



# Auf dem Weg zum reaktionsschnellen Netz: Das taktile Internet

Harald Orlamünder



# Auf dem Weg zum reaktionsschnellen Netz. Das taktile Internet

## Inhalt

1	Einführung	5
1.1	Begriffsbestimmung	5
1.2	Ausgangslage	6
1.3	Untersuchung	6
2	Anforderungen	8
2.1	Betrachtete technische Bereiche	8
2.1.1	Echtzeit-Internet	8
2.1.2	Prozessautomatisierung	9
2.1.3	Industrie 4.0	9
2.1.4	Professionelle Musikproduktion	9
2.1.5	Online Gaming	10
2.1.6	Hochgeschwindigkeitshandel in der Finanzwelt	10
2.1.7	Machine-to-Machine-Communication (M2M)	11
2.1.8	Smart Grid	11
2.1.9	Cloud Computing	12
2.2	Technische Aspekte	13
2.2.1	Echtzeit	13
2.2.2	Beiträge zur Verzögerung in Netzen	14
2.2.3	Verzögerung im Medium (Laufzeit)	15
2.2.4	Bandbreite und Übertragungs-geschwindigkeit	16
2.2.5	Schwankung der Verzögerungszeit	19
2.2.6	Weitere Qualitätsparameter	19
2.3	Technische Ansätze zur Qualitätsbereitstellung	20
2.4	Service Level Agreement (SLA)	20
2.5	Gibt es zu viele Randbedingungen oder gar Verhinderungsgründe?	21
3	Analyse der Protokolle und deren Implementierung	22
3.1	Ethernet	22
3.2	Internet Protokoll	24
3.2.1	Identifikation und Schutz des Paketes	24
3.2.2	Fragmentierung	25
3.2.3	Qualitätskennzeichnung	26
3.2.4	IP Routing	26
3.2.5	Adressierung höherer Protokoll-Schichten	27

Impressum

Stiftungsreihe 104

Redaktion  
Dr. Erich Zielinski  
Petra Bonnet M.A.

Druck der Broschüre  
DCC Kästl GmbH & Co. KG

Alle Rechte vorbehalten  
© 2013

Die Alcatel-Lucent Stiftung für  
Kommunikationsforschung ist  
eine nichtrechtsfähige Stiftung  
in der treuhänderischen Ver-  
waltung des Stifterverbandes  
für die Deutsche Wissenschaft.

Angaben nach § 5 TMD/  
§ 55 RfStv

Stifterverband für die Deutsche  
Wissenschaft e.V.  
Barkhovenallee 1  
45239 Essen  
Telefon: (02 01) 8401-0  
Telefax: (02 01) 8401-301  
E-Mail: mail@stifterverband.de

Geschäftsführer:  
Prof. Dr. Andreas Schlüter  
(Generalsekretär)

ISSN 0932-156x

3.3	Address Resolution Protocol (ARP)	27
3.4	Protokolle zur Qualitätsunterstützung	27
3.4.1	Einleitung	27
3.4.2	Integrated Services (INTSERV) & Resource Reservation Protocol (RSVP)	28
3.4.3	Differentiated Services (DIFFSERV)	29
3.5	Multiprotocol Label Switching (MPLS)	30
3.6	Höhere Protokolle	32
3.6.1	Transmission Control Protocol (TCP)	32
3.6.2	User Datagram Protocol (UDP)	33
3.6.3	Weitere Schicht-4-Protokolle	33
4	Analyse der Netzstrukturen und Netzelemente	34
4.1	Einführung	34
4.1.1	Kommunikationsprinzipien	34
4.1.2	Mehrfachausnutzung von Übertragungsressourcen	36
4.1.3	Fehlerschutz	37
4.1.4	Verschlüsselung	38
4.2	Architektur von Netzknoten	38
4.3	Netzstrukturen	42
4.4	Zugangsnetze	45
4.4.1	Telefonleitung (Kupferdoppelader)	45
4.4.2	Fernseh-Kabelnetz (Koaxialkabel)	47
4.4.3	Glasfaser	48
4.4.4	Drahtlose Anschlüsse	49
4.4.5	Satelliten	50
4.4.6	Stromleitung	50
4.5	Kernnetz	50
4.6	Mobilfunk	51
4.6.1	Einführung	51
4.6.2	Global System for Mobile Communications (GSM)	52
4.6.3	UMTS	52
4.6.4	Long Term Evolution (LTE)	53
4.6.5	Zukünftige Generationen	54
4.6.6	Zusammenfassung	54
4.7	Kurzstreckenfunk	54
4.7.1	WLAN	54
4.7.2	Bluetooth	54
4.7.3	Zigbee	54
4.7.4	Near Field Communication (NFC)	54
4.7.5	Wireless M-Bus	54
4.8	Übertragungstechnik	54

5	Bestehende Ansätze	57
5.1	Industrial Ethernet	57
5.2	Realtime Transport Protocol (RTP)	58
5.3	Realtime Streaming Protocol (RTSP)	59
5.4	Hypertext Transfer Protocol Version 2 (HTTP 2.0)	60
5.5	Web Real Time Communication (WebRTC)	60
6	Standardisierung	61
6.1	International Telecommunication Union (ITU)	61
6.2	European Telecommunications Standards Institute (ETSI)	63
6.3	oneM2M	64
6.4	Internet Engineering Task Force (IETF)	64
6.5	Vorschlag für weiteres Vorgehen	65
7	Technische Möglichkeiten und Vorschläge	66
7.1	Änderungen an der Netzarchitektur	66
7.2	Steigerung der Leistung der Netzknoten	67
7.3	Reduktion der Anzahl der Netzknoten	67
7.4	Reduktion der Typen an Netzknoten	67
7.5	Steigerung der Übertragungsgeschwindigkeit	68
7.6	Reduktion der Protokollschichten	68
7.8	Reduktion der Protokollvielfalt	70
7.9	Was ist zu tun?	70
7.10	„TeraStream“ – ein Beispiel	71
8	Ausblick	73
9	Anhang: Referenzen	74
10	Anhang: Abkürzungen	78



