

# Effiziente Erbringung zuverlässiger Gruppenkommunikationsdienste in ATM-Netzen

Georg Carle

## 1 Einleitung

Im Bereich der Telekommunikation läßt sich zur Zeit ein revolutionärer Umbruch beobachten. Er kann im technologischen Bereich auf eine rapide anwachsende Übertragungs- und Vermittlungskapazität in Verbindung mit einer rasch voranschreitenden Dienstintegration zurückgeführt werden. Im Bereich der Anwendungen beruht der Umbruch auf einer starken Änderung des Benutzerverhaltens. Diese zu beobachtenden Änderungen des Benutzerverhaltens lassen sich zu einem wesentlichen Teil auf die Verfügbarkeit neuartiger kommunikationsbasierter Anwendungen zurückführen.

Unter Ausnutzung der großen Übertragungskapazität von Glasfasern wurden lokale und regionale Hochgeschwindigkeitsnetze eingeführt, die auf den Medienzugriffsprotokollen FDDI und DQDB basieren. Grundlage für eine neue Generation von lokalen Hochgeschwindigkeitsnetzen sowie des Breitband-ISDN ist das zellenbasierte Übermittlungsprinzip des Asynchronen Transfer-Modus (ATM). Dieses Übermittlungsprinzip ermöglicht eine umfassende Dienstintegration, da in einem einheitlichen Netz unterschiedliche Anwendungen mit festen und variablen Datenraten und mit stark variierenden Anforderungen an die Übertragungsqualität kommunizieren können. Gleichzeitig erlaubt ATM eine gute Ausnutzung von Netzressourcen und erleichtert dadurch eine preiswerte Erbringung von Breitbanddiensten. Bei der Entwicklung von ATM-Netzen stand von Beginn an eine Hardware-Implementierung der zeitkritischen Funktionalität im Vordergrund, wodurch eine Vermittlung mit sehr hoher Leistungsfähigkeit sichergestellt wird.

Neben diesem technologischen Wandel führen auch Änderungen der Anwendungen zu neuen Herausforderungen. Während das bisherige Benutzerverhalten durch die Kommunikation zweier Partner geprägt wurde, gewinnt heute in zunehmendem Maße der Informationsaustausch in Gruppen an Bedeutung. Ein großes Spektrum von Anwendungen aus den Bereichen verteilte Systeme, verteilte rechnergestützte Gruppenarbeit, Konferenzsysteme und Verteildienste haben Bedarf an Gruppenkommunikationsdiensten. Zur parallelen Verarbeitung von Programmen werden in zunehmendem Maße vernetzte Arbeitsplatzrechner anstelle von Parallelrechnern eingesetzt, weshalb zu erwarten ist, daß der Einsatz zuverlässiger Gruppenkommunikationsdienste in naher Zukunft stark anwachsen wird. Selbst bei der Verwendung von Hochgeschwindigkeitsnetzen kann der Leistungsbedarf der Anwendungen häufig nicht ausreichend erfüllt werden, da die Kommunikationssysteme der Arbeitsplatzrechner für diese Anwendungsklasse häufig einen Leistungsengpaß darstellen. Konferenzsysteme sind ein weiteres Beispiel für Anwendungen, die Gruppenkommunikationsdienste mit hohen Bandbreiten und geringen Verzögerung benötigen, wobei die Kommunikationssysteme der Endgeräte häufig zu Leistungsengpässen werden. Erst die Beseitigung dieser Engpässe ermöglicht die Realisierung neuartiger anspruchsvoller Anwendungen. Beispiele hierzu sind verteilte Flugsimulatoren oder operative Eingriffe, bei denen Roboter eingesetzt werden, die durch nicht am Ort befindliche Experten gesteuert werden.

