriffsverfahren, deren Datenformate sich an das der ATM-Zelle anlehnen, benutzen das GFC-Feld für Steuerungszwecke (z.B. DQDB [DePr94]).
Aus dem Wegfall des GFC-Feldes im ATM-Netz (NNI) resultiert ein um 4 Bit auf 28 Bit vergrößerter Adreßraum (VPI+VCI).
Das Feld *Payload Type* (PT) dient zur Unterscheidung von Zelltypen. Eine Nutzungsmöglichkeit, besteht darin, spezielle Zellen für verbindungsbezogenes, dynamisches Bandbreitenmanagement zu verwenden. Für solche *Resource Management Cells* (RM-cells) wurde der Payload Type 110_{bin} reserviert. Andere Zelltypen sind initialen Signalisierungsaufgaben vorbehalten (Meta-Signalisierung) oder dienen Verwaltungs- und Wartungszwecken (u.a. in Verbindung mit speziellen VCI-Werten). Auch Möglichkeiten für anwendungsspezifische Signalisierung werden durch den Payload Type unterstützt.

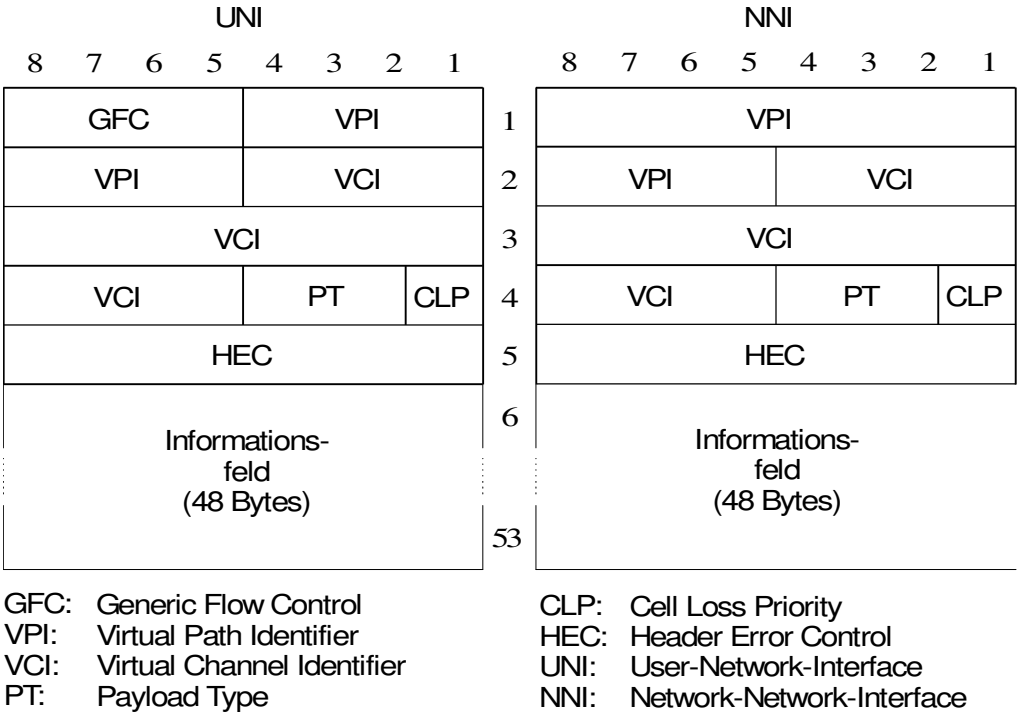

Bild 5: ATM-Zellformate an der Teilnehmer-Netz-Schnittstelle UNI und der Netz-Netz-Schnittstelle NNI.

Das *Cell Loss Priority-Bit* (CLP-Bit) bietet eine einfache Möglichkeit zur Unterscheidung hoch- und niedrigpriorisierter Zellen. Die entsprechende Kennzeichnung wird in der Regel an der Quelle vom Benutzer vorgenommen und in den Netzknoten ausgewertet. CLP=1-Zellen werden in Hochlastsituationen vorrangig verworfen, um den CLP=0-Verkehr zu schützen. Auch der Netzbetreiber kann durch Setzen des CLP-Bits Zellen "markieren", wenn diese gemäß einer Vereinbarung zwischen Benutzer und Netzbetreiber als "überzählig" festgestellt werden.

Das HEC-Feld (*Header Error Check*) erfüllt zwei Aufgaben. Zum einen wird eine CRC-Fehlersicherung des Zellkopfs durchgeführt, die den HEC-Wert einschließt. Gleichzeitig dient der Fehlercode der Zellgrenzenerkennung beim Empfänger. Diese arbeitet in Grundzügen wie folgt: Der Datenstrom wird, wie in Bild 1 angedeutet, bitseriell übertragen und empfangen. Beim Empfänger erfolgt zunächst bitsynchron und fortlaufend die HEC-Berechnung und Überprüfung eines gleitenden 5-Byte-Fensters bis Übereinstimmung festgestellt und damit die Zellgrenze erkannt wird. Die HEC-Überprüfung wird anschließend Zelle für Zelle fortgesetzt. Der genaue Ablauf und das Verhalten bei Fehlinterpretationen durch zufällige Übereinstimmungen regelt ein Zustandsdiagramm [DePr94].
Die Prozeduren mit Bezug auf Datenstrukturen des Informationsfeldes gehören im engeren Sinne nicht zu den ATM-Funktionen. Die verschiedenen übergeordneten Protokolle, die das Informationsfeld der ATM-Zelle als "Transporteinheit" nutzen, sind jedoch wichtige Bestandteile der Schnittstellenstandards.

