UNTERSUCHUNG DER LEISTUNGS-CHARAKTERISTIKA ATM-BASIERTER IN-HOUSE NETZWERKE HINSICHTLICH IHRER EIGNUNG FÜR MEDIZINISCHE TELEPRÄSENZSYSTEME

Diplomarbeit

am

Institut für Angewandte Informatik
Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt

in Verbindung mit dem

Institut für Telematik
Fakultät für Informatik
Universität Fridericiana zu Karlsruhe

von

cand. inform. Torsten Neck

Tag der Ausgabe:	01.11.1994
Tag der Abgabe:	30.04.1995

Verantw. Betreuer:	**Professor Dr. Gerhard Krüger**
Betreuer:	**Dr. Elmar Holler** – Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Betr. Mitarbeiter:	**Dipl.-Ing. Georg Carle**
	Dr. Jochen Seitz

Ich erkläre hiermit, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Karlsruhe, den 30. April 1995

0 Verzeichnisse

0.1 Inhalt

0 VERZEICHNISSE ---- 5
0.1 Inhalt ---- 5
0.2 Abbildungen ---- 9
0.3 Tabellen ---- 10

1 THEMENUMFELD UND AUFGABENSTELLUNG ---- 11
1.1 Telepräsenzsysteme für die minimal invasive Chirurgie ---- 11
1.2 Aufgabenstellung ---- 14
1.3 Durchführung ---- 15
1.4 Einsatzszenarien für medizinische Telepräsenzsysteme ---- 16

2 INFORMATIONSTECHNISCHE GRUNDKOMPONENTEN EINES TELEPRÄSENZSYSTEMES ---- 19
2.1 Prozeßsteuerung und Prozeßregelung ---- 19
2.1.1 Strecke ---- 19
2.1.2 Steuerung ---- 19
2.1.3 Regelung ---- 20
2.2 Prinzipien der technischen Kommunikation ---- 20
2.2.1 Das Grundmodell der Kommunikation ---- 20
2.2.2 Hierarchische und geschichtete Kommunikationsarchitekturen ---- 21
2.2.3 Protokoll und Dienst ---- 22
2.2.4 Das Open-System-Interconnection Basis-Referenzmodell der ISO ---- 22
2.3 Telemanipulation – Verbindung von Regelung mit ausgeprägter Kommunikation ---- 25

3 GRUNDLAGEN DES ASYNCHRONEN TRANSFER MODES ATM ---- 29
3.1 Breitbandnetze – Netztechnik für steigende Anforderungen ---- 29
3.1.1 Gewachsene Netzstrukturen und Dienste ---- 29
3.1.2 Integriertes, digitales Schmalbandnetz ISDN ---- 29
3.1.3 IBCN – ISDN-Anpassung an wachsende Anforderungen ---- 30
3.2 Prinzipien von ATM-Netzen ---- 32
3.2.1 Topologie und logische Struktur von ATM-Netzen ---- 33
3.2.2 Synchroner Transfer Modus STM ---- 34
3.2.3 Asynchroner Transfer Modus ATM ---- 34
3.2.3.1 Vereinfachtes Paketvermittlungsverfahren ---- 34
3.2.3.2 ATM-Zellstruktur ---- 35
3.2.4 Hierarchisierung der virtuellen Verbindungsstruktur im ATM ---- 37
3.2.4.1 Switching ---- 37
3.2.4.2 Adressierung von Verbindungen im ATM ---- 37
3.2.4.3 Hierarchie der Vermittlungsobjekte ---- 38
3.2.4.4 Vermittlungsweise der Durchgangsknoten ---- 38
3.3 Schichtenstruktur für ATM-Netze ---- 39
3.3.1 Das ATM-Referenzmodell ---- 39
3.3.2 Aufgaben der Ebenen ---- 40
3.3.2.1 Nutzerebene – User Plane ---- 40
3.3.2.2 Steuerebene – Control Plane ---- 40
3.3.2.3 Management-Ebene – Management Plane ---- 41
3.3.3 Die Protokollschichten von ATM ---- 41
3.3.3.1 Zusammenspiel der Schichten ---- 41

3.3.3.2 Die ATM-Adaptionsschicht – AAL ---- 42
3.3.3.3 Die ATM-Schicht ---- 43
3.3.3.4 Die Physikalische Schicht ---- 43
3.4 Physikalische Schnittstellen zu ATM ---- 45
3.4.1 Einsetzbare physikalische Medien ---- 45
3.4.2 SDH – die Synchrone Digitale Hierarchie ---- 45
3.4.2.1 Digitale Hierarchien ---- 45
3.4.2.2 PDH – Plesiochrone Digitale Hierarchie ---- 46
3.4.2.3 SDH-Transportmoduln STM-1, STM-4 und STM-16 ---- 46
3.4.2.4 SONET – Amerikanisches Pendant zu SDH ---- 46
3.4.3 ATM-Zellübertragung im STM-1-Frame ---- 47
3.4.4 Zellenbasierende Schnittstelle ---- 48

4 KONZEPT EINES TELEPRÄSENZSYSTEMES AUF BASIS EINES KONVENTIONELLEN RECHNERNETZES ---- 49
4.1 DISTEL – ein prototypisches Telepräsenzsystem im industrietechnischen Maßstab ---- 49
4.2 MONSUN – Manipulator Control System Utilizing Network Technology ---- 51
4.2.1 Übersicht über das MONSUN-Konzept ---- 51
4.2.2 Objekthierarchie der MONSUN-Komponenten ---- 52
4.2.3 Kommunikationskonzept von MONSUN ---- 55
4.2.3.1 Virtuelle Kommunikation der Anwendungsprozesse von MONSUN ---- 55
4.2.3.2 ISO-OSI-orientierte Kommunikationsstruktur von MONSUN ---- 58
4.2.3.3 Tiefere Protokollschichten in MONSUN ---- 59
4.2.3.4 Funktionalität des Transportdienst-Anpassungsmoduls „LEVEL4" ---- 60
4.2.3.5 In der Realisierung von MONSUN eingesetzte Produkte ---- 62
4.3 ARTEMIS – die Weiterführung von MONSUN für die medizinische Anwendung ---- 62
4.3.1 ARTEMIS – Advanced Robotics and Telemanipulation System for Minimally Invasive Surgery ---- 62
4.3.2 ROBOX – Beispiel einer für den Medizineinsatz entwickelten Telemanipulator-Komponente ---- 63
4.3.3 Objekthierarchie von ARTEMIS ---- 64
4.3.4 Kommunikationsstruktur in ARTEMIS ---- 65
4.3.4.1 Veränderte Informationsflüsse im Vergleich zu MONSUN ---- 65
4.3.4.2 Wechsel von der Intel-OSI-Protokollsuite auf die DoD-Protokollfamilie ---- 66
4.3.4.3 Fortentwicklung bei der Integration multimedialer Informationen ---- 67
4.4 ARTEMIS/MONSUN, ein multimediales System ---- 68
4.4.1 Definition eines Multimedia-Systemes ---- 68
4.4.2 Erweiterung des ARTEMIS/MONSUN-Konzeptes im Hinblick auf Multimedia ---- 68
4.4.2.1 Neue Objekte für das kontinuierliche Medium ---- 68
4.4.2.2 Einordnung der neuen Objekte in bestehende Strukturen ---- 69
4.4.2.3 Aus den neuen Objekten resultierende veränderte Kanalstruktur der Kommunikation ---- 69
4.4.2.4 Kommunikationsbeziehungen in einem einfachen ARTEMIS-Szenario ---- 70
4.4.2.5 Exkurs: Die Kommunikationsstruktur von ARTEMIS unter Diskussion ---- 71

5 KONTINUIERLICHE MEDIEN IM ARTEMIS/MONSUN-KONZEPT UND IHRE LEISTUNGSANFORDERUNGEN 73
5.1 Standards der Audio-Digitalisierung ---- 73
5.1.1 Das kontinuierliche Medium „Audio" ---- 73
5.1.2 Die Signalformcodierung ---- 73
5.1.3 Quellencodierung ---- 74
5.2 Kenngrößen der digitalen Bildverarbeitung ---- 74
5.2.1 Das Prinzip der digitalen Bildverarbeitung ---- 74
5.2.2 Orts-Diskretisierung: ---- 75
5.2.3 Kanal-Diskretisierung: ---- 76
5.2.4 Amplituden-Diskretisierung ---- 77
5.2.5 Zeit-Diskretisierung ---- 77
5.3 Anforderung an digitale Video-Übertragung ---- 78
5.3.1 Analoge Fernsehtechnik ---- 78
5.3.2 D2-MAC ---- 79
5.3.3 Digitale Video-Normen ---- 79
5.4 Datenkompression für digitale Bilder und Szenen ---- 80
5.4.1 Verlustfreie Kompressionsverfahren ---- 81

5.4.2 Verlustbehaftete Kompressionsverfahren ---- 82
5.4.2.1 Irrelevanzreduktion für Einzelbilder: JPEG ---- 83
5.4.2.2 Kompressionsverfahren für Bewegtbilder ---- 83
5.5 3D-Video im Hinblick auf Kompression ---- 84
5.5.1 Prinzip der High-Speed-Shutter 3D-Farb-Video-Technik ---- 84
5.5.2 Herkömmliche 3D-Videotechniken ---- 85
5.5.3 Kompression beim High-Speed-Shutter 3D-System ---- 85
5.6 Schlußfolgerungen für Bewegtdatenübertragung ---- 86
5.7 Einzelbilder in der medizinischen Anwendung ---- 87

6 LEISTUNGSANFORDERUNGEN EINES ATM-BASIERTEN MONSUN/ARTEMIS-SYSTEMES ---- 89
6.1 Methodik für die Ermittlung der Leistungsanforderungen im ARTEMIS/MONSUN-Szenario ---- 89
6.2 PDUs der Anwendungsschicht in MONSUN ---- 92
6.3 Zyklen und Verkehrscharakteristik in MONSUN ---- 93
6.3.1 Kenngrößen für die Kanal-Verkehrscharakteristik ---- 93
6.3.2 Charakteristik des COM_DO-Kanales ---- 95
6.3.3 Charakteristik des DAT_UP-Kanales ---- 96
6.3.4 Charakteristik des DAT_DO-Kanales ---- 96
6.4 Leistungsanforderungen des Transportdienstes ---- 96
6.4.1 Berechnungsgrundlagen für die Übertragungsanforderungen ---- 97
6.4.2 Anpassung auf das Transportprotokoll ---- 98
6.4.3 MONSUN-PDUs über TP4 ---- 98
6.4.4 ARTEMIS-PDUs über TCP ---- 102
6.4.5 Berücksichtigung von Fehlereinflüssen auf der Transportschicht ---- 103

7 ÜBERTRAGUNG DER MULTIMEDIALEN DATEN ÜBER EIN ATM-NETZ ---- 105
7.1 ATM-Anpassung für die Regelung in MONSUN und ARTEMIS ---- 105
7.1.1 Verkehr über AAL2 ---- 105
7.1.1.1 AAL2-CS-Unterschicht ---- 105
7.1.1.2 AAL2-SAR-Unterschicht ---- 105
7.1.2 Verkehr über AAL3/4 ---- 106
7.1.2.1 CS der AAL3/4 ---- 106
7.1.2.2 Die SAR des AAL3/4 ---- 107
7.1.3 Verkehr über AAL5 ---- 107
7.1.3.1 Die CS des AAL5 ---- 107
7.1.3.2 Die SAR des AAL5 ---- 108
7.2 A/V-Übertragung in einem ATM-Netz ---- 108
7.2.1 A/V-Datenübertragung über AAL1 ---- 108
7.2.1.1 CS des AAL1 ---- 108
7.2.1.2 SAR des AAL1 ---- 109
7.2.2 A/V-Datenübertragung bei Einsatz von Kompression ---- 109
7.3 ATM-spezifische Leistungscharakteristik ---- 109
7.3.1 Die MONSUN-Regelungsdaten auf den ATM-Adaption-Layers ---- 109
7.3.1.1 Der COM_DO-Kanal von MONSUN über AAL ---- 110
7.3.1.2 Der DAT_UP-Kanal von MONSUN/ARTEMIS über AAL ---- 110
7.3.1.3 Die Kanäle COM_DO_MNT und COM_DO_BC von ARTEMIS über AAL ---- 110
7.3.1.4 Der DAT_DO-Kanal von MONSUN/ARTEMIS über AAL ---- 110
7.3.1.5 Anforderungsbewertung ---- 111
7.3.2 Übertragungsverzögerungen durch Blockung ---- 112
7.3.2.1 Effizienz der Zellübertragung ---- 112
7.3.2.2 Zellenverzögerung durch Blockung im Convergence-Sublayer des AAL ---- 112
7.3.3 Zellverzögerung durch Multiplexen auf der Physikalischen Schicht ---- 114
7.3.3.1 Kanalmultiplex im ATM-Netz ---- 114
7.3.3.2 Statistische Aspekte des Zell-Multiplexens ---- 114
7.3.3.3 Abschätzung der Zellenverzögerung durch Multiplexen ---- 115
7.3.4 Laufzeiteffekte durch Reassemblierung beim Empfänger einer Nachricht ---- 116
7.4 Übertragungscharakteristik des physikalischen Mediums ---- 117

8 PRAKTISCHE ANSÄTZE ZUR ERMITTLUNG DER PERFORMANCE-CHARAKTERISTIKA FÜR ATM-BASIERTES MONSUN ---------- 118
8.1 Übersicht ---------- 118
8.2 ARTEMIS-Steuerung mit externer Rückkopplung über den Satelliten KOPERNIKUS ---- 120
8.3 Erfahrungen mit der Video-Datenübertragung über ein ATM-Netz ---------- 123
8.3.1 Ausstattung der Geräte ---------- 123
8.3.2 Logische Struktur des Versuchsaufbaus ---------- 124
8.3.3 Merkmale des AVA-200 ---------- 125
8.3.3.1 ATM-Anschluß ---------- 125
8.3.3.2 Video-Anschlüsse ---------- 125
8.3.3.3 Audio-Anschlüsse ---------- 126
8.3.3.4 Video-Digitalisierung für die ATM-Übertragung ---------- 126
8.3.3.5 Verbindungen ---------- 126
8.3.3.6 Ausgabe ---------- 127
8.3.4 Merkmale des ASX-100 ATM-Switches ---------- 127
8.3.5 Untersuchungen ---------- 128
8.3.5.1 Versuchsanordnung ---------- 128
8.3.5.2 Untersuchungsergebnisse ---------- 129
8.3.5.3 Interpretation der Beobachtungen ---------- 131
8.4 Performance-Messungen am COSY-Switch des IAI ---------- 132
8.4.1 Das „ATM Test und Conformance Center" der GMD-FOKUS in Berlin ---------- 132
8.4.2 Verfügbares Test-Equipment beim ACT-Berlin ---------- 132
8.4.2.1 Das „HP 75000 Broadband Series Test System" ---------- 132
8.4.2.2 Weitere ATM-Testhilfen ---------- 132
8.4.3 Anlage der Messungen und Versuche ---------- 133
8.4.3.1 Prinzipielle Versuchsanordnung ---------- 133
8.4.3.2 Konfigurationsmöglichkeiten des HP-Breitband-Testers ---------- 133
8.4.4 Grundlegende Operationstests ---------- 135
8.4.4.1 Konfiguration des getesteten COSY-Systemes ---------- 135
8.4.4.2 Test der Operabilität und Interoperabilität ---------- 136
8.4.4.3 Langzeit-Stabilitätstest ---------- 136
8.4.5 Leistungsmeßreihen ---------- 137
8.4.5.1 Meßmethoden und Kennzahlen ---------- 137
8.4.5.2 Meß-Systematik ---------- 137
8.4.5.3 Meßergebnisse ---------- 138
8.4.6 Messungen unter simulierten Bedingungen eines Telepräsenzsystemes ---------- 140

9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK ---------- 141

10 LITERATUR ---------- 142

11 VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN UND AKRONYME ---------- 146

0.2 Abbildungen

Abbildung 1.1: Am Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelte chirurgische Effektoren 12
Abbildung 1.2: OP-Szenario der Zukunft — ein Telepräsenzsystem im Einsatz 16
Abbildung 2.1: Blockschaltbild einer Steuerung 19
Abbildung 2.2: Schema eines Regelkreises 20
Abbildung 2.3: Organon-Modell der Sprache nach Platon/Bühler 21
Abbildung 2.4: Standard-Architekturtypen Hierarchie und Schichtung 22
Abbildung 2.5: Kommunikation im OSI-Basisreferenzmodell der ISO 23
Abbildung 2.6: Fluß der Dateneinheiten beim Zusammenwirken der Schichten im OSI-BRM 24
Abbildung 2.7: Digitale Regelung mit einem Steuerrechner 26
Abbildung 2.8: Telemanipulationssystem — örtliche Trennung von Regelalgorithmus und technischem Prozeß und Interaktion mit Hilfe von Mailboxen über Standard-Kommunikations-Stacks 27
Abbildung 3.1: Schematische Struktur eines ATM-Netzes mit teilvermaschten Knoten 33
Abbildung 3.2: Prinzipieller Aufbau einer ATM-Zelle 35
Abbildung 3.3: Felder des Zellenkopfes bei IBCN UNI und NNI 37
Abbildung 3.4: Hierarchie der Verbindungsobjekte im ATM 38
Abbildung 3.5: Behandlung von VPI und VCI in Cross-Connect und Switch 38
Abbildung 3.6: Das ATM-Referenzmodell 40
Abbildung 3.7: Zellsynchronisationsautomat der PHY-CS 44
Abbildung 3.8: Transport von ATM-Zellen im VC-4 eines STM-1-Frames 47
Abbildung 4.1: Komponenten des Telepräsenzsystemes DISTEL 49
Abbildung 4.2: Gerätetechnischer Aufbau einer MONSUN-AEH 53
Abbildung 4.3: Objekthierarchie in MONSUN 54
Abbildung 4.4: Prozeß- und Kommunikationsstruktur in MONSUN 56
Abbildung 4.5: Führung der externen Kommunikationskanäle über eine Anpassungsschicht und einen handelsüblichen TP4-Protokoll-Stack auf Ethernet 61
Abbildung 4.6: Freiheitsgrade für die Steuerung von ROBOX 63
Abbildung 4.7: Kontrollbildschirm für ROBOX 64
Abbildung 4.8: Zusammenfassende Ansicht der ARTEMIS-Komponenten mit Objektstruktur, Kommunikationsstruktur und Netzstruktur 65
Abbildung 4.9: Funktionales System-Konzept von ARTEMIS nach /HoNe95/ 67
Abbildung 4.10: Logische Kommunikation in einem multimedialen ARTEMIS-Szenario 70
Abbildung 5.1: Diskretisierung kontinuierlicher Szenen 75
Abbildung 6.1: Performance-Kenngrößen und ihr Zusammenhang 91
Abbildung 6.2: Schematische Feldergliederung der MONSUN-PDUs auf Anwendungsebene (nicht proportional) 92
Abbildung 6.3: Typische Formen der Lastverteilung 94
Abbildung 6.4: Wachstum der geforderten Kanalrate in Abhängigkeit von PDU-Overhead und Bearbeitungsverzögerung 101
Abbildung 8.1: COSY G4 der Firma HiLAN , Karlsruhe 118
Abbildung 8.2: K-Net AVA200 auf Fore ASX-100 ATM-Switch 119
Abbildung 8.3: Demonstrator-Szenario zur eingeschränkten Fernhantierung über Satellit 122
Abbildung 8.4: Sun SPARC10 mit ATM-NIC SBA-200 123
Abbildung 8.5: Fore ASX-100 mit 4mal TAXI-Interface, darauf K-Net AVA-200 Codec 124
Abbildung 8.6: Basisschema des Bilddatenaustausches im Hinblick auf eine ATM-Übertragung 124
Abbildung 8.7: Eine über das ATM-Netz mittels AVA-200/ASX-100 übertragene Videoszene auf der Bedienoberfläche einer Workstation 127

Abbildung 8.8: Opticon 3D-Endoskop auf Metronom ausgerichtet 128
Abbildung 8.9: Versuchsanordnung zur Performance-Beobachtung des AVA-200-Szenarios 129
Abbildung 8.10: Schnappschuß während laufender Videoübertragung bei Hintergrundlast 130
Abbildung 8.11: Prinzipielle Versuchsanordnung für alle durchgeführten Leistungsmessungen 133
Abbildung 8.12: Konfiguration von Protokollstruktur und Hardwarekomponenten des HP 75000 Broadband Test Tools 134
Abbildung 8.13: Vorbereitung einer Messung auf dem AAL1 134
Abbildung 8.14: Konfiguration des HP-Cell Protocol Processors 135
Abbildung 8.15: Testanordnung zum Erzwingen des Switchens über die System-Backplane 138
Abbildung 8.16: Anzeige der Kennzahlen auf dem GUI des Testsystemes 138

0.3 Tabellen

Tabelle 3.1: Europäische Kanalvarianten im S-ISDN 30
Tabelle 3.2: Konfektioniertes Leistungsangebot bei S-ISDN 30
Tabelle 3.3: Übersicht über die Eigenschaften typischer Breitbandanwendungen 31
Tabelle 3.4: Hinreichende Übertragungsqualitäten für typische Anwendungen 32
Tabelle 3.5: Verfeinerung der ATM-Schichtfunktionen in Sublayers 42
Tabelle 3.6: ITU-T Dienstklassifikation und ihre Zuordnung zu AAL-Servicetypen 43
Tabelle 3.7: Zellterminologie 44
Tabelle 3.8: Korrespondenz zwischen SONET- und SDH-Übertragungsframes und Übertragungsraten 47
Tabelle 4.1: Priorisierung der typischen MONSUN-Tasks 57
Tabelle 5.1: Übersicht der 3-Komponenten-Kanaldiskretisierungsverfahren 77
Tabelle 5.2: Erforderliche Bitraten bei Video-Digitalisierung nach den CCIR-Empfehlungen 80
Tabelle 6.1: MONSUN-spezifische PDUs und ihre Zuordnung zu den Kommunikationskanälen 93
Tabelle 6.2: Zusammenstellung der abstrakten Kanalanforderungen in MONSUN und ARTEMIS 96
Tabelle 6.3: Anforderungen der Transportschicht für die MONSUN-Kanäle 100
Tabelle 6.4: Anforderungen der Transportschicht für die ARTEMIS-Kanäle 103
Tabelle 6.5: Prozentualer Lastzuwachs durch Berücksichtigung von Fehlern 104
Tabelle 7.1: Synopse aller charakteristischen Bitraten der Regelung 111
Tabelle 7.2: Abschätzung der Paketierverzögerungen in MONSUN/ARTEMIS 113
Tabelle 7.3: Abschätzung der Paketierverzögerungen auf AAL3/4 in MONSUN/ARTEMIS 113
Tabelle 7.4: Aufteilung von MONSUN/ARTEMIS-PDUs auf Zellen 116
Tabelle 8.1: Cell Delay des COSY-GIGA-Switches 139
Tabelle 8.2: Cell Interarrival Delay des COSY-GIGA-Switches 139

1 Themenumfeld und Aufgabenstellung

1.1 Telepräsenzsysteme für die minimal invasive Chirurgie

Am Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Technik und Umwelt, dem früheren Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, wird seit geraumer Zeit auf dem Gebiet der Telemanipulations- und Telepräsenztechniken Forschung betrieben. Zunächst hatten diese Forschungsaktivitäten die Entwicklung von Systemen zur ferngesteuerten Arbeit in großtechnischen Anlagen wie Kernreaktoren zum Ziel. In den letzten Jahren jedoch vollzog sich zusammen mit der Abkehr von der Kerntechnik und der Einrichtung eines Arbeitsschwerpunktes Mikrosystemtechnik im Forschungszentrum auch eine Umorientierung auf die Entwicklung medizinischer Fernhantierungssysteme.

Solche medizinischen Fernhantierungssysteme sollen insbesondere in der *minimal invasiven Chirurgie*[1] eingesetzt werden, dem Bereich der Medizin, in dem – quasi durch ein „Schlüsselloch" – durch Schnitte von wenigen Zentimetern Länge mit *endoskopischen* Werkzeugen gearbeitet wird, kontrolliert durch ein in gleicher Weise in den Operationsraum eingebrachtes *Endoskop*[2]. Ein deutlicher Impuls für die Ausführung solcher minimal invasiver Eingriffe ging dabei zunächst von ähnlichen Untersuchungsmethoden in der *Gynäkologie*[3], der Frauenheilkunde, aus. Typische chirurgische Szenarien der minimal invasiven Art sind die Entfernung von Gallensteinen (*Cholezystostomie*), die Entfernung der Gallenblase selbst (*Cholezystektomie*)[4], Spiegelungen im Bauchraum (*Laparoskopie*), Darmoperationen (*Enterotomie*) und die Behandlung von Rippen- und Bauchfellverletzungen (*Laparozelen*) [5] /Psch77/.

Für die systematische Betrachtung ist es hilfreich, den Wandel in der Operationstechnik, von der herkömmlichen Chirurgie ausgehend, zu betrachten:

- In der herkömmlichen Chirurgie wird das Operationsfeld für den Operateur weitgehend freigelegt und ist direkt einsehbar und vom Chirurgen ertastbar. Der Operateur führt seine Werkzeuge seinem Fingergeschick folgend über kurze Distanzen direkt in das Operationsfeld. Die Werkzeuge sind einfache mechanische Geräte, häufig Varianten von Skalpellen, Scheren, Pinzetten, Zangen und Schlingen, deren Bedienung als solche

---

[1] Erklärungen und ethymologische Erläuterungen der verwendeten medizinischen Begriffe werden jeweils als Fußnoten beim ersten Auftreten eines Begriffes gegeben: *Minimal Invasive Chirurgie*, von lateinisch *minimus* (Elativ), sehr klein; *invadere*, eindringen; griechisch χειρ, Hand; χειρουργικος, mit der Hand arbeitend.

[2] *Endoskop:* von griechisch ενδον, innen, und σκοπεο, besehe: Spiegelinstrument zur Untersuchung von Körperhöhlen mit elektrischer Lichtquelle und optischer Vorrichtung (Spiegel- oder Linsensystem), meist als *Fibroskop* mit Glasfasern zum Licht- und Bildtransport.

[3] *Gynäkologie*: von griechisch γυνη, γυναικος: Weib; λογος: Lehre.

[4] *Cholezystostomie, Cholezystektomie*: von griechisch χολη: die Galle; κυστις: Blase; εκτεμνω: schneide heraus; τεμνω: schneide; operative Entfernung der Gallenblase bzw. Eröffnung der Gallenblase und Entfernung des Gallenblaseninhalts.

[5] *Laparoskopie, Laparoenterotomie, Laparozele*: von griechisch λαπαρα: die Weichen, der Bauch; εντερον, der Darm; τομη, Schnitt, und κηλη, Bruch: Besichtigung der Bauchhöhle mit einem Endoskop, Operative Öffnung der Bauchdecke und des Darmes und Bauchwandbruch.

– abgesehen von den notwendigen Kenntnissen über die rechten medizinischen Techniken und den angemessenen Einsatz der Werkzeuge – rasch zu erlernen ist.

- In der minimal invasiven Chirurgie wird das Operationsfeld nun nicht mehr freigelegt, was als wesentliche Veränderung den direkten Sichtkontakt des Operateurs unterbindet. Darüber hinaus ist nun auch der Tastsinn der Hand nicht mehr für diagnostische Zwecke einsetzbar.

  Für die optische Rückkopplung seines Eingriffes setzt der Operateur deswegen ein *Endoskop* ein. Diese Umstellung ist jedoch mit Qualitätseinbußen verbunden und muß durch entsprechendes Training vom Operateur kompensiert werden. Typische Qualitätseinbußen bei der Endoskopie können der Verzicht auf dreidimensionale oder farbige Darstellung sein oder die Unmöglichkeit, durch den Gedankengang des Operateurs den gezeigten Bildausschnitt zu beeinflussen, wie es bei der natürlichen optischen Kontrolle durch „Hinschauen“ und „Konzentration“ auf die als „wesentlich“ erkannten Bildausschnitte der Fall ist.

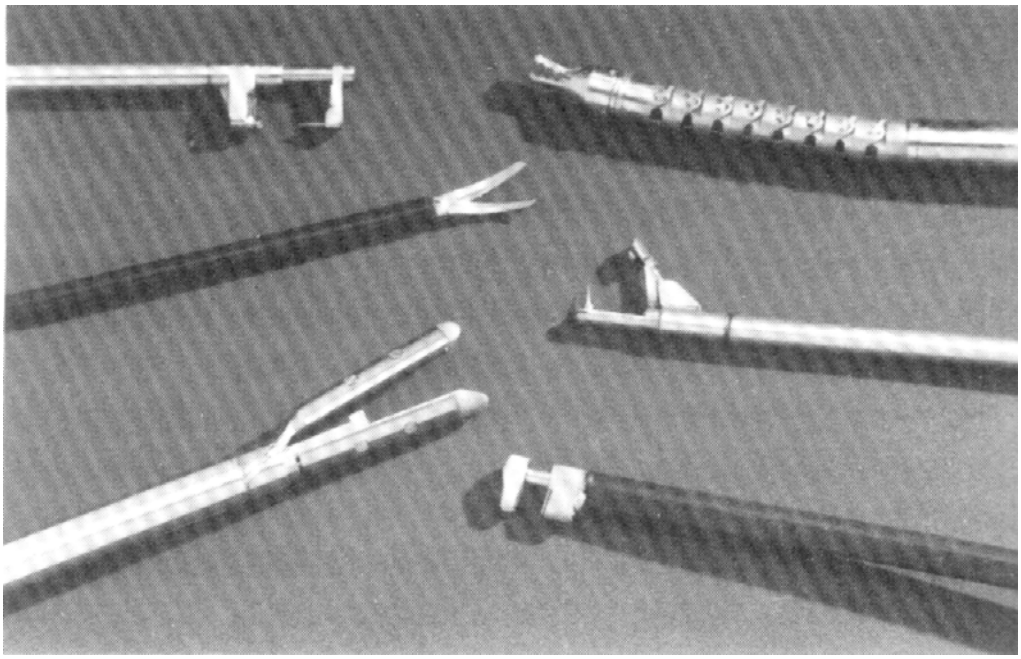

Abbildung 1.1: Am Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelte chirurgische Effektoren

Auch die Werkzeuge für den Eingriff sind den veränderten Bedingungen angepaßt: sie müssen nun durch eine sogenannte Trokarhülse[6], eine Stahlröhre, die durch den Operationsschnitt geführt wird und so das Einführen und Positionieren wechselnder Werkzeuge gestattet, zum Operationsziel geführt werden. Da die Distanzen von der Trokaröffnung zum Operationsfeld meist kurz sind (mehrere Zentimeter im Sektor der laparoenterotomischen Operationen, der endoskopischen Eingriffe im Bauchraum), bleiben die Werkzeuge mechanisch und weitgehend ähnlich bedienbar wie in der konventionellen Chirurgie. Bedingt durch die Führung durch einen Trokar sind jedoch längliche, starre Werkzeuge zu verwenden, deren Freiheitsgrade beim Operationsvor-

[6] *Trokar* oder *Troicart*: von französisch *„trois-quarts“,* dreikantige Nadel. In einem Röhrchen steckende, dolchartige, starke Nadel mit Griff und dreikantiger Spitze; die Nadel kann nach dem Einstechen in Körperhöhlen unter Zurücklassung des Röhrchens entfernt werden.

gang deutlich eingeschränkt sind. In Abbildung 1.1 sind beispielhaft Effektoren, die operierenden Enden, solcher Werkzeuge dargestellt.

- In einem weiteren Schritt kann nun noch eine deutliche Miniaturisierung der Arbeitsbedingungen als Schwierigkeit hinzutreten, wie sie beispielsweise für *neurochirurgische*[7] Eingriffe signifikant ist. Im herkömmlichen Eingriff bedient sich der Operateur eines Mikroskopes zur visuellen Kontrolle, führt aber die Werkzeuge häufig noch im originalen Maßstab mit freier Hand.

  Die minimal invasive Variante solcher Eingriffe integriert die Mikroskopoptik in das Endoskop, führt also hier zu relativ geringer Veränderung des Operationsszenarios im Vergleich zum konventionellen Eingriff. Gerade im Sektor der neurochirurgischen Eingriffe kommt außerdem der *computertomographischen*[8] Darstellung eine große Bedeutung zu. Während das herkömmliche optische Mikroskop nicht oder nur sehr begrenzt zuläßt, solche Tomogramme der realen Szene des Operationsfeldes zu überlagern, ist dies beim digitalen Endoskopbild auf einem Monitor durchführbar.

  Im Bereich der Werkzeuge kann die zuvor genannte Einschränkung im Zugriff zum Operationsgebiet dadurch kompensiert werden, daß entsprechende mechanische Übersetzungen den Durchführenden ein weniger anstrengendes Arbeiten im vergrößerten Maßstab ermöglichen. Trainingsbedürftig bleibt dabei dennoch die fehlerfreie Umsetzung des Maßstabes der vorgebenden, stellenden Bewegung in den der Effektor-Bewegung, insbesondere ist Training auch für die Adaption an die durch die flexiblen Gelenkstrukturen der Werkzeuge entstehende Nachlaufeigenschaft und Trägheit unerläßlich.

- In einem letzten Schritt seien noch die Eigenschaften eines Operationsszenarios, etwa bei der Dilatation oder Rotablation[9] von Herzgefäßen, betrachtet:

  Zu der fehlenden direkten Sicht, dem fehlenden direkten Zugriff und der Miniaturisierung tritt hier als bestimmende Eigenschaft noch eine erhöhte Distanz zwischen dem außerhalb des Operationsraumes befindlichen „Bedienteil“ und dem „Effektor“ auf, also zwischen der Stelle, an der ein Werkzeug vom Operateur bedient wird, und der Stelle, an der das Werkzeug tatsächlich einen Eingriff vornimmt; lag er in den zuvor genannten Bereichen der Chirurgie noch in der Größenordnung von Zentimetern, treten nun Distanzen im Meterbereich auf, die insbesondere nicht geradlinig und starr überbrückt werden können.

  Dies erfordert unbedingt die bereits im Absatz zuvor angedeutete Entkopplung von Bedienteil und Effektor und eröffnet gleichzeitig die Möglichkeit, die bei direkter Kopplung vorgegebene 1:1-Beziehung von Eingabekinematik und Effektorkinematik

---

[7] *Neurologie*, *Neurochirurgie*, von griechisch νευρον, Nerv; Nervenlehre, Nervenoperationen.

[8] *Tomographie*, von griechisch τομη, Schnitt; γραφο, schreibe: Schichtenaufnahmeverfahren; „röntgenologische Methode zur scharfen Darstellung wählbarer Körperschichten unter Verwischung der darüber und darunter gelegenen Schichten“ /Psch77/. Durch das Hintereinanderfügen vieler Schichten kann der räumliche Charakter des untersuchten Gebildes in 2½D-Techniken am Computer nachmodelliert werden (*Computertomographie*). Zur Generierung der Schichtbilder sind nicht nur röntgenologische Methoden einsetzbar, sondern auch Techniken aus der Elementarteilchenphysik: *Kernspintomographie*.

[9] *Dilatationen* und *Rotablationen* dienen zur Entfernung von den Kreislauf oder bestimmte Funktionen hemmenden Ablagerungen von Fett oder Kalk an Gefäßinnenwänden. Dazu wird entweder (*Dilatation*) ein miniaturisierter Luftballon durch die verengte Stelle des Gefäßes getrieben, oder (*Rotablation*) eine miniaturisierte Fräse – mit externem oder als Mikromotor direkt vor Ort realisiertem Aktor angetrieben – beseitigt die störenden Ablagerungen.

nicht nur im Parameter „Maßstab“ zugunsten erleichterter Bedienbarkeit zu verändern. Hierbei ist z. B. auch an die Steuerung durch Touchscreens, Sidesticks oder Spracheingabe zu denken.

Die Betrachtungen der voranstehenden Abschnitte führen zu einer Klassifizierung der Operationsszenarien nach vier bestimmenden Kriterien:

- Visuelle Kontrolle des Operationsfeldes,
- Taktile Kontrolle des Operationsfeldes,
- Kinematik von Bedienteil und Effektor (Freiheitsgrade und Skala) und
- Zugriffsdistanz.

Diesen Kriterien gilt bei der Entwicklung medizinischer Fernhantierungssysteme besondere Aufmerksamkeit /HoTr93/. Sie eröffnen dabei aus technischer Sicht einen weiteren Horizont, indem sie nicht nur eine relativ kurze Distanzüberbrückung zwischen Bedienteil und Effektor im Operationsgebiet zulassen, sondern zwischen Operateur und Patient (damit letztendlich auch wieder zwischen Bedienteil und Effektor) eine beliebige Distanz erlauben. Obwohl dies aus technischer Sicht möglich ist, sprechen aus medizinischer Sicht psychologische und ethische Gründe gegen einen Einsatz medizinischer Fernhantierungssysteme über beliebige Distanzen und fordern die vertrauensfördernde Nähe des Arztes zum Patienten.

Damit ein Fernhantierungssystem, das die oben genannten Kriterien adäquat realisiert, in der medizinischen Praxis eingesetzt werden kann, müssen jedoch über die genannten Eigenschaften hinaus noch strenge Qualitätsmerkmale erfüllt sein, die aus einem bloßen Fernhantierungssystem ein *Telepräsenzsystem* machen.

Zur Klärung der Charakteristika von Telepräsenzsystemen genügt ein wortimmanenter Ansatz:

- Bei einem Telepräsenzsystem handelt es sich um ein Fernhantierungssystem (τηλε–, griechisch: fern–), in dem die bestehende Distanz transparent ist.
- Der Hantierer ist „präsent“ (*praesens*, lateinisch: gegenwärtig), also trotz der bestehenden Distanz direkt, insbesondere ohne Informationsverlust und ohne Einschränkung bezüglich seiner potentiellen Einflußnahme am Geschehen beteiligt.

Als wesentliche Anforderung an ein Telepräsenzsystem resultiert daraus, daß alle signifikanten Informationen ohne Zeitverlust zwischen den beiden Enden des Systemes auszutauschen sind.

Als „signifikante“ Informationen sind in diesem Zusammenhang unbedingt die Bildinformationen – in dreidimensionaler Farbdarstellung – aus dem Endoskop, mit Mikrosensoren an den Effektoren erfaßte Reflexionen von Momenten, Drücken und Kräften, akustische Signale und numerische Daten aus den lebenserhaltenden Instrumenten anzusehen sowie die Positions- und Zustandsdaten der im Operationsfeld befindlichen Effektoren und die aus der Eingabe des Operateurs resultierenden Stellwerte.

Ein typisches medizinisches Telepräsenzsystem wird also durch Verbindung von Konzepten aus Robotik, aus Telematik und aus Multimedia/Virtual Reality charakterisiert.

1.2 Aufgabenstellung

Die vorliegende Arbeit ist im Bereich der Telematik in zuvor eingeführten Telepräsenzsystemen angesiedelt.

Das Institut für Angewandte Informatik am Forschungszentrum Karlsruhe arbeitet an der Entwicklung eines Telemanipulatorsystems für den Einsatz in der minimal invasiven Chirurgie (MIC).

Grundlage der Arbeit ist ein bereits prototypisch realisiertes Architekturkonzept für die Telemanipulatorsteuerung, das Standard-LAN-Technologie für die Übertragung zeitkritischer Steuerungsdaten zwischen Bedienerschnittstelle und dem als Fernarbeitseinheit eingesetzten Manipulator verwendet.

MONSUN (Manipulator Control System Utilizing Network Technology) kann als offene Systemarchitektur verstanden werden, die es möglich macht, unterschiedliche Manipulatoren in ein komplexes Telepräsenzsystem zu integrieren; für die Telemanipulation sind dabei zeitkritische Regelkreise über das verwendete LAN zu schließen.

Die Sollwertvorgaben für Position, Geschwindigkeit etc. werden bei der Telemanipulation über ein Eingabegerät (Master-Manipulator) vom Bediener vorgegeben, d. h. diese Sollwertvorgaben werden in einem übergeordneten Regelkreis, in dem der Bediener einbezogen ist, generiert. Die erforderlichen Stellwertaktionen leitet der Bediener in einem echten Telepräsenzsystem aus multimedialen Informationen (Video, Audio, Kraftreflexion) ab.

In der aktuellen Pilotversion von MONSUN werden Audio- und Videoinformationen nicht über das verwendete LAN übertragen, sondern analog über separate Übertragungskanäle geführt.

Neue Breitband-Übertragungstechniken wie ATM erscheinen geeignet, alle für die Telemanipulation in Telepräsenzsystemen relevanten Informationen über ein einheitliches Medium (Glasfaser) zu übertragen, vorausgesetzt, daß nicht hohe Übertragungsverzögerungen die zeitkritische Regelung über Breitbandnetze verbieten.

Am Beispiel des „Asynchronen Transfer Modus“ (ATM), dem aussichtsreichsten Kandidaten für die geplante Anwendung, sollen in einer genauen Analyse der Anwendung charakteristische Rahmenvorgaben und anhand praktischer Versuche mit einer zu beschaffenden hausinternen Pilotinstallation alle relevanten Übertragungsverzögerungen, die bei der Übertragung von Steuerdaten, Audio und Video zu erwarten sind, ermittelt werden.

1.3 Durchführung

Bei der Durchführung stand zeitlich die Vorbereitung der Beschaffung notwendiger ATM-Komponenten für eine Pilotinstallation, insbesondere des zentralen ATM-Switches, am Anfang. Die notwendigen Beschaffungen konnten zwar im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit vorbereitet werden, wegen der begrenzten Verfügbarkeit der notwedigen Investitionsmittel jedoch nicht vollständig realisiert werden.

Parallel dazu wurden die zugrundegelegten Konzepte MONSUN und ARTEMIS intensiv analysiert, um aus ihnen möglichst genaue Anforderungen für ein später aufzubauendes Versuchsszenario zu erhalten.

Die Ergebnisse dieser Analyse waren in Beziehung zu setzen mit den Prinzipien des vorgesehenen ATM-Netzes. Deshalb wurde in einer weiteren Phase der Durchführung das Konzept von ATM studiert.

Die bislang in den KfK-Entwicklungen MONSUN und ARTEMIS informationstechnisch noch nicht integrierten A/V-Medien wurden danach im Hinblick auf ihre digitale Verarbeitung und Übertragung untersucht.

Begleitend dazu fanden soweit möglich praktische Versuche statt, die die Überlegungen stützen und vertiefen sollten.

1.4 Einsatzszenarien für medizinische Telepräsenzsysteme

Der Begriff „Telepräsenzsystem“ wurde im einleitenden Abschnitt aus sehr „lokal“ geprägten Betrachtungen heraus abgeleitet. Das Prinzip eines Telepräsenzsystemes ist jedoch – zumindest in der technischen Theorie – keinen räumlichen Beschränkungen unterworfen und eröffnet der Medizin damit Möglichkeiten, die aus der gegenwärtigen Betrachtung als „Science Fiction“ erscheinen (Abbildung 1.2).

Im anfänglichen Szenario eines minimal invasiven Eingriffs wurde zunächst selbst bei Einschränkung von direkter Einsicht und direktem Zugriff davon ausgegangen, daß Operateur und Patient sich räumlich in nächster Nähe befinden. Für den Eingriff als solchen ist diese nächste Nähe jedoch nicht mehr erforderlich, wenn das Telepräsenzsystem seinen charakteristischen Eigenschaften gerecht wird, nämlich, alle signifikanten, notwendigen Daten ohne Informations- und Zeitverlust zwischen Operateur und Patient zu übertragen.

In dieser Definition ist implizit nur die Unterscheidung zweier räumlich getrennter Aktionszentren enthalten, des Ortes, an dem der Eingriff tatsächlich geschieht, und des Ortes, an dem der Eingriff vom Operateur gesteuert wird, die Distanz, die zwischen diesen Orten liegt, bleibt technisch unbeschränkt.

Über den Parameter der räumlichen Distanz zwischen Patienten und Operateur lassen sich nun Klassen von Operationsszenarien bilden, die sich vom Operationsprinzip kaum unterscheiden, sondern deren wesentliches Merkmal die Qualität des zugrundeliegenden Datentransportes ist.

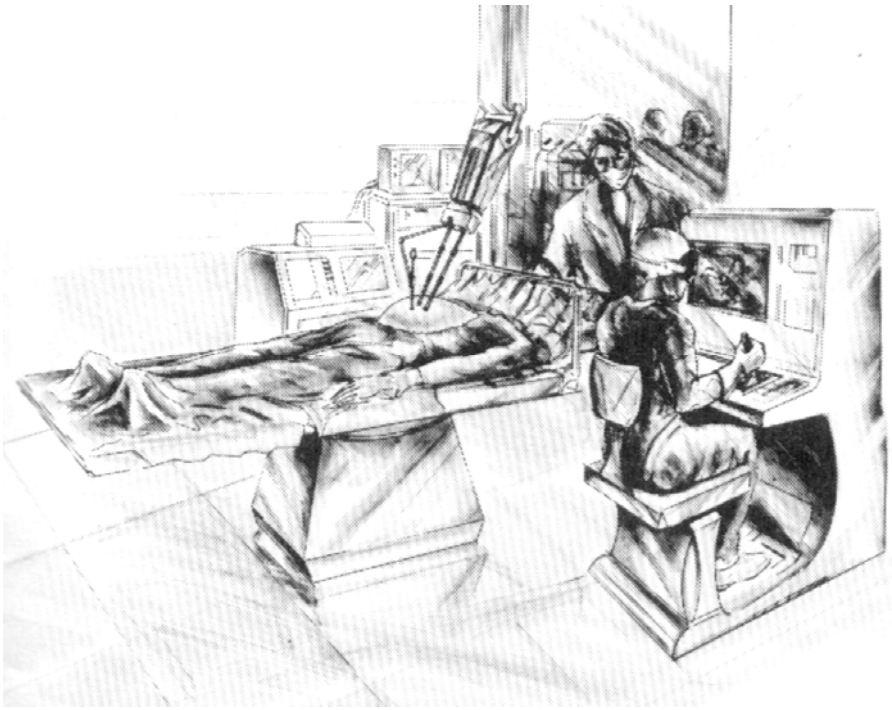

Abbildung 1.2: OP-Szenario der Zukunft – ein Telepräsenzsystem im Einsatz

- Die bereits eingangs eingeführte erste Klasse erfordert engste Lokalität. Der Operateur erhält die signifikanten Daten direkt aus dem Operationsgebiet durch mechanische Rückkopplung an seinen Geräten, durch Bilder etwa aus spiegeloptischen Endoskopen,

sowie durch Blick- und Hörkontakt. Er steuert seine Geräte durch direkte mechanische Kopplung. Es existieren viele einzelne, natürliche Datentransporte, jedoch kein multimedialer Datentransport im Sinne der Informatik.

- Die zweite Klasse bedient sich schon technischer Datentransportsysteme, z. B. zur Übertragung von Video-Endoskopszenen. Die geringen Distanzen in der Größenordnung eines Operationsraumes erlauben jedoch den Einsatz vielfältiger und spezifischer Übertragungsprotokolle auf unterschiedlichen Medien.
- Erst in der dritten Klasse, die sich in der räumlichen Größenordnung eines lokalen Netzes (LAN) bewegt und damit typischerweise Entfernungen zwischen zwei beliebigen Punkten eines Klinikgeländes überbrückt, wird es notwendig, einheitliche Übertragungssysteme für multimediale Daten im informationstechnischen Sinne einzusetzen. In Operationsszenarien dieser Klasse wird es damit möglich sein, einen Operateur z. B. in einer ausgelagerten aber informationstechnisch integrierten Spezialklinik zu einem Eingriff in einer kritischen Phase nicht nur diagnostisch beratend sondern therapeutisch, eingreifend **hinzuzuziehen**.
- Das Einsatzszenario der vierten Klasse unterscheidet sich wenig von der dritten, jedoch treten deutlich veränderte Distanzen auf, die nun im Bereich der Weitverkehrsnetze (MAN, WAN, GAN) liegen sollen. Möglicherweise ist es einem Patienten einerseits nicht zumutbar, zu einem einzigen Spezialisten in einem anderen Kontinent transportiert zu werden, die Auslastung des Spezialisten oder die Dringlichkeit des Eingriffes andererseits vereiteln aber dessen Einfliegen. Sind nun hinreichend zuverlässige und leistungsstarke Übertragungssysteme zwischen den beteiligten Kliniken verfügbar, so kann der Eingriff dennoch vorgenommen werden.

Die Betrachtung in den vier Klassen beruht im Wesentlichen auf der Unterscheidung einer weiteren, unabhängigen Komponente eines Telepräsenzsystemes: Neben den beiden Aktionszentren wird nun – zumindest in den höheren Klassen – ein unabhängiges, multimediales Transportsystem gefordert. Hierin liegt auch die Unterscheidung von Klasse drei und vier begründet: Während das Transportsystem in der dritten Klasse noch der Verantwortung des Klinikbetreibers unterliegt und er durch geeignete Maßnahmen wie Redundanz und Benutzungsbeschränkungen auf die Ausfallsicherheit und Leistungsfähigkeit zum Zeitpunkt einer Telepräsenz-Operation Einfluß nehmen kann, ist dies in Klasse vier nicht mehr möglich. Hier werden mit Sicherheit die Zuständigkeiten mehrerer öffentlicher Netzbetreiber berührt, es liegen auf verschiedenen Teilstrecken verschiedene Medien (verschiedener Güte und Leistungsfähigkeit) vor und es ist nicht möglich, etwa Benutzungsbeschränkungen zur Qualitätssicherung durchzusetzen.

2 Informationstechnische Grundkomponenten eines Telepräsenzsystemes

Bereits an früherer Stelle wurde festgehalten, daß in einem Telepräsenzsystem Konzepte aus der Prozeßautomatisierung und der Telematik vereint werden. Sie sollen vor der späteren Synthese deswegen separat vorgestellt werden.

2.1 Prozeßsteuerung und Prozeßregelung

Will man ein technisches System automatisieren, so müssen die den Systemzustand kennzeichnenden Größen erfaßt und interpretiert werden. Aus der Kenntnis über einen momentanen Systemzustand und über ein gesetzmäßig dynamisches Verhalten des Systems heraus können dann durch geeignete Beeinflussungen der Systemgrößen gewünschte Folgezustände herbeigeführt werden /ReLe94/.

Folgende Begriffe sind dabei von Bedeutung:

2.1.1 Strecke

Die *Strecke* oder *Steuerstrecke/Regelstrecke* ist derjenige Teil des Systems, in dem technische oder physikalische Größen gemäß einer Zielfunktion beeinflußt werden. Im Fall etwa der dezentralen Steuerung einer Endoskop-Positionierung stellt jede einzeln ansteuerbare Achse der Positioniermechanik eine einzelne Strecke dar, im Fall einer zentralen Steuerung wird das kinematische Gesamsystem der Achsen als eine einzige Strecke betrachtet.

2.1.2 Steuerung

Unter *Steuerung* versteht man einen Vorgang in einem abgegrenzten System, der durch gezielte Eingaben aufgrund der dem System eigenen Gesetzmäßigkeit bestimmte Ausgaben erzeugt, die beispielsweise auf eine Strecke einwirken.

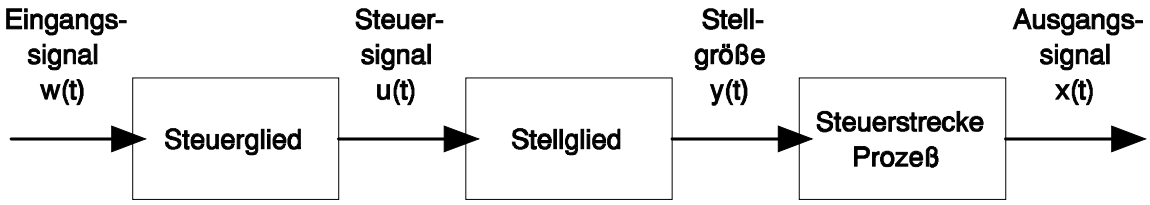

Abbildung 2.1: Blockschaltbild einer Steuerung

Das Charakteristikum der Steuerung ist, daß das Ergebnis der Beeinflussung der Strecke durch die Ausgabegrößen nicht beobachtet wird, zumindest nicht in dem Sinne, daß beobachtete Auswirkungen direkt in die Steuerung zurückgeführt werden.

Ein Beispiel für eine Steuerung wäre das Zurückfahren der oben genannten Endoskop-Positionierung aus einem beliebigen Betriebs- oder Fehlerzustand in eine Grundposition (sogenanntes „Einfahren“).

Abbildung 2.1 zeigt das Blockschaltbild einer Steuerung.

2.1.3 Regelung

Die *Regelung* ist eng mit der Steuerung verwandt, auch hier wird durch Eingabe bestimmter *Stellgrößen* eine *Regelstrecke* beeinflußt. Im Gegensatz zur rückführungslosen Steuerung wird jedoch bei der Regelung der *Ist-Zustand* der Strecke ständig überwacht und in den sogenannten *Regelgrößen* erfaßt. Der gewünschte Systemzustand wird in sogenannten *Führungsgrößen* erfaßt. Regelgrößen und Führungsgrößen werden nun in einem *„Feedback“* miteinander verglichen (Soll-Ist-Vergleich) mit dem Ziel, eine Angleichung über die aus den turnusmäßigen Vergleichen abgeleiteten Stellgrößen zu erreichen.

Dieser charakteristische Wirkungsablauf – Messen – Vergleichen – Stellen – vollzieht sich in einem geschlossenen Kreis, dem sogenannten *Regelkreis,* der in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt ist.

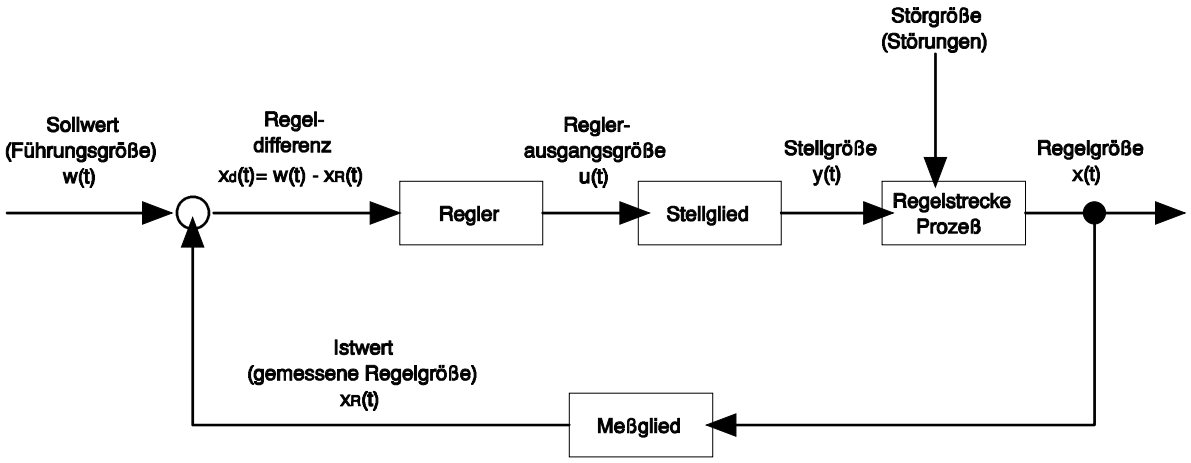

Abbildung 2.2: Schema eines Regelkreises

Eine solche Rückkopplung ist insbesondere dort notwendig, wo Störeinflüsse von außen ein Erreichen des Sollzustandes verhindern können oder wo durch systeminhärente Verzögerungen und Verluste oder ähnliche dynamische Eigenschaften ein Gleichgewichtszustand hergestellt werden muß.

2.2 Prinzipien der technischen Kommunikation

2.2.1 Das Grundmodell der Kommunikation

Das Grundmodell der Kommunikation geht auf den griechischen Philosophen Platon (Athen, 427–347 v. Chr.) zurück und wurde von dem deutschen Sprachpsychologen Karl Bühler (1879–1963) 1934 in dem Werk „Sprachtheorie“ verfeinert als sogenanntes „*Organon-Modell*“ (οργανον, griechisch: Werkzeug) publiziert. Abbildung 2.3 zeigt es als Schema.

Die nach Platon übersetzte Kernaussage lautet: *„Sprache ist ein Werkzeug, mit dem Einer einem Anderen etwas mitteilen kann über die Dinge.“*

Die wesentliche Betrachtungsweise liegt dabei auf der horizontalen Kommunikation zwischen „Einem“ und dem „Anderen“, beide als gleichwertige Partner (sog. *Peers* im Sprachgebrauch des Telematikers) in der Kommunikationshierarchie zu verstehen. Untergeordnet werden ihnen implizit die „Dinge“, deren Eigenschaften nur durch die „Werkzeugfunktion“, die Abbildung in eine Sprache in den Kommunikationsakt einfließen.

Interessanterweise nutzt Bühler dieses Grundmodell nun zur Klassifizierung von Textformen (Lyrik, Dramatik, Epik) in der Literatur, indem er unterschiedliche funktionale Schwergewichte auf die eingeführten drei Objekte, „Einer“, „Anderer“, „Dinge“, legt. Ganz ähnliche Methoden führen in der technischen Betrachtungsweise der Kommunikation zu der Unterscheidung funktionaler Schichten.

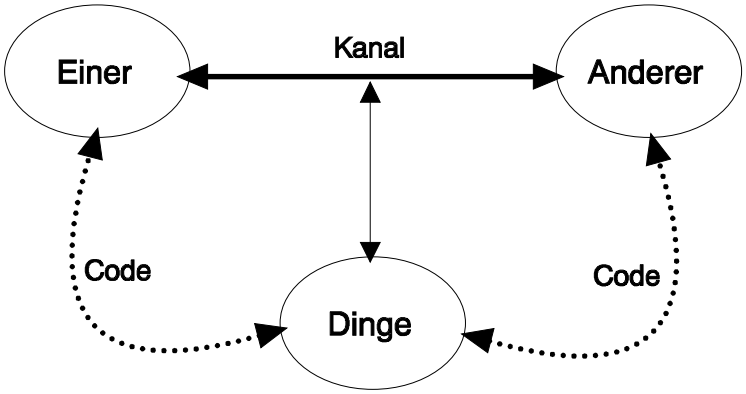

Abbildung 2.3: Organon-Modell der Sprache nach Platon/Bühler

Das Organon-Modell bleibt trotz der Ausrichtung auf die natürlichsprachige Kommunikation zwischen Menschen in den wesentlichen Aspekten, nämlich der Unterscheidung zwischen *Datenquelle* und *Datensenke* und der Forderung eines gemeinsamen, abbildenden Datenformates, auch für Betrachtungen technischer Kommunikation tauglich. Die Abbildung der „Dinge“ auf einen vorausgesetzten, gemeinsamen Code der Partner z. B. werden wir in Abschnitt 2.2.4 als *Protokolldateneinheit* definieren; selbst der Begriff des *Kanals*, der zum Transport der Nachricht zwischen dem „Einen“ und dem „Anderen“ eingerichtet wird, ist bereits in dieser Sprachtheorie von 1934 zu finden. Der Kanalbegriff entspricht weitgehend dem, was wir später informationstechnisch unter einem *virtuellen Kanal (Virtual Circuit, VC)* verstehen werden.

2.2.2 Hierarchische und geschichtete Kommunikationsarchitekturen

Während das Grundmodell der Kommunikation im vorangehenden Abschnitt noch eine ganzheitliche Betrachtung des Informationstransportes versucht, ist es in der Telematik üblich, eine auf funktionellen Aspekten der Teilvorgänge der Kommunikation beruhende Struktur herauszustellen. Eine solche Strukturierung hilft einerseits, die Komplexität technischer Kommunikationssysteme zu beherrschen, und ermöglicht andererseits, einzelne Komponenten gezielt zu ersetzen, ohne die Gesamtstruktur verändern zu müssen /LoKr93, Tane92/.

Als Architekturmodelle sind *Hierarchie* und *Schichtung* gebräuchlich, wobei letztere als strenger Sonderfall der Hierarchie angesehen wird.

Wie aus der schematischen Abbildung 2.4 ersichtlich, ist beiden Architekturen gemeinsam, daß verschiedene *Ebenen* oder *Schichten* unterschieden werden, denen Objekte zugeordnet sind. Dabei sind Objekte einer Ebene als gleichwertig gemäß dem Ordnungsprinzip anzusehen. Die Strenge bei der Schichtung gegenüber der einfachen Hierarchie liegt in dem Verbot für ein weiter oben angeordnetes Objekt, auf ein Objekt in einer tieferen als der unmittelbar unterliegenden Hierarchieebene zuzugreifen, und analog in dem Verbot für ein weiter unten angeordnetes Objekt, auf ein Objekt in einer höheren als der unmittelbar überliegenden Hierarchieebene zuzugreifen.

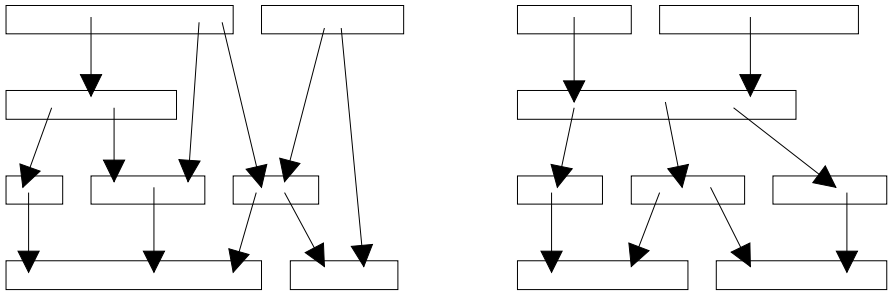

Abbildung 2.4: Standard-Architekturtypen Hierarchie und Schichtung

2.2.3 Protokoll und Dienst

Nach Einführung einer hierarchischen Struktur ist es sinnvoll, die Kommunikationsakte nach ihrer Richtung zu unterscheiden:

- Kommunikation, die zwischen Objekten einer Hierarchieebene bzw. Schicht stattfindet, wird horizontale Kommunikation genannt. Man betrachtet sie als Datenaustausch zwischen gleichwertigen Partnern, *Peers*. Horizontale Kommunikation ist also eine Peer-to-Peer-Kommunikation. Die Regeln, die Festlegungen über horizontale Kommunikationsabläufe vornehmen, werden *Protokolle* genannt.

  Besondere Strenge liegt hierbei in Verbindung mit einer geschichteten Betrachtungsweise in der Verwendung des Begriffes „horizontal“: Ein Protokoll regelt die horizontale Kommunikation zwischen Partnerinstanzen der selben Schicht, nicht eine als gemäß dem eingeführten Sprachgebrauch „diagonal“ zu bezeichnende Kommunikation zwischen Instanzen unterschiedlicher Schichten.

- Kommunikation, die zwischen Objekten unterschiedlicher Hierarchieebenen bzw. benachbarter Schichten eines Systems stattfindet, heißt analog vertikale Kommunikation. Da sie zwischen Objekten unterschiedlicher Wertung stattfindet, wird sie als Dienstleistungsbeziehung aufgefaßt, in der es einen Dienstnehmer (Client) und einen Diensterbringer (Server) gibt. Die Regeln, die einen solchen Kommunikationstyp bestimmen, sind durch sogenannte Dienstprimitive festgelegt. Übliche Dienstprimitive sind (Dienst-) Anforderung (Request), (Anforderungs-) Anzeige (Indication), (Anforderungs-) Beantwortung (Response) und (Anforderungs-) Bestätigung (Confirmation).

  Wie im Alltag auch – beispielsweise bei der Post in der Schalterhalle –, werden Dienste an bestimmten, vereinheitlichten Stellen angeboten und in Anspruch genommen, an den sogenannten *Dienstschnittstellen* und dort genauer in den *Dienstzugangspunkten (Service Access Points, SAP).* In den Dienstzugangspunkten werden die notwendigen Informationen über vereinheitlichte Vorgänge, nämlich die Dienstprimitive, zwischen den Instanzen der beteiligten beiden Schichten ausgetauscht.

2.2.4 Das Open-System-Interconnection Basis-Referenzmodell der ISO

Ein nach den vorgenannten Prinzipien für die Kommunikation zwischen unterschiedlichen, technischen Systemen eingeführtes Standard-Modell liegt im *Basisreferenzmodell* der International Standardization Organisation (ISO) für die Verbindung offener Systeme

(Open System Interconnection) vor, das kurz *ISO-OSI-BRM* oder nur *OSI* genannt wird und im ISO IS 7498[10] festgelegt ist /ISO84/.