## 2 Problemstellung

In der Praxis konnte bereits die prinzipielle Realisierbarkeit von Anwendungen gezeigt werden, bei denen hochleistungsfähige Gruppenkommunikationsdienste eine wesentliche Rolle spielen. Die heute verfügbaren Gruppenkommunikationsdienste weisen aber noch zahlreiche Schwachstellen auf, welche die weitergehende Verbreitung dieser Anwendungen bisher verhinderten. Insbesondere bieten die heutigen heterogenen Netze, bei denen Brücken und Router eingesetzt werden, nur eine ungenügende Unterstützung für die Gruppenkommunikation. In diesen Netzen wird heute überwiegend das verbindungslose Vermittlungsschichtprotokoll IP eingesetzt, dessen Erweiterung Multicast-IP die Erbringung von Gruppenkommunikationsdiensten im Internet erlaubt. Dazu wurde das sogenannte MBONE (virtual Internet Multicast-BackBONE for Multicast IP) realisiert, das ein weltumspannendes Netz von Multicast-fähigen IP-Routern darstellt. Multicast-IP ist allerdings mit den Nachteilen einer hohen Netzbelastung, geringer Leistungsfähigkeit und geringer Zuverlässigkeit behaftet. Daher läßt sich ein Einsatz von Anwendungen mit IP-basierter Gruppenkommunikation in großem Umfang vielfach schon aus Gründen der begrenzten Netzkapazität nicht realisieren. Für Netze mit IP-basierter Gruppenkommunikation wurde

zwar schon eine größere Anzahl von Transportprotokollen für zuverlässige Gruppenkommunikation entwickelt, allerdings ist dabei die erzielbare Qualität sowie die Skalierbarkeit für große Gruppen oder große Entfernungen in der Regel nicht befriedigend.

ATM-Netze bieten durch die hohe Bandbreite und die üblicherweise in den Netzknoten vorhandene Hardware-Unterstützung für Punkt-zu-Mehrpunktverbindungen eine bessere Ausgangslage für die Erbringung von Gruppenkommunikationsdiensten. Wenn die ATM-Technologie aber in Verbindung mit den heute vielfach verwendeten verbindungslosen Protokollen der Netzwerkschicht und den dazu verfügbaren Transportprotokollen eingesetzt wird, so wirkt sich zwar die hohe Bandbreite der ATM-Netze positiv aus, es bleiben allerdings viele Vorteile der ATM-Technologie ungenutzt. Daher besitzen die auf diese Weise realisierbaren Gruppenkommunikationsdienste deutliche Einschränkungen in Bezug auf Leistungsfähigkeit, maximale Anzahl möglicher Teilnehmer und Skalierbarkeit für weite Entfernungen. Insbesondere führen die heutigen Transportprotokolle häufig dazu, daß Gruppenkommunikationsdienste auf ineffiziente Weise erbracht und dadurch Netzressourcen verschwendet werden.

Da in naher Zukunft in vielen Fällen ATM-Technologie sowohl im lokalen Netz als auch im Weitverkehrsnetz eingesetzt werden wird, ist es unabdingbar, über geeignete Protokolle für zuverlässige Gruppenkommunikation zu verfügen, mit denen sich die in einem homogenen ATM-Netz vorhandene Unterstützung für leistungsfähige Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen in vollem Umfang nutzen läßt.

Die Schwächen der für heterogene Netze entwickelten Kommunikationsprotokolle beim Einsatz in einem homogenen ATM-Netz sind darauf zurückzuführen, daß ATM-Netze gegenüber den bisherigen Netzen in mehrfacher Hinsicht einen Paradigmenwechsel darstellen. Die für heterogene Netze entwickelten Kommunikationsprotokolle für zuverlässige Gruppenkommunikation haben in der neuen Umgebung funktionale und leistungsbezogene Defizite. Die Ursachen dafür werden im folgenden erläutert.