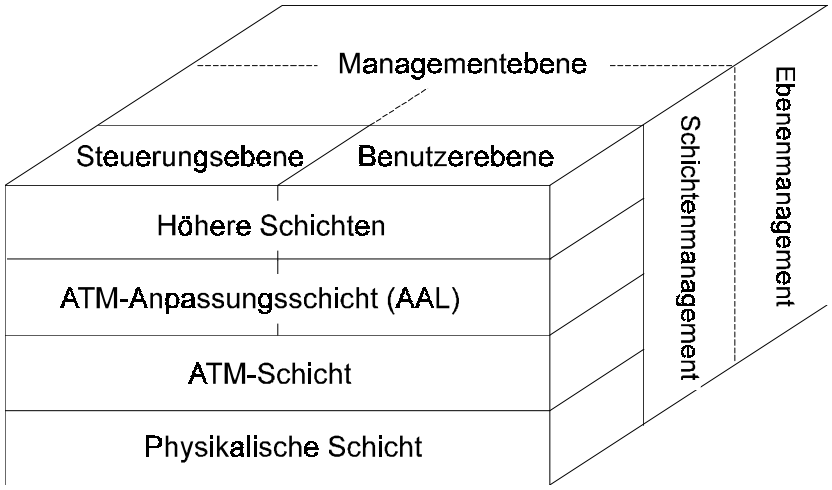

Bild 6: ATM-Protokoll-Referenzmodell

Das Protokoll-Referenzmodell unterscheidet Schichten und Ebenen. Die Darstellung in Bild 6 deutet an, daß die Funktionen in der ATM-Anpassungsschicht und den höheren Schichten nach Steuerungsebene und Benutzerebene unterschieden werden, während die ATM-Schicht (und die Physikalische Schicht) ihre Funktionen beiden Ebenen gleichermaßen anbietet.
Die Physikalische Schicht ist die Schnittstelle zum Übertragungsmedium. Die Standards legen fest, in welcher Form ATM-Zellen übertragen werden. Ein Beispiel ist der bereits erwähnte STM-1-Übertragungsrahmen.
Die ATM-Schicht enthält die zentralen Übermittlungsfunktionen, das Zusammenführen von Zellströmen (*Multiplexing*), die VPI/VCI-Umwertung und Vermittlung (*Switching*) sowie das Teilen von Zellströmen (*Demultiplexing*). Hinzu kommen verbindungsbezogene Protokollfunktionen und Dienste der ATM-Schicht, welche Steuerzellen mit entsprechendem *Payload Type* (PT) verwenden. Beispielsweise werden auf Basis eines Protokolls zur dynamischen Zellratensteuerung *Resource-Management*-Zellen in der ATM-Schicht erzeugt und ausgewertet. Bei bestehender virtueller Verbindung (VCC oder VPC) wird dynamisch, d.h. als Reaktion auf aktuelle Erfordernisse, die Zellrate am Netzzugang gesteuert.
Eine Zusammenstellung der wichtigsten Funktionen und ihre Zuordnung zu den Schichten (bzw. Teilschichten) zeigt Bild 7.

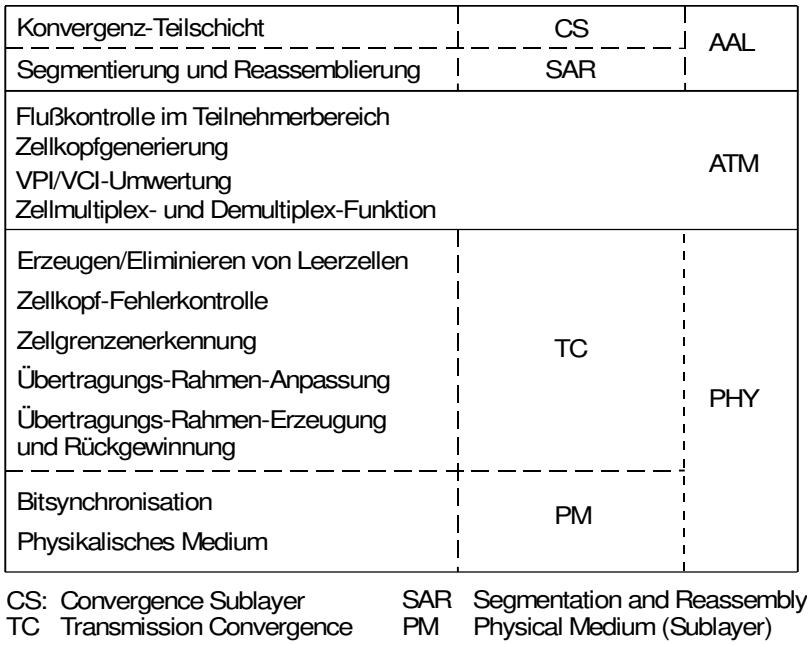

Bild 7: Schichten und Funktionen im ATM

Die ATM-Anpassungsschicht (AAL) bildet die Schnittstelle zu den Formaten und Protokollen der höheren Schichten. Sie besteht aus zwei Teilschichten. Die untere Teilschicht (*Segmentation and Reassembly Sublayer*, SAR) übernimmt die Formatumsetzung, die Zellbildung und -auflösung. Dabei wird nur das Informationsfeld benutzt und ausgewertet. In der oberen Teilschicht (*Convergence Sublayer*, CS) sind verschiedene Formate und Protokollfunktionen definiert, welche die höheren Schichten als AAL-Dienste nutzen. Die ATM-Standardisierung unterscheidet vier Diensteklassen, je nachdem, ob ein Zeitbezug zwischen Quelle und Ziel benötigt wird (Echtzeitdienste), mit variabler oder konstanter Bitrate gesendet wird und ob verbindungsorientiert oder verbindungslos kommuniziert wird. Diesen Diensteklassen entsprechend wurden für die Anpassungsschicht unterschiedliche Protokolle und Formate definiert. Die Diensteklasse A (Echtzeitanforderungen, konstante Bitrate, verbindungsorientiert) wird durch den AAL-Typ 1 abgedeckt. Der AAL-Typ 2 entspricht den Anforderungen der Dienstklasse B, die sich von der Klasse A durch die variable Bitrate unterscheidet (Bild 8).