## Einführung

### 1.1 Begriffsbestimmung

Nachdem in der Vergangenheit der Fokus beim Ausbau der Kommunikationsnetze auf der Breitbandigkeit, also der Steigerung der Übertragungsgeschwindigkeit lag, wird es inzwischen wichtiger, auch andere Parameter zu optimieren. Dieses Dokument widmet sich der Verzögerungszeit im Netz. Ziel ist es, das Netz reaktionsschneller zu machen. Inzwischen wurde dafür auch ein neues Schlagwort geprägt: „*Taktiler Internet*“.

Dieser Begriff ist so zu verstehen, dass es um das Fühlen und Ertasten im Zusammenhang mit Internet-Inhalten geht. Eine Beispiel ist die Weiterentwicklung der Touchscreen-Technologie, die es dem Bediener erlauben, nicht nur durch Wischen sondern auch durch unterschiedlich starken Druck Funktionen zu steuern [1]. Auch die Rückmeldung des Computersystems auf den eingebenden Finger über ein mit Piezoelementen oder lichtsensitiven Polymeren ausgerüstetes Display oder sogar eine Rückmeldung auf den ganzen Körper über einen speziellen Stuhl sind denkbar [2, 3, 4]. Anwendungen sind Computerspiele aber auch Simulatoren.

Im vorliegenden Dokument ist der Begriff im Zusammenhang mit schnellen Reaktionszeiten zu sehen. Dafür ist der Mensch sehr empfindlich: Die Weiterleitung eines Reizes hat eine Geschwindigkeit von ca. 100 m/s, d.h. zwischen dem Fühlen am Finger und der Registrierung im Gehirn vergehen nur ca. 10 ms. Natürlich werden in Zukunft viele Anwendungen im Bereich Maschine-Maschine-Kommunikation (M2M), Produktionsautomatisierung und Industrie 4.0 zu sehen sein [5], also Anwendungen, in denen der Mensch nicht mehr direkt Kommunikationspartner ist.

Je nach Anwendung sind auch hier kurze Reaktionszeiten und hohe Zuverlässigkeit gefordert. Eine Person, eingebunden in die Weiterleitungskette, würde die gewünschten Eigenschaften u. U. wieder zunichte machen. Trotzdem wurde der Begriff *Taktiler Internet* gewählt, denn trotz aller Maschinenlastigkeit soll der Mensch mit seinen Eigenschaften und Forderungen weiter im Mittelpunkt stehen.

Somit wird den aktuellen Themen;

- Breitbandigkeit der Netze (DSL, HFC, Glasfaser),
- Mobilität (in allen Formen, vom Kurzstreckenfunk bis zur Satellitenkommunikation), und
- Vernetzung aller Dinge (Internet of Things, M2M, Sensornetze)

mit der Forderung nach geringer Verzögerungszeit ein weiteres Thema hinzugefügt. Dabei geht diese Forderung weit über das hinaus, was heute schon als „Echtzeit-Internet“ bezeichnet wird.

Oben wurden die Begriffe *Reaktionszeit* und *Verzögerungszeit* verwendet. Einige andere Begriffe in diesem Zusammenhang sind: *Laufzeit*, *Delay*, *Latenz* und *Lag*. Alle diese Begriffe definieren sich als die Zeit zwischen Reiz und Reaktion, zwischen Ursache und Wirkung oder auch zwischen dem Ende eines Ereignisses bis zum Beginn der Reaktion auf dieses Ereignis. Eine klare Unterscheidung ist nicht möglich. Daher wird im Folgenden nur noch von der Verzögerungszeit gesprochen und diese als die Zeit definiert, die vergeht zwischen dem Absenden eines Bits oder Datenpakets bis zu dessen Ankunft auf der Empfangsseite. Kapitel 2.2.4 geht näher auf diese Definition ein.

## 1.2 Ausgangslage

Im letzten Jahrhundert dominierte das Telefonnetz die elektronische Kommunikation. Es war auf die Sprachübertragung zugeschnitten, sowohl was die Bandbreite (300 Hz bis 3,4 kHz) angeht, als auch die Verzögerungszeit (max. 25 ms). Auch bei der Einführung der Digitaltechnik im Telefonnetz blieben diese Randbedingungen bestehen, wobei das Sprachfrequenzband jetzt durch die Pulse Code Modulation (PCM) in einen Datenstrom mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von 64 kbit/s abgebildet wurde. Die Forderung nach einer geringen Verzögerung stellte aber mehr und mehr eine Herausforderung dar, denn das Codieren und Decodieren der digitalen Signale, sowie deren Verarbeitung z.B. in Multiplexern kostet Zeit.