Lange Zeit stellte die Übertragungskapazität des Netzes einen Engpaß dar. Die Einführung von ATM-Netzen hatte zur Folge, daß die vermittelbare Bandbreite im gleichen Zeitraum deutlich schneller angestiegen ist als die Leistungsfähigkeit der Endsysteme. Dadurch wurde die Protokollverarbeitung in diesen Rechnern, die zur Sicherstellung eines zuverlässigen Ende-zu-Ende-Dienstes erforderlich ist, zum potentiellen Leistungsengpaß. Heutige Kommunikationssysteme sind aufgrund der für die Protokollverarbeitung verwendbaren Rechenleistung schon für den einfacheren Fall der Punkt-zu-Punkt-Kommunikation vielfach nicht in der Lage, den Anwendungen die Leistungsfähigkeit des ATM-Netzes verfügbar zu machen. Der dabei beobachtbare Leistungsengpaß vergrößert sich für die Gruppenkommunikation noch weiter und kann mit wachsender Gruppengröße und wachsender Entfernung stark zunehmen. Mit wachsender Anzahl von Empfängern spielt insbesondere das Problem der Quittungsimplosion [HBC95] eine immer wichtigere Rolle.

Ein Leistungsengpaß kann aber nicht nur durch unzureichende Verarbeitungsleistung für die Protokollbearbeitung verursacht werden, sondern kann auch darauf zurückzuführen sein, daß Protokollmechanismen unzureichend an die Eigenschaften des darunterliegenden Netzwerks angepaßt sind. Während die konventionellen Internetze in der Regel von einer verbindungslosen Netzwerkschicht geprägt sind, ist ATM ein verbindungsorientiertes Protokoll. Aus diesem Grund eignen sich die für eine verbindungslose Netzwerkschicht entwickelten Transportprotokolle nur bedingt für ATM-Netze. Insbesondere die Protokollmechanismen zur Verbindungsverwaltung dieser Transportprotokolle sind für den Einsatz in einem ATM-Netz nur schlecht geeignet, da sie die Funktionalität der ATM-Verbindungsverwaltung nicht ausnutzen. Bei Gruppen, deren Zusammensetzung sich rasch ändert, können dadurch große unerwünschte Verzögerungen entstehen.

In bestehenden paketvermittelten Internetzen treten Pakete variabler Länge auf, die häufig mehreren Kilobyte groß sind. Im Überlastfall treten in den Netzknoten Pufferüberläufe auf, bei denen Pakete verworfen werden. In den Netzknoten bieten diese Pakete variabler Länge die Basiseinheit des Multiplexens zur Zuteilung von Netzressourcen. Im Gegensatz dazu bilden in ATM-Netzen kurze Zellen mit einer Länge von 53 byte die Basiseinheit des Multiplexens. Überlastete ATM-Knoten werfen einzelne Zellen, was üblicherweise zur Folge hat, daß die aus bis zu mehreren hundert Zellen bestehenden Pakete komplett verloren gehen. Daher ist eine Fehlerbehebung in der Transportschicht, wo immer der Verlust ganzer Pakete behoben werden muß, nicht geeignet, Fehler durch beschädigte oder verlorene ATM-Zellen effizient zu beheben. Bei einer Behebung von Zellverlusten in der Transportschicht führt schon eine verhältnismäßig geringe Zellverlustwahrscheinlichkeit zu einem dramatischen Einbruch der Dienstqualität. Um eine ausreichend hohe Auslastung von ATM-Netzen auch bei stoßartigen Quellen zu ermöglichen, ist es wichtig, einen hohen Multiplexgewinn zu erzielen, was sich häufig aber nur bei Tolerierung einer höheren Zellverlustwahrscheinlichkeit realisieren läßt.

Paketvermittelte Netze sind üblicherweise auf die Erbringung eines einzigen Diensttyps ausgelegt, bei

dem keine Dienstqualität garantiert wird. Daher wird in diesen Netzen von den Anwendungen üblicherweise nur eine kleine Anzahl unterschiedlicher Transportprotokolle verwendet. Beim Vermittlungsdienst von ATM-Netzen stehen mehrere Dienstkategorien mit unterschiedlichen Eigenschaften zur Verfügung, bei denen beim Verbindungsaufbau für Bandbreite, Verzögerung und Zuverlässigkeit genaue Vorgaben gemacht werden können. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, den Anwendungen einen geforderten Dienst durch spezielle Protokollmechanismen, die an die jeweiligen Eigenschaften des Vermittlungsdienstes angepaßt wurden, auf effizientere Weise zu erbringen, als dies mit einem universellen Transportprotokoll möglich wäre.