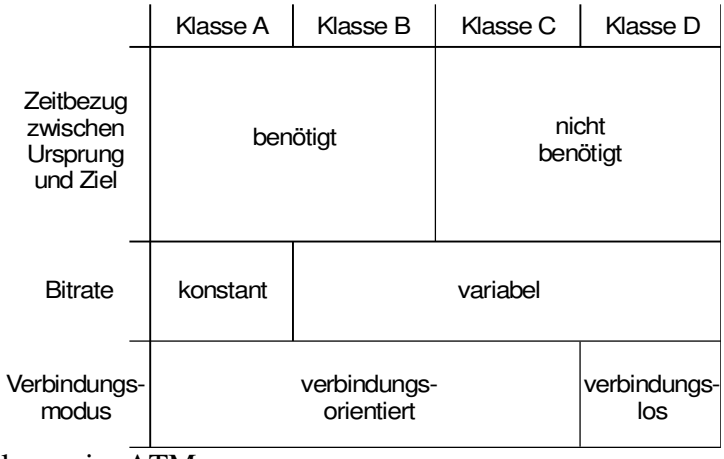

Bild 8: Diensteklassen im ATM

Für die beiden Dienstklassen C und D wurden entsprechend die AAL-Typen 3 und 4 geschaffen, wobei sich eine Zusammenfassung beider Typen unter der Bezeichnung AAL3/4 durchsetzte. Bei der Verwendung des AAL-Typs 3/4 werden 4 Byte des Informationsfelds für AAL-spezifische Steuerungsaufgaben verwendet, um unter anderem eine Multiplexbildung auf der Anpassungsschicht zu unterstützen und um Zellverlust (über eine zyklische Numerierung) festzustellen. Diese Zellverlustkontrolle erscheint allerdings unnötig, wenn in höheren Schichten bereits Overhead für entsprechende Überwachungsfunktionen eingefügt wurde. Dies betrifft vor allem Szenarien mit bestehenden Protokollen, die auf ATM aufsetzen. Ein Beispiel ist das Internet Protocol IP und die Initiative "IP over ATM" im Umfeld des ATM Forums. Es entstand die Spezifikation für einen AAL-Typ 5, bei der das Informationsfeld der ATM-Zelle voll genutzt wird. Die Zellverlustkontrolle entfällt hierbei auf der Anpassungsschicht, ebenso wie die Multiplexfunktion.

3. Bitratenvariabilität im ATM

3.1 Ebenenmodell und Bitratenvariabilität

Die Bitratenvariabilität ist eine Eigenschaft des Asynchronen Transfer Modus, die maßgeblich zur Wahl des ATM als Übermittlungsverfahren für das Breitband-ISDN beitrug. Variable Bitraten entsprechen im ATM variablen Zellraten. Für burstartige Datenströme mit ON-OFF-Charakteristik eignet sich die Beschreibung der Bitratenvariabilität auf der Verbindungsebene, der Burst-Ebene und der Zellebene (Bild 9). Dieses Ebenenmodell unterscheidet nach der zeitlichen Größenordnung von "Aktivitätsphasen". Die Aktivitätsphase der Verbindungsebene entspricht der Verbindungsdauer. Die Burst-Ebene unterscheidet Aktivitätsphasen (ON-Phasen), in denen Zellen mit Spitzenzellrate gesendet werden und Pausenzeiten (OFF-Phasen). Auf der Zellebene interessieren die Zwischenankunftzeiten der einzelnen Zellen.
Die Bitratenvariabilität auf der Zellebene resultiert aus der Eigenschaft des ATM, daß Zellankünfte nicht determiniert und Zwischenankunftszeiten im allgemeinen variabel sind. Beim CBR-Dienst (*Constant Bit Rate Service*) sind Schwankungen der Zwischenankünfte definitionsgemäß sehr gering, können aber dennoch Einfluß auf die Qualität der zeitsensitiven Dienste haben. Bei der Echtzeitübertragung von Sprache können verspätet eintreffende Zellen unter Umständen nicht mehr genutzt werden.

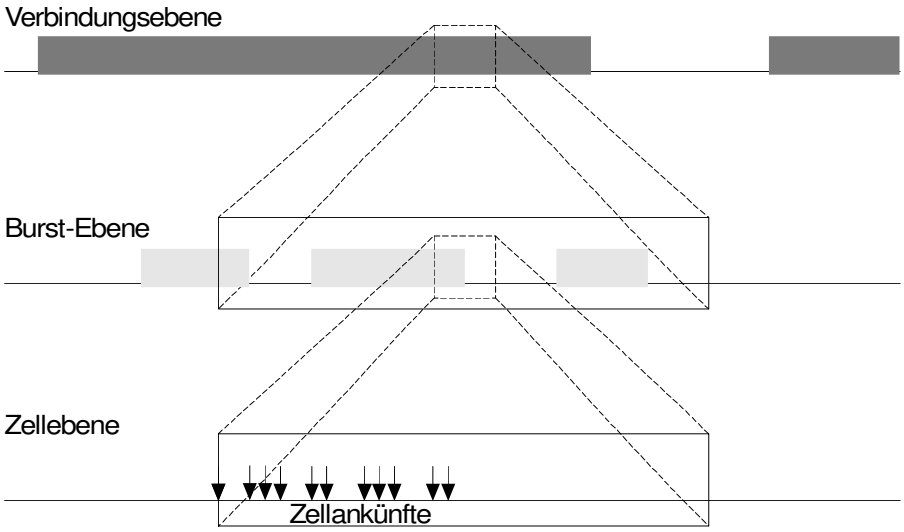

Bild 9: Aktivitätsebenen asynchroner Zelldatenströme

Auf der Verbindungsebene besteht die Möglichkeit, eine Zellrate frei auszuwählen und verbindungsbezogen anzumelden, beispielsweise im Rahmen eines Dienstes mit konstanter Bitrate (*Constant Bit Rate Service*, CBR). Einschränkungen bestehen durch die Grenzen der physikalischen Übertragungskapazität am ATM-Netzzugang und durch die feste Zellraten-Granularität. Der Benutzer hat somit die Möglichkeit, eine Zellrate den Erfordernissen der Anwendungen gemäß beim Netzbetreiber anzumelden und zu nutzen.

Auf der Burst-Ebene kommt ein zweiter Aspekt der Bitratenvariabilität hinzu, der sich direkt aus der asynchronen Übermittlung ergibt: Das Senden, Weiterleiten und Empfangen der Zellen kann mit variabler Rate erfolgen. Die prinzipielle Einschränkung der Variabilität besteht darin, daß die auf der Verbindungsebene vereinbarte Spitzenzellrate nicht überschritten werden darf. Der Vorteil für den Benutzer ergibt sich bei bitratenvariablen Anwendungen, wenn die variable Bandbreitenutzung kostengünstiger ist als der CBR-Dienst mit gleicher Spitzenzellrate. Für den Netzbetreiber besteht die Möglichkeit, bei der Übertragung bitratenvariabler Datenströme die Vorteile des Statistischen Multiplexens zu nutzen.