Mit dem Aufkommen des Internets wurde die Datenkommunikation massenmarktauglich. Durch das Verfahren der verbindungslosen Paketvermittlung ist die Übertragung vieler konkurrierender Datenströme effizient möglich. Die Übertragungsgeschwindigkeit im Internet wurde stetig erhöht, um den gestiegenen Anforderungen der Kunden gerecht zu werden. Die Verzögerungszeit spielte nur eine untergeordnete Rolle, denn die ersten Dienste wie E-Mail und Filetransfer waren da unkritisch. Mit dem Aufkommen des Web wurde das Internet interaktiv – und hier spielt die „menschliche Zeitkonstante“ eine Rolle: wir wollen möglichst schnell eine Antwort von einem Server erhalten; eine Wartezeit von mehr als einer Sekunde empfinden wir schon als lästig.

Aber erst wirklich kritisch wurde das Thema der Verzögerungszeit mit der Übernahme der Telefonie durch das Internet. Jeder, der schon einmal über eine Satellitenverbindung telefoniert hat, kennt das Problem: der Ge-

sprächsfluss ist massiv gestört, man fällt sich gegenseitig ins Wort. 150 ms werden als gerade noch akzeptabel angesehen.

Und jetzt der nächste Schritt. Immer mehr kommunikationstechnische Anwendungen wollen das Internet nutzen. Darunter sind auch Funktionen, die seither nur lokal ausgeführt, heute aber geografisch verteilt arbeiten sollen. Damit ergeben sich auch neue Anforderungen an das Netz, besonders was die Verzögerungszeit angeht.

## 1.3 Untersuchung

In den folgenden Kapiteln werden die relevanten Aspekte untersucht:

- Zuerst werden im Kapitel 0 die Anwendungsbereiche analysiert, die mehr oder weniger harte Anforderungen an die Verzögerungszeit in der Kommunikation stellen. Hier spielt der Begriff „Echtzeit“ eine Rolle, aber auch viele neue Schlagworte von Smart Grid bis Industrie 4.0 stellen entsprechende Anforderungen. Aus technischer Sicht sind dann die Parameter zu untersuchen.
- Im Kapitel 0 werden die Protokolle analysiert. Nicht nur weil der Begriff „Internet“ für das Taktile Internet verwendet wird, sondern weil das Internet-Protokoll heute als Basis jeglicher Kommunikation dient, konzentriert sich das Kapitel auf die Internet-Protokoll Suite sowie das allgegenwärtige Ethernet.
- Ähnlich wie die Protokolle sind auch die Netze zu analysieren, was in Kapitel 0 durchgeführt wird. Dabei liegt der Schwerpunkt auf öffentlichen Netzen. Intranets sind flexibler, da sie meist kleinere Struk-

- 
- turen umfassen und unter der Kontrolle eines einzigen Betreibers liegen.
- Der Frage, ob es schon Ansätze zur Lösung der Problematik gibt, wird in Kapitel 0 nachgegangen.
  - In Kapitel 6 wird die Standardisierung analysiert. Es werden Gremien gelistet, die sich der Problematik angenommen haben.
- Ziel der Untersuchung ist die Erarbeitung von Vorschlägen für das weitere Vorgehen. Dabei geht es sowohl um Änderungen und Ergänzungen zu bestehenden Systemen und Netzen aber auch eventuell um komplett neue Ansätze. Kapitel 0 widmet sich diesem Ergebnis.
  - Mit einem Ausblick in Kapitel 0 endet die Untersuchung.



## 2 Anforderungen

Nachfolgend wird eine Analyse verschiedener aktueller Anwendungen durchgeführt, besonders deren Anforderungen an die Kommunikation. In einem zweiten Schritt werden die Parameter und Begriffe erläutert.

### 2.1 Betrachtete technische Bereiche

Bevor auf einige Themen im Detail eingegangen wird, soll hier eine Übersicht von Anwendungen aufgelistet werden, die in einer VDE-Studie [6] als Treiber für mehr Bandbreite angesehen werden:

- Zunahme von Web-2.0-Diensten,
- Asynchroner Videoabruf und IPTV,
- Netzbasierte elektronische Spiele,
- 3D-Welten im Internet,
- Ambient Intelligence und Internet der Dinge,
- Cloud Computing,
- Energieinformationsnetze,
- Embedded Systems,
- Maschine-Maschine-Kommunikation.

Im Zusammenhang mit den hier betrachteten Themen listet die gleiche Studie unter dem Strichwort „Schlüsselbereiche“:

- Embedded Systems,
- Aktor-Sensor-Netzwerke,
- Computer-Physikalische-Systeme (Cyber Physical Systems).

Die Verzögerungszeit wird nicht explizit erwähnt, spielt aber bei vielen Anwendungen eine Rolle. Einige der genannten, aber auch weitere Themen mit Echtzeit-Forderungen, werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

### 2.1.1 Echtzeit-Internet

Über das *Echtzeit-Internet* wird schon lange diskutiert, allerdings hatte man früher Dienste wie Sprache und Video im Fokus, bei denen es hauptsächlich darum geht, einen synchronen Datenstrom ohne Unterbrechung zu übertragen.

Heute verbirgt sich hinter dem Begriff *Echtzeit-Internet* die Idee, dass z.B. Google „sofort“ Twitter-Meldungen in die Suchmaschine aufnimmt [7]. Eine Definition beschreibt das Echtzeit-Internet wie folgt „*Das Echtzeit-Netz umfasst Technologien, Plattformen und Dienste, die Informationen im Moment der Entstehung bündeln und (fast) ohne Zutun des Empfängers an diesen weiterleiten*“ [8].