Um zuverlässige Gruppenkommunikationsdienste in ATM-Netzen auf effizientere Weise als mit den bisher vorhandenen Protokollen erbringen zu können, ist die Entwicklung neuer Protokolle erforderlich, die an die spezifischen Randbedingungen in ATM-Netzen besser angepaßt sind. Dabei ist es wichtig, Fehlerkontrollmechanismen zur Verfügung zu haben, die Zellverlusten beheben können, ohne die Leistungsfähigkeit des Dienstes wesentlich zu beeinträchtigen. Da bei der Gruppenkommunikation eine Vielzahl unterschiedlicher Randbedingungen möglich sind, ist es wesentlich, Fehlerkontrollmechanismen einsetzen zu können, die an die charakteristischen Eigenschaften eines Kommunikationsszenarios angepaßt sind. Gleichzeitig müssen diese Mechanismen mit geringem Implementierungsaufwand realisierbar sein, um Leistungsengpässe durch die Protokollverarbeitung zu vermeiden. Die Entwicklung geeigneter Protokolle sowie geeigneter Protokollimplementierungen für zuverlässige Gruppenkommunikationsdienste in ATM-Netzen stellt allerdings eine große Herausforderung dar, weil die Parameter für Empfängerzahl, Übertragungskapazität, Entfernung, Verlustwahrscheinlichkeit und Quellencharakteristik über mehrere Größenordnungen schwanken können. Bei der Protokollimplementierung ist es insbesondere wichtig, geeignete Realisierungskonzepte für zellenbasierte Operationen zu finden, da die Zwischenankunftszeiten von Zellen im Mikrosekundenbereich liegen.

### 3 Lösungsansatz und Ergebnisse

Wie eine Analyse bisheriger Konzepte für die Fehlerkontrolle zeigt, stellen Multicast-fähige Protokolle, die für konventionelle Netze entworfen wurden, beim Einsatz in ATM-Netzen häufig einen Leistungsengpaß dar [Car95c, Car95a]. Für zuverlässige Punkt-zu-Punkt-Kommunikation wurden bereits mehrere ATM-spezifische Protokolle vorgestellt. Diese Ansätze zeichnen sich dadurch aus, daß die Fehlerkontrolle in der sich direkt oberhalb der ATM-Schicht befindenden ATM-Adaptionsschicht durchgeführt wird. Allerdings wurde bisher noch kein ATM-spezifischer Ansatz für zuverlässige Gruppenkommunikation vorgestellt.

Ein wichtiges Ziel dieser Arbeit besteht darin, ein Adaptionsschichtprotokoll zu entwickeln, das über multicastfähige Protokollmechanismen hoher Leistungsfähigkeit verfügt. Um bessere Skalierungseigenschaften zu erzielen, soll außerdem nach Verbesserungen des bisher verfolgten Ansatzes gesucht werden, Fehlerkontrolle in ATM-Netzen nur in den Endsystemen durchzuführen. Beim Entwurf der Protokollmechanismen muß berücksichtigt werden, daß Fehler, die bei der Multicast-Kommunikation in ATM-Netzen häufig auftreten, die Leistungsfähigkeit des Gruppenkommunikationsdienstes in möglichst geringem Maße beeinträchtigen. Gleichzeitig ist zu beachten, daß die Verarbeitung der Protokollmechanismen nur wenig Rechenleistung verursacht und eine Implementierung der Protokollmechanismen in Hardware mit möglichst wenig Aufwand möglich ist.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Adaptionsschichtprotokoll RMC-AAL (Reliable Multicast ATM Adaption Layer) wurde unter Berücksichtigung dieser Anforderungen entwickelt. Es verfügt über besonders leistungsfähige Fehlerkontrollmechanismen, die für eine große Anzahl von Kommunikationsszenarien und Randbedingungen eine effiziente und preiswerte Erbringung von zuverlässigen Gruppenkommunikationsdiensten ermöglichen. Mit diesen Protokollmechanismen ist es erstmals möglich, bei der Gruppenkommunikation auch für hohe Datenraten, große Entfernungen und stoßartigen Verkehr verhältnismäßig hohe Zellverlustraten zu tolerieren. Die Fehlerkontrollmechanismen sind sowohl für Endsysteme [Car95c], als auch für spezielle Zwischensysteme, sogenannte Gruppenkommunikationsserver [Car95b], geeignet.