3.2 Statistisches Multiplexen

Beim statistischem Multiplexen teilen sich mehrere Datenströme Netzressourcen auf statistischer Basis, wobei für jeden Datenstrom mindestens die im Mittel benötigte Bandbreite (Zellrate) garantiert wird. Im Rahmen des *Variable Bit Rate Service* (VBR) erfolgt für jede Verbindung mindestens die Reservierung der *Sustainable Cell Rate*, SCR. Dabei handelt es sich um die geschätzte mittlere Zellrate, die vom Benutzer als Verkehrsparameter beim Verbindungsaufbau angegeben wird. Die in einem Netzknoten mindestens benötigte Übertragungskapazität ergibt sich aus der Summe aller SCR-Werte der überlagerten Datenströme. Darüber hinaus wird in der Regel zusätzliche Übertragungskapazität reserviert, um Zellratenschwankungen zu berücksichtigen. Zellratenschwankungen, bei denen die Übertragungskapazität bzw. die zugeteilte nutzbare Zellrate überschritten wird, werden durch Pufferung aufgefangen. Überschreitet

die aktuelle Zellrate eines einzelnen Datenstroms zeitweilig den Wert SCR, entsteht für diese Verbindung ein wachsender *Überhang* an Zellen, der durch Unterschreiten der SCR wieder abgebaut wird.
Beim statistischen Multiplexen wird weniger Übertragungkapazität reserviert, als der Summe der überlagerten Spitzenzellraten (*Peak Cell Rates*, PCR) entspricht. Daher kann der Fall auftreten, daß durch Zellratenschankungen die Übertragungskapazität erschöpft wird, der überschießende Anteil der Zellen nicht vollständig aufgefangen wird und somit Zellverlust auftritt. Mit der Zahl der unabhängigen, überlagerten Datenströme sinkt jedoch diese Verlustwahrscheinlichkeit. Die Einsparung der Bandbreite gegenüber einer Reservierung auf der Basis der Spitzenzellraten (*Peak Cell Rates*, PCR) wird auch als Multiplexergewinn bezeichnet.

Der Vorteil des statistischen Multiplexens ergibt sich für den Benutzer, wenn der VBR-Dienst (bei tolerierbarem Zellverlust) kostengünstiger ist als der CBR-Dienst mit gleicher Spitzenzellrate. Für den Netzbetreiber bedeutet der VBR-Dienst eine bessere Auslastung seiner Ressourcen, denn der Multiplexergewinn entspricht einer Erhöhung der effektiv nutzbaren Übertragungskapazität, die für weitere Verbindungen zur Verfügung steht.

3.3 Stark burstartige Datenströme

Die Grenzen des statistischen Multiplexens zeigen sich, wenn nur wenige Datenströme überlagert werden und der Überhang an ATM-Zellen durch Überschreiten der SCR vergleichsweise groß ist. Ein großer Überhang kann insbesondere bei Zellströmen mit Burst-Silence-Charakteristik (ON-OFF-Charakteristik) entstehen, die durch große Datenmengen im Burst und vergleichsweise lange Silence-Perioden gekennzeichnet sind. Diese ON-OFF Perioden sind bei einer Betrachtung auf der Verbindungsebene vergleichsweise kurz, so daß eine fortlaufende Anpassung der verbindungsbezogenen Verkehrsparameter einen unverhältnismäßig hohen Protokolloverhead bedingen würde. Ein Anwendungsbeispiel ist der mehrfache Abruf von Stillbildern aus einer Bilddatenbank. Der interaktive Abruf von einzelnen Bildern erfolgt dabei auf Basis einer bestehenden ATM-Verbindung. Die wiederholte Auswahl und Übertragung komprimierter Stillbilder - das "Blättern" in der Bilddatenbank - erfordert kurze Übertragungszeiten und entsprechend hohe Übertragungsbitraten. Als Beispiel betrachte man eine Senderate der Bildübertragung von 5 Mbit/s bei einer mittleren Burst-Länge von 250 kByte (komprimierte Bilddaten). Es ergibt sich eine mittlere Sendezeit von 0,4 s. Der Mittelwert der Silence-Phase, die mittlere Bildbetrachtungszeit, sei mit 3,6 s angenommen. Die mittlere Senderate errechnet sich zu 500 kbit/s. Die Burstiness, das Verhältnis von Spitzenbitrate zur mittleren Bitrate beträgt $b = 10$.

Bei Nutzung des *Constant Bit Rate Service* (CBR) beträgt die Auslastung der reservierten Übertragungsbandbreite lediglich 10%. Es stellt sich daher die Frage, ob der *Variable Bit Rate Service* (VBR) effektiv genutzt werden kann. Erfolgt lediglich eine Reservierung entsprechend der garantierten Zellrate SCR, die im Beispiel der mittleren Senderate 500 kbit/s entspricht, müssen in der Regel erhebliche Pufferkapazitäten im Netz vorhanden sein, um den durch die große Burst-Länge (250 kByte) entstehenden Überhang an Zellen in Hochlastsituationen aufzufangen. Dies ist praktisch nur denkbar, wenn der hier betrachtete verzögerungstolerante Verkehr vom verzögerungssensitiven Verkehr separiert wird und die benötigten großen Pufferspeicher dediziert den verzögerungstoleranten Datenströmen zugewiesen werden. Die reservierte Bandbreite

wird in diesem Fall effektiv genutzt, jedoch auf Kosten einer aufwendigen Pufferung im Netz. Wenn zudem die Anzahl der überlagerten Datenströme gering ist, bleibt auch der Multiplexergewinn und damit der Vorteil des statistischen Multiplexens klein.