Der Hintergrund dieser Entwicklung liegt in der teilweise recht kurzen Halbwertszeit von Informationen. Die Empfehlung für einen Link, die in einem sozialen Netz gepostet wird, könnte schon bald veraltet sein. Bei einem Hinweise auf eine eBay-Auktion ist das offensichtlich, auch die Verspätungsmeldung der Bahn sollte den Kunden schnell erreichen. Inzwischen gibt es eine Vielzahl an Webseiten, die „in Echtzeit“ Informationen sammeln, aufbereiten und allen Nutzern zugänglich machen. Das reicht von Entwicklungen in Krisenherden bis zu Fundraising.

Ob der zeitliche Abstand zwischen dem Posting und der Veröffentlichung 100 ms oder 10 sec beträgt, ist nicht wirklich relevant. Es wird von „minutengenaue Aktualität“ gesprochen. Wirklich harte Anforderungen kommen aus anderen Bereichen. Daher ist das Echtzeit-Internet keine Referenz für das Taktile Internet.

Allerdings kommt hier noch ein anderer Effekt zum Tragen, der große Kapazitäten erfordert: sofort nach einer Link-Empfehlung kann es

---

zu einer Überlastung des Links bzw. des entsprechenden Servers und der Kommunikationsinfrastruktur kommen [8, 9]. Überlast bedeutet aber auch größere Verzögerungszeit.

### 2.1.2 Prozessautomatisierung

DIN definiert Prozessautomatisierung als „Das Ausrüsten einer Einrichtung, so dass sie ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen bestimmungsgemäß arbeitet.“ Das ist noch sehr allgemein und lässt sich auf viele Bereiche anwenden. Selbst eine Online-Bestellung passt in das Schema [10].

Im Kontext des Taktilen Internet interessiert der Einsatz der IKT im industriellen Bereich, wobei klassisch das Thema „Echtzeitbetriebssystem“ einen hohen Stellenwert hat. Hier stehen die Eigenschaften Multitasking, Prioritäten und Interrupt-Steuerung an erster Stelle, um die Forderungen der Prozessumgebung und ihrer Hardware möglichst nahtlos in Software abzubilden. Für die Kommunikation werden in der Regel Feldbussysteme eingesetzt. Die Vernetzung damit ist lokal und berücksichtigt den Echtzeitaspekt. Wie später noch gezeigt wird, gewinnt das Ethernet hier an Marktanteilen.

### 2.1.3 Industrie 4.0

Unter Industrie 4.0 wird der Einzug von Methoden der IKT in die Industrie verstanden. Ziel ist die *Intelligente Fabrik*, die flexibel auf veränderte Anforderungen reagieren kann, z.B. dass die notwendigen Maschinen sich selbst konfigurieren. Das geht über die vorher behandelte Prozessautomatisierung hinaus und basiert auf der Vernetzung von Maschinen, Anlagen und Produktionsprozessen.

Diese Flexibilität soll es erlauben, schnell auf veränderte Marktbedingungen reagieren zu können. Dazu müssen z.B. die Maschinen über eine Kommunikationsschnittstelle verfügen und per Kommandos umkonfiguriert werden können. Aber auch der gesamte Materialfluss muss anpassbar sein. Rohmaterial und Halbzeuge sind zur richtigen Maschine zu bringen, Zwischenprodukte müssen der weiteren Verarbeitung zugeführt werden usw. Der gesamte Prozess muss somit steuerbar sein.

Davon versprechen sich die Beteiligten vor allem eine größere Flexibilität und mehr Effizienz im Verbrauch von Ressourcen, speziell von Energie. Insgesamt verspricht man sich Kostenvorteile.

### 2.1.4 Professionelle Musikproduktion

Heutzutage laufen die meisten Musikproduktionen über den Computer, wobei es egal ist, ob als Quelle noch klassische oder elektronische Instrumente zum Einsatz kommen. Über digital aufgenommene Spuren können die einzelnen Quellen gemischt und sogar transponiert sowie zeitlich angepasst werden. Bei der elektronischen Erzeugung wird eine geringe Verzögerungszeit gefordert, so dürfen zwischen dem Druck auf eine Taste, z.B. einer MIDI-Tastatur, und dem Hörbarwerden des Tones nicht mehr als 20 ms vergehen. Im PC werden dafür spezielle Audio-Treiber eingesetzt.

Erfolgt die Produktion über das Internet, sind zwei Fälle zu unterscheiden. Werden die fertig aufgenommenen Spuren und sonstige Daten zum Ziel übertragen und dort in einer entsprechenden SW nachverarbeitet, dann ergeben sich keine harten Anforderungen an die Übertragung. Soll allerdings die Produkti-

on selbst über das Internet abgewickelt werden, z.B. in der Form, dass verschiedene Musiker an verschiedenen Orten zusammenspielen, dann ist dieser Vorgang sehr zeitkritisch. Hier ist nicht nur die Einweglaufzeit wichtig, sondern beide Wege sind relevant. Das wird schon bei zwei Musikern erkennbar, die sich ja gegenseitig hören müssen.

Inzwischen gibt es sowohl Plattformen im Internet, über die über die gemeinsam Musik produziert werden kann [11] als auch Software bzw. Erweiterungen von Musikproduktionssoftware, die einen Austausch von Partnern über das Internet erlauben [12]. Beide Varianten fordern mindestens 256 kbit/s für den Audio-Austausch. Aussagen über die zulässige Verzögerungszeit werden nicht angegeben, aber vor der Nutzung von WLAN oder gar Tethering per Smartphone wird gewarnt. (Siehe auch Kapitel 4.7.1)

Die Musiker verwenden die Bezeichnung *Latenz* bzw. *latency* für die Verzögerungszeit.