RMC-AAL verfügt über einen rahmenbasierten Übertragungswiederholungsmechanismus, der sich durch einen sehr geringen Bandbreitenzusatz aufwand auszeichnet. Mit ihm lassen sich Gruppenkommunikationsdienste insbesondere bei geringen Zellverlustwahrscheinlichkeiten auf sehr effiziente Weise erbringen. Außerdem stellt dieser Mechanismus nur sehr geringe Anforderungen an die Verarbeitungsleistung. Dazu trägt auch ein spezielles Quittungsformat mit Binärfeldern bei, das für eine große Anzahl von Empfängern nur einen verhältnismäßig geringen Verarbeitungsaufwand zur Folge hat und damit das Problem der Quittungsimpllosion beherrschbar macht.

Für höhere Zellverlustwahrscheinlichkeiten sowie für Anwendungen, die besonders niedrige Verzögerungszeiten fordern, verfügt RMC-AAL zusätzlich über einen Fehlerkontrollmechanismus mit zellenbasierter Übertragungswiederholung. Durch die Einführung von sogenannten Rahmenfragmenten für die zellenbasierte Übertragungswiederholung lassen sich Zellverluste erstmals auch für Verbindungen mit großer Pfadkapazität effizient beheben. Gegenüber existierenden Vorschlägen für eine zellenbasierte Fehlerkontrolle konnte außerdem der zusätzliche Bandbreitenbedarf deutlich gesenkt werden.

Desweiteren verfügt RMC-AAL über einen Mechanismus zur zellenbasierten Vorwärtsfehlerkorrektur (Forward Error Correction, FEC), der insbesondere in Weitverkehrsnetzen sowie in Fällen, in denen die Skalierbarkeit durch die Anzahl von Übertragungswiederholungen eingeschränkt ist, vorteilhaft eingesetzt werden kann. Das FEC-Verfahren kombiniert einen geringen Verarbeitungsaufwand mit einer großen Robustheit gegenüber den in ATM-Netzen typischen korrelierten Zellverlusten und ermöglicht außerdem eine dynamische Änderung der Redundanz.

Im Gegensatz zu den bisherigen Konzepten für zuverlässige Kommunikation in ATM-Netzen, die Fehlerkontrollmechanismen nur in den Endsystemen vorsehen, konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, daß eine Fehlerkontrolle auch innerhalb des Netzes möglich und vielfach mit deutlichen Vorteilen verbunden ist. Der neuentwickelte Gruppenkommunikationsserver bietet insbesondere im Weitverkehrsbereich und bei großen Gruppen eine wirkungsvolle Unterstützung für Quittungsverarbeitung, Übertragungswiederholung und Vorwärtsfehlerkorrektur. Der Gruppenkommunikationsserver erlaubt zusätzlich eine Leistungssteigerung bei heterogenen Gruppen, bei denen innerhalb der Gruppe große Unterschiede bezüglich der Verbindungseigenschaften sowie bezüglich Funktionalität und Leistungsfähigkeit der Gruppenteilnehmer bestehen können. Außerdem erlaubt er das Multiplexen mehrerer Sender über eine einzige ATM-Verbindung, womit die Skalierbarkeit bei Gruppen mit mehreren Sendern verbessert werden kann.

Unter Verwendung der Sprache SDL wurde eine formale Spezifikation von RMC-AAL für Sender, Empfänger und Gruppenkommunikationsserver erstellt [CS96]. Eine besondere Eigenschaft dieser Spezifikation besteht darin, daß die Protokollbearbeitung durch mehrere, parallel arbeitende Prozesse erfolgt. Damit wurde die Grundlage dafür geschaffen, die ATM-Dienstkomponenten durch parallele Implementierungen hoher Leistungsfähigkeit zu realisieren.