Eine andere Möglichkeit, die Übertragungskapazität effektiv zu nutzen ist die Glättung des Datenstroms vor der Weiterleitung ins Netz. Eine solche Glättung zeigt Bild 10

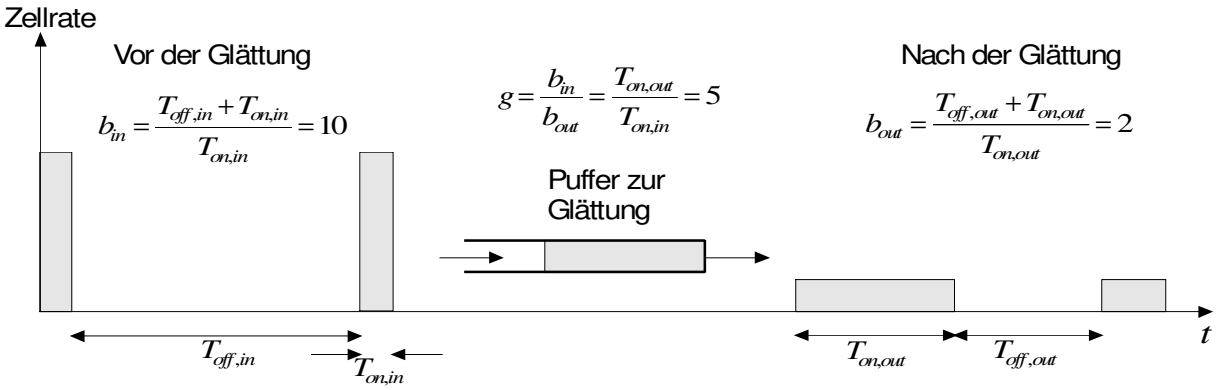

Bild 10: Glättung eines burstartigen Datenstroms mit dem Faktor $g = b_{in}/b_{out} = 5$.
T_{on} : Mittlere Dauer der ON-Phase, T_{off} : Mittlere Dauer der OFF-Phase

Die dargestellte starke Glättung mit dem Faktor $g = b_{in}/b_{out} = 5$ führt im betrachteten Beispiel der interaktiven Abrufanwendung zu einem entsprechend langsameren Bildaufbau. Die im Bild dargestellte Glättung gelingt zudem nur scheinbar, denn durch die Verlängerung der Burst-Phase verkürzt sich nicht die Bildbetrachtungszeit (Silence-Phase), so daß sich eine effektive Burstiness $b_{out,eff} = (T_{off,in} + T_{on,out}) / T_{on.out} = 2,8$ ergibt.
Das Beispiel zeigt, daß die Möglichkeiten des statistischen Multiplexens wie auch die Anpassung der Verkehrscharakteristik durch Glättung bei stark burstartigen Datenströmen sehr begrenzt sind. Hier liegt der Ansatzpunkt für die sogenannten reaktiven, dynamischen Verfahren. Die Grundidee besteht darin, auf aktuelle Anforderungen und Lastsituationen durch gezielte Anpassungsmaßnahmen zu reagieren. Man spricht in diesem Fall von dynamischem Bandbreitenmanagement. Es bietet sich an, wenn mit statistischem Multiplexen ein nur sehr beschränkter Gewinn erzielt werden kann und eine starke Glättung am ATM-Netzzugang nicht möglich oder nicht erwünscht ist.

4. Dynamisches Bandbreitenmanagement

Mit dem Begriff dynamisches Bandbreitenmanagement bezeichnen wir Konzepte und Maßnahmen auf der Burst-Ebene zur optimierten Nutzung der Übertragungskapazitäten. Aus der Sicht des Benutzers steht das Prinzip "Bandbreite auf Anforderung" (*Bandwidth on Demand*) im Vordergrund. Im Idealfall wird bei variabler Datenrate nur die jeweils aktuell benötigte Bandbreite angefordert, genutzt und abgerechnet. Aus Sicht des Netzbetreibers bieten dynamische Verfahren die Möglichkeit, Datenströme je nach Lastsituation unterschiedlich zu behandeln, um Netzressourcen besser auszulasten oder Hochlastsituationen abzubauen. Ein Beispiel ist die gezielte Senkung der Datenrate in Hochlastsituationen durch Pufferung und die Erhöhung der Bedienrate gepufferter Daten bei Niedriglast. Ein konkretes Steuerungsmodell erfordert besondere Funktionen

unterhalb der Verbindungsebene, beispielsweise Protokolle zur Signalisierung von Hochlast oder zur An- und Abmeldung von Bandbreite bzw. zur dynamischen Anpassung der Zellrate.

4.1 ABR-Dienst und UBR-Dienst

Der vom ATM-Forum spezifizierte *Available Bit Rate Service* (ABR-Dienst) bietet auf der ATM-Schicht eine Möglichkeit, aktuell freie Netzkapazitäten dynamisch zu nutzen. Bei der Diskussion dieser Konzepte kam für Dienste mit derartigen Eigenschaften die Bezeichnung *best-effort service* auf. Der Netzbetreiber ist bemüht, der aktuellen Belastung entsprechend freie Kapazitäten dynamisch zur Verfügung zu stellen. Der Dienst kann durch ein Verfahren unterstützt werden, das eine dynamische Anpassung des Verkehrs an die aktuelle Lastsituation bewirkt. Dabei werden fortlaufend die Netzknotenbelastungen einer virtuellen Verbindung mit Hilfe von umlaufenden *Ressource Management*-Zellen signalisiert (Bild 11). An der Quelle erfolgt eine entsprechende Steuerung der Zellrate. Der ABR-Dienst bietet eine Bandbreitengarantie nur in Bezug auf eine vom Benutzer zu wählende *Minimum Cell Rate* (MCR), die auch Null sein kann.