### 2.1.5 Online Gaming

Man kann zu Computerspielen zwar stehen wie mal will – es ist ein nicht zu unterschätzender Markt. 1997 wurde das erste grafische Online-Spiel vorgestellt, ein Rollenspiel, das viele Mitspieler unterstützte.

Im Laufe der Zeit wurden immer mehr Actionspiele entwickelt, bei denen es auf die Reaktionszeit ankommt. Beispiele sind sogenannte Ego-Shooter. Hier werden ca. 60 ms als tolerabel angesehen.

Ein größeres Problem mit der Verzögerungszeit tritt bei Multiplayer-Games auf. Hier sollten alle Mitspieler zu jeder Zeit den gleichen Spielstatus vorfinden. Durch die unterschiedlichen Verzögerungszeiten zwischen den Spielern und dem Spiele-Server ist das aber

nicht der Fall. Es muss daher versucht werden, eine Art Kompensation des Fehlers durchzuführen, entweder durch eine Vorausrechnung auf den wahrscheinlich zukünftigen Status oder durch eine generelle Verzögerung, so dass der Spieler einen zwar zurückliegenden aber für alle gültigen Status angezeigt bekommt.

Die Gaming-Community bezeichnet die (spürbare) Verzögerungszeit als *Lag*.

### 2.1.6 Hochgeschwindigkeitshandel in der Finanzwelt

Kauf und Verkauf von Wertpapieren ist nicht mehr nur die Domäne von Börsenhändlern, sondern Computer mit ausgefeilten Programmen haben dieses Geschäft teilweise übernommen. Dabei werden im Millisekundenbereich Aufträge abgewickelt und auch die Haltezeit der Papiere kann in diesem Bereich liegen. Klar, dass auch die Kommunikationstechnik mit diesem Tempo Schritt halten muss. So wurde für 300 Mio. Dollar ein neues Glasfaserkabel über den Atlantik verlegt, das ausschließlich dem Finanzsektor für Finanzdaten und Kursinformationen dient. Gegenüber den bestehenden Seekabeln der Telekommunikationsbetreiber wurde die Strecke zwischen London und Halifax um 570 km verkürzt, was eine Verkürzung der Übertragungszeit von 6 ms ergibt! Die Investition soll sich in wenigen Jahren amortisiert haben, denn jede Millisekunde generiert angeblich pro Jahr viele Millionen Dollar zusätzlichen Gewinn.

„Geschwindigkeit bei der Orderausführung ist zum wichtigsten Faktor avanciert und wird mittlerweile in Milli- und Mikrosekunden gemessen“, so Dr. Joachim Nagel von der Deutschen Bundesbank [13].

---

Klar, dass bei diesen Geschwindigkeiten bei Fehlern im System kein manueller Eingriff mehr möglich, liegt doch wie schon ausgeführt, die menschliche Reaktionszeit bei ca. einer Sekunde. Die Folge können dann kurzzeitige Kursschwankungen sein, als „Flash-Crash“ bezeichnet.

Für die Übertragung der Finanzdaten selbst wurde ein spezielles Protokoll geschaffen, das *Financial Information eXchange Protocol* (FIX) [14, 15]. Es handelt sich zwar um ein textbasiertes, aber sehr kryptisches Protokoll. Als *FIXML* gibt es auch ein auf XML basierendes Format. Allerdings ist das native Format viel kompakter und damit schneller, sicher mit ein Grund, dass FIXML nicht so verbreitet ist.

### **2.1.7 Machine-to-Machine-Communication (M2M)**

Die M2M Communication wird als ein großer Markt angesehen – man schätzt, dass von 50 Mrd. Geräten bisher nur 50 Mio. vernetzt sind. Das Anwendungsfeld ist sehr breit, einige Anwendungen sind:

- Smart Grid (wird nachfolgend näher ausgeführt),
- Robotertechnik,
- Assistenzsysteme, Ambient Assisted Living (AAL),
- Medizintechnik,
- Fahrzeuge, Telematik, Logistik,
- Fernüberwachung, z.B. von Verkaufsautomaten.

Wegen dieser breiten Anwendungsgebiete wird M2M als sehr wichtig und schnell wachsend angesehen. Die Standardisierung, besonders bei ETSI, ist daher sehr aktiv.

Zwar werden vielfach Kurzstreckenfunktechniken für M2M zum Einsatz kommen, aber man sieht in vielen Fällen auch den Mobilfunk als geeignet an. Die „Teilnehmer“ an einer M2M-Kommunikation zeigen ein anderes Verhalten als der herkömmliche menschliche Teilnehmer. Daher wird eine Optimierung bzw. Anpassung in den Telekommunikationsnetzen notwendig werden.

Viele dieser Anwendungen haben harte zeitliche Anforderungen, man denke nur an einen Roboter, der sofort stehen bleiben muss, wenn ein Hindernis auftaucht. Ob man aber solche sicherheitskritischen Funktionen über ein Kommunikationsnetz steuern lässt, darf bezweifelt werden. Solche Funktionen müssen lokal ausgeführt werden.

Die Anforderungen, die z.B. bei ETSI an M2M gestellt werden, beinhalten keine konkreten Angaben zu Zeiten. Nur Time Stamps und Synchronisation werden erwähnt, aber ohne Angabe von Werten [16].