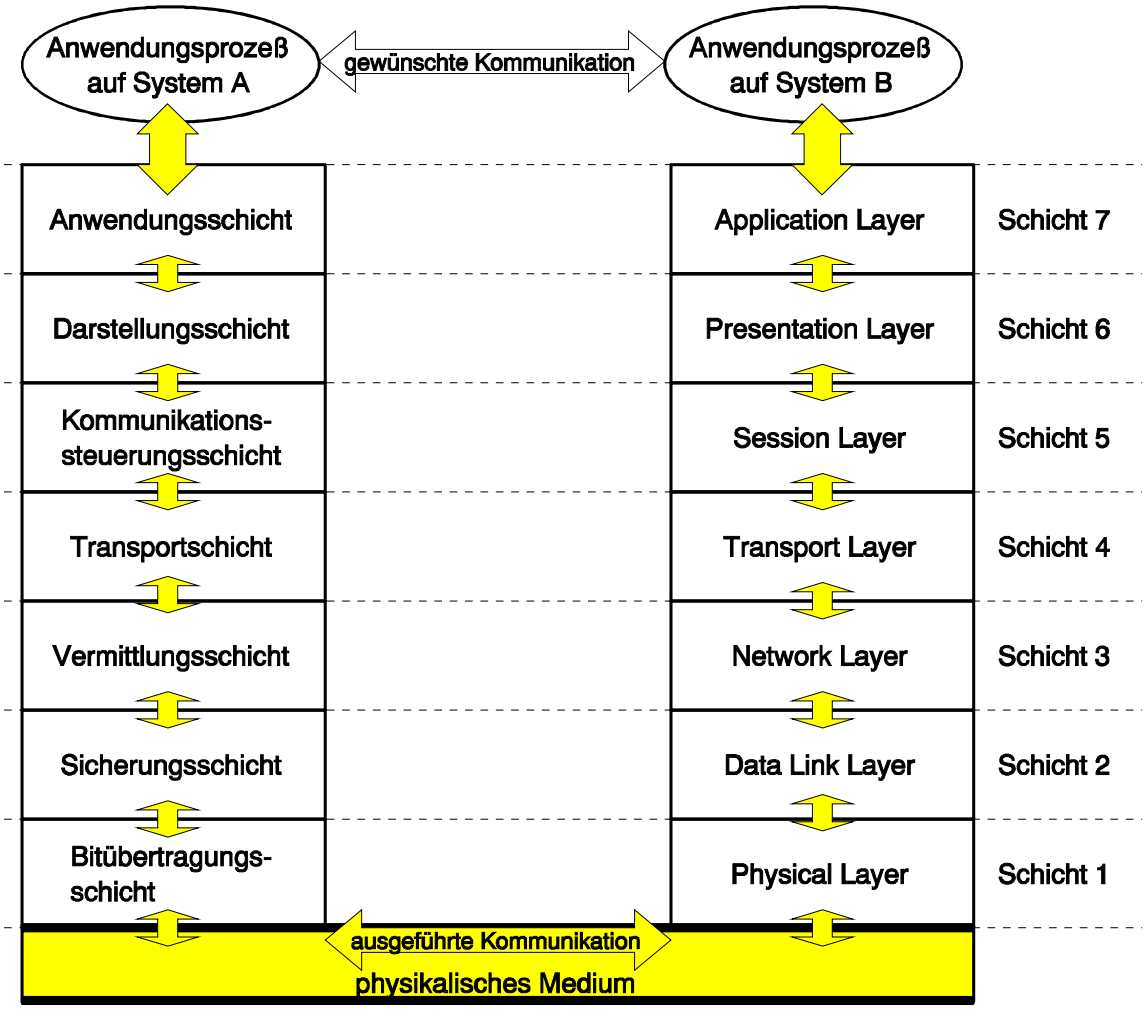

Abbildung 2.5: Kommunikation im OSI-Basisreferenzmodell der ISO

Es fordert als Voraussetzung für die Kommunikation zweier Systeme eine bestehende physikalische Verbindung in dem Sinne, daß es möglich sein muß, einen physikalischen Kommunikationskanal zum Datentransport, wenn auch nur zeitweise und kurzfristig, zwischen den kommunizierenden Partnern einzurichten.

Wie in Abbildung 2.5 zu sehen ist, wird hier eine Struktur von sieben funktionalen Schichten[11] für einen Kommunikationsakt in jedem der kommunizierenden Systeme durchlaufen.

Eine Instanz einer Schicht der Nummer N + 1 in einem offenen System benutzt die von der Schicht mit der Nummer N an der Dienstschnittstelle mit der Nummer N zur Verfügung gestellte Funktionalität zur Datenübertragung einer bestimmten Qualität, um mit einer

[10] Die Standards der ISO werden klassifiziert in *DIS, Draft International Standards*, also Standardisierungs-Entwürfe, und in *IS, International Standards*, also verbindliche internationale Normen.

[11] Die Namen der sieben Schichten sind für den deutschen Sprachgebrauch leider nicht einheitlich übersetzt: für den **Physical Layer** ist neben **Bitübertragungsschicht** auch die Bezeichnung **Physikalische Schicht** üblich, für **Network Layer** neben **Vermittlungsschicht** auch **Netzwerkschicht**, für **Session Layer** neben **Kommunikationssteuerungsschicht** auch **Sitzungsschicht**.

gleichrangigen, also in der gleichen Schicht N + 1 angesiedelten Instanz auf einem anderen offenen System zu kommunizieren. Letztendlich wird durch diese „virtuelle“ Kommunikation der Peer-Instanzen die Funktionalität der entsprechenden Schicht N + 1 realisiert, die wiederum von einer Instanz der nächsthöheren Ebene N + 2 benutzt werden kann. Die Kommunikation zwischen den Peer-Instanzen erfolgt dabei nach einem für diese Schicht festgelegten Protokoll, welches die jeweils ausgetauschten Dateneinheiten, sogenannte *Protokolldateneinheiten (Protocol Data Units, PDU)* in Format und Bedeutung festlegt.

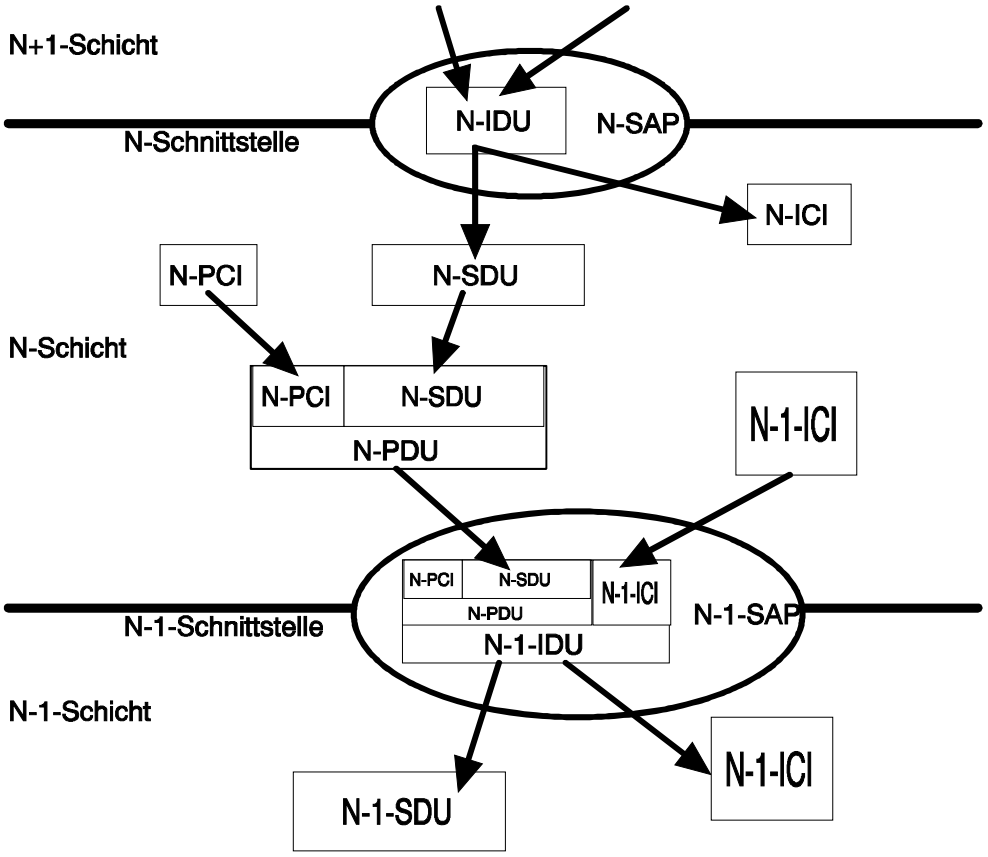

Abbildung 2.6: Fluß der Dateneinheiten beim Zusammenwirken der Schichten im OSI-BRM

Charakteristisch für das Schichtprinzip ist, daß die Art und Weise, wie die Schicht N den gewünschten Dienst für die Schicht N + 1 erbringt, nach dem Geheimnisprinzip realisiert ist. Dies ermöglicht die früher geforderte Flexibilität solcher Schichtungen, indem, bei Beibehaltung von Schnittstellen und Funktionalität, Schichten durch beliebige Äquivalente ausgetauscht werden können.

Die Layer-N + 1-Instanz hat allein über die Dienstschnittstelle Zugriff auf die angebotene Funktionalität. Der tatsächliche Datenaustausch wird deswegen zwischen den Schichten über ein festgelegtes Datenformat abgewickelt. Die Dateneinheiten werden entsprechend ihrer Aufgabe *Schnittstellen-Dateneinheiten (Interface Data Units, IDU)* genannt und zur Kennzeichnung, welcher Schicht sie zuzuordnen sind, mit einem der Dienstschnittstelle entsprechenden Präfix versehen[12].

[12] Üblich sind die Initialen der englischen Schichtbezeichnungen: Phy-, D-, N-, T-, S-, P-, A-, also etwa T-PDU, Phy-SDU, N-IDU. Gleiche Präfixe finden auch bei der Bezeichnung der Dienstelemente Verwendung, etwa T-Connect.req, P-Data.ind, ...

Die Informationen der IDU, die nur für den Moment der Datenübergabe an der Schnittstelle benötigt werden, sogenannte *Schnittstellen-Kontrollinformation (Interface Control Information, ICI)* werden in der diensterbringenden Schicht N abgetrennt. Die Dateneinheit liegt in der Schicht selbst damit in nochmals veränderter Form als sogenannte *Dienst-Dateneinheit (Service Data Unit, SDU)* vor.

Die SDU wiederum wird in der Schicht N mit Verwaltungsinformationen versehen, die die Peer-Instanz zur Erfüllung ihrer Funktion benötigt, sogenannten *Protokoll-Verwaltungsdaten (Protocol Control Information, PCI).* SDU mit zugehöriger PCI bildet die eigentliche PDU der Schicht N.

Als typisch für geschichtete Kommunikationssysteme kann aus der voranstehenden Betrachtung herausgestellt werden:

- Abwicklung horizontaler Kommunikation über Dienstbenutzung;
- strenge Gliederung der Dienstfunktionalität in Schichten;
- *Kapselung*: Daten werden beim Durchlaufen der Schichten nach unten zunehmend mit Overhead versehen, der beim Durchlaufen des Partner-Stapels wieder schichtweise entfernt werden muß;
- Schichtimplementierung nach dem Geheimnisprinzip, Nutzung einer Schicht nur über die Schnittstellen.

2.3 Telemanipulation — Verbindung von Regelung mit ausgeprägter Kommunikation

Wurde dem kommunikativen Aspekt bei der Regelung im Abschnitt 2.1 noch keine Bedeutung beigemessen, so ist dies bei der Telemanipulation notwendig, bei der die Regelstrecke vom Regler beliebig weit entfernt sein kann und bei der insbesondere der Regler ein Regelalgorithmus auf einem Digitalrechner sein kann.

Es sei deswegen der in Abbildung 2.2 gezeigte Regelkreis zu einem digitalen Regelkreis konkretisiert /ReLe94/:

- Zunächst wird davon ausgegangen, daß Stellglied und Meßglied den vom Wesen her analogen Prozeß auch analog beeinflussen bzw. überwachen. In einem Endoskop-Positionierungssystem beispielsweise sind die Stellglieder Servo-Motoren, die die Achsen der Positioniermechanik stellen, als Meßglied tritt unter anderen auch ein am Kernforschungszentrum entwickelter *Mikro-Kraft/Momenten-Sensor (KMS)* auf /HoTr93/.
- Darüber hinaus wird davon ausgegangen, daß die Regelung selbst, also zum einen die Erzeugung von Soll-Werten und zum anderen der Abgleich mit den gemessenen Ist-Werten, von einem *Regelalgorithmus* auf einem digitalen Steuerrechner ausgeführt wird.
- Zur Umsetzung der Daten aus der digitalen Steuerung in die analoge Prozeßwelt werden dafür zusätzlich *D/A-* und *A/D-Wandler* benötigt. Sie führen eine Diskretisierung des Wertebereiches der Steuergrößen durch.
- Eine Diskretisierung des Zeitbereiches der Steuergrößen führen das *Halteglied* in der Richtung von zeitdiskret nach zeitkontinuierlich und der *Abtaster* in der umgekehrten Richtung durch.

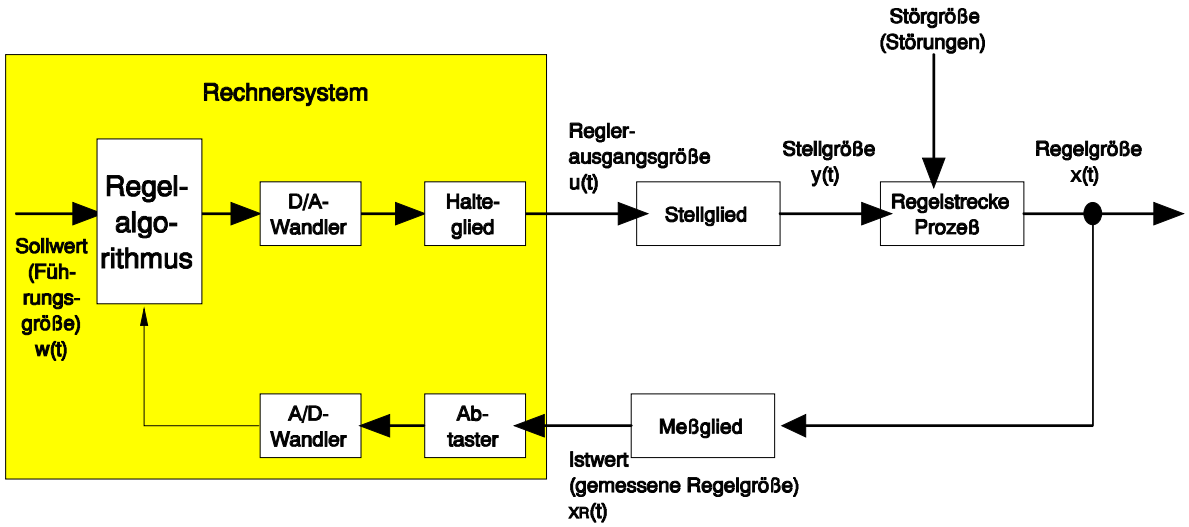

Abbildung 2.7: Digitale Regelung mit einem Steuerrechner

In dem für die Telemanipulation signifikanten Schritt kann nun der lokale Regelalgorithmus außerdem in ein weiteres, entferntes System verbracht werden.

Ihm wird dazu in dem beherbergenden System ein „Store-and-Forward“ Mitteilungssystem beigestellt, das hier salopp als „*Mailbox*“ bezeichnet werden soll /TiPr92, Wett93/. Primär dient sie zur Entkopplung der beiden beteiligten technischen Systeme auf Anwendungsebene im Sinne der Prozeßsynchronisation, Synchronisationsfragen können nun für das Kommunikations-Subsystem separat gelöst werden. Die Mailbox bekommt vom Regelalgorithmus berechnete Stellwerte in einem ausgezeichneten Speicherbereich abgelegt („Store“) und sorgt mit Hilfe spezifischer Telekommunikationsprotokolle für die Ablieferung („Forward“) beim Steuerrechner des technischen Prozesses. Daten in den Mailboxen werden vom Anwendungsprozeß im *Pollingverfahren* abgerufen. Geeignet ist dieses Verfahren jedoch nur für technische Prozesse mit einer geringen Zahl von Informationskanälen, die durch die eingeführte Verteilung zu kommunikativen Außenbeziehungen werden. Liegen sehr viele Interaktionswünsche von Geräten zum Regelalgorithmus vor, die nicht deterministisch eingehen, ist durch die programmgesteuerte Interaktion (Polling) eine zu starre Betriebsform vorgegeben. Für derartige Ansprüche muß auf die Mailbox-Kopplung verzichtet werden und eine entsprechende Unterbrechungsbehandlung (z. B. über das Konzept des *Vorrangdatenverkehrs*) im Kommunikationssubsystem berücksichtigt werden.

An die Stelle des Regelalgorithmus in der schematischen Abbildung 2.7 tritt bei der Telemanipulation nun ebenfalls eine Mailbox mit einem entsprechenden Ablieferungsprozeß, der zyklisch nach neu angekommenen Nachrichten sieht (*Polling*) und diese über den D/A-Wandler an die Stellglieder weitergibt und der die über den A/D-Wandler erhaltenen Meßwerte über die Mailbox mit ihrem Telekommunikationsprotokoll „an den Regelalgorithmus“ (eigentlich an „seine“ Mailbox) versendet. Damit ist die Synthese von Regelung und Telekommunikation erreicht (Abbildung 2.8). Es bleibt jedoch anzumerken, daß das gezeigte Konzept idealtypisch zu verstehen ist. Eine Realisierung wird wegen erfahrungsgemäß zu erwartenden Stabilitätsproblemen durch Totzeiten und wegen Sicherheitsaspekten (Verbindungszusammenbruch) den eigentlichen Regelalgorithmus stets im Steuerrechner belassen und nur abstrakte Sollwertvorgaben in einem vereinfachten Steueralgorithmus im Bedienrechner erzeugen. Eine Rückkopplung findet dann insbesondere über den Bediener selbst, den „man in the loop“, statt.

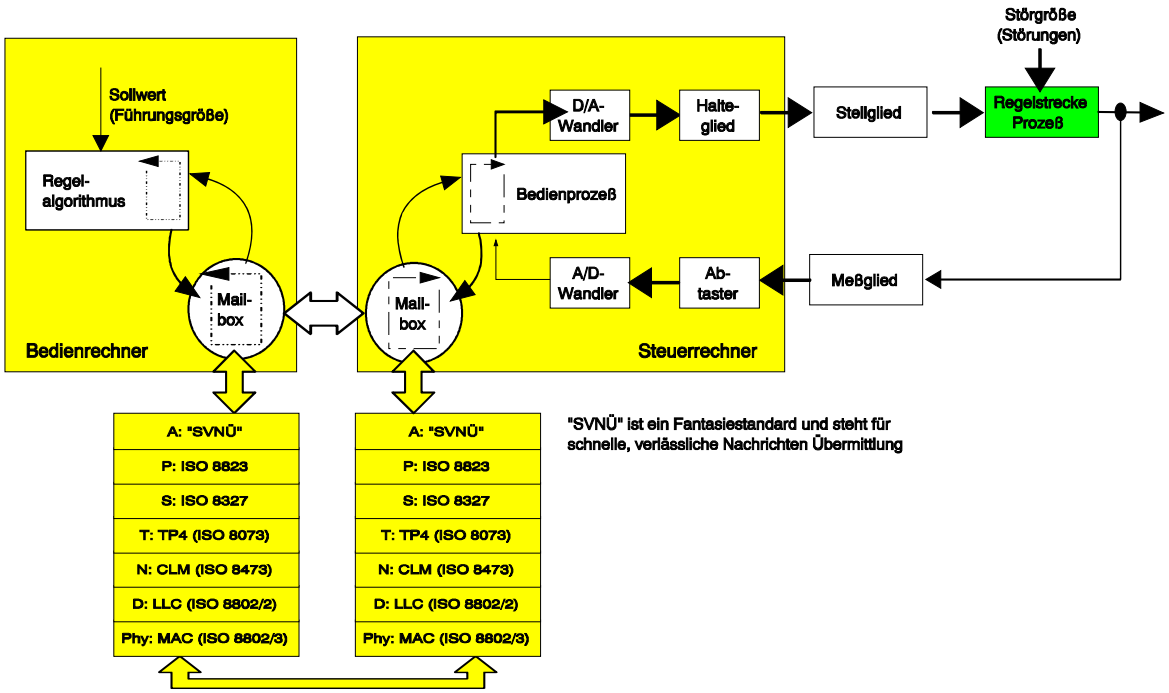

Abbildung 2.8: Telemanipulationssystem — örtliche Trennung von Regelalgorithmus und technischem Prozeß und Interaktion mit Hilfe von Mailboxen über Standard-Kommunikations-Stacks

Das Verteilen von Regelalgorithmus und technischem Prozeß ist hierbei nicht mit der herkömmlichen hierarchischen Prozeßautomatisierung zu verwechseln, bei der auch verschiedene Rechnersysteme zu unterschiedlichen Steuerungsaufgaben zum Einsatz kommen (vgl. z. B. Abbildung 4.2 auf S. 53). Die verschiedenen Rechnersysteme bei der konventionellen Prozeßautomatisierung gehören unterschiedlichen Führungsebenen, etwa der *Prozeßebene*, der *Operativebene* oder der *Leitebene* (vgl. /ReLe94/ S. 77) an, und sind so mit Steuerungs- und Optimierungsaufgaben unterschiedlicher zeitlicher Qualität und unterschiedlicher Komplexität betraut. Das verteilte Regelsystem der Telemanipulation ordnet die beteiligten Rechner auf der gleichen Führungsebene an. Darüber hinaus ist auch die vorrangige Aufgabenstellung bei einem Telemanipulationssystem eine andere als bei der Prozeßautomatisierung: Der technische Prozeß soll bei der Telemanipulation vorwiegend direkt, in Echtzeit, vom menschlichen Bediener beeinflußt werden (*MSM-Betrieb, Master-Slave-Manipulator-Betrieb*), während die Prozeßautomatisierung versucht, den Prozeß ohne Bedienereingriffe zu beeinflussen und zu kontrollieren (*Automatikbetrieb*).

3 Grundlagen des Asynchronen Transfer Modes ATM

3.1 Breitbandnetze — Netztechnik für steigende Anforderungen

3.1.1 Gewachsene Netzstrukturen und Dienste

Kennzeichen langer Phasen der Telekommunikation ist, daß jeder Telekommunikationsdienst auf einem dedizierten Medium aufbaut; für die Sprachübermittlung in einer Punkt-zu-Punkt-Kommunikation dient das öffentliche Telefonnetz, für die Datagrammdienste nach dem Store-and-Forward-Prinzip existiert ein separates Telegrafennetz (einer der ersten Telematikdienste überhaupt), Kommunikation mit *Broadcast-* oder *Multicast-Charakteristik* (*Verteildienste*) treten typischerweise im Rundfunk auf, für Datendienste existieren eigene Datennetze, die sich möglicherweise der analogen Telefontechnik bedienen.

Typisch für die Datennetze ist einerseits die Benutzung des Telefonnetzes als physikalisches Medium mit geringer Geschwindigkeit alternativ zur Nutzung einer speziellen (z. T. proprietären) Verkabelung, andererseits der Strukturwechsel bei unterschiedlichen Ausbreitungsklassen der Netze: für LANs werden andere Strukturen verwendet wie für MANs, WANs oder GANs.

Aus Sicht des einzelnen Benutzers war bislang auch charakteristisch, daß die subjektiv wahrgenommene Leistungsfähigkeit des Netzes mit der Erstreckung abnahm. Dieses Phänomen rührt von der Knappheit der für die Weitverkehrskommunikation zur Verfügung stehenden Betriebsmittel (Übertragungsleistung des Kanals, Verfügbarkeit an Kanälen, Fehlerrate der Kanäle) her, die es erforderlich macht, eine mit der Erstreckung wachsende Zahl verschiedener Verbindungen zu multiplexen, wodurch die für den Einzelnen zur Verfügung stehende Kapazität selbst bei objektiv leistungsfähigeren Kanälen schrumpft. Es ist darüber hinaus festzustellen, daß die Betriebsmittelausstattung mit wachsender Erstreckung in geringerem Maße wächst als die Anforderungen des Benutzers.

3.1.2 Integriertes, digitales Schmalbandnetz ISDN

Mit der Einführung des dienstintegrierten, digitalen Netzes *ISDN* (Integrated Services Digital Network) wurde versucht, eine Vereinheitlichung der Netztechnik in zweierlei Weise zu erwirken: zum einen sollte es ermöglicht werden, die vielfältigen Anforderungen der Kommunikation mit nur einem Netzwerk „steckerkompatibel“ zu befriedigen, zum anderen sollte die Netztechnik einheitlich für alle Erstreckungen eingesetzt werden.

Das heute etablierte ISDN, inzwischen gerne als *S-ISDN* (*Schmalband-ISDN*, englisch *N-ISDN, Narrowband-ISDN*) bezeichnet, wird von der Mehrzahl der Benutzer überwiegend als qualitativ hochwertiges Telefonnetz im klassischen Einsatz angesehen. Hier kann der Benutzer schnell die Vorteile gegenüber dem analogen Telefonnetz vor allem im Bereich der privaten *Nebenstellenanlagen* (*PBX, Private Branch Exchange*) erkennen. Im Bereich der Datenübertragung wird jedoch insbesondere im „multimedialen“ Umfeld unserer Tage mit einer Übertragungsleistung von 64 kbit/s, wie sie bei S-ISDN in einem *B-Kanal*[13] angeboten wird, schon die untere Grenze der Anforderungen repräsentiert. (Die Kanalbezeichnungen finden sich in Tabelle 3.1.)

[13] Das Präfix „B“ steht für „Benutzer“, der B-Kanal ist also der eigentliche Benutzerkanal.

Tabelle 3.1: Europäische Kanalvarianten im S-ISDN

Kanalkürzel	Kanal-Bitrate	angeboten im Anschluß
B	64 kbit/s	Basisanschluß
D_{16}	16 kbit/s	Basisanschluß
D_{64}	64 kbit/s	Primärmultiplex
H_0	384 kbit/s	Primärmultiplex
H_{12}	1920 kbit/s	Primärmultiplex (Europa)

Konfektioniert werden dem Endbenutzer in einem Basisanschluß, dem *S_0-Anschluß*, zwei B-Kanäle zu jeweils 64 kbit/s und ein *D_{16}-Kanal* für die Signalisierung (den Informationsfluß, der benötigt wird, um eine Verbindung aufzubauen) und zum paketvermittelten Datenverkehr zur Verfügung gestellt; die Obergrenze der konfektioniert erhältlichen Übertragungsleistung liegt mit dem *Primärmultiplex-Anschluß* „S_{2M}“ in Europa bei 2 Mbit/s, geteilt auf 30 B-Kanäle und einen *D_{64}-Kanal*, wobei mehrere B-Kanäle zu einem sogenannten *H-Kanal (Highspeed-Kanal)* gebündelt werden können (Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: Konfektioniertes Leistungsangebot bei S-ISDN

Anschluß	Brutto Bitrate	Kanalstruktur
S_0 (Basisanschluß)	192 kbit/s	$2 \times B + D_{16}$
S_{2M} (Primärmultiplex-Anschluß Europa)	2048 kbit/s	$30 \times B + D_{64}$ $5 \times H_0 + D_{64}$ $1 \times H_{12} + D_{64}$

Vergleicht man in dieser Hinsicht die seit den achtziger Jahren eingeführten klassischen LAN-Konzepte (CSMA/CD IEEE 802.3, Token-Ring IEEE 802.5 und Token-Bus IEEE 802.4) mit einer geteilten Gesamtübertragungsleistung von 10 Mbit/s bis 16 Mbit/s, würde ein Wechsel auf S-ISDN häufig und zumindest im LAN-Sektor einen Rückschritt bedeuten. S-ISDN hat jedoch als Datenübertragungsdienst im Weitverkehrsbereich seinen festen Platz. /HäHu94/.

3.1.3 IBCN – ISDN-Anpassung an wachsende Anforderungen

In Fortführung des ISDN-Konzeptes wird ein an die steigenden Leistungsanforderungen angepaßter Dienst entwickelt: das *Integrierte Breitband Kommunikationsnetz (IBCN, Integrated Broadband Communication Network)* oder *B-ISDN (Breitband-ISDN).*

Einerseits wird damit versucht, neue Technologien wie das Bildtelefon an den Arbeitsplatz der Benutzer zu bringen, andererseits hat man im Sinn, die bisherigen Massenkommunikationsdienste wie Rundfunk und Fernsehen, ggfs. um eine interaktive Komponente (*Video on Demand, VoD*) bereichert, über das gleiche Medium zu den Endgeräten zu bringen; das derzeit allgegenwärtige Schlagwort „Informations-Highway“ sei dafür ein Beleg. Dies sind sicherlich charakteristische Anwendungen, die eine hohe Übertragungsbandbreite bis zum Endgerät benötigen (vgl. Tabelle 3.3). Man sollte dennoch nicht übersehen, daß der „normale“ Datennetzbenutzer mit der ihm bislang schon in den LAN-Technologien zur Verfügung gestellten Bandbreite hinreichend bedient wird. Deswegen sind die Arbeiten für ein Breitbandnetz an zwei Zielen orientiert:

- ❑ Einführung eines einheitlichen Netzes für alle Erstreckungen und Diensttypen von Endsystem zu Endsystem (aus den S-ISDN-Bestrebungen übernommen);
- ❑ Flexible Skalierbarkeit des Netzanschlusses entsprechend der aktuellen, tatsächlichen Bedürfnisse des Endbenutzers.

Tabelle 3.3: Übersicht über die Eigenschaften typischer Breitbandanwendungen

		Anwendungen (s. Legende unten)									
Diensteigenschaft		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
Übermittlungsrate	≤ 16 Mbit/s	☑		☑	☑	☑	☑	☑		☑	
	≤ 30 Mbit/s			☑	☑		☑	☑	☑		☑
	≥ 100 Mbit/s		☑						☑		☑
Verkehrseigenschaften	CBR	☑				☑	☑	☑	☑	☑	☑
	VBR					☑	☑	☑		☑	☑
	burstartiger Verkehr		☑	☑	☑		☑	☑			
Verkehrsbeziehung	Punkt-zu-Punkt	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑		
	Punkt-zu-Mehrpunkt	☑		☑	☑	☑	☑		☑	☑	☑
	Verteilung									☑	☑
Symmetrie	unidirektional				☑		☑		☑	☑	☑
	bidirektional asymmetr.		☑	☑				☑			
	bidirektional symmetr.	☑	☑	☑		☑	☑				
Verbindungsbeziehung	verbindungsorientiert	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
	verbindungslos			☑	☑		☑	☑		☑	☑

(überarbeitet nach /Sieg94/)

Legende: ① Telefonie (als typische S-ISDN-Anwendung), ② Supercomputer-Kopplung, ③ Schnelle LAN-Kopplung, ④ Standbildübertragung, ⑤ Videokonferenz, ⑥ Multimedia-Verbindungen, ⑦ Multimedia-Abrufdienste (VOD, Video on Demand), ⑧ TV-Programmaustausch zwischen Studios, ⑨ Programmverteilung im herkömmlichen TV, ⑩ HDTV-Programmverteilung (High Definition Television)

Für die Konzeption des Breitbanddienstes wurden insbesondere die weit verbesserten Leistungsdaten (Übertragungskapazität, Dämpfung, Bitfehlerrate) heutiger Netztechnologie (Leitungen, aktive Komponenten) berücksichtigt. In den siebziger und achtziger Jahren bei der Entwicklung der heute noch eingesetzten Konzepte stand vor allem die Kompensation der Technologiemängel im Zentrum und führte zu einer Vervielfachung bestimmter Funktionen auf alle Schichten der Kommunikationshierarchie. Die heutige Technologiegüte und die wachsenden Anforderungen führen zu einem z. B. gegenüber OSI vereinfachten „3-Komponenten-Modell“, das die Abwicklung der Kommunikation mit höherer Flexibilität und geringerer Redundanz durch Komponenten, die nur drei Ebenen zugeordnet sind, ermöglicht, nämlich (nach /KrZi93/):

- ❑ die anwendungsbezogene Komponente,
- ❑ die transportorientierte Komponente und
- ❑ die netzbezogene Komponente.

Aus dieser vereinfachten Betrachtung heraus haben sich die heutigen Hochgeschwindigkeitsnetze wie IBCN, DQDB oder SMDS entwickelt. Anders als bei früheren Ansätzen, wo von einer zur Verfügung stehenden Technologie ausgehend, Techniken zur

angemessenen Nutzung der Technologie entwickelt wurden, konnte dabei auch von den Anwendungen ausgegangen werden.

Die Anforderungen für ein modernes Netz lauten schlagwortartig /LaEp94/:

- Semantische Transparenz – die Anzahl der Übertragungsfehler liegt unterhalb einer definierten Schwelle, so daß davon ausgegangen wird, daß Informationen durch den Transport im Netz nicht verfälscht werden.
  (Typische Wahrscheinlichkeiten sind beispielsweise bei SMDS: unentdeckte Bitfehler – 10^{-10}, verfälschte Empfänger – $5 \cdot 10^{-8}$, verlorene Pakete – 10^{-4} /Pryc94/.)
- Zeittransparenz – die Verzögerung (Delay) und Varianz der Verzögerung zwischen Einlieferung am und Auslieferung vom Netz liegt unterhalb einer definierten Schwelle.
- Isochronität – eine in einem bestimmten Zeitraster eingelieferte Information verläßt das Netz bei der Auslieferung im gleichen Raster. (Schwankungen im Zeitraster werden als Jitter bezeichnet.)
  Für die bisher genannten Entwurfsziele wird von typischen Anwendungen gefordert:

Tabelle 3.4: Hinreichende Übertragungsqualitäten für typische Anwendungen

Anwendung	akzeptable Bitfehlerrate	akzeptable Paketverlustrate	akzeptable Fehlleitungsrate	akzeptable Verzögerung
Telefonie ohne Echosperre	10^{-7}	10^{-3}	10^{-3}	25 ms
Telefonie mit Echosperre	10^{-7}	10^{-3}	10^{-3}	500 ms
konventionelle Datenübertragung	10^{-7}	10^{-6}	10^{-6}	≥ 1000 ms
Videoverteilung	10^{-6}	10^{-8}	10^{-8}	1000 ms
Videoüberwachung	10^{-6}	10^{-8}	10^{-8}	250 ms
HiFi-Tonverteilung	10^{-5}	10^{-7}	10^{-7}	1000 ms
HiFi-Tonüberwachung	10^{-5}	10^{-7}	10^{-7}	250 ms
Prozeßfernsteuerung	10^{-5}	10^{-3}	10^{-3}	1000 ms
Prozeßfernsteuerung mit Kraftreflexion	10^{-5}	10^{-3}	10^{-3}	200 ms

(nach /Pryc94/, ergänzt)

- Als letztes Entwurfs-Schlagwort sei noch die Skalierbarkeit genannt: die Kapazität des Übertragungskanales sollte möglichst exakt dem Bedarf der Anwendung angepaßt sein.

3.2 Prinzipien von ATM-Netzen

Die Grundlage der genannten Netze sind schnelle Übermittlungsverfahren, die von der Zuverlässigkeit heutiger Übermittlungsstrecken profitieren. Das Vermittlungsverfahren des *Asynchronen Transfer Modus (ATM)* vereint dabei die Vorteile der *Leitungsvermittlung* (*Circuit Switching*) mit denen der *Paketvermittlung* (*Packet Switching*). Hierbei wird zusätzlich versucht, alle anfallenden Daten möglichst transparent zu übertragen und notwendige Prüfungen erst auf Seiten des empfangenden Endgerätes durchzuführen.

3.2.1 Topologie und logische Struktur von ATM-Netzen

(physikalische Schicht, ATM-Schicht, Ebenenmanagement)[14]

Auf ATM basierende Netze sind von ihrer logischen Struktur und der Netztopologie her teilvermaschte Netze, in denen Daten zwischen den Knoten über gerichtete physikalische Verbindungen weitergereicht werden. Die Knoten sind dabei aktiv in das Netz eingebunden. Am Rande des Netzes befindliche Knoten repräsentieren die Endgeräte der Teilnehmer (in Abbildung 3.1 mit abgerundeten Ecken und kleinen Buchstaben bezeichnet), die rein vermittelnden Knoten im Transitsystem werden als *Switches* (Vermittlungsknoten) und *Cross-Connects* (Durchschalter) (in Abbildung 3.1 nicht unterschieden, als Rechtecke mit großen Buchstaben) bezeichnet.

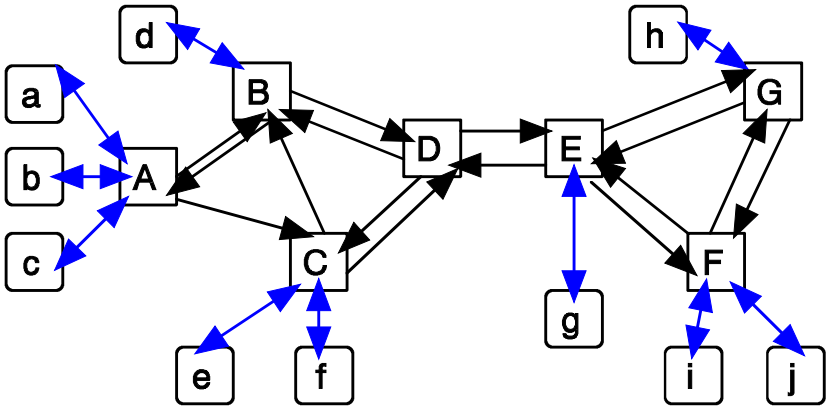

Abbildung 3.1: Schematische Struktur eines ATM-Netzes mit teilvermaschten Knoten

Bei der Einführung ATM-basierter Netze wird eine Migrationsstrategie unterstützt, die die Teilnehmer vor hohen Investitionen dadurch schützt, daß sie bestehende Netzinfrastrukturen weiterbenutzen können und ATM zunächst als *„Backbone“,* als schnelles *Koppelnetz*, einsetzen. Die in Abbildung 3.1 dargestellten Endsysteme sind deswegen häufig sogenannte *Zugangsnetze* konventioneller Art. Bei ATM werden dementsprechend auch zwei Schnittstellen unterschieden:

- die Benutzer-Netz-Schnittstelle, User Network Interface UNI, (Doppelpfeile in Abbildung 3.1) und
- die Netz-Netz-Schnittstelle zwischen ATM-Vermittlungsknoten, Network Node Interface NNI, (unidirektionale Pfeile in Abbildung 3.1).

Voraussetzung der bidirektionalen Kommunikation in einem solchen Netz ist, daß zwischen den zukünftigen Partnern sowohl in der Hin- wie auch in der Rückrichtung eine Verbindung auf existierenden Teilstrecken ausgebildet werden kann. Dies ist in jedem Fall dann möglich, wenn der das Netz repräsentierende *Digraph stark zusammenhängend*[15] ist. Anders formuliert ist eine Kommunikation nur zwischen Knoten innerhalb einer *starken Zusammenhangskomponente* des Netzes möglich.

Durch die aktive Einbindung der Knoten über gerichtete physikalische Leitungen besteht in ATM-Netzwerken auf dieser Betrachtungsebene keine Konkurrenz um den Medienzugriff, da das Medium nur zwei Partnern in festgelegten, sich gegenseitig ausschließenden Rollen

---

[14] In dieser Weise werden hier und in den folgenden Abschnitten Schichtzuordnungen zum Referenzmodell des B-ISDN angegeben, das erst später eingeführt wird.

[15] *Digraph* steht für *Directed Graph, gerichteter Graph*. Die entsprechenden Definitionen finden sich in der Standardliteratur zu Algorithmen und Datenstrukturen, etwa bei /OtWi93/ in Kapitel 8 oder /CoLe90/.

(aktiv, Sender, und passiv, Empfänger) zuzuordnen ist. Im Gegensatz zu busorientierten Netzen wie Ethernet oder ALOHA, bei denen indeterministisch mehrere Partner einen Zugriff versuchen können, geschieht die Medienvergabe in ATM also deterministisch.

Die Kommunikation in ATM ist also schon von der Topologie her verbindungsorientiert, was den Verbindungsaufbau in einer der eigentlichen Kommunikation vorlaufenden Phase der *Signalisierung (Signalling)* erfordert.

3.2.2 Synchroner Transfer Modus STM

Im S-ISDN wurden für die typischen Dienstbenutzer Datenraten festgelegt, mit denen grob dienstangepaßt übertragen werden konnte (Fernsprechkanal B, „Hochgeschwindigkeitskanäle“ H). Dabei ging man im Wesentlichen von Anwendungen mit konstanter Bitrate aus.

Als geeignete Übertragungstechnik wurde der *Synchrone Transfer Modus (STM)* angesehen, bei dem größere Datenpakete konstanter Länge*, Frames (Rahmen oder Übertragungsrahmen)* genannt, in relativ kleine Untereinheiten konstanter Länge, *Slots (Schlitze),* aufgeteilt werden.

Bei der in S-ISDN ebenfalls verbindungsorientiert ablaufenden Kommunikation wurde im Rahmen der Signalisierung beim Verbindungsaufbau festgelegt, welche Slots in **jedem** Frame einer bestimmten Verbindung zuzuordnen sind. Dieses Prinzip der *virtuellen Verbindung (VC, Virtual Circuit)* – das in ähnlicher Weise schon in klassischen Paketvermittlungsnetzen wie X.25 eingesetzt wird – ermöglicht es, auf einem physikalischen Kanal hoher Kapazität im Zeitmultiplex mehrere logische Kanäle geringerer Kapazität einzurichten. Die Nutzdaten einer bestimmten Verbindung werden zum Zeitpunkt ihres Entstehens auf festen, beim Verbindungsaufbau festgelegten Routen durch das Netz transportiert; zur Unterscheidung der virtuellen Verbindungen auf einem Übermittlungsabschnitt wird ihnen beim Verbindungsaufbau eine eindeutige Kennung zugewiesen, der sogenannte *Virtual Channel Identifier (VCI).* Während der Zeit, in der keine Nutzdaten zur Übertragung anliegen, ist nicht der gesamte physikalische Kanal blockiert (wie etwa beim Raummultiplex der Durchschaltevermittlungen), sondern nur der für die virtuelle Verbindung reservierte Teil, der verbleibende Teil kann für andere virtuelle Verbindungen zur Verfügung gestellt werden.

Um das vorgenannte Prinzip zu realisieren, hat bei STM jede Verbindung in jedem Frame an der selben Stelle ihre Slots, die die Datenportionen aufnehmen. Da die Frames in einem konstanten Zeitraster (alle 125 µs) über das Medium übertragen werden, stehen auch der Datenquelle auf Anwendungsebene in festem zeitlichen Raster Slots zur Verfügung, womit eine synchrone Übertragung mit *konstanter Datenrate (CBR, Constant Bit Rate)* realisiert ist. Liegen in einem Zeitabschnitt keine Daten zur Übertragung an, bleiben die reservierten Slots leer.

3.2.3 Asynchroner Transfer Modus ATM

3.2.3.1 Vereinfachtes Paketvermittlungsverfahren

(ATM-Schicht, ATM-Anpassungsschicht)

Der *Asynchrone Transfer Mode (ATM)* ist ein spezielles Übermittlungsverfahren, das auf einem vereinfachten, verbindungsorientierten Paketvermittlungsverfahren basiert. Die Vereinfachung beruht auf den früher genannten Betriebsmerkmalen:

- Verzicht auf die Fehlersicherung auf den Übermittlungsabschnitten wegen der Zuverlässigkeit moderner Leiter.
- Verzicht auf Flußsteuerung auf den Übermittlungsabschnitten. (Herkömmliche Quittungsverfahren sind wegen der hohen Übertragungs- und Verarbeitungsgeschwindigkeit nicht praktikabel: Puffergrößen!)
- Verbindungsbezogene Betriebsweise: Festlegung des Übermittlungsweges beim Verbindungsaufbau und Reservierung der benötigten Betriebsmittel, beispielsweise in einem „Verkehrsvertrag“ (Traffic Contract).

Die Bezeichnung „asynchron“ beschreibt die Tatsache, daß die Übertragungsrate, die von einer Datenquelle auf Anwendungsebene benötigt wird, anders als beim STM entkoppelt ist von der Übertragungsrate der Pakete auf physikalischer Ebene; die physikalische Bitübertragung kann dennoch synchron erfolgen.

3.2.3.2 ATM-Zellstruktur

(ATM-Schicht)

Zur begrifflichen Unterscheidung von älteren Konzepten werden die ATM-Pakete als *Zellen* bezeichnet. Zellen sind vergleichsweise kurze Pakete fester Länge (53 Oktette), was den Overhead zur Längenangabe oder Endebegrenzung erspart. Jede Zelle besteht aus einem *Kopffeld* für die Verwaltung (5 Oktette) und aus einem *Informationsfeld*, das die Nutzdaten enthält (48 Oktette).

Die von der SG XVIII (Subgroup XVIII der ITU-T) im Juni 1989 so festgelegte Zellgröße ist dabei als ein Kompromiß zwischen den amerikanischen und den europäischen Kommissionsmitgliedern zu sehen. In Amerika steht die Datenübertragung eher im Vordergrund der Überlegungen, für die längere Zellen (64 + 5 Oktette) von Vorteil sind, in Europa eher die Sprachübertragung, für die sich kurze Zellen (32 + 5 Oktette) besser eignen.

Durch diese Struktur wird ein Teil der physikalischen Übertragungskapazität der Nutzdatenübertragung entzogen, der Wert liegt bei ATM bei einem Overhead von 9,4 %, im Vergleich dazu bei STM durch die Haltung der Verbindungsdaten in externen Tabellen der Vermittlungssysteme bei nur 3,7 %.

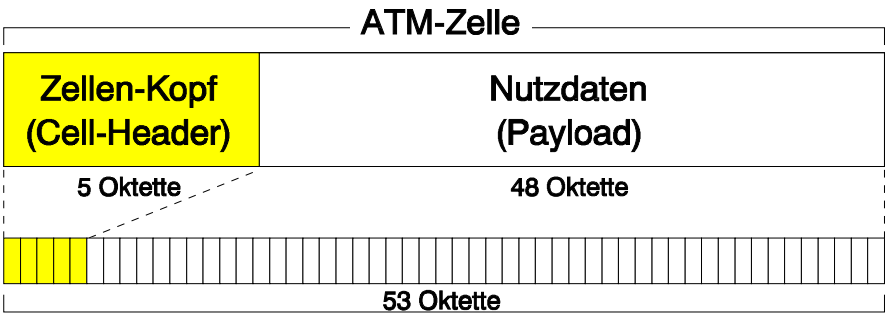

Abbildung 3.2: Prinzipieller Aufbau einer ATM-Zelle

ATM ist mit STM nahe verwandt, denn auch bei den in ATM übertragenen Zellen kommt das Prinzip der virtuellen Verbindung zur Anwendung. Der Zellenkopf dient dabei zur Unterbringung des VCI. Im Gegensatz zum STM ist die Zuordnung von Zellen zur Verbindung jedoch nicht mehr von vornherein festgelegt, so daß bei schwankendem Datenaufkommen *(VBR, variable Bitrate, Variable Bit Rate*) durch bedarfsgerechte Zuteilung von Zellen zur Verbindung eine höhere Auslastung des Mediums erreicht werden kann (*statistisches Multiplexen*).

Nach dem Verbindungsaufbau erfolgt der Transport der ATM-Zellen allein aufgrund der im Zellenkopf enthaltenen Kennzeichnungen. Dabei wird noch zwischen der Kennzeichnung des *virtuellen Kanals (VC)* und des *virtuellen Pfades (VP)* oder *Kanalbündels* unterschieden. In einem virtuellen Pfad sind mehrere virtuelle Kanäle mit gleicher Zielrichtung zusammengefaßt, so daß in bestimmten Netzelementen, den Cross-Connects, eine schnellere Lenkung der Zellen möglich ist, da nur der *VPI (Virtual Path Identifier)* als Teil der gesamten Zieladresse untersucht werden muß. Hier wird auch die früher eingeführte Unterscheidung von Switches und Cross-Connects verständlich: während Cross-Connects nur aufgrund der VPI-Werte vermitteln, werten Switches zusätzlich noch den VCI der Zellen aus (s. auch Abbildung 3.5 auf Seite 38).

Der Zellenkopf ist insgesamt in sechs weitere Informationsfelder gegliedert:

- Die virtuelle Kanalnummer VCI in einer Länge von 16 Bit.

  (ATM-Schicht)

  Ein Kanal wird bei ATM bidirektional aufgebaut und hat deshalb in beiden Richtungen den selben VCI. Ein VCI wird jeweils nur für einen Übermittlungsabschnitt festgelegt, wird also von den Switches bei der Leitung durch das Netz auf den Übermittlungsabschnitten verändert.
- Die virtuelle Kanalbündelnummer VPI in den Längen 12 Bit auf Übermittlungsabschnitten des NNI und 8 Bit am UNI.

  (ATM-Schicht)
- Das ***Generic Flow Control (GFC)*** **Feld** am UNI, das den Raum der vier hier nicht verwendeten VPI-Bits am NNI einnimmt.

  (ATM-Schicht)

  GFC dient der Steuerung und der Erzielung von Fairness beim Zugriff der Netzwerkbenutzer.
- Eine Kennzeichnung der Informationsfeldart (***Payload Type Identifier, PTI***) von 3 Bit Länge.

  (ATM-Schicht, Control-Plane)

  Im Konzept von ATM ist das Netzmanagement integriert. Die dafür notwendigen Managementinformationen werden über die Payload in den Zellen im ATM-Netz propagiert. Managementzellen werden deshalb mit Hilfe des *Payload Types (PT)* von den Netzelementen interpretiert.
- Das Prüffeld für die Erkennung und Behebung von Fehlern im Kopffeld (***Header Error Control, HEC***) mit 8 Bit Länge.

  (physikalische Schicht)

  Bei ATM wird aus Gründen der Verarbeitungsgeschwindigkeit auf die Überprüfung der Nutzdaten in den Switches verzichtet, es wäre jedoch ineffizient, ganz auf eine Fehlerprüfung in den Switches zu verzichten. Treten Bitfehler im Cell-Header unerkannt auf, führen die für die Zellenleitung notwendigen, verfälschten Informationen zu einem vermehrten Verkehr, einmal durch die Leitung an falsche Empfänger, die die Zellen verwerfen müssen, zum anderen durch die Wiederholung der beim eigentlichen Empfänger ausstehenden Zellen. Es ist deshalb sinnvoll, Fehlleitungen durch eine HEC nach Möglichkeit zu korrigieren oder durch frühzeitiges Erkennen eine weitere Ausbreitung und Verkehrsbelastung zu verhindern.
- Das ***Cell Loss Priority (CLP)*** Bit, über das angezeigt werden kann, daß eine Zelle Payload geringerer Wichtigkeit transportiert und die Zelle im Bedarfsfall verworfen werden darf.

  (ATM-Schicht)

Die Anordnung der genannten Felder im Zellenkopf ist in Abbildung 3.3 gezeigt.

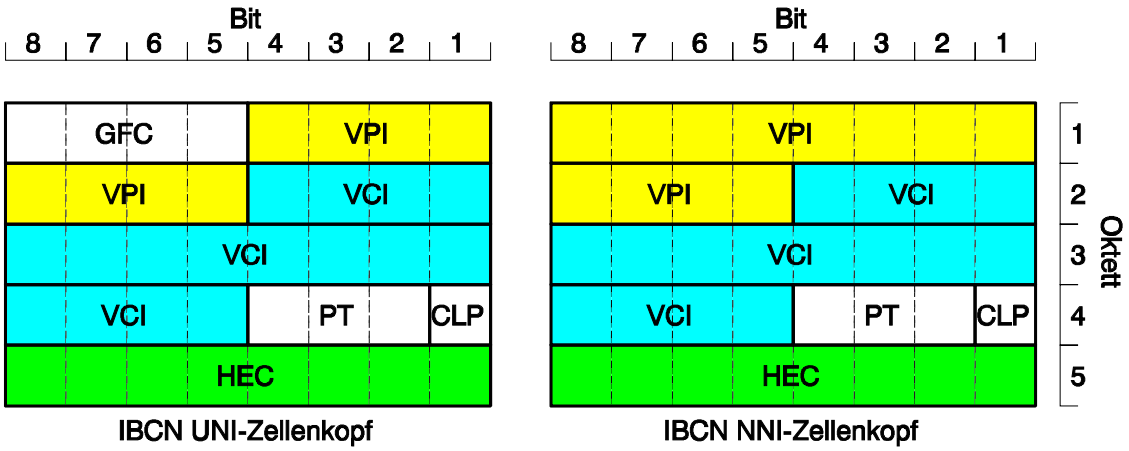

Abbildung 3.3: Felder des Zellenkopfes bei IBCN UNI und NNI

3.2.4 Hierarchisierung der virtuellen Verbindungsstruktur im ATM

(ATM-Schicht)

3.2.4.1 Switching

Am ATM-Anschluß eines Knotens werden die Zellen ggfs. verschiedener Quellen im Multiplexverfahren auf einem physikalischen Kanal übertragen. Funktion eines Switches dabei ist, die eingehenden Zellen aufgrund ihrer Kennzeichnung im Kopffeld an einen entsprechenden Ausgang weiterzuleiten. Die Anschlüsse verfügen bei ATM über eine Bruttodatenrate von 155 Mbit/s oder 622 Mbit/s. Im Gegensatz zum STM wird diese Gesamtdatenrate jedoch nicht in fest dimensionierte kleinere Datenkanäle (H-Kanäle) aufgeteilt, und es wird auch keine feste Zellrate einer bestimmten Verbindung zugeteilt; vielmehr erfolgt die Zuteilung der Nutzdatenrate dynamisch, das heißt, die Rate produzierter Zellen einer Verbindung entspricht dem tatsächlichen, momentanen Bedarf der Verbindung und kann in verschiedenen Zeitintervallen sehr unterschiedlich bemessen sein. Nicht benötigte Kapazität am ATM-Anschluß wird durch Leerzellen aufgefüllt, so daß auf dem physikalischen Medium ein kontinuierlicher Zellstrom entsteht.

3.2.4.2 Adressierung von Verbindungen im ATM

Während im STM die Pakete aufgrund ihrer Position im Frame identifiziert werden, müssen beim ATM dazu je nach Knotentyp 20 %, 30 %, 60 % oder 70 % der Informationen des Zellkopfes analysiert werden[16]. Insgesamt stehen für die Unterscheidung von Verbindungen zwischen 24 und 28 Bit zur Verfügung, was einen logischen Adressraum von 16 777 216 bzw. 268 435 456 Objekten entspricht. Diese adressierten Objekte im ATM sind jedoch nicht die Teilnehmer, sondern könnten bestenfalls Verbindungen zwischen den Teilnehmern sein. Im Hinblick darauf, daß IBCN den Entwicklungszielen folgend einmal das einzige weltweite Kommunikationsnetz sein soll, wird klar, daß nicht einmal Verbindungen durch maximal 28 Bit netzweit eindeutig zu bezeichnen sind – man bedenke die Mächtigkeit der Potenzmenge von „nur“ weltweit etwa 6 Milliarden Telefonanschlüssen. Das eingeführte

[16] Auf die gesamte Zelle bezogen sind dies jedoch nur 1,9 %, 2,8 %, 5,7 % bzw. 6,6 %.

Konzept der virtuellen Pfade und Verbindungen benutzt daher die genannten IDs zur Adressierung allein von Übermittlungsabschnitten. Die tatsächliche Verbindung kann durch eine Folge variabler Länge von Tupeln aus virtuellem Pfad und virtuellem Kanal bezeichnet werden, wobei für jeden Vermittlungsknoten ein solches Tupel auftritt (Routing-Trace, Nachverfolgung der Wegewahl).

3.2.4.3 Hierarchie der Vermittlungsobjekte

Das Modell unterscheidet dabei drei Hierarchieebenen (Abbildung 3.4):

- an oberster Stelle ist der jeweilige physikalische Kanal angesiedelt,
- ihm untergeordnet sind die Kanalbündel,
- die in letzter Ebene die einzelnen Verbindungen enthalten.

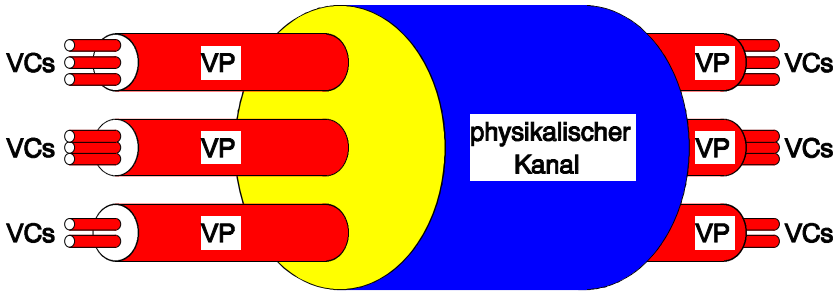

Abbildung 3.4: Hierarchie der Verbindungsobjekte im ATM

3.2.4.4 Vermittlungsweise der Durchgangsknoten

Eine Vermittlungsstelle im ATM-Netz muß für jede Zelle, die sie empfängt, aufgrund der VPI/VCI-Werte einen ihrer Ausgänge wählen und die Zelle mit ggfs. neuem Wert von VPI/VCI auf den nächsten Übermittlungsabschnitt in Richtung Ziel ausgeben. Die ggfs. neu eingetragenen Werte für VPI/VCI sind dann wiederum nur für den nächsten Übermittlungsabschnitt gültig. Für die Umsetzung selbst hält jeder Knoten die notwendigen Informationen in Tabellen. Diese Tabellen müssen bei jedem neuen Verbindungsaufbau in jedem beteiligten Knoten aktualisiert werden, wobei komplexe Algorithmen zur Wegewahl (Routing) und zur Tabellenverwaltung (Hashtechniken) zeitaufwendig ablaufen.

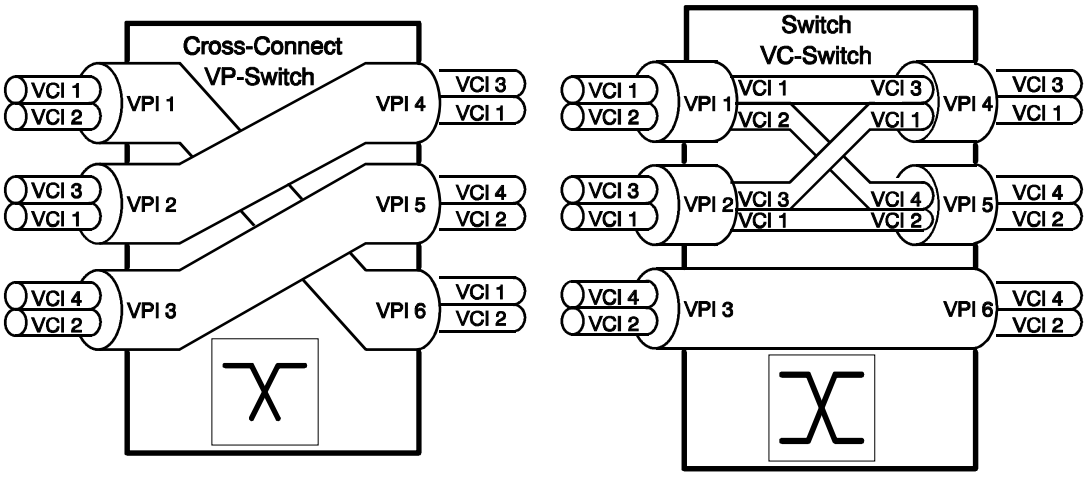

Abbildung 3.5: Behandlung von VPI und VCI in Cross-Connect und Switch

Das eingeführte hierarchische Konzept der virtuellen Pfade und Verbindungen trägt dazu bei, diesen Aufwand zu reduzieren, indem virtuelle Pfade für bestimmte Zielrichtungen (beispielsweise zu einem eigenständigen Subnetz oder einer Workgroup) vordefiniert werden. Dadurch können Tabellen in Knoten, die als Durchschaltungen kompletter Kanalbündel fungieren, unverändert bleiben, auch wenn eine neue Verbindung hinzukommt. Ein großer Vorteil im ATM neben der Aufwandsreduktion in der Verbindungsaufbauphase ist hierbei, daß – anders als im STM – die vordefinierten Verbindungen keine Bandbreite benötigen, solange sie nicht benutzt werden.

Die unterschiedliche Vermittlungsweise in Cross-Connect und Switch soll in Abbildung 3.5 verdeutlicht werden. Dabei wird klar, daß durch die reine VP-Umsetzung in den Cross-Connects, deren Umsetztabellen vergleichsweise klein gehalten werden können. Die Zahl der von einem Cross-Connect vermittelbaren Übermittlungsabschnitte ist allerdings auf $2^{12} = 4096$ begrenzt.

Anzumerken ist an dieser Stelle noch, daß bei ATM-Netzen für den Benutzer zwischen *Signalling Virtual Channels* (*SVC*, vermittelten virtuellen Verbindungen) und *Permanent Virtual Channels* (*PVC*, vorbestimmten virtuellen Verbindungen) unterschieden wird. Während die SVCs durch Signalisierung von der Control-Plane im später vorgestellten ATM-Referenzmodell in der vorgenannten Weise eingerichtet werden, werden PVCs über Managementfunktionen in den Vermittlungsknoten eingetragen. Die Wegefindung und Veränderung der Vermittlungstabellen wird damit von Hand durch den Benutzer selbst vorgenommen.

3.3 Schichtenstruktur für ATM-Netze

Wie schon in den herkömmlichen Netzen werden bei ATM verschiedene funktionale Ebenen in einem Schichtenmodell[17] unterschieden, in dem sich die bei /KrZi93/ vorgeschlagene Drei-Komponenten-Struktur widerspiegelt. Die Notwendigkeit für eine geschichtete Systematisierung überhaupt wurde z. B. bereits durch die Unterscheidung von Netzkomponenten mit verschieden weit reichenden Aufgaben (Endsysteme, Switches, Cross-Connects) einsichtig.

3.3.1 Das ATM-Referenzmodell

Für das ATM B-ISDN-Netzwerk hat die ITU-T bzw. ITU-TS (früher CCITT) eine Empfehlung I.321 erarbeitet, die den Prinzipien des OSI-BRM entspricht. Es werden in I.321 jedoch nur die tiefen Schichten näher ausgeführt und im Vergleich zu OSI treten erhebliche Erweiterungen[18] (dritte Dimension: *Ebenen, Planes*) im ATM-Referenzmodell auf (Abbildung 3.6).

Das genaue Verhältnis zu OSI ist vom ITU-T (noch) nicht geklärt, jedoch lassen sich die folgenden Beziehungen feststellen:

- Die Bitübertragungsschicht von ATM entspricht weitgehend der OSI-Schicht 1. Hier werden die Bitkodierungen und physische Mediencharakteristiken behandelt.

[17] Die vorangehenden Abschnitte sind jeweils in einer Kommentarzeile einer bestimmten Schicht des nachfolgend eingeführten Modelles zugeordnet.

[18] Durch die Erweiterung des Modells sind nun die bisher synonym gebrauchten Begriffe *„Schicht“ (Layer)* und *„Ebene“ (Plane)* zu unterscheiden: Schichten sind die vertikal aufgebauten Hierarchiestrukturen, Ebenen hingegen die horizontal aufgebauten.

- Die ATM-Schicht hat Ähnlichkeiten mit der MAC-Schicht der konventionellen Netze, entspricht also dem unteren Teil der OSI-Schicht 2. Allerdings erfüllt sie auch die wesentliche Aufgabe der Vermittlung, wofür in OSI die Schicht 3 definiert ist.
- Die ATM-Anpassungsschicht sorgt für die Aufteilung der aus höheren Schichten kommenden PDUs auf ATM-Zellen. Sie ist von der Funktionalität her mit dem unteren Teil der OSI-Transportschicht vergleichbar, was im Einklang damit steht, daß sie in Transitsystemen nicht oder nur schwach ausgeprägt sein muß und im wesentlichen in den Adapterkarten der Endgeräte oder den Anschlußknoten der Zugangsnetze ihre Anwendung findet.

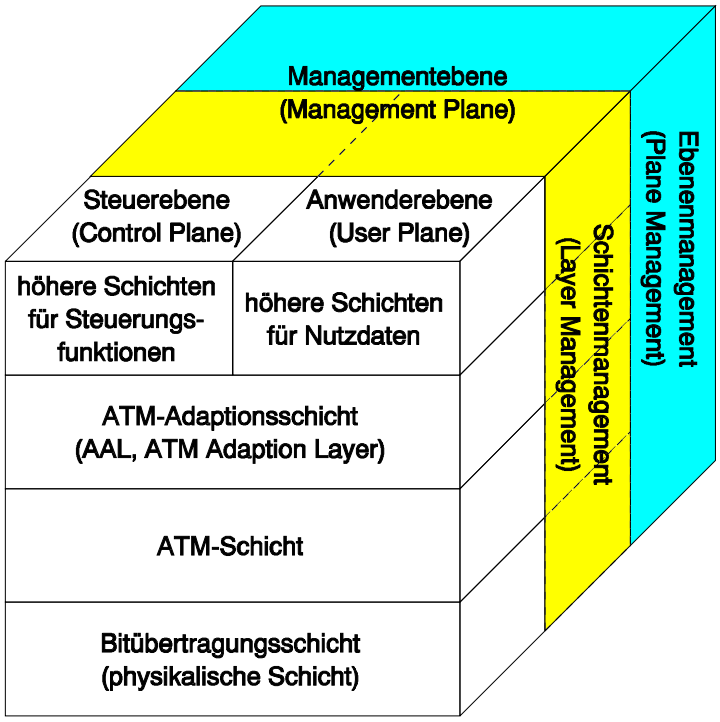

Abbildung 3.6: Das ATM-Referenzmodell

3.3.2 Aufgaben der Ebenen

Als neue Gliederungsstruktur im ATM-Referenzmodell treten die Ebenen auf. Mit ihnen wird dem Verwaltungsaspekt eines ATM-Netzes Rechenschaft getragen.