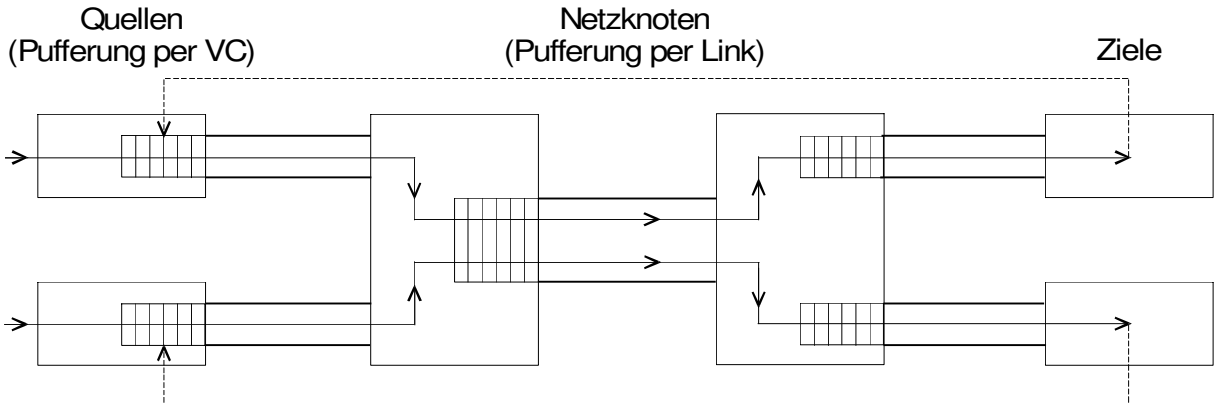

Bild 11: Zellratensteuerung zwischen den Endpunkten von virtuellen Verbindungen

Wie beim ABR-Dienst mit der Option MCR=0 gibt es auch beim *Unspecified Bit Rate Service* (UBR-Dienst) keine Bandbreitengarantie. Außerdem wird beim UBR-Dienst auf Hochlastkontrolle und Zellratensteuerung verzichtet. In Hochlastsituationen werden Zellen verworfen, um den Einfluß auf Verbindungen höherer Dienstgüte zu begrenzen. Der Vorteil des UBR-Dienstes liegt vor allem in einer einfachen Implementierung der Netzzugangsfunktionen. Abgesehen von der Spitzenzellrate sind keine Anforderungsparameter zu spezifizieren. Eine einmal bestehende Verbindung auf der Basis eines UBR-Dienstes kann bei insgesamt geringem Verkehrsaufkommen effektiv genutzt werden, da im Gegensatz zum ABR-Dienst der Steuerungs-Overhead der Flußkontrolle entfällt.

4.2 Schnelle Ressourcenzuteilung

Die ITU-T Empfehlung I.371 "Traffic Control and Congestion Control in B-ISDN" [I371-93] beschreibt die Grundzüge der schnellen Ressourcenverwaltung (*Fast resource management*). Die Abgrenzung gegen andere Bereiche der Verkehrskontrolle ergibt sich aus dem typischen Zeitintervall zur Ausführung der Protokollfunktionen: die Laufzeit einer ATM Zelle vom Sender zum Empfänger und zurück (*round-trip propagation delay*). Die Empfehlung skizziert dazu die Grundzüge eines Protokolls zur schnellen Ressourcenzuteilung: Als Antwort auf eine Anfrage des Benutzers zur Übertragung eines Bursts im ATM-Netz werden Ressourcen zugewiesen und nach Beendigung der Burst-Phase wieder freigegeben. Für die Dauer der Wartezeit bis zur Bestätigung der Bandbreitenanfrage erfolgt eine Speicherung der am Netzzugang eintreffenden Daten. Die Anfragemeldung durchläuft alle betroffenen Netzknoten einer virtuellen Verbindung und wird anschließend zum Netzzugangsknoten zurückgesandt. In jedem Knoten wird gegebenenfalls die Reservierung der angeforderten Bandbreite vorgenommen. Ist in allen betroffenen Netzknoten die benötigte Bandbreite vorhanden, werden die am Netzzugang gespeicherten Daten freigegeben.

4.3 Bedingte spontane Bandbreitennutzung

Ein grundsätzlicher Nachteil der dynamischen Reservierungsverfahren besteht darin, daß auch in Niedriglastsituationen ein Anstieg der Datenrate zu einer Zwischenspeicherung führt und somit Verzögerungen und auch Zellverlust am Netzzugang prinzipiell in Kauf genommen werden müssen. Es besteht allerdings die Möglichkeit, diesen Nachteil durch geeignete Kombination von Reservierung und bedingter spontaner Bandbreitenutzung zu verringern, ohne die Belastung im Netz wesentlich zu beeinträchtigen. Spontane Bandbreitenutzung ist die den aktuellen Erfordernissen entsprechende direkte Ratenanpassung der ins ATM-Netz gesendeten Zellen ohne vorherige Reservierung. Während mit der reservierten Zellrate Übertragungskapazitäten im Netz jeweils für die Dauer der Reservierung fest gebunden sind, wird der durch spontane Nutzung benötigte Bandbreitenanteil im Netz auf statistischer Basis berücksichtigt. Eine spontane Bandbreitenanpassung ist hier nur bedingt nutzbar, etwa in Hochlastsituationen des Netzzugangspuffers.

4.4 Beispiel: Glättung und lastabhängige spontane Bandbreitennutzung

Am Beispiel einer Überlagerung stark burstartiger ON-OFF Datenströme in einem Puffer am ATM-Netzzugang sollen die Eigenschaften einer spontanen Bandbreitennutzung aufgezeigt werden. Der Mittelwert der zur Übertragung benötigten Bandbreite des überlagerten Datenstroms sei *M*. Ein Schwellwert teilt den Puffer in zwei Teile. Befindet sich der Füllstand im unteren Bereich, erfolgt die Pufferbedienung mit einer vorgegebener Zellrate. Dies entspricht der einfachen Glättungsfunktion. Bei einem Anstieg des Füllstands über den Schwellwert hinaus in den oberen Pufferbereich kann die Zellrate am Pufferausgang spontan angehoben werden, um die Wahrscheinlichkeit für Pufferüberlauf zu reduzieren. Über einen Faktor f, $0 \le f \le 1$ wird das Maß der Anpassung als Parameter des Systems vorgegeben. Die fehlende Bandbreite in Hochlastsituationen wird mit dem Faktor f multipliziert und dieser Anteil wird spontan genutzt. Demnach bedeutet $f = 0$, daß im oberen Pufferbereich keine

Zellratenanpassung erfolgt und mithin die einfache Glättungsfunktion im gesamten Pufferbereich gilt. Ist $f > 0$, wird im oberen Pufferbereich die aktuelle Zellrate der Pufferbedienung angehoben. Die maximale mögliche Anhebung ist durch einen vorgegebenen Grenzwert bestimmt, der dem Maximum der nutzbaren Bandbreite $B_{out,\max}$ entspricht. Die relative Größe $B_{out,\max} / M$ bezeichnet die verbleibende Burstiness am Pufferausgang.
In den Untersuchungen wurde ein überlagerter Datenstrom berechnet. Die Charakteristik der 4 gleichartigen ON-OFF Quellen mit der Burstiness $b = 10$ wurde als negativ-exponentiell verteilt angenommen, mit den Mittelwerten $T_{on} = 0,4\text{s}$ und $T_{off} = 3.6\text{s}$ der ON- bzw. OFF-Phasen. Die weiteren Parameter sind: $M = 570$ Zellen/s, Pufferlänge $S = 4000$ Zellen und Schwellwert $L = 2000$ Zellen. Die Auslastung der Bedieneinheit des Netzzugangspuffers wurde in allen Fällen mit 91% eingestellt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. Eine ausführliche Beschreibung der Szenarien und Randbedingungen enthält [Wiss95].