### **2.1.8 Smart Grid**

Die Stromwirtschaft steht vor einem Umbruch, der Stromerzeugung, Stromtransport und Verteilung, aber auch die Geschäftsbeziehungen zwischen den verschiedenen Teilnehmern am Markt betrifft. Allgemein anerkannt ist, dass nur mit einem vermehrten Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) diese neuen Anforderungen zu meistern sein werden.

Smart Grid steht als Überbegriff für eine breite Palette an Einzelmaßnahmen. Die vorrangigsten sind:

- Smart Meter, also das elektronische Erfassen und Auslesen der Zählerstände. In der Rückrichtung sollte eine Tarifinforma-

tion dem Verbraucher helfen, seinen Verbrauch geeignet zu steuern.

- Verteilnetzautomatisierung, umfasst Netzbetrieb und Netzüberwachung. Das wird immer wichtiger, denn im Verteilnetz finden sich heute schon viele kleine Einspeisestellen (z.B. Photovoltaikanlagen), die bewirken, dass sich der Stromfluss teilweise umkehrt.
- Elektromobilität, dabei stellt das Laden – je nach Anforderung (z.B. Ladezeit) – einen starken Strombedarf dar; andererseits können Elektroautos aber auch als verteilter Speicher dienen.

Wo liegen hier die zeitlichen Anforderungen? Beim Smart Meter gibt es verschiedene Vorstellungen zu den Messintervallen. Industrielle Verbraucher messen im 15-Minuten-Abstand, ein Wert, der in Zukunft auch für den privaten Kunden angewandt werden kann. Die Übertragung der Messwerte selbst ist zeitlich unkritisch, denn sie tragen einen Zeitstempel.

Bei der Verteilnetzautomatisierung könnten sich schon härtere Forderungen ergeben. Hier sind sofortige Reaktionen auf Ereignisse wie z.B. Abschaltung aufgrund von Kurzschlüsse notwendig. Für Steuerungszwecke ist oft der Phasenwinkel von Interesse. Da eine Vollwelle bei 50 Hz Netzfrequenz 20 ms dauert, kann die Zeit kritisch sein [17].

Die Forderungen der Elektromobilität liegen wieder eher in der Klasse wie das Smart Meter.

### 2.1.9 Cloud Computing

Seit einiger Zeit ist ein starker Trend zu beobachten, Rechenleistung und Speicher für Daten und Anwendungen nicht mehr lokal am

Arbeitsplatz vorzuhalten, sondern auszulagern und über ein Kommunikationsnetz – genauer: eine Internet-Infrastruktur – zu verbinden. Der Begriff *Cloud Computing* zeigt, dass die Ressourcen nicht klar lokalisiert und fest zugeordnet sind, sondern sich verteilt in einer *Wolke* befinden. Üblicherweise liegen die Ressourcen auch nicht an zentralen Punkten sondern wirklich breit gestreut.

Eine solche Cloud kann privat betrieben werden, z.B. von einer Firma für ihre Mitarbeiter, aber sie kann auch öffentlich bereitgestellt werden. Anbieter sind dann die großen Internet-Firmen.

Vorteile dieses Verfahrens sind die dynamische Anpassung der Ressourcen an den Bedarf, die hohe Verfügbarkeit, da die Ressourcen im Netz verteilt sind, und die Datensicherung durch automatisches Backup. Dass der Datenschutz ein Problem darstellt soll hier nur erwähnt, aber nicht weiter ausgeführt werden. Dadurch, dass viele Kunden ein solches Cloud-System nutzen, ergibt sich statistischer Gewinn durch das Pooling der Ressourcen.

Wenn aber Rechenleistung, Anwendungen und Daten sich verteilt in dieser Wolke befinden, ist ein schnelles Netz dazwischen notwendig. Dabei sind vor allem hohe Übertragungsgeschwindigkeiten und schnelle Reaktionszeiten wichtig. Das wird sofort einsichtig, verdeutlicht man sich das Arbeiten mit einer Textverarbeitung: ruft man eine Funktion auf, sollte die Reaktion möglichst ohne erkennbare Verzögerung am Bildschirm sichtbar sein, z. B. eine neue Formatierung. Liegt jetzt diese Funktion „irgendwo“ auf einem Server, kann zwar der Server sehr viel leistungsfähiger sein als der lokale PC, aber das Netz dazwischen kann zur Bremse werden [18].

## 2.2 Technische Aspekte

Das folgende Kapitel geht auf den Begriff *Echtzeit* ein und gibt eine Übersicht über die technischen Einflussfaktoren, die zu Verzögerungen in Telekommunikationsnetzen führen.

### 2.2.1 Echtzeit

In der Computerhistorie wurden *Echtzeitsysteme* und *Timesharing-Systeme* unterschieden. Dabei ist der Begriff *Echtzeit* nicht an eine bestimmte zeitliche Schranke gebunden, sondern abhängig von der Anwendung und diese kann Reaktionszeiten im Millisekundenbereich fordern, andere Anwendungen dagegen sind evtl. mit Stunden zufrieden. Die gerne verwendete Gleichsetzung „Echtzeit = schnell“ ist also falsch.

Auf der anderen Seite sind moderne Computersysteme heute so schnell geworden, dass oftmals jede Echtzeitforderung erfüllt werden kann, abgesehen von Spezialfällen. Man denke nur an den PC auf dem Schreibtisch: er erfüllt heute Aufgaben, die noch vor 20 Jahren undenkbar waren.