3.3.2.1 Nutzerebene – User Plane

Die *Nutzerebene* hat den eigentlichen Datentransport für den Benutzer zur Aufgabe. Sie verläuft deshalb über alle vier im Referenzmodell eingeführten Schichten und entspricht herausgelöst einem herkömmlichen Schichtenmodell.

3.3.2.2 Steuerebene – Control Plane

Der Nutzerebene zur Seite gestellt wird die *Control Plane*. Sie dient dem Auf- bzw. Abbau von Benutzerverbindungen und legt deshalb in der obersten Schicht ein spezielles Signalisierungsprotokoll fest. Die Funktion ist daher mit einem D-Kanal im S-ISDN vergleichbar.

Es sind im Hinblick auf die Netztopologie hierbei verschiedene Signalisierungsprotokolle zu unterscheiden, deren Standardisierung durch die ITU und das ATM-Forum, einen normgebenden Zusammenschluß von ATM-Netzbenutzern und Herstellern von ATM-Komponenten, verschieden weit vorangeschritten sind:

- Die Signalisierung am UNI, also dem Zugang eines ATM-Endgerätes zum ATM-Netz
- sowie der Ende-zu-Ende-Datenstrom zwischen zwei ATM-Endgeräten sind durch das ATM-Forum im „UNI 3.1“ festgelegt,
- für die Signalisierung und Wegefindung innerhalb des ATM-Netzes zwischen den Switches und Cross-Connects gibt es verschiedene proprietäre Lösungen (z. B. Fore Systems SPANS), ein ATM-Forum-Standard steht erst kurz vor der Verabschiedung.

3.3.2.3 Management-Ebene – Management Plane

Bei der Konzeption dieser Ebene wurde versucht, das Netz-Management von vornherein in das Protokollmodell zu integrieren. Management von Netzen wird heute immer wichtiger, insbesondere, wenn man an wachsende Erstreckungen und Teilnehmerzahlen denkt. Zum einen ist es bisweilen nicht mehr durchführbar, eine fehlerhaft konfigurierte Komponente vor Ort umzukonfigurieren, zum anderen müssen das Hinzukommen oder Abwandern von Stationen, Netzengpässe, Protokollverletzungen, Fehlabläufe und Orts- bzw. Topologie- und Konfigurationsveränderungen bei Teilnehmern rasch erkannt werden.

Das ATM-Referenzmodell teilt entsprechend dem großen Aufgabengebiet mit unterschiedlichsten Anforderungen die Management-Plane nochmals in zwei Teilbereiche.

- Das *Schichten-Management (Layer-Management)* übernimmt Koordination und Kontrolle der einzelnen Protokollschichten und ihres Zusammenwirkens, besonders auch die Koordination zwischen Control-Plane und User-Plane. Es ist insbesondere für *Meta-Signalisierung*[19] und *OAM-Funktionen* (*OAM, Operation and Maintenance*) zuständig. OAM überwacht die Netzwerkleistungsfähigkeit und dient dem Fehlermanagement auf der ATM-Schicht durch eigene OAM-Zellen (gekennzeichnet im PT).
- Das *Ebenen-Management (Plane Management)* überwacht und koordiniert das Zusammenwirken der Teilnehmer und Knoten im Netz selbst.

3.3.3 Die Protokollschichten von ATM

3.3.3.1 Zusammenspiel der Schichten

In den Teilnehmerendgeräten beginnt der Ablauf der Kommunikation in gewohnter Weise in einer Anwendung, die Daten in einem beliebigen Format generiert.

Die Anwendungs-PDUs werden zur weiteren Verarbeitung zunächst der ATM-Adaptionsschicht (AAL) übergeben, die zuerst einen Kopf und Trailer der Konvergenzsubschicht (CS-PCI) hinzufügt und danach eine Segmentierung (der CS-SDU in SAR-PDUs) vornimmt. Nach der Segmentierung liegt der ursprüngliche Datenframe, mit AAL-CS-Header und -Trailer ergänzt und zerteilt in 48 Oktett lange „AAL-Zellen“ vor.

[19] Als Meta-Signalisierung wird die Signalisierung zur Einrichtung von Signalisierungkanälen bezeichnet. Sie wird über den unveränderlich festgelegten VC mit VCI= 1 auf jedem VP vorgenommen.

Die ATM-Schicht nimmt die „AAL-Zellen“ entgegen und fügt den in Abschnitt 3.2.3.2 beschriebenen Zellenkopf hinzu. Die PDU in der ATM-Schicht ist damit die beschriebene ATM-Zelle.

Schließlich werden die ATM-Zellen an die Physikalische Schicht übergeben, wo die für die tatsächliche Übertragung auf einem elektrischen oder optischen Medium notwendige Umformung und Anpassung vorgenommen wird.

Aus der Beschreibung des Zusammenspiels erkennt man bereits, daß eine Verfeinerung der Layers in Unterschichten vorgenommen wird. Diese ist in Tabelle 3.5 als grobe Übersicht wiedergegeben.

Tabelle 3.5: Verfeinerung der ATM-Schichtfunktionen in Sublayers

Funktion	Unterschicht	Schicht
Konvergenz	CS	AAL
Segmentierung und Reassemblierung	SAR	
Allgemeine Flußsteuerung		ATM
Umsetzung von VPI/VCI		
Zell-Multiplexing und Demultiplexing		
Zellraten-Entkopplung	TC	PHY
HEC Generierung/Prüfung		
Zellendarstellung		
Anpassung an Übertragungsrahmen		
Erstellung/Wiederherstellung von Übertragungsrahmen		
Bit-Timing	PM	
Physikalisches Medium		

Es bedeuten: CS – Convergence Sublayer – Konvergenz Unterschicht, SAR – Segmenting and Reassembling Sublayer – Unterschicht zur Zerteilung und zum Wiederzusammenfügen, TC – Transmission Convergence Sublayer – Unterschicht zur Übermittlungsanpassung, PM – Physical Medium – physikalisches Medium.

3.3.3.2 Die ATM-Adaptionsschicht – AAL

Die Anpassungsschicht ist das Bindeglied zwischen den zu übertragenden Nutzdaten und der zellenorientierten ATM-Übertragung. Entsprechend den vielfältigen höheren Diensten können sie eine feste oder variable Bitrate haben, sie können in einem starren Zeitraster auftreten oder burstartig, in Schüben. Sie können als tatsächliche Nutzdaten verbindungsorientierter Dienste oder wie die Daten der Signalisierung verbindungslos auftreten.

Die ITU hat deswegen eine Klassifikation der Dienstdatentypen in vier Klassen vorgenommen (Tabelle 3.6). Jeder Klasse wird nun ihrer Charakteristik entsprechend von der AAL bedient, allerdings wird hier noch ein Typ 5 hinzugenommen. Den in der AAL angebotenen fünf Diensttypen entsprechen fünf PDU-Formate, auf die im nächsten Kapitel eingegangen wird.

- Die Konvergenzsubschicht (CS) ist im wesentlichen dafür verantwortlich, daß die für den entsprechenden Dienst angemessenen Mechanismen zur Datenaufbereitung für eine anschließende Übermittlung in Zellform eingesetzt werden.
- Die Segmentierungs- und Reassemblierungs-Subschicht (SAR) „zerhackt" auf der Senderseite die von CS aufbereiteten Daten in Payload-konforme Blöcke von 48 Oktetten Länge, wobei sie bei zu kurzen Restblöcken auch für ein entsprechendes Auffüllen sorgt. Auf der Empfängerseite fügt sie analog Blöcke wieder zu einer kompletten CS-PDU zusammen.

Tabelle 3.6: ITU-T Dienstklassifikation und ihre Zuordnung zu AAL-Servicetypen

Kriterium	Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D
S/E-Zeitbeziehung	zeitkontinuierlich/isochron		zeitdiskret/bursty	
Zeitraster	CBR	VBR		
Verbindungsmodus	verbindungsorientiert			verbindungslos
AAL-Diensttyp	AAL 1	AAL 2	AAL 3	AAL 4
			AAL 5	

3.3.3.3 Die ATM-Schicht

Die Funktionen der ATM-Schicht sind – wie der Bezeichner ausdrückt – die im einführenden Abschnitt 3.2.3 dieses Kapitels als „charakteristisch" behandelten Prinzipien.

3.3.3.4 Die Physikalische Schicht

Die **Physical Medium Subschicht (PM)** ist die tiefste Schicht im ATM-Modell. Sie muß damit die wirkliche Bitübertragung durchführen, abhängig vom eingesetzten Medium, das optischer (Singlemode Glasfaser, Multimode Glasfaser) oder elektrischer Art (Koaxialkabel, Twisted Pair Kupferkabel) sein kann. Die Bit Timing Funktionen dieser Subschicht sorgen für die Generierung und Entgegennahme passend codierter Signale (Modulationstechniken).

Die **Transmission Control Subschicht (TC)** führt fünf wesentliche Funktionen aus:

- Anpassung an Übertragungsrahmen:
  Grundsätzlich besteht die Alternative, ATM-Zellen im *direkten Zellstrom* auf ein Medium zu legen oder sie in genormte Übermittlungssysteme einzupassen. Die von ITU-T für AUI und NNI vorgesehenen, genormten Übermittlungssysteme sind die *Synchronen Digitalen Hierarchie (SDH)* (ITU-Empfehlung G.709) und die *Plesiochronen Digitalen Hierarchie (PDH)* (ITU-Empfehlung G.703), auf Vorschlag des ATM-Forums am AUI ergänzt durch FDDI-Rahmen[20].
- Detektion der Zellgrenzen (*Cell Delineation*):
  Der Mechanismus, der den Empfänger eines Bitdatenstromes ermächtigt, darin eine Zellstruktur zu erkennen, ist in der Empfehlung I.432 des ITU-T beschrieben (Abbildung 3.7):
  - Die empfangende Instanz der Cell Delineation befindet sich anfänglich in einem Hunt-Zustand, in dem die eingehenden Daten Bit für Bit untersucht werden. Wird

[20] FDDI ist genormt in ISO IS 9314-1 bis -3. Diese Variante der Einpassung wird nach dem eingesetzten Chipsatz des Herstellers Texas Instruments überwiegend als TAXI bezeichnet.

bei dieser Analyse eine Bitsequenz gefunden, die einem korrekten HEC-Feld entspricht, wechselt der Automat den Zustand.

- Der Folgezustand wird als PreSynch-Zustand bezeichnet. Die Detektion hat eine gültige HEC-Sequenz gefunden und nimmt nun an, eine Zellgrenze läge vor. Dann müßten in feststehenden Bitabständen weitere gültige HEC-Sequenzen auftreten. Die Analyse des Bitstromes geschieht daher nun nicht mehr bitweise, sondern zellenweise. Tritt bei dieser Untersuchung ein inkorrektes HEC-Feld auf, wird sofort in den Hunt-Zustand zurückgewechselt, treten stattdessen eine festgelegte Zahl d korrekter HEC-Sequenzen auf, wird der Zustand weiter gewechselt.
- Im dritten Synch-Zustand wird davon ausgegangen, daß die Zellgrenzen verläßlich detektiert wurden. Die weitere Bearbeitung erfolgt also Zelle für Zelle, treten jedoch a fehlerhafte HEC-Felder in Folge auf, ist vermutlich die Synchronisation verloren gegangen und es wird zurück in den Hunt-Zustand gewechselt.

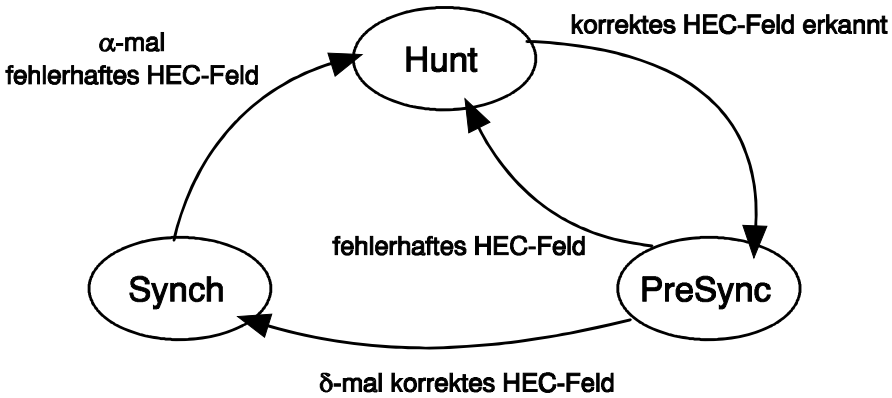

Abbildung 3.7: Zellsynchronisationsautomat der PHY-CS

- HEC-Generierung und Auswertung:
  Während die Synchronisierung ausschließlich Aufgabe der empfangenden Instanz ist, wird die HEC-Generierung von der Sendeinstanz durchgeführt. Zum Einsatz kommt ein CRC-Verfahren mit dem auf den Zellkopf mit Ausnahme der 8 HEC-Bits angewandten Generatorpolynom $x^8 + x^2 + x + 1$.

  Die HEC-Prüfung in der Empfangsinstanz kann einen erkannten Bitfehler korrigieren (*Valid Cells*), bei mehreren erkannten Bitfehlern wird die Zelle verworfen (*Invalid Cells*). (Die Zellterminologie ist zusammenfassend in Tabelle 3.7 dargestellt.)

Tabelle 3.7: Zellterminologie

Bezeichnung	Schicht	Beschreibung
Idle Cell	PHY	Leerzelle, die zum Ausgleich der Differenz zwischen benötigter Zellrate der Anwendung und des Übermittlungssystemes dient.
Valid Cell	PHY	Zelle, deren HEC-Prüfung fehlerfrei verlief, oder deren Fehler korrigiert werden konnte.
Invalid Cell	PHY	Fehlerhafte Zelle, die verworfen wird.
Assigned Cell	ATM	Zelle, die tatsächliche Nutzlast einer Anwendung transportiert.
Unassigned Cell	ATM	Zelle, die zum Management oder zur Erzielung von Fairness in den ATM-Zellstrom eingefügt wurde.

- Zellraten-Entkopplung (Cellrate Decoupling):
  In dieser Teilschicht schließlich werden sogenannte Idle Cells in den Strom der ATM-Zellen eingefügt, um die vom verwendeten Übermittlungssystem benötigte Zellenrate zu erreichen. Beim Empfang werden sie wieder ausgeschieden und nur die sogenannten Assigned Cells und Unassigned Cells an die ATM-Schicht weitergereicht.

3.4 Physikalische Schnittstellen zu ATM

Für den physikalischen Zugang zum ATM-Netz sind die Benutzer-Netz-Schnittstelle UNI und die Netz-Netz-Schnittstelle NNI von Bedeutung.

Wie im vorangehenden Abschnitt dargelegt wurde, gibt es zwei wesentliche Ansätze, die ATM-Zellen physikalisch zu übertragen, nämlich als Zellen an sich und eingepaßt in sogenannte *Envelops (Umschläge)* oder *Container (Behälter)* vordefinierter Übermittlungssysteme.

Die erste Methode findet bisher ausschließlich in den Netzknoten selbst und in privaten Netzen statt, für die Schnittstellen UNI und NNI ist die Verwendung der Synchronen Digitalen Hierarchie (SDH) und noch der Plesiochronen Digitalen Hierarchie (PDH), am UNI allein die TAXI-Technik von FDDI gebräuchlich.

3.4.1 Einsetzbare physikalische Medien

Die für die Verbindung der ATM-Komponenten einsetzbaren Medien richten sich nach den Kriterien Schnittstelle (UNI/NNI), Übertragungsleistung und Reichweite. Das bevorzugte physikalische Medium zur Verbindung von ATM-Knoten und Endeinrichtungen ist die Glasfaser, jedoch sind auch Kupferkabel in Form von Koaxialkabeln und als verdrillte Adernpaare *(TP, Twisted Pair Copper)* vorgesehen.

Bei den Glasfaserkabeln unterscheidet man zwischen *Multimode*- und *Singlemodefasern* (letztere nach ITU-T G.652), sie sind für alle in ATM festgelegten Übermittlungsraten an NNI und UNI geeignet und erlauben mit ihren Dämpfungseigenschaften Kabelwege zwischen 800 m und 2000 m.

Koaxialkabel (ITU-T G.703) finden im UNI Verwendung und erlauben Datenraten von 34,368 Mbit/s (PDH E3) bis 139,264 Mbit/s (PDH E4) bei Distanzen zwischen 100 m und 200 m.

Die TP-Varianten sind für den UNI-Einsatz konzipiert. Als Kabel wird vorwiegend abgeschirmtes Material (*STP, Shielded Twisted Pair*) für Datenraten von 44,736 Mbit/s (PDH DS3) bis 155,52 Mbit/s (*Fiber Channel, FC*) eingesetzt, neuerdings jedoch auch ungeschirmtes Kabel (*UTP, Unshielded Twisted Pair*) der *Kategorie 3* für 51,840 Mbit/s (SONET STS-1) und der *Kategorie 5* für 155,52 Mbit/s (SONET STS-3 bzw. SDH STM-1) auf kurzen Distanzen.

3.4.2 SDH – die Synchrone Digitale Hierarchie

3.4.2.1 Digitale Hierarchien

Als Übermittlungssystem auf dem Verbindungsnetz zwischen den ATM-Knoten und immer mehr auch im Anschlußbereich hält derzeit nach ihrer Verabschiedung als Standard des CCITT in 1988 die Synchrone Digitale Hierarchie (SDH) ihren Einzug und löst damit die bislang verbreitete Plesiochrone Digitale Hierarchie ab.

Digitale Hierarchien sind Multiplexstrukturen, in denen bestimmte Grundkanäle auf mehreren Stufen zu leistungsfähigeren Bündelsystemen zusammengefaßt werden.

3.4.2.2 PDH – Plesiochrone Digitale Hierarchie

Die Stufen der Plesiochronen Digitalen Hierarchie – ausgehend etwa von einem Telefonortsnetz über eine Fernnetzebene bis hin zu einer Highwaynetz-Ebene (z. B. Transatlantik-Kabel) – müssen immer komplett durchlaufen werden, wobei nach oben immer umfangreichere Kanalbündel gebildet werden, in denen wiederum Kapazitätsreserven für Zeiten der Spitzenlast bereitzustellen sind. In der bisherigen PDH war es nicht möglich, einen einzelnen Kanal direkt in einem Schritt aus dem Kanalbündel der obersten Ebene herauszulösen (ein Telefongespräch aus dem Transatlantik-Kabel herausgreifen), es mußten alle Hierarchiestufen durchlaufen werden, um eine andere Zuordnung zu erreichen. In der Gegenrichtung ist es beispielsweise nicht möglich, einen 2,048 Mbit/s-Signalstrom (PDH E1) direkt in einen Signalstrom PDH E4 mit 139,264 Mbit/s zu multiplexen (ein Telefongerät direkt an das Transatlantikkabel anzuschließen), da die PDH bitsynchron arbeitet und die Übertragungsrahmen von E1 in einem E4-Signal nicht lokalisierbar sind /Kyas93/.

Anders sieht es dagegen in der SDH aus. Hier kann über Zeiger direkt auf Rahmen beliebiger Multiplexstruktur zugegriffen werden. Dies wird durch Einführung eines flexiblen Koppelnetzes auf Rechnerbasis erreicht. Die rechnergesteuerten SDH-Elemente ersetzen die bisherigen Verstärker und Multiplexer.

3.4.2.3 SDH-Transportmoduln STM-1, STM-4 und STM-16

SDH basiert dabei auf der synchronen Übertragung vordefinierter Transportmoduln (STM, Synchronous Transport Module) mit einheitlicher Struktur.

Das Basismodul ist der Transportrahmen STM-1, der synchron alle 125 µs über das physikalische Medium übertragen wird. Er besteht aus einer Matrix von 9 Reihen zu jeweils 270 Oktetten und realisiert damit eine Brutto-Übertragungsrate von 155,520 Mbit/s. Er weist als Struktur ein *Payload-Feld* und ein *Overhead-Feld* auf. Das Overhead-Feld beinhaltet die ersten 9 Oktette aller 9 Reihen. Das Nutzfeld kann abhängig von der Struktur der zu übertragenden Information und der Übertragungsrate weiter gegliedert sein (vgl. VC-4). Als in STM-1 zu übertragende Informationen kommen neben einer kontinuierlichen Folge von ATM-Zellen (sogenannter C-4 Container) mehrere 2,048-Mbps-Systeme[21] oder 34-Mbps-Systeme (TUG-3-Transportgruppe; TUG, Tributary Unit Group; drei PCM-Systeme zu je 34 Mbit/s) in Frage.

Die höheren Hierarchieebenen von SDH werden durch Zusammenfassung von STM-1-Vielfachen erreicht. Das STM-4-Modul bietet damit eine Brutto-Übertragungsrate von $4 \cdot 155{,}520$ Mbit/s, also 622,080 Mbit/s, und STM-16 von $16 \cdot 155{,}520$ Mbit/s, also 2488,320 Mbit/s.

3.4.2.4 SONET – Amerikanisches Pendant zu SDH

Eine vergleichbare Struktur ist auch in Amerika eingeführt; sie nennt sich *SONET* (Synchronous Optical Network). Die Basiseinheit bei Sonet ist jedoch nicht der STM-1-Rahmen sondern eine kleinere Einheit von drei Reihen zu jeweils 270 Oktetten, die als STS-1

[21] „Mbps“ anstelle von „Mbit/s“ wird hier allein der besseren Lesbarkeit wegen verwendet.

Rahmen (*STS, Synchronous Transfer Signalling*) bezeichnet wird. Mit der üblichen Wiederholrate von 125 µs realisiert dieser Basisrahmen eine Brutto-Übertragungsrate von 51,840 Mbit/s.

Die entsprechenden Vielfachstrukturen heißen bei SONET STS-3, STS-12 und STS-48. Die Korrespondenz zu SDH ist aus Tabelle 3.8 ersichtlich.

Tabelle 3.8: Korrespondenz zwischen SONET- und SDH-Übertragungsframes und Übertragungsraten

SONET-Frame	SDH-Frame	Brutto-Datenrate	Netto-Datenrate	VC4 Netto-Rate
STS-1	–––	51,840 Mbit/s	50,112 Mbit/s	49,920 Mbit/s
STS-3	STM-1	155,520 Mbit/s	150,336 Mbit/s	149,760 Mbit/s
STS-9	STM-3	466,560 Mbit/s	451,008 Mbit/s	449,280 Mbit/s
STS-12	STM-4	622,080 Mbit/s	601,344 Mbit/s	599,040 Mbit/s
STS-18	STM-6	933,120 Mbit/s	902,016 Mbit/s	898,560 Mbit/s
STS-24	STM-8	1244,160 Mbit/s	1202,688 Mbit/s	1198,080 Mbit/s
STS-48	STM-16	2488,370 Mbit/s	2405,376 Mbit/s	2396,160 Mbit/s

3.4.3 ATM-Zellübertragung im STM-1-Frame

Sollen ATM-Zellen über ein SDH-Interface übertragen werden, stellt dies im Grunde einen Rückschritt dar, denn die Zellen als Verarbeitungsatome des ATM müssen zunächst gesammelt und in einen STM-Frame gebündelt werden. In der gebündelten Form werden sie schließlich physikalisch übertragen.

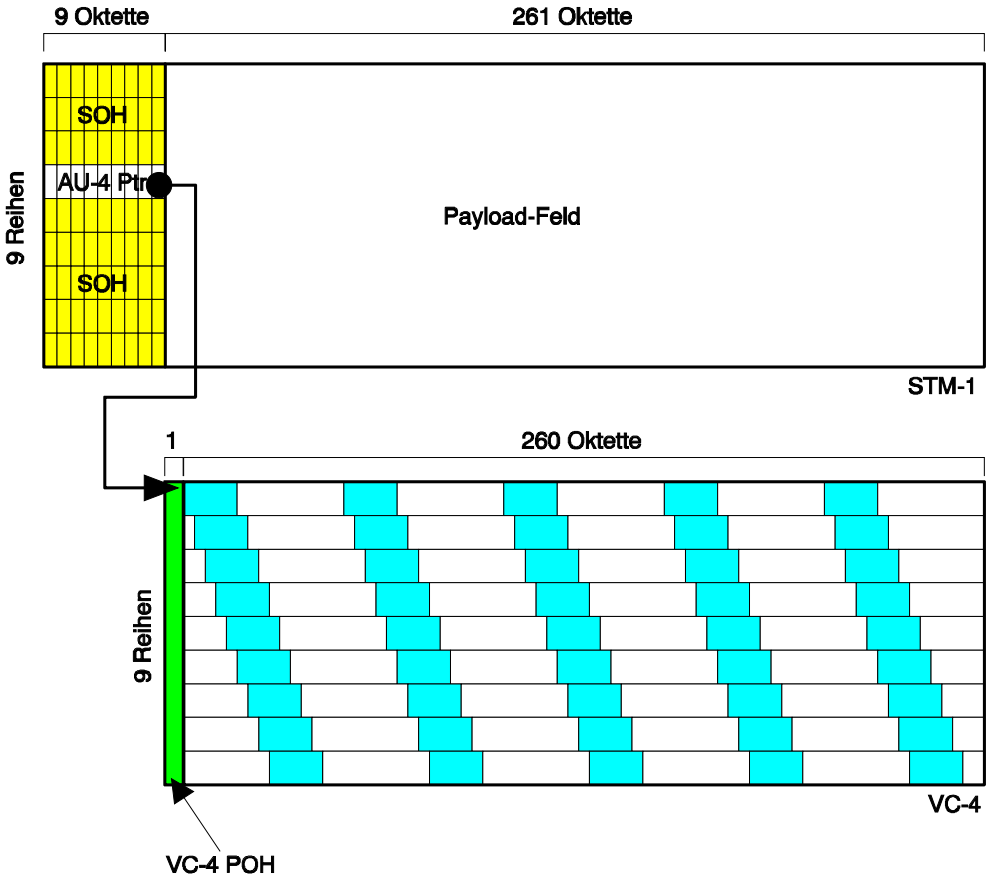

Abbildung 3.8: Transport von ATM-Zellen im VC-4 eines STM-1-Frames

Im STM-1-Frame steht zur Aufnahme der ATM-Zellen nur das Payload-Feld zur Verfügung, das bekanntlich in 9 Reihen zu (270 - 9) Oktetten organisiert ist, es bietet damit Platz für maximal 2349 Oktette.

Zur Aufnahme der ATM-Zellen dient jedoch nicht der pure Payload-Teil des STM-1-Frames, sondern es wird ein sogenannter *Virtueller Container Nummer 4 (VC-4)* verwendet, der von der Nutzkapazität des STM-1-Frames nochmals 1 Oktett pro Reihe als *Path Overhead (POH)* benötigt. Um nicht unnötig Kapazität zu vergeuden, wird die Zusammenfassung der ATM-Zellen nicht an den Zellengrenzen orientiert. Diese Struktur ist in Abbildung 3.8 symbolisch dargestellt.

Letztendlich bleiben also nur 9 Reihen zu 260 Oktetten für die Aufnahme von 44,151 ATM-Zellen und bieten damit die in Tabelle 3.8 in der letzten Spalte gezeigte Netto-Bitrate von 149,760 Mbit/s oder eine Zellrate von 353 207,5 Zellen/s. Berücksichtigt man dabei noch den Overhead durch den ATM-Zellenkopf von 5 Oktetten, so kommt man bei der Übertragung mit STM-1-Rahmen auf eine maximale effektive Übertragungskapazität von 135,632 Mbit/s. Diese kann sich je nach der eingesetzten AAL-Variante noch weiter reduzieren.

3.4.4 Zellenbasierende Schnittstelle

Die von ITU-T festgelegten Merkmale für das PM einer direkten zellenbasierten Schnittstelle sind identisch mit denen eines SDH-Mediums. Bei den Merkmalen der Übertragungs-konvergenz ergeben sich leichte Unterschiede.

TC geht davon aus, daß ständig Zellen transportiert werden, ohne an einen zeitlichen Rahmen geknüpft zu sein. Der Empfänger des Datenstroms regeneriert den Takt entweder aus dem empfangenen Signal oder er erhält ihn vom Taktgeber der Kommunikationsanlage. TC erledigt in bekannter Weise die Zellsynchronisation, HEC-Erstellung und Überprüfung, die Anpassung der Zellrate zwischen PHY- und ATM-Schicht und OAM-Funktionen.

Um die Überlastung der Schnittstelle durch eine überhöhte Bitrate zu verhindern, transportiert die PHY-Schicht spezielle *PL-Zellen (Physical-Layer-Zellen)*, die nicht an die ATM-Schicht weitergegeben werden. Sie werden in der zellenbasierten TC-Subschicht erzeugt und verarbeitet. Der maximale Abstand solcher PL-Zellen ist auf 26 Zellen der ATM-Schicht festgelegt, also wenigstens jede 27. physikalische Zelle ist eine PL-Zelle. PL-Zellen sind entweder Leerzellen zur Zellratenanpassung oder OAM-Zellen der physikalischen Schicht. Sie werden an einem feststehenden Header erkannt. Dabei wird auch für die OAM-Zellen eine maximale Distanz von 513 physikalischen Zellen festgelegt.

4 Konzept eines Telepräsenzsystemes auf Basis eines konventionellen Rechnernetzes

4.1 DISTEL — ein prototypisches Telepräsenzsystem im industrietechnischen Maßstab

Mit DISTEL, dem digitalen Steuerungssystem für Telemanipulatoren, wurde 1990 im Kernforschungszentrum Karlsruhe ein erstes System im Sinne zuvor beschriebener Architektur in Betrieb genommen.

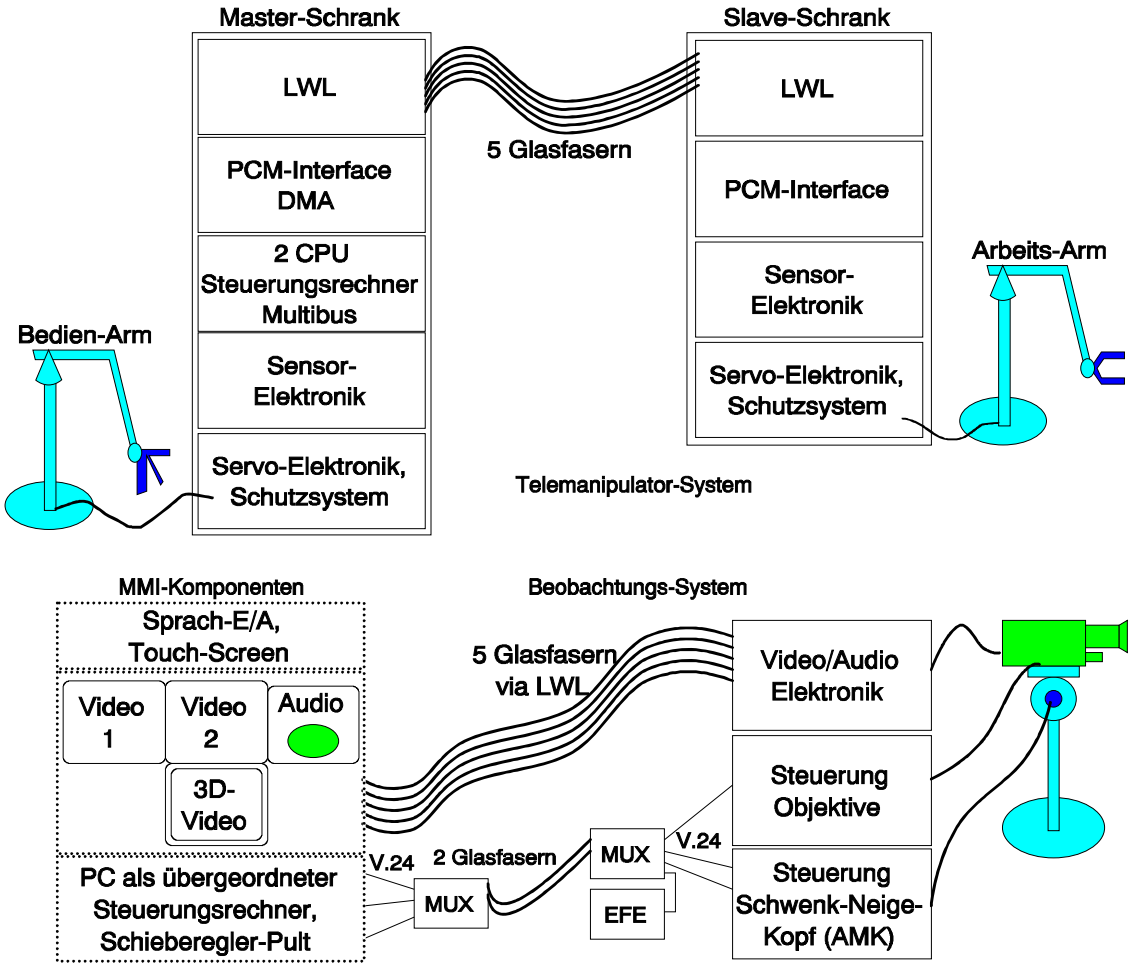

Abbildung 4.1: Komponenten des Telepräsenzsystemes DISTEL

DISTEL besteht aus zwei getrennten funktionalen Gruppen, dem eigentlichen Telemanipulator-System und einem Beobachtungssystem. Jede dieser Gruppen hat wiederum zwei Komponenten, die Eingabe-/Bedienseite bzw. Anzeigeseite und die Effektoren-Seite/Seite der Arbeitseinheit bzw. Kameraseite, wovon erstere in Raum 002A des Institutsgebäudes 445 und letztere im handhabungstechnischen Laborgebäude 691 auf dem Gelände des Forschungszentrums untergebracht sind. Die Verbindung beider Seiten wird über ein 1,3 km langes 12adriges Glasfaserkabel hergestellt, das über Lichtwellenleiter-Interfaces (LWL in Abbildung 4.1) ein Signalübertragungssystem in *Puls Code Modulation (PCM)* realisiert. Hierbei werden für die Steuerung des Telemanipulator-Systems fünf Adern

des Glasfaserkabels verwendet, für die Audio/Video-Übertragung des Beobachtungssystemes weitere fünf Adern, die beiden verbleibenden Adern dienen zur Übertragung acht gemultiplexter V.24-Kanäle für die Steuerung des Beobachtungssystemes und die Fernschaltung der Energieversorgungen (EFE in Abbildung 4.1) /BrSc90/.

Die Komponenten der beiden funktionalen Gruppen sind in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt. Bei dem Telemanipulator-System handelt es sich um einen kraftreflektierenden Arbeitsarm mit EMSM-2-Elektromechanik[22]. Der Bediener hat als Eingabe dabei in Form eines Pistolengriffes mit Zustimmungstaste[23] die gleiche Kinematik wie am Arbeitsarm, mit Ausnahme der reflektierten Kräfte, die bei der Einspielung in den Bedienarm verstärkt oder abgeschwächt werden können. Gleiche Kinematik bedeutet hierbei, daß für einen Roboterarm ein spezifischer Bedienarm zur Verfügung gestellt werden muß, der es ermöglicht, die Steuerung des Roboterarmes über Achs-Lage-Sollwerte korrespondierender Gelenke direkt vorzunehmen.

Am Arbeitsarm ist eine Unterarm-Videokamera angebracht, die aus dem Blickwinkel des Arbeitsarmes eine Einsicht in die manipulierte Szene liefert (sie ist in der symbolischen Darstellung in Abbildung 4.1 nicht eingezeichnet). Die Szene mit dem Arbeitsarm ist jedoch auch durch eine an einem separat steuerbaren Schwenk-Neige-Kopf untergebrachte Video-Kamera zusammen mit dem Arbeitsarm einzusehen. Dieser Schwenk-Neige-Kopf kann über eine sogenannte Tracking-Funktion automatisch den Arbeitsarm verfolgen. Die übertragenen Video-Daten sind farbig dreidimensional und ermöglichen so eine realistische optische Einschätzung der Szene.

Wie durch die Symbolik in Abbildung 4.1 angedeutet, liegt hier aus der Sicht des Telematikers noch kein integriertes System vor: Während die Komponenten der Telemanipulator-Steuerung zwar in Multibus-Rechnern integriert sind, stellen die Komponenten der *Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMI)* zur Bedienung des Beobachtungssystems mehr oder weniger unabhängige Einzelsysteme dar, deren Zusammenwirken auf der räumlichen Nähe der Endgeräte beruht. Selbst die Steuerungs-Komponenten des Beobachtungssystemes, Video/Audio-Elektronik, Objektiv-Steuerung und Steuerung des Schwenk-Neige-Kopfes, die zwar in einem gemeinsamen Gehäuse, dem sogenannten AMK-Schrank, untergebracht sind, arbeiten unabhängig voneinander. Die Audio/Video-Signale selbst werden noch analog übertragen.

Wesentliche integrierende Komponente des DISTEL-Systemes ist das als Übertragungsmedium eingesetzte Glasfaserkabel, wobei jedoch die einzelnen Adern wiederum unabhängig voneinander genutzt werden.

---

[22] Beschrieben in: G. W. Köhler, M. Salaske. Elektrischer Master-Slave-Manipulator EMSM-2b. In: Robotersysteme 4 (1988), S. 188–192.

[23] Die Zustimmungstaste, umgangssprachlich auch als Totmann-Schalter bezeichnet, dient der Betriebssicherheit des Systems, indem sie sicherstellt, daß die Motoren an der Arbeitseinheit nur dann angesteuert werden, wenn und solange tatsächlich eine Vorgabe am Master-Arm durch den Bediener vorliegt. Die umgangssprachliche Bezeichnung stammt aus dem Eisenbahnbetrieb, wo ein Totmann-Schalter vom Zugführer turnusmäßig betätigt werden muß, um zu verhindern, daß eine Notbremsung des Zuges ausgelöst wird.

4.2 MONSUN – Manipulator Control System Utilizing Network Technology

4.2.1 Übersicht über das MONSUN-Konzept

Das Konzept von MONSUN greift die Erfahrungen aus dem Betrieb von DISTEL auf und integriert sie in ein fortgeschrittenes Konzept der Fernhantierung. Konzeptuell liegt bei MONSUN eine Fertigungsstraße vor, an der verschiedene Arbeitseinheiten untergebracht sind. Die Koordination und Steuerung der Arbeitseinheiten geschieht von einer zentralen Mastereinheit aus. Wie bei DISTEL wird dabei auch in MONSUN eine getrennte Betrachtung für die Regelung und die zur Überwachung notwendige Audio/Video-Übertragung vorgenommen; die A/V-Signale werden in analoger Technik separat geführt und gehen nicht in das Systemkonzept ein.

Im Bereich der Regelung kennzeichnen drei grundlegende Prämissen das MONSUN-Konzept:

- Das Universal-Master-Prinzip,

  durch das die bei DISTEL noch bestehende 1:1-Zuordnung in der Kinematik von Bedieneinheit und Arbeitseinheit aufgehoben wird.

  Vielmehr wird nun als Bedieneinheit eine von der Arbeitseinheit unabhängige und, wie der Name ausdrückt, damit universell für verschiedenste Arbeitseinheiten einsetzbare Steuereinheit verwendet. Dieser universelle Master zur Steuerung wird in Folge seiner Universalität als autonome Einheit nicht mehr fest einer Arbeitseinheit zugeordnet, sondern kann nach Bedarf die Steuerung unterschiedlicher Arbeitseinheiten übernehmen. In der Steuerung wird die Universalität dadurch erreicht, daß die Gelenk-Korrespondenz von Bedienteil und Roboter zugunsten einer Lagevorgabe in einem abstrakten, kartesischen Koordinatensystem aufgegeben wird. Alternativ zur Vorgabe einer Zielposition kann auch ein vektorielles Geschwindigkeits-Steuerungsprinzip angewendet werden, das dem Arbeitsarm zielgerichtete Fahrgeschwindigkeiten vorgibt. Es ist besonders für die Steuerung nach dem Joystick-Konzept geeignet, macht aber zusätzlich notwendig, den Joystick bei Auftreten einer mechanischen Kollision am Arbeitsarm aktiv in eine neutrale Stellung zu bringen.

  Das MONSUN-Konzept setzt damit voraus, daß auf der Roboterseite eine Anpassung vorhanden ist, die aus den Stellgrößen in einem für MONSUN definierten, **universellen** Koordinatensystem „K_0“ durch entsprechende Transformationen **spezifische** Stellgrößen für die Achslage- oder Gelenklageregelung errechnet.

- Der Einsatz konventioneller Rechnernetze zur Verbindung von Arbeitseinheiten mit der universellen Mastereinheit.

  Durch dieses Prinzip können alle in Frage kommenden Arbeitseinheiten als Pool aufgefaßt werden. Durch Aufbau einer Assoziation zum Universalmaster kann aus dem Pool der Arbeitseinheiten jederzeit ein Roboter mit einem gerade benötigten Werkzeug oder einer geeigneten Kinematik eingesetzt werden, vorausgesetzt, er steht physikalisch an einer geeigneten Stelle für den Einsatz. Damit kommt dem Auf- und Abbau der Assoziation zwischen Mastereinheit und Arbeitseinheit die gleiche Bedeutung zu wie in der industriellen, automatischen Fertigung dem Werkzeugwechsel an einem Roboter oder in einer Fertigungszelle.

- Ein weiteres Charakteristikum für MONSUN (wie schon für DISTEL) ist, daß die Wirkkette der Regelung nicht nur in eine Richtung, nämlich von der Mastereinheit zur

Arbeitseinheit, läuft, sondern auch in umgekehrter Richtung von den Kraft-Momenten-Sensoren der Arbeitseinheit zum Bedienarm der Mastereinheit. Dort muß entsprechend den gemessenen Kräften und Momenten die dem Bediener entgegenzusetzende Kraft in gleicher Weise eingeregelt werden. (Die Eingaben des Bedieners sind aus Sicht der Kraftreflexionsregelung für den Masterarm wie in Abbildung 2.2 auf S. 20 als Störgrößen aufzufassen.)

4.2.2 Objekthierarchie der MONSUN-Komponenten

Im Konzept von MONSUN sind die primären Komponenten die bereits eingeführte Mastereinheit und die Arbeitseinheit:

- Die *Mastereinheit (MEH)* ist dabei durch einen *Master-Manipulator*, den eigentlichen *Bedienarm*, und einen zugehörigen *Steuerrechner* realisiert. Abstrahierend kann für die konzeptuelle Betrachtung von MONSUN dieser Steuerrechner als Repräsentant der gesamten MEH angesehen werden. Er stellt als offenes System die Anbindung der MEH über das Netz bereit, nimmt die Umrechnung der Stellwinkel des Bedienarmes in die unter MONSUN standardisierten kartesischen Koordinaten (K_0) vor und sendet diese auf das Netz und er generiert die Steuersignale der aus den Kraft-Momenten-Sensoren (KMS) der Arbeitseinheit gewonnenen Kraftreflexionsdaten für den Bedienarm.

- Die *Arbeitseinheit (AEH)* ist wie schon die MEH in einem Steuerrechner und dem eigentlichen Robotersystem realisiert. Der AEH-Rechner nimmt die Kommandos von der MEH vom Netz, rechnet die Koordinaten in die vom Roboterarm spezifisch benötigten Stellwerte um und sammelt gleichzeitig im Polling-Verfahren die Ist-Daten der KMSen und der Stellgelenke auf, um sie an das Netz weiterzugeben. Der Steuerrechner der AEH kann außerdem direkt IRDATA[24]-Programme interpretieren und ausführen, so daß eine abstrakte Programmierung des Roboters direkt vor Ort möglich wird.

  Die heute erhältlichen Industrie-Roboter-Systeme, die als AEH eingesetzt werden können, müssen dabei als verteilte, hierarchische Systeme im folgenden Sinn verstanden werden: Die ausgelieferten Steuerungsrechner sind überwiegend an eine ganz bestimmte Roboter-Hardware angepaßt und werden dediziert eingesetzt. Als direkte Bedienschnittstelle verfügen sie meist über ein Bedienfeld mit Schaltern, Anzeigeleuchten, ggfs. ein eingebautes Bildschirmterminal oder ein Handprogrammiergerät (HPG). Sie können mittels serieller Schnittstellen gemäß IEEE RS232c oder CCITT V.24[25] mit übergeordneten Rechnern der Operativebene verbunden werden. Die Sensor-Elektronik der Steuerungsrechner selbst ist nicht in der Lage, die für die rückwirkende Regelung notwendigen Kraft-Momenten-Sensordaten zu erfassen und für die Regelung vorzuverarbeiten. Sie sind außerdem meist nur in geringem Maße geeignet, die an den Roboter montierbaren Werkzeuge in ihrem gesamten Umfang (im Koordinatensystem K_{TCP}) zu steuern, die infolgedessen behelfsmäßig als sogenannte Zusatz- oder Hilfsachsen (im Koordinatensystem K_0) behandelt werden müssen. Für die Steuerung der Effektoren und die Vorverarbeitung der KMS-Daten sind deswegen meist dedizierte Steuerungskomponenten notwendig. Eine reale AEH mit einem Industrieroboter hat typischerweise den in Abbildung 4.2 gezeigten gerätetechnischen Aufbau. Die im Sinne von MONSUN (insbesondere gegenüber dem Netz) als

[24] IRDATA ist ein in DIN 66 313 standardisiertes Format zur Übermittlung von Betriebsdaten für Industrieroboter

[25] In Deutschland genormt durch die DIN 66 020 in der Fassung vom Mai 1981

Steuerrechner die AEH repräsentierende Komponente, wie sie im Absatz zuvor beschrieben wird, ist der in Abbildung 4.2 der Operativebene zugeordnete Rechner.

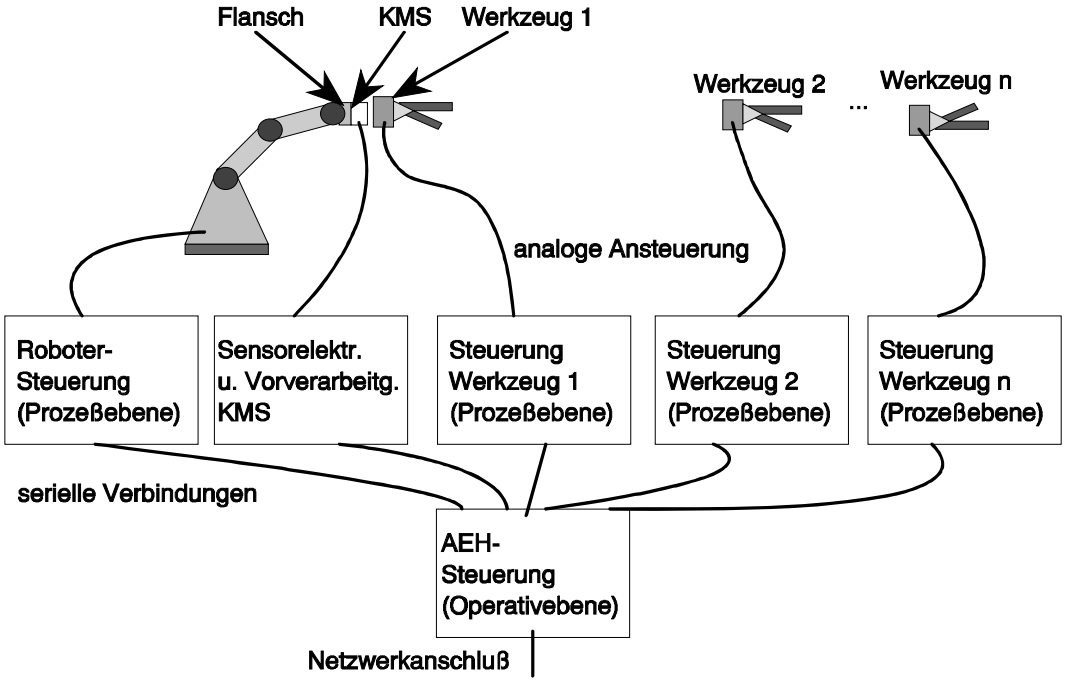

Abbildung 4.2: Gerätetechnischer Aufbau einer MONSUN-AEH

Neben MEH und AEH werden jedoch noch weitere Objekte unterschieden:

- Eine allgemein einsetzbare *Mensch/Maschine-Schnittstelle (MMI),* die die Verwaltung der Assoziationen und Teile der Steuerung realisiert,
- eine *Trackingeinheit (TEH),* die es ermöglicht, die Arbeit eines Effektors an einer Arbeitseinheit im Videobild zu beobachten. Dabei verfolgt die Trackingeinheit mit der Kamera automatisch die AEH und paßt Brennweite und Fokus der Objektive an die beobachtete Szene an, sie bleibt daneben aber auch manuell positionierbar. Die Daten für die automatische AEH-Verfolgung kommen hierbei aus den Ist-Paketen direkt von der AEH über das Netz.
- Eine *Monitoringeinheit (MOEH)* oder Überwachungseinheit, die im Rechnermodell eine 3D-Visualisierung von Aktionen der AEH vornimmt, Bahnbewegungen einer AEH aufzeichnet und speichert und aus früher aufgezeichneten, ggfs. manuell editierten Bahndaten AEH-Bewegungen simuliert und visualisiert. Die MOEH kann dabei auch die von einem lokal an einer AEH ablaufenden IRDATA-Programm generierten Statusmeldungen auswerten und visualisieren, was es denkbar macht, den eigentlichen Roboter einer AEH durch Software zu ersetzen und die Simulation des AEH-Betriebs allein mit Hilfe der MOEH durchzuführen.

Unter den aufgeführten Objekten können verschiedene Abhängigkeiten und Zuordnungen festgestellt werden, die sich in der für MONSUN typischen Objekthierarchie (Abbildung 4.3) widerspiegeln. Die der Anordnung zugrundeliegende Relation kann mit „erhält Informationen von“ bezeichnet werden.

Konkret wird eine gerätetechnische MEH-Gruppe gebildet, zu der der Masterarm selbst mit seinem Steuerrechner und eine multimediale MMI-Workstation gezählt werden. Die MMI-Workstation wird dabei dem MEH-Steuerrechner übergeordnet. Vom Konzept her steht dies im Einklang mit der Tatsache,

daß der MEH-Rechner empfangene Daten nicht unbedingt selbst auswerten muß, sondern zur Bearbeitung an das MMI durchreichen kann.

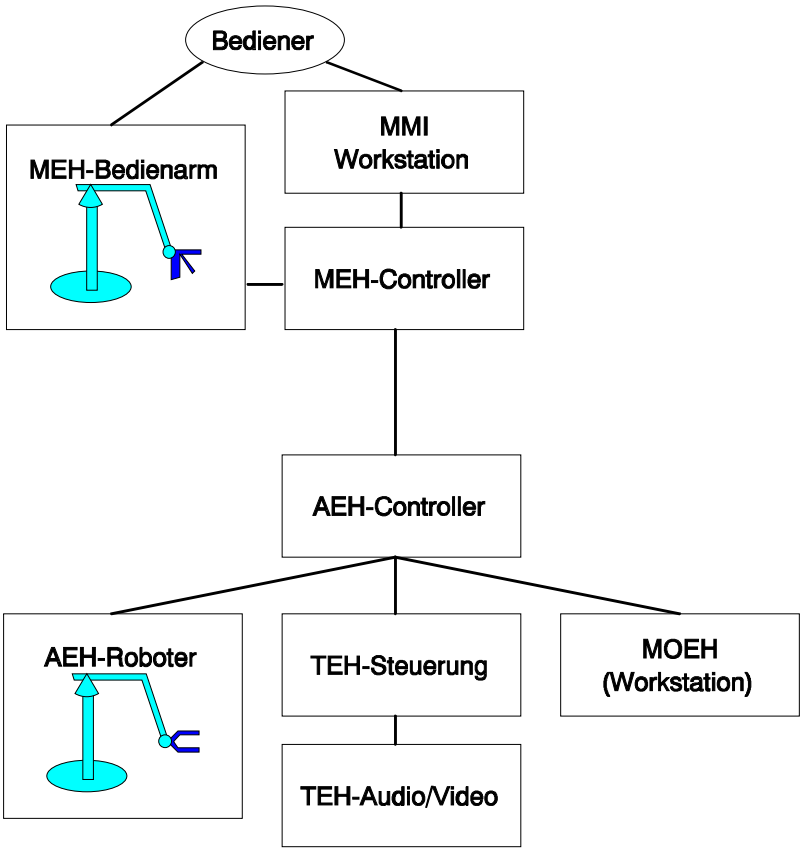

Abbildung 4.3: Objekthierarchie in MONSUN

Analog wird gerätetechnisch eine AEH-Gruppe gebildet, deren Kopf der AEH-Operativrechner bildet. Ihm untergeordnet sind neben dem eigentlichen Roboterarm sowohl die TEH mit dem an ihr angeschlossenen Audio/Video-Equipment als auch die MOEH. Die Zuordnung der MOEH zur AEH anstatt zur MEH – der sie räumlich tatsächlich zugeordnet ist – ist dadurch zu rechtfertigen, daß sie – wie weiter oben angedeutet – sehr sinnvoll zur Simulation nicht existenter Arbeitsroboter eingesetzt werden kann, bzw. bei großer räumlicher Distanz oder schwieriger Einsichtnahme auf die AEH das Verhalten der AEH am Ort der Bedienstation visualisiert, funktional und vom Informationsfluß her also eher einer AEH entspricht.

Immanent ist dieser Objekthierarchie die Prämisse, daß alle Aktivität von den MEHen ausgeht. Selbst dann, wenn eine AEH im Automatik-Betrieb von einem zuvor aufgezeichneten oder direkt per IRDATA eingegebenen Programm gesteuert wird, muß dieses Programm von einer MEH aus gestartet werden, was wiederum den Aufbau einer Assoziation zwischen MEH und AEH erfordert.

Im Sinne einer nebenläufigen, verteilten Arbeit ist dabei ein Sitzungskonzept und Sitzungsprotokoll zu betreiben, das es ermöglicht, eine Assoziation einer MEH zu einer AEH kurzfristig abzubauen, um die AEH im Automatik-Betrieb nebenläufig, selbständig arbeiten zu lassen, und für etwaige Eingriffe später wieder aufzunehmen. Dieses Konzept muß daneben aber auch ermöglichen, über eine bestehende Assoziation korrigierend und intervenierend in ein ablaufendes Programm einzugreifen. Um die Bindungen der MEH aus Sicht der Betriebsmittelbelegung möglichst flexibel zu gestalten, ist in MONSUN vorgesehen, daß auch eine AEH im Kommunikationssubsystem initiativ werden kann: Beim Erreichen eines

Ausnahmezustandes während des Automatikbetriebes (wenn z. B. ein Greifer seine Nutzlast verliert o. ä.) fordert die betroffene AEH selbständig einen Bediener-Eingriff über das Kommunikationssubsystem an. In der traditionellen Robotik werden drei übliche Interaktionskonzepte zwischen Gerät (in MONSUN: AEH) und Steuerrechner (in MONSUN: MEH) unterschieden: zyklusgesteuerte Interaktion, timergesteuerte Interaktion, Interaktion durch Unterbrechungsanforderung des Gerätes. MONSUN verfolgt üblicherweise die zyklusgesteuerte Steuerung, jedoch wird mit dem eben genannten Mechanismus ein der Unterbrechungssteuerung verwandtes Konzept simuliert.

4.2.3 Kommunikationskonzept von MONSUN

Die Struktur eines nach dem MONSUN-Konzept aufgebauten Systemes entspricht, wie in den voranstehenden Abschnitten gezeigt wurde, weitgehend der Struktur, die in Abschnitt 2.3, insbesondere in Abbildung 2.8 auf Seite 27, eingeführt wurde. Auch in MONSUN ist die eigentliche Regelung mit ihren Anwendungsprozessen über eine Mailbox-Struktur vom Kommunikationssubnetz entkoppelt.

4.2.3.1 Virtuelle Kommunikation der Anwendungsprozesse von MONSUN

Die Kommunikationsstruktur in MONSUN ist nahe am OSI-BRM orientiert. Es ist daher sinnvoll, verschiedene Kommunikationsprinzipien nach den in OSI üblichen Schichten zu betrachten.

Außerhalb der Normierung durch das Basisreferenzmodell wird in OSI die eigentliche Anwendung mit ihren Anwendungsprozessen angesiedelt, was darin begründet ist, daß Kommunikationsdienste zwar noch konfektioniert angeboten werden können – nämlich in Schicht 7 – nicht mehr jedoch die Vielfalt der diese Kommunikationsdienste nutzenden Anwendungen.

Als Anwendungen von MONSUN werden hier die Mastereinheit, respektive der die Mastereinheit bezüglich der Kommunikation repräsentierende Operativ-Rechner, und eine Arbeitseinheit bzw. deren Operativ-Rechner betrachtet.

In der AEH realisieren vier nebenläufige Prozesse die eigentliche Funktion:

- die übergeordnete AEH-Steuer-Task,
- eine AEH-Zyklus-Task,
- eine AEH-Kommunikations-Task und
- eine AEH-Zyklus-Empfangs-Task.

Korrespondierend dazu ist die MEH in fünf nebenläufigen Prozessen realisiert:

- der zentralen MEH-Steuer-Task,
- einer MEH-Zyklus-Task,
- einer MEH-Kommunikations-Task,
- einer MEH-Zyklus-Empfangs-Task und
- einer MEH-MMI-Kommunikations-Task.

Die korrespondierenden Prozesse haben die folgenden Aufgaben:

- Die Zyklus-Tasks sind als Prozesse höchster Priorität angesiedelt und werden durch einen Hardware-Timer zyklisch gestartet. Ihnen obliegt die Durchführung der eigentlichen Steuerung und Regelung in oben beschriebener Weise.
- Die Steuer-Tasks führen die der Operativ-Ebene zuzuordnenden Aufgaben aus, das heißt, sie steuern die Betriebsarten der Einheiten, starten sie oder schalten zwischen

ihnen um, erlauben die Beeinflussung des Betriebes und realisieren die logische Ablaufsteuerung der MONSUN-Funktionen.

- Die Empfangstasks, bzw. Kommunikationstasks dienen zur Abkopplung des Kommunikationssubsystemes vom Regelungssystem, die auf diese Weise asynchron arbeiten können. Dies ist im Sinne einer Art „Staukontrolle“ für die Zyklus-Tasks notwendig, um eben die Zyklus-Task vor der Überlastung durch burstartig einlaufende Steuermitteilungen zu schützen. Die Mailboxen der Kommunikationsprozesse dienen dabei als Pufferspeicher.
- Die nur auf MEH-Seite existente MMI-Kommunikations-Task dient in ähnlicher Weise wie die Empfangs-Tasks zur Entgegennahme von Mitteilungen vom separaten Rechner der Mensch-Maschine-Schnittstelle und zur Ablieferung von Mitteilungen an ihn.
- Darüber hinaus sind noch eine Error-Task zur separaten Fehlerbehandlung, ein Abort-Prozeß und ein Console-Input-Prozeß vorhanden, die der Übersichtlichkeit halber in der Abbildung 4.4 nicht separat aufgeführt sind.

Aufbauend auf diesen Prozessen lassen sich verschiedene Kommunikationskanäle unterscheiden, die ebenfalls in Abbildung 4.4 schematisch dargestellt sind.

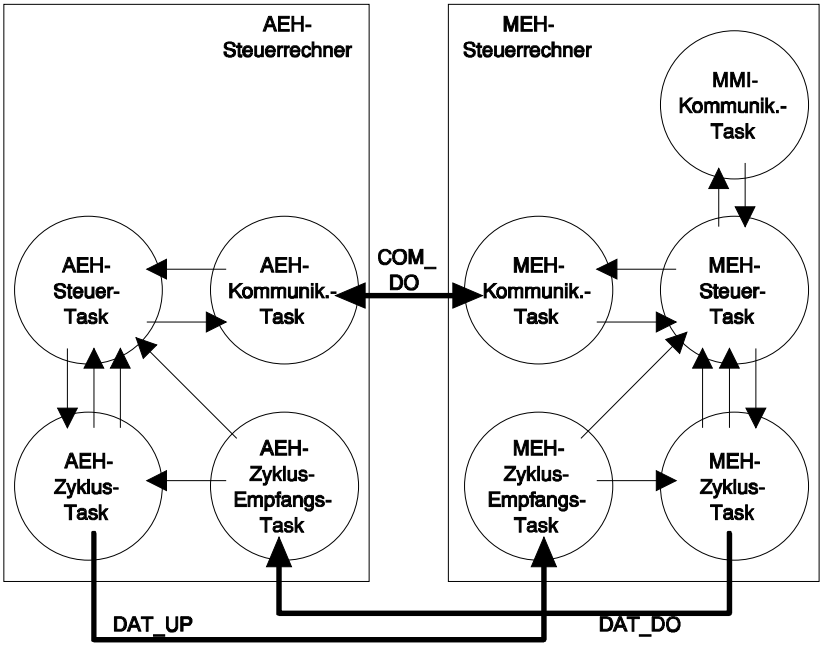

Abbildung 4.4: Prozeß- und Kommunikationsstruktur in MONSUN

Zu beachten ist, daß es sich dabei um zwei Klassen von Kanälen handelt, nämlich um Kanäle für die strenge *Interprozeßkommunikation (IPC, Inter Process Communication)* (in der Abbildung 4.4 durch dünne Pfeile dargestellt) und virtuelle Kanäle, die über das externe Kommunikationsnetz zu realisieren sind (in der Darstellung durch dickere Pfeile gekennzeichnet).

Im Sinne einer Vereinheitlichung oder Standardisierung, die eine weitgehend „steckerkompatible“ Interoperabilität aller Einheiten als Ziel hat, können die IPC-Kanäle nach dem Geheimnisprinzip ausgelegt werden. Allein die Außenbeziehungen sind für eine funktionierende Kooperation von MEH und AEH verbindliche Schnittstellen. Die gezeigte Taskstruktur ist eine Bestandsaufnahme der tatsächlich realisierten Demonstratoren, die für eine Analyse der typisch auftretenden Lasten herangezogen wird. Denkbar ist jedoch auch,

daß alle drei Kanäle von nur einer integrierten Kommunikationstask verwaltet werden, was nach außen jedoch zu den gleichen Datenflüssen führen würde.

Im einzelnen wird MONSUN durch drei externe Informationsflüsse gekennzeichnet:

- Mitteilungen zur Regelung von der MEH an eine AEH werden über einen sogenannten **DAT_DO** (**Dat**a Flow **Do**wnstream) Kanal geführt. Nutzdaten des DAT_DO-Kanals sind die Sollvorgaben für die AEH.
- Die Regelungsdaten von AEH an die zugeordnete MEH laufen über den sogenannten **DAT_UP** (**Dat**a Flow **Up**stream) Kanal. Die Nutzdaten sind die Sollwerte für die Kraft/Momente-Reflexion im Bedienarm.

Sie verbinden also die jeweilige Zyklus-Task unidirektional mit der puffernden Empfangstask.

- Getrennt davon existiert ein bidirektional ausgeprägter **COM_DO**-Kanal (**Com**munication **Do**wnstream), der für den Austausch von Statusinformationen oder zur Signalisierung eingesetzt wird. Eine wesentliche Aufgabe dieses Kanals ist die Ablieferung von Nachrichten des unterliegenden Transportsystemes (OSI-Layer 4).

Die Prozesse, die die Kanäle und zugeordneten Mailboxen steuern, werden mit unterschiedlichen Prioritäten betrieben, die außerdem in MEH und AEH für die analoge Task noch unterschiedlich ausgelegt sind.

Tabelle 4.1: Priorisierung der typischen MONSUN-Tasks

Task	Priorität bei der MEH	Priorität bei der AEH
DAT_DO	50	211
DAT_UP	212	50
COM_DO	210	210
ERROR	140	140
ABORT	34	34
MMI	220	––
CONSOLE_INPUT	221	––

In der MEH hat die für DAT_DO zuständige Task die relativ höchste Priorität, die Prozesse für DAT_UP und COM_DO sind mit geringerem Gewicht versehen, auf Seiten der AEH wird modellkonform DAT_UP mit der höchsten Priorität bedient, DAT_DO und COM_DO sind entsprechend geringer bewertet[26]. Die exakten, empirisch optimierten Werte finden sich in Tabelle 4.1.

Die Kopplung von MEH und AEH wird *verbindungsorientiert* gehandhabt; das heißt, die in Abbildung 4.4 dargestellten externen Informationsflüsse werden in der Implementierung auf tatsächliche *Virtual Channels (VC)* des Kommunikationssubsystemes abgebildet, die entsprechend aufgebaut, überwacht und abgebaut werden müssen.