Die Berechnungsergebnisse auf Basis einer Fluid Flow Approximation des Datenstroms im Puffer zeigen die nachfolgenden Diagramme. Die Verlustwahrscheinlichkeit P_{loss} ist bei $B_{out,\max} / M = 2,8$ vergleichsweise hoch und unabhängig von f (Bild12). Mit abnehmendem Einfluß der Begrenzung ($B_{out,\max} / M \to 10$) kann sich die Zellratenanpassung auswirken. Bei verschwindendem Begrenzungseffekt ($B_{out,\max} / M = 9,8$) und hoher Zellratenanpassung $f = 0,86$ ergibt sich der nahezu verlustfreie Fall mit $P_{loss} \approx 10^{-15}$.

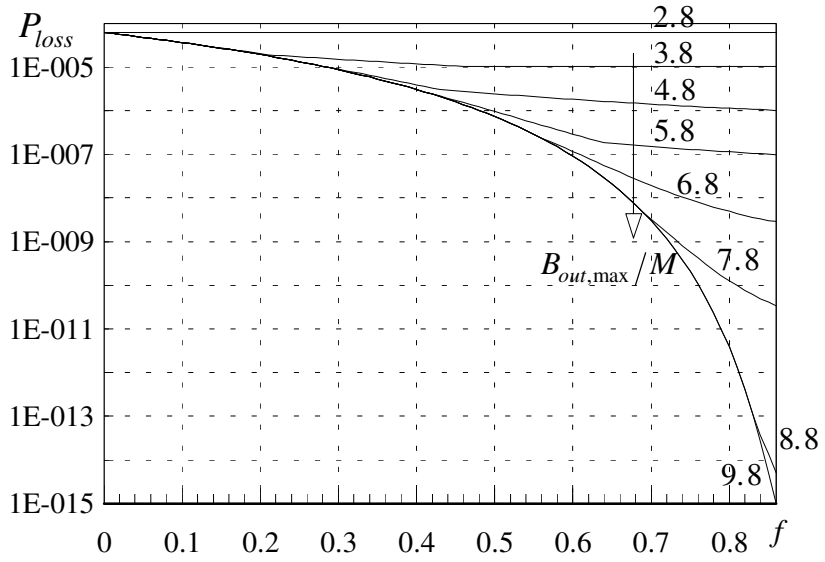

Bild 12: Verlustwahrscheinlichkeit bei zustandsabhängiger Zellratenanpassung im oberen Pufferbereich.

Durch spontane Bandbreitenutzung im Hochlastbereich kann demnach eine erhebliche Verbesserung der Verlustwahrscheinlichkeit erzielt werden. Es stellt sich hier die Frage, wie stark der Anteil der spontan genutzten Bandbreite ist. Im folgenden werden dazu

zwei Kenngrößen betrachtet, die Wahrscheinlichkeit $P^{(2)}$, daß sich der Füllstand im oberen Pufferbereich befindet (Hochlastwahrscheinlichkeit) und der relative Bandbreitenhub $h^{(\Delta)}$, der auf M bezogene Mittelwert der in den Hochlastphasen zusätzlich und spontan genutzten Bandbreite. Man beachte, daß in allen Fällen der vergleichenden Untersuchung der Mittelwert der Bedienrate des Netzzugangspuffers gleich gewählt wurde. Der Auslastung von 91% entspricht eine Bandbreite von $1{,}1M$, die am Pufferausgang im Mittel nutzbar ist.

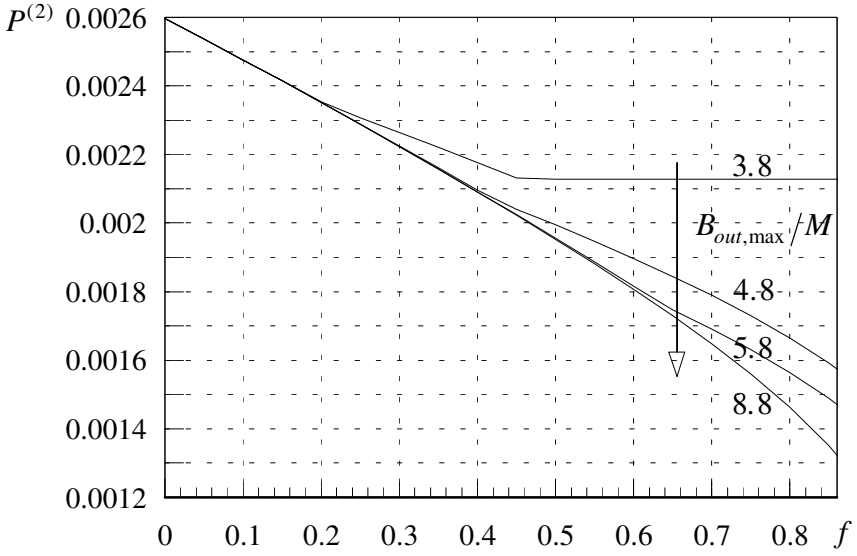

Bild 13: Hochlastwahrscheinlichkeit $P^{(2)}$ in Abhängigkeit von $B_{out,\max}$ und f

Wie die Verlustwahrscheinlichkeit sinkt auch $P^{(2)}$ mit der Zellratenerhöhung (Fakor f) und mit abnehmendem Einfluß der Begrenzung $B_{out,\max}/M \to 10$ (Bild 13).

Bild 14 zeigt die entsprechenden Werte des relativen Bandbreitenhubs.