Somit sollte der Begriff Echtzeit nicht mehr verwendet werden, sondern die Reaktionszeit des Systems explizit angegeben werden, wenn es gilt, einen Forderungskatalog aufzustellen.

Nachfolgend eine formale Analyse der Dienste. Aus Sicht der Verzögerungszeit lassen sich drei Klassen von Diensten unterscheiden:

- Dienste, die auf dem Austausch von Daten beruhen, die keinen oder nur wenigen zeitlichen Beschränkungen unterworfen sind. Dazu gehören Filetransfer und

E-Mail, mit Einschränkungen auch das World Wide Web.

- Dienste, die einen kontinuierlichen Datenstrom senden, der auf der Empfangsseite so wieder reproduziert werden muss. Ein Beispiel ist Video. Wenn der Film verzögert beim Zuschauer ankommt, so ist das in Grenzen tolerabel, allerdings sind z.B. Unterbrechungen oder Einbrüche in der Qualität nicht akzeptabel.
- Dienste, die zusätzlich zu den vorher genannten Anforderungen auch eine schnelle Reaktionszeit erfordern, z.B. weil sie auf einem menschlichen Dialog aufbauen. Das Problem ist die Störung des Gesprächsflusses, falls die Verzögerungszeit zu groß ist. Hier werden 150 ms als akzeptabel genannt. Noch härter sind die Anforderungen beim Gaming.

Abbildung 1 zeigt diese Klassifizierung, wobei noch ein weiterer Aspekt hinzugefügt wurde: Manche Dienste bestehen aus mehreren Komponenten, die eine Synchronisation erfordern. Beispiel ist die Lippen synchronität von Bild und Ton.

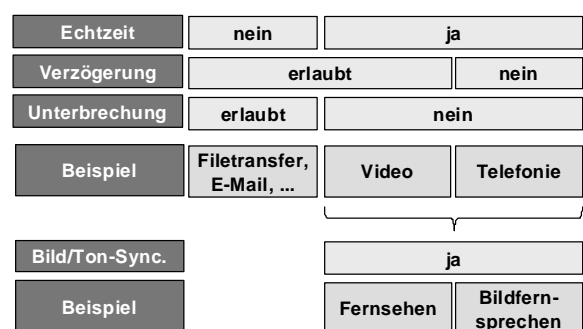


Abbildung 1: Klassifizierung von „Echtzeit“

**Fazit: Durch die unklare und sich mit der Zeit wandelnde Bedeutung sollte der Begriff „Echtzeit“ nur im Kontext mit einer Anwendung verwendet werden.**

### 2.2.2 Beiträge zur Verzögerung in Netzen

In den Netzen gibt es mehrere Beiträge, die zur Gesamtverzögerung beitragen. Dabei muss zuerst geklärt werden, welche Verzögerungszeit gemeint ist. Dazu folgender geschichtlicher Ablauf:

Das erste große Telekommunikationsnetz war das Telefonnetz. Es wurden analoge Signale übermittelt und im Netz gab es keine Zwischenspeicherung der Informationen. Die Mehrfachausnutzung der Leitungen erfolgte im *Frequenzmultiplexverfahren* quasi verzögerungsfrei. Somit bildeten hauptsächlich die Laufzeiten auf den Leitungen die Verzögerung.

Mit Einführung der Digitaltechnik traten weitere Verursacher von Verzögerungen auf: Die Wandlung vom analogen Signal in ein digitales Codewort bei der *Puls Code Modulation* (PCM) geht nicht ganz verzögerungsfrei. Abbildung 2 zeigt den Prozess.

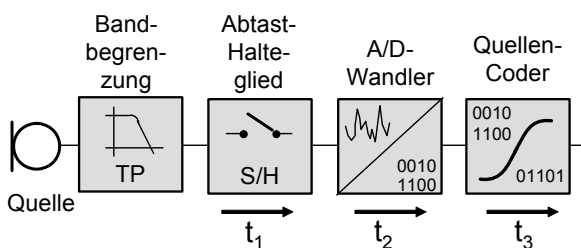


Abbildung 2: Digitalisierung von Sprache - PCM-Generierung

Vom analogen Signal wird eine Probe genommen und in einem Abtasthalteglied (Sample & Hold) gespeichert. Dann übernimmt ein Analog-Digital-Wandler die Aufgabe, eine digitale Repräsentation des Signals zu erzeugen. Schließlich wird das digitale Signal anhand einer nichtlinearen Quantisierungskennlinie in das endgültige Codewort gewandelt. Die Geschwindigkeit all dieser Vorgänge hängt von der Technik ab und wurde im Laufe der Jahre immer schneller. Der PCM-Datenstrom der digitalen Telefonie hat üblicherweise eine Übertragungsgeschwindigkeit von 64 kbit/s, dabei wird alle 125  $\mu$ s ein Byte gesendet.

Aber auch im Netz selbst gab es neue Verzögerungszeiten: die Mehrfachausnutzung der Leitungen erfolgt in der digitalen Telefonie im Zeitmultiplexverfahren. Dabei werden die Codeworte mehrerer Verbindungen in einen zeitlichen Rahmen von 125  $\mu$ s angeordnet. Das bedeutet aber, dass ein Codewort u.U. bis zu 125  $\mu$ s zwischengespeichert werden muss, bevor es in den Rahmen einsortiert werden kann. Dieser Vorgang passiert in jedem schaltenden Gerät, sowohl in einer digitalen Vermittlungsstelle als auch in übertragungstechnischen Geräten, z.B. Multiplexern.