[26] Wie allgemein bei Betriebssystemen üblich, die Prioritäten zulassen, bezeichnet ein niederer Zahlenwert eine höhere Priorität. Für Regeln zur Vergabe von Prioritäten vergleiche man etwa /ReLe94/ Kap. 2.4.2.

4.2.3.2 ISO-OSI-orientierte Kommunikationsstruktur von MONSUN

Das in der Kommunikationskomponente von MONSUN verfolgte Konzept ist eng am OSI-BRM orientiert, wie es in Abschnitt 2.2.4 vorgestellt wurde. Hierbei sind jedoch nur die übertragungsorientierten Schichten eins bis vier tatsächlich implementiert. Die im voranstehenden Absatz beschriebenen Anwendungsprozesse setzen auf der Transportschicht auf und kümmern sich intern um die Abwicklung von Sitzungs- und Darstellungsproblemen. Auch der Assoziationsauf- und -abbau und der Datenaustausch zwischen den Mailboxen der kommunizierenden Teilsysteme werden **nicht** über die nach ISO oder CCITT empfohlenen *Single Association Objects (SAO)* mit Hilfe von standardisierten Dienstelementen *(CASE, Common Application Service Elements*, und *SASE, Special Application Service Elements*) wie *ACSE (Association Control Service Element), ROSE (Remote Operation Service Element), RTSE (Reliable Transfer Service Element), MHS (Message Handling System)* oder *JTM (Job Transfer and Manipulation)* abgewickelt, sondern geschieht tatsächlich als Aufbau einer Transportverbindung.

Die ISO führt für die Kommunikation über bestehende oder einzurichtende Netzwerkverbindungen verschiedener Güte angemessene Transportprotokolle in vier Klassen ein. Die Klassen sind zum einen der Güte der Vermittlungsschicht angepaßt, die nach den Kriterien „Restfehlerrate“ und „Rate auftretender N-Disconnects/N-Resets“ bewertet und selbst bereits in drei Klassen partitioniert wird /LoKr93/:

- Typ A bietet eine für den Vermittlungsschichtbenutzer hinreichende Restfehlerrate und Rate der von der Vermittlungsschicht angezeigten Fehler.
- Typ B befriedigt zwar in der Restfehlerrate, jedoch nicht in der Rate der angezeigten Fehler.
- Typ C kann in beiden Kriterien nicht befriedigen.

Auf dieser Basis sieht die ISO für OSI die folgenden fünf Transportprotokollklassen vor:

- Klasse 0 (*TP0*) setzt eine bestehende, zuverlässige Netzwerkverbindung (Typ A) voraus, die durch das TP0 (Transportprotokoll der Klasse 0) 1:1 auf eine Transportverbindung abgebildet wird.
- Klasse 1 (*TP1*) ist in der Lage, zusätzlich zur Klasse 0 noch eine Behandlung von Fehlern, die von der Vermittlungsschicht angezeigt werden, durchzuführen. TP1-Protokolle sind also für Vermittlungsdienste des Typs B geeignet.
- Klasse 2 (*TP2*) basiert ebenso wie die Klasse 0 auf einem Typ A Vermittlungsdienst, kann jedoch in Erweiterung von TP0 mehrere Transportverbindungen auf eine Vermittlungsverbindung abbilden (multiplexen). Die kommunizierenden Transportdienstnehmer können dabei die Verwendung von Flußkontrollmechanismen aushandeln.
- Klasse 3 (*TP3*) bietet die zusätzlichen Qualitätsmerkmale „Multiplexing“ und „Flußkontrolle“ für Vermittlungsdienste des Typs B, vereint also die Charakteristika der Klassen 1 und 2.
- Klasse 4 (*TP4*) ist die komplexeste Protokollklasse der Transportschicht. Über die Leistungsmerkmale der Klasse 3 hinaus bietet sie noch Mechanismen zur Fehlererkennung und Fehlerbehandlung, eignet sich also auch für das Aufsetzen auf Vermittlungsdiensten des Typs C.

In MONSUN kommt ein TP4-Protokoll zum Einsatz, realisiert gemäß ISO 8073 im Softwareprodukt iNA 960 der Firma Intel.

Beim Aufbau einer Transportverbindung zwischen MEH und AEH muß die verbindungsinitiierende Station in der Lage sein, einen *Dienstzugangspunkt der Transportschicht (T-SAP, Transport Service Access Point)* der Zielstation anzusprechen. Jeder der in Abbildung 4.4 und Absatz 4.2.3.1 eingeführten Kanäle wird 1:1 auf eine Transportverbindung abgebildet. Nach /Tane92/ kann dies über eine zuvor festgelegte statische Abmachung geschehen oder über einen Standard-Anlaufpunkt (*Name-Server, Directory-Server*), der aufgrund der Verbindungs-Aufbau-Anfrage die gewünschte Adresse liefert. Da MONSUN von einem begrenzt lokalen Einsatz ausgeht, bei dem die Zahl der potentiellen Kommunikationspartner überschaubar bleibt, wird hier die statische Variante bevorzugt. Die T-SAPs aller Kanäle werden über eine statische Ressourcendatei für alle potentiell beteiligten Stationen propagiert, was bei Eingliederung einer neuen Station in den Pool manuell durch Einlesen an allen potentiellen Kommunikationspartnern geschieht.

Der Vorteil, auf einen standardisierten OSI-Transportdienst (in geschichteter Implementierung) zurückzugreifen, zeigt sich im Betrieb der aufgebauten Verbindungen: TP4 sorgt mit den nachstehend tabellarisch aufgeführten Funktionen für den sicheren Transport der Regelungsdaten über das unterliegende Netz, von dem (außer der Eignung für die Echtzeit-Rahmenbedingungen) keine näheren Einzelheiten bekannt sein müssen.

Die Leistungen von TP4 sind:

- Verbindungsauf- und Verbindungsabbau, Ablehnung von Verbindungen
- Segmentierung langer Nachrichten auf T-PDUs und Reassemblierung von T-PDUs zu kompletten Nachrichten
- Zuordnung von T-PDUs zu Transportverbindungen
- Übertragung von T-PDUs
- Protokollfehler-Behandlung
- Folgenumerierung von T-PDUs und Quittierung von T-PDUs
- Vorrangdaten Übertragung (Expedited Data Transfer)
- Flußsteuerung der Transportschicht (Kreditvergabe, Sliding Windows)
- Resynchronisation nach Fehlern der Vermittlungsschicht (N-RESET) mit notwendiger T-PDU-Pufferung bis zur Bestätigung (Acknowledge)
- Multiplexing (mehrere T-Verbindungen auf eine N-Verbindung) und Aufteilung (eine T-Verbindung über mehrere N-Verbindungen). Die Fähigkeiten von TP4 erlauben also, mit Hilfe von Multiplexing die für jeden der Kanäle COM_DO, DAT_DO und DAT_UP aufgebauten Transportverbindungen auf eine Vermittlungsverbindung abzubilden.
- optionale Generierung von Prüfsummen der Transportschicht.

4.2.3.3 Tiefere Protokollschichten in MONSUN

Bei einer sauberen Schichtimplementierung des Kommunikationssystemes ist Information über die tieferen Schichten, wie gesagt, nur in geringem Maße erforderlich.

Eine erforderliche Information ist die Leistungsfähigkeit des Systemes, bewertet in den Faktoren Übertragungsgeschwindigkeit und Fehlerrate. Dabei spielt die Struktur insofern eine wesentliche Rolle, als das Gesamtsystem nach dem Bottleneck-Prinzip nur so leistungsfähig sein kann wie seine schwächste Komponente.

Die drei tiefen Schichten, die für MONSUN eingesetzt werden, sind standardisierte und konfektionierte Netzwerkprodukte auf der Basis von *ISO IS 8802/3, Carrier Sense Multiple Access with Collission Detection (CSMA/CD),* häufig kurz *Ethernet* genannt. Ethernet bietet bei einer für Kupferverkabelung durchschnittlichen Bitfehlerrate von 10^{-9}...10^{-10} (/Mühl93/) eine Gesamtbandbreite von 10 Mbit/s, die auf alle angeschlossenen Stationen im Konkurrenzverfahren aufgeteilt wird. Für den Zugriff der Stationen wird mit CSMA/CD ein indeterministisches Verfahren implementiert, so daß keine konstanten Verzögerungszeiten angegeben werden können. Das Medium Ethernet ist dennoch für den Transport der Regelungs-Nachrichten geeignet, nicht jedoch für den integrierten Transport der an der TEH entstehenden Audio/Video-Daten. Charakteristische Daten in diesem Zusammenhang werden in Kapitel 5 bei der Aufstellung der Übertragungsanforderungen genannt.

Als physikalisches Medium wird ein Segment des im IAI verlegten „gelben Kabels“ 10Base5 verwendet, das über einen aktiven Sternkoppler der Firma Hirschmann mit den weiteren drei 10Base5-Segmenten und dem einen 10Base2-Segment des Gebäudes verbunden ist. Eine Anbindung an das Backbone des Forschungszentrums, einen Doppelring in Glasfaser, auf dem FDDI betrieben wird, ist vom Hirschmann-Sternkoppler ausgehend mit einem sechsfaserigen Lichtwellenleiter realisiert. Die MONSUN-Stationen sind an dieses Netz physikalisch über *Transceiverdosen (AUI, 15-pin SUB-D)* und Drop-Kabel angeschlossen.

Als Ethernet-Adapter Hardware kommen die Karten „OpenNet PCLink 2“ des Herstellers Intel zum Einsatz. Sie bieten die Funktionen der OSI-Schichten 1 und 2 in schneller Hardware. Die Funktionen der OSI-Schicht 3 werden über das IBM-Protokoll „NetBIOS“ realisiert.

4.2.3.4 Funktionalität des Transportdienst-Anpassungsmoduls „LEVEL4“

Um auch in MONSUN nicht auf die Flexibilität verzichten zu müssen, die ein Aufsetzen auf dem gesamten Protokoll-Stack von OSI für die Anwendung bietet, wurde als Ersatz für die anwendungsorientierten OSI-Dienste (der Sitzungs-, Darstellungs- und Anwendungsschicht) ein spezielles Anpassungs-Modul mit der Bezeichnung „LEVEL4“ implementiert.

Es realisiert im Wesentlichen ausgewählte Funktionen zur Übersetzung der für die Anwendungsprozesse typischen Schnittstellensemantik der Kanäle COM_DO, DAT_DO und DAT_UP auf standardisierte Transport-Dienstelemente.

Die an der LEVEL4-Schnittstelle den Anwendungen angebotenen Dienste sind im einzelnen (sofern möglich, wird dem Dienst-Bezeichner in eckigen Klammern eine Zuordnung zu einer der höheren OSI-Schichten nachgestellt):

- **`Open_Net`** [5]: meldet den Aufrufer bei der Netzwerksoftware (iNA 960) an, welche einen **`COMMUSER`**-Token als Berechtigung zum Aufruf der eigentlichen Netzwerkdienste zurückliefert.
- **`Open_vc`** [5]: setzt an der Transportschnittstelle ein T-Connect.Request ab und initiiert dadurch den bestätigten Transportverbindungsaufbau nach dem *„Three-Way-Handshake“* (s. z. B. /LoKr93/ S. 230). Als Parameter werden der Bezeichner des entfernten Rechners (**`rem_hi`**, Remote Host Id) und der dort anzusprechende T-SAP (**`rem_tsap`**, Remote T-SAP Id) übergeben. Zurückgeliefert wird dem Initiator eine „**`cdb`**“ genannte Kennung für die virtuelle Transportverbindung.
- **`Open_vc_await`** [5]: ist der **`Open_vc`** beantwortende Prozeß. Es ist erlaubt, die Kennung des Remote Host mit 0 anzugeben, was ermöglicht, alle **`Open_vc`**-Requests, ganz gleich von welchem Rechner im Netz sie kommen, zu akzeptieren.

- **`Open_Resource`** [7]: legt einen Requestblock mit zugeordneter Mailbox an, die auf einen bestimmten Transport-VC ausgelegt sind und nur von ihm verwendet werden können. Eine n:1-Zuordnung von Requestblock/Mailbox zu T-VC ist möglich.
- **`Close_Resource`** [7]: gibt belegte Ressourcen wieder frei.

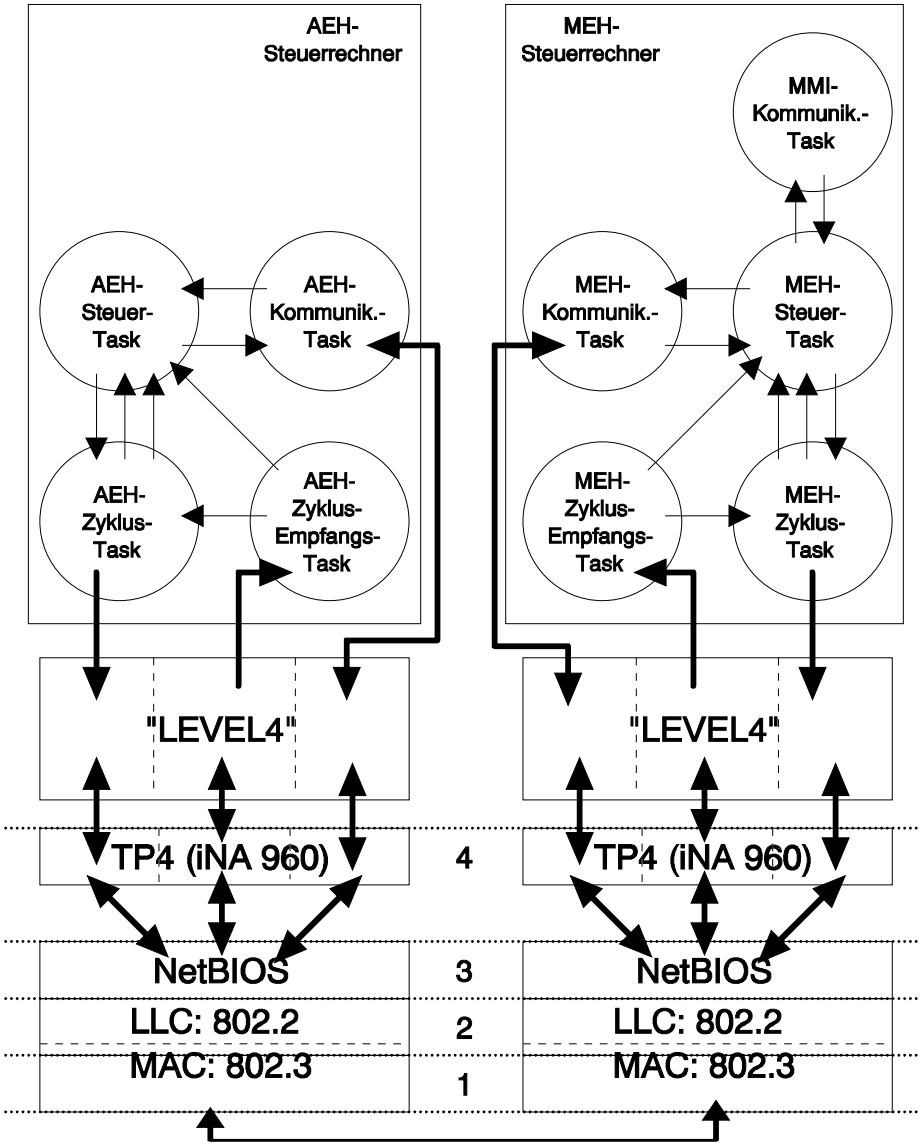

Abbildung 4.5: Führung der externen Kommunikationskanäle über eine Anpassungsschicht und einen handelsüblichen TP4-Protokoll-Stack auf Ethernet

- **`Send_vc_Data`** [5, 7]: führt den eigentlichen Datentransfer durch (initiiert ein T-Data.Request an der Transportschnittstelle).
- **`Send_vc_Wait`** [5, 7]: ist die zu **`Send_vc_Data`** korrespondierende Antwortfunktion.
- **`Recv_vc_Data`** [7]: fordert Nachrichten vom Remote-Host an (Polling).
- **`Recv_vc_Wait`** [7]: realisiert den „Server“ für voranstehendes Polling.
- **`Close_vc`** [5]: Verbindungs-Abbau, vom Sender veranlaßt.
- **`Close_vc_await`** [5]: Verbindungs-Abbau, vom Empfänger veranlaßt.
- **`Get_rhi`** [7]: kann als Nameserver-Anfrage verstanden werden: zu dem als Parameter angegebenen logischen Rechnernamen wird die entsprechende **`rem_hi`** (Remote Host Id) geliefert.

- **`Open_dg_Resource`** [7]: legt wie **`Open_Resource`** eine Mailbox mit Requestblock an, jedoch nicht verbindungsorientiert, sondern für die verbindungslose Kommunikation über *Datagramme*.
- **`Close_dg_Resource`** [7]: gibt eine zuvor belegte Datagramm-Mailbox wieder frei.
- **`Send_dg_Data`** [5, 7]: Datentransfer über den Datagrammdienst des Transportsystemes.
- **`Send_dg_Wait`** [5, 7]: Antwortfunktion für Datagrammdienst.
- **`Recv_dg_Data`** [7]: Polling im Datagramm-Dienst.
- **`Recv_dg_Wait`** [7]: Server für das Datagramm-Polling.

Mit Hilfe dieser Dienste läßt sich der Regelungs-Betrieb unabhängig vom tatsächlich eingesetzten Transportsystem durchführen. Ein Wechsel vom Intel-TP4-Stack „iNA 960“, etwa auf die Protokollsuite des DoD (US Department of Defense, Initiator der Internet-Protokollentwicklungen), *TCP/UDP (Transmission Control Protocol/User Datagram Protocol),* erfordert nur die entsprechende Anpassung der Ausgangsseite von „LEVEL4“.

Die gesamte Task-, Kanal- und Schichtstruktur ist zusammenfassend in Abbildung 4.5 dargestellt. Hier ist das in den Demonstratoren eingesetzte TP4-basierte Kommunikationssubsystem abgebildet.

4.2.3.5 In der Realisierung von MONSUN eingesetzte Produkte

Bei den Piloten, die nach dem MONSUN-Konzept am IAI installiert sind, werden bisher Multibus-Rechner auf der AEH-Seite und Industriestandard-PCs auf AEH- und MEH-Seite eingesetzt.

Sie sind für die Netzwerkkommunikation über das Ethernet mit den in Abschnitt 4.2.3.3 genannten Standard-Produkten der Firma Intel bestückt.

Da das für die Industriestandard-PCs eingesetzte Betriebssystem für die Regelung den Timesharingbetrieb unter Echtzeitbedingungen zur Verfügung stellen muß, konnte nicht auf die weit verbreiteten Standard-Systeme MS-DOS oder OS/2 von Microsoft bzw. IBM zurückgegriffen werden, vielmehr wurde das Echtzeitbetriebssystem RMX des Herstellers Intel herangezogen. Hierauf sind heute als Zusatz speziell angepaßte Plattformen MS-DOS/Windows aufsetzbar. RMX ist ebenso für die z. T. in der Robotersteuerung noch eingesetzten Multibus-Rechner verfügbar.

Für die Programmierung der Anwendungsprozesse und der Anpassungen steht ein leistungsfähiger PASCAL-Compiler zur Verfügung. „LEVEL4“ sowie die genannten Regelungsprozesse sind entsprechend in RMX-PASCAL geschrieben.

4.3 ARTEMIS – die Weiterführung von MONSUN für die medizinische Anwendung

4.3.1 ARTEMIS – Advanced Robotics and Telemanipulation System for Minimally Invasive Surgery

ARTEMIS ist das Akronym für Advanced Robotics and Telemanipulation System for MIS, wobei MIS selbst ein Akronym aus Minimally Invasive Surgery ist. Es bezeichnet ein Projekt am Forschungszentrum Karlsruhe, in dem die MONSUN-Prinzipien, angepaßt für den Einsatz in der minimal invasiven Chirurgie, fortentwickelt werden.

Die Fortenwicklung geschieht einerseits im Sektor der Roboter und Effektoren, wo die bislang bei MONSUN eher handhabungs- und fertigungstechnisch ausgelegten Roboter durch Systeme für den medizinischen Einsatz ersetzt bzw. ergänzt werden, andererseits werden auch im Systemkonzept Veränderungen vorgeschlagen.

Dies hat seine Notwendigkeit unter anderem auch darin, daß bei der Festlegung der MONSUN-Prinzipien die Assoziation zwischen MEH und AEH dominierend war. Für den Einsatz mit allen schon in MONSUN eingeführten Objekten hat sich dieses Konzept zum Teil als zu starr erwiesen und muß entsprechend angepaßt werden.

4.3.2 ROBOX – Beispiel einer für den Medizineinsatz entwickelten Telemanipulator-Komponente

Als Beispiel für einen an den medizinischen Einsatz angepaßten Effektor sei hier „EFS-ROBOX“ stellvertretend genannt.

Hierbei handelt es sich um ein Endoskopführungssystem (EFS), das es ermöglicht, über MONSUN-Protokolle ein in einem Träger montiertes 3D-Video-Endoskop zu positionieren. Im Sprachgebrauch der MONSUN-Objekte ist ROBOX damit eine TEH.

In diesem System ist das Endoskop entlang einer in Grundstellung orthogonal zur Berührebene des Eintrittspunktes in den Bauchraum des Patienten liegenden Achse ein- und ausfahrbar. Die Lage der Berührebene selbst und damit der Normal-Achse kann jedoch über zwei sich orthogonal schneidende Führungssphären, die als Halbkreise konzentrisch zur Bauchdecke des Patienten angeordnet sind, im Rahmen der durch den Trokar gegebenen Freiheit verändert werden. Mit dieser Regelgeometrie läßt sich das optische Ende des Endoskops in einem kegelförmigen Bereich bzw. Kugelsektor des Operationsraumes positionieren.

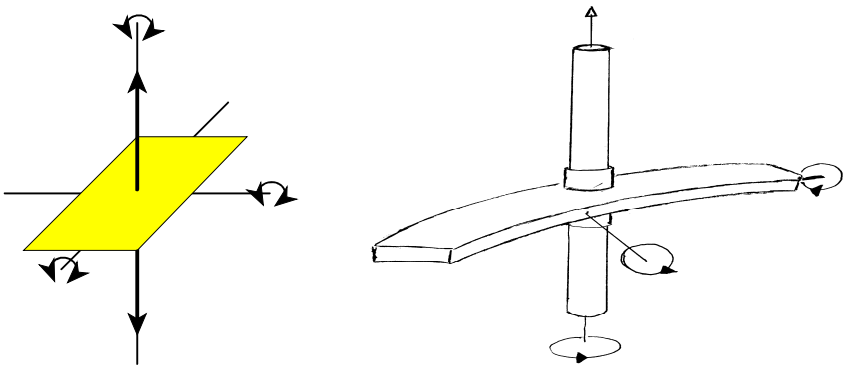

Abbildung 4.6: Freiheitsgrade für die Steuerung von ROBOX

ROBOX sieht dafür eine Regelung ohne Kraft-/Momentenreflexion in vier Freiheitsgraden vor: neben dem translatorischen Freiheitsgrad zum Ein- und Ausfahren des Endoskopes und den zwei sphärischen Koordinaten zur Neigung der Endoskop-Hauptachse ist noch eine Rotation um die Hauptachse möglich.

Zur Steuerung wurde ein in Abbildung 4.7 symbolisch dargestelltes MEH-Modul entwickelt, bei dem die Positionierung nicht mittels eines Masterarmes vorgenommen wird, sondern vorzugsweise durch natürlichsprachliche Kommandos („vor“, „zurück“, „links“, „rechts“, „halt“), durch die Koordinatenvorgaben mit einer speziellen mehrdimensionalen Maus, die neben den ebenen Bewegungen auf der Arbeitsfläche über Infrarotsensoren auch Bewegungen in einer dritten Dimension erfassen kann, durch Steuerung mittels eines Fußpedales

oder über entsprechende grafische Bedienfelder des als Kontrollrechner eingesetzten PCs. EFS-ROBOX ist in dieser Betriebsart als AEH aufzufassen. Daneben ist ein Tracking-Verfahren möglich, bei dem das Endoskop aufgrund von Positionssignalen einem eingesetzten chirurgischen Effektor automatisch folgt. Die Signale werden an der Endoskopspitze von einem Sensor empfangen und am Effektor von einem Mikrotransmitter ausgesendet.

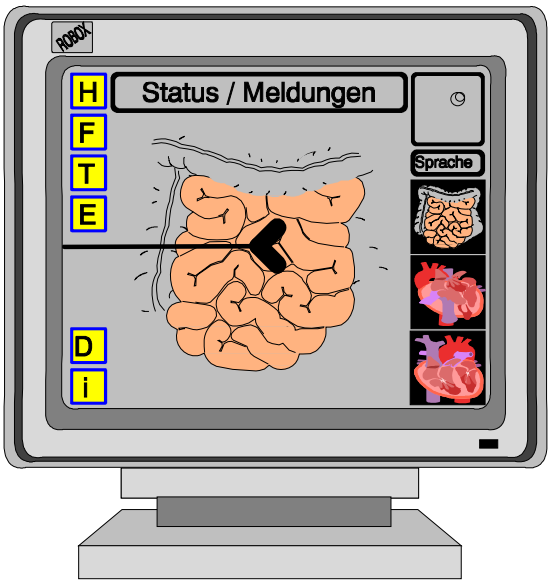

Abbildung 4.7: Kontrollbildschirm für ROBOX

Das gezeigte Bediensystem für den AEH-Betrieb war dabei zunächst in der Weise einer konventionellen Regelung als Modul auf dem Steuerungsrechner des EFS-ROBOX implementiert. Im Sinne von MONSUN wurde jedoch eine Trennung von MMI/MEH-Modul und TEH/AEH-Steuerung auf zwei Maschinen vorgenommen. Im augenblicklichen Status wird als Transportsystem ein TCP/IP-Stapel auf beiden Rechnern eingesetzt (s. Abschnitte 4.3.4.1 und 4.3.4.2).

4.3.3 Objekthierarchie von ARTEMIS

Veränderungen des Konzeptes werden primär in der Objekthierarchie vorgeschlagen, sekundär in der Kommunikationsstruktur.

Sind bei MONSUN die Operativrechner von MEH und AEH die wesentlichen Angelpunkte der die Regelung betreffenden Kommunikation, alle anderen Objekte der MEH übergeordnet, der AEH untergeordnet, so wird in ARTEMIS ein zentralistisches Modell verfolgt. Im Mittelpunkt des Systemes steht nun das als *MMI (Man/Machine Interface, Mensch-Maschine-Schnittstelle)* bezeichnete Kontrollsystem. Es hat gegenüber MONSUN, wo es unterstützend als Initiator der Assoziationsausbildung zwischen MEH und AEH und zur Wahl der Betriebsart eingesetzt wurde, erweiterte kontrollierende und koordinierende Funktionen. Diese Erweiterung wird insbesondere im Hinblick darauf vorgenommen, daß in einer chirurgischen Anwendung nicht mehr ausreichend sein kann, nur eine MEH zur Regelung einzusetzen. Es wird vielmehr sinnvoll sein, mehrere MEHen (etwa mit Datenhandschuh oder Sidestick für linke und rechte Hand und Pedalen als „Bedienarm“ ausgestattet) über ein MMI koordiniert in den Prozeß einzubringen.

Daneben muß im Simulationsbild auf dem MMI nicht nur der Betrieb einer AEH dargestellt werden, sondern in einem Fenster sind alle beteiligten AEHs simultan zu visualisieren.

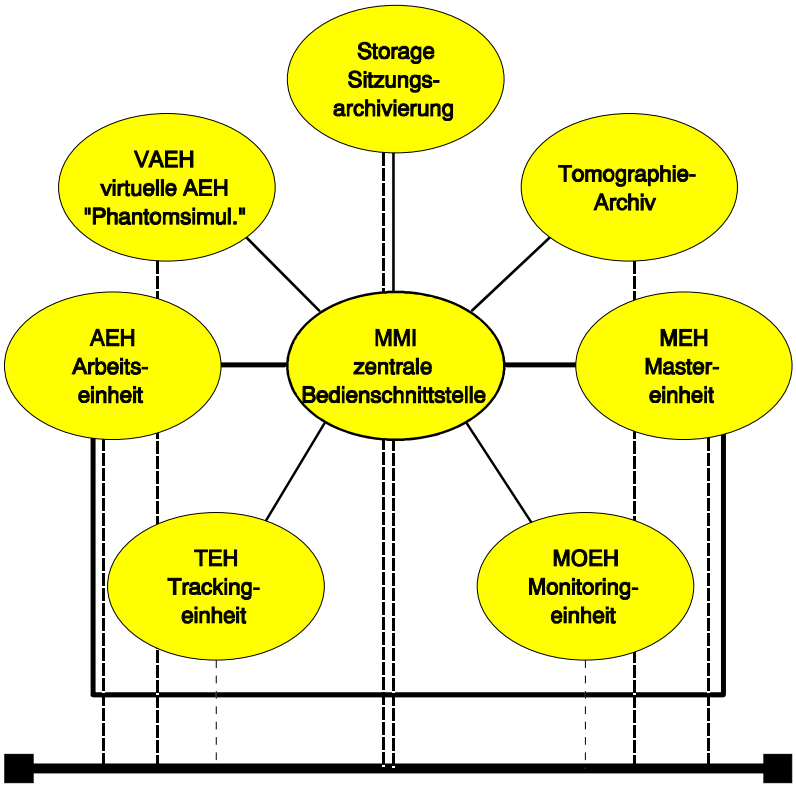

Abbildung 4.8: Zusammenfassende Ansicht der ARTEMIS-Komponenten mit Objektstruktur, Kommunikationsstruktur und Netzstruktur

Dem MMI untereinander gleichrangig beigeordnet werden die anderen von MONSUN her bekannten Objekte wie TEH und MOEH, jedoch auch neue Objekte:

- *Sitzungs-Archiv (Storage)* zur Aufzeichnung von Operationssitzungen mit dem ARTEMIS-System, das für spätere Optimierungsansätze, für Schulungszwecke, zur Funktions- und Gütekontrolle ersetzter Komponenten, aber auch zur Beweisführung in etwaigen Rechtsstreitigkeiten wegen Kunstfehlern einzusetzen ist.
- *Computer-Tomographie-Archiv*, von dem für den aktuellen Eingriff Computertomogramme des Patienten abgerufen und dem Bild der realen Szene überlagert werden können.
- *Medizin-Datenbanken*, die frühere, allgemeine medizinische Daten (Befunde, Medikationen, ...) des Patienten online verfügbar halten.
- *Virtuelle Arbeitseinheiten (VAEH)* oder *„Phantom-Simulatoren“*, die – besonders für Ausbildungszwecke – in virtueller Realität das Verhalten von Operationsgebieten (Bauchraum, Galle, Leber, ...) mit einer Arbeitseinheit dem Bediener an MMI/MEH simulieren.

4.3.4 Kommunikationsstruktur in ARTEMIS

4.3.4.1 Veränderte Informationsflüsse im Vergleich zu MONSUN

Der dieser zentralistischen Objekttopologie entsprechende typische Kommunikationsfluß würde auf diese Weise nicht mehr zwischen MEH und AEH ablaufen, sondern in Sternstruktur über das MMI. Da in diesem Fall jedoch das MMI rasch zum Flaschenhals der Kommunikationsleistung werden kann, soll das ARTEMIS-Konzept eine Auflösung der

Sternstruktur bei der Kommunikation unterstützen, indem die Regelung über die bekannten DAT_UP- und DAT_DO-Kanäle nach wie vor direkt zwischen MEH und AEH läuft (dickere Linien in Abbildung 4.8).

Anders verhält es sich jedoch beim COM_DO-Kanal:

- die Koordinationsinformationen, die er in MONSUN transportiert, können auch bei ARTEMIS verbindungsorientiert über COM_DO geführt werden,
- die Statusmeldungen der Arbeitseinheiten sollten jedoch als Datagramme im Broadcast über einen neu zu definierenden Kanal zurückgegeben werden.

Dies hat den Vorteil, daß die Stationen, die nicht aktiv am Regelprozeß beteiligt sind, aber zu Archivierungszwecken, zur Simulation oder Visualisierung über den Betriebszustand der Roboter und Werkzeuge informiert sein müssen – also die Mehrzahl der oben eingeführten Objekte –, nicht eigens vom MMI mit den Daten versorgt werden müssen, sondern im selben Kommunikationsvorgang wie das MMI diese Daten erhalten.

Neben der Entlastung der Workstation, auf der das MMI implementiert ist, wird dadurch die gesamte Verkehrslast auf der bei Ethernet in Bus-Topologie ausgeprägten Kommunikationsinfrastruktur reduziert (in Abbildung 4.8 unten mit den Busanschlüssen der Objekte als gestrichelte Linien) und der Verwaltungsaufwand, welche Objekte die Statusinformationen zu erhalten haben, wird verteilt. Aufgrund der in Datagrammen stets vorhandenen Absenderadresse, kann jedes „lauschende“ Objekt nach initialer Einrichtung durch das MMI lokal entscheiden, welche Statusdatagramme für es bestimmt sind.

4.3.4.2 Wechsel von der Intel-OSI-Protokollsuite auf die DoD-Protokollfamilie

Da als Rechner für das MMI die Leistung der bisher verwendeten Industriestandard-PCs nicht befriedigt, soll hier auf die nächsthöhere Leistungsklasse der Workstations gewechselt werden.

Dies ist insbesondere auch im Hinblick auf die angesprochenen Simulatoren und Visualisierer von Interesse. Als Eigenentwicklung des IAI steht mit KISMET (Kinetic Simulation, Monitoring and Off-Line Programming Environment for Telerobotics) ein hochleistungsfähiges Simulations- und Visualisierungssystem zur Verfügung, das durch seine flexible Architektur einerseits als MOEH eingesetzt werden kann, andererseits jedoch ebenso als AEH-Simulator (VAEH) und als MEH. KISMET ist derzeit auf Hochleistungsworkstations des Herstellers Silicon Graphics Incorporate (SGI) unter dem SGI-eigenen Unix-SVR4-Derivat IRIX 5.2 und der graphischen Oberfläche X11 im Motiv-Stil implementiert[27] /Kühn94/.

Da auf solchen Unix-Workstations kaum Unterstützung für einen OSI-Protokoll-Stack zu finden ist, ist es sinnvoll, das MONSUN-Konzept auf den DoD-Protokollstack zu portieren. Diese Protokoll-Familie stellt einen De-Facto-Standard in der Unix-Welt dar, die Funktionalität entspricht der der ersten vier OSI-Schichten, wobei die Bitübertragungsschicht und die Sicherungsschicht bei beiden Protokoll-Stapeln identisch ist. Für die

[27] SVR4 steht als Abkürzung für den derzeit de facto geltenden Unix-Standard System V Release 4. Er wird in herstellerspezifischen Produkten wie z. B. in IRIX 5.2 von SGI oder Solaris 2.4 von Sun Soft Inc. vertrieben. X-Windows in der Version 11 Release 6 (X11R6) ist eine grafische Benutzeroberfläche für Unix-Systeme. Für sie sind verschiedene Mimiken (Open-Look, Motif) definiert, die, um das charakteristische Aussehen und Verhalten zu erreichen, Programmierbibliotheken zur Verfügung stellen, auf die der Anwendungsprogrammierer aufsetzen kann (vgl. bspw. /Neck94/).

unterschiedlichen Schichten 3 und 4 läßt sich eine 1:1-Zuordnung erstellen. Die DoD-Protokolle der Transport- und Vermittlungsschicht sind im Einzelnen:

- *TCP (Transmission Control Protocol),* das den verbindungsorientierten Transportdienst ähnlich wie TP4 bei OSI realisiert,
- *UDP (User Datagram Protocol),* das einen Datagramm-Dienst auf der Transportschicht bildet, und
- *IP (Internet Protocol),* das den Vermittlungsdienst der Schicht 3 in OSI realisiert, im Wesentlichen also Routing und Flußkontrolle auf den Vermittlungsabschnitten durchführt.

Die DoD-Protokollfamilie setzt auf der TCP/UDP-Schicht, also auf den Transportdienst, direkt eine Anwendungsschicht auf, in der die bekannten Standard-Kommunikations-anwendungen *„TELNET“* (virtuelles Terminal), *„FTP“* (File Transfer Protocol), *„SMTP“* (Simple Mail Transport Protocol, elektronische Post) angesiedelt sind.

Diese Struktur entspricht der von MONSUN genutzten Dienststruktur. Für die aus MONSUN beibehaltenen kommunikativen Außenbeziehungen ist damit eine Anpassung des Moduls „LEVEL4“ an die veränderte Transportschnittstelle von TCP bzw. UDP erforderlich und hinreichend. Die vorgeschlagenen veränderten Kommunikationsbeziehungen in ARTEMIS – Broadcasts der Statusmeldungen – erfordern jedoch eine weiterreichende Anpassung.

4.3.4.3 Fortentwicklung bei der Integration multimedialer Informationen

Wie aus der Abbildung 4.9 ersichtlich ist, wird bei ARTEMIS nun versucht, zumindest empfangsseitig, also im MMI-System, die bislang gänzlich separat behandelten multimedialen Informationen zu integrieren.

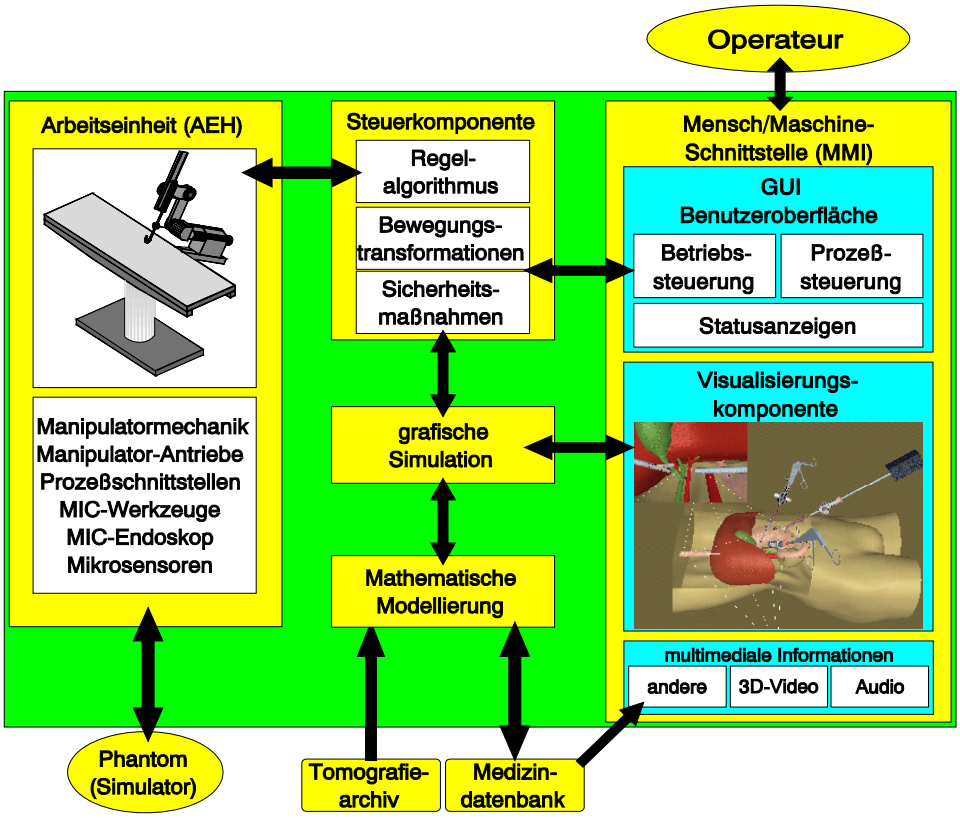

Abbildung 4.9: Funktionales System-Konzept von ARTEMIS nach /HoNe95/

Auf dem Bildschirm der MMI-Workstation kann mit einer geeigneten Video-Karte die Szene direkt aus dem Endoskop eingeblendet werden, die akustischen Informationen werden über ein an die Station angeschlossenes Lautsprechersystem wiedergegeben.

Problematisch ist beim integrierten Empfang von Video-Daten mittels standardisierter Hardware die Rückgewinnung des auf Senderseite in den Video-Datenstrom eingefügten Steuersignals für das quasi Demultiplexen der linken und rechten Kamerabilder für die dreidimensionale Darstellung der Video-Szene. Eine Lösung für standardisierte PC-Hardware konnte jedoch schon erfolgreich vorgestellt werden.

Ein Ziel in ARTEMIS ist es, die bislang noch separat realisierte Übertragung multimedialer Informationen auch in das Kommunikations-Subsystem zu integrieren, den Integrationsschritt also schon auf der Senderseite zu vollziehen. Hierzu ist ATM eine geeignete Netzwerklösung.

4.4 ARTEMIS/MONSUN, ein multimediales System

4.4.1 Definition eines Multimedia-Systemes

ARTEMIS und MONSUN sind in der vorgestellten Weise typische Kandidaten, jedoch im derzeitigen Stand noch keine tatsächlichen multimedialen Systeme. Dieser Sachverhalt wird durch die Definition eines Multimedia-Systemes bei /Stei93/ erklärt:

> *„Ein Multimedia-System ist durch die rechnergesteuerte, **integrierte** Erzeugung, Manipulation, Darstellung, Speicherung, Kommunikation von unabhängigen Informationen gekennzeichnet, die in mindestens einem **kontinuierlichen** (zeitabhängigen) und einem **diskreten** (zeitunabhängigen) Medium kodiert sind.“*

Als kontinuierliches Medium sind hierbei vor allem die Video/Audio-Informationen aus dem Endoskop und einer Raumüberwachung zu sehen, die Regelungsdaten sind zwar nicht, wie in der Definition von Steinmetz als synonym angegeben „zeitunabhängig“, sie treten jedoch in zeitlich nicht genau festgelegten Rastern auf und erfüllen die von ATM her bekannten Eigenschaften der VBR (variablen Bitrate) und der Burstiness (des schubweisen Auftretens), was die Zuordnung zum diskreten Medium rechtfertigt.

Was MONSUN und ARTEMIS im bisherigen Stand zu multimedialen Systemen nach obiger Definition fehlt, ist die *„rechnergesteuerte, integrierte Erzeugung, ...“,* denn augenblicklich werden die Video/Audio-Daten ja nicht nur gänzlich separat geführt, sondern auch an nur räumlich integrierten Monitoren und Lautsprechern wiedergegeben. Der Integrationsschritt bleibt damit ein wesentlicher Aspekt bei der Migration auf ATM-Netze.

4.4.2 Erweiterung des ARTEMIS/MONSUN-Konzeptes im Hinblick auf Multimedia

4.4.2.1 Neue Objekte für das kontinuierliche Medium

Dem multimedialen Charakter muß im MONSUN/ARTEMIS-Konzept durch Einführung neuer Objekte aus dem Sektor der kontinuierlichen Medien Rechnung getragen werden:

- Eine *Videoeinheit (VEH)* liefert ein digitalisiertes, kontinuierliches Video-Signal,
- eine *Audioeinheit (AUEH)* liefert ein digitalisiertes, kontinuierliches Audio-Signal und

- eine *Audio-/Video-Einheit* oder ***A/V-Einheit (AVEH)*** stellt die Kombination der zuvor eingeführten Einheiten mit einem korrelierten Ton-Bewegtbild-Datenstrom dar.

Die Unterscheidung in drei Objekte, zwei, die jeweils einen kennzeichnenden Datenstrom führen, und eines mit dem kombinierten Datenstrom, erscheint im Augenblick sinnvoll, da z. B. die reinen Bewegtszeneninformationen aus einem 3D-Video-Endoskop (VEH) von grundlegend anderer Qualität sind als die kombinierten A/V-Daten aus einem als Raumüberwachung (AVEH) eingesetzten konventionellen Video-Kamcorder. Die pure AUEH kann in einem Szenario etwa dazu dienen, Sprachanweisungen eines hinzugezogenen „Remote-Spezialisten“ an die vor Ort tätigen Ärzte (*Anästhesisten*[28], Chirurgen) und das zuarbeitende Personal (Schwestern, Pfleger, ...) zu übertragen. Letztlich wäre es auch denkbar, die Unterscheidung zu parametrisieren und nur ein Objekt AVEH in das ARTEMIS-Modell aufzunehmen.

4.4.2.2 Einordnung der neuen Objekte in bestehende Strukturen

Wichtig ist die strenge begriffliche Trennung der Objekte VEH, AUEH und AVEH von den bereits bekannten AEH und TEH. Auch bei der bisherigen Struktur von ARTEMIS wurde ein 3D-Video-Endoskop betrachtet oder selbst bei DISTEL eine Szenenkamera und eine Unterarmkamera. Vom Konzept her ging es dabei jedoch immer nur um die Regelung einer angemessenen Positionierung dieser Objekte, nicht um den Inhalt der von den Objekten gelieferten Informationen. Für den Systemaufbau bisher wäre es – abgesehen von der Eignung für den Einsatz als Demonstrator – unerheblich gewesen, ob z. B. bei ROBOX tatsächlich ein Endoskop positioniert wird oder nur eine in Gewicht und Form angeglichene Atrappe. Die neuen Objekte lassen sich sowohl in die Objekthierarchie von MONSUN (Abbildung 4.3 auf S. 54) aufnehmen, auf dem Niveau der AEH (da die Informationen nicht zur Steuerung/Regelung benutzt werden), als auch in die Objektstruktur von ARTEMIS als weitere periphere Einheit. Würde man die gerätetechnische Hierarchie betrachten, so wären die neuen Einheiten einer TEH unterzuordnen.

4.4.2.3 Aus den neuen Objekten resultierende veränderte Kanalstruktur der Kommunikation

Für ARTEMIS und MONSUN waren bisher vom Kommunikationsaspekt her die drei Kanäle DAT_DO, DAT_UP und COM_DO ausreichend. Sie dienten zum Austausch aller für die Regelung in der Assoziation von MEH und AEH notwendigen Daten. Nach den Kriterien der ITU-T (Tabelle 3.6 auf S. 42) sind sie der Dienstklasse C zuzuordnen:

- zeitdiskrete Sender/Empfänger-Korrelation,
- variable Bitrate,
- verbindungsorientiert.

Die Informationsflüsse von einer AVEH sind dagegen den Dienstklassen A und B zuzuordnen, denn die Charakteristik von Video-Signalen ist:

- Isochronität zwischen Sender und Empfänger,
- konstante Bitrate,
- verbindungsorientiert,

und die von Audio-Signalen:

---

[28] *Anästhesie, Anästhesist*, von griechisch αναισθησια, Unempfindlichkeit; chirurgisch: Schmerzbetäubung (Narkose oder Lokalanästhesie); der Anästhesist ist neben der Narkose auch für Blutersatz und Schockbehandlung während der Operation und die Überwachung der Frischoperierten verantwortlich.

- Isochronität zwischen Sender und Empfänger,
- variable Bitrate,
- verbindungsorientiert.

Daneben hat die Kommunikationsbeziehung eines MMI mit einer AVEH (mit Ausnahme der Assoziationsaufbau-Phase) einen rein unidirektionalen Charakter, ganz anders als die Regelung, die Sollwerte abliefert und auf Statusrückmeldungen angewiesen ist.

Es ist also notwendig, einen neuen Kommunikationskanal einzuführen, der in Anlehnung an die bisherige Nomenklatur in MONSUN als

AV_UP (Audio/Video Upstream)

zu bezeichnen ist.

4.4.2.4 Kommunikationsbeziehungen in einem einfachen ARTEMIS-Szenario

Als ein abschließendes ARTEMIS-Szenario unter Einbeziehung eines neuen Objektes werde von folgender Anordnung ausgegangen:

- Gemäß dem ARTEMIS-Konzept dient als zentraler Koordinator eine multimediafähige Workstation, die als Objekt „MMI“ (ARTEMIS-Semantik!) fungiere.
- Als Eingabeteil sei ihr ein beliebig angemessener, kraftreflektierender Masterarm zugeordnet (Objekt MEH).
- In direkter Bedienerführung durch MEH und MMI wird eine beliebige AEH eingesetzt.
- Diese wird von einer TEH beobachtet und automatisch verfolgt, die
- mit einer VEH feststehender Optik bestückt ist.

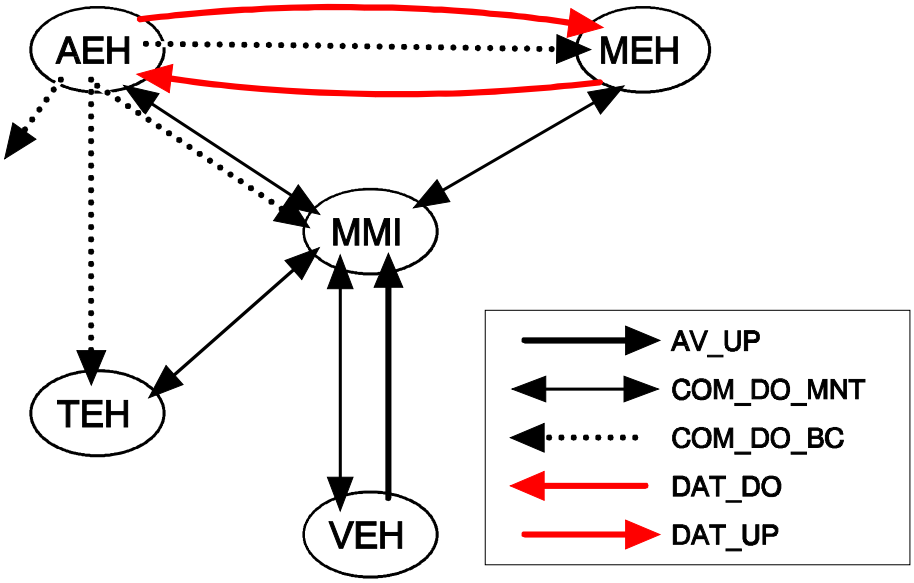

Abbildung 4.10: Logische Kommunikation in einem multimedialen ARTEMIS-Szenario

Folgende Kommunikationsbeziehungen sind zwischen den Einheiten zu betrachten:

- Gemäß MONSUN-Konzept müssen zwischen MEH und AEH in direkter Kommunikationsbeziehung Regelinformationen fließen, wozu die Kanäle DAT_DO und DAT_UP aufgebaut werden.
- Für den Aufbau der Assoziationen ist eine vom MMI ausgehende Signalisierung erforderlich, die über dem COM_DO-Kanal abgewickelt wird. Die zweigeteilte Funktionalität des ursprünglichen COM_DO-Kanales, Signalisierung und Assoziations-

verwaltung einerseits, Transport von Statusinformationen andererseits, wird dadurch berücksichtigt, daß zwei unterschiedliche Kanäle eingeführt werden,

- COM_DO_MNT (COM_DO Connection Maintenance), für die verbindungsorientierte, bidirektionale Verwaltungskommunikation aus dem ursprünglichen COM_DO-Kanal, und
- COM_DO_BC (COM_DO Status Broadcast), für den unidirektional verbindungslosen, als Broadcast geplanten Teil des ursprünglichen COM_DO-Kanals, der zur Propagation der Statusinformationen dient.

Die Kanäle COM_DO_MNT sind jeweils zwischen dem MMI und allen anderen Objekten des Szenarios aufzubauen (vgl. Abbildung 4.8 auf S. 65), die COM_DO_BC-Kanäle gehen nur von der AEH aus. Als Empfänger der Broadcast-Nachrichten kommen primär TEH, MEH und MMI in Betracht, sekundär auch die im momentanen Szenario nicht aufgenommenen Einheiten MOEH und Sitzungsarchiv, nicht jedoch die VEH.

- Die VEH wird über den COM_DO_MNT-Kanal vom MMI in die Assoziationsgruppe integriert und kommuniziert dann unidirektional über einen AV_UP-Kanal ausschließlich mit dem MMI. Organisatorisch entspricht dies einer Stabsbeziehung (im Gegensatz zur sonst vorherrschenden Matrix-Organisation), die es ermöglicht hat, auch bisher schon MONSUN/ARTEMIS ohne multimediale Integration zu betreiben.

Abbildung 4.10 zeigt schematisch das beschriebene Szenario.

4.4.2.5 Exkurs: Die Kommunikationsstruktur von ARTEMIS unter Diskussion

An dieser Stelle sei in einem kurzen Exkurs dargestellt, daß ARTEMIS kein fertiges Konzept darstellt, sondern sich in der Definitionsphase befindet; der derzeit noch in der Diskussion befindliche Ansatz zur Propagation der AEH-Statusmeldungen sei als Beispiel angerissen:

- Die Diskussion ist im Hinblick auf Sicherheitsaspekte zu führen, denn durch die Broadcast-Charakteristik bleibt es einerseits jeder Station, ob am Szenario beteiligt oder nicht, überlassen, durch Auswertung der Absenderadresse in der Broadcast-PDU zu entscheiden, ob sie die Information entgegennehmen und auswerten will. Andererseits kann eine auf Sabotage ausgelegte Station eine falsche Statusmeldung auf das Netz bringen, was durch das Fehlen von Quittierungstechniken beim verbindungslosen Broadcast nicht erkannt werden kann.
- Im Hinblick auf die Ökonomie ist von Bedeutung, welches Netzwerk für die Realiserung zum Einsatz kommen soll; bei einer Realisierung auf Basis eines teilvermaschten ATM-Netzes anstelle eines Bussystemes ist besonders der vermehrte *Traffic* zu beachten:

  Im Bussystem wird der Versand von Statusmedlungen per BC (Broadcast) eingeführt, um die Traffic-Last dadurch zu verringern, daß die BC-PDU (Broadcast-PDU) von der sendenden Station einmal auf das Medium gelegt wird und von dort am *Transceiver* jeder „interessierten“ Station kopiert werden kann („Vervielfachung nach Bedarf“).

  Anders jedoch bei ATM: jeder Switch muß eine empfangene Broadcast-Zelle unter Vervielfachung an alle seine Ausgänge weitervermitteln („prophylaktische Vervielfachung als Angebot“), was im Gesamtnetz bei jedem Switchdurchgang eine Vervielfachung der Zellen um die Zahl der Ports des Switches abzüglich 1 (Empfangsport), insgesamt also ein exponentielles Wachsen des Verkehrs bewirkt.

Die Zahl der an einem Operationsgeschehen beteiligten Stationen ist jedoch gering[29] und im Voraus bestimmbar, so daß sich hier ein Workgroup-Konzept, wie es bei ATM in Form eines „virtuellen Netzes“ vorgesehen ist, bestens eignet: Durch Netzwerkmanagement kann bestimmt werden, welche am Gesamtnetz beteiligten Stationen zu welcher Workgroup gehören sollen, ganz unabhängig von ihrem physikalischen Anschluß in der Topologie. Das virtuelle Netzkonzept erlaubt dann, aufgrund der Workgroup-Zugehörigkeit zu filtern, welche Mitteilungen die Arbeitsgruppe erreichen und verlassen dürfen (virtuelles Subnetz). Dies hat den Vorteil, daß schon bei der Propagation der Statusmeldungen per BC ein Schneeballeffekt verhindert wird.

Unter diesem Aspekt ließe sich aber auch die bei MONSUN ursprünglich vorgesehene verbindungsorientierte Status-Meldung über den „traditionellen“ COM_DO-Kanal rechtfertigen: Sind COM_DO-Kanäle ohnehin zwischen dem MMI und allen am Einsatz beteiligten Objekten ausgebildet[30], so müßte dem MMI nur noch die Funktion des Vervielfachens eingehender Statusinformationen über die bestehenden COM_DO-Verbindungen hinzugefügt werden, die in der zuvor genannten ATM-Lösung vom Switch, also dem Netz selbst, ausgeführt wird.

Dagegen spricht wiederum der Leistungsaspekt, denn neben der Belastung durch die Ausführung vieler MMI-Tasks ist eine für die MMI-Workstation erhältliche ATM-Adapter-Karte sicherlich schon aufgrund ihrer Funktionalität „am Rande“ des Netzes (Vervielfachung der BC-Message auf der AAL-Schicht) nicht so leistungsfähig wie ein netzinterner Switch (Vervielfachung der BC-Zellen auf der ATM-Schicht).

Die Ansicht des Verfassers bei der Abwägung genannter Argumente tendiert unter Gewichtlegung auf den Performance-Aspekt zur Auftrennung des COM_DO-Kanales in ein COM_DO_MNT mit Punkt-zu-Punkt-Charakeristik und ein COM_DO_BC mit Multicast-Charakteristik, wie am Szenario oben gezeigt.

[29] vgl. den Absatz über die Propagation der T-SAPs in Abschnitt 4.2.3.2 auf S. 59.

[30] Es wäre allerdings auch möglich, daß z. B. das Sitzungsarchiv bei einem dedizierten „Operationsnetz“ oder „Fernhantierungsnetz“ (ggfs. über das Konzept der „virtuellen Netze“ realisiert), ohne zuvor über einen COM_DO-Kanal von einem oder mehreren MMIs anassoziiert worden zu sein, in der Rolle des universellen, unabhängigen „Protokollanten“ alle Statusmeldungen auf dem Netz aufgreifen soll. (Dies wäre zur Klärung späterer rechtlicher Probleme etwa in Kunstfehlerprozessen vorteilhaft.) In diesem Fall würde das MMI mit der Verwaltung einer sonst nicht notwendigen Verbindung zusätzlich belastet.

5 Kontinuierliche Medien im ARTEMIS/MONSUN-Konzept und ihre Leistungsanforderungen

5.1 Standards der Audio-Digitalisierung

5.1.1 Das kontinuierliche Medium „Audio“

Audio-Signale sind von ihrer Natur her Schallvorgänge mit periodischen Druckschwankungen eines Mediums (Flüssigkeit, Gas, Festkörper). Solche Druckschwankungen können über geeignete Sensoren (Membranen) in gleicher Weise von Menschen und Maschinen erzeugt und aufgenommen werden.

Audio-Signale treten in drei Ausprägungen auf, als „Geräusch“, „Musik“ und „Sprache“. Diese Ausprägungen unterscheiden sich in der Signalcharakteristik, besonders in den Frequenzbändern der Signale: Der Gesamtbereich des Schalls gliedert sich u. a. in die Klassen Infraschall (0 Hz – 16 Hz) und Hörschall (16 Hz – 20 kHz). Die Ausprägung „Geräusch“ deckt dabei beide Klassen vollständig ab, „Musik“ überdeckt die Klasse Hörschall ganz, „Sprache“ jedoch nur einen Ausschnitt daraus (300 Hz – 3000 Hz im Telefon sind offensichtlich ausreichend).

Für die Übertragung von Audio-Signalen im medizinischen Einsatz spielt die Ausprägung „Sprache“ die wesentliche Rolle. Sie hat zwei charakteristische Eigenschaften, die man zur Sprachverarbeitung nutzen kann:

- Stimmhafte Sprachsignale weisen während gewisser Zeitintervalle eine beinahe periodische Struktur auf. Die Signale werden als *quasistationär* mit einer Dauer von etwa 30 ms angesehen.
- Das Spektrum einiger Laute weist ausgeprägte Maxima auf, wovon meist etwa fünf Frequenzen betroffen sind. Diese Frequenzmaxima werden als *Formanten* bezeichnet.

Soll Sprache über ein technisches System transportiert werden, sind zwei Umformungsvorgänge durchzuführen:

- Die Sprache muß am Eintrittspunkt in das technische System aufgenommen und mit hinreichender Qualität codiert werden,
- und sie muß am Ausgangspunkt des technischen Systemes wieder in Luftdruckschwankungen umgeformt werden.

Für den Transport über ein digitales technisches System sind effiziente Codierungen erforderlich, die mit möglichst geringer Datenrate auskommen und dennoch eine hinreichende Qualität des decodierten Signales bei der Ausgabe sichern (/Stei93/).

5.1.2 Die Signalformcodierung

Diese Art der Codierung ist in gleicher Weise für die Übertragung der Ausprägung „Musik“ geeignet. Sie ist auf die Effizienz hin optimiert und findet beispielsweise bei Compact-Disk-Playern ihre Anwendung.

Das analoge Signal wird hierbei in einem PCM-Verfahren mit einem konstanten Zeitraster abgetatstet und die gemessenen Werte digitalisiert. Es findet also ein Übergang von einem zeit-wert-kontinuierlichen Signal über ein zeit-diskretisiertes, wert-kontinuierliches auf ein zeit-wert-diskretes Signal statt.

Die Samplingfrequenz im Musikbereich beträgt 44,1 kHz, die Quantisierung wird mit einer Auflösung von 16 bit vorgenommen. Für Stereo-Signale wird eine getrennte Abtastung der beiden Kanäle vorgenommen, die später im TDM auf einen Kanal gemultiplext werden.

Die charakteristische Kanalrate berechnet sich:

$$\Theta_{A-Stereo} = 2 \cdot \frac{44100}{s} \cdot 16bit = 1{,}4112 Mbit/s$$

Für die Sprachcodierung ist eine Samplingfrequenz von nur 8 kHz und eine Quantisierung mit 8 bit ausreichend, um nach dem Shannon-Nyquist-Theorem die signifikanten Frequenzen der Formanten in hinreichender Qualität abzubilden. Die Datenrate reduziert sich damit auf den von S-ISDN bekannten Wert 64 kbit/s.

Durch Einsatz eines modifizierten Codierverfahrens, der *Differential Puls Code Modulation (DPCM)*, kann man bei gleicher Qualität die Datenrate auf 56 kbit/s senken, und in einem weiteren Schritt, mit dem *Adaptive DPCM-Verfahren*, auf nur 32 kbit/s.

5.1.3 Quellencodierung

Dieses Verfahren führt die Codierung in jeweils zwei Phasen in jeder Codierungsrichtung durch: in einer A/D-Wandlungsphase mit nachgeschalteter Sprachanalyse beim Codieren und in einer Rekonstruktionsphase mit nachgeschalteter D/A-Wandlung beim Decodieren.

Die Sprachanalyse unterteilt bei der Aufnahme das Signal in eine Menge von Frequenzbändern, unter der Annahme, daß nur wenige Frequenzmaxima aus dem Sprachspektrum relevant für das Verstehen sind, und ermittelt eine Sprachgrundfrequenz. Zudem werden die Unterschiede zwischen den stimmhaften Lauten (ähnlich der Ausprägung „Musik“) und den stimmlosen Lauten (ähnlich der Ausprägung „Geräusch“) ausgenutzt.

Das Verfahren, das bei /Flan92/ ausführlicher beschrieben ist, ermöglicht die Reduktion der erforderlichen Kanalrate auf 3 kbit/s, jedoch bei eingeschränkter Verständlichkeit.

5.2 Kenngrößen der digitalen Bildverarbeitung

5.2.1 Das Prinzip der digitalen Bildverarbeitung

Sollen Bilder in einem Rechnersystem verarbeitet werden, müssen sie *ikonisch*, d. h. als „Bilder an sich“, oder *symbolisch*, d. h. in Form von Bildbeschreibungen, in diskreter Form (*Digital Image*) in das System eingebracht werden.

Diese Diskretisierung kann in viererlei Hinsicht geschehen: als Orts-Diskretisierung, Kanal-Diskretisierung, Amplituden-Diskretisierung und Zeit-Diskretisierung. Sie muß bei der Aufnahme des Bildes, also beim Übergang von der realen Welt in das Rechnersystem, geschehen.

Maßstab für die Auslegung der Diskretisierung kann dabei der Mensch sein, dessen Gesichtssinn nur über ein begrenztes Auflösevermögen verfügt und daher ab einer gewissen „Feinheit“ der Diskretisierung keinen Unterschied mehr zum kontinuierlichen Bild

wahrnehmen kann. Das Bestreben der Auslegung unter diesem Aspekt muß also die Verfeinerung der Diskretisierung sein.

Dies steht im Widerspruch zur Auslegung nach technischen Gesichtspunkten, die eine Diskretisierung unter den wirtschaftlichen Bewertungskriterien Datenvolumen des diskreten Bildes und (mittelbar) Verarbeitungsgeschwindigkeit durchführen muß.

Die Auswahl eines konkreten Verfahrens für eine bestimmte Anwendung muß daher als Kompromiß zwischen Qualität und Wirtschaftlichkeit der Verarbeitung erfolgen.

