ATM-Switching in HFC-Verteilnetzen

U. Thürmann*, M. Zitterbart*, T. Meuser**

*Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund, TU Braunschweig
Email: {thuerman|zit}@ibr.cs.tu-bs.de

**Philips Forschungslaboratorien, Aachen
Email: meuser@pfa.research.philips.com

http://www.ibr.cs.tu-bs.de/~thuerman/hfc.html

1 Einführung

Kabelverteilnetze, die heute für Kabelfernsehen verwendet werden, können in Zukunft eine wichtige Rolle für den Anschluß privater Haushalte an digitale Multimedia-Netzwerkdienste spielen. Verschiedene Technologien sind entwickelt worden, um bestehende Netze auf diese Aufgaben vorzubereiten [3]. Hierzu zählen HFC, FTTC und FTTH. Betreiber von Kabelverteilnetzen in den USA und auch in Europa unternehmen notwendige Schritte und bauen ihre Netze zur Nutzung für multimediale, digitale Dienste aus.

Dieser Beitrag ist folgendermaßen gegliedert. Kapitel 2 beschreibt die Struktur von Kabelverteilnetzen und die Probleme, die sich aus diesem Aufbau für bidirektionale digitale Kommunikation ergeben. Das zweite Kapitel befaßt sich mit Ansätzen für die MAC-Schicht von HFC-Netzwerken und dem Draft des 802.14-Standards der IEEE 802.14 Working Group. Kapitel 3 zeigt Probleme auf, die insbesondere bei interaktiven multimedialen Anwendungen auf HFC-Netzwerken entstehen können, für die Lösungsmöglichkeiten auf Basis von ATM-Switches diskutiert werden. In Kapitel 4 wird das Simulationsmodell vorgestellt, mit dem verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Switch-Topologien untersucht werden sollen.

Kapitel 5 faßt den Beitrag zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Arbeiten.

2 HFC-Netze

Heutige Kabelfernsehnetze sind unidirektionale, baumförmige Verteilnetze, deren Wurzel der Headend-Controller darstellt (s. Abbildung 1). Im Netz befinden sich unidirektionale Signalverstärker, die das Broadcastsignal in Richtung der angeschlossenen Haushalte weiterleiten. Die Entfernung vom Headend-Controller bis zum entferntesten Haushalt beträgt typischerweise maximal 80 km.

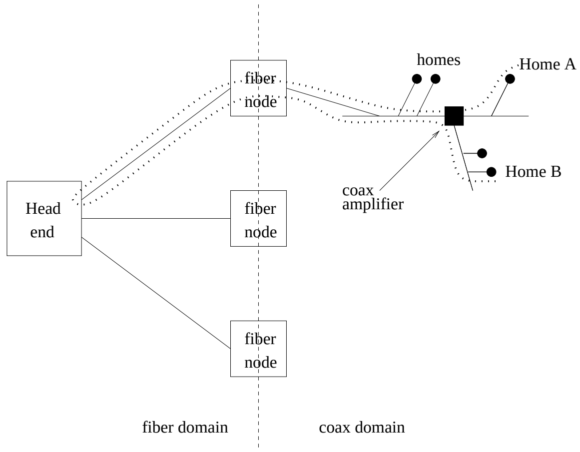

Abbildung 1: Struktur eines HFC-Netzwerks

An den Grenzen der optischen und kupferbasierten Teilnetze sind sogenannte Fiber-Nodes plaziert worden, die die Umsetzung der Signale vornehmen. Ein Fiber-Node bedient typischerweise 500 bis 2000 Haushalte [1].

Für Upstream- und Downstream-Kanäle werden getrennte Frequenzbereiche verwendet, typischerweise 5-40 MHz für Upstream- und 450-750 MHz für Downstream-Kanäle. Ein Upstream-Kanal besitzt eine Datenrate zwischen 2 und 10 Mbit/s, ein Downstream-Kanal zwischen 30 und 40 Mbit/s [1, 2].

MAC-Protokolle für den Transport von ATM-Zellen über HFC-Netze sind in [1], [2] und [6] beschrieben. In [4] werden verschiedene Architekturen für IP und ATM über HFC behandelt.