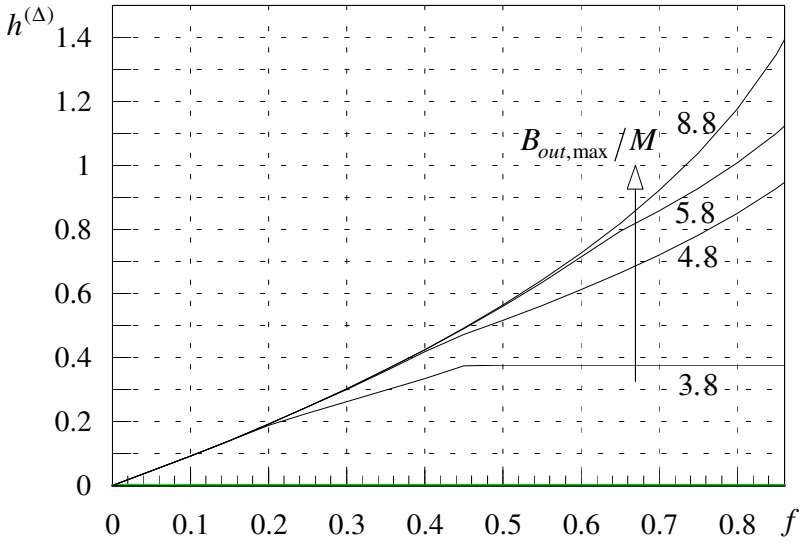

Bild 14: Relativer Bandbreitenhub $h^{(\Delta)}$ bei zustandsabhängiger Drosselung.

Um einen deutlichen Rückgang der Verlustwahrscheinlichkeit zu erzielen, darf die Begrenzung der spontan nutzbaren Bandbreite einen bestimmten Wert nicht überschreiten. P_{loss} läßt sich, wie aus Bild 12 zu entnehmen ist, um mehr als zwei Zehnerpotenzen gegenüber dem einfachen Fall reduzieren, wenn $B_{out,\max}/M = 5.8$ und $f = 0.6$ gewählt wird. Der relative Bandbreitenhub beträgt nach Bild 14 dabei $h^{(\Delta)} \approx 0.7$. Im Hochlastbereich tritt maximal eine Erhöhung der aktuell genutzten Bandbreite um den Faktor $5.8/2.8 = 2.07$ auf. Im Mittel ist in den Hochlastphasen jedoch nur ein geringer Anstieg um den Faktor $(2.8 + 0.7)/2.8 = 1.25$ zu erwarten.

4.5 Schlußfolgerung

Mit der Ergänzung der einfachen Glättungsfunktion des Multiplexers durch eine lastabhängige spontane Bandbreitenanpassung läßt sich eine erhebliche Verringerung der Verlustwahrscheinlichkeit im Netzzugangspuffer erzielen. Dieses Ergebnis ist insofern nicht überraschend, da auch anschaulich einleuchtet, daß mit einer gezielten Anhebung der Zellrate in Hochlastsituationen drohender Verlust drastisch reduziert werden kann. Da sich der Einfluß der bedingten spontanen Bandbreitenutzung auf die relativ seltenen Hochlastphasen beschränkt, verändert sich die Charakteristik des Zellstroms am Pufferausgang nur wenig.

Die Untersuchungen zeigen eine Verbesserung der Verlustwahrscheinlichkeit bzw. eine Erhöhung der Effizienz (Auslastung) bei vorgegebener Verlustwahrscheinlichkeit. Insgesamt erweist sich dynamisches Bandbreitenmanagement, das auf geeignete Weise durch lastabhängige, spontane Bandbreitennutzung ergänzt wird, als ein

vielversprechendes Konzept, um stark burstartige, verzögerungstolerante Datenströme in ATM-Netzen effizient zu übertragen.

Literatur

[Coud86] J.P. Coudreuse, P. Boyer, "Asynchronous time-division techniques for real time ISDN's", Seminaire international sur les reseaux temps reel, Bandol, April 1986

[DePr94] M. de Prycker ATM - "Die Lösung für das Breitband ISDN", Prentice Hall Verlag GmbH, München, 1994

[Gone86] P. Gonet, et. al., "Asynchronous Time-Division Switching: The Way to Flexible Broadband Communication Networks," 1986 Int. Zurich Seminar on Digital Communications, March 9-11, 1986, pp. 141-148

[I371-93] ITU-T Recommendation: Traffic control and congestion control in B-ISDN, Nov. 93

[I432-94] ITU-T Recommendation: B-ISDN user-network interface - Physical layer specification, Jan. 94

[Kade91] F. Kaderali, "Digitale Kommunikationstechnik I - Netze, Dienste, Informationstheorie, Codierung", Vieweg Verlag, Wiesbaden 1991.

[Kade94-1] F. Kaderali, "Neue Kommunikationstechniken für Anwender: Ein Überblick", Corporate Networks und neue Techniken, Proceedings des Telekom-Anwender-Kongresses 1994, Vieweg Verlag, S. 217-225

[Kade94-2] F. Kaderali, "Corporate Networks - Die Entwicklung der Gemeinschaftsnetze" telecom praxis, Heft 10, Okt. 1994, S.34-37,

[Kade95] F. Kaderali, "Digitale Kommunikationstechnik II Übertragungstechnik, Vermittlungstechnik, Datenkommunikation, ISDN", Vieweg Verlag, Wiesbaden 1995.

[Kirt87] P. Kirton, et. al., "Fast Packet Switching for Integrated Network Evolution, " Int. Switching Symp., Phoenix, March 15-20, 1987, pp. B6.1.1-7

[Minz89] S.E. Minzer: "Broadband ISDN and Asynchronous Transfer Mode (ATM)", IEEE Communications Magazine, Sept. 1989, pp. 17-24.

[Samm92] F. Sammartino, "The ATM Forum - An official supplement from the ATM Forum", Data Communications, Oct. 1992

[Turn83] J.S. Turner, L.F. Wyatt: "A Packet Network Architecture for Integrated Services", IEEE GLOBECOM '93, pp. 45-50.

[Wiss93] J. Wissing, "Hysteresis-based congestion control at the B-ISDN access", International Symposium on Fiber Optic Networks and Video Communications, Conference on Broadband Strategies and Technologies for the Optical Access Network, 5-8 April 1993, Berlin.

[Wiss95] J. Wissing, "Dynamisches Bandbreitenmanagement am ATM-Netzzugang für burstartige, verzögerungstolerante Datenströme", Dissertation am Lehrgebiet Kommunikationssysteme der FernUniversität in Hagen, Hagen, 1995.