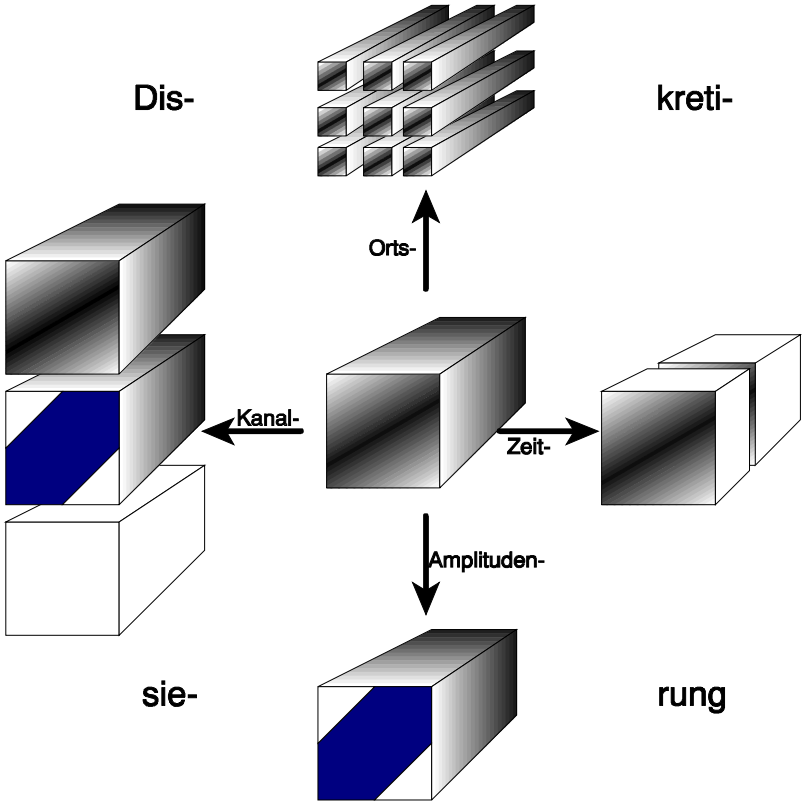

Abbildung 5.1: Diskretisierung kontinuierlicher Szenen

Die verschiedenen Diskretisierungsmechanismen werden nachfolgend einzeln besprochen (/Hofm93/, /Stei93/). Im Hinblick auf den Einsatz für ein multimediales MONSUN/ARTEMIS werden alternative Kompromißvorschläge genannt. Die Diskussion bezüglich ihrer Eignung kann aus der Sicht des Informatikers nur unter dem Aspekt der technischen Realisierbarkeit im Hinblick auf das zur Übertragung verwendete ATM-Netz und unter der Berücksichtigung des physiologisch Wahrnehmbaren geführt werden. Die grundsätzliche Argumentation, welche der technisch realisierbaren Qualitäten hinreichend ist, muß den Medizinern vorbehalten bleiben.

5.2.2 Orts-Diskretisierung:

Ein *Bild* oder eine *Bildfunktion I(x, y)* ist auf einer *Fläche* $F = \{(x,y) \in \Re^2 : a \le x \le b \wedge c \le y \le d\}$ mit unendlich vielen *Bildpunkten* definiert. Die Ortsdiskretisierung geht nun von der Fläche F auf eine Fläche F' über, die isomorph zu einem Intervall des $(\aleph_0)^2$ mit endlich vielen Bildpunkten ist. Damit wird die bisher kontinuierliche Bildebene durch ein Gitter mit fester Ortsauflösung ersetzt:

$$F' = \{(x,y) \in \Re^2 : a \le x \le b \wedge c \le x \le d \wedge x = m \cdot \Delta x \wedge y = n \cdot \Delta y\}$$

Die charakteristischen Größen bei der Ortsdiskretisierung sind damit das *Seitenverhältnis* (d-c)/(b-a) des Bildes und das Seitenverhältnis $\Delta x/\Delta y$ eines *Bildpunktes* (*Pixels*).

Als Qualitätskennzahl der Ortsdiskretisierung ist die Mächtigkeit des Ortsraumes F' entscheidend. Sie liegt bei einfachen Bildverarbeitungssystemen bei etwa 250 000 Pixeln, bei Druckvorlagen hingegen bei 100 000 000 Pixeln. Die für unsere Betrachtungen typische Anwendung des digitalen TV liegt nach der CCIR-Norm 601 bei 420 000 Pixeln mit einem Bildseitenverhältnis von 4:3.

Für den Einsatz mit ARTEMIS/MONSUN spielt dieser Qualitätsparameter bei der Auswahl des verwendeten Video-Systemes eine Rolle. Die in Europa verbreiteten Farbfernsehnormen PAL und SECAM arbeiten beispielsweise mit 625 Zeilen, NTSC in Nordamerika mit 525 Zeilen. Das Seitenverhältnis beträgt 4:3. Das zukünftige Hochauflösende Fernsehen HDTV wird mit 1250 Zeilen bei einem Seitenverhältnis von 16:9 arbeiten.

5.2.3 Kanal-Diskretisierung:

Das menschliche Auge ist in der Lage, elektromagnetische Wellen im Bereich von 380 nm bis 760 nm als Farben von blau bis rot wahrzunehmen. Für einen Farbeindruck ist das *Spektrum* über diesem Wellenlängenbereich verantwortlich, das mit Hilfe der Funktion $S(\lambda)$ mathematisch wiedergegeben werden kann. Das kontinuierliche Spektrum wird im Rahmen der Kanal-Diskretisierung in endlich viele endliche Intervalle mit den Grenzen λ_1 und λ_2 approximiert. Der Wert für ein Pixel, d. h. die *Amplitude* A der Bildfunktion I, ergibt sich durch:

$$A = k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) r(\lambda) d\lambda$$

Die Funktion r ist hierbei die *Spektralwertfunktion*, die die Empfindlichkeit eines Sensors modelliert, der die Strahlungsfunktion S aufnehmen muß (z. B. die Empfindlichkeit eines CCD-Chips). Durch den Faktor k kann die Funktion A auf einen Wertebereich normiert werden.

Die zum Einsatz kommenden Spektralwertfunktionen sind durch das Deutsche Institut für Normung (DIN) im Dokument DIN 5033, „Farbmessung", standardisiert. Hier geschieht die Messung aufgrund der drei verschiedenen Kanäle Rot, Grün und Blau.

Für die Bildverarbeitung von besonderer Wichtigkeit sind die Farbdarstellungen mittels eines Kanales „Helligkeit" (*Luminanz, L*) und zweier Kanäle für die „Farbdifferenz" (*Chrominanz, u* und *v*). Diese Kanalaufteilung entspricht dem Farbsehen in der *Retina* des menschlichen Auges, wo also nicht Rot-Grün-Blau-Mischungen wahrgenommen werden, sondern eine Helligkeit, eine Rot-Grün-Differenz und eine Blau-Gelb-Differenz. Physiologisch ist dies durch die Wahrnehmung mittels *Stäbchen* (Schärfe, Luminanz) und *Zäpfchen* (Farben, Chrominanz) im Auge begründet[31].

Die Kanalauflösung des Auges spielt für die Auslegung von Bildverarbeitungssystemen in der TV- und Video-Technik eine entscheidende Rolle. Hier gibt es Kameras, die eine Kanaltrennung in drei Komponenten, zwei Komponenten oder nur einer Komponente und nach verschiedenen Verschaltungen vornehmen.

---

[31] Die Verteilung der Rezeptoren begründet die verbesserte Bewegungsauflösung im Randbereich des Gesichtsfeldes und die Farbwahrnehmung allein im „Detailkanal" im Zentrum des Gesichtsfeldes. Die Chrominanz-Charakteristik erklärt das Auftreten von Farbenblindheit in den Ausprägungen Rot-Grün-Blindheit und Blau-Gelb-Blindheit: der entsprechende Kanal ist gestört.

Legt man die klassische additive Farbmischung aus den Grundfarben R-G-B (Rot, Grün, Blau) zugrunde, lassen sich die verbreiteten Systeme darstellen:

Tabelle 5.1: Übersicht der 3-Komponenten-Kanaldiskretisierungsverfahren

System	Verschaltung	Anwendung
RGB	R G B	Computerbildschirme
Luv	L= R + G u= R - G v= B - R - G	menschliche Retina
YUV	Y= 0,30 R + 0,59 G + 0,11 B U= 0,493 (B - Y) V= 0,877 (R - Y)	3-Chip-Kameras, professionelle TV/Video-Produktion, typische Vertreter: M-II Studio-MAZ-Technik
YIQ	Y= 0,30 R + 0,59 G + 0,11 B I= 0,60 R + 0,28 G - 0,32 B Q= 0,21 R - 0,52 G + 0,31 B	professionelle TV/Video-Produktion in Amerika (NTSC)
YC	Y= 0,30 R + 0,59 G + 0,11 B C= U + V	semiprofessionelle Heimsysteme, typische Vertreter: S-VHS, Hi8

Der qualitative Unterschied bei der Verwendung von 3-Komponentenverfahren oder 2- und 1-Komponentenverfahren wird sehr deutlich sichtbar, ist jedoch im Schwarz-Weiß-Druck dieser Arbeit nur unzureichend wiederzugeben: Bei einem Testbildvergleich mit einem vertikalen Schwarz-Weiß-Grau-Flächenraster und einem Farbbalken stellt man bei abnehmender Zahl der Komponenten vorwiegend eine zunehmende Unschärfe (Luminanzsignal) fest; die Verschlechterung der Farbübergänge fällt dagegen kaum ins Gewicht.

5.2.4 Amplituden-Diskretisierung

Bei der Kanal-Diskretisierung entsteht ein reeller Amplitudenwert für jeden Kanal. Ziel der Amplituden-Diskretisierung ist nun, den kontinuierlichen Wertebereich in Klassen einzuteilen, die durch ganze Zahlen repräsentierbar sind. Dadurch werden sie digital verarbeitbar. Der kontinuierliche Wertebereich wird in äquidistante Intervalle eingeteilt, die Zahl der Intervalle (Klassen) wird wegen der effizienteren Codierung der repräsentierenden Ganzzahl als Zweierpotenz, häufig sogar in Vielfachen von 8, gewählt. Es besteht der enge Zusammenhang der Codelänge |l| mit der Zahl der Klassen |X| durch die Gleichung $|l| = \lceil \log_2 |X| \rceil$.

Übliche Werte für |X| sind 2 (Binärbilder), im Drucksektor 16 (Vierfarbdruck), bei einfachen Monitorsystemen 256 und im Bereich der TV/Video-Verarbeitung bei 2^{21}=2 097 152, 2^{24}= 16 777 216 (genannt „True Color“) bis hin zu 2^{30}= 1 073 741 824 (Studio-Produktion).

5.2.5 Zeit-Diskretisierung

Werden nicht nur einzelne, stehende Bilder verarbeitet, sondern bewegte Szenen, muß auch die Dimension Zeit diskretisiert werden. Dies geschieht in der bekannten Weise, daß eine eigentlich stetig ablaufende Bewegung in eine meist äquidistante Folge von Einzelbildern aufgelöst wird. Ab einer zeitlichen Auflösung (Bildfrequenz) von etwa 100 ms (10 Hz) wird sie vom menschlichen Gesichtssinn als Bewegung wahrgenommen, ab etwa 50 ms (20 Hz) ist der Betrachter nicht mehr zur Trennung der Einzelbilder in der Lage. Das Flimmern reduziert sich auf ein erträgliches Maß bei etwa 25 ms (40 Hz). Für ein ermüdungsfreies

Betrachten zeitdiskretisierter Szenen wird derzeit eine minimale Bildfrequenz von 70 Hz gefordert.

Heute gängige Anwendungen wie TV und Video arbeiten mit Frequenzen von 25 Hz (Europa: PAL/SECAM) und 30 Hz (USA: NTSC), die Filmindustrie im 35 mm-Film mit 24 Hz, für HDTV sind 50 Hz vorgesehen. Um dennoch ein flimmerfreies Bild zu erzeugen, werden Halbbildverfahren eingesetzt und die Wiederholrate der Anzeige von der Bildfrequenz entkoppelt. Beim Kinofilm entsteht so eine Bildwiederholrate von 72 Hz, beim herkömmlichen Fernsehen (durch Zwischenzeilenverfahren) von 50 Hz bzw. 60 Hz und beim HDTV von 100 Hz.

5.3 Anforderung an digitale Video-Übertragung

Im vorhergehenden Abschnitt wurden die Parameter zur Spezifikation bzw. Beschreibung von Anforderungen für die digitale Video-Datenübertragung eingeführt. Mit ihnen als Kennzahlen sollen nun die verschiedenen Möglichkeiten für eine digitale Video-Übertragung durchgerechnet werden.

5.3.1 Analoge Fernsehtechnik

Die heute verfügbaren digitalen Videoverarbeitungssysteme sind alle vom analogen Fernsehen abgeleitet, das als wesentliche Signalquelle zu erachten ist.

Die Fernsehkanäle sind an den Verteileigenschaften des Rundfunks orientiert. Alle Empfänger erhalten über ihre Antenne alle Fernsehkanäle und müssen für den gewünschten Sender mit einem Bandpaßfilter die zugehörigen Frequenzen herausfiltern. Die Signale sind jedoch von ihrem Wesen her analog, das heißt die zuvor eingeführten Diskretisierungen finden erst zum Teil statt, im Wesentlichen in Form der Kanaldiskretisierung und der Zeitdiskretisierung. Zur Übertragung wird durch Modulationstechnik jedoch wieder ein kontinuierliches Medium verwendet. Dies spiegelt sich darin wider, daß als Leistungsanforderungen die für analoge Modulationstechnik typischen Bandbreiten und Trägerfrequenzen angegeben werden.

Charakteristik aller bekannten Signalvarianten BAS (Bild-Austast-Synchronsignal), FBAS (Farb-BAS), PAL (Phase Alternating Line), SECAM (Sequential Coleur avec Memoire) und NTSC (National Television Systems Committee) ist die 1-Komponenten-Codierung.

Da in Analogtechnik gearbeitet wird, findet nicht die bei der Digitalisierung erforderliche Amplituden-Diskretisierung statt. Die Kanalamplituden werden in verschiedenen Modulationstechniken, die die Signalvarianten unterscheiden, auf eine Trägerfrequenz aufmoduliert.

Die Ortsdiskretisierung, die für das analoge Ausgabemedium „Kathodenstrahlröhre“ ausgelegt ist, unterscheidet als örtliche Auflösung nur Zeilen in einem Bild. Bei BAS, FBAS, PAL und SECAM sind dies 625 Zeilen mit einer Aspect-Ratio von 4:3. Bei NTSC wird mit nur 525 Zeilen bei gleichem Verhältnis gearbeitet.

Die Empfehlungen CCIR 601 und CCIR 601-2 bestimmen für die zeitliche Diskretisierung ein äquidistantes Raster von 25 Hz im BAS-, FBAS- und PAL-Signal. NTSC normiert auf 30 Hz. Die so entstehenden zeitlich diekreten Einheiten werden *Frames* oder *Full-Frames* genannt. Alle Verfahren arbeiten nach dem Zwischenzeilenverfahren mit der doppelten Bildwiederholfrequenz. Die Halbbilder nennt man *Half-Frames*.

Die analogen Bandbreiten für die Übertragung von Half-Frames werden für BAS, FBAS und PAL zwischen 5 MHz, 6,75 MHz und 8 MHz angegeben.

Durch die analoge Handhabung liegt als Übertragungssignal wiederum eine zeit-wert-kontinuierliche Transformation der Bilddaten vor. Bei der Digitalisierung muß in einer weiteren Phase nochmals zeitlich und örtlich diskretisiert werden.

5.3.2 D2-MAC

Auf dem Weg zum hochauflösenden Fernsehen HDTV wurde ein verbessertes Rundfunkverteilverfahren unter dem Namen *D2-MAC (Duo-Binary Multiplexed Analogue Components)* definiert. Es ermöglicht im Vergleich zu den alten Techniken die Übertragung von 2-Komponenten-codierten Signalen im Zeitmultiplex TDM.

Die anderen charakteristischen Größen wurden fast unverändert von PAL übernommen: von den 625 übertragenen Zeilen sind nur 574 sichtbar (PAL: 575) und es wird zusätzlich zu 4:3 auch das Bildverhältnis 16:9 unterstützt; nach wie vor kommt das Zeilensprungverfahren mit einer Vollbildrate von 25 Hz zur Anwendung, die Luminanz- und Chrominanz-Kanäle werden nicht amplitudendiskretisiert. Der Tonkanal ist digitalisiert und bietet mit einem Volumen von 105 bit eine Bitrate von 1,64 Mbit/s.

Von den für die Übertragung einer gesamten Zeile zur Verfügung stehenden 64 µs werden 34,4 µs dem Luminanz-Kanal, 17,3 µs dem Chrominanz-Kanal und 10,3 µs dem Ton/Daten-Kanal zur Verfügung gestellt.

5.3.3 Digitale Video-Normen

Die zuvor beschriebenen Fernsehnormen sind allesamt als analoge Verteildienste konzipiert. Schon 1982 wurde jedoch eine CCIR-Norm für das digitale Fernsehen herausgegeben, in der insbesondere ein Abtastschema (Zeitdiskretisierung des kontinuierlichen Einzelbildsignales) und eine Quantisierungsmethode (Amplitudendiskretisierung des wertkontinuierlichen Einzelbildsignales) für das Video-Signal[32] angegeben sind.

- Ein einfachster Ansatz könnte in einer sogenannten „geschlossenen Codierung“ mit einer Pulse-Code-Modulationstechnik (PCM) das analoge Verteilsignal digitalisieren.

  Geht man für das Schwarz-Weiß-Signal von einer minimal dem Nyquist-Theorem genügenden Sample-Frequenz aus und einer Quantisierung in 256 Graustufen, errechnet sich mit der Bandbreite 5 MHz des Signales eine digitale Datenrate von 2·5 MHz·8 bit= 80 Mbit/s.

  CCIR sieht für die geschlossene Codierung des FBAS-Signales das Sampling mit der vierfachen Frequenz der Farbträgerfrequenz vor, bei einer Quantisierung in 8 bit, womit sich eine Datenrate von 4·4,43 MHz·8 bit= 141,76 Mbit/s ergibt.

  All diese Ansätze zeichnen sich jedoch durch eine sehr schlechte Qualität aus.

- Geht man von einer auf die separaten Komponenten angewendeten Digitalisierung aus, lassen sich weit bessere Qualitäten erzielen. Das CCIR hat für die Dreikomponentencodierung YUV einen Referenzstandard festgelegt, der für Studioqualität ausreichend ist. In ihm wird der Luminanzkanal mit einer zeitlichen Auflösung von 13,5 MHz gesampled und die beiden Chrominanzkanäle mit der halben Auflösung, also jeweils 6,25 MHz. Die Quantisierung erfolgt mit 8 bit pro Kanal. Die digitalen

[32] In der Unterscheidung zum Fernsehverteildienst, der in die Übertragung zeitlich gekoppelt auch die Audio-Information aufnehmen muß, werden bei den getrennten Betrachtungen der Digitalisierung nur noch die Video-Komponente(n) behandelt.

Werte werden im Zeitmultiplex (TDM) über einen gemeinsamen digitalen Kanal übertragen.

Die erforderliche Übertragungsrate für diesen digitalen Video-Kanal beträgt: (13,5 MHz + 6,75 MHz + 6,75 MHz) · 8 bit = 216 Mbit/s

Bei der bekannten Zeilenfrequenz von 64 µs entstehen durch die Abtastung 864 Luminanzwerte pro Zeile und 432 Chrominanzwerte pro Kanal und Zeile. Davon sind jedoch aufgrund von Austastlücken für die horizontale Kathodenstrahlrückführung nur 720 bzw. 360 sichtbar (nur 540 von 648 Linien); von den 625 Zeilen eines Bildes sind wegen der vertikalen Rückführung wiederum nur 575 sichtbar, so daß bei Ausnutzung dieser Tatsache bereits eine Reduktion der Datenrate auf 165,6 Mbit/s möglich wäre.

- Das CCIR hat durch die Definition von drei Substandards zunächst einen anderen Weg beschritten: die Samplingfrequenzen der Komponenten werden reduziert und führen so zu einer geminderten Bildqualität, die für Kopier- und Verteilzwecke dennoch vollkommen ausreichend ist.

In der Tabelle 5.2 sind die Substandards zusammenfassend durch ihre Charakteristika beschrieben, und es werden die für den jeweiligen Substandard erforderlichen Übertragungsraten brutto und netto (unter Ausnutzung der Austastlücken) angegeben.

Tabelle 5.2: Erforderliche Bitraten bei Video-Digitalisierung nach den CCIR-Empfehlungen

CCIR-Norm	Gewichtung bzgl. Standard		Samplingfrequenz [MHz]		Brutto-Datenrate	Netto-Datenrate
	Y	U und V	Y	U und V	[Mbit/s]	
Standard	1	1	13,5	6,75	216,0	165,6
Substandard 1	5/6	5/6	11,25	5,625	180,0	138,0
Substandard 2	3/4	1/2	10,125	3,375	135,0	103,5
Substandard 3	2/3	1/3	9,0	2,25	108,0	82,8

Die Substandards stellen in der Phase der Diskretisierung bzw. Digitalisierung schon Repräsentanten von irrelevanzreduzierenden Kompressionstechniken dar. Hier soll allerdings der Begriff Kompression nur bei Anwendung solcher und ähnlicher Techniken auf bereits digitalisierte Bilder verwendet werden.

5.4 Datenkompression für digitale Bilder und Szenen

Im vorausgehenden Abschnitt wurde aus einem kontinuierlichen Bild bzw. einer kontinuierlichen Szene zunächst durch Diskretisierung und Codierung ein digitales Bild bzw. eine Folge digitaler Bilder erzeugt. Hierbei wurde der subjektive Qualitätsanspruch des Betrachters in der Güte der Diskretisierung berücksichtigt. Aus der gewählten Diskretisierung resultierten bereits für das Volumen und die Übertragungsrate der digitalen Bilder und Szenen erhebliche Anforderungsschwankungen.

Getrennt von dieser technikinhärenten Anforderungscharakteristik kann nun noch die Redundanz in der Codierung eines Bildes oder einer Szene ausgenutzt werden, um das Volumen und infolgedessen die erforderliche Übertragungsrate für Szenen zu reduzieren. Diesen Schritt nennt man Bilddatenkompression.

Für die Kompression gibt es zwei grundsätzliche Verfahrenstypen:

- Verlustfreie Verfahren
  nutzen die in der digitalen Repräsentation der Bilder vorhandene Redundanz aus und wählen eine effizientere Codierung. Dabei gehen keine Informationen des Bildes verloren.
- Verlustbehaftete Verfahren,
  im Gegensatz dazu, bewerten die das Bild repräsentierenden Informationen in relevante und irrelevante für den Bildeindruck. Alle als irrelevant eingestuften Informationen werden verworfen, wodurch sich aus dem komprimierten Bild die ursprünglichen Daten nicht mehr vollständig rekonstruieren lassen.

Während die Codierungsverfahren der rein technischen Beurteilung unterliegen, ist beim Einsatz der Irrelevanz-Reduktion die Bildquelle und der spätere Betrachter ausschlaggebend. Zur Entscheidung, welches Verfahren mit welchen Parametern (Schwellwerte) zum Einsatz kommen kann, müssen dafür umfangreiche empirische Untersuchungen mit Testpersonen – im Umfeld dieser Arbeit also mit Chirurgen der Minimal Invasiven Therapie – vorgenommen werden. Dies konnte bisher nicht durchgeführt werden, die Einschätzungen beruhen auf der subjektiven Erfahrung des Verfassers mit wenigen Testszenen.

5.4.1 Verlustfreie Kompressionsverfahren

Für die Bestimmung eines effizienten Codierungsverfahrens sind Ansätze aus der Informationstheorie erforderlich. Die digitalisierte Quelle wird als Nachricht über einem bestimmten *Alphabet S* aufgefaßt; die Zeichen sind die aus der Amplituden-Diskretisierung enstandenen abstrakten Intervalle, die typischerweise schon in einem Code vorliegen. Eben die Umcodierung macht die Kompressionseigenschaft der Codierverfahren aus!

Jedem Zeichen wird gemäß seiner *Auftretenswahrscheinlichkeit* $p(s_i)$ ein *Entscheidungsgehalt* $E(s_i)$ zugeordnet, der als Maßzahl für eine optimale Codelänge des Zeichens bei Codierung mit variabler Länge über dem Ziel-Codealphabet der Mächtigkeit b dient (bei binärer Codierung ist b=2).

$$E(s_i) = \log_b \frac{1}{p(s_i)}$$

Der mittlere Entscheidungsgehalt, die *Entropie*, H(S) der gesamten Quelle ist ein Maß für die durchschnittliche Länge des optimalen Codes.

$$H(S) = \sum_{i=1}^{n} \left(p(s_i) \cdot E(s_i) \right)$$

- Die Codefestlegung geschieht dann nach dem ***Huffmann-Verfahren*** mit variabler Codelänge so, daß den Zeichen mit der höchsten Auftretenswahrscheinlichkeit die kürzesten Codes zugeordnet werden und den Zeichen geringster Wahrscheinlichkeiten die längsten. Dabei ist eine Präfix-Bedingung („Fano-Eigenschaft“) zu beachten, die besagt, daß keiner der kurzen Codes als Anfang (*Präfix*) eines länger codierten Zeichens auftreten darf (/Koch77/ Kap. 2). Der Huffmann-Algorithmus achtet bei der Codierung durch ein zweiphasiges Prinzip von Analyse und Codegenerierung auf die Erstellung eines ausgeglichenen Codes mit einer durchschnittlichen Länge im Bereich der Entropie.
- Die optimale Codierung erlaubt die Zuordnung einer exakt der Entropie entsprechenden Anzahl von Codebits zu einem Zeichen der Quelle. Dies ist nicht immer

ein ganzzahliger Wert. Durch das Prinzip der arithmetischen Codierung wird der bei der Huffmann-Codierung durch die separate Codierung jedes Zeichens in ganzzahligen Schritten noch gegebene Overhead weiter reduziert. Die Codierung eines gelesenen Zeichens erfolgt unter der Berücksichtigung der schon zuvor bearbeiteten Zeichen. Die erreichte Effizienz wird daher mit dem Verzicht auf den wahlfreien Zugriff auf jedes einzelne Bildelement bezahlt.

- Redundanzreduktion.

  Alle Bilder aus der realen Welt weisen Korrelationen zwischen zeitlich und räumlich benachbarten Bildpunkten auf, die für eine Codierung ausgenutzt werden können. Die Korrelationen erhöhen sich bei der Steigerung der räumlichen und zeitlichen Diskretisierungsauflösung und verringern sich bei erhöhter Auflösung der amplitudinalen Diskretisierung.

  Einfache Verfahren zur Reduktion der Redundanzen sind Delta-Codierung, bei der nur Differenzen (vgl. DPCM in Abschn. 5.1.2) zwischen benachbarten Amplitudenwerten codiert werden und RLE-Techniken (Run-Length Encoding, Lauflängen-Codierung), bei denen in Wertepaaren codiert wird, die einem Amplitudenwert in der ersten Komponente die Anzahl der nachfolgenden identischen Werte in der zweiten Komponente zuordnen.

  Komplexere Verfahren zur Redundanzreduktion liegen beispielsweise bei der fraktalen und der objektorientierten Kompression (vgl. Quellencodierung in Abschn. 5.1.3) vor, die den Bildinhalt aufgrund einer Analyse mit charakteristischen Formen (Fraktale, bzw. fest gegebene geometrische Objekte) generisch beschreiben und für die Beschreibung eine möglichst platzsparende Darstellung wählen.

Verlustfreie Kompressionsverfahren der vorgestellten Art erreichen durchschnittliche Reduktionsfaktoren von 1,5 bis 2.

Die meisten definierten Austauschformate, besonders für Einzelbilder, beruhen auf den vorgestellten Techniken.

Besteht die Möglichkeit für eine technische Anwendung, frei zwischen den vorgestellten Techniken der Codierung zu wählen, so ist zu berücksichtigen, daß

- die Verfahren unterschiedlich komplex sind und deshalb unterschiedliche Verarbeitungszeiten bedingen,
- die Volumenreduzierung für Archivierungszwecke sicherlich der bestimmende Faktor ist, für die Echtzeitverarbeitung, die sofort nach der Generierung der Szenen und ihrer Anzeige am entfernten Ende die Daten wieder vernichtet, jedoch die Verarbeitungszeit im Vordergrund steht, sofern die Datenmenge über das technische Übertragungssystem in der erforderlichen Zeit übertragbar ist,
- die Fehleranfälligkeit des Verfahrens der Fehlerhaftigkeit des Übertragungssystemes angemessen sein muß. (Nicht-wahlfreie Codierungen führen bei Auftreten nur eines Fehlers u. U. zur Unbrauchbarkeit des ganzen Bildes; nicht umsonst nennen sich die Verfahren „redundanzreduzierend“; erhöhte Redundanz erhöht die Sicherheit.)

5.4.2 Verlustbehaftete Kompressionsverfahren

Beobachtet man das Perzeptionsvermögen (die Aufnahmefähigkeit) des Menschen, stellt sich die Frage, inwieweit überhaupt die dargereichte Information notwendig für das Verständnis des Inhaltes ist. Gerade im Bereich der Bewegtbilder, die in vielen Anwendungen nur flüchtig beobachtet werden können, ist die Erhaltung und Darstellung sämtlicher Bild-

informationen nicht erforderlich, da nicht perzeptierbar. Dies wird bei den verlustbehafteten Kompressiontechniken ausgenutzt.

5.4.2.1 Irrelevanzreduktion für Einzelbilder: JPEG

Ein weit verbreitetes Verfahren für die Kompression von Einzelbildern wurde von der Joint Photographic Experts Group (JPEG), einer Arbeitsgruppe des IEC normiert (ISO IS 10918, 1992). Hierbei werden sowohl verlustfreie als auch verlustbehaftete Kompressionstechniken in 4 definierten Modi mit verschiedenen Untervarianten kombiniert. Darüberhinaus legt der Standard ein Austauschformat fest, das neben den komprimierten Daten auch die für eine Dekompression benötigten Parameter enthält.

Im verlustfreien Modus wird nach dem Prinzip der Vorhersage für einen Nachbarpunkt gearbeitet. Ausgegangen wird von einem Signal in den drei Komponenten Y, u und v. Codiert wird jeweils nur die Differenz zwischen Vorhersagewert und Pixelwert nach einem Huffmann-Code oder nach einem arithmetischen Verfahren. Die Kompressionsfaktoren liegen bei dieser Methode etwa bei 2.

In den verlustbehafteten Modi werden aus jedem Kanal (Y, u, v) Blöcke von 8×8 Pixeln gebildet und mittels der sogenannten „Diskreten Cosinus-Transformation“ (DCT) aus dem Ortsraum in den Frequenzraum transformiert.

Anschließend werden diese Blöcke mittels einer (benutzerdefinierbaren) Tabelle mit 64 Einträgen quantisiert. Dadurch entstehen viele Werte, die sich nicht oder kaum unterscheiden, da in kleinen Ausschnitten natürlicher Bilder die Frequenzen meist in einem engen Intervall liegen.

Erst jetzt schließt sich die verlustfreie Entropiecodierung an. Sie codiert ausgehend von den Eckelementen der Blöcke die Abweichungen, die nach der Quantisierung überwiegend 0 sind.

Die Informationsverluste rühren dabei bereits von den Rechengenauigkeitsfehlern der DCT her, als auch von der anschließenden Quantisierung. Die Verwendung der Quantisierungstabelle ermöglicht es, jedes der 64 Blockelemente separat mit unterschiedlicher Bewertung zu bearbeiten.

Es sind auf diese Weise Kompressionsfaktoren bis zu 32 erreichbar.

Leistungsfaktoren dieser Kompressiontechnik sind die effizienten Implementierungen der DCT und ihrer Rücktransformation, die für jeden Bildblock in jedem Luminanz-/Chrominanzkanal 64mal durchzuführen sind. Häufig wird hierfür schnelle Hardware eingesetzt. Wirtschaftlich interessant ist jedoch auch, daß sich JPEG sehr gut eignet um getrennte Produkte „Codierer“ und „Decodierer“ zu realisieren. (Weiterreichende Informationen finden sich z. B. in /Hofm93/ und /Stei93/.)

5.4.2.2 Kompressionsverfahren für Bewegtbilder

Liegen schnelle Realisierungen der JPEG-Komprimierer vor, kann eine Video-Szene durch isochron ausgeführte JPEG-Komprimierungen bearbeitet werden. Man bezeichnet dieses Verfahren auch als *Motion-JPEG* oder *M-JPEG*.

Zieht man jedoch die Charakteristik der Bewegtbildszene in Betracht, können mit speziellen Verfahren bessere Ergebnisse erzielt werden.

Ein Standard ist die *Empfehlung H.261*, die für den Einsatz für Bildtelefone im S-ISDN konzipiert wurde. Interessant ist, daß hier dem Einsatz angemessen eine maximale Signalverzögerung von 150 ms zwischen Kompressionseingang und Dekompressionsausgang festgelegt ist.

Das erlaubte Eingangssignal ist bei H.261 präzise bestimmt: am Eingang muß eine Bildwechselfrequenz von 29,97 Vollbildern/s vorliegen, codiert nach CCIR 601. Für die Ortsauflösung sind zwei Formate vorgesehen, 288 Zeilen zu 352 Pixeln und 176 Zeilen mit 144 Pixeln (im Luminanzkanal). Damit ergeben sich unkomprimierte Übertragungsraten von 36,46 Mbit/s und 9,12 Mbit/s. H.261 verwendet eine blockorientierte Kompression, die einen Faktor von bis zu 48 erreicht.

MPEG ist ein von der Arbeitsgruppe *Moving Picture Expert Group* des IEC entwickelter Standard (ISO IS 11172, 1993), der eine Datenrate von 1,4 Mbit/s anstrebt. MPEG berücksichtigt die Entwicklungen der Standbildkompression JPEG und der H.261 Bewegtbildkompression. In MPEG ist ein symmetrischer und ein asymmetrischer Modus definiert. Bei der symmetrischen Kompression ist der Aufwand der Kompression gleich wie bei der Dekompression, was für den gedachten Echtzeiteinsatz erforderlich ist. Für Verteildienste ohne Echtzeitanspruch kann im asymmetrischen Modus die Kompression aufwendiger ausfallen als die Dekompression. Vom IEC ist die Verabschiedung von vier MPEG-Standards geplant, die Datenraten von etwa 64 kbit/s bis hinz zu 40 Mbit/s erfordern.

MPEG geht von einer 3-Komponenten-Codierung der Videoszene aus und berücksichtigt dann die Veränderungen der Szene durch

- I-Frames:
  Kompression wie ein Einzelbild, jedoch wegen der Echtzeitanforderung mit geringerem Kompressionsfaktor
- P-Frames:
  beinhalten nur die Veränderungen zu vorhergegangen I-Frames und P-Frames, die Kompressionsrate ist hoch.
- B-Frames:
  beinhalten nur Veränderungen zu einem vorhergegangenen und einem vorausgesagten nächsten Frame.
- D-Frames:
  sind einzeln komprimierte Frames niedriger Qualität, die für den schnellen Vorlauf bei digitalen Video-Aufzeichnungen benötigt werden.

5.5 3D-Video im Hinblick auf Kompression

5.5.1 Prinzip der High-Speed-Shutter 3D-Farb-Video-Technik

Das hier vorgestellte Prinzip der 3D-Video-Übertragung ist ein Patent der Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH.

Es benutzt ein konventionelles, analoges Fernseh-Farbsignal zur Übertragung der dreidimensionalen Daten und ist deshalb hervorragend geeignet, mit allen bestehenden TV-Techniken, einschließlich der Digitaltechniken für konventionelles TV, verarbeitet zu werden.

Mit zwei separaten Kameras werden in einem Winkel, der dem natürlichen Schielwinkel der Augen entspricht, Bilder/Szenen aufgenommen. Hinter den Kameras befindet sich jedoch ein Multiplexer, der die Zwischenbildübertragung der Fernsehtechnik ausnutzt und

abwechselnd das linke Kamerabild und das rechte Kamerabild auf die konventionellen Half-Frames verteilt.

Bei der Übertragung über den analogen Fernsehkanal wird das bei BAS, FBAS, PAL vorhandene untere Seitenband in jedem Half-Frame (die ersten 1,25 MHz der Bandbreite) dazu benutzt, Synchronisationssignale für den Empfänger mitzutransportieren.

Der Betrachter am Empfänger erhält ein „normales“ Fernsehbild, das nicht zwei Halfframes eines Bildes, sondern stattdessen jeweils Halfframes von zwei Bildern darstellt, was sich in der Betrachtung durch Doppelkonturen bemerkbar macht. Die durch den Verzicht auf jeweils ein Halbbild hervorgerufenen Flimmereffekte werden durch Verwendung eines Bildschirms mit doppelter Bildwiederholfrequenz ausgeglichen (100 Hz-Schirm).

Der 3D-Effekt wird nun erreicht, indem dem Betrachter eine spezielle Brille aufgesetzt wird, die über LCD-Gläser in der Lage ist, abwechselnd das linke und rechte Glas zu verschließen (Bezeichnung entsprechend „Shutter-Brille“). Das abwechselnde Verschließen der Brillengläser, das Demultiplexen der Links-/Rechts-Signale, muß nun noch mit der Anzeige auf dem Bildschirm synchronisiert werden, wozu die in den unteren Teilbändern der Fernsehübertragung eingespeisten Signale verwendet werden. Diese werden wiederum von einem am Bildschirm angebrachten Infrarot-Transmitter zu den empfangenden Shutter-Brillen übertragen.

5.5.2 Herkömmliche 3D-Videotechniken

Das *Anaglyphen-Verfahren* ist das wohl bekannteste 3D-Verfahren. Hierbei werden die Links-/Rechts-Teilbilder in unterschiedlichen Farben dargestellt und die Trennung beim Empfänger erfolgt durch eine Brille mit entsprechenden Farbfolien. Das Verfahren hat den Nachteil, daß durch die Verwendung von Farben zur Kanaltrennung nur Grauwerteindrücke vermittelt werden können.

Das *Dual-Monitor-System* verwendet zwei Anzeigeschirme, die die Teilbilder in horizontaler bzw. vertikaler Polarisation anzeigen. Über einen halbversilberten Spiegel werden sie erst auf Empfangsseite gemultiplext und zum Betrachter geleitet, der mit einer entsprechend unterschiedlich polarisierten Brille den 3D-Effekt in Farbe wahrnehmen kann. Das Verfahren erfordert neben zwei polarisierenden und exakt synchronisierten Monitoren insbesondere zwei Video-Übertragungskanäle.

Das *Groß-Shutter-Verfahren* multiplext wie das High-Speed-Shutter-Verfahren der KfK die Teilbilder schon auf Sendeseite, nimmt die Trennung jedoch durch einen bildschirmgroßen LC-Shutter zentral am empfangenden Monitor vor. Die getrennten Kanäle werden durch weitere Vorrichtungen links- bzw. rechtszirkular polarisiert und können vom Betrachter dann wieder über eine passive Zirkularpolarisationsbrille aufgenommen werden. Der Nachteil dieses Verfahrens ist die langsame Arbeitsgeschwindigkeit des zentralen Groß-Shutters.

5.5.3 Kompression beim High-Speed-Shutter 3D-System

Die vorgestellten Kompressionstechniken sind für das 3D-System alle anwendbar, jedoch unterschiedlich geeignet.

Prinzipiell sind die redundanzreduzierenden Verfahren bei der Diskretisierung schon in der verwendeten Video-Technik enthalten und unabhängig vom 3D-System.

Alle weitergehenden Verfahren (redundanz- und relevanz-reduzierend) sind effizient einsetzbar, wenn sie auf der Intraframe-Reduktion beruhen, also nur Redundanzen bzw. Irrelevanzen innerhalb eines Halfframes berücksichtigen. Besonders eignen sich

arithmetische Redundanzreduktionen dadurch, daß keine Zwischenspeicherung von Frames oder Halfframes notwenig ist, sondern daß die Kompression während des Signaldurchlaufs durch die Kompressionseinheit erledigt werden kann. Man spricht von Kompression „On-The-Fly“.

Bauen die gewählten kompressiontechniken dagegen auf Interframe-Reduktion auf, also auf den Veränderungen zwischen aufeinanderfolgenden Halfframes, so führen die durch den Schielwinkel hervorgerufenen Sprünge zu einem sehr schlechten Kompressionsverhältnis, da sich die Szene scheinbar stark verändert.

Interframe-Verfahren müssen daher, sollen sie effizient eingesetzt werden, vor dem Multiplexen des Signales stattfinden.

5.6 Schlußfolgerungen für Bewegtdatenübertragung

Für die Integration des kontinuierlichen Mediums Video liegen bewährte analoge Fernsehtechniken vor. Die grundsätzliche Entscheidung über die benötigte Qualität des Bildes muß bei der Auswahl dieser Systeme ansetzen.

Voraussichtlich sind semiprofessionelle Systeme mit einer guten Luminanzauflösung und Zweikomponentencodierung (Y/C) ausreichend. Ein solches System liegt mit der preiswerten S-VHS- oder Hi8-Camcorder-Technik vor.

Die Digitalisierung der analog teildiskretisierten Signale – zeitdiskret (Framing), ortsdiskret (Zeilen) – muß angemessen sein. Nach persönlichem Eindruck des Verfassers und belegt durch die Literatur (/Stei93/ u. a.) ist der Substandard 2 des CCIR hinreichend. Er fordert mit einer CBR von 135 Mbit/s einen Wert, der beim Einsatz eines ATM-Netzes sicher realisierbar ist.

Der Einsatz von „zusätzlichen“, d. h. über die bei der Diskretisierung vorgenommene Redundanzreduktion hinausgehenden Kompressionstechniken ist im Operationsszenario aus verschiedenen Gründen nicht angebracht:

- Jede Kompressionstechnik benötigt Bearbeitungszeit, die sich in der Übertragungszeit von Ende zu Ende nachteilig bemerkbar macht.
  - Intraframe-Techniken müssen bis zu einem kompletten Frame puffern, um Redundanzen aufzuspüren, was eine zusätzliche Verzögerung von 40 ms bedingt. (Nach der Untersuchung in /Enss94/ liegen die Werte in der Praxis zwischen 5 ms und 40 ms.)
  - Interframe-Techniken müssen wenigstens zwei komplette Frames puffern, um die Veränderungen der Szene zu analysieren, was eine Verzögerung von 80 ms bedingt.
- Die Kompressionstechnik ist bei dem vorgeschlagenen Standard nicht notwendig, da das Netzwerk in der Lage ist, die geforderte Datenrate zu erbringen („lokale“ Erstreckung vorausgesetzt).
- Die digitale Video-Verarbeitung ist insgesamt mit einem bestimmten Aufwand verbunden, der in der Gesamtverzögerung gemessen wird. Er setzt sich aus dem Aufwand für die Diskretisierung und Digitalisierung und dem Aufwand für die Übertragung zusammen. Der Einsatz von Kompressionstechniken erhöht den Aufwand im Rahmen der Digitalisierung eventuell zugunsten eines geringeren Aufwandes für die Übertragung, durch geringere Bitraten und verminderte Reassemblierzeiten. Nach Einschätzung des Verfassers nach dem Studium der Kompressionstechniken ist der Aufwandszuwachs durch Einsatz von Kompression größer als die Einsparung bei der Übertragung des komprimierten Signales, die darüber hinaus durch nun auftretende

variable Bitrate noch eine andere Dienstqualität (anderer AAL erforderlich, vgl. /GhHu93/) und damit ggfs. verschlechterte Konsumqualität erhält (s. auch /ReBe92/). Die Gefahr der Verschlechterung bei der Konsumqualität wird durch die zumindest vorhandene Redundanzreduktion noch erhöht (vgl. /WeWe93/).

- Da die Daten der Szene sofort nach der Erzeugung verbraucht werden, durch das Beobachten während der Operation, brauchen sie nicht gespeichert und damit auch aus Gründen der Speicherplatzverminderung nicht reduziert werden (vgl. /BeBi94/).
- Die in ARTEMIS mit dem Sitzungs-Archiv vorgesehene digitale Speicherung der Video-Daten ist von den Echtzeitbedingungen weitgehend entkoppelt und kann deshalb eine Kompression vor Ort nach dem Empfang vornehmen.
- Eine analoge Speicherung auf herkömmlichen Videoband ist jederzeit möglich.

5.7 Einzelbilder in der medizinischen Anwendung

Abschließend für dieses Kapitel sei noch kurz auf die medizinischen Einzelbilder eingegangen, die in der Patientendatenbank in Form von Röntgenaufnahmen oder Tomographiebildern auftreten können.

Es gibt bisher in ARTEMIS keine publizierten, konkreten Vorstellungen, in welcher Weise diese Daten in ein Operationsszenario eingehen können. Infolgedessen ist auch keine scharfe Aussage über die Echtzeitanforderungen möglich.

Charakteristische Daten für Einzelbilder können angegeben werden, sie sind jedoch für die Speicherung interessanter als für die Übertragung, sofern diese keinen zeitlichen Begrenzungen unterliegt. Ein Röntgenbild hat ein unkomprimiertes Datenvolumen von etwa 3,7 Mbit.

Für den Austausch medizinischer Bilddaten wurde ein Format mit der Bezeichnung ACR/NEMA konzipiert. Es gestattet neben dem reinen Austausch von Röntgen und Tomographiedaten auch das Mitliefern anderer Patientendaten. Darüberhinaus sind in ACR/NEMA auch Spezifikationen für Hardware, z. B. Peripherie und Interfaces, enthalten.

Für eine Leistungsanforderung des Übertragungssystemes muß erst geklärt werden, welche Transformationen in ARTEMIS auf den Einzelbilddaten in welchen Komponenten vorgenommen werden müssen. Etwa könnten Tomogramme von einem Datensatz ausgehend in KISMET selbständig verarbeitet werden, so daß nur die rasche Anlieferung des ersten Datensatzes notwendig ist. Überschlagsmäßig kann mit entsprechender Kompression von einem angenommen Faktor 10 und mit einer Übertragungsrate von etwa 130 Mbit/s bei einer Übertragungsverzögerung des Netzes von 10 µs ein Bild in 2,9 ms ausgeliefert werden.

6 Leistungsanforderungen eines ATM-basierten MONSUN/ARTEMIS-Systemes

In diesem Kapitel wird versucht, die Leistungsanforderungen des ARTEMIS/MONSUN-Konzeptes zunächst in einer vom Transportsystem relativ unabhängigen Weise in Form von Bitraten zusammenzustellen, denn ein zukunftssicherer Entwurf sollte sich in erster Linie nicht an vorhandenen Techniken orientieren, die sich – wie der Abschnitt 3.1 zeigt – innerhalb weniger Jahre entscheidend verändern können, sondern muß von den Anforderungen der Anwendungen ausgehen; erst die Realisierung wird eine akzeptable Anpassung an vorhandene Technik vornehmen oder kompromißlos geeignete Technik suchen.

Gerade mit Blick auf zukünftige Einsatzszenarien von ARTEMIS/MONSUN im Klinikbetrieb kommt dann der Realisierung auf handelsüblicher Netztechnik jedoch eine große Bedeutung zu, denn keine Klinik wird unter betriebswirtschaftlichen und systemarchitektonischen Gesichtspunkten – selbst bei Aufbau und Unterhalt eines dedizierten Operationsnetzes – mit „exotischer“ proprietärer Hardware und unerprobten Protokollen arbeiten, solange der Markt geeignete konfektionierte Techniken zur Verfügung stellt. Nur dann können bei Ausfall von Kommunikationskomponenten rasch – durch Umschalten auf ein Netz statischer oder lastverteilender, dynamischer Redundanz („normales“ Hausnetz) oder schlichtes Auswechseln der fehlerhaften Komponente – Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

„Exotik“ ist bei der Entwicklung und Anpassung der AEH-Roboter notwendig und angebracht, da die Funktionalität dieser Komponenten im Gegensatz zur Funktionalität des Kommunikationssubsystemes stark spezialisiert ist.

6.1 Methodik für die Ermittlung der Leistungsanforderungen im ARTEMIS/MONSUN-Szenario

In den folgenden Ausführungen wird teilweise nur von MONSUN gesprochen werden, unter der Annahme, daß für die derzeit in ARTEMIS noch nicht festgelegten Kommunikationsaspekte (vor allem Anwendungs-PDUs, Kanalcharakteristik; vgl. 4.4.2.5) die Definitionen von MONSUN im wesentlichen fortbestehen.

Nachdem im abschließenden Teil des vierten Kapitels (Abschnitt 4.4.2) ein Schritt hin zum multimedialen System unternommen wurde, werden nun nacheinander die charakteristischen Anforderungen für die Regelung (diskretes Medium) und die A/V-Übertragung (kontinuierliches Medium) untersucht.

Dabei wird grundsätzlich davon ausgegangen, daß ein zugrundegelegtes ATM-Netzwerk in der Datentransferphase in der Lage ist, die beim separaten Verbindungsaufbau ausgehandelten Leistungen zu garantieren. Eine Verbindung, deren Qualität nicht garantiert werden kann, wird nicht aufgebaut.

Dies ist eine praktikable Voraussetzung, solange der Bereich der In-House-Netze nicht verlassen wird. Die zentralistisch orientierte Struktur von ATM zieht die Komponente „Netz“ (im Gegensatz zu den herkömmlichen Varianten mit Zugriffskonkurrenz) in einem Gerät „Switch“ zusammen, das über eine wohldefinierte Ausstattung an Ressourcen verfügt, die beim Verbindungsaufbau zugeteilt werden. Im hausinternen Bereich bleibt die Zahl der Switches klein, so daß mit Hilfe des integrierten Managements z. B. das Routing nachvollzogen werden kann und Engpässe, aus der detaillierten Kenntnis über die

Leistungsfähigkeiten der Teilstrecken heraus, einfach erkannt und zum Teil über organisatorische Maßnahmen behoben werden können.

Wird der In-House-Sektor verlassen, ist die Zahl der durchlaufenen Switches in der Regel groß und nicht mehr exakt bekannt und es werden verschiedene „Hoheitsgebiete“ durchlaufen. Für diesen Fall sind anders geartete Untersuchungen (etwa auf der Basis von Congestion Control) vorzunehmen.

Im In-House-Sektor ist es insbesondere vertretbar, die Verbindung für eine Anwendung nach dem Maximalprinzip auszulegen, so daß eine Qualität garantiert werden kann (vgl. /Pryc94/ S. 40). Nach dem Paradigma der „Skalierbarkeit“ – angewendet auf die Anforderungen – sollten dann aber die Verbindungsanforderungen so genau wie möglich am tatsächlichen Bedarf orientiert sein, um die Ressourcenvergeudung zu minimieren.

Dies geschieht in diesem Kapitel für die multimedialen Anwendungen MONSUN/ARTEMIS. In einem Soll-Ist-Vergleich werden dann die ermittelten Anforderungen den für ATM-Netze verfügbaren Komponenten gegenübergestellt, um geeignete Konfigurationen zu ermitteln.

Das methodische Vorgehen ist hierbei an der Schicht-Organisation des Systemes orientiert: Ausgehend von der bei /Pryc94/ als „natürliche Bitrate“ bezeichneten Anforderung der Applikationen für den abstrakten Kanal, werden zunehmend die für die Realisierung in Betracht kommenden Dienstschichten mit ihren Overheads und Diensterbringungs-verzögerungen in die Betrachtung aufgenommen. Dies geschieht für die beiden multi-medialen Komponenten getrennt, da heute verfügbare Komponenten im Bereich der kontinuierlichen Medien mit proprietären Techniken direkt auf der AAL aufsetzen. Für die Daten des diskreten Mediums wird die Schichtstruktur üblicherweise bis zur Transportschicht durchlaufen, die dann als Einstieg zum AAL des ATM-Adapters dient. Die Treiber für den eingesetzten Endgeräte-Adapter bieten dann ein der Transportschicht zumindest in Teilen entsprechendes API an, auf dem die Anwendung direkt mit den gewohnten Transportschicht-Dienstprimitiven arbeiten kann.

Die scheinbare Zäsur in der Betrachtung beim Erreichen des AAL ist darin begründet, daß ein ATM-basiertes Netz einen großen Teil der für die Auslegung wichtigen Protokoll-funktionen nur an den Verbindungsenden durchführt (vgl. Abschnitte 3.1.3 und 3.2), im eigentlichen „Netz“ jedoch nur die Funktionen der ATM-Schicht und der Physikalischen Schicht zur Anwendung kommen. Nach der Anpassung durch den AAL ist für die „netzinterne“ Betrachtung keine Unterscheidung des diskreten und kontinuierlichen Mediums mehr erforderlich, da die Betrachtung auf der Einheit „Zelle“ beruht, deren Inhalt für das Netz transparent ist. Hier findet also keine Veränderung des Datenvolumens im einzelnen mehr statt, und die feststellbaren Effekte sind auf Verarbeitungsverzögerungen, auf die „Umverteilung“ beim Mischen verschiedener Datenströme durch das „Switchen“ und auf die Übertragungsverzögerung im strengen Sinne zurückzuführen.

Bei der zunehmenden Konkretisierung der Dienstanforderungen am Rande des Netzes sind besonders die in geschichteten Kommunikationssystemen typischen Protokollmechanismen, Kapselung, Aufteilung/Wiedervereinigung und Blocken/Entblocken, für die Veränderungen verantwortlich, da sich durch sie die PDU-Charakteristiken in den Merkmalen PDU-Länge, PDU-Anzahl, PDU-Overhead (Oberbegriff: Transportvolumen) verändern.

Doch selbst bei Passieren eines Durchreichdienstes, bei dem die PDUs keine Veränderung erfahren, benötigt jeder Schichtdurchlauf eine gewisse Zeit, die als weiteres Charakteristikum hinzukommt.

Die zeitliche Betrachtung hat zwei Bestandteile, nämlich zum einen die Zeit, die für die örtliche Veränderung der Informationen benötigt wird, zum anderen die Zeit, die für die

formale Veränderung der Information benötigt wird. /Pryc94/ beschreibt dieses Phänomen auf S. 53f. wie folgt:

> *„Die Verzögerung eines Netzwerks besteht aus verschiedenen Bestandteilen, die in zwei Hauptgruppen aufgeteilt werden können: die Übertragungsverzögerung D_t (hervorgerufen durch die Übertragung der Information von der Quelle zum Empfänger über das Netzwerk) und die Verarbeitungsverzögerung D_p (hervorgerufen durch Verarbeitungsvorgänge in den Vermittlungsknoten, Multiplexern usw.).*
>
> $$D = D_t + D_p$$
>
> *Die Übertragungsverzögerung D_t hängt von der physischen Geschwindigkeit des Mediums und dem Abstand zwischen Sender und Empfänger ab. (...)*
>
> *Die Verarbeitungsverzögerung D_p hängt von der physischen Einbindung der Knoten auf dem Weg zwischen Quelle und Ziel ab sowie von der Art der Informationsverarbeitung.“*

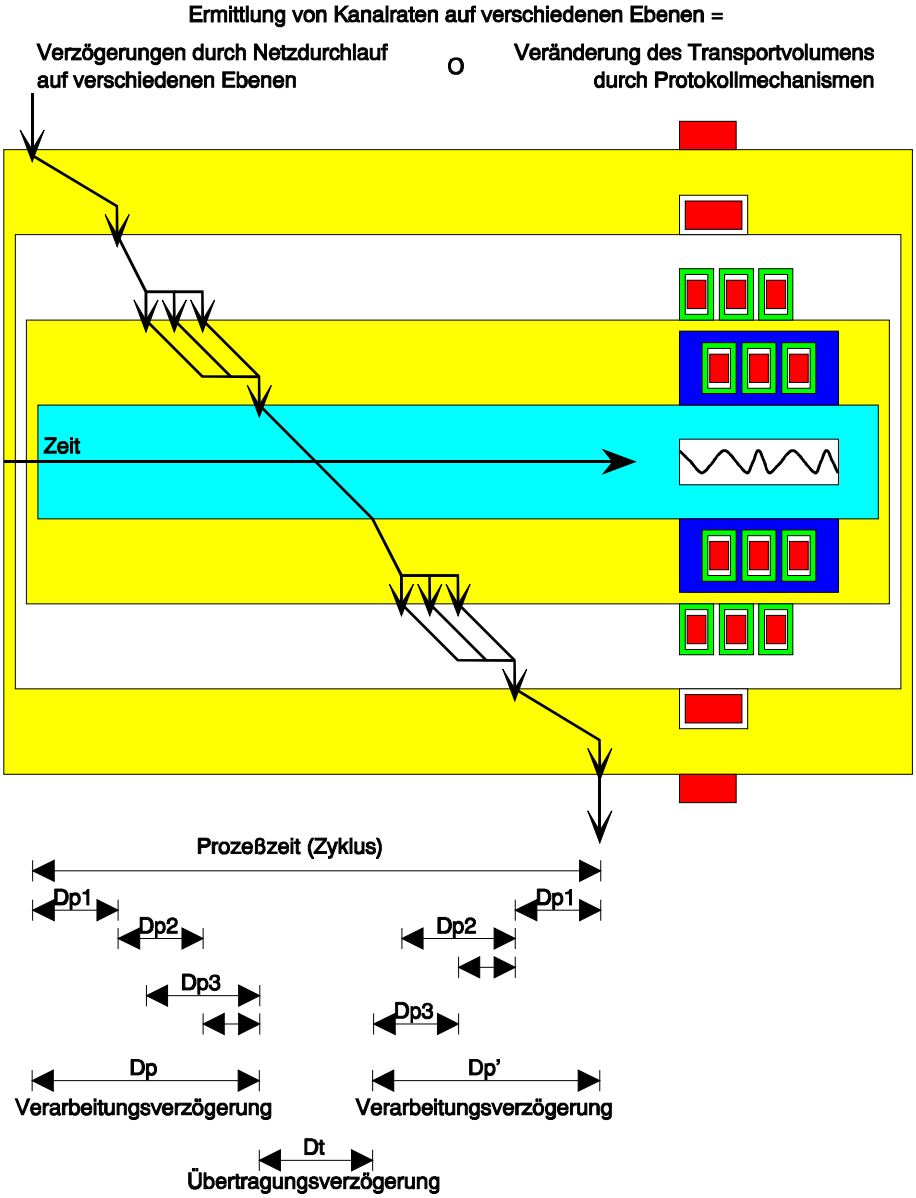

Abbildung 6.1: Performance-Kenngrößen und ihr Zusammenhang

Während die Veränderungen des Transportvolumens durch Standards bestimmt sind und daher einer quantitativen Betrachtung zugänglich, erweisen sich die Verzögerungszeiten häufig als ungeeignet für eine allgemeingültige quantitative Betrachtung, da sie einerseits überwiegend implementations- und damit herstellerabhängig sind und andererseits normalerweise nicht fest. Dies betrifft insbesondere die Verarbeitungsverzögerungen D_p.

Aufgrund von Protokollstrukturen und Verkehrscharakteristiken sind jedoch auch für die Verarbeitungsverzögerungen qualitative Aussagen möglich, und zwar immer dann, wenn Assemblierungs-/Reassemblierungsmechanismen oder Paketierungs-/Entpaketierungsmechanismen mit festgelegten Transportraten zusammentreffen. Sie bewirken für die oberen Schichten Wartezeiten, die durch Pufferspeicher und Anpassung der Anlieferrate kontrolliert werden müssen.

Die Übertragungsverzögerung D_t läßt sich für ein bestimmtes physikalisches Medium hingegen wieder quantitativ recht zuverlässig bestimmen.

Abbildung 6.1 veranschaulicht diesen Sachverhalt und gibt die Struktur für das weitere Vorgehen vor.

6.2 PDUs der Anwendungsschicht in MONSUN

In diesem Abschnitt werden die auf der Ebene der Anwendungsprozesse auftretenden PDUs für die Regelung zusammengestellt und den eingeführten logischen Kanälen zugeordnet. Mit Hilfe der im Abschnitt 4.2.3 eingeführten Taskstruktur und unter Berücksichtigung des später zum Einsatz kommenden Transportprotokolles kann ein charakteristischer Kanaldurchsatz auf verschiedenen Ebenen, zusammengefaßt in einem Durchsatzprofil, ermittelt werden.

Für den Informationsfluß in Außenbeziehungen über die ursprünglichen MONSUN-Kanäle sind sieben der insgesamt neun definierten PDU-Varianten auf Anwendungsprozeßebene relevant:

MV_ATZ, **MV_COM**, **MV_DHW**, **MV_KMS**, **MV_MEL**, **MV_POS** und **MV_XYZ**.

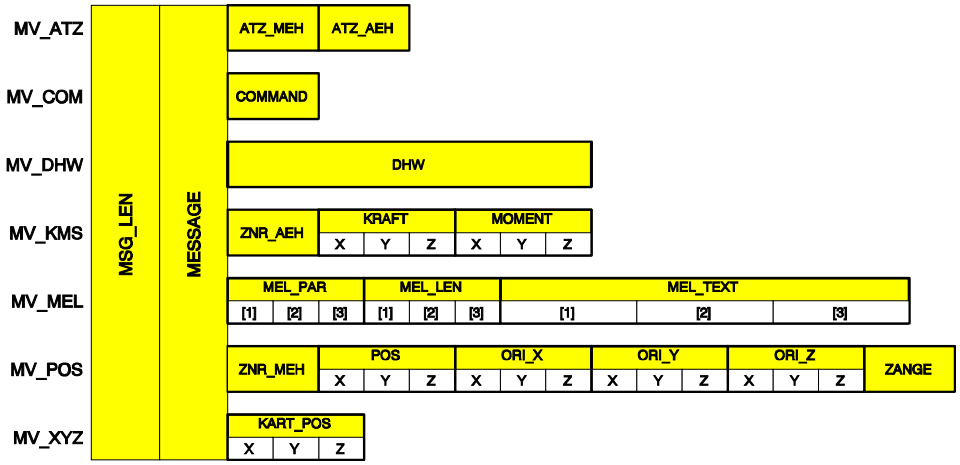

Abbildung 6.2: Schematische Feldergliederung der MONSUN-PDUs auf Anwendungsebene (nicht proportional)

Die Message-Varianten („MV_“) der Tabelle 6.1 sind bei den vorhandenen MONSUN-Implementierungen über einen Varianten-Record in RMX-PASCAL definiert.

Die PDU-Längen liegen zwischen 6 Byte für die Variante MV_COM[33] und 256 Byte für die Variante MV_MEL, wobei 4 Byte in zwei Kopffeldern MES_LEN und MESSAGE in jeder Variante gleich sind (Abbildung 6.2).

Tabelle 6.1: MONSUN-spezifische PDUs und ihre Zuordnung zu den Kommunikationskanälen

PDU	Beschreibung	Felder	Länge	Kanäle
MV_ATZ	Transport von Abtastzeitrasterwerten von MEH und AEH beim Verbindungsaufbau	**ATZ_MEH**, **ATZ_AEH**	12 Byte	COM_DO
MV_COM	Transport von Kommandos für Betriebsartenwechsel und dgl.	**COMMAND**	6 Byte	COM_DO, DAT_DO, DAT_UP
MV_DHW	Transport von Winkel-Vorgaben an AEH	**DHW**	32 Byte	DAT_DO
MV_KMS	Transport von reflektierten Kräften und Momenten vom KMS einer AEH zur MEH	**ZNR_AEH**, **KRAFT[x,y,z]**, **MOMENT[x,y,z]**	32 Byte	DAT_UP
MV_MEL	Transport von Mitteilungstexten	**MEL_PAR[1..3]**, **MEL_LEN[1..3]**, **MEL_TEX[1..3]**	256 Byte	COM_DO
MV_POS	Transport von Stellvorgaben von der MEH an die AEH in speziellen Matrix-Inkrementen	**ZNR_MEH**, **POS[x,y,z]**, **ORI_X[x,y,z]**, **ORI_Y[x,y,z]**, **ORI_Z[x,y,z]**, **ZANGE**	132 Byte	DAT_DO
MV_XYZ	Transport von Positionsvektoren in kartesischen Koordinaten bezüglich K_0 als Statusmeldungen von der AEH an die MEH, bzw. zukünftig per BC	**KART_POS[x,y,z]**	16 Byte	COM_DO

Weitere PDUs aus den ARTEMIS-Demonstratoren (EFS-ROBOX) sind zwar für die Entwickler vorläufig definiert, werden aber noch verändert und erst danach dokumentiert. Es ist jedoch die Aussage möglich und für die hier angestellten Überlegungen hinreichend, daß keine PDU die Länge von 300 Byte überschreiten wird.

6.3 Zyklen und Verkehrscharakteristik in MONSUN

6.3.1 Kenngrößen für die Kanal-Verkehrscharakteristik

Die PDUs der Anwendungsprozesse von MONSUN werden – initiiert durch die in Abschnitt 4.2.3.1 besprochenen Tasks – im Rahmen der Regelung über das Netz transportiert. Soll zunächst vom Transportsystem abstrahiert eine Verkehrscharakteristik für die Anwendung aufgestellt werden, so sind die einzelnen Kanäle unabhängig voneinander zu betrachten.

[33] Alle 21 Betriebskommandos (**CMD_...**) werden codiert in der **MV_COM**-PDU übermittelt (Assoziationen, Verbindungsabbau/-abbruch, MSM-Betrieb, Automatikbetrieb u. a.).

Als Kennzeichen für den Verkehr auf den einzelnen Kanälen werden betrachtet:

- Die partikulare Bitrate.
  In diesem Parameter wird der variablen Bitrate dadurch Rechnung getragen, daß zur Bestimmung der Bitrate das zeitliche Raster und die Länge der zu transportierenden unterschiedlichen PDUs herangezogen wird. Dies wird dadurch erleichtert, daß in der Datentransferphase von MONSUN – und nur diese soll ihrer Echtzeitbedingungen wegen betrachtet werden – nicht mehr als zwei verschiedene PDU-Typen pro Kanal auftreten, also nicht mehr als zwei, bei richtungsabhängigem Betrieb vier partikulare Kanäle existieren können. Zwar ist auf den MONSUN-Kanälen nicht deterministisch festgelegt, welche PDUs in welcher Folge auf den Kanälen auftreten, die in /Schu91/ gegebenen Werte ermöglichen jedoch eine recht scharfe Aussage, wenn man sie mit den Werten in Kapitel 4 von /Brei91/ in Beziehung setzt.