2.1 Interaktive Multimedia-Anwendungen über HFC-Netzen

Interaktive Anwendungen sind durch einen bidirektionalen Datenverkehr gekennzeichnet. In HFC-Netzen werden solche Kommunikationsmuster allerdings nichts direkt unterstützt. Folgende Probleme müssen gelöst werden:

- *Asymmetrische Netzwerkstruktur*
  - Kabelfernseh-Systeme sind aufgrund der Broadcast-Anwendung, für die sie entwickelt wurden, asymmetrischer Natur. Sie bieten eine wesentlich höhere Bandbreite in Downstream- als in Upstream-Richtung. Im Downstream-Kanal sind nur Broadcast-Übertragungen möglich, während im Upstream-Kanal nur an das Head-End gesendet werden kann. Durch diese Eigenschaften eignen sich HFC-Netze für Anwendungen wie File-Download, News und WWW, bei denen Verbindungen typischerweise von einem Client im HFC-Netz zu einem Server außerhalb dieses Netzes aufgebaut werden und die Anforderungen an die Bandbreite vom Server zum Client sehr viel höher ist, als in umgekehrter Richtung.

    Interaktive Anwendungen wie Telefonie und Video-Konferenzen erfordern symmetrische Bandbreite und im Upstream-Kanal und garantierte Zugriffszeiten auf den Upstream-Kanal.
  - Zwei Stationen, die an einem Kabel angeschlossen sind, können nicht direkt miteinander kommunizieren. Dies ist beispielsweise für Stationen A und B in Abbildung 1 der Fall. Jede Station kann nur auf den Downstream-Kanälen empfangen und auf den Upstream-Kanälen senden.

    Dies bedeutet einerseits, daß Nachrichten zwischen zwei Stationen im HFC-Netz immer den Headend-Controller passieren müssen, und andererseits, daß Kollisionen auf dem Meidum nicht durch die beteiligten Stationen selbst bemerkt werden können. Es wird also ein spezielles Zugriffsprotokoll benötigt, in dem der Headend-Controller die Erkennung und Auflösung von Kollisionen unterstützt.
- *Skalierbarkeit und Last des Headend-Controllers*

  Da der gesamte Verkehr aller Stationen im Netz über den Headend-Controller fließt, sind der Headend-Controller und die an ihn direkt angeschlossenen Segmente des HFC-Netzes potentielle Leistungsengpässe.

  Dies gilt besonders für Zeiten besonders starker Benutzung, die beispielsweise in den frühen Abendstunden auftreten.

  Dies kann die Antwortzeiten interaktiver Anwendungen stark beeinflussen und zu nicht akzeptablen Dienstqualitäten führen, aufgrund von Überlastungen des Headends und der Upstream-Kanäle.

2.2 Der Standard IEEE 802.14

Die oben beschriebenen Eigenschaften von HFC-Netzen machen ein spezielles MAC-Protokoll für die Zugriffskontrolle und die Erkennung und Auflösung von Kollisionen notwendig. Die IEEE 802.14 Working Group befaßt sich mit der Standardisierung der MAC-Schicht. Seit Mai 1997 existiert ein Draft des 802.14-Standards, dessen wesentlichen Punkte hier kurz zusammengefaßt werden:

- Upstream- und Downstream-Kanäle sind in Einheiten fester Länge unterteilt, die Minislots bzw. Allocation Units genannt werden. In diesen Einheiten können verschiedene PDUs transportiert werden, indem die benötigte Anzahl solcher Minislots bzw. Allocation Units konkateniert werden.

- Das Headend legt für jeden Minislot im Upstream-Kanal fest, ob er für eine bestimmte Station reserviert ist, oder ob mehrere Stationen auf den Minislot zugreifen dürfen, mit der Folge einer eventuellen Kollision.

- Bevor eine Station Daten senden kann, muß sie eine Bandbreitenanforderung an den Headend-Controller in einem speziellen Minislot senden. Bei diesen Minislots kann es zu Kollisionen kommen, da sie für eine Gruppe von Stationen freigegeben werden.

- Die Kollisionsauflösung geschieht nach einem „Ternary Tree Contention Resolution" Algorithmus (siehe Kapitel 4).