Aus der SDL-Spezifikation wurde durch Einsatz eines Übersetzungswerkzeugs aus einem kommerziellen SDL-Werkzeugpaket automatisch eine Software-Implementierung generiert. Mit dieser Implementierung erfolgte außerdem eine Validierung des Protokolls in zahlreichen Szenarien. Für höchste Leistungsfähigkeit bei der Verarbeitung von RMC-AAL wurden parallele Implementierungsarchitekturen für ATM-Endsysteme und Gruppenkommunikationsserver entwickelt [CD96]. Wesentliche Beiträge zur Leistungssteigerung konnten mit der Entwicklung eines speziellen Hardware-Bausteins zur Quittungsverwaltung [CS95b, CS95a] und einer generischen ATM-Protokollverarbeitungseinheit (Generic ATM Protocol Processing Unit, GAPPU, [CS95a, CSS96b, CSS96a]) geleistet werden.

Unter Verwendung der vom Bereich Zentrale Forschung und Entwicklung (ZFE) der Firma Siemens zur Verfügung gestellten Laufzeitumgebung Channels wurden die Protokollmechanismen von RMC-AAL in ATM-basierte Arbeitsplatzrechner der Firma Sun, sowie in ATM-basierte PCs unter Linux integriert. Die Laufzeitumgebung Channels ist eine objektorientierte Betriebssystemerweiterung, die Protokollimplementierungen wichtige Basismechanismen wie Zeitgeberunterstützung und Pufferverwaltung bereitstellt. Durch spezielle Scheduling-Mechanismen der Laufzeitumgebung wird ein Einsatz in multimedialfähigen Endsystemen unterstützt.

Um den Nachweis zu erbringen, daß mit den Fehlerkontrollmechanismen von RMC-AAL in Endsystemen und in Gruppenkommunikationsservern eine höhere Leistungsfähigkeit als mit bisherigen Ansätze möglich ist, wurde die erzielbare Leistungsfähigkeit für eine Vielzahl unterschiedlicher Randbedingungen untersucht. In diesen Untersuchungen konnte auch ermittelt werden, wie in Abhängigkeit der Randbedingungen die Auswahl und die Parametrisierung der Protokollmechanismen zu erfolgen hat, um die höchste Leistungsfähigkeit zu erzielen.

Basierend auf den zellenbasierten Mechanismus von RMC-AAL zur Vorwärtsfehlerkorrektur wurde ein Vorschlag für eine dienstspezifische Konvergenzschicht für AAL5 mit FEC (FEC-SSCS) entwickelt, die sich in einer Vielzahl von Anwendungsfällen einsetzen läßt. Innerhalb des ATM-Forums, einem Zusammenschluß von Herstellern, Netzbetreibern und Anwendern von ATM-Technologie, wurde eine vollständige Spezifikation für FEC-SSCS erstellt [CEG<sup>+</sup>95b]. Außerdem wurden mehrere Beiträge in den Standardisierungsprozeß des ATM-Forums eingebracht, die sich mit der Notwendigkeit neuartiger, leistungsfähiger Fehlerkontrollmechanismen für die Adaptionsschicht [CEG<sup>+</sup>95a, GECD95] sowie deren Bewertung [ECD95b, ECD95a, EC95] befaßten.