  Darüber hinaus kann in zweierlei Weise nach dem Maximalprinzip gearbeitet werden[34], indem einesteils vorausgesetzt wird, daß zu jedem möglichen Sendezeitpunkt auch entsprechende PDUs gesendet werden, und andernteils, für den „aggregierten Kanal“, daß zu jedem Kanalübertragungszeitpunkt die größte in Frage kommende PDU versandt wird.

- Die aggregierte Bitrate.
  Sie ist die als Nettodatenrate des Kanales auf Taskebene auftretende Datenrate, die das Nachrichtenprofil, also die Verteilung der partikularen Raten, darstellt.

- Die aus der Anordnung der partikularen Bitrate resultierende Lastform.
  Je nach Art und Weise, in welcher Reihenfolge, Häufigkeit und Häufung verschiedene Bitraten auftreten, erhält die aggregierte Bitrate eine charakteristische Form. Ausschlaggebend für die auftretenden Formen ist, ob nur feststehende Bitraten (wertdiskret) oder wertkontinuierliche Raten auftreten. Ferner kann das Auftreten bestimmter Bitraten nach einer zeitlichen Funktion geschehen (deterministisch) oder zufällig verteilt sein (indeterministisch).

  Typische Formen sind in Abbildung 6.3 bezeichnet:

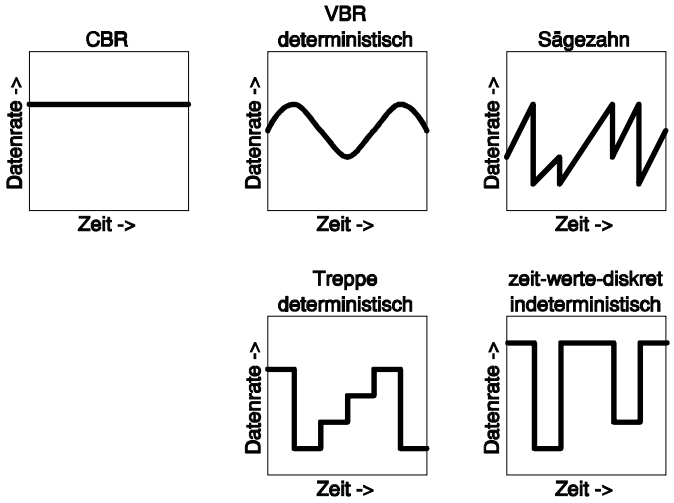

Abbildung 6.3: Typische Formen der Lastverteilung

- Die Burstiness oder der Burstfaktor.

[34] Dies ist bei ARTEMIS ohnehin notwendig, wo nur pauschale Angaben über die PDUs vorliegen.

Dieser Faktor gibt das Verhältnis der maximal auftretenden Datenrate zur durchschnittlich auftretenden Datenrate an.

6.3.2 Charakteristik des COM_DO-Kanales

Der COM_DO-Kanal ist als einziger der drei für MONSUN definierten Kanäle bidirektional ausgelegt. Die Bidirektionalität kann sich im Betrieb des Kanales in einem Duplex- oder Halbduplexverfahren niederschlagen. Hier wird davon ausgegangen, daß eine Übertragung immer den gesamten abstrakten Kanal zugeteilt bekommt, somit eine Serialisierung der Einzelübertragungen nach dem TDM bzw. ein Halbduplexbetrieb vorgenommen wird. Dies stellt im Hinblick auf die Anforderung an Übertragungskapazität für den abstrakten COM_DO-Kanal auf aggregierter Ebene den Worst-Case dar.

Nach /Brei91/ und /Schu91/ wird in MONSUN durch die COM_DO-Task im Modul **MSG_CON** im partikularen Raster 50 ms eine **MV_COM**-PDU von der MEH an die AEH versandt, im Wechsel dazu, im gleichen Raster 50 ms, können **MV_MEL**-PDUs in Richtung MEH an AEH versandt werden und wiederum mit einer Periode von 50 ms können Quittungen (der Transportschicht) als **MV_COM**-PDUs, Statusmeldungen der AEH als **MV_XYZ**-PDUs oder Mitteilungen der AEH an die MEH in **MV_MEL**-PDUs eingehen. Daraus berechnen sich die partikularen Anforderungen mit der Formel[35] $\Theta = \frac{|PDU|}{\rho} \cdot 8\frac{bit}{Byte}$ zu:

- **MV_COM**, MEH→AEH: $\frac{6Byte}{50 \cdot 10^{-3} s} \cdot 8\frac{bit}{Byte} = 960\,bit/s$
- **MV_MEL**, MEH→AEH: $\frac{256Byte}{50 \cdot 10^{-3} s} \cdot 8\frac{bit}{Byte} = 40960\,bit/s$
- **MV_MEL**, AEH→MEH: $\frac{256Byte}{50 \cdot 10^{-3} s} \cdot 8\frac{bit}{Byte} = 40960\,bit/s$

Der aggregierte Kanal insgesamt muß im TDM alle drei einzelnen Datenströme im genannten Zeitraster transportieren können, benötigt also eine Netto-Kapazität von mindestens 82 880 bit/s. Andernfalls würden entweder Nachrichten verloren gehen, oder es müßten entsprechende Zwischenspeicher vorhanden sein.

Für eine Worst-Case Rechnung soll davon ausgegangen werden, daß ausschließlich 256 Byte lange PDUs im Raster von $16^{2}/_{3}$ ms zu transportieren sind, was zu einer Netto-Kapazität von 122 880 bit/s führt.

Für ARTEMIS wird vom Pauschalwert 300 Byte für eine PDU auf dem Kanal COM_DO_MNT und von 255 Byte auf dem Broadcast-Kanal COM_DO_BC ausgegangen, durch die Auftrennung der Kanäle beträgt die Ereignisperiode auf COM_DO_MNT nun 25 ms, auf dem Broadcast-Kanal sogar 50 ms, was zu den Netto-Kapazitäten von 96 000 bit/s für COM_DO_MNT und 40 800 bit/s für COM_DO_BC führt.

[35] Das Zeichen für die Kapazitätsanforderung Θ ist vom englischen Wort „Throughput“ abgeleitet, ρ für die partikulare Kanalperiode von der üblichen Bezeichnung für die Dichte in der Physik.

Tabelle 6.2: Zusammenstellung der abstrakten Kanalanforderungen in MONSUN und ARTEMIS

Kanal	Lastprofil	Auslegung	
		MONSUN	ARTEMIS
COM_DO	indeterministisch, Stufenform, Burstfaktor $42^{2}/_{3}$	122,880 kbit/s	–––
COM_DO_MNT	indeterministisch, Sägezahn, Burstfaktor 50	–––	96,000 kbit/s
COM_DO_BC	CBR	–––	40,800 kbit/s
DAT_UP	indeterministisch, Stufenform, Burstfaktor $5^{1}/_{3}$	17,067 kbit/s	
DAT_DO	fast CBR, Burstfaktor 22	70,400 kbit/s	200,000 kbit/s
abstrakter „Multiplex-Kanal"	**indeterministisch, Sägezahn, Burstfaktor ca. 50**	**210,347 kbit/s**	**353,867 kbit/s**

6.3.3 Charakteristik des DAT_UP-Kanales

Für den DAT_UP-Kanal kommen die **MV_COM**-PDUs mit 6 Byte Länge und die Steuerpakete für die Kraft-Momenten-Reflexion **MV_KMS** mit 32 Byte Länge in Betracht. Sie werden mit einer Periode von 15 ms in MONSUN generiert, stehen damit mit $66^{2}/_{3}$ Hz zur Übertragung am abstrakten DAT_UP-Kanal an. Nach dem Höchstwertprinzip wird eine Spitzenlast von ausschließlich **MV_KMS**-PDUs zur Rechnung herangezogen.

Die Kanalkapazität ergibt sich somit für MONSUN zu netto $17\,066^{2}/_{3}$ bit/s.

Es ist nicht anzunehmen, daß für ARTEMIS eine Kraftreflexion von höherer Auflösung als bei MONSUN benötigt wird, der Wert wird also auch für ARTEMIS angenommen.

6.3.4 Charakteristik des DAT_DO-Kanales

Der Kanal mit der höchsten Priorität in MONSUN und ARTEMIS ist in der Datentransfer-Phase der MSM-Sitzung der DAT_DO-Kanal. Auch hier fließen mit einer Periode von 15 ms Steuerpakete in Form von **MV_POS**-PDUs gemischt mit **MV_COM**-PDUs, wobei der abstrakte Kanal wieder für eine Spitzenlast ausschließlich mit **MV_POS**-PDUs ausgelegt wird. Die Rate von $66^{2}/_{3}$ **MV_POS**-Paketen der Länge 132 Byte erfordert eine Nettokapazität von 70 400 bit/s.

Geht man für ARTEMIS von einer verkürzten Zykluszeit von 12 ms und PDUs der Länge 300 Byte aus, errechnet sich die Kanalkapazität hier zu 200 000 bit/s.

6.4 Leistungsanforderungen des Transportdienstes

Die Anforderungen der einzelnen abstrakten Kanäle an das Kommunikationssubsystem sind in Der aggregierte Kanal insgesamt muß im TDM alle drei einzelnen Datenströme im genannten Zeitraster transportieren können, benötigt also eine Netto-Kapazität von mindestens 82 880 bit/s. Andernfalls würden entweder Nachrichten verloren gehen, oder es müßten entsprechende Zwischenspeicher vorhanden sein.

Für eine Worst-Case Rechnung soll davon ausgegangen werden, daß ausschließlich 256 Byte lange PDUs im Raster von 162/3 ms zu transportieren sind, was zu einer Netto-Kapazität von 122 880 bit/s führt.

Für ARTEMIS wird vom Pauschalwert 300 Byte für eine PDU auf dem Kanal COM_DO_MNT und von 255 Byte auf dem Broadcast-Kanal COM_DO_BC ausgegangen, durch die Auftrennung der Kanäle beträgt die Ereignisperiode auf COM_DO_MNT nun 25 ms, auf dem Broadcast-Kanal sogar 50 ms, was zu den Netto-Kapazitäten von 96 000 bit/s für COM_DO_MNT und 40 800 bit/s für COM_DO_BC führt.

Tabelle 6.2 nochmals zusammengefaßt.

6.4.1 Berechnungsgrundlagen für die Übertragungsanforderungen

Die Raten eines partikularen Kanales j auf der Ebene i berechnen sich allgemein nach der bereits auf der MONSUN-Ebene angewendeten Formel:

$$\Theta_{i,j} = \frac{\left|PDU_{i,j}\right|}{\rho_{i,j}} \cdot 8\,\frac{bit}{Byte},$$

wobei $\left|PDU_{i,j}\right|$ die Länge der PDU von Typ j auf Ebene[36] i in Byte darstellt und $\rho_{i,j}$ die auf der Ebene i für die entsprechende PDU j vorgegebene Ereignisperiode in Millisekunden. Der Faktor 8 bit/Byte nimmt die Umrechnung auf das gewohnte Maß, bit/s, der Kanaldatenrate vor.

Für die Auslegung des aggregierten Kanales i wurde dem indeterministischen Lastprofil entsprechend nach dem Höchstwertprinzip die Formel angewendet:

$$\Theta_i = j_{\max} \cdot \max_J \Theta_{i,j} = j_{\max} \cdot \frac{\max_J\left(\left|PDU_{i,j}\right|\right)}{\min_J\left(\rho_{i,j}\right)} \cdot 8\,\frac{bit}{Byte}$$

Für den Ebenenwechsel seien folgende Annahmen gemacht:

- Es findet keine Segmentierung beim Ebenenwechsel statt (Eindeutigkeit der PDU-Abbildung).
- Es findet keine Blockung beim Ebenenwechsel statt (Injektivität der PDU-Abbildung).
- Eine die Kanalrate beeinflussende Bearbeitungsverzögerung kann dann nur aus Quittierungstechniken herrühren. Sie wird durch einen über der Menge J konstanten Wert τ_i abgeschätzt.
- Der Schichtübergang ist bezüglich des Wachstums der PDUs isoton:

$$\forall j,k \in J,\ j \neq k : \left|PDU_{i,j}\right| < \left|PDU_{i,k}\right| \Rightarrow \left|PDU_{i+1,j}\right| \leq \left|PDU_{i+1,k}\right|$$

Somit kann folgender Zusammenhang zwischen den geforderten Übertragungskapazitäten auf den Ebenen i und i + 1 hergestellt werden:

$$\Theta_{i+1,j} = \frac{\lambda_{i+1,j} \cdot \left|PDU_{i,j}\right|}{\rho_{i,j} - \tau_i} \cdot 8\,\frac{bit}{Byte},$$

[36] Der Index i sei eine der Hierarchiezugehörigkeit (nicht nach OSI) der Ebene entsprechende natürliche Zahl, die die Zählung auf der obersten Ebene mit 1 beginnt; der Index j sei ebenfalls eine natürliche Zahl, die die betrachteten PDUs nach einer beliebigen Ordnung von 1 beginnend numeriert. Die Indexfolgen I und J genügen der Darstellung I = 1, ..., i_{max}; J = 1, ..., j_{max}.

wobei $\lambda_{i+1,j}$ das Größenverhältnis der PDUs in den beiden Schichten bezeichnet aus Sicht der Schicht i+1 ($\lambda_{i+1,j} = \frac{|PDU_{i+1,j}|}{|PDU_{i,j}|}$). Sei nun noch $\xi \in J$ derjenige Index, für den gilt: $|PDU_{i+1,\xi}| = \max_J(|PDU_{i+1,j}|)$, dann ist

$$\Theta_{i+1} = j_{\max} \cdot \frac{\lambda_{i+1,\xi} \cdot |PDU_{i+1,\xi}|}{\min_J(\rho_{i,j}) - \tau_i} \cdot 8\frac{bit}{Byte}$$

Setzt man die Kanalraten zueinander in Beziehung, wird die in Abschnitt 6.1 gemachte Aussage deutlich sichtbar:

$$\Theta_{i+1,j} = \lambda_{i+1,j} \cdot \Theta_{i,j} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{\rho_{i,j} - \tau_i}$$

bzw.

$$\Theta_{i+1} = \lambda_{i+1,\xi} \cdot \Theta_i \cdot \frac{\min_J(\rho_{i,j})}{\min_J(\rho_{i,j}) - \tau_i} = \lambda_{i+1,\xi} \cdot \frac{|PDU_{i,\xi}|}{\min_J(\rho_{i,j}) - \tau_i} = \frac{|PDU_{i+1,\xi}|}{\min_J(\rho_{i,j}) - \tau_i}$$

Für diese Berechnungen ist eine wichtige Voraussetzung, daß die Dienste ohne Pufferung von IDUs arbeiten. Auf diese Weise wird gefordert, daß bei Übergabe der nächsten IDU an den unterliegenden Dienst dieser die Bearbeitung der vorhergehenden Daten bereits abgeschlossen hat.

6.4.2 Anpassung auf das Transportprotokoll

In der Schichtstruktur werden die drei Kanäle über die MONSUN-Anpassungsschicht „LEVEL 4“ weiterbehandelt und danach an die konfektionierte TP4-Implementierung „iNA 960“ gegeben.

In ARTEMIS werden die PDUs sofort an TCP in einer noch nicht näher dokumentierten PC-Implementierung des DoD-Stacks übergeben.

Die Anpassungsschicht „LEVEL 4“ nimmt hierbei nur eine Anpassung der Dienstprimitiven vor, in Bezug auf die PDUs ist sie als Durchreichschicht anzusehen, was in der Implementierung in der ausschließlichen Verwendung von Zeigern auf die PDUs ersichtlich wird. Für die Abschätzung der Bearbeitungszeit ist die Datentransferphase allein interessant. Durch das einfache Durchreichen der PDUs mittels Verzeigerung kann von Bearbeitungszeiten im Mikrosekundenbereich ausgegangen werden.

6.4.3 MONSUN-PDUs über TP4

Als Protokoll (ISO IS 8073) für den OSI-Transportdienst (ISO IS 8072) wurde (wegen des unzuverlässigen Netzwerkes der bestehenden Implementierungen) TP4 mit seinen weitreichenden Fehlerbehandlungstechniken erforderlich. Geht man von einer deutlichen Qualitätssteigerung bei der Verwendung eines ATM-Netzes aus, so könnte zur Verringerung der Bearbeitungszeit der Transportschicht ein statischer Wechsel auf TP2 in Erwägung gezogen werden, das auf einer zuverlässigen Netzwerkschicht aufbaut und neben Verbindungsauf- und -abbau, Datentransfer und Segmentierung/Wiedervereinigung noch das Multiplexen mehrerer Transportverbindungen auf eine Netzwerkverbindung gestattet. Transportprotokolle nach ISO IS 8073 erlauben die dynamische Festlegung auf eine Proto-

kollklasse durch Aushandlung beim Verbindungsaufbau. Deswegen spielen diese Überlegungen für die Betrachtung der T-PDUs keine Rolle.

Die Protokolle nach ISO IS 8073 unterscheiden zehn T-PDU-Typen[37], von denen für die Performance-Untersuchung wiederum nur die des Datentransfers interessieren. Da in MONSUN kein Vorrangdatenverkehr unterstützt wird, sind lediglich die DT- und AK-, ER-PDUs von Bedeutung. Sie bestehen grob aus den z. T. optionalen vier Teilen: Header-Längenangabe, fester Header, variabler Header und Benutzerdaten.

- Das *Length-Indicator-Feld (LI)* von 1 Byte dient zur Angabe der Länge des gesamten dem LI-Feld folgenden Headers in Byte. Da der Code 11111111_2 für „zukünftige Anwendungen“ reserviert ist, ergibt sich für den festen und variablen Header eine maximale Länge von 255 Byte (254 Byte + 1 Byte LI).
- Der feste Header schlüsselt in einem 4-bit-Feld den *Typ der T-PDU* auf und in den nächsten 4-bit bei den AK-PDUs die Höhe des im Rahmen der Flußsteuerung in der Klasse 4 gewährten Sendekredits (*Credit, CDT*). In den DT- und ER-PDUs ist dieses Feld konstant 0000_2.
- Zum festen Header wird ebenfalls noch das folgende, 2 Byte lange Feld „*Destination Reference*“ gezählt. Es dient ähnlich wie der VCI in der ATM-Schicht zur Identifikation einer Transportverbindung, die in den Protokollen der Kategorien 2, 3 und 4 auf eine Vermittlungsverbindung gemultiplext werden können.
- In den DT-PDUs folgt als Bestandteil des festen Headers ein üblicherweise 2 Byte, z. T. auch 4 Byte langes Feld mit einem 1-bit-Flag „EOT“, das in der letzten Teilnachricht einer auf mehrere T-PDUs segmentierten Mitteilung der empfangenden Protokollinstanz mit dem Wert 1_2 anzeigt, daß sie das Wiederzusammensetzen der Segmente beenden und die komplette Nachricht an den Transportdienstbenutzer weitergeben kann. Die verbleibenden 15 bit bzw. 31 bit sind das Feld der PDU-Folgenummer, die im Rahmen der Kreditgewährung und Flußkontrolle für Serialisierungen, Bestätigungen und Reihenfolgetreue benötigt werden. Mit 15 bit können 32 768 PDUs ohne Wiederholung der Folgenummer verarbeitet werden, für hohe Sicherheitsansprüche und Verarbeitungsraten werden mit 31 bit 2 147 483 648 T-PDUs ohne Wiederholung der Folgenummer verarbeitbar.

  In den AK-PDUs tritt an dieser Stelle des festen Headers ein Feld mit der Folgenummer k der nächsten erwarteten T-PDU auf, womit gleichzeitig der Erhalt der T-PDUs bis zur Folgenummer k - 1 bestätigt wird.

  Die ER-T-PDU hat als letztes Feld des festen Headers ein Code-Feld zur Angabe eines Problemes (*Reject Cause, Ablehnungsgrund*), das zu einem Protokollfehler führte.
- Der variable Teil des Headers tritt optional bei den AK-PDUs auf und kann einerseits zur Veränderung (verringernd oder erweiternd) des gewährten Sendekredits benutzt werden, andererseits eine Prüfsumme für den Header enthalten.
- Die AK- und ER-T-PDUs enden mit dem variablen Teil des Kopfes, bei der DT-T-PDU schließt sich das eigentliche Feld mit den Benutzerdaten in einer variablen Länge zwischen 1282 Byte und maximal 81922 Byte an.

Für die Auslegung der MONSUN-Kanäle ist aus dieser Betrachtung abzuleiten:

---

[37] *CR, Connection Request; CC, Connection Confirm; DR, Disconnect Request; DC, Disconnect Confirm; DT, Data; ED, Expedited Data; AK, Data Acknowledgement; EA, Expedited Data Acknowledgement; RJ, Reject; ER, Error.*

- Jede MONSUN/LEVEL 4-PDU kann in einer T-PDU transportiert werden, Segmentierung ist nicht erforderlich.
- Die wesentlichen Auswirkungen beim Durchgang durch die Transportschicht rühren vom Protokollmechanismus „Kapselung“ her.
- Alle MONSUN-PDUs werden in DT-T-PDUs verpackt.
- Durch den Protokollmechanismus der Kreditvergabe in der Transportschicht zusätzlich zur Kreditvergabe in MONSUN selbst und unter der Annahme eines verläßlichen Vermittlungsdienstes können die Bestätigungen der Transportschicht bei der Auslegung als „Sicherheitszuschlag“ τ pauschal berücksichtigt werden. Die Bestätigungen von MONSUN sind dort als eigenständiger partikularer Kanal berücksichtigt und treten auf der Transportschicht als normaler Datenverkehr auf.
- Der Protokollmechanismus des Multiplexens (mehrerer Transportverbindungen auf eine Netzwerkverbindung) faßt die auf MONSUN-Ebene separat modellierten Kanäle zu einem für die Auslegung relevanten Transportkanal zusammen.

Nach dem Höchstwertprinzip wird von einer DT-T-PDU mit 31 bit Folgenummer ausgegangen, die in einem um τ reduzierten Zeitintervall zu übertragen ist. Die Reduktion τ ist in der Anpassung des Senderasters an erforderliche Rückmeldungen der Partnerinstanz (*Acknowledgements, ACKs*) begründet. Da aber nicht jede versendete PDU separat mit einem ACK beantwortet wird, weil nämlich Kreditschemata zum Einsatz kommen, und da die Fehlerrate des Diensterbringers eine wesentliche Rolle spielt, kann τ nicht exakt für eine PDU angegeben werden. Eine statistische Abschätzung für die Berücksichtigung der Fehlerrate und die aus ihr entstehenden Verzögerungen wird in Abschnitt 6.4.5 separat vorgenommen.

Die von der Transportschicht geforderten Einzelkanalraten und die Multiplexkanalrate lassen sich aus den früher bestimmten einzelnen MONSUN-Kanalraten mit den Formeln aus Abschnitt 6.4.1 berechnen, als ACK-Verzögerungen werden hierbei 0 ms für die Verdeutlichung des reinen Einflusses der Kapselung, sowie die bei konventionellen Kupfernetzen praxisnahen Werte 2 ms und 4 ms angenommen (vgl. /Brei91/ Kap. 4).

Tabelle 6.3 zeigt die Ergebnisse:

Tabelle 6.3: Anforderungen der Transportschicht für die MONSUN-Kanäle

Kanal	$\lambda_{i+1,\xi}$	Θ_i	$\min(\rho_{i,i})$	Bearbeitungsverzögerung τ_i		
				0 ms	2 ms	4 ms
COM_DO	264/256	122,880 kbit/s	50 ms	126,720 kbit/s	132,000 kbit/s	137,739 kbit/s
DAT_UP	40/32	17,067 kbit/s	15 ms	21,334 kbit/s	24,616 kbit/s	29,091 kbit/s
DAT_DO	140/132	70,400 kbit/s	15 ms	74,667 kbit/s	86,154 kbit/s	101,918 kbit/s
Multiplex		**210,347 kbit/s**		**222,721 kbit/s**	**242,770 kbit/s**	**268,748 kbit/s**

In der Abbildung 6.4 wird am Beispiel des DAT_DO-Kanales gezeigt, wie die erforderliche Kanalrate in Abhängigkeit von PDU-Overhead und Verarbeitungszeit asymptotisch wächst, qualitativ ergibt sich für die anderen Kanäle die gleiche Form.

Es ist also in Konsequenz dieses Zusammenhangs besonders auf die Güte des Tansportdienstes bezüglich der Fehlerrate zu achten, die durch Übertragungswiederholungen eine Vergrößerung von τ bewirkt. Die Größe des PDU-Overheads ist von sekundärer Bedeutung.

Im Hinblick auf eine Realisierung von MONSUN auf einem ATM-Netz ist zu berücksichtigen, daß die für ATM gelieferten Treiber fast ausschließlich eine Anbindung an die

Transportschicht des DoD, also TCP und UDP, bieten. Es wäre daher erforderlich, MONSUN direkt auf TCP umzustellen[38].

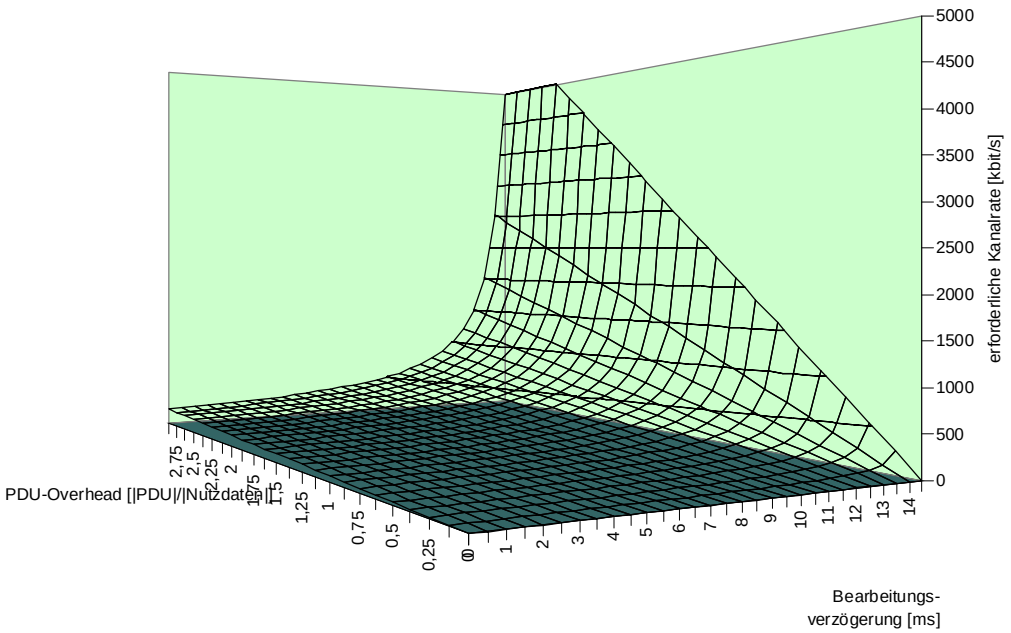

Abbildung 6.4: Wachstum der geforderten Kanalrate in Abhängigkeit von PDU-Overhead und Bearbeitungsverzögerung

Die tatsächliche Protokollstruktur wird bei verschiedenen Herstellern von ATM-Endgeräte-Adaptern, selbst bei einer Kommunikation ausschließlich zwischen ATM-Endgeräten, sehr unterschiedlich gehandhabt. Während nach Auskunft des Marketing Managers der CONTROLWARE GmbH, dem deutschen Vertriebspartner der Fore Systems, Inc. (weltweit führender Hersteller von ATM-Endgeräte-Adaptern und Switches), die Treiber der entsprechenden Anwendung des Benutzers ein API mit einer emulierten Transportschicht (TCP) zur Verfügung stellen, wird bei anderen Herstellern der ursprüngliche, konventionelle Protokollstack bis zur Schicht 2 von OSI, mindestens jedoch bis zur Netzwerkschicht (OSI-Layer 3) durchlaufen, und erst darunter setzt sich der AAL. Die bekanntesten Vorschläge für solche „Zwitterlösungen“ mit „Quereinstieg“ (ohne Gatewayfunktion) sind in verschiedenen RFCs beschrieben:

Mit dem RFC 1483, „Multiprotocol Encapsulation over ATM-AAL5“, kann der Quereinstieg auf der LLC-Subschicht der Ebene 2 erfolgen (Bridging), indem ATM als Ersatz für ein konventionelles Netz eingesetzt wird und die MAC-Rahmen transparent als „Pseudo-Benutzerdaten“ an die AAL5 zur Übertragung über das ATM-Netz gereicht werden.

RFC 1577, „Classical IP and ARP over ATM“, schlägt vor, den Quereinstieg auf der IP-Schicht, der Netzwerkschicht in OSI, vorzunehmen.

Mit dem RFC 1006, „ISO-Transport Service on Top of the TCP“, geschieht der „Quereinstieg“ schon direkt in der Transportschicht. Er schlägt vor, wie die OSI-Dienstelemente auf TCP umzusetzen sind. Dabei wird in diesem RFC jedoch nur eine geringfügig erweiterte Funktionalität von TP0 spezifiziert. Er setzt dabei nicht die Verwendung von ATM als Netz

[38] Dies ist insbesondere für die endgültige Festlegung eines verbindlichen Transportprotokolles für ARTEMIS zu berücksichtigen.

voraus, so daß theoretisch sogar eine Kombination von RFC 1006 und RFC 1483 denkbar wäre.

Da diese Umsetzungen jedoch als zusätzliche Tasks in Software realisiert sind, werden sie mit Sicherheit die Verarbeitungsverzögerung merklich verschlechtern.

6.4.4 ARTEMIS-PDUs über TCP

In ARTEMIS wird als Transportprotokoll derzeit nicht ISO-TP4 eingesetzt, sondern das verbindungsorientierte Transportprotokoll des DoD-Stapels, TCP.

TCP ist nahe verwandt mit TP4. Es arbeitet als Transportprotokoll mit den selben oder ähnlichen Protokollmechanismen wie TP4, so daß alle prinzipiellen Aussagen des vorausgehenden Abschnittes übernommen werden können (vgl. auch /RFC1006/).

Im Gegensatz zu OSI, wo der Transportschicht noch drei weitere Schichten überlagert sind, ist TCP schon vom Konzept her die höchste Schicht und zur direkten Entgegennahme der Nachrichten des Benutzers ausgelegt. Die Transportinstanzen des TCP akzeptieren daher beliebig lange Nachrichten des Benutzers, die sie ggfs. in 64 KByte[39] lange Segmente zerlegen und üblicherweise über den Datagrammdienst IP einzeln versenden.

Dieser Sachverhalt spiegelt sich im Format der TCP-PDU wieder. Im Gegensatz zu TP4 findet nur eine einzige TCP-PDU Verwendung, die einen Header von mindestens 20 Byte im Gegensatz zu den 8 Byte der DT-PDU in TP4 aufweist. Aus Sicht des Overheads stellt sich TCP also schlechter als ISO-TP4 (man vgl. aber die Auswirkung des Overheads in Abbildung 6.4 und die Betrachtung der Paketierungsverzögerung in Abschnitt 7.3.2.2).

Die Felder des TCP-Headers sind:

- *Source Port*, 16 bit, die T-SAP-Adresse des Absenders, die für die Auslieferung über einen Datagrammdienst benötigt wird.
- *Destination Port*, 16 bit, die T-SAP-Adresse des Empfängers.
- *Sequence Number*, 32 bit,
- *Piggyback Acknowledgement*, 32 bit (Beschreibung s. z. B. /Tane92/ S. 269)
- *TCP-Header-Length*, maximal 10 bit, zur Längenangabe des gesamten TCP-Headers,
- sechs 1 bit-Flags zur Anzeige von dringenden Daten (Urgent), zur Abwicklung des Verbindungsaufbaus u. ä.
- *Window*, 16 bit, das die Größe des Byte-Kredits für das Sliding-Window-Verfahren angibt.
- *Checksum*, 16 bit, eine Prüfsumme des gesamten Rahmens,
- *Urgent Pointer*, 16 bit, der in Verbindung mit dem Urgent-Flag verwendet wird.
- Das *Options*-Feld, 0 oder mehr 32 bit-Worte, das zur Aushandlung beim Verbindungsaufbau eingesetzt wird.

An den Header schließen sich die Daten bis zu der angegebenen maximalen Länge von 64 KByte an.

Für die Regelungsdaten in ARTEMIS können aus dieser Struktur die gleichen Voraussetzungen abgeleitet werden wie bei MONSUN und TP4.

Die Kanalanforderungen berechnen sich mit den ARTEMIS-Werten aus der Tabelle 6.2 und der bekannten Formel, also wie in Tabelle 6.4 zusammengefaßt.

---

[39] Man beachte an dieser Stelle das kapitale „K“ für den Faktor 1024; das technische „kilo“ (Faktor 1000) wird streng mit versalem „k“ geschrieben, „M“ bedeutet das technische „mega“ (Faktor 1 000 000).

Für einen ARTEMIS-Kanal der Vermittlungsschicht ist damit eine Netto-Datenrate von mindestens 388 kbit/s erforderlich.

Tabelle 6.4: Anforderungen der Transportschicht für die ARTEMIS-Kanäle

Kanal	$\lambda_{i+1,\xi}$	Θ_i	$\min(\rho_{i,j})$	Bearbeitungsverzögerung τ_i		
				0 ms	2 ms	4 ms
COM_DO_MNT	320/300	96,000 kbit/s	25 ms	102,400 kbit/s	111,304 kbit/s	121,904 kbit/s
COM_DO_BC	275/255	40,800 kbit/s	50 ms	44,000 kbit/s	45,833 kbit/s	47,826 kbit/s
DAT_UP	52/32	17,067 kbit/s	15 ms	27,734 kbit/s	32,001 kbit/s	37,819 kbit/s
DAT_DO	320/300	200,000 kbit/s	12 ms	213,333 kbit/s	256,000 kbit/s	320,000 kbit/s
Multiplex		**353,867 kbit/s**		**387,467 kbit/s**	**445,138 kbit/s**	**527,549 kbit/s**

6.4.5 Berücksichtigung von Fehlereinflüssen auf der Transportschicht

Die Kanalanforderungen von MONSUN/ARTEMIS an Transport- und Vermittlungsdienst sind signifikant durch den Protokollmechanismus Kapselung und in noch stärkerem Maße durch die Verarbeitungszeit des betrachteten Dienstnehmers geprägt.

Die geforderten Raten wurden unter der Annahme ermittelt, daß ein perfekter Diensterbringer vorhanden ist. Diese Annahme soll nun aufgegeben werden. Die betrachteten Protokolle sind im Bezug auf die Fehlerbehandlung ARQ-Protokolle (Automatic Repeat Request, automatische Wiederholungsanforderung), die bei Erkennen eines Fehlers eine Neuübertragung anfordern. Dies führt also im Fehlerfall zu einer erhöhten Last, die nach /Pryc94/ näherungsweise berechnet werden kann.

Es wird davon ausgegangen, daß die Protokolle nach einem Sliding-Window-Verfahren mit einer Fenstergröße W arbeiten. Ein „Go-Back-N"-Algorithmus habe im Durchschnitt noch W/2 ausstehende Pakete und die Wahrscheinlichkeit für ein verlorenes oder zerstörtes Paket sei p.

Wird mit der Wahrscheinlichkeit p·(1-p) ein Paket nach einmaliger Neuübertragung korrekt empfangen, so ist die erwartete Zahl neuübertragener Pakete $\frac{W}{2}\cdot p\cdot(p-1)$. Die Wahrscheinlichkeit für den korrekten Erhalt eines Paketes nach der zweiten Wiederholung, das nach der ersten Neuübertragung noch nicht richtig empfangen wurde, ist $(1-p)\cdot p^2$. Die erwartete Zahl neuübertragener Pakete in diesem Fall $W\cdot p^2\cdot(1-p)$. Dieses Prinzip wird fortgesetzt, bis schließlich jedes Paket sein Ziel erreicht.

Der Lastzuwachs läßt sich dann als Summe aller erwarteten Neuübertragungen errechnen:

$$R=\sum_{k=1}^{\infty}\left(k\cdot\frac{W}{2}\cdot p^k\cdot(1-p)\right)=\frac{W}{2}\cdot\frac{p}{1-p}$$

Die Wahrscheinlichkeit p ist nun von der Paketlänge L abhängig und von der Bitfehlerrate B für die Verbindung; längere Pakete sind störanfälliger als kurze:

$$p=1-(1-B)^L$$

Womit sich der Lastzuwachs schreiben läßt:

$$R=\frac{W}{2}\cdot\frac{1-(1-B)^L}{(1-B)^L}$$

Für das diensterbringende System ist die Vermittlungsschicht von OSI die Schnittstelle für die berechnete Anforderung. Daher spielt die Anzahl der Übermittlungsabschnitte für die Betrachtung insofern eine Rolle, als sich mit wachsender Zahl n der Übermittlungsabschnitte die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler erhöht. Die Formel ist also anzugleichen:

$$R = \frac{W}{2} \cdot \frac{1-(1-B)^{nL}}{(1-B)^{nL}}$$

Typische Bitfehlerraten für ATM-basierte Netze liegen bei etwa 10^{-6}, die typischen Paketlängen nach den vorangehenden Abschnitten bei 264 Byte bzw. 320 Byte. Die Fenstergröße W sei mit üblichen Werten 5, 7 und 10 (vgl. auch /Schu91/ Abs. 2.3) angenommen. Im hausinternen Bereich liegt die Zahl der Übermittlungsabschnitte unter 10 (sie ist bei spannenden Wegen von der Zahl der verwendeten Switches s abhängig: n = s + 1) und wird für die Rechnung mit 1, 2 und 3 festgesetzt.

Tabelle 6.5 zeigt die Berechnungsergebnisse in Prozent für die verschiedenen Parameterkombinationen und im Vergleich zu einem (Kupfer-)Netz ordentlicher (B = 10^{-6}) und geringer Zuverlässigkeit (B = 10^{-4}).

Tabelle 6.5: Prozentualer Lastzuwachs durch Berücksichtigung von Fehlern

L=	264 Byte									320 Byte								
W=	5			7			10			5			7			10		
n=	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
B=10^{-10}	0,66 $\cdot 10^{-7}$	1,32 $\cdot 10^{-7}$	1,98 $\cdot 10^{-7}$	0,92 $\cdot 10^{-7}$	1,85 $\cdot 10^{-7}$	2,77 $\cdot 10^{-7}$	1,32 $\cdot 10^{-7}$	2,64 $\cdot 10^{-7}$	3,96 $\cdot 10^{-7}$	0,80 $\cdot 10^{-7}$	1,60 $\cdot 10^{-7}$	2,40 $\cdot 10^{-7}$	1,12 $\cdot 10^{-7}$	2,24 $\cdot 10^{-7}$	3,36 $\cdot 10^{-7}$	1,60 $\cdot 10^{-7}$	3,20 $\cdot 10^{-7}$	4,80 $\cdot 10^{-7}$
B=10^{-6}	0,07	0,13	0,20	0,09	0,18	0,27	0,13	0,26	0,39	0,08	0,16	0,24	0,11	0,22	0,33	0,16	0,32	0,48
B=10^{-4}	6,69	13,56	20,60	9,36	18,98	28,85	13,38	27,11	41,21	8,13	16,52	25,19	11,38	23,13	35,27	16,26	33,05	50,38
	MONSUN									ARTEMIS								

Für die Anwendungen ARTEMIS und MONSUN im geplanten Szenario liegen die Werte für den Lastzuwachs weit unter 1 ‰ der bestehenden Last und können somit tatsächlich vernachlässigt werden. Die Rechnungen mit festen Zeitwerten τ in Tabelle 6.3 und Tabelle 6.4 entsprechen mit Lastzuwachsraten zwischen 4 % und 50 % einem Medium, das mindestens eine Bitfehlerrate von 10^{-4} aufweist.

7 Übertragung der multimedialen Daten über ein ATM-Netz

7.1 ATM-Anpassung für die Regelung in MONSUN und ARTEMIS

Im einführenden Kapitel über die Grundprinzipien von ATM wurde schon festgestellt, daß das ATM-Modell von seiner Funktionalität her bis in den Bereich der OSI-Transportschicht vordringt. Es ist daher sinnvoll, an dieser Stelle in einer zukünftigen ATM-basierten Realisierung auf das ATM-Modell zu wechseln.

Aufgabe der ATM-Anpassungsschicht ist es, den Dienst, der von der ATM-Schicht universell angeboten wird, im Hinblick auf eine bestimmte Anforderungscharakteristik zu verbessern und anzugleichen.

Für die Übertragung von Regelungsdaten aus MONSUN und ARTEMIS kommen von den fünf angebotenen Anpassungsdiensten der AAL2, AAL3 und AAL5 in Betracht, sie werden kurz vorgestellt:

7.1.1 Verkehr über AAL2

Die Dienste der AAL2 sind von ITU-T vorgesehen für die Übertragung von zeitkontinuierlichen „Echtzeitdaten“, die sehr empfindlich gegenüber Verzögerungen sind, aber von ihrem Profil her mit variabler Bitrate auftreten. Sie wäre also in einem ersten Ansatz gut für die Übertragung der MONSUN-Steuerdaten geeignet. Die Empfindlichkeit gegenüber Verzögerung ist allerdings im Sinne der Isochronität zu sehen, also unter dem Gesichtspunkt, daß ein ggfs. auftretender Jitter zwischen den Dateneinheiten auf ein Minimum ausgeglichen werden muß und die Daten im möglichst exakt gleichen Zeitraster zueinander wie bei der Entstehung weiter abzuliefern sind. Dieses strenge Kriterium erfüllen die Steuerdaten von MONSUN und ARTEMIS nicht.

Es gibt derzeit auch keine Empfehlungen der ITU-TS für eine Realisierung dieses Dienstes, möglicherweise wird AAL2 zukünftig als Erweiterung von AAL1 betrachtet.

Bekanntlich gliedert sich die AAL nochmals in zwei Unterdienste, die Konvergenzsubschicht und die Segmentierungs- und Reassemblierungs-Subschicht.

7.1.1.1 AAL2-CS-Unterschicht

Die aus der Übertragung von Daten mit variabler Bitrate herrührenden SDUs sind zwischen der höheren Schicht und AAL2-CS auszutauschen. Da eine zeitliche Korrespondenz zwischen Sender und Empfänger erwartet wird, sind Informationen über das Zeitraster zu führen. Erforderlichenfalls kann die überliegende Schicht über den Verlust oder das fehlerhafte Auftreten von Zellen informiert werden, sofern diese Fehler nicht durch die AAL selbst behoben werden können.

7.1.1.2 AAL2-SAR-Unterschicht

Da die Bitrate der Anwendung variabel ist, kann es geschehen, daß beim Aufteilen der SDU Zellen nicht vollständig gefüllt werden und der Füllstand von Zelle zu Zelle schwankt. Die PDU der AAL2-SAR hat dementsprechend die folgende Form:

- Zu Beginn steht ein 4 bit langes Sequenznummernfeld, das es ermöglicht, den Verlust von Zellen oder das Auftreten fehlgeleiteter Zellen zu erkennen. Die Reihenfolgetreue der Zellen wird bereits durch die ATM-Schicht gewährleistet.
- Die nächsten 4 bit bilden das CT-Feld (Cell Type), das anzeigt, ob eine Zelle den Beginn einer segmentierten CS-SDU (BOM, Begin of Message), ein inneres Stück (COM, Continuation of Message) oder das letzte Stück einer segmentierten CS-SDU (EOM, End of Message) enthält. Alternativ kann auch angezeigt werden, daß die Zelle Timing-Information enthält.
- Es folgt die eigentliche Payload (SAR-SDU) in einer festen Länge von 45 Oktetten.
- Da durch die variable Bitrate geschehen kann, daß die SAR-SDUs nicht vollständig gefüllt sind (bzw. mit bedeutungslosen Padbits aufgefüllt), muß eine Längenangabe der SAR-SDU im folgenden LI-Feld (Length Indicator) von 6 bit erfolgen.
- Den Abschluß liefert ein 10 bit langer CRC-Prüfcode, der es ermöglicht, Bitfehler in der SAR-SDU zu korrigieren.

7.1.2 Verkehr über AAL3/4

Die Dienste AAL3 und AAL4 werden von der ITU-T für die Übertragung von Daten empfohlen, die empfindlich gegenüber Verlust sind, jedoch eine gewisse Verzögerung bis zur Auslieferung tolerieren können. Die Anpassung geschieht in AAL3 für verbindungsorientierten Datenaustausch und in AAL4 für den verbindungslosen Datenaustausch. Für den verbindungsorientierten Betrieb von MONSUN ist also die AAL3 angemessen.

Für die Regelung in MONSUN ist eine relativ geringe Datenrate erforderlich. Die Charakteristik der Regeldatenpakete erfordert keine Isochronität. Dies entspricht also dem Profil der AAL3.

7.1.2.1 CS der AAL3/4

Die CS der AAL3/4 wird weiter untergliedert in die dienstspezifische CS (*SSCS, Service Specific Convergence Sublayer*) und die allgemeine CS oder *Common Part CS (CPCS)*. Während die SSCS für viele Anwendungen leer sein wird, ist die CPCS immer vorhanden.

Für den Dienst der CPCS sind in AAL3/4 zwei Betriebsarten definiert, der Nachrichtenmodus und der Streamingmodus. Im Nachrichtenmodus wird die SDU für AAL in genau einer Portion vollständig angeliefert, in einer AAL-IDU, beim Streamingmodus kann die komplette AAL-SDU in mehreren Portionen, also über mehrere AAL-IDUs eintreffen. Der Streamingmodus eignet sich deshalb für den Transport sehr langer Nachrichten, was bei MONSUN und ARTEMIS nicht der Fall ist, hier wird nur der Nachrichtenmodus verwendet.

Für beide Typen kann Peer-to-Peer ein gesicherter Betrieb oder ein ungesicherter Betrieb erfolgen.

Im gesicherten Betrieb ist jede erhaltene CS-SDU fehlerfrei, da alle beschädigten oder fehlgeleiteten CS-PDUs zurückgeschickt werden. Zusätzlich ist eine Flußsteuerung möglich.

Im ungesicherten Betrieb kann eine ausgepackte CS-SDU fehlerhaft sein, sie kann auch gar nicht übermittelt worden sein. Der Einsatz einer Flußsteuerung ist möglich.

Diese Funktionalität wird über PCI-Felder der AAL3/4-CPCS erreicht, es sind:

- der CPCS-PDU-Header mit den Feldern CPI (Common Part Indicator), 8 bit, BTag (Begin Tag, Anfangsmarke) mit 8 bit und BASize (benötigte Puffergröße zur Aufnahme der CS-IDU), 16 bit,

- und der CPCS-PDU-Trailer mit den Feldern AL (Längenabgleich) ohne inhaltliche Funktion, 8 bit, Etag (End Tag, Endemarke), 8 bit, mit dem gleichen Inhalt wie in BTag des CPCS-Headers und Length, 16 bit, zur Angabe der Nutzlastlänge in der CPCS-SDU.
- Das PAD-Feld vor dem Trailer dient zur Längenanpassung der Payload auf ein Vielfaches von 4 Oktett.

7.1.2.2 Die SAR des AAL3/4

Die CS-PDUs erreichen die SAR mit variabler Länge. Zur Steuerung der Segmentierung und Reassemblierung fügt die SAR als PCI daher zwei Felder hinzu:

- Das Segment-Start-Feld (ST) mit 2 bit, das angibt, welcher Teil einer CS-PDU in der SAR-Payload befördert wird, das erste, letzte, mittlere oder ein einzelnes Segment.
- Der Längenindikator (LI) mit 6 bit, der bei Einzelsegmenten oder letzten Segmenten den Füllstand des Payload-Feldes mit wirklichen Daten der CS angibt.

Daneben treten folgende Felder als PCI auf:

- Bitfehlererkennung in der SAR-PDU wird über ein 10 bit langes CRC-Feld vorgenommen. Als Generatorpolynom dient $(x^{10} + x^9 + x^5 + x^4 + x + 1)$.
- Das Erkennen fehlgeleiteter und verlorener SAR-Zellen wird mithilfe eines Folgenummer-Feldes (SN) von 4 bit Länge realisiert.
- Eine 10 bit lange Multiplexkennzeichnung (MID), die es der SAR ermöglicht, mehrere CS-PDUs auf einen ATM-Verbindung (VCI/VPI) zu führen. Es können also 1024 AAL3/4-Dienstbenutzer auf einer ATM-Verbindung kommunizieren.

Für die Payload der SAR, die SAR-SDU bleiben damit noch 44 Oktette.

7.1.3 Verkehr über AAL5

Die AAL3/4 hat den Nachteil, daß sie wegen der umfangreichen Sicherungsmaßnahmen die Effizienz deutlich reduziert: es stehen von der potentiellen Übertragungskapazität in der SAR nur gut 91 % zur Verfügung. Die Erfahrung zeigte darüber hinaus, daß selbst die 10 bit CRC in Verbindung mit der 4 bit Folgenummer nicht zu einer Reduktion der Fehler in dem Maße führte, daß es den Verlust an Übertragungskapazität ausgleichte. Deswegen wurde vom ATM-Forum die AAL5 für die gleichen Dienstanforderungen wie für AAL3/4 eingeführt, die eine verbesserte Effizienz bietet.

Ziel der Definition war, die Funktionalität auf der CPCS weitgehend zu erhalten; effektiv wurde nur die Unterstützung des Multiplexens gestrichen.

7.1.3.1 Die CS des AAL5

Hier ist im Bereich der CPCS den genannten Intentionen entsprechend kaum ein Unterschied zur CPCS des AAL3/4 festzustellen:

- Der gesamte CPCS-Header (CPI, BTag, BASize) entfällt; Einsparung: 4 Oktette.
- Der CPCS-Trailer wird von 4 Oktetten auf 8 Oktette erweitert, die Felder sind:
  - CPCS-UU, 8 bit, zum Transport von CPCS-Informationen Peer-to-Peer,
  - CPI (Common Part Identifier), 8 bit, derzeit nur als Längenanpassungsfeld, zukünftig eventuell für Management-Aufgaben verwendet,
  - Length, 16 bit, wie in AAL3/4.

- zusätzlich geschieht im Trailer nun die Fehlererkennung allein auf der CPCS, nicht mehr kombiniert in CPCS und SAR. Dafür wird ein verändertes 32 bit CRC-Feld verwendet. Das Generatorpolynom für den CRC-32 ist:

$$x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^{8} + x^{7} + x^{5} + x^{4} + x^{2} + x + 1$$

- Das PAD-Feld dient wie in AAL3/4 dazu, die CPCS-PDU auf eine Länge in Vielfachen von 48 Oktett (AAL3/4 nur 44 Oktette!) anzupassen, so daß in der SAR vollständige Zellen entstehen.

7.1.3.2 Die SAR des AAL5

Die SAR dieses AAL ist sehr schmal bzw. effizient ausgelegt, indem sie auf die Kapselung mit SAR-PCIs ganz verzichtet. Sie akzeptiert die CS-PDUs in unterschiedlicher Länge und teilt sie also auf uneingeschränkte SAR-SDUs von 48 bit auf.

Zur Steuerung des Reassemblierens wird (wie schon früher beschrieben) im Zellenkopf für die ATM-Zelle von der SAR die letzte Zelle einer assemblierten CPCS-PDU gekennzeichnet.

7.2 A/V-Übertragung in einem ATM-Netz

Bei der Übertragung von Audio- und Video-Daten über ein Kommunikationssystem liegt ein quasi zeitkontinuierlicher Datenstrom vor, der von seiner Natur her eine konstante Bitrate aufweist. Bei Einsatz von Kompressionstechniken ändert sich zwar die Charakteristik zur variablen Bitrate, die zu übertragenden „Portionen“, die Frames oder Halfframes, werden jedoch immer noch quasi zeitkontinuierlich übertragen. Die wichtigste Aufgabe für ein Übertragungssystem ist deshalb, die Isochronität zu wahren.

Dieser Beschreibung nach liegt mit Audio/Video ein typischer Kandidat zur Übertragung mittels AAL1 vor. Einsatz von Kompression verändert das Profil so, daß für die Übertragung AAL2 oder gar AAL5, der universelle AAL, tauglich wird.

7.2.1 A/V-Datenübertragung über AAL1

AAL1 ist für Daten vorgesehen, die in konstanter Länge und in äquidistanten Zeitintervallen angliefert werden. In der gleichen Weise werden sie auf Empfängerseite an den Dienstnehmer wieder ausgeliefert. Der Takt für die Auslieferung kann dabei vom AAL bereitgestellt werden oder aus den übertragenen Daten selbst rekonstruiert werden.

7.2.1.1 CS des AAL1

Die Funktion des CS hängt stark vom Dienst ab, der unterstützt werden soll. Typische Funktionen des AAL1-CS sind:

- Ausgleich der schwankenden Zellverzögerung (Cell Delay Variation, CDV) mit Hilfe eines Puffers,
- Behandlung von Zellverlust und Fehlleitungen,
- Übermittlung von Strukturinformationen der transportierten Daten und
- Ausgleich von Taktschwankungen zwischen Sender und Empfänger.
  - ✦ Dafür kommt z. B. das Verfahren des Synchronous Residual Time Stamps (SRTS) zum Einsatz, bei dem jede Zelle mit einem Zeitstempel, eben dem Residual Time Stamp, versehen wird. Bei Verwendung eines synchronen Netzes wie der SDH, liegt ein allgemeiner Netztakt sowohl bei Sender als auch beim Empfänger vor. Die Differenz von Diensttakt des Senders und allgemeinem Netztakt wird als RTS an den Empfänger übermittelt. Dies geschieht formal im CSI-Feld der SAR-PDU.

- ✦ Eine Alternative ist die Methode des „Adaptiven Taktes“, bei dem die Daten auf Empfängerseite mit dem Netztakt in einen Puffer eingeliefert werden. Die Daten verlassen den Puffer mit dem lokalen Takt, der jedoch im Sinne der klassischen Regelung von dem augenblicklichen Füllstand des Puffers beeinflußt wird: steigender Füllstand erhöht den lokalen Takt, sinkender Füllstand erniedrigt ihn.

- ❑ Zur Sicherung einer hohen Qualität besonders bei Videoübertragung wird eine vorausschauende Fehlerkorrekturtechnik (FEC, Forward Error Control) eingesetzt.

7.2.1.2 SAR des AAL1

Die Zerlegung des quasikontinuierlichen Datenstromes in Zellen soll möglichst effizient durchgeführt werden. Dennoch muß eine Folgenumerierung der Zellen, eine Bitfehlersicherung und die Taktkennzeichnung vorgenommen werden. In der SAR-PDU wird der Kompromiß durch einen Header von nur 1 Oktett und 47 Oktetten Payload geschlossen. Das erste Oktett jeder SAR-Zelle enthält alle notwendigen Steuerinformationen:

- ❑ Im SN-Feld von 4 bit Länge steht das CSI-Bit (Convergence Sublayer Indication Bit) zur Takterzeugung beim Empfänger oder zur Kennzeichnung der Übertragung von Strukturdaten. Die nächsten drei Bits enthalten die Sequenznummer der Zellen (SN, Sequence Number).
- ❑ Wegen der Wichtigkeit der Sequenznummern werden diese in den nächsten 4 Bits, im SNP-Feld (*Sequence Number Protection*) durch einen 3 bit CRC mit dem Generatorpolynom $x^3 + x + 1$ und ein zusätzliches Parity-Bit abgesichert, das zur Entscheidung benötigt wird, ob das SN-Feld oder das SNP-Feld durch einen Bitfehler betroffen ist.

7.2.2 A/V-Datenübertragung bei Einsatz von Kompression

Beim Einsatz von Kompressionstechniken zur Übertragung von Video-Daten wird die konstante Bitrate als kennzeichnende Eigenschaft aufgegeben. Im Hinblick auf eine Übertragung mittels ATM-Netzen wird damit der Aspekt der Belastung neben der Erzielung von Isochronität zum zentralen Punkt.

In den Veröffentlichungen finden sich überwiegend Ansätze, die auf den MPEG-Varianten beruhen. Interessanterweise werden hier wenige Ansätze auf Basis des nach ITU-Schema prädestinierten AAL2 diskutiert (/KiNa91/, /Enss94/). Vielmehr werden die Video-Daten nach der Kompression über einen besonders angepaßten *Service Specific Convergence Sublayer (SSCS)*, z. T. unter Umgehung des *Common Part Convergence Sublayer (CPCS)*, auf dem AAL5 übertragen (/GhHu93/, /ReBe92/) .

7.3 ATM-spezifische Leistungscharakteristik

7.3.1 Die MONSUN-Regelungsdaten auf den ATM-Adaption-Layers

In diesem Abschnitt werden knapp die Daten für eine Führung der MONSUN-Regeldaten über die vorgestellten AALs zusammengefaßt.

Der AAL2 hat sich nur in erster Überlegung als geeignet erwiesen und wird deshalb nicht betrachtet. Für eine Implementierung steht auch von keinem Hersteller eine Treiberunterstützung für AAL2 zur Verfügung.

7.3.1.1 Der COM_DO-Kanal von MONSUN über AAL

Die PDUs des COM_DO-Kanales sind zwischen 6 Byte und 256 Byte, nach Durchlaufen der TP4 zwischen 14 Byte und 264 Byte lang.

Im AAL3 wird der Nachrichtenmodus angewandt, da die MONSUN-PDU in einem Teil angeliefert werden. Von der CPCS werden die PDUs mit 8 Oktett PCI versehen, in der Länge erstmals angepaßt und in der SAR mit weiteren 4 Oktett SAR-PCI und einer weiteren Längenanpassung auf Zellgröße ausgestattet.

Geht man von dem partikularen Kanal mit 6 Byte PDUs aus erhält man einen sehr hohen Overhead durch die 1:1-Zuordnung von PDU zu Zelle (unabhängig ob eine MONSUN-PDU oder eine TP4(MONSUN)-PDU betrachtet wird). Die erforderliche Zellrate von 20 Zellen/s bedingt eine geforderte ATM-Netto-Bitrate von 8,46 kbit/s.

Im aggregierten Kanal werden die 256 Byte bzw. 264 Byte PDUs auf 6 bzw. 7 Zellen aufgeteilt, die in der Rate von 360 Zellen/s bzw. 420 Zellen/s über die ATM-Schicht zu transportieren sind, also eine Bitrate von 152,64 kbit/s bzw. 178,08 kbit/s verlangen.

Durch den geringeren Overhead werden bei Verwendung von AAL5 auf dem maximal abgeschätzten, aggregierten Kanal 6 Zellen pro PDU benötigt. Damit errechnet sich wiederum eine benötigte Bitrate von 152,64 kbit/s.

7.3.1.2 Der DAT_UP-Kanal von MONSUN/ARTEMIS über AAL

Die PDUs sind hier 6 Byte und 32 Byte bzw. (mit TP4) 14 Byte und 40 Byte und (mit TCP) 26 Byte und 52 Byte groß.

Die größeren Varianten liegen gerade an der Grenze, um in einer SAR-Zelle transportiert zu werden, nachdem sie mit der CPCS-PCI versehen wurden:

- bei Aufsetzen des reinen MONSUN auf die AAL werden in Typ 3 und Typ 5 jeweils (1 Zelle/PDU) 66,7 Zellen/s erzeugt oder 28,27 kbit/s.
- bei Zwischenschalten von TP4/TCP sind es mit AAL3 (2 Zellen/PDU) 133,3 Zellen/s oder 56,53 kbit/s mit AAL5 (1 Zelle/PDU) die Werte wie zuvor.

7.3.1.3 Die Kanäle COM_DO_MNT und COM_DO_BC von ARTEMIS über AAL

Für die ARTEMIS-Variante sind zwei Kanäle zu rechnen:

Der COM_DO_MNT versendet aggregiert abgeschätzt mit einer PDU-Rate von 40 Hz seine PDUs von 300 Byte bzw. 320 Byte. Sie werden auf 7 bzw. 8 Zellen des AAL3 aufgeteilt, auf 7 Zellen bei AAL5. Die Bitraten betragen demnach 118,72 kbit/s bei 7 Zellen/PDU und 135,68 kbit/s bei 8 Zellen/PDU.

Der COM_DO_BC-Kanal arbeitet mit einer PDU-Frequenz von 20 Hz bei PDU-Volumen von 255 Byte bzw. 275 Byte. Dies erfordert die Segmentation auf 6 bzw. 7 AAL3-Zellen oder 6 AAL5-Zellen. Die Bitraten sind entsprechend 50,88 kbit/s bei 6 Zellen/PDU und 59,36 kbit/s bei 7 Zellen/PDU.

7.3.1.4 Der DAT_DO-Kanal von MONSUN/ARTEMIS über AAL

Die PDUs sind in MONSUN maximal 132 Byte groß, in ARTEMIS 300 Byte. Mit Transportschicht-Overhead betragen die Längen bei MONSUN maximal 140 Byte und bei ARTEMIS maximal 320 Byte.

Es ergeben sich mit den Rechnungen wie in den Abschnitten zuvor die folgenden Segmentierungen, Zell- und Bitraten:

- ❑ MONSUN, pur, AAL3: 4 Zellen/PDU, 266,7 Zellen/s, 113,07 kbit/s
- ❑ MONSUN, TP4, AAL3: 4 Zellen/PDU, 266,7 Zellen/s, 113,07 kbit/s
- ❑ ARTEMIS, pur, AAL3: 7 Zellen/PDU, 583,3 Zellen/s, 248,18 kbit/s
- ❑ ARTEMIS, TCP, AAL3: 8 Zellen/PDU, 666,7 Zellen/s, 282,67 kbit/s
- ❑ MONSUN, pur, AAL5: 3 Zellen/PDU, 200,0 Zellen/s, 84,80 kbit/s
- ❑ MONSUN, TP4, AAL5: 4 Zellen/PDU, 266,7 Zellen/s, 113,07 kbit/s
- ❑ ARTEMIS, pur, AAL5: 7 Zellen/PDU, 583,3 Zellen/s, 248,18 kbit/s
- ❑ ARTEMIS, TCP, AAL5: 7 Zellen/PDU, 583,3 Zellen/s, 248,18 kbit/s

7.3.1.5 Anforderungsbewertung

Tabelle 7.1: Synopse aller charakteristischen Bitraten der Regelung

Kanal	Bitraten [kbit/s]					
	Applikation	TP4/TCP	AAL3		AAL5	
			Appl.	TP4/TCP	Appl.	TP4/TCP
COM_DO	122,88	126,72	152,64	178,08	152,64	
DAT_UP	17,07	21,33	28,27	56,53	28,27	
DAT_DO	70,40	74,67	113,07		84,80	113,07
MONSUN:	**210,35**	**222,72**	**293,98**	**347,68**	**265,71**	**293,98**
COM_DO_MNT	96,00	102,40	118,72	135,68	118,72	
COM_DO_BC	40,80	44,00	50,88	59,36	50,88	
DAT_UP	17,07	27,73	28,27	56,53	28,27	
DAT_DO	200,00	213,33	248,18	282,67	248,18	
ARTEMIS:	**353,87**	**387,46**	**446,05**	**534,24**	**446,05**	

Die aufgetragenen Anforderungen der Regelung für die ATM-Schicht sind immer noch sehr gering. Sie können mit Sicherheit auch in einem belasteten Netz garantiert werden (vgl. 8.4.6 auf S. 140).

Vergleicht man die geforderten Kapazitäten mit denen in den Abschnitten 6.3 und 6.4 (Der aggregierte Kanal insgesamt muß im TDM alle drei einzelnen Datenströme im genannten Zeitraster transportieren können, benötigt also eine Netto-Kapazität von mindestens 82 880 bit/s. Andernfalls würden entweder Nachrichten verloren gehen, oder es müßten entsprechende Zwischenspeicher vorhanden sein.

Für eine Worst-Case Rechnung soll davon ausgegangen werden, daß ausschließlich 256 Byte lange PDUs im Raster von 162/3 ms zu transportieren sind, was zu einer Netto-Kapazität von 122 880 bit/s führt.

Für ARTEMIS wird vom Pauschalwert 300 Byte für eine PDU auf dem Kanal COM_DO_MNT und von 255 Byte auf dem Broadcast-Kanal COM_DO_BC ausgegangen, durch die Auftrennung der Kanäle beträgt die Ereignisperiode auf COM_DO_MNT nun 25 ms, auf dem Broadcast-Kanal sogar 50 ms, was zu den Netto-Kapazitäten von 96 000 bit/s für COM_DO_MNT und 40 800 bit/s für COM_DO_BC führt.

Tabelle 6.2 auf S. 95, Tabelle 6.3 auf S. 100, Tabelle 6.4 auf S. 103), so stellt man fest, daß die Kanalanforderungen durch die ineffiziente Verpackung bei kurzen PDUs überproportional am AAL ansteigt (Zuwachsraten zwischen 16,3 % und 165 %).