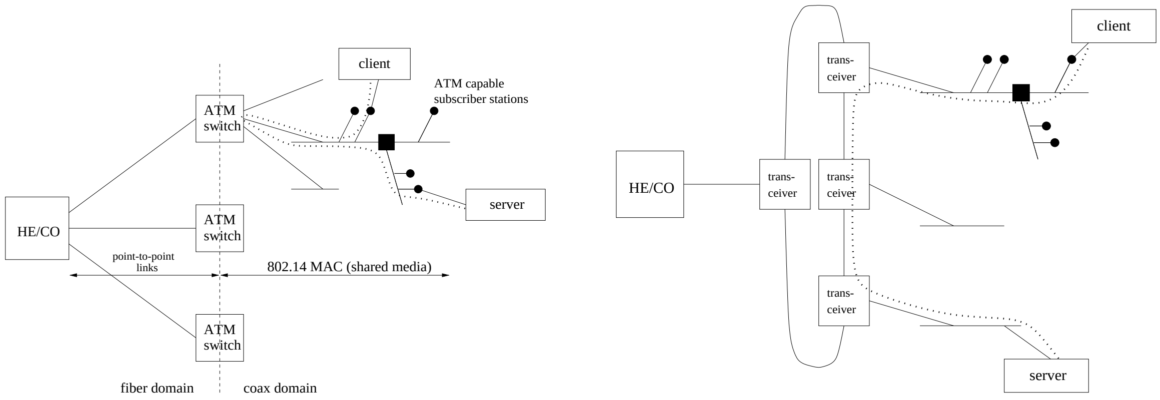

Abbildung 2: ATM-Switches in HFC-Netzen

- ATM-Zellen stellen die Basis für die Übertragung dar. MAC-Layer-Managementinformationen werden in AAL5-Frames übertragen. Optional kann der Headend-Controller oder eine Station auch LLC-Frames variabler Länge unterstützen, die jedoch nicht für MAC-Managementnachrichten benutzt werden. ATM-Zellen und LLC-Frames werden in Upstream-Richtung nur in reservierten Slots gesendet.

3 ATM-Switching in HFC-Verteilnetzen

Indem Fiber-Nodes und/oder Signalverstärker durch Switches ersetzt werden, kann der Verkehr zwischen Stationen desselben HFC-Netzes direkt ohne den Umweg über das Headend vermittelt werden. Hierdurch kann das Headend als potentieller Leistungsengpaß gegebenfalls stark entlastet werden. Die Wahrscheinlichkeit für Kollisionen sinkt, was zu verbesserten Antwortzeiten interaktiver Anwendungen führt.

Verschiedene Switch-Topologien sollen mit dem im nächsten Kapitel vorgestellten Simulationsmodell untersucht werden. Mithilfe der Simulationsergebnisse sollen die untersuchten Topologien bezüglich der erreichbaren Dienstgüte eingeordnet und verglichen werden. Insbesondere werden die Bandbreite im Upstream-Kanal sowie Antwortzeiten für interaktive Anwendungen, die um den Medienzugriff konkurrieren, Gegenstand der Untersuchungen sein.

Es können nur die Fiber-Nodes oder auch Signalverstärker durch ATM-Switches ersetzt werden. Die Switches können untereinander dieselben baumförmigen Verbindungen besitzen wie die Fiber-Nodes und Verstärker des HFC-Netzes oder sie können durch Ringstrukturen verbunden sein. Dazu eignen sich ATM-Transceiver, mit denen verteilte Switches aufgebaut werden können [5]. Abbildung 2 zeigt diese zwei Topologien von Switches. Im links dargestellten Szenario sind lediglich die Fiber-Nodes durch ATM-Switches ersetzt. Anwendungen auf zwei Stationen, die am selben Switch angeschlossen sind, können nun direkt über diesen Switch miteinander kommunizieren. Die Leitungen zwischen dem Headend und den Switches sind nun Punkt-zu-Punkt-Verbindungen, auf denen es nicht mehr zu Kollisionen kommen kann. Damit wird auch die Aufgabe, Kollisionen zu erkennen und aufzulösen, vom Headend in die Switches verlagert. Die Switches stellen nun die Wurzeln mehrerer Segmente mit gemeinsamen Medium für viele Stationen dar.