## Literatur

- [Car95a] Georg Carle. Adaptable error control for Efficient Provision of Reliable Services in ATM Networks. In *First Workshop on ATM Traffic Management WATM'95, IFIP, WG.6.2 Broadband Communication, Paris*, Dezember 1995.
- [Car95b] Georg Carle. Framework with Scaleable Error Control for Reliable Multipoint Services in ATM Networks. In *International Conference on Multimedia Networking, MmNet'95, Aizu-Wakamatsu, Fukushima, Japan*, September 1995.
- [Car95c] Georg Carle. Towards Scaleable Error Control for Reliable Multipoint Services in ATM Networks. In *12th International Conference on Computer Communication, ICC'95, Seoul, Korea*, August 1995.
- [CD96] Georg Carle und Stefan Dresler. High Performance Group Communication Services in ATM Networks. In O. Spaniol A. Danthine, D. Ferrari und W. Effelsberg (Hrsg.), *High-Speed Networks for Multimedia Applications*. Kluwer Academic Publishers, 1996, Seite 199–224.
- [CEG<sup>+</sup>95a] Georg Carle, Hiroshi Esaki, Alope Guha, Keiji Tsunoda und Kumiko Kanai. Necessity of an FEC Scheme for ATM Networks. In *ATM Forum Technical Committee 'Service Aspects and Applications', Contribution ATMF/95-0325; Denver, Colorado, U.S.A.*, April 1995.
- [CEG<sup>+</sup>95b] Georg Carle, Hiroshi Esaki, Alope Guha, Keiji Tsunoda und Kumiko Kanai. Proposal for Specification of FEC-SSCS for AAL Type 5. In *ATM Forum Technical Committee 'Service Aspects and Applications', Contribution ATMF/95-0326; Denver, Colorado, U.S.A.*, April 1995.
- [CS95a] Georg Carle und Jochen Schiller. Enabling High-Bandwidth Applications by High-Performance Multicast Transfer Protocol Processing. In *6th IFIP Conference on Performance of Computer Networks, Istanbul, Türkei*, Oktober 1995.
- [CS95b] Georg Carle und Jochen Schiller. Modular VLSI Implementation Architecture for the Scalable Provision of High-Performance Multimedia Multipoint Services. In *Third IEEE Workshop on the Architecture and Implementation of High Performance Communication Subsystems, HPCS'95, Mystic, Connecticut, U.S.A.*, August 1995.
- [CS96] Georg Carle und Jochen Schiller. Modeling, Simulation and Synthesis of High-Performance ATM Protocols and Multimedia Systems. In K. Bagchi G. Zobrist, J. Walrand (Hrsg.), *State-of-the Art in Performance Modeling and Simulation*. Gordon and Breach Publishers, 1996, Seite 203–222.
- [CSS96a] Georg Carle, Günter Schäfer und Jochen Schiller. An Approach to Hardware-Supported Accounting Management in ATM-Networks. In *Proceedings of the 8th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks, Berlin/Potsdam*, August 1996.
- [CSS96b] Georg Carle, Günter Schäfer und Jochen Schiller. Flexible Design of Hardware-Supported High Performance Protocol Processing Units. In *Proceedings of the 5th Open Workshop on High Speed Networks, Paris*, März 1996.
- [EC95] Hiroshi Esaki und Georg Carle. Combination of SSCOP and an AAL-Level FEC Scheme. In *ATM Forum Plenary, Contribution ATMF/95-1560; London*, Dezember 1995.
- [ECD95a] Hiroshi Esaki, Georg Carle und Tim Dwight. Benefits of AAL-Level FEC Scheme for ATM Networks. In ; *ATM Forum Plenary, Contribution ATMF/95-1438; London*, Dezember 1995.
- [ECD95b] Hiroshi Esaki, Georg Carle und Tim Dwight. Reliable Multicast Service Needs Cell-Level FEC Scheme. In *ATM Forum Plenary, Contribution ATMF/95-1437; London*, Dezember 1995.
- [GECD95] Alope Guha, Hiroshi Esaki, Georg Carle und Tim Dwight. Necessity of Cell-Level FEC Scheme for ATM Networks. In *ATM Forum Plenary, Contribution ATMF/95-1011; Toronto, Kanada*, August 1995.
- [HBC95] Markus Hofmann, Torsten Braun und Georg Carle. Multicast communication in large scale networks. In *Third IEEE Workshop on the Architecture and Implementation of High Performance Communication Subsystems, HPCS'95, Mystic, Connecticut, U.S.A.*, August 1995.