Die in dieser Betrachtung zu erwartenden Verzögerungen resultieren (vgl. Abschnitt 6.1) aus dem Transport der Daten über die Leitung und der Aufsammelzeit, die die SAR im Empfänger benötigt, um die PDUs wieder komplett an die höheren Schichten weiterzugeben.

Es ist jedoch in keinem Standard festgelegt, daß die AAL-CS tatsächlich jede einlaufende, kurze PDU ineffizient in einer Zelle über das ATM-Netz übertragen muß. Es ist auch denkbar, daß mehrere PDUs aufgesammelt werden, bis eine Zelle zu nahezu 100 % gefüllt ist. In diesem Fall sind durch die Pufferung der Zellen in Abhängigkeit von PDU-Ankunftsrate und PDU-Volumen Verzögerungen zu erwarten.

Beide Möglichkeiten werden in den Abschnitten 7.3.2 und 7.3.4 durchgerechnet.

7.3.2 Übertragungsverzögerungen durch Blockung

7.3.2.1 Effizienz der Zellübertragung

Für die Übertragung von Nutzdaten in einer Kapsel-Struktur läßt sich allgemein eine Kennzahl „*Effizienz*“ η in Abhängigkeit vom Nutzdatenvolumen (X) und dem Volumen der kapselnden Daten ohne Nutzinformation für den Dienstnehmer (H) ermitteln:

$$\eta = \frac{X}{X + H}$$

Da die Nutzdaten in ATM in Zellen übertragen werden, die in einer fest vorgegebenen Weise strukturiert sind, ist in die Effizienz η die Zahl der für die Übermittlung benötigten Zellen (die u. U. eine ungünstige Auslastung haben können) anstelle des unportionierten Nutzdatenvolumens einzurechnen:

$$N = \left\lceil \frac{X}{L} \right\rceil$$

L bezeichnet hierbei die feste Länge des Payload-Teils einer Zelle in Oktett. Für diesen Fall ist also die Effizienz:

$$\eta = \frac{X}{N \cdot (L + H)} = \frac{X}{\left\lceil \frac{X}{L} \right\rceil \cdot (L + H)}$$

Aus dieser Betrachtung erkennt man, daß die Regelungsdatenübertragung in MONSUN mit den z. T. sehr kurzen PDUs ineffizient ist. Oder anders betrachtet: vor allem in ARTEMIS, wo die PDUs noch nicht endgültig definiert sind, sollten aus Effizienzgründen PDU-Längen in ganzzahligen Vielfachen der Zellgröße mit entsprechendem Raum für die Overheads aus tieferen Schichten (über dem AAL-Layer) festgelegt werden.

7.3.2.2 Zellenverzögerung durch Blockung im Convergence-Sublayer des AAL

Verzögerungen können bei ATM-Netzen je nach Implementierung des AAL-CS schon dadurch entstehen, daß bei der Bildung von ATM-Zellen in den Adaptern der Endgeräte das Füllen einer Zelle abgewartet wird. Dies ist besonders bei langsamen, zeitkontinuierlichen

Diensten mit kleinen Nutzdatenportionen festzustellen: durch die Blockungscharakteristik der Zelle müssen mehrere („lange“) Perioden des Quellsignales abgewartet werden, bis eine Zellübertragung stattfinden kann.

Betrachtet man beispielsweise einen partikularen COM_DO-Kanal von MONSUN, der in einem angenommen konstanten Raster von 50 ms MV_COM-PDUs von 6 Oktett Länge anliefert, und soll ferner jede Zelle vollständig mit MV_COM-Paketen gefüllt sein, bevor sie übertragen wird, so müssen acht MV_COM-Pakete oder 400 ms abgewartet werden. Als Alternative bietet sich die Übertragung von nur teilweise gefüllten Zellen an, was einen Durchsatzverlust bewirkt.

Für die erste Rechnung sei angenommen, daß die MONSUN-PDUs durch eine transparente AAL-CS ohne Hinzufügen von Overhead-Informationen auf die Größe des Payload-Feldes der ATM-Zellen geblockt werden.

Tabelle 7.2 stellt die von dieser Quelle herrührenden Verzögerungen für MONSUN und ARTEMIS für die in Frage kommenden PDUs auf verschiedenen Ebenen zusammen:

Tabelle 7.2: Abschätzung der Paketierverzögerungen in MONSUN/ARTEMIS

Anwendung	Kanal	Layer	Periode [ms]	PDU-Länge	PDUs/Zelle	Paketier-Ver-zögerg.
MONSUN	$COM_DO_{MV_COM}$	Regelg.	50	6	8,0	400,0 ms
		TP4	50	14	3,4	171,4 ms
	DAT_UP	Regelg.	15	32	1,5	22,5 ms
		TP4	15	40	1,2	18,0 ms
ARTEMIS	DAT_UP	Regelg.	15	32	1,5	22,5 ms

Wird jedoch ein aggregierter Kanal betrachtet, können die Zellen durch eine Mischung aus MONSUN-PDUs angefüllt werden, was die Paketierverzögerung reduziert. Die Tabelle 7.2 ist daher als Worst-Case anzusehen.

Rechnet man bei die Verwendung von AAL3/4 mit einer Payload-Länge von 44 Oktetten, und setzt man voraus, daß die Blockung im CPCS geschieht, so kommt man auf folgende Werte:

Tabelle 7.3: Abschätzung der Paketierverzögerungen auf AAL3/4 in MONSUN/ARTEMIS

Anwendung	Kanal	Layer	Periode [ms]	PDU-Länge	PDUs/Zelle	Paketier-Ver-zögerg.
MONSUN	$COM_DO_{MV_COM}$	Regelg.	50	6	7,3	366,7 ms
		TP4	50	14	3,1	157,1 ms
	DAT_UP	Regelg.	15	32	1,4	20,6 ms
		TP4	15	40	1,1	16,5 ms
ARTEMIS	DAT_UP	Regelg.	15	32	1,4	20,6 ms

Man erkennt, daß sich die höhere Effizienz bei Verwendung von AAL5 in diesem Falle nachteilig auswirkt.

7.3.3 Zellverzögerung durch Multiplexen auf der Physikalischen Schicht

7.3.3.1 Kanalmultiplex im ATM-Netz

Die Technik der VPI und VCI ermöglicht das Multiplexen verschiedener Verbindungen auf eine ATM-Übermittlungsstrecke.

Die Zellen der gemultiplexten Datenströme sind mit einer der vereinbarten Bitrate entsprechenden Häufigkeit vertreten, aber unabhängig voneinander im Gesamtzellstrom verteilt. Anders formuliert, ergibt sich die Übermittlungsrate einer Verbindung aus der Zahl der ihr zugeordneten Zellen in einem hinreichend großen Beobachtungszeitraum (vgl. partikularer Kanal in den oberen Schichten).

Durch die Zellratenentkopplung wird auf der Anschlußleitung immer ein kontinuierlicher Zellstrom übertragen. Zwischen den Zellen der verschiedenen Verbindungen fließen außerdem noch Signalisierungszellen und, falls erforderlich, Leerzellen.

Die *Belastung* eines ATM-Multiplexanschlusses ist als Quotient aus Zahl der genutzten Zellen und Gesamtzahl aller Zellen definiert.

Der Zugang der einzelnen Verbindungen zum ATM-Anschluß erfolgt über eine von allen Verbindungen genutzte Warteschlange (Zugangspuffer). In sie stellen die Verbindungen gemäß ihrer Übermittlungsrate Zellen ein, die vom ATM-Anschluß nach dem FIFO-Prinzip entnommen werden. Ist der Speicher voll, wird der Zugang blockiert und die nun ankommenden Zellen verworfen. Festlegungen für die Implementierung bestimmen, daß die Warteschlange so dimensioniert sein muß, daß die Wahrscheinlichkeit für den Zellverlust unter den Wert 10^{-9} sinkt.

7.3.3.2 Statistische Aspekte des Zell-Multiplexens

Der Abstand, in dem beim Zellmultiplex die Zellen einer Verbindung im effektiven Zellstrom auftreten, ist nicht festgelegt und somit als Zufallsvariable X mit diskretem Wertebereich ($\subset \aleph_0$) aufzufassen. Die Werte sind von der Übertragungsrate der Verbindung und der der anderen gemultiplexten Verbindungen abhängig. Unter dieser Voraussetzung läßt sich die Wahrscheinlichkeit dafür, daß zwischen zwei Zellen einer ersten Verbindung A n Zellen anderer Verbindungen liegen, schreiben (P_A ist die Zellenwahrscheinlichkeit für die Verbindung A):

$$P(X_A = n+1) = P_A \cdot (1-P_A)^n$$

Ebenso läßt sich der partikulare *Durchsatz* Ξ[40] der Verbindung A mit Hilfe des Zellabstandes X_A ausdrücken (diesmal als Zellrate, nicht als Bitrate):

$$\Xi_A = \frac{1}{X_A}$$

Bei zeitkontinuierlichen Diensten ist X eine Konstante (vgl. Multiplex im STM) und der Wert von X damit die Periode, Ξ der Takt des Quellensignales. Im zeitdiskreten Fall ist X die Zufallsvariable, die in hinreichend langen Beobachtungsperioden durch den Mittelwert μ approximiert und mit der Standardabweichung s charakterisiert werden kann.

[40] Das Zeichen Ξ wird in optischer Anlehnung an das zuvor für den analogen Sachverhalt auf höheren Ebenen benutzte Θ gesetzt und zur inhaltlichen Verdeutlichung des Bezuges zur Zufallsvariable X.

7.3.3.3 Abschätzung der Zellenverzögerung durch Multiplexen

Die zweite Quelle für Zellverzögerung ist der in 7.3.3.1 genannte Eingangspuffer an der ATM-Anschlußleitung. Hier müssen die einlaufenden Zellen verweilen, bis sie nach dem FIFO-Prinzip zur Weitersendung anstehen. Wird die beim Verbindungsaufbau ausgehandelte (maximale) Übermittlungsrate eingehalten, können garantiert alle Zellen durch das Netz transportiert werden, es kommt zu keinen Verlusten.

Die Verzögerung erwächst aus dem Mischen der Zellen aus Verbindungen mit unterschiedlichen mittleren Bitraten (Annahme: poissonverteilt) auf eine kapazitativ ausreichende Ausgangsleitung mit fester Bitrate.

Eine Abschätzung ist mit der Theorie der Warteschlangen durch ein „M/M/1"-System möglich (vgl. auch /AtBr94/), dem jedoch ein deutlicher Optimismus anhaftet.

In /AtBr94/ werden deshalb in Kapitel 7 auch pessimistischere Systeme diskutiert, insbesondere:

- das „M/D/1-System", das wie das „M/M/1"-System für Netzwerke mit poissonverteilten Ankunftsraten geeignet ist;
- das „N·D/D/1-Modell", das einen Multiplexer für eine feste Anzahl identischer, deterministischer Verkehrsquellen gut simuliert (Telefonvermittlung);
- das „Σ D_j/D/1-Modell", das für einen Multiplexer unter einer festen Zahl unterschiedlicher, deterministischer Verkehrsquellen geeignet ist und
- das „M+D/D/1-Modell", das für Abschätzungen der *Cell Delay Variation* geeignet ist, wenn Verkehr von konstanter Bitrate mit einer poissonverteilten Grundlast gemultiplext wird.

Da in den für MONSUN/ARTEMIS zu erwartenden Szenarien nicht von deterministischen Verkehrsquellen ausgegangen werden kann, verlieren die ersten drei Modelle an Bedeutung. Die Autoren in /AtBr94/ führen gegen das „M+D/D/1-Modell" eine mangelnde Praxistauglichkeit zu Felde und schlagen stattdessen empirische Untersuchungen vor, wie sie im Rahmen dieser Arbeit im Kapitel 8.4, insbesondere im Absatz 8.4.6 auf S. 140, beschrieben werden. Die Betrachtung in diesem Kapitel kann sich deshalb auf das etwas optimistische „M/M/1-System" beschränken.

Die Herleitung dafür findet man in /Tane92/ auf den Seiten 765–771. Dazu sind die mittleren Ankunftsraten (λ_i, in Zellen/s) der Kanäle (i) zu kennen, die gemultiplext werden müssen. Ebenso ist die Kenntnis der Abfertigungsrate ($\mu \cdot C$) am ATM-Ausgang notwendig.

Die mittlere Verarbeitungsverzögerung für den Kanal i beträgt damit:

$$T_i = \frac{1}{\mu \cdot C - \lambda_i}$$

Die Ermittlung der maximalen Übermittlungsrate in den vorherigen Abschnitten ist also auch im Hinblick auf die Zellverzögerung wesentlich bestimmendes Qualitätsmerkmal.

Die obenstehende Formel wurde auf die Werte der Tabelle 7.1 auf S. 111 angewandt; dabei wurde die Abfertigungsrate µC für einen SDH-Anschluß auf Basis des STM-1-Rahmens (353 207,5 Zellen/s) eingerechnet und die Ankunftsraten λi auf die Einheit Zellen/s (Faktoren: für AAL3 1/352 Zellen/bit, für AAL5 1/384 Zellen/bit) umgerechnet. Mit den geringen Zellraten der Regelung bewegen sich die Wartezeiten alle im Intervall von ca. 2,83 µs bis 2,84 µs.

Für die Video-Datenströme errechnen sich die Multiplex-Verzögerungen analog auf Basis der Tabelle 5.2 auf S. 80 mit dem entsprechenden Umrechnungsfaktor für AAL1 (1/376 Zellen/bit). Man erkennt hierbei, daß über den STM-1-Anschluß nur die Substandards 2 „optimiert“ und 3 des CCIR verlustfrei realisierbar sind. Die Verzögerungswerte betragen:

- Substandard 2 „normal“: 359 042,6 Zellen/s → nicht realisierbar!
- Substandard 2 „optimiert“: 275 266,0 Zellen/s → 12,83 µs
- Substandard 3 „normal“: 287 234,0 Zellen/s → 15,16 µs
- Substandard 3 „optimiert“: 220 212,8 Zellen/s → 7,52 µs

7.3.4 Laufzeiteffekte durch Reassemblierung beim Empfänger einer Nachricht

Laufzeiteffekte entstehen außerdem nach Durchlaufen der Übertragungsstrecke im Empfänger durch die Reassemblierung der Zellen zu einer PDU. Dieser Effekt ist daher nur bei PDUs zu erwarten, die zuvor auf mehrere Zellen aufgeteilt wurden. Die Zellaufteilungen sind deswegen explizit in der Tabelle 7.4 zusammengefaßt (vgl. Abschnitt 7.3.1).

Tabelle 7.4: Aufteilung von MONSUN/ARTEMIS-PDUs auf Zellen

Kanal	[Zellen/PDU]			
	AAL3		AAL5	
	Appl.	TP4/TCP	Appl.	TP4/TCP
COM_DO	6	7	6	6
DAT_UP	1	2	1	1
DAT_DO	4	4	3	4
COM_DO_MNT	7	8	7	7
COM_DO_BC	6	7	6	6
DAT_UP	1	2	1	1
DAT_DO	7	8	7	7

Bei der digitalen Video-Übertragung über AAL1 wird ein Frame nach CCIR-Substandard 2 in 14 362 Zellen bzw. 11 011 Zellen übertragen, nach Substandard 3 in 11 490 Zellen bzw. 8 809 Zellen (jeweils „normal“ und „optimiert“).

Eine Abschätzung mit der generierenden Zellrate würde als Reassemblierzeit natürlich gerade die Periodendauer des generierenden Kanales liefern und hat also keine Aussagekraft.

Die Angabe von Zeiten ist in diesem Fall demnach nicht sinnvoll, da hier die Übertragungsverzögerung der Strecke und der durchlaufenen Switches, *die Cell Delay Variation (CDV)*, sowie die Qualität der Übertragung in Bezug auf Zellverlust zu berücksichtigen ist.

Liegen solche Daten vor – gewonnen etwa mittels des Managements eines bestehenden Netzes – läßt sich eine Zeit durch Multiplikation der Zellenzahl mit der durchschnittlichen Verzögerung pro Zelle mit der Zellrate des physikalischen Kanales und der Übertragungsverzögerung der Strecke bestimmen.

7.4 Übertragungscharakteristik des physikalischen Mediums

Als abschließende Betrachtung soll noch das physikalische Medium an sich betrachtet werden.

Verzögerungen ergeben sich selbstverständlich auch aus der Eigenschaft des verwendeten Mediums, daß sich die elektromagnetischen Wellen darin theoretisch maximal mit Lichtgeschwindigkeit, faktisch mit nur 0,7facher Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Es kann deshalb der einfache Zusammenhang zwischen Kabellänge (oder Überbrückungsdistanz Distanz bei nicht Leitungsgebundenen Medien) und Ausbreitungsgeschwindigkeit hergestellt werden:

$$\text{Signalverzögerung} = \text{Ausbreitungsgeschwindigkeit}^{-1} \cdot \text{Kabellänge}.$$

In ATM-Netzen läßt sich diese Laufzeit dadurch nach oben abschätzen, daß wegen der Dämpfungscharakteristik maximale Kabellängen definiert sind.

Für die Multimode-Fasertechnologie wurde eine maximale Länge von 2000 m angegeben, die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Glasfasern liegt bei etwa $0{,}7 \cdot c$, wobei c mit $2{,}9 \cdot 10^8$ m/s angesetzt wird. Die maximale Signallaufzeit beträgt dann also maximal 9,85 µs.

Dieser Wert wird durch den durchschnittlichen Verzögerungswert eines Switches vergrößert und multipliziert sich mit der Anzahl der insgesamt durchlaufenen Übermittlungsabschnitte (n), so daß für ein konkretes Szenario die Signalverzögerung mit

$$\text{Signalverzögerung} = n \cdot (9{,}85\ \mu s + \max(\text{Switching-Delay}))$$

grob abgeschätzt werden kann.

Für die Angabe der Laufzeit muß nun noch beachtet werden, wieviele „Signalimpulse“ gepuffert werden müssen, bis ein Verarbeitungsschritt beginnen kann. Dies ist das Problem, das schon auf höherer Ebene bei der Reassemblierverzögerung betrachtet wurde.

ATM-Netze sind an allen Stellen so konzipiert, daß mit minimalen Puffern gearbeitet und möglichst sofort nach Einlaufen des ersten „Impulses“ (z. B. nach Einlaufen nur des kompletten Zellkopfes, nicht der ganzen Zelle) mit der Bearbeitung begonnen werden kann.

8 Praktische Ansätze zur Ermittlung der Performance-Charakteristika für ATM-basiertes MONSUN

8.1 Übersicht

In diesem Kapitel werden die praktischen Ansätze (Demonstrationen, Versuche, Messungen) beschrieben, in denen die ermittelten Performance-Charakteristika für ein ATM-basiertes MONSUN/ARTEMIS bestätigt werden sollen.

Als ein Teil bei der Durchführung dieser Arbeit wird am Institut für Angewandte Informatik des Forschungszentrums Karlsruhe auch mit dem Aufbau eines kleinen ATM-Testnetzes begonnen. In diesem Rahmen waren deshalb die Vorbereitung und Durchführung der notwendigen Beschaffungen, also die Erkundung des Anbietermarktes, die Erstellung von Ausschreibungskriterien und die Sichtung der eingegangenen Angebote, durchzuführen.

So konnte mittlerweile ein ATM-Switch der Firma HiLAN GmbH, Karlsruhe, mit 2,5 Gbit/s interner, blockierungsfreier Kapazität beschafft und zeitweise provisorisch in Betrieb genommen werden (Abbildung 8.1). Er verfügt über drei SDH-Ports mit 155 Mbit/s Bruttorate. Als Besonderheit integriert er in das Systemgehäuse eine Komponente, die es erlaubt, bis zu acht Ethernet-Zugangsnetze (10Base2/10BaseT) über den Switch zu koppeln. Das System, das die Bezeichnung COSY (Cell Oriented System) trägt, wird später noch genauer vorgestellt.

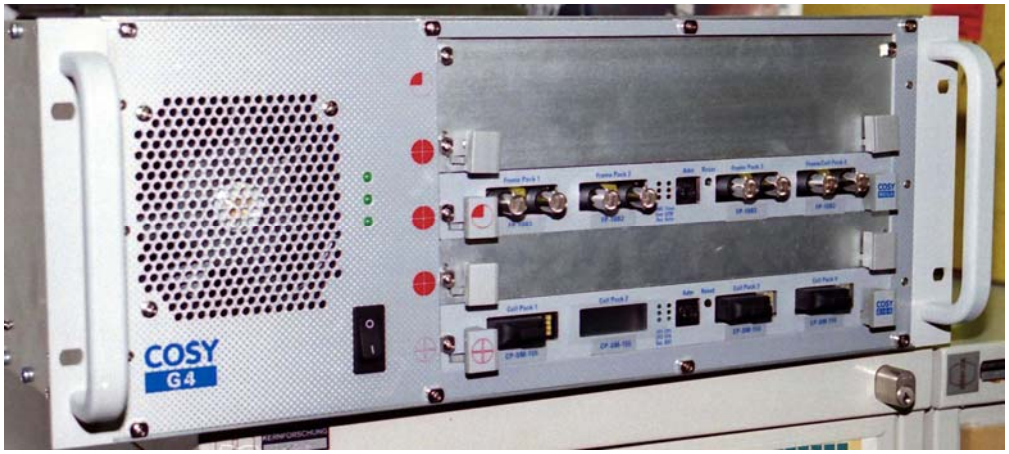

Abbildung 8.1: COSY G4 der Firma HiLAN , Karlsruhe

In der Ausführungsphase befindet sich die Beschaffung von zunächst einer ATM-Adapterkarte „ESA-200“ von Fore Systems, Inc. für eine SGI-Workstation „Indigo 2“, auf der KISMET und das zentrale ARTEMIS-MMI zum Einsatz kommen sollen. Diese Karte soll zum Auslieferungszeitpunkt bereits über Treiber mit Unterstützung für die „LAN-Emulation“ nach den Empfehlungen des ATM-Forum verfügen. Damit wird es möglich sein, nicht nur direkt zwischen zwei ATM-Endsystemen oder direkt zwischen ATM-gekoppelten Ethernet-Systemen zu kommunizieren, sondern auch zwischen einer ATM-Station und einer Ethernet-Station. Dies ist für den Aufbau eines „Hybridsystemes“ von ARTEMIS/MONSUN erforderlich, das die vorhandenen Ethernet-basierten Komponenten über das „MEGA“-Board des COSY-Systemes als Zugangsnetz mit der ATM-Welt, insbesondere der multimedialen MMI-Workstation koppeln wird.

Ebenso ist in nächster Zukunft die Bestellung eines Management-Werkzeuges beabsichtigt („CINEMA-PC“), mit dem Konfiguration, Überwachung und statistische Auswertungen des im Aufbau befindlichen Netzes durchgeführt werden können.

Am Übergang zur Ausführungsphase befindet sich darüber hinaus die Beschaffung eines A/V-Coders „AVA-200“ des Herstellers K-Net, der in der Lage ist, ein konventionelles, analoges Eingangssignal (S-VHS, PAL/NTSC/SECAM) von drei alternativen Video-Quellen und vier Audio-Quellen (CD-Qualität) direkt über ein ATM-Netz zu transportieren (s. Abschnitt 8.3.3).

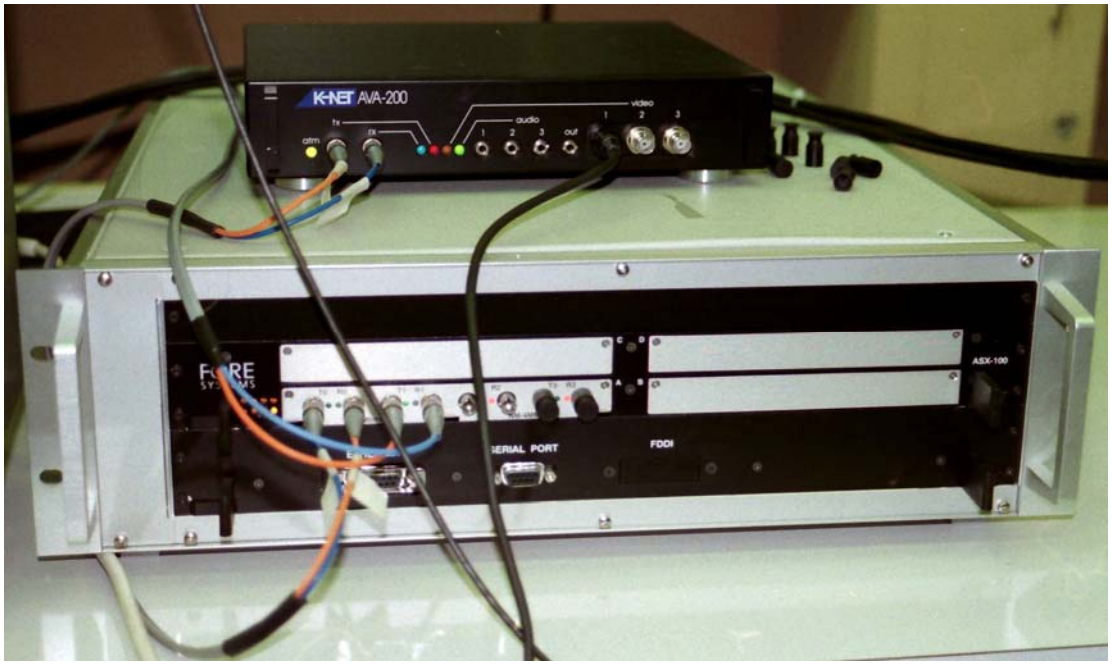

Abbildung 8.2: K-Net AVA200 auf Fore ASX-100 ATM-Switch

Die Beschaffungen gehen einher mit der strukturierten Neuverkabelung des gesamten Institutsgebäudes in Glasfasertechnologie, so daß mit der Aufnahme eines Dauerbetriebs des ATM-Piloten bis zum Sommer dieses Jahres gerechnet werden kann.

Vor diesem Hintergrund sind die durchgeführten praktischen Untersuchungen und Versuchsaufbauten zu sehen. Sie haben damit vorläufigen Charakter.

Durchgeführt werden konnten die folgenden Versuche:

- Fernhantierte Steuerung mit Video-Rückkopplung (2D) über eine Satellitenstrecke zwischen Heidelberg und Berlin im Rahmen einer Tagung der Society for Minimally Invasive Therapy (SMIT).
- Übertragung eines konventionellen Audio-/Video-Datenstromes über den genannten „AVA-200“ ATM-Coder und einen ATM-Switch „Fore ASX-100“.
- Performance-Messung des als Kern des institutseigenen ATM-Pilotnetzes beschafften ATM-Switches „COSY“ mit Hilfe eines speziellen ATM/SDH-Test-Werkzeuges bei der GMD-FOKUS.

8.2 ARTEMIS-Steuerung mit externer Rückkopplung über den Satelliten KOPERNIKUS

Im Rahmen des „Sixth International Meeting 1994“ der Society for Minimally Invasive Therapy fand eine Podiumsdiskussion in Form eines Satelliten-Symposiums in Berlin statt, die durch Demonstrationen ergänzt werden sollte.

Der vom IAI in diesem Zusammenhang eingebrachte Versuchsaufbau benutzte als Kern das bekannte EFS-ROBOX in einer eingeschränkten und verteilten Variante.

Vor Ort im Berliner Konferenzraum war das eigentliche Endoskopführungssystem installiert. Es besteht entsprechend der MONSUN-Prozeßhierarchie aus zwei Komponenten:

- Auf der Regler-Ebene aus der Positionierungsmechanik und dem an einem „Kunstbauch“ (einem stark vereinfachten, transparenten Plastikmodell des Bauchraumes eines menschlichen Patienten im Maßstab 1:1) montierten 3D-Video-Endoskop.
- Auf der Operativebene aus dem Steuerungsrechner, der die eingehenden Solldaten über entsprechende Transformationen an die Regler weitergibt.

Die Bedieneingabe wurde in Heidelberg in einem Labor des Deutschen Krebsforschungszentrums (DKFZ) installiert. Sie bestand aus einer SGI Workstation (Indigo mit XS24 Grafik unter IRIX 4.0.5) mit dem Softwaresystem KISMET.

Die Verbindung der beiden Aktionszentren wurde von der Deutschen Telekom über zwei mobile Übertragungswagen der Bundeswehr und eine temporäre Standleitung über den Satelliten KOPERNIKUS realisiert. Die Standleitung wurde auf dem 20/30 GHz-Band eingerichtet.

Dieses Kernszenario entspricht einem eingeschränkten MONSUN/ARTEMIS-Szenario. Die signifikante Einschränkung ist, daß keine verteilte Regelung stattfindet, sondern nur eine Steuerung, d. h. die Vorgaben aus der Eingabe in Heidelberg werden absolut an das EFS in Berlin gegeben, ohne daß gemessene Ist-Werte über die Satellitenstrecke zurückfließen, es liegt also kein Regel**kreis** vor.

In den Termen von MONSUN/ARTEMIS ist der Versuchsaufbau folgendermaßen zu beschreiben:

- Die in Berlin installierte ROBOX-Komponente fungiert grundsätzlich als AEH.
- Das in Heidelberg betriebene KISMET fungiert in zwei MONSUN-Rollen gleichzeitig, als MEH und als MOEH.

  Der eigentliche Bedienarm für die MEH ist die standardmäßig an der Workstation angeschlossene Maus, was eine reduzierte Funktionalität für die Vorgaben bedingt. Für die Demonstration wird die Steuerung von ROBOX von den üblichen vier Freiheitsgraden (vgl. **Abbildung 4.6** auf S. 63) auf die zwei sphärischen Freiheitsgrade Φ_1 und Φ_2 zum „Schwenken“ des Endoskopes eingeschränkt.

  Der Einsatz von KISMET in der Rolle der MOEH wurde aus der fehlenden direkten Sicht auf die AEH in Berlin notwendig. Entgegen der für MONSUN/ARTEMIS vorgesehenen Struktur der Informationsflüsse wurde in diesem speziellen Fall daher die Steuervorgabe des „Masterarmes“ (Maus) nicht über einen dedizierten MEH-Rechner normalisiert und an die AEH- und MOEH-Rechner über separate Kanäle geleitet, sondern die „rohe“ Sollvorgabe der Maus ging direkt an die MOEH-Einheit (KISMET), wurde dort im Rahmen der Visualisierung normalisiert und direkt von der MOEH an

die entfernte AEH weitergegeben. Die MOEH fungiert damit nur kurzzeitig, während der Normalisierung und der Versendung der Sollwerte, als MEH.

- Entsprechend der Steuerungscharakteristik und der fehlenden Rückkopplung wurde über die Satellitenstrecke nur eine dem DAT_DO-Kanal entsprechende Kommunikation realisiert.

  Für die Ende-zu-Ende Kommunikation zwischen Workstation und ROBOX-Rechner werden zwei Punkt-zu-Punkt-Abschnitte zu Coder und Decoder der Satellitenanlage benötigt. Hier kommen physikalisch serielle Leitungen nach V.24 (9-Pin-Variante) zum Einsatz. Die Daten werden über feste 9,6 kbit/s im Format „1 Startbit, 8 Datenbits, 1 Stopbit, keine Paritätsprüfung“ im Start-Stop-Verfahren übermittelt.

  Ende-zu-Ende auf der Strecke zwischen Coder und Decoder findet die drahtlose Übertragung ebenfalls auf zwei Punkt-zu-Punkt-Abschnitten zwischen Coder und Satellit bzw. Satellit und Decoder statt. Diese Abschnitte sind gemäß G.703 als PDH-Kanäle vom Typ E1 mit 2,048 Mbit/s ausgelegt.

Die gesamte Übertragungsstrecke kann jedoch nur konzeptuell als DAT_DO-Kanal bezeichnet werden, da auf ihr nur reduzierte „PDUs“ der Anwendung übertragen wurden, nämlich ROBOX-spezifische Inkremente der beiden Freiheitsgrade $\Delta\Phi_1$ und $\Delta\Phi_2$. Diese Einschränkung wird wiederum durch die Zwitterstellung von KISMET ermöglicht, das bezüglich der Sollwerte in der Visualisierung die gleiche Semantik verwendet wie die Steuerung von ROBOX. Der DAT_UP-Kanal ist insbesondere nicht mit der aus MONSUN bekannten Mailbox-Struktur zeitlich entkoppelt. Die Steuer-“PDU“ aus KISMET besteht in zwei 4 Byte-Werten, die im Zeitraster 15 ms zyklisch zu übertragen sind. Nach der bekannten Methode lassen sich die Anforderungen berechnen: 64 bit/15 ms = 4,267 kbit/s natürliche Rate, durch „Assembling“ auf die physikalischen Datenpakete des Start-Stop-Betriebs (2 bit Overhead) errechnet sich eine Bruttorate von 5,333 kbit/s. Der Testbetrieb zeigte jedoch, daß aufgrund eines systematischen Fehlers jeweils das letzte übertragene Oktett verstümmelt wurde, so daß die Einfügung eines Stuff-Oktetts in die Steuerdaten notwendig wurde. Dies erhöht die geforderterte Kanalrate auf 6,000 kbit/s. Die physikalische Schnittstelle am „UNI“ von 9,6 kbit/s ist also für die Übertragung der Regeldaten hinreichend.

Es wurde gänzlich darauf verzichtet, den COM_DO-Kanal über die Satellitenstrecke zu realisieren, da von ihm hauptsächlich die Initialisierungskommandos und die Betriebsartensteuerung zu bewältigen ist, was über den ROBOX-Steuerrechner vor Ort in Berlin ausgeführt wurde.

Das eben beschriebene Kernszenario wurde darüber hinaus noch durch folgende Einrichtungen ergänzt:

- Das Bild aus dem 3D-Video-Endoskop wird lokal in Berlin auf einer Großbildwand angezeigt. 3D-Effekte werden über das Groß-Shutter-Verfahren (s. Abschnitt 5.5.2 auf S. 85) erzeugt.
- Die effektiven Bewegungen des ROBOX-Systemes im Plastik-Modell werden durch eine konventionelle Raumkamera in Berlin erfaßt (TEH-Funktionalität). Das Bild wird über ein zweites Coder-Decoder-Paar in Gegenrichtung über die Satellitenstrecke nach Heidelberg auf einen Monitor eingespielt. Der Bediener in Heidelberg hat damit die Möglichkeit, quasi in indirektem Feedback die Auswirkungen seiner Steuerung zu beobachten. Insbesondere kann er Laufzeiteffekte zwischen MOEH und TEH feststellen.

- Eine in Heidelberg angebrachte Raumkamera liefert auf die Großbildwand in Berlin als kombinierte Szene den Stellvorgang am „Bedienarm“ in Heidelberg zusammen mit der Ansicht der Simulation durch KISMET und das schon rückgeführte Bild aus der Raumkamera in Berlin.

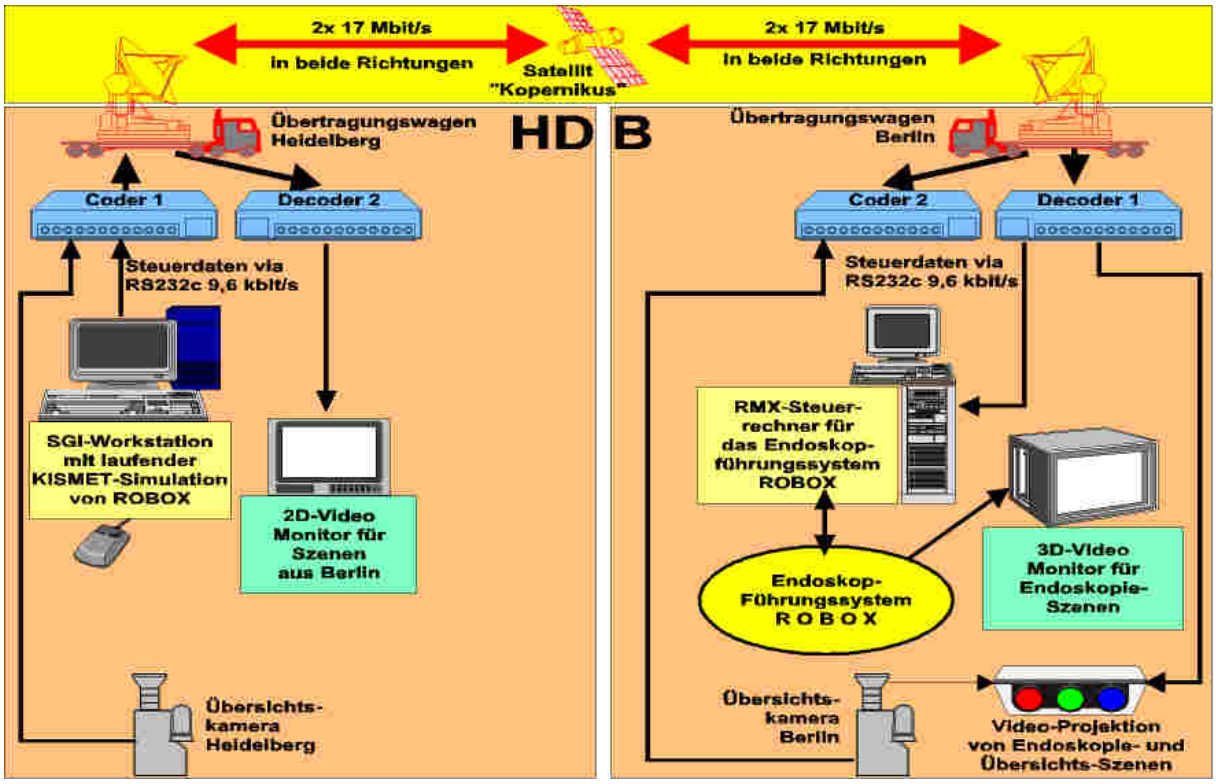

Abbildung 8.3: Demonstrator-Szenario zur eingeschränkten Fernhantierung über Satellit

Für die A/V-Datenübertragung verfügen die eingesetzten THOMSON-CoDec-Paare am „UNI“ über jeweils zwei Ein-/Ausgangsgruppen für zweikomponenten-codierte Videosignale. Sie werden im Coder nach einem nicht preisgegebenen Verfahren komprimiert und „NNI“-seitig über PDH-E3-ähnliche Kanäle von 34,368 Mbit/s versendet.

Im Betrieb der Demonstration konnten Verzögerungszeiten beobachtet werden, die folgendermaßen strukturell erklärbar sind (unter der Annahme, daß eine Verzögerung von Mausbewegung bis zur KISMET-Reaktion vom menschlichen Beobachter nicht wahrgenommen werden kann):

- In Heidelberg: Kombinierte Verzögerung der Steuerübertragung (HD→B) und Video-Rückübertragung (B→HD).
- In Berlin: Kombinierte Verzögerung der Video-Übertragung (HD→B) und „gekapselte“ kombinierte Verzögerung Steuerübertragung und Video-Feedback.

Die durch die Beobachtungen ermittelten Verzögerungswerte liegen für die einfache Strecke Heidelberg-Berlin bei ca. 1,3 s mit einer deutlichen Varianz.

Für die Beurteilung der beobachteten Werte muß die reine medienbedingte Laufzeit des Signales (Ausbreitung fast in Lichtgeschwindigkeit) zum geostationären Satelliten (in 36 000 km Höhe) und zurück berücksichtigt werden: $2 \cdot 36{\cdot}10^{6}$ m $\div$ $3{\cdot}10^{8}$ m/s $\approx$ 240 ms (bei /Tane92/ auf S. 145 mit 270 ms angegeben). Die hohe Distanz macht diesen Parameter im Gegensatz zur Betrachtung bei erdgebundenen Kabelnetzen erheblich.

Durch den in verschiedene Beobachtung doppelt eingehenden Transport über den Satelliten, sind hier schnell Gesamtverzögerungswerte erreicht, die für einen sensiblen Echtzeiteinsatz nicht mehr akzeptabel sind. Als Obergrenze für die tolerable Verzögerung bei Fernhantierung wurde in Tabelle **3.4** auf S. 32 ein Wert von 200 ms genannt, der schon überschritten ist.

Die über die Ausbreitungszeit hinausgehende Verzögerung ist primär durch Schaltvorgänge in den bereitgestellten CoDec-Paaren zu erklären. Bei einem Loop-Back-Test wurde ein Coder unter Umgehung des Satelliten direkt an den Decoder angeschlossen. Als Verzögerung traten allein hierbei schon Werte von bis zu 300 ms auf.

8.3 Erfahrungen mit der Video-Datenübertragung über ein ATM-Netz

Im Zuge der Angebotserstellung für die Beschaffung des institutseigenen ATM-Switches erklärte sich die Firma CONTROLWARE GmbH, Dietzenbach, bereit, einen Versuchsaufbau leihweise für anderthalb Tage zur Verfügung zu stellen.

8.3.1 Ausstattung der Geräte

Als ATM-Endgeräte wurden eine Sun SPARC-Station 10 (mit einer CPU) und ein spezieller A/V-Coder mit der Bezeichnung „AVA-200“ von K-Net Ltd., Camberley (GB), eingesetzt (Abbildung 8.4).

Die SPARC-Station war mit einem „SBA-200“ ATM-Adapter von Fore Systems, Inc. mit optischem TAXI-Interface für 140 Mbit/s ausgestattet.

Abbildung 8.4: Sun SPARC10 mit ATM-NIC SBA-200

Der AVA-200 verfügt standardmäßig über eine ebensolche physikalische Schnittstelle.

Herz des Demonstrationsaufbaus war ein ATM-Switch „ASX-100“ von Fore Systems, Inc. mit 2,5 Gbit/s interner Kapazität. Als physikalische Schnittstellen wies er vier optische TAXI-Ports mit 140 Mbit/s Bruttokapazität auf (Abbildung 8.5).

Für den Demonstrationsaufbau wurde die Sun SPARC-Station über Multimode-Kabel mit dem ersten Port des ASX-100 verbunden. Die logische Verbindung zum Switch wurde manuell über einen PVC hergestellt.

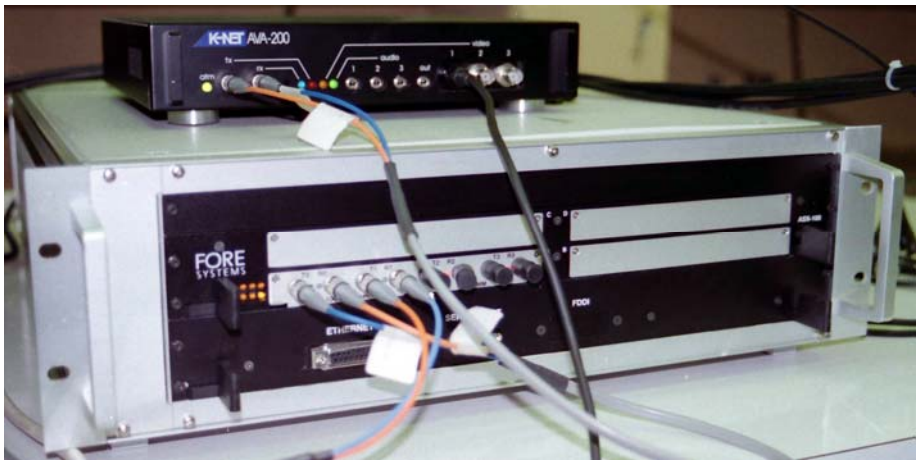

Abbildung 8.5: Fore ASX-100 mit 4mal TAXI-Interface, darauf K-Net AVA-200 Codec

Der AVA-200 wurde am zweiten Port des ASX-100 angeschlossen und ebenfalls über PVCs verbunden.

8.3.2 Logische Struktur des Versuchsaufbaus

Dem Versuchsaufbau liegt das Basis-Schema des Bilddatenaustauschs des ITU-T zugrunde. Es ist in Abbildung 8.6 schon für die konkrete Konfiguration auf Basis eines ATM-Netzes angepaßt.

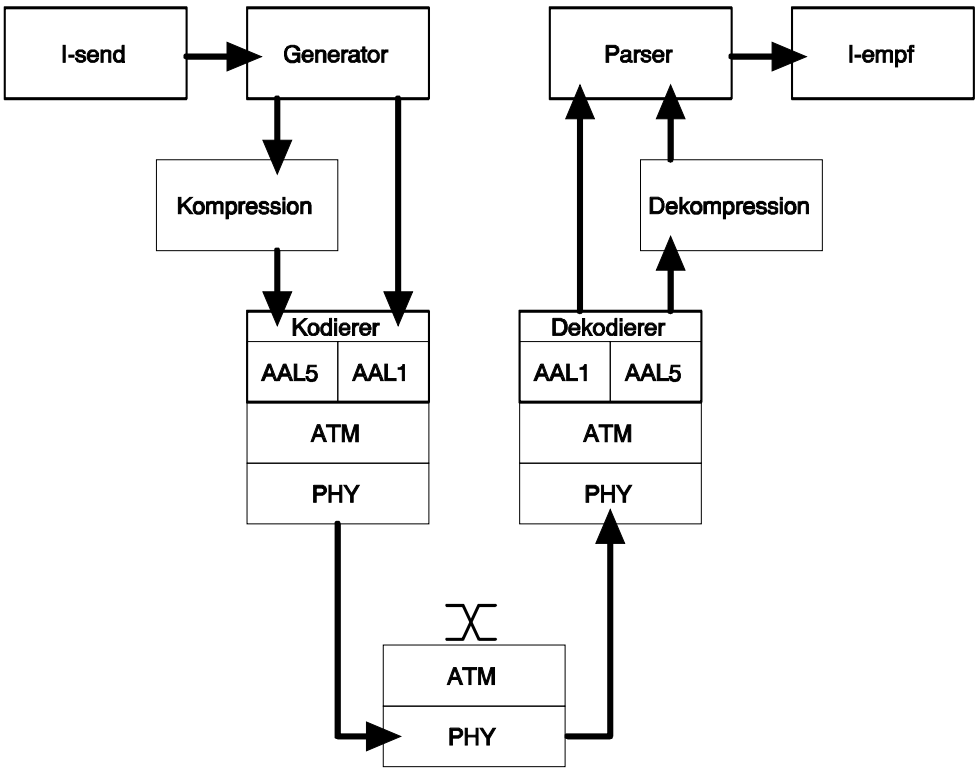

Abbildung 8.6: Basisschema des Bilddatenaustausches im Hinblick auf eine ATM-Übertragung

Die natürlich vorliegende Szene „I-send“ – etwa die Beobachtung einer Operation durch eine Endoskopkamera – wird in der *Generator*-Komponente diskretisiert. Der *Codierer* überträgt die diskretisierte Signalfolge in eine für das Netzwerk kompatible Repräsentation

um. Optional kann zwischen die Generierung der diskreten Darstellung und die Netzwerkanpassung noch eine Datenreduktion in Form einer Kompression geschaltet werden.

Die angepaßten Szeneninformationen werden gemäß der Netzwerkcharakteristik übertragen.

Am Empfänger findet ein entgegengesetzter Ablauf bis hin zur Erzeugung einer der natürlichen Szene "I-send" möglichst entsprechenden Szene „I-empf" statt.

Zu beachten ist, daß die Beurteilung der Beobachtungen grundsätzlich in zwei unterschiedlichen Kategorien erfolgen muß, der Kategorie der Qualität und der Kategorie der Performance. Durch die grundsätzliche Verlusthaftigkeit jeder Diskretisierung, kann die Szene I-empf nur unter konstruierten Bedingungen[41] identisch mit der Szene I-send sein. Die qualitative Beurteilung wird die Ähnlichkeit der beiden Szenen in Betracht ziehen, die Performance-Beurteilung hingegen wird erst auf der Ebene von Parser und Generator mit einem Vergleich beginnen.

Als Performance-Charakteristika treten aus dieser grundsätzlichen Betrachtung also hervor:

- ***Isochronität:*** Die zeitliche Änderung in der Szene I-empf wird durch Zeitdiskretisierung im Generator in eine Folge von Einzelbildern mit bestimmtem Abstand zueinander aufgelöst. Das Qualitätsmerkmal Isochronität fordert, daß die vom Parser abgelieferten Einzelbilder den selben Abstand zueinander haben wie die Bilder im Generator. Maßzahl: *Jitter*.
- **Übertragungsverzögerung:** unabhängig vom Jitter, ist von Bedeutung, wie lange die Übertragung gemessen vom Eingang des Generators bis zum Ausgang des Parsers benötigt. Maßzahl: Laufzeit; bei fraglicher Isochronität: durchschnittliche Laufzeit.
- **Informationsverlust durch die Übertragung**: Beim Durchlauf durch die Instanzen kann es zu Kapazitätsproblemen bei Puffern kommen, so daß verschiedene Informationen am Eingang einer Instanz verloren gehen oder von der Instanz zur Einhaltung einer Bedienrate verworfen und durch Dummy-Informationen ersetzt werden. Diese Charakteristik reicht schon in die qualitative Beurteilung und ist deshalb ausdrücklich auf Informationsverlust **aus der Übertragung** eingeschränkt.

8.3.3 Merkmale des AVA-200

8.3.3.1 ATM-Anschluß

Der K-Net Coder AVA-200 ist mit einem ATM-Anschluß für TAXI-Interfaces (140 Mbit/s) für das bei FDDI übliche Multimode-Kabel mit ST-Konnektoren ausgestattet.

Die unterschiedlichen Eingangssignale werden alle auf diesen einen Ausgangsport gemultiplext und über PVCs an die Empfänger geleitet.

8.3.3.2 Video-Anschlüsse

Der AVA-200 verfügt über drei physikalische Eingänge für analoge Standard-Videosignale. Zwei Eingänge sind mit BNC-Buchsen versehen und erwarten ein Ein-Komponenten-Signal (*Composite-Signal*) in den Standards PAL, NTSC oder SECAM. Der dritte Eingang ist mit einer 5-Pin Mini-DIN-Buchse ausgestattet, an die ein S-VHS-Analogsignal geführt werden kann.

[41] Die Konstruktionsbedinungen gleichen in diesem Fall den Informationsverlust der Diskretisierungen aus.

Eines der drei Signale kann jeweils exklusiv an den ATM-Ausgang durchgeschaltet werden, es ist jedoch auch ein Mischbetrieb möglich, in dem alle drei Eingänge mit einer maximalen aggregierten Rate von 25 Frames/s auf den ATM-Ausgang geschaltet werden.

Die analogen Video-Signale werden wahlweise mit 8 bit-, 16 bit- oder 24 bit-auflösenden RGB-Kanälen digitalisiert. Eine Irrelevanzreduktion findet standardmäßig nicht statt, wohl aber eine Redundanzreduktion.

Als Zusatzhardware ist ein Motion-JPEG-Kompressor erhältlich, er benötigt dann jedoch auf der Empfangsseite einen entsprechenden Hardware-Dekompressor.

8.3.3.3 Audio-Anschlüsse

Für die Übertragung von Audio-Stereosignalen stehen vier Ports mit den in den Heim-Stereoanlagen verbreiteten 3,5 mm-Klinken-Buchsen zur Verfügung. Davon dient ein Anschluß als Ausgang, die drei anderen als Eingang.

Signale an diesen Anschlüssen werden wahlweise mit 8 bit oder 16 bit aufgelöst und bei 44 kHz oder 48 kHz gesampled.

8.3.3.4 Video-Digitalisierung für die ATM-Übertragung

Für die Video-Übertragung auf einem ATM-Netz wird der AAL5 vom AVA-200 benutzt. Das Anpassungsverfahren ist eine proprietäre Technik von K-Net.

Das eingehende, analoge Videosignal wird zunächst diskretisiert, jedoch nicht gemäß der ursprünglichen Zeilenstruktur weiterverarbeitet, sondern auf der Basis von Blöcken der Dimension 8 Pixel × 8 Pixel (sog. *Tiles*).

Für die SSCS-PDU ist eine maximale Länge von 64 KBytes vereinbart (*Maximum Transfer Unit, MTU*). Die Größe der MTU kann jedoch vom Benutzer herabgesetzt werden, womit indirekt die Bandbreite für den entsprechenden Kanal begrenzt aber auch die Verzögerung herabgesetzt wird. K-Net schlägt aufgrund eigener Experimente eine MTU-Größe von 12 KByte für unkomprimierte Videoübertragungen und von ca. 1 Kbyte für Audioübertragungen vor.

Die Anpassung auf die AAL5-Zellen wird in einer SSCS vorgenommen. Die genaue Arbeitsweise hängt dabei von den für jeden Videostrom separat festgelegten Codiervorgaben (MTU) des Benutzers ab.

Die Tiles werden kompakt auf die AAL5-Zellen verteilt, wobei dem letzten Segment ein 8 Oktette langer SSCS-Trailer (bei K-Net „Tile-Trailer“ genannt) angehängt wird.

Der Trailer enthält als erste Information die Eckkoordinaten des ersten Tiles, das in der SSCS-SDU enthalten ist, und eine 4 Byte lange Frame-Number.

8.3.3.5 Verbindungen

Für die Steuerung des AVA-200 wird ein spezielles *Control-Program (CP)* ausgeliefert, das auf jeder handelsüblichen Workstation mit X11 betrieben werden kann. Jedem AVA-200 im Netz wird genau eine Instanz dieses CP mit einer VPI/VCI-Kombination zugeordnet.

Für jeden Video- oder Audio-Datenstrom wird eine eigenständige Verbindung mit bestimmten VPI/VCI-Kombinationen festgelegt.

8.3.3.6 Ausgabe

Abbildung 8.7: Eine über das ATM-Netz mittels AVA-200/ASX-100 übertragene Videoszene auf der Bedienoberfläche einer Workstation

Als Anzeige der Video-Daten ist im Konzept des AVA-200 ein Fenster auf einer handelsüblichen Workstation vorgesehen. Zu diesem Zweck wird eine entsprechende Software mitgeliefert. Sie enthält außer den skalierbaren Anzeigefenstern für die Video-Datenströme ein einfaches GUI, mit dem Einstellungen an der Konfiguration verändert werden können (Abbildung 8.7).

Ein Statusfenster hält den Benutzer, wenn gewünscht, über die Verkehrscharakteristik auf dem Laufenden.

Es ist von K-Net auch eine Decoder-Hardware AVD-100/AVD-200 erhältlich, die die über das ATM-Netz empfangenen Daten wieder in herkömmliche Analogsignale zur konventionellen Weiterverarbeitung umwandelt.

8.3.4 Merkmale des ASX-100 ATM-Switches

Der Fore-Switch ASX-100 ist ein modular aufgebauter ATM-Switch für Arbeitsgruppen. Er hat eine interne Kapazität von 2,5 Gbit/s, die über die von Fore patentierte „Switch-Fabrik“ auf die Anschlüße verteilt werden. Im Wesentlichen ist dies ein sehr schneller und mit hoher Bandbreite ausgelegter Bus.

Als Arbeitsgruppen-Switch konzipiert, verfügt der ASX-100 in Portionen von jeweils vier Stück über bis zu 16 physikalische Anschlüsse. Als Varianten sind alle für das UNI definierten Interfaces bis zu einer maximalen Einzelkapazität von 155 Mbit/s erhältlich.

Der Switch basiert auf einer SPARC-2 Workstation-Platine und wird entweder über einen seriellen Anschluß (V.24) konfiguriert, oder von einer über einen ATM-Port angeschlossenen

Workstation aus mittels der *Switch Control Software (SCS)*. Mit ihr können alle benötigten PVC-Verbindungen eingerichtet werden.

8.3.5 Untersuchungen

8.3.5.1 Versuchsanordnung

In der knappen Zeit, die nach dem Aufbau, dem Anschluß und der Einrichtung der Komponenten noch zur Verfügung stand, konnten nur qualitative Ergebnisse ermittelt werden. Die dennoch aufgeführten Zahlen beruhen auf der Messung von Hand mit einer Stoppuhr und sind als entsprechend ungenau einzustufen.

Mit den vorgestellten Komponenten sollten Qualitätsuntersuchungen im Hinblick auf Übertragungsverzögerungen und Isochronität vorgenommen werden. Darüber hinaus konnte die grundsätzliche Verträglichkeit mit der in der Endoskopie eingesetzten Video-Technik bestätigt werden.

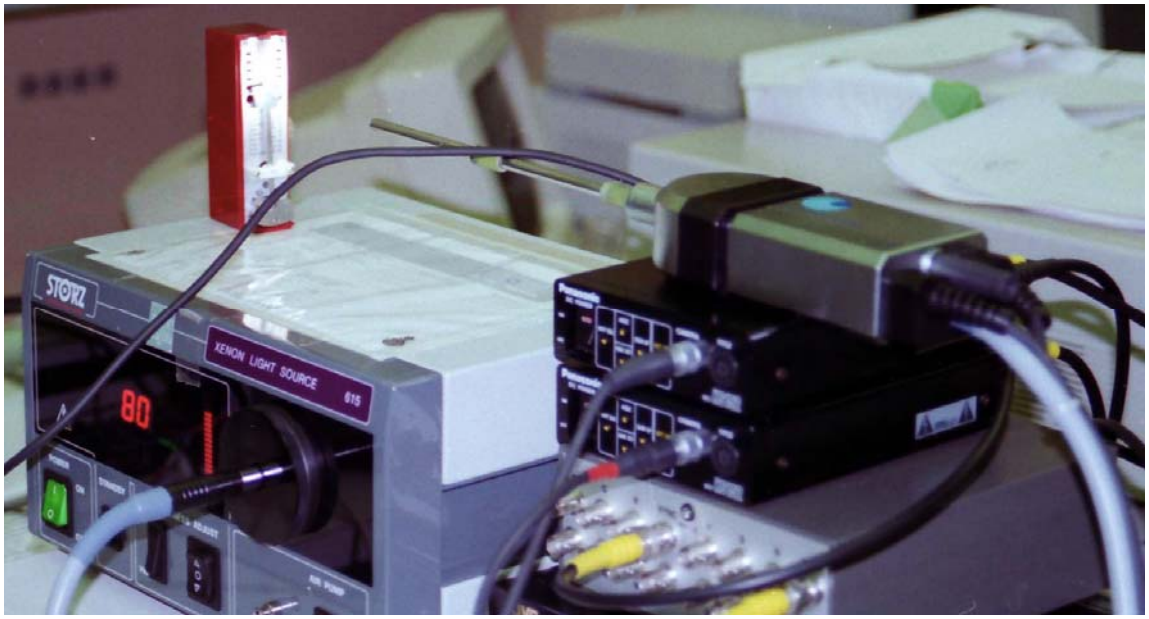

Abbildung 8.8: Opticon 3D-Endoskop auf Metronom ausgerichtet

Eine Kamera des 3D-Video-Endoskopes „Opticon“ des KfK wurde mit dem S-VHS-Eingang des AVA-200 verbunden (Abbildung 8.8). Auf die Übertragung von 3D-Video-Daten mußte verzichtet werden, da am AVA-200 nur ein S-VHS-Eingang oder zwei Composite-Eingänge mit BNC zur Verfügung stehen. Das für den Test einzig verfügbare Endoskopsystem verfügte jedoch nach der Multiplex-Stufe nur über 3-Komponenten-Ausgänge. So wurde das S-VHS-Signal einer Kamera des Endoskopsystemes vor dem 3D-Multiplexer in den AVA-200 eingespeist.

Als regelmäßig bewegtes Objekt wurde vor die Endoskopkamera ein Metronom gestellt, dessen Bild auf dem Video-Fenster der Workstation angezeigt wurde.

Die Anordnung wurde so vorgenommen, daß das natürliche Metronom und das Bild auf der Workstation in einer senkrechten Achse zueinander lagen. Laufzeitunterschiede konnten auf diese Weise sehr deutlich als „Phasenverschiebung“ zwischen den beiden Metronomen wahrgenommen werden.

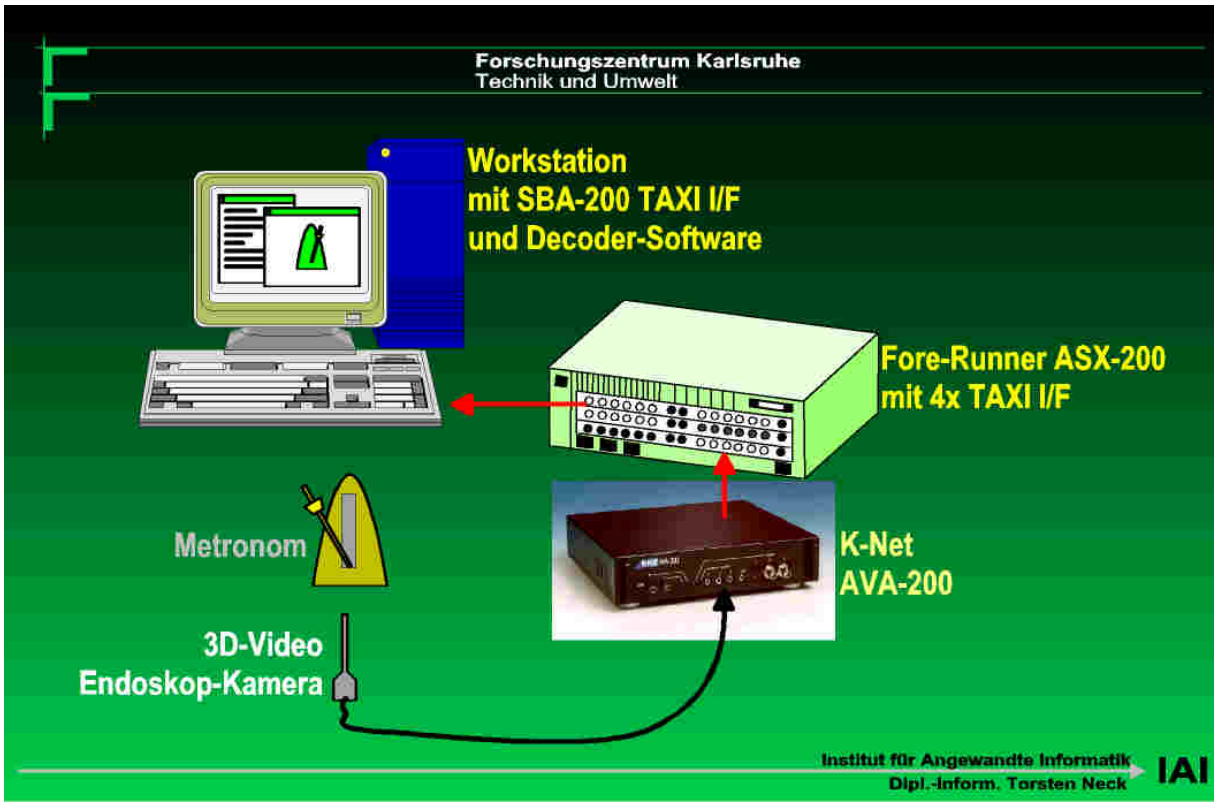

Abbildung 8.9: Versuchsanordnung zur Performance-Beobachtung des AVA-200-Szenarios

Das Szenario ist schematisch in Abbildung 8.9 dargestellt.

8.3.5.2 Untersuchungsergebnisse

Bildqualität:

- Die zur Demonstration bereitgestellte SPARC-Station war mit einer einfachen Grafikkarte ausgestattet, die zur Anzeige der Video-Szene das „Pseudocolor“ Farbmodell[42] benutzt. Die Farbauflösung wurde von mehreren Betrachtern als wirklichkeitsnah eingestuft.
- Die Ortsauflösung des Bildes wurde als hinreichend beurteilt. Das Darstellungsprogramm SVA-200 erlaubt das „Aufziehen“ oder „Schrumpfen“ des Fensters mit der Video-Szene bis zu einer maximalen Größe (in Abbildung 8.7 zu sehen). Die Anzeigegröße hat jedoch keinen Einfluß auf die Ortsauflösung bei der Diskretisierung des kontinuierlichen Videosignales. Daher ist objektiv bei kleiner Darstellung auf dem Bildschirm die Qualität der Ortsauflösung besser. Subjektiv wird kein Unterschied wahrgenommen.

Performance:

- Die zuvor beschriebene Technik hat jedoch deutliche Auswirkung auf die Performance: die Größenanpassung des Video-Frames an das Anzeigefenster geschieht mittels Interpolation entweder durch die CPU der Workstation oder bei entsprechender Grafikoption durch den Bildprozessor der Grafikkarte. Die Interpolationsrechnungen

[42] „Pseudocolor“ ist ein palettenbasiertes System, das versucht, möglichst wirklichkeitsgetreue Farben in der unterstützten Farbauflösung durch Optimierung der Palette für das Fenster zu erzielen, auf dem gerade der „Fokus“ liegt.

können offensichtlich nicht mit der Framerate der Video-Applikation Schritt halten, so daß bei größerer Anzeige eine signifikant verschlechterte Isochronität in Form von Szenensprüngen und burstartigen Geschwindigkeitsschwankungen zu beobachten ist. Die Szene bleibt dabei für kurze Zeit scheinbar stehen und springt im ersten Fall unter Verwerfen zwischenzeitlicher Frames auf einen neuen Stand, oder die gepufferten Videoframes werden in einer höheren als der isochronen Rate von 25 Hz als scheinbarer „Zeitraffer“ nachgeliefert.