Das rechts dargestellte Szenario ersetzt die Fiber-Nodes durch einen Ring von ATM-Transceivern. Bei dieser Struktur können auch Stationen, die an verschiedene Fiber-Nodes angeschlossen sind, ohne den Umweg über das Headend kommunizieren. Der Weg über das Headend wird nur noch für die Kommunikation mit Endsystemen außerhalb des HFC-Netzes benötigt.

4 Simulationsmodell

Derzeit wird ein Simulationsmodell entwickelt, das die für Quality of Service interessanten Aspekte MAC-Schicht, wie im 802.14 Draft beschrieben, modelliert.

In einem HFC-Netzwerk nach dem 802.14 Draft sind die Minislots im Upstream-Kanal numeriert. Jede Station muß mit dem Headend-Controller und den anderen Stationen synchronisiert sein und einen Zähler für die Minislots im

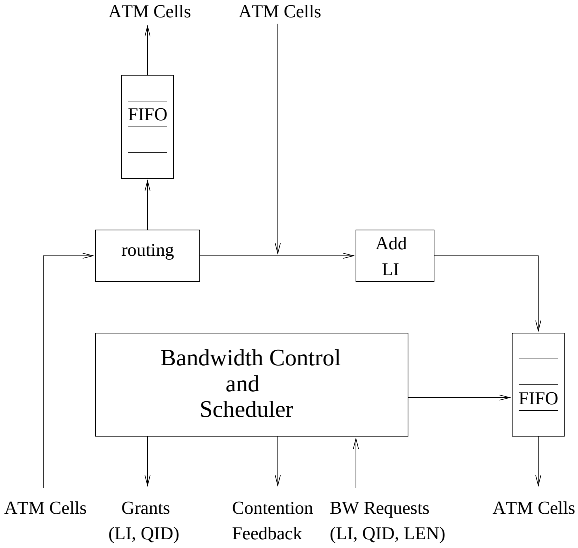

Abbildung 3: Modell des Headends

Upstream-Kanal implementieren. Der Headend-Controller teilt den Stationen in Minislot-Allocation-Messages und ATM-Cell-Grants Minislots zu, die für die Übertragung verwendet werden dürfen. Die Stationen müssen sich die Nummern der ihnen zugeteilten Minislots merken und senden, wenn ihr Zähler für die Minislots den entsprechenden Stand erreicht hat. Im Simulationsmodell werden dagegen Nachrichten an die Stationen genau zur Anfangszeit der zugewiesenen Minislots versendet, was zum sofortigen Auslesen und Senden des ersten Elements der Warteschlange in der Station führt. Außerdem werden getrennte Verbindungen zwischen Headend-Controller und den Stationen für verschiedene Nachrichten verwendet. Dadurch entfällt sowohl im Headend-Controller als auch in der Station die Notwendigkeit, ankommende Nachrichten nach ihrem Typ zu unterscheiden und entsprechend zu behandeln.

Somit wird Funktionalität vom Modell der Station in das des Headend-Controllers verlagert und die Komplexität des Gesamtmodells verringert.

Weiterhin werden Feedback-Nachrichten, mit denen der Headend-Controller den Stationen den Empfang von Request-Nachrichten bestätigt, nicht modelliert.

Diese Vereinfachungen führen zu folgendem Ablauf im Simulationsmodell: ATM-Zellen, die der Headend-Controller empfängt und die an eine Station im HFC-Netz weitergeleitet werden müssen, werden mit dem Adress-Identifier LI (Local Identifier) versehen und in eine Ausgangswarteschlange eingefügt (siehe Abbildung 3). Da der Headend-Controller den alleinigen Zugriff auf den Downstream-Kanal besitzt, können Zellen aus dieser Warteschlange ohne Kollisionen und ohne Zuteilung des Kanals gesendet werden.

Auf einer anderen Verbindung teilt der Headend-Controller allen Stationen mit, wann Minislots im Upstream-Kanal für Bandbreitenanforderungen verwendet werden dürfen. Gesteuert durch den Algorithmus zur Kollisionsauflösung schicken einige Stationen eine Anforderung auf einer eigenen Verbindung zum Headend-Controller. Der Headend-Controller informiert die Stationen über den Erfolg der Anforderung oder über das Auftreten einer Kollision, die in späteren Minislots aufgelöst werden muß.

Erfolgreiche Bandbreitenanforderungen führen zur Zuteilung (Grant) von Minislots an die anforderdende Station, welche daraufhin eine ATM-Zelle aus ihrer Warteschlange an den Headend-Controller sendet.

Eine zentrale Bedeutung kommt dem Bandbreiten-Controller und Scheduler im Headend zu. Er muß die Bandbreitenanforderungen der Station verwalten und entscheiden, wann welche Station aus welcher Warteschlange ATM-Zellen senden darf. Dabei sind Verkehrsklassen und evtl. zugesicherte QoS-Garantien der einzelnen Warteschlangen in den Stationen zu berücksichtigen. Außerdem legt er fest, wann Cluster von Minislots für weitere Anforderungen freigegeben werden.

Das Simulationsmodell einer Station ist in Abbildung 4 dargestellt. Da alle Nachrichten des Headend-Controllers physikalisch an alle Stationen gesendet werden, müssen Nachrichten, die an eine Station oder eine Gruppe von Stationen gerichtet sind, einen Adress-Identifier enthalten. Die Stationen enthalten daher für eingehende ATM-Zellen und Zuteilungsnachrichten (Grant) einen Komparator, der die Zieladresse aus der Nachricht mit der eigenen Adresse (LI) vergleicht.

Eine Station kann mehrere Warteschlangen für ATM-Zellen verwalten, die unterschiedliche Queue Identifier (QID) besitzen. Bandbreitenanforderungen (BW Requests) und Zuteilungen (Grants) enthalten daher immer außer dem LI, der die Station identifiziert, auch den QID.

Zellen von verschiedenen Verkehrsgeneratoren können je nach QoS-Anforderungen in unterschiedliche Warteschlangen aufgenommen werden. Wird eine Zelle in eine zuvor leere Warteschlage eingefügt, wird eine Bandbreitenanforderung in eine spezielle Warteschlange eingefügt.

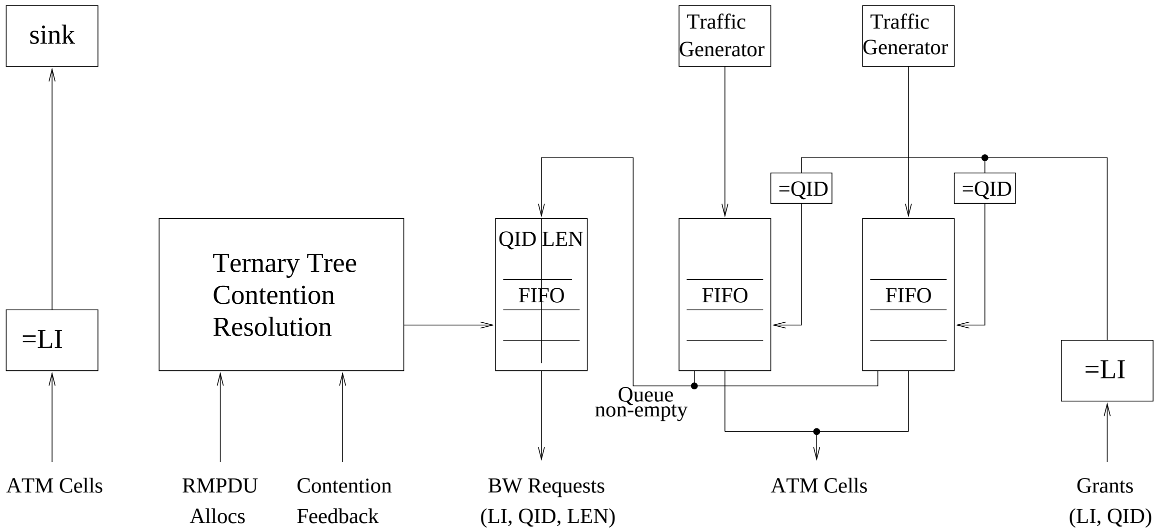

Abbildung 4: Modell einer Station

Diese werden in dafür vorgesehenen Minislots gesendet, wie im nächsten Abschnitt beschrieben.
Wird eine Bandbreitenanforderung mit der Zuteilung von Minislots zum Senden der ATM-Zellen beantwortet, so überprüft die Station den LI und QID und leitet die Zuteilung an die entsprechende Warteschlange. Die erste Zelle der Warteschlange wird entfernt und gesendet, nachdem eventuelle weitere, noch nicht gesendete Bandbreitenanforderungen, in den Kopf des zu sendenden Paketes eingefügt wurden (piggybacking).