- Übetragungsverzögerung:
  Bei allen Beobachtungen trat eine konstante Grundverzögerung im Rahmen der Meßgenauigkeit auf.

  - Sie wurde überschlagsmäßig bestimmt, indem die Phasenverschiebung des angezeigten Taktells im Vergleich zum wirklichen Taktell bei verschiedenen Frequenzen betrachtet wurde. Bei 1 Hz konnte keine Verschiebung beobachtet werden, bei 2 Hz wurde sie erkennbar und konnte bei 3 Hz auf $\pi/2$ geschätzt werden. Von diesem Wert ausgehend berechnet sich eine Laufzeit auf Anwendungsebene von

    ca. 83 ms.

  - Der Einfluß des Switches auf die konstante Verzögerung wurde in einem nächsten Versuch dadurch demonstriert, daß der Ausgang des AVA-200 direkt auf den Eingang des SBA-200-Adapters gesteckt wurde. (Ganz präzise wurde dabei allerdings auch die Kabelstrecke auf die Hälfte der ursprünglichen Länge reduziert. Da jedoch kein Kabel länger als 1,5 m war, kann dieser Einfluß vernachlässigt werden.) In der Beobachtung ohne technische Hilfsmittel konnte kein Unterschied zum vorhergehenden Versuchsaufbau festgestellt werden (Abbildung 8.10). Exakte Messungen am Nachfolgemodell ASX-200 im ATM Test & Conformance Center (ATC) der GMD in Berlin haben eine konstante Verzögerung von 19 µs ermittelt.

Abbildung 8.10: Schnappschuß während laufender Videoübertragung bei Hintergrundlast

- In einem dritten Szenario wurde die Belastung der Workstation durch weitere Anwendungsprozesse erhöht. Als einfacher Prozeß zur Generierung der Hintergrundlast wurde das Unix-Kommando „find“ auf das Root-Directory des Dateisystemes angesetzt. Die entstehende Last hatte also keinerlei Auswirkung auf die Netzwerkkomponenten der Workstation. Die Auswirkungen dieser Last übertrafen dennoch alle anderen beobachteten Phänomene bei weitem: mitunter blieb die Video-Szene über mehrere Sekunden hinweg stehen. Die Phase, in der nach Rückkehr zur Grundlast die dafür ermittelte Verzögerung wieder erreicht wurde, dauerte im Durchschnitt etwa 5 s. Während der hohen Belastung des Systemes konnten weder feste noch mittlere Verzögerungen ermittelt werden, die Schwankungen hatten eine zu große Varianz.
- Um den „Flaschenhals“ weiter einzukreisen, wurde die Belastung des ATM-Subsystemes durch Aufschalten eines Audio-Signales erhöht. Das von K-Net eingesetzte Codierverfahren läßt jedoch für das Multiplexen selbst auf der von FDDI stammenden 140 Mbit/s-TAXI-Schnittstelle noch genügend Kapazitätsreserven, so daß keine weiteren Effekte wahrnehmbar wurden. Die Verzögerung des Video-Signales blieb weiterhin allein von der Belastung der Workstation durch andere Prozesse abhängig. Es konnte keine Verschiebung zwischen Ton und Bild bei der Übertragung einer vom Videorecorder eingespielten Szene über getrenntem Ton- und Bild-Eingang festgestellt werden.

8.3.5.3 Interpretation der Beobachtungen

Mit dem AVA-200 ist dem Hersteller K-Net eine qualitativ hochwertige Lösung geglückt, um audiovisuelle Daten über das digitale ATM-Netz zu übertragen. Die gewählten Reduktionsfaktoren führen zu einer Qualität, die durchaus den medizinischen Einsatz erlaubt.

Die Performance bewegt sich grundsätzlich im Rahmen des Tolerierbaren, sofern für die Anzeige der Daten eine dedizierte Workstation oder der spezielle Decoder von K-Net (AVD-100) eingesetzt wird.

Deutlich konnte gezeigt werden, daß der ATM-Switch im Szenario nicht merklich zu den beobachteten Effekten beitrug. Also wird auch die Erweiterung des Szenarios auf ein lokales Netz mit mehreren Switches die Eignung der untersuchten Komponenten unter dem Aspekt der Laufzeiten nicht gefährden.

Ist die Video-Anzeige zur Integration in die MMI-Komponente von ARTEMIS vorgesehen (MMI, KISMET), kann sie nicht mehr als Referenzbild für den Chirurgen zur Überwachung des Eingriffes eingesetzt werden. Die Belastung der Steuerungs- und Regelungsprozesse zumindest bei einer Workstation der Leistugsklasse der „SPARC 10“ beeinträchtigen die Video-Darstellung zu sehr. Es bleibt zu untersuchen, ob der Einsatz anderer Workstations (SGI mit speziellen Grafikprozessoren) diese Aussage erhärtet oder entkräftet.

Anmerkung:

> Die Einsatztauglichkeit der Komponenten AVA-200 und AVD-200 wird im Leeds Institute for Minimally Invasive Therapy (L.I.M.I.T.), Leeds (GB), seit kurzer Zeit praktisch bewiesen. Endoskopische Operationsszenen werden zu Ausbildungszwecken zusammen mit den simultanen Erklärungen des Operateurs über ein ATM-Netz auf Monitore in die angeschlossenen Hörsääle im „Leeds General Infirmary“ vor Ort und im ca. 2,5 km entfernten „St. James Hospital“ ausgestrahlt.

8.4 Performance-Messungen am COSY-Switch des IAI

8.4.1 Das „ATM Test und Conformance Center“ der GMD-FOKUS in Berlin

Die Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD) unterhält in Berlin das Forschungszentrum für Offene Kommunikationssysteme (FOKUS).

In Zusammenarbeit mit der Deutschen Telekom Berlin (De.Te.Berkom) wurde mit Beginn des Jahres 1995 in diesem Institut ein Testzentrum für ATM-Komponenten (ATC) eingerichtet, mit dem Ziel, Operabilitäts- und Interoperabilitätsstudien möglichst vieler ATM-Komponenten durchzuführen und die Einhaltung der bestehenden Normen von ITU-T und ATM-Forum zu überprüfen.

Dafür wurden spezielle ATM-Testwerkzeuge im Wert von rd. 1 000 000 DM beschafft, die nicht nur qualitative Versuche ermöglichen, sondern quantitative Aussagen. Als derzeit kostenlose Dienstleistung unterstützt das ATC Anwender von ATM-Netzen in Industrie und Forschung bei der Durchführung von Tests und Leistungsmessungen an deren Komponenten.

Das IAI nahm diesen Dienst in Anspruch, um den beschafften ATM-Switch „COSY“ unter simulierten Bedingungen, wie sie im zukünftigen multimedialen Einsatz für ARTEMIS/MONSUN zu erwarten sind, in Betrieb zu nehmen und seine Performance zu beurteilen.

8.4.2 Verfügbares Test-Equipment beim ACT-Berlin

8.4.2.1 Das „HP 75000 Broadband Series Test System“

Dieses System ist ein hochentwickeltes Werkzeug, das Tests in den verschiedensten Variationen von der reinen Funktionsprüfung bis zu Performance-Untersuchungen und von der physikalischen Schicht bis zum AAL ermöglicht.

Es ist von der Hardware her modular aufgebaut und im ATC derzeit mit den folgenden Komponenten ausgestattet:

- Ein VXIbus-basiertes **Grundsystem** (HP E4210A) mit V/382 HP-UNIX Controller und 13 Erweiterungssteckplätzen.
- Ein **SDH/SONET** STM-1/STS-3c **Optical Line Interface** für 155 Mbit/s (HP E1697A), mit dem die Messungen am HiLAN-System COSY durchgeführt wurden.
- Zwei **TAXI** 100 Mbps/140 Mbps **Line Interfaces**.
- Zwei **Cell Protocol Processors** (HP E4209A), um in Kooperation mit den physikalischen Line Interfaces ATM-Verkehr zu erzeugen und Analysen bis zum AAL vorzunehmen.
- Ein **optischer Lastgenerator** mit 4 SDH/SONET-Ausgängen.

8.4.2.2 Weitere ATM-Testhilfen

Neben dem hauptsächlich eingesetzten HP-Testsystem sind noch vorhanden:

- Ein „Tekelec Airtronic Chameleon Open“-System mit einem SDH (STM-1) Interface und einem TAXI-Interface das AAL und höhere Schichten behandeln und die Signalisierung nach ATM-Forum UNI 3.1 analysieren kann.
- Ein Wandel & Goltermann „ATM-100“ mit SDH-Interface.

- Darüber hinaus Eigenentwicklungen des FOKUS auf der Basis von Sun Workstations, die mit ATM-Adaptern ausgestattet sind.

8.4.3 Anlage der Messungen und Versuche

8.4.3.1 Prinzipielle Versuchsanordnung

Außer für mehrere der Operabilitäts- und Interoperabilitätstests, die mit den Eigenentwicklungen des ATC durchgeführt wurden, kam für alle anderen Untersuchungen am COSY-Switch das vorgestellte HP-Test-Tool zum Einsatz.

Die Versuchsanordnung hatten eine prinzipielle Struktur, wie sie in Abbildung 8.11 gezeigt wird, davon wurden jedoch im Zuge der Operabilitätstests geringfügige Varianten gebildet.

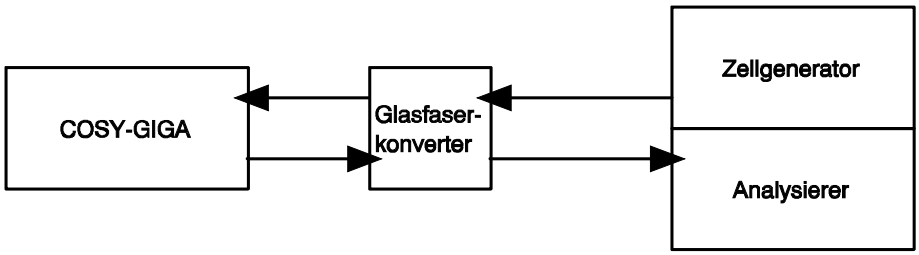

Abbildung 8.11: Prinzipielle Versuchsanordnung für alle durchgeführten Leistungsmessungen

Ein optischer Ausgang (Line Interface) des HP-Testers wurde über die anschließend erläuterte Konfiguration mit einem ATM-spezifischen Lastgenerator gekoppelt.

Da die Line-Interfaces nach ITU-T-Norm für Single-Mode Glasfasern ausgelegt sind, das COSY-System aber als kleiner „Workgroup-Switch“ für die im Inhouse-sektor stärker verbreitete Multimode Faser konzipiert ist, mußte ein Glasfaser-Konverter (CBL fibre converter) zwischengeschaltet werden.

Von CBL-Konverter wurde das Signal an einen Eingangsport des „GIGA“-Switches, das eigentliche ATM-Switch-Modul des COSY-Systemes, geführt.

Der Rückweg von COSY-GIGA zum HP 75000 verlief über die gleichen Stationen. Der Eingang des Line Interfaces am HP-Tester wurde intern mit einem ATM-spezifischen Protokollanalysator verbunden, der wiederum an einem grafischen Benutzerinterface (GUI) auf einer separat angeschlossenen Workstation die ermittelten Ergebnisse anzeigte.

8.4.3.2 Konfigurationsmöglichkeiten des HP-Breitband-Testers

Für die Konfiguration der Hardware und die eigentliche Durchführung und Auswertung von Tests und Messungen wird im HP-System eine umfangreiche und selbst extrem konfigurierbare Softwarekomponente eingesetzt. Sie stellt dem Benutzer eine grafische Schnittstelle auf Basis von X11 zur Verfügung.

Ausgehend von dem Konfigurationsmenü, das in Abbildung 8.12 und Abbildung 8.13 gezeigt ist, werden alle Messungen vorgenommen. Abbildung 8.12 zeigt in einem Schnappschuß, wie ein durchzuführender Test grundlegend konfiguriert wird.

Im oberen Teil wird die Protokollstruktur festgelegt; eine Verbindungslinie zwischen den grafischen Objekten zeigt, auf welchen Ebenen der Test durchgeführt wird und wie die Protokollobjekte zusammenwirken.

Im unteren Teil können die für den Test einzusetzenden Hardwaremodule ausgewählt werden. Im abgebildeten Beispiel wird eine Messung auf der ATM-Schicht durchgeführt; als Physikalisches Medium (PM) dient ein STM-1-Rahmen der von der ATM-TC-Subschichtinstanz mit einem VC-4 gefüllt wird. Zur Generierung der ATM-Zellen und Testauswertung wird der Cell Protocol Processor (CPP) eingesetzt; die Zellen fließen über das SDH-STM-1 Line Interface; eine Hintergrundlast wird zusätzlich vom SDH-STM-1-Load Generator erzeugt.

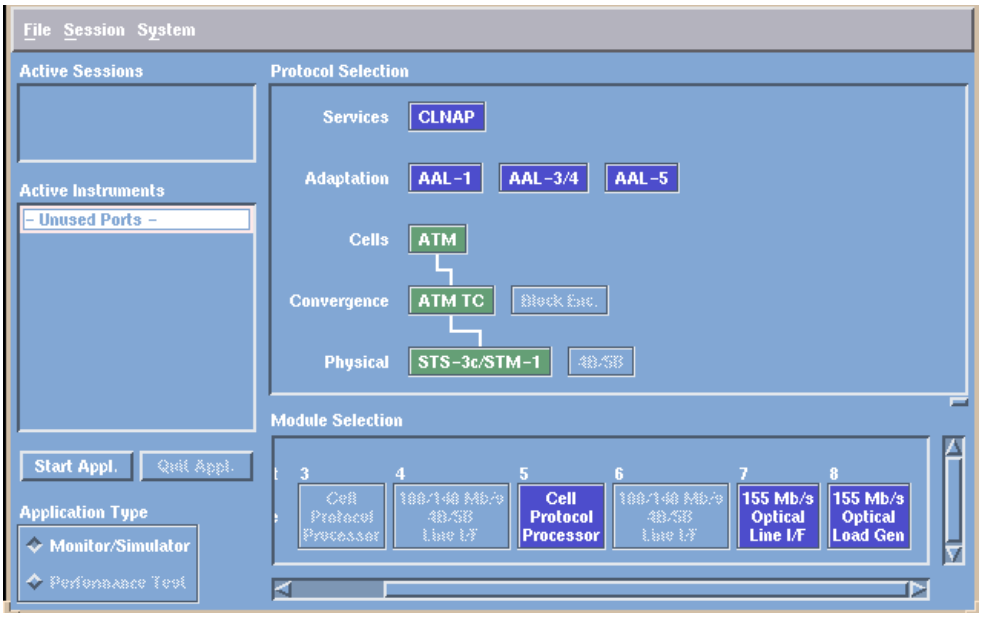

Abbildung 8.12: Konfiguration von Protokollstruktur und Hardwarekomponenten des HP 75000 Broadband Test Tools

In dem in Abbildung 8.13 gezeigten zweiten Schnappschuß setzt die Messung (eine Schicht höher als zuvor) auf dem AAL1 auf, wird wieder über das SDH-Interface geführt, benutzt zur Auswertung der ermittelten Daten den CPP und verzichtet diesmal auf eine Hintergrundlast.

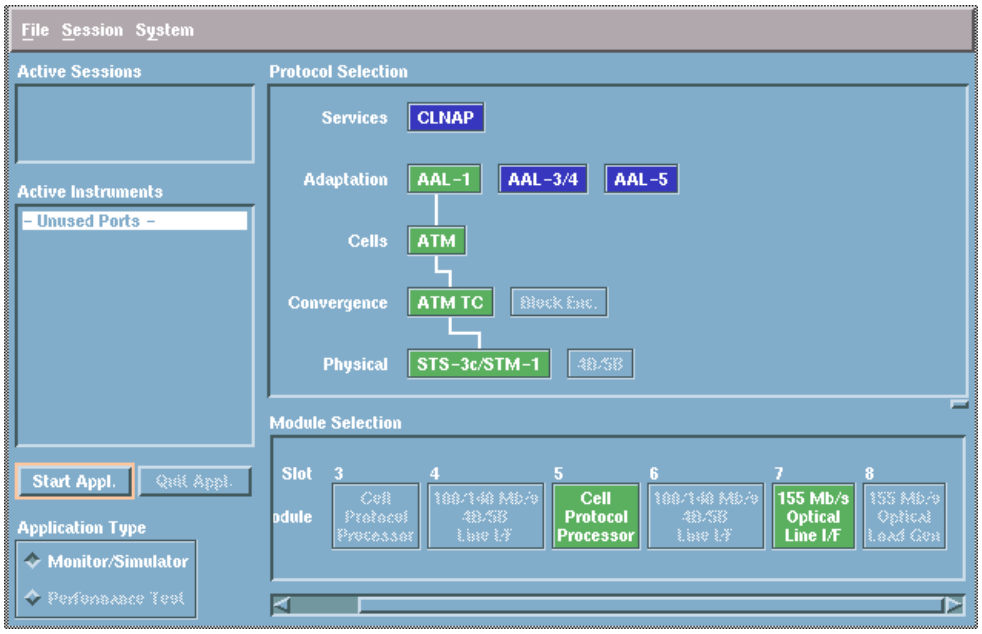

Abbildung 8.13: Vorbereitung einer Messung auf dem AAL1

Die beiden Beispiele zeigen die Konfigurationen, wie sie für die Messungen am COSY-Switch eingesetzt wurden.

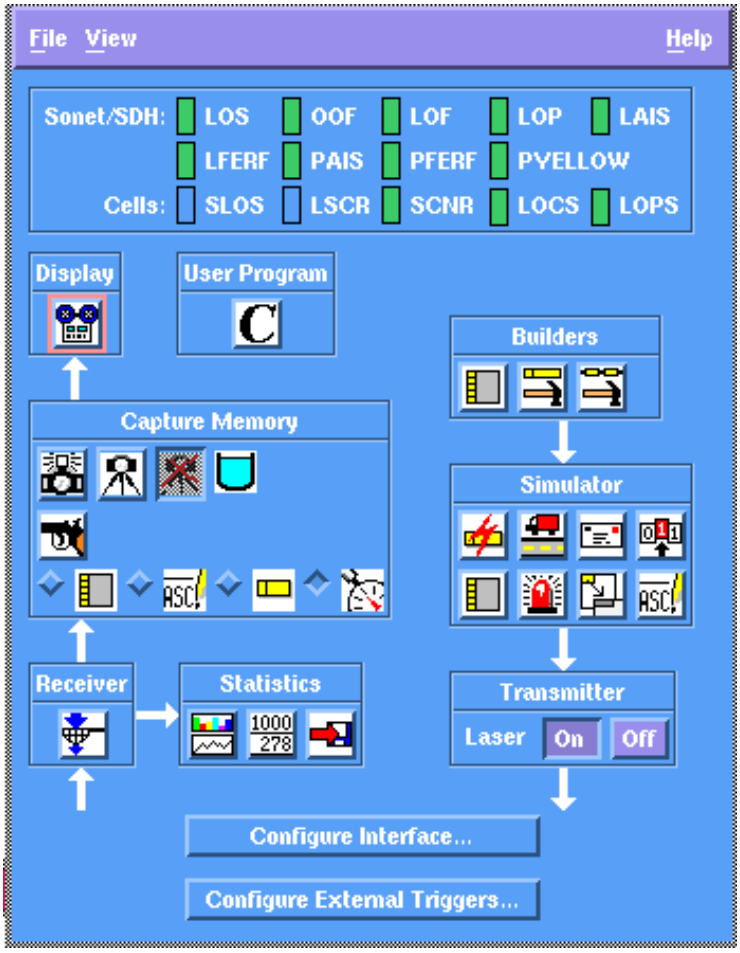

Abbildung 8.14: Konfiguration des HP-Cell Protocol Processors

Die eigentliche Sitzung zur Messung wird aufgrund der eingestellten Konfiguration über ein Steuerungsmenü des CPP gestartet, dessen GUI in Abbildung 8.14 zu sehen ist.

8.4.4 Grundlegende Operationstests

8.4.4.1 Konfiguration des getesteten COSY-Systemes

Das vom IAI zum Aufbau seines ATM-Pilotnetzes erworbene System der Karlsruher Firma HiLAN GmbH ist ein ATM-Switch mit drei SDH STM-1-Ports in optischer Ausführung für Multimode-Kabel mit SC-Konnektoren. Der Switch intern arbeitet mit einer blockierungsfreien Matrix und bietet 2,5 Gbit/s interne Bandbreite. In dem eigentlichen ATM-Switch, dem Modul „COSY-GIGA“, können bis zu vier sogenannte „Cell-Packs“, ATM-Ports unterschiedlicher physikalischer Ausprägung, mit maximal 622 Mbit/s Brutto-Bandbreite pro Port eingebaut werden. Daneben ist mit dem Modul „COSY-MEGA“ ein Übergang in herkömmliche Netze möglich. Die Konfiguration für das IAI weist im MEGA-Board vier sogenannte „Frame-Packs“, Anschlüsse für herkömmliche Netze, für jeweils zwei 10Base2-BNC Ethernet-Ports auf.

8.4.4.2 Test der Operabilität und Interoperabilität

Das COSY-GIGA-System sollte in einem ersten Test auf seine Operabilität und die Interoperabilität hin untersucht werden.

Dies geschah dadurch, daß der Switch zunächst in das bestehende ATM-Netz des FOKUS eingegliedert wurde. Die Interoperabilität wurde auf diese Weise gleich mit unter Beweis gestellt, da das ATM-Netz an sich schon eine Herstellervielfalt aufweist. Der COSY-Switch arbeitete einwandfrei mit der verwendeten Workstation und den vorhandenen fünf Switches von Fore (ASX-200, ASX-100), Siemens (HiCom ATM-P), Cisco (A100) und Synoptics (LattisCell 10124S) zusammen. Eine erste Loop-Back Laufzeitmessung von der Workstation über einen Fore ASX-200 zu COSY und zurück (nochmals über den ASX-200) ergab eine Roundtrip-Zeit von 52 µs. Wurde die Rückführung bereits hinter dem ASX-200 vorgenommen (Durchlauf von 2× Workstationadapter, 2× ASX-200) betrug die Verzögerung 29 µs. Der COSY-Switch im realen Betrieb wurde also mit 23 µs Verzögerung gemessen.

Im Laufe der Tests wurde jeder der drei Ports des COSY-GIGA wenigstens einmal benutzt. Grundsätzlich konnte die Operabilität jedes Ports gezeigt werden, obwohl einzelne Fehlfunktionen auftraten, die auf Prototypversionen der entsprechenden Interfacekarte (Patchdrähte!) zurückgeführt werden konnten.

Die Konformität zu den UNI-Richtlinien des ATM-Forum wurde außerdem durch die stichprobenartige Verwendung verschiedener VPI/VCI-Kombinationen auf den Ports geprüft. Da der Switch keine Signalisierung unterstützt, wurden die Verbindungen jeweils als PVCs eingerichtet. Es gab keine VPI/VCI-Werte, die der Switch nicht unterstützt hätte.

8.4.4.3 Langzeit-Stabilitätstest

Zum Nachweis der Stabilität des Switch-Betriebes wurde eine Langzeitmessung von 17 Stunden und 6 Minuten durchgeführt.

Eine CLNAP-PDU (*Connectionless Network Access Protocol*) wurde von CPP über AAL3/4 zu einer 3 Zellen langen Sequenz transformiert. Diese Sequenz wurde mit einer konstanten Bandbreite von 131,79 Mbit/s (88 % Auslastung des Anschlusses) zyklisch wiederholt über den ATM-Switch übertragen.

Während der gesamten Versuchdauer wurden im Empfänger Zähler geführt, im Einzelnen für:

- die Anzahl der vom CPP ausgegebenen Zellen: 19,158441 $\cdot 10^9$
- die Anzahl der empfangenen Zellen in der SAR-Subschicht: 19,158 $\cdot 10^9$
- die Anzahl der empfangenen Zellen in der ATM-Schicht: 21,770929 $\cdot 10^9$
- die Anzahl der reassemblierten CLNAP-PDUs: 6,3861469 $\cdot 10^9$
- die Anzahl der „Unassigned Cells“: 0,0
- Zahl der falschen Header, Cell Loss, Corrected Headers, SAR Errored Cells: 0,0

Der COSY-Switch erwies sich damit als äußerst stabil.

8.4.5 Leistungsmeßreihen

8.4.5.1 Meßmethoden und Kennzahlen

Die anschließenden detaillierten Leistungsmessungen wurden auf der Basis des AAL1 vorgenommen. In jede vom CPP generierte Zelle wurde als ATM-Payload ein Zeitstempel eingeschrieben. In Verbindung mit der Zellenfolgenummer konnte er zur Ermittlung der folgenden Kennzahlen benutzt werden:

- „Cell Delay“:

  Die Durchlaufverzögerung einer Zelle wird dadurch ermittelt, daß der als Payload transportierte Absende-Zeitstempel der Zelle von der Zeit abgezogen wird, zu der die Zelle am Analysator einläuft.

  Da diese Differenz nur eine aktuell eingelaufene Zelle ohne Rücksicht auf ihre Folgenummer betrachtet, verändern verlorene Zellen das Meßergebnis nicht. Dies ist sinnvoll, da über die Kennzahl die reine Laufzeit der Zellen durch die aktuelle Konfiguration ermittelt werden soll.

- „Cell Interarrival Delay“:

  Zur Bestimmung dieses Wertes wird die Ankunftszeit der aktuell eingelaufenen Zelle von der Ankunftszeit der letzten eingelaufenen Zelle davor abgezogen. Auf diese Weise ermittelt man den zeitlichen Abstand von zwei Zellen der gleichen Verbindung.

  In diese Kennzahl fließt die Qualität des Netzes insofern ein, daß bei Verlust von Zellen, die ja bei AAL1 mit einem isochronen Raster in konstanter bitrate ausgesendet werden, der Zellverlust automatisch den Abstand der einlaufenden Zellen vergrößert, also die gemessene Cell Interarrival Delay.

- „Cell Loss Ratio“:

  Durch Vergleich des Folgezählers der Zellen beim Empfang kann ermittelt werden, wieviele Zellen „auf der Strecke geblieben“ sind.

  Die Anzahl verlorener Zellen allein ist jedoch nicht sehr aussagekräftig; sie muß in Verbindung gebracht werden mit der Gesamtzahl der transportierten Zellen, um als Kennzahl geeignet zu sein. Dies geschieht in der „Cell Loss Ratio“, die das Verhältnis von verlorenen Zellen zur Gesamtzahl der Zellen angibt.

8.4.5.2 Meß-Systematik

Für die Beurteilung des gemessenen Systemes ist es nicht hinreichend, die Kennzahlen in nur einer Messung bei einer Konfiguration durchzuführen.

Die Kennzahlen wurden deshalb in einer Basismessung an einer Kombination von Eingangs- und Ausgangsport bei verschiedenen Belastungen auf einer Verbindung ermittelt.

Das Testszenario wurde dann zunächst dadurch verändert, daß andere Kombinationen von Eingangs- und Ausgangsport eingesetzt wurden.

Die Kombination der Ports ist von der üblichen Anschlußart eines Switches her so, daß Ein- und Ausgang auf einer Platine sitzen („Cell-Pack“ im COSY-System).

Um den Switchvorgang im Gerät mehr an der Wirklichkeit zu orientieren, wo der Sender einer Nachricht nicht selbst auch Empfänger ist (*„Loopback“*), wurde in die übliche Anord-

nung zunächst durch eine Kabelschleife ein zweites Cell-Pack einbezogen (Abbildung 8.15, links). Hierdurch konnte insbesondere der Einfluß der SDH-Chips auf die Verzögerung untersucht werden. Als Ein-Ausgangspaare bleiben dabei jedoch immer noch die Ports jeweils eines Cell-Packs verbunden.

Um auszuschließen, daß gar kein eigentlicher Switching-Vorgang stattfindet, sondern der Switch die Loopback-Charakteristik aufgrund einer Optimierung erkennt, wurde nun die Anordnung so abgeändert, daß in jedem Fall ein Switching über die Backplane des COSY-GIGA durchgeführt werden mußte (Abbildung 8.15, rechts).

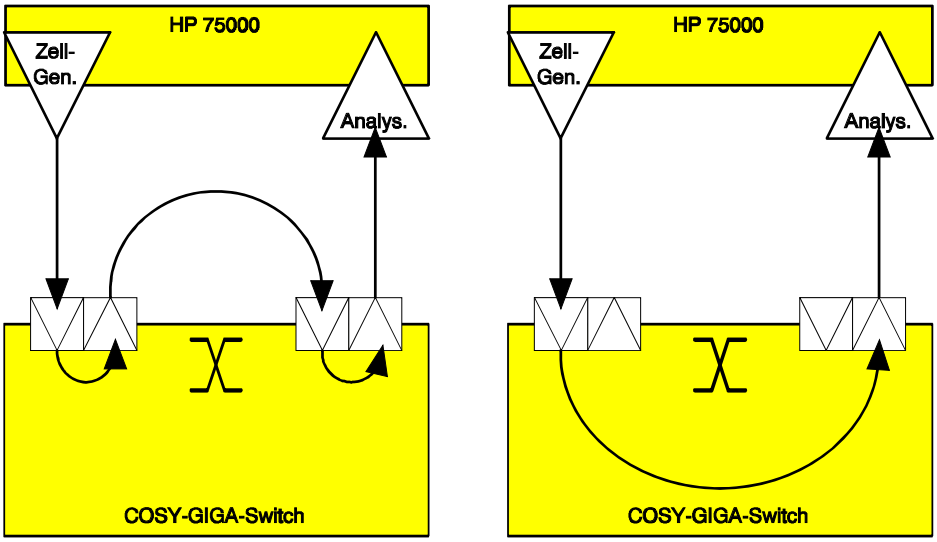

Abbildung 8.15: Testanordnung zum Erzwingen des Switchens über die System-Backplane

In der letzten Testphase wurde die Belastung des Anschlusses einem späteren Einsatz entsprechend simuliert. Dazu wurden die in dieser Arbeit berechneten erforderlichen Raten herangezogen, um mit dem CPP über die typischen AALs einen gemischten Verkehr zu generieren und eine weitere Meßreihe durchzuführen.

8.4.5.3 Meßergebnisse

In den beiden folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Messungen aufgeführt. Sie enthalten die von Hand direkt von der Anzeige des Testers (Abbildung 8.16) übertragenen Werte.

Abbildung 8.16: Anzeige der Kennzahlen auf dem GUI des Testsystemes

Für die richtige Beurteilung der Zahlen ist jedoch der Einfluß des HP 75000 und des CBL-Konverters auf die Verzögerungen abzurechnen, die vorab bestimmt wurden:

- Internes „Cell Delay“ (CD) der Testanordnung:
  Mittelwert: 3,24377 µs; Maximum: 3,3 µs; Minimum: 3,2 µs
- „Cell Interarrival Delay“ (CID) der Testanordnung:
  Mittelwert: 2,83114 µs; Maximum: 3,3 µs; Minimum: 2,7 µs

Tabelle 8.1: Cell Delay des COSY-GIGA-Switches

allokierte Bandbreite	10 % 14,98 Mbit/s	25 % 37,44 Mbit/s	50 % 74,88 Mbit/s	75 % 112,32 Mbit/s	100 % 149,76 Mbit/s
Delay	[µs]				
Durchschnitt:	27,3225	27,3894	27,3900	28,0459	30,9156
Maximum:	29,7	29,3	30,4	30,7	31,2
Minimum:	23,7	25,5	23,8	24,1	30,6
Varianz:	1,76178	2,08312	1,43398	1,72442	0,065607

Tabelle 8.2: Cell Interarrival Delay des COSY-GIGA-Switches

allokierte Bandbreite	10 % 14,98 Mbit/s	25 % 37,44 Mbit/s	50 % 74,88 Mbit/s	75 % 112,32 Mbit/s	100 % 149,76 Mbit/s
Delay	[µs]				
Durchschnitt:	28,6567	11,325	5,66242	3,77578	2,83116
Maximum:	34,3	14,7	8,7	8,7	3,3
Minimum:	25,0	8,1	2,7	2,7	2,7
Varianz:	4,74098	3,50954	2,79198	2,11758	0,044875

Der Switch verhält sich nach den Daten der ersten Tabelle also in jedem Lastbereich gleich gut. Man kann von einer konstanten Zellverzögerung von ca. 24,5 µs sprechen, was die anfängliche Abschätzung aus dem realen Einsatz im heterogenen Netz bestätigt. Damit liegt er nach Auskunft des ATC im ersten Drittel aller dort bisher gemessenen Switches.

Die zweite Auswertung zeigt, daß der Switch sehr stabil bezüglich des Jitters überträgt. Die Varianzen sind für die angemessene Realisierung eines AAL1-Dienstes hinreichend klein.

Für die dritte Kennzahl ist das Aufzeichnen einer Tabelle überflüssig, da in keinem Versuch ein Zellverlust feststellbar war. (Die Testreihe mit dem defekten SDH-Board soll nicht in die Auswertung einfließen.)

Zu den Varianten der oben aufgeführten Grundmessung ist auszusagen:

- Die Werte zeigten keine Schwankung bei Verwendung anderer Ports. Nur ein Cell-Pack fiel aus dem Rahmen, allerdings so deutlich, daß klar ein Verarbeitungsfehler und keine strukturellen Eigenschaften die Ursache war. Die Cell-Packs sind noch nicht im endgültigen Design erstellt und durch die vorhandenen Patch-Drähte können Ausfälle verursacht werden.

- Die Zahlen veränderten sich um einen konstanten Wert von 1 µs, wenn statt eines Cell-Packs der Durchgang durch zwei Cell-Packs gemessen wird. Dies ist in der Verwendung von SDH-Rahmen zu sehen, die in jedem Board erst ausgepackt und wieder neu verpackt werden müssen. Der Zuwachs der Bearbeitungszeit beim Wechsel von TAXI- auf SDH-Line-Interfaces konnte in unabhängigen Tests bei Fore-Komponenten mit 5 µs ermittelt werden.
- Das erzwungene Switchen über die Backplane des COSY-Systemes brachte erwartungsgemäß keine Veränderung der Meßergebnisse.

8.4.6 Messungen unter simulierten Bedingungen eines Telepräsenzsystemes

Der Einsatz des Switches in einem Telepräsenzsystem wurde dadurch simuliert, daß die aus den typischen Komponenten „Regelung“ und „Video“ herrührenden Lasten vom CPP des HP 75000 erzeugt wurden:

- Für die „Regelungslast“ wurde ein Sägezahnprofil auf AAL5 erzeugt, das in Bursts die geforderte Kapazität von 32 % auf 88 % der Bandbreite erhöhte. Zwischen die Bursts wurden *Gaps* (Lücken) von jeweils 2 Zellen gelegt.
  Die geforderte Bandbreite ist im Vergleich zu den für MONSUN/ARTEMIS ermittelten Werten mit Absicht deutlich erhöht, damit potentielle Effekte überhaupt festgestellt werden können.
  Versuchstechnisch wurden diese Zellen von den Lastgeneratoren des HP-Tools erzeugt.
- Für die „Video-Last“ wurde mit AAL1 der für die Auswertung eingesetzte Verkehr in konstanter Bitrate von 54 % der Kanalkapazität erzeugt. Diese Last entspricht mit 80,87 Mbit/s etwa einem nach CCIR-Substandard 3 digitalisierten Video-Signal.

Der so erzeugte Verkehr wurde auf ein Line-Interface des COSY-Systemes gelegt. Dies ist zwar nicht ganz realistisch dem Einsatz nachgebildet, wo nach zwei getrennten Eingängen (MEH und VEH) die Zellen erst am Ausgang des Switches auf den Anschluß der MMI-Workstation gemultiplext werden. Diese Tatsache ist jedoch insofern unerheblich, als es sich bei dem Eingang in der Simulation und dem Ausgang in der Realität um die gleichen Line Interfaces handelt. Letztlich ändert sich nur der Zeitpunkt des Multiplexens (vor dem Switch-Vorgang statt in Realität nach dem Switch-Vorgang).

Die derart durchgeführten Messungen zeigten keine Abweichung von den Zahlen im vorhergehenden Abschnitt.

Das ist insofern nicht verwunderlich, als für die Ermittlung der Meßwerte das CBR-Signal der AAL1 mit der eingangs beschriebenen Zeitstempel-Methode verwendet werden mußte. Es wurde also die Grundlast zur Messung herangezogen. Die wechselnde Last, die aufgrund der Überlastspitzen nicht voll befriedigt werden kann, konnte zur Auswertung technisch nicht herangezogen werden.

Immerhin konnte gezeigt werden, daß die Qualität einer Verbindung durch Störeinflüsse burstartiger, anderer Verbidungen nicht beeinträchtigt wird.

Solche Situationen sind jedoch im lokal geprägten Einsatz von ARTEMIS/MONSUN nicht zu erwarten, wenn – wie in dieser Arbeit geschehen – die Komponenten des Gesamtverkehrs nach dem Maximalprinzip abgeschätzt werden und beim Verbindungsaufbau auch die Maximalwerte für die Entscheidung herangezogen werden, ob eine Verbindung noch aufbaubar ist oder abgelehnt werden muß.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die moderne Medizin benötigt für die Durchführung sensibler, minimal invasiver Eingriffe mehr und mehr unterstützende Techniken. Die Informatik kann dafür unter anderem im Bereich der Robotik und der Telematik Beiträge leisten.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten vorhandene Konzepte studiert werden, die aus dem reichen Erfahrungsschatz der Fernhantierung in großtechnischen Anlagen heraus entwickelt wurden. Kennzeichnend für sie ist die Verbindung von Konzepten aus der Robotik und Echtzeitprogrammierung mit Konzepten aus der Telematik.

Telepräsenzsysteme, die für den medizinischen Einsatz entwickelt werden, unterliegen besonders strengen Echtzeitbedingungen. Sie sind darüber hinaus echte multimediale Anwendungen.

Im Rahmen der präzisen Analyse der vorhandenen Konzepte konnte ermittelt werden, daß die strengen Randbedingungen des medizinischen Einsatzfeldes sich nicht in Höchstanforderungen auswirken. Insbesondere konnte gezeigt werden, daß ein auf unabhängigen Kanälen beruhendes Konzept voll genügt. Durch die geschickte Struktur des Gesamtsystemes sind die Kanäle fast ausschließlich unidirektional. Die beiden Phänomene „Unabhängigkeit“ und „Unidirektionalität“ erleichtern das Einhalten der strengen Echtzeitbedingungen, indem sie erhöhte Parallelität ermöglichen.

ATM-Netze stellen eine hohe Übertragungskapazität bei geringer Verzögerung zur Verfügung. Theoretische Berechnungen mit den ermittelten Anforderungen führen zu dem Schluß, daß die heute mit ATM erhältliche Übertragungskapazität von 155 Mbit/s bis zum Endgerät durchaus in der Lage ist, sowohl das kontinuierliche Medium „Video“ (ca. 82 Mbit/s bis zu 103 Mbit/s und 108 Mbit/s) als auch das diskrete Medium „Regelung“ (ca. 0,5 Mbit/s) in einem Anschluß zu befriedigen. Damit wird das Konzept von ARTEMIS mit einem zentralen „MMI-Server“ durchführbar.

Die theoretisch ermittelten und praktisch gemessenen Verzögerungen von 25 µs bis ca. 83 ms für die verschiedenen Ebenen und Medien liegen im Bereich des tolerierbaren. Es konnte gezeigt werden, daß nicht die Netztechnik an sich der entscheidende Einflußfaktor für die Verzögerungen ist, sondern die Weiterverarbeitung vor allem der kontinuierlichen A/V-Daten auf der Anwendungsebene.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit gingen von einem sehr lokalen System aus, in dem ein oder zwei ATM-Switches für nicht mehr als eine „Operation“ gleichzeitig zur Verfügung stehen. Unter diesen Voraussetzungen konnte „großzügig“ mit den Ressourcen umgegangen werden.

An dieser Stelle können, an die vorliegende Arbeit anschließend, Anpassungen im Hinblick auf ein größeres Netz und mehrere Operationssitzungen gleichzeitig vorgenommen werden. Schlagworte wie „garantierte Dienstgüte“, „Traffic Shaping“ und „Ressourcenmanagement“ spielen dann eine wichtige Rolle.

Weitergehende Untersuchungen sind sicher auch im Hinblick auf die Systemsicherheit notwendig. Zum einen muß die Betriebssicherheit bei einer wirklichen Operation durch Redundanz garantiert werden können, zum anderen ist auch die Datensicherheit zu untersuchen, da reale Anwendungen im Bereich sehr sensibler Daten angesiedelt sein werden.

10 Literatur

/AtBr94/ A. Atkinson, A. Brinkmann, J. L. van den Berg, J. J. A. van Dijk, F. C. I. van den Eijnden, C. P. H. M. Lavrijsen, S. Louis, R. Macfadyen, S. Murphy, E. M. Scharf, D. De Vleeschauwer, R. J. F. de Vries, S. B. Winstanley, S. Wittevrongel. ***Results of Experiments on Performance Assessment using Real Applications.*** Philips Report, EXPLOIT Document R2061/EXP/SW3/DS/P/030/b1. Philips Kommunikations Industrie AG, Nürnberg, 31.12.1994

/BeBi94/ Christoph Berhardt, Ernst Biersack. ***Video Server Architectures: Performance and Scalability.*** In: Proceedings of the 4th Open Workshop on High Speed Networks, S. 220–227, Brest, September 1994.

/Beck92/ Klaus Becker. ***Entwurf und Realisierung einer Bedienschnittstelle für den bedienergeführten Betrieb von MONSUN.*** Primärbericht Nr. 42.03.01P11B. Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Oktober 1992.

/Bley93/ P. Bley. ***Ziele und Organisation des Projektes Mikrosystemtechnik des KfK.*** In: Proceedings des *1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik*, S. 9–18, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 23./24. September 1993.

/Brei91/ Helmut Breitwieser. ***Übersicht über das Universalmaster-Steuerungssystem MONSUN.*** Primärbericht Nr. 17.03.01P10F. Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, November 1991.

/Brei93/ Helmut Breitwieser. ***Funktionen, Betriebsarten und Bedienoberfläche des Universalmaster-Steuerungssystems MONSUN.*** Primärbericht Nr. 41.06.01P05A. Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Februar 1993.

/BrSc90/ H. Breitwieser, H. Schufflitz, M. Huber. ***Bedienung von DISTEL.*** Primärbericht Nr. 17.03.01P15A. Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Oktober 1990.

/BuSc94/ Markus Burak, Falk Schulz, Thomas Luckenbach. ***Performance Experiments with Inhouse ATM Technology.*** In: Proceedings der ICCS94, 14.–18. November 1994, Singapore.

/Cell94/ Cellware Breitband Technologie GmbH. ***Provisional AAL1 Handbook.*** Cellware GmbH, Berlin, September 1994.

/CoLe89/ Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest. ***Introduction to Algorithms.*** Second Printing. MIT Press, Cambridge, 1990.

/Enss94/ Jürgen Enssle. ***Modelling and Statistical Multiplexing of VBR MPEG Compressed Video in ATM Networks.*** In: Proceedings of the 4th I.W.S. Meeting '94, S. 59–67.

/Eppe94/ Klaus Eppele. ***ATM: Migrationspfade und Projekte.*** In: DATACOM 8/1994, S. 112–118. Datacom Verlag, Bergheim, August 1994.

/Eppe95/ Klaus Eppele. ***Die LAN-Emulation ist der letzte Meilenstein auf dem Weg zu ATM.*** In: Computerwoche 5(95), S. 40f., 3. Februar 1995.

/Flan92/ James L. Flanagan. ***Speech Technology and Computing: A Unique Partnership.*** In: IEEE Communications Magazine, S. 84–89, Mai 1992.

/GhHu93/ Mohammad Ghanbari, Charles J. Hughes. ***Packing Coded Video Signals into ATM Cells.*** In: IEEE/ACM transactions on Networking, Vol. 1(5), S. 505–508, Oktober 1993.

/GiGu91/ Michael Gilge, Riccardo Gusella. ***Motion Video Coding for Packet-Switching Networks — an Integrated Approach.*** In: SPIE Vol. 1605, Visual Communications and Image Processing '91: Visual Communication, S. 592–603.

/HäHu94/ Rainer Händel, Manfred N. Huber, Stefan Schröder. ***ATM Networks. Concepts, Protocols, Applications.*** 2nd Edition, Addison-Wesley, Workingham, 1994.

/Hofm93/ Georg Rainer Hofmann. ***Imaging: Bildverarbeitung und Bildkommunikation.*** Springer-Verlag, Berlin, 1993.

/HoNe95/ Elmar Holler, Torsten Neck. ***An ATM-Based Local Communication System for Telesurgery.*** In: Proceedings of the *Medicine Meets Virtual Reality III* Conference, San Diego, 19.–22. Januar 1995, S. 137–146, IOS Press, January 1995.

/HoTr93/ E. Holler, R. Trapp. ***Ein experimenteller Telemanipulator für die Minimal-Invasive Chirurgie.*** In: Proceedings des *1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik*, S. 94–101, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 23./24. September 1993.

/ISO84/ International Standardization Organisation. ISO IS 7498: Information Processing Systems, ***Open Systems Interconnection, Basic Reference Model.*** ISO, Oktober 1984.

/KiNa91/ Taizo Kinoshita, Tomoko Nakahashi, Masaaki Takizawa. ***Variable Bit-rate HDTV Coding Algorithm for ATM Environments in B-ISDN.*** In: SPIE Vol. 1605, Visual Communications and Image Processing '91: Visual Communication, S. 604–613.

/Koch77/ Günter Koch, Ulrich Rembold. ***Einführung in die Informatik für Ingenieure und Naturwissenschaftler.*** Teil 1.Carl Hanser Verlag, München, 1977.

/Krüg92/ Gerhard Krüger. ***Telematik II.*** Kopien der Vortragsfolien der gleichnamigen Vorlesung an der Universität Karlsruhe, Sommersemester 1992. Universität Karlsruhe, 1992.

/KrZi93/ Gerhard Krüger, Martina Zitterbart. ***Hochleistungskommunikation.*** Folienmanuskript zur gleichnamigen Vorlesung im Sommersemester 1993. Universität Karlsruhe, 1993.

/Kühn94/ Uwe G. Kühnapfel. ***Realtime Graphical Computer Simulation for Endoscopic Surgery.*** In: Proceedings of the *Medicine Meets Virtual Reality II* Conference. San Diego, California, 27.–30. Januar 1994, S. 114–116.

/Kyas93/ Othmar Kyas. ***ATM-Netzwerke.*** DATACOM-Verlag, Bergheim, 1993.

/Lack94/ Hans Lackner. ***ATM: Stand der Normierung.*** In: DATACOM 6/1994, S. 130–137. Datacom Verlag, Bergheim, Juni 1994.

/LaEp94/ Hans Lackner, Klaus Eppele. ***ATM-Tag.*** Seminarunterlagen der Firma Hi-LAN GmbH, Karlsruhe, 23. August 1994.

/LoKr93/ Peter C. Lockemann, Gerhard Krüger, Heiko Krumm. ***Telekommunikation und Datenhaltung.*** Hanser Verlag, München, 1993.

/LuRu94/ T. Luckenbach, R. Ruppelt, F. Schulz. ***Performance Experiments within Local ATM Networks.*** In: Proceedings der EFOC&N Conference, 21.–24. Juni 1994, Heidelberg.

/Mühl93/ Max Mühlhäuser. ***Telematik I.*** Kopien der Vortragsfolien der gleichnamigen Vorlesung an der Universität Karlsruhe, Wintersemester 1992/93. Universität Karlsruhe, 1993.

/Neck93/ Torsten Neck. ***Management von DQDB-Netzen.*** In*: Netzwerk-Management und Hochgeschwindigkeitskommunikation*, Seminare im Sommersemester 1993, S. 55–77. Interner Bericht 21/93, Institut für Telematik an der Universität Karlsruhe, August 1993.

/Neck94/ Torsten Neck. ***Entwurf und Implementierung einer Hypertextkomponente für die LIGA-Prozeßmodellierung.*** Studienarbeit am Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH. Universität Karlsruhe, März 1994.

/OtWi93/ Thomas Ottmann, Peter Widmayer. ***Algorithmen und Datenstrukturen.*** 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, BI-Wissenschafts-Verlag, Mannheim, 1993.

/Pryc94/ Martin de Prycker*.* ***Asynchronous Transfer Mode. Die Lösung für Breitband-ISDN.*** Prentice Hall, New York, 1994.

/Psch77/ Willibald Pschyrembel. ***Klinisches Wörterbuch.*** 253. erweiterte Auflage, Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 1977.

/ReBe92/ Amy R. Reibman, Arthur W. Berger. ***On VBR Video Teleconferencing over ATM Networks.*** IEEE Communications Magazine, S. 314–319, 1992.

/ReLe94/ Ulrich Rembold, Paul Levi. ***Realzeitsysteme zur Prozeßautomatisierung.*** Hanser Verlag, München, 1994.

/RFC1006/[43] Network Working Group, Request for Comments 1006: ***ISO-Transport Service on Top of the TCP.*** Version 3. Marshall T. Rose, Dwight E. Cass, Northrop Research and Technology Center, May 1987.

/RFC1483/ Network Working Group, Request for Comments 1483*: Multiprotocol Encapsulation over ATM Adaption Layer 5.* Juha Heinanen, Telecom Finland, July 1993.

/RFC1577/ Network Working Group, Request for Comments 1577*: Classical IP and ARP over ATM.* M. Laubach, Hewlett-Packard Laboratories, January 1994.

/RiWe92/ Bill Rieken, Lyle Weiman. ***Adventures in UNIX Network Applications Programming.*** John Wiley & Sons Inc., New York, 1992.

/Schu91/ H. Schufflitz. ***Richtlinien für die Kommunikation zwischen MEH und AEH über LAN.*** MONSUN-Arbeitspapier vom 14.03.1991

/Sieg94/ Gerd Siegmund. ***ATM – die Technik des Breitband-ISDN.*** 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, v. Decker Verlag, Heidelberg, 1994.

/Stei93/ Ralf Steinmetz. ***Multimedia-Technologie.*** Einführung und Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin, 1993.

/Stre94/ Wolfgang Strehlow. ***Abschlußbericht zur Projektarbeit am Institut für Angewandte Informatik des KfK im Aufbaustudium zum Euromaster-Telekommunikation.*** IHK-Bildungszentrum Karlsruhe GmbH, Oktober 1994.

/Tane92/ Andrew S. Tanenbaum. ***Computer-Netzwerke.*** 2. Aufl., Wolframs Fachverlag, Attenkirchen, 1992.

[43] Die RFCs – Requests for Comment – stellen die Quasi-Standards der „Internetgemeinde“ dar. Sie werden üblicherweise nicht gedruckt, sondern können in elektronischer Form direkt von verschiedenen aFTP- oder Mail-Servern im Internet bezogen werden. Mit vielen Linux-Distributionen oder als Standard-Sammlung sind sie auch auf CD erhältlich. Offizielles RFC/FYI-Archiv (FYI bedeuted „For Your Information“) ist der FTP-Server ds.internic.net des Internet Network Information Centers. Von dort sind auch Papierfassungen durch e-Mail an info@is.internic.net oder Mail-Versionen durch e-Mail an mailserv@ds.internic.net erhältlich.

/TiPr92/ Walter F. Tichy, Lutz Prechelt. ***Softwaretechnik.*** Folienmanuskript zur gleichnamigen Vorlesung im Wintersemester 1992/93. Universität Karlsruhe, 1992.

/Wett93/ Horst Wettstein. ***Systemarchitektur.*** Hanser Verlag, München, 1993.

/WeWe93/ P. H. Westerink, J. H. Weber, D. E. Boekee, J. W. Limpers. ***Adaptive Channel Error Protection of Subband Encoded Images.*** In: IEEE transactions on Communications, Vol. 41(3), S. 454–459, März 1993.

11 Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Akronyme

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
A/D-Wandler	Analog nach Digital Wandler
A/V	Audio/Video
AAL	ATM Adaption Layer; ATM Anpassungsschicht
ACK	Acknowledgment; Bestätigung
ACSE	Association Control Service Element
AEH	Arbeitseinheit
API	Application Programming Interface; Programmierschnittstelle für die Anwendungen
ARP	Address Resolution Protocol
ARTEMIS	Advanced Robotics and Telemanipulation System for Minimally Invasive Surgery
ATC	ATM Test and Conformance Center der GMD-Fokus, Berlin
ATM	Asynchronous Transfer Mode, Asynchroner Übertragungsmodus
AU-4	Administrative Unit Number 4; Verwaltungseinheit Nr. 4
AUEH	Audio-Einheit
AUI	Attachment Unit Interface
AVEH	Audio-/Video-Einheit
B-ISDN	Broadband ISDN; Integriertes, digitales Breitbandnetz
BAS	Bild-Austast-Synchronsignal
BC	Broadcast; Verteilsendung
BNC	Bayonet Nut Coupling; Bayonettverschluß mit Raste
BRM	Basic Reference Model; Basis-Referenzmodell
C-4	Container Number 4; Typ-4 Behälter
CASE	Common Application Service Element
CBR	Constant Bitrate; konstante Bitrate
CCD	Charge Coupled Device
CCIR	Consultative Committee on International Radio
CCITT	Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique
CD	Cell Delay; Zellenverzögerung
CDV	Cell Delay Variation; Streuung des Zellabstandes
CID	Cell Interarrival Delay; Zellabstands-Verzögerung
CLM	Connectionless Mode
CLNAP	Connectionless Network Access Protocol; Protokoll für den verbindungslosen Netzwerkzugang
CLP	Cell Loss Priority; Kennzeichnungsbit für Zellverwerfbarkeit
CLS	Connectionless Server; Diensterbringer für verbindungslosen Dienst
CODEC	Coder-Decoder
COSY	Cell Oriented System
CP	Control Program; Steuerungs-Programm
CPCS	Common Part Convergence Sublayer; Allgemeine Konvergenz-Unterschicht
CPP	Cell Protocol Processor
CPU	Central Processing Unit; Zentralprozessor

CRC	Cyclic Redundancy Check; zyklisches Redundanzfehler-Prüfverfahren
CS	Convergence Sublayer; Konvergenz Subschicht
CSI	Convergence Sublayer Indicator
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
D/A-Wandler	Digital nach Analog Wandler
D2-MAC	Duobinary Multiplexed Analogue Components
DAC	Digital to Analogue Converter; D/A-Wandler
DCT	Diskrete Cosinus Transformation
DEMUX	Demultiplexer
DISTEL	Digitales Steuerungssystem für Telemanipulatoren
DKFZ	Deutsches Krebsforschungszentrum, Heidelberg
DMA	Direct Memory Access
DoD	Department of Defense
DOS	Disk Operating System
DPCM	Differential Pulse Code Modulation
DQDB	Distributed Queue Dual Bus (IEEE 802.6)
EFE	Energie-Ferneinschaltung
EFS	Endoskop Führungssystem
EMSM-2	Elektrischer Master-Slave-Manipulator 2
FBAS	Farb-Bild-Austast-Synchronsignal
FC	Fiber Channel
FDDI	Fibre Distributet Data Interface
FEC	Forward Error Control; Vorausschauende Fehlersicherung
FOKUS	Forschungszentrum für Offene Kommunikationssysteme
FTP	File Transfer Protocol
FYI	For Your Information
GAN	Global Area Network; weltumspannendes Netz
GB	Großbritannien
GFC	Generic Flow Control; generische Flußkontrolle
GMD	Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH
GUI	Graphical User Interface; grafische Benutzeroberfläche
HDTV	High Definition Television; hochauflösendes Farbfernsehen
HEC	Header Error Control; Fehlerprüfsequenz des ATM-Zellkopfes
HPG	Handprogrammiergerät
IAI	Institut für Angewandte Informatik
IBCN	Integrated Broadband Communications Network; integriertes Breitband-Kommunikationsnetz
IBM	International Business Machines Incorporate
ICI	Interface Control Information
IDU	Interface Data Unit; Schnittstellen-Dateneinheit
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronical Engineers
iNA 960	Intel Network Access 960 Software
IP	Internet Protocol
IPC	Inter Process Communication, Interprozeßkommunikation
ISDN	Integrated Services Digital Network; dienstintegrierendes digitales Netzwerk
ISO	International Standardization Organisation
ISO DIS	ISO Draft International Standard

ISO IS	ISO International Standard
ITU	International Telecommunication Union
ITU-T/ITU-TS	International Telecommunication Union, Telecommunication Section (früher CCITT)
JPEG	Joint Photographic Experts Group; Vereinte Expertengruppe der Fotografen
JTM	Job Transfer and Manipulation
K_0	gesamtsystembezogenes, kartesisches Standardkoordinatensystem in MONSUN
KfK	Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
KISMET	Kinematic Simulation, Monitoring and Off-Line Programming Environment for Telerobotics
KMS	Kraft-/Momenten-Sensor
K_{TCP}	auf das Werkzeug bezogenes, kartesisches Koordinatensystem in MONSUN; der Index TCP steht hier für Tool Center Point
LAN	Local Area Network; lokales Netz
LC	Liquid Crystal; Flüssigkristall
LCD	Liquid Crystal Display; Flüssigkristall Anzeige
LLC	Logical Link Control
LWL	Lichtwellenleiter
MAC	Media Access Control
MAN	Metropolitan Area Network; Regionalnetz
MEH	Master-Einheit
MHS	Message Handling System
MIC	Minimal invasive Chirurgie
MIS	Minimal Invasive Surgery
MMI	Man Machine Interface; Benutzerschnittstelle
MOEH	Monitoring-Einheit
MONSUN	Manipulator Control System Utilizing Network Technology
MPEG	Motion Pictures Experts Group; Expertengruppe für Bewegtbilder
MS	Microsoft Incorporate
MSM	Master-Slave-Manipulator-Betrieb
MTU	Maximum Transfer Unit; größte transportierbare Einheit
MUX	Multiplexer
MV	Mitteilungsvariante
NNI	Network Node Interface; netzinterne Schnittstelle
NTSC	National Television Systems Committee
OAM	Operation and Maintenance; Betrieb und Wartung
OP	Operationssaal
OS/2	Operatingsystem /2; Betriebssystem /2
OSI	Open System Interconnection
PAL	Phase Alternating Line; Phasenspringendes Signal
PBX	Private Branch Exchange; Nebenstellen-Telefonanlage
PC	Personal Computer
PCI	Protocol Control Information
PCM	Pulse Code Modulation
PDU	Protocol Data Unit; Protokolldateneinheit
PHY	Physical Layer; phsikalische Schicht
PL-Zelle	Physical-Layer-Zelle
PM	Physical Medium; physikalisches Medium

POH	Path Overhead; Pfadverwaltungsinformation
PT	Payload Type; Nutzdatentyp
PTI	Payload Type Identifier; Nutzlast Typennummer
PVC	Permanent Virtual Channel; vordefinierter virtueller Kanal
QoS	Quality of Service; Dienstgüte
RFC	Request for Comments
ROSE	Remote Operation Service Element
RTSE	Reliable Transfer Service Element
S-ISDN	Schmalband-ISDN
S_0	Basisanschluß des S-ISDN
S_{2M}	europäische Variante des Primärmultiplex-Anschlusses im S-ISDN
SAO	Single Association Object
SAP	Service Access Point; Dienstzugangspunkt
SAR	Segmenting and Reassembling; Segmentierung und Zusammenfügen
SASE	Special Application Service Element
SCS	Switch Control Software
SDH	Synchrone Digitale Hierarchie
SDU	Service Data Unit; Dienstdateneinheit
SECAM	Sequential Coleur avec Memoire; Spiecherbehaftetes Farbfolge-Signal
SG XVIII	ITU-T Subgroup XVIII; Unterausschuß XVIII der ITU-TS
SGI	Silicon Graphics Incorporate
SMDS	Switched Multi-Megabit Data Service
SMIT	Society for Minimally Invasive Therapy; Geselschaft für minimal invasive Behandlung
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
SN	Sequence Number; Folgenummer
SNP	Sequence Number Protection
SOH	Section Overhead; Verwaltungsinformation der Sektion
SONET	Synchronous Optical Network
SPANS	Simple Protocol for ATM Network Signalling, proprietäre NNI-Signalisierung von Fore Systems, Inc.
SRTS	Synchronous Residual Time Stamp
SSCS	Service Specific Convergence Sublayer; Dienstspezifische Konvergenz-Subschicht
STM	Synchronous Transfer Mode; synchrones Übermittlungsverfahren
STM-ν	Synchronous Transport Module Type ν; Synchrones Transportmodul vom Typ ν
STP	Shielded Twisted Pair; abgeschirmte, verdrillte Kupfer-Doppelader
STS-ν	Synchronous Transport Signalling Type ν; Synchrones Übermittlungssignal vom Typ ν
SUB-D	Subminiaturstecker oder -buchse in Form des Buchstabens „D“
SVC	Signalling Virtual Channel; signalisierter virtueller Kanal
SVR4	Unix System V Release 4
T-SAP	Transport Service Access Point; Dienstzugangspunkt der Transportschicht
TAXI	Transparent Asynchronous Receive/Transmit Interface
TC	Transmission Convergence Sublayer; Subschicht der Übermittlungskonvergenz
TCP	Transmission Control Protocol
TDM	Timne Division Multiplex; Multiplex nach dem Zeitscheibenverfahren
TEH	Trackingeinheit
TP	Twisted Pair Copper; verdrillte Kupfer-Doppeladern

TP0	Transportprotokoll der ISO-Klasse 0
TP1	Transportprotokoll der ISO-Klasse 1
TP2	Transportprotokoll der ISO-Klasse 2
TP3	Transportprotokoll der ISO-Klasse 3
TP4	Transportprotokoll der ISO Klasse 4
Transceiver	Transmitter-Receiver, kombiniertes Empfangs- und Sendegerät
TUG	Tributary Unit Group; Verteileinheitsklasse
TV	Television; Fernsehen
UDP	User Datagram Protocol
UNI	User Network Interface; Benutzer Netzzugang
UNI 3.0	ATM-Forum Anwender-Zugangsvereinbarungen Version 3.0 (10.09.1993)
UNI 3.1	ATM-Forum Anwender-Zugangsvereinbarungen Version 3.1 (1994)
UNIX	Uniplex Information and Computing Service
UTP	Unshielded Twisted Pair; ungeschirmte, verdrillte Kupfer-Doppelader
VAEH	Virtuelle Arbeitseinheit
VBR	Variable Bitrate; veränderliche Bitrate
VC	Virtual Circuit/Virtual Channel; virtueller Kanal
VC-4	Virtual Container Number 4; virtueller Typ-4-Behälter
VCI	Virtual Channel Identifier; virtuelle Kanalnummer
VEH	Video-Einheit
VoD	Video on Demand; Videoverteilung auf Bestellung
VPI	Virtual Path Identifier; virtuelle Pfadnummer
WAN	Wide Area Network; Weitverkehrsnetz
X11	X-Windows System Version 11

Bedankungen

Diese Diplomarbeit wurde am Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Technik und Umwelt mit Geräten und Ausstattungen des Instituts für Angewandte Informatik durchgeführt.

Herzlich danken möchte ich:

- Herrn *Professor Dr. Gerhard Krüger,*
  dem Leiter des Instituts für Telematik an der Universität Karlsruhe, für die Ausgabe und Annahme dieser Diplomarbeit,
- Herrn *Dr. Elmar Holler,*
  dem Leiter der Abteilung Steuersysteme und Kommunikation am Institut für Angewandte Informatik für die Aufgabenstellung und die Betreuung meiner Arbeit am Forschungszentrum Karlsruhe,
- *Dipl.-Ing.* ***Georg Carle*** und ***Dr. Jochen Seitz***,
  die an der Universität Karlsruhe meine Arbeit engagiert betreut haben,
- den Mitarbeitern der Abteilung SK am Institut für Angewandte Informatik des Forschungszentrums Karlsruhe, insbesondere Herrn *Dipl.-Ing.* ***Heinz Becker***, Herrn *Dipl.-Inform.* ***Helmut Breitwieser***, Herrn *Dipl.-Mat. (FH)* ***Reinhold Oberle***, Herrn ***Dr. Udo Voges***,
- *Dipl.-Inform.* ***Hans Lackner,*** *Dipl.-Inform.* ***Klaus Eppele, Markus Pestinger***, *Dipl.-Inform.* ***Dieter Hametner*** und *Dipl.-Betriebsw. (BA)* ***Simone Knöthig***
  von der Firma HiLAN GmbH, Karlsruhe,
- *Dipl.-Inform.* ***Markus Burak,*** *Dipl.-Ing.* ***Falk Schulz*** und *Dipl.-Ing.* ***Olaf Fiebig***
  von der GMD-FOKUS in Berlin,
- Herrn *Dipl.-Inform.* ***Willi Müller*** vom Handhabungstechnik-Labor des Forschungszentrums Karlsruhe,
- *Dipl.-Betriebsw. (BA)* ***Christian Ziegenhardt,*** *Dipl.-Ing.* ***Walter Vellenzer,*** *Dipl.-Ing.* ***Jürgen Braun*** und *Dipl.-Ing.* ***Christoph Lämmle***
  von der Firma CONTROLWARE, Dietzenbach.