4.1 Kollisionsauflösung

Der Block *Contention Resolution* im Modul *Station* enthält den Algorithmus für die Kollisionsauflösung, der in Abbildung 5 dargestellt ist. Das Headend alloziert regelmäßig Cluster von Minislots im Upstream-Kanal zum Senden von Bandbreitenanforderungen. Jeder Cluser ist mit einer Request Number RQ versehen. Für Cluster mit $RQ = 0$ wird zusätzlich eine Entry Persistance R festgelegt. Neue Stationen, die erst in den Prozeß eintreten, dürfen nur in Minislot-Clustern mit $RQ = 0$ senden. Wird ein solcher Cluster von der Station erkannt, liest sie den Wert R aus der Nachricht und generiert eine Zufallszahl R_S zwischen 0 und R. Ist R_S kleiner als die Anzahl der Minislots in dem Cluster, sendet die Station ihre Anforderung im Minislot mit der Nummer R_S. Anderenfalls muß sie auf den nächsten Cluster warten. Mithilfe von R kann das Headend also die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen in Request Minislots variieren.

Nach dem Senden muß die Station die Nachricht über den Erfolg ihrer Anforderung abwarten. Im Erfolgsfall ($FB = 0xfe$) wartet die Station auf die Zuteilung der angeforderten Minislots, um ihre Daten zu senden. Falls es in dem Request Minislot zu einer Kollision kam ($FB < 0xfe$), sendet das Headend mit der entsprechenden Nachricht eine neue Request Number RQ, den die Station in ein Register einträgt. Die Station darf nun in jedem Minislot-Cluster mit einer RQ kleiner oder gleich dem in diesem Register gespeicherten Wert senden.

4.2 Simulationen

Das Simulationsmodell modelliert den Teil des HFC-Netzes, in dem der Zugriff ein gemeinsames Medium für alle angeschlossenen Stationen vom Headend gesteuert wird. Um verschiedene Switch-Topologien und verschieden große HFC-Teilnetze zu untersuchen, sind die Modelle für das Headend und die Stationen mit Simulationsmodulen für ATM-Switches bzw. ATM-Transceivern zu kombinieren. Das Headend wird mit einer variablen Anzahl von Stationen auf der einen Seite verbunden. Der nach oben gerichtete ATM-Link des Headend ist mit einem ATM-Switch der ATM-Transceiver verbunden, der wiederum Teil eines aus mehreren ATM-Switches oder ATM-Transceivern aufgebauten Teilnetzes ist. Die Parameter der Simulation umfassen die Topologie und Größe des ATM-Teilnetzes, die Anzahl der Stationen an jedem Headend eines HFC-Teilnetzes sowie Größe von Warteschlangen und Anzahl und Geschwindigkeit der Upstream-

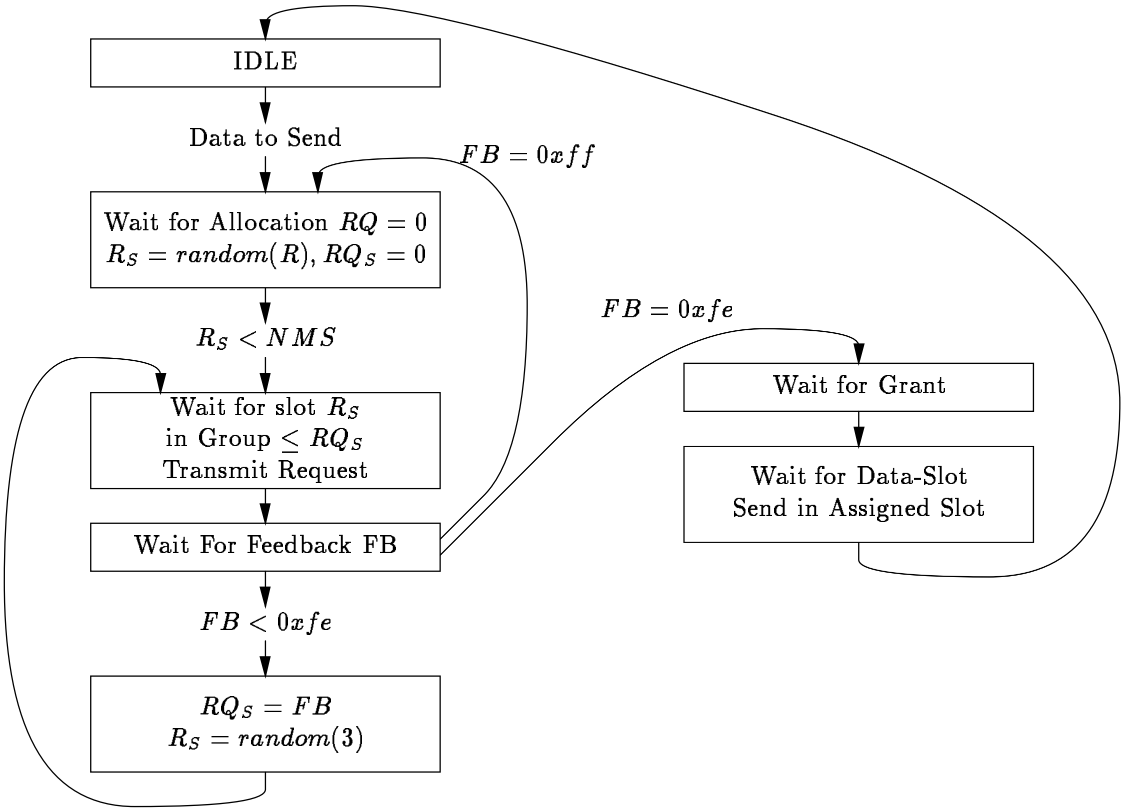

Abbildung 5: Kollisionsauflösung in 802.14

und Downstream-Kanäle.

5 Zusammenfassung

Nach einem Überblick über die Struktur von HFC-Netzen wurden einige ihrer speziellen Eigenschaften gegenüber anderen Netzwerktechnologien beschrieben. Diese Eigenschaften führen zu Problemen, wenn HFC-Netze für Daten- und interaktive Multimedia-Anwendungen eingesetzt werden sollen. Um Problemen mit Last auf dem Headend zu begegnen, sind ATM-Switches im HFC-Netz in verschiedenen Topologien diskutiert worden. Ein Simulationsmodell, mit dem diese Switch-Topologien simuliert werden sollen, ist im letzten Kapitel dieses Beitrages vorgestellt worden.

Literatur

[1] Chatschik Bisdikian, Bill McNeil, Rob Norman, and Ray Zeisz, *MLAP: A MAC Level Access Protocol for the HFC 802.14 Network*, IEEE Communications Magazine, March 1996.

[2] James E. Dail, Miguel A. Dajer, Chia-Chang Li, Peter D. MAgill, Curtis A. Siller, Jr., Kotikalapudi Sriram, and Norman A. Whitaker, *Adaptive Digital Access Protocol: A MAC Protocol for Multiservice Broadband Access Networks*, IEEE Communications Magazine, March 1996.

[3] Tim Kwok, *A Vision for Residential Broadband Services: ATM-to-the-Home*, IEEE Network, September/October 1995.

[4] Mark Laubach, *To Foster Residential Area Broadband Internet Technology*, ConneXions.

[5] Klaus-Peter May, Pierre Semal, Yonggang Du, Christoph Herrmann, *A Fast Restoration System for ATM-Ring-Based LANs*, IEEE Communications Magazine, September 1995

[6] Ying-Dar Lin and Chia-Jen Wu, *A HFC MAC Protocol for Interactive CATV Networks*, 8th IEEE Workshop on LANs/MANs, Potsdam, August 1996.