Der bisher letzte Schritt besteht in der Nutzung von Paketnetzen wie dem Internet. Jetzt müssen die Daten zuerst in Paketform gebracht werden, entweder durch die Anwendung selbst oder durch eine Paketierung, die z.B. PCM-Sprachproben aufammelt und dann als Paket weiter schickt, wie Abbildung 3 zeigt. Überträgt man Sprache über ein IP-Netz so sind 160 Byte ein typisches Sprachpaket. Die Bildung eines solchen Paketes dauert  $160 \times 125 \mu\text{s} = 20 \text{ ms}$

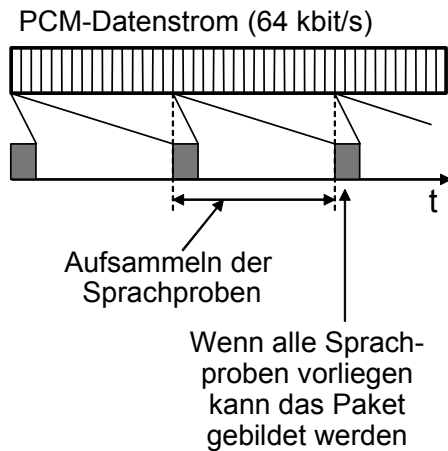


Abbildung 3: Paketisierung von Sprache

Auf dem Weg zum Ziel liegen jetzt Netzknoten, die Datenpakete verarbeiten. Dabei gibt es verschiedene Methoden mit dem Paket umzugehen. Darauf wird in Kapitel 0 näher eingegangen. Auf der Empfangsseite muss das Paket ausgewertet werden. Das kann oft nur geschlossen funktionieren, d.h. das Paket muss erst vollständig empfangen sein, bevor es ausgewertet wird.

Jedes Speichern von Teilen oder des ganzen Paketes führt zu zusätzlichen Verzögerungszeiten und damit geht jetzt auch die Übertragungsgeschwindigkeit in die Verzögerungszeit ein, ein Aspekt, der in Kapitel 5.2 näher untersucht wird.

**Fazit: Jede Weiterentwicklung, die wir als Fortschritt ansehen (Digitalisierung, Paketisierung), hat die Verzögerungszeit erhöht, aber einen Weg zurück gibt es nicht.**

### 2.2.3 Verzögerung im Medium (Laufzeit)

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen im Vakuum beträgt knapp 300 000 km/s, was eine Laufzeit von 3,33 ns/m ergibt.

Jedes Material im Ausbreitungsweg verursacht eine Verringerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit, ausgedrückt durch den Verkürzungsfaktor. Dieser ist von der Permeabilitätskonstante und der Dielektrizitätskonstante des Materials abhängig. Da erstere bei den Kabeln fast keine Rolle spielt, bestimmt hier hauptsächlich das Dielektrikum den Verkürzungsfaktor. Das gilt für die Luft, wobei hier der Faktor sehr gering ist, besonders aber für kunststoff-isolierte Kabel und Glasfasern.

- Die Dichte der Luft ist von der Höhe über dem Erdboden abhängig. Somit ist auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit höhenabhängig und in der Nähe des Erdbodens am geringsten. Allerdings liegt Luft sehr nahe am Vakuum, so reduziert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Bodennähe nur um 0,28% gegenüber der im Vakuum.
- Im Koaxialkabel hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit vom Dielektrikum der Isolation zwischen Innen- und Außenleiter ab. Der Verkürzungsfaktor liegt, je nach Material und Aufbau, bei 0,66 ... 0,77. Somit ergeben sich Ausbreitungsgeschwindigkeiten von 200 000 km/s (Polyethylen) ... 231 000 km/s (Kunststoff mit Luftzellen). Die Laufzeiten errechnen sich dann zu 5 ... 4,33 ns/m. Verwendet man Teflon als Dielektrikum ist die Laufzeit mit ca. 4,7 ns/m etwas geringer als bei Polyethylen.
- Kupferdoppeladern sind etwas schlechter als Koaxialkabel. Hier liegt der Verkür-



zungsfaktor bei 0,6, die Laufzeit damit bei 5,55 ns/m.

- Bei der Glasfaser bestimmt der Brechungsindex die Geschwindigkeit. Ein Brechungsindex von 1 entspricht der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Das in den Glasfasern verwendete Glas hat einen Brechungsindex von ca. 1,5 was zu einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 200 000 km/s und einer Laufzeit von 5 ns/m führt.

**Fazit: Die Laufzeiten sind zwar vom Übertragungsmedium bzw. dessen Eigenschaft abhängig, liegen aber in einem engen Bereich zwischen 3,33 ... 5,55 ns/m.**

#### 2.2.4 Bandbreite und Übertragungsgeschwindigkeit

Unterschiedliche Dienste haben unterschiedliche Anforderungen an das transportierende Netz. Das wichtigste Kriterium ist die benötigte Bandbreite bzw. Übertragungsgeschwindigkeit. Hierzu eine Begriffsbestimmung: Unter *Bandbreite* wird in der Analogtechnik die Differenz zwischen einer oberen und einer unteren Grenzfrequenz bezeichnet. Bei der Telefonie soll z.B. der Frequenzbereich 300 Hz bis 3,4 kHz übertragen werden, die Bandbreite beträgt demnach 3,1 kHz. In der Digitaltechnik dagegen interessiert, welche Datenmenge in einer gewissen Zeitspanne übertragen werden kann. Die Datenmenge wird in Bit oder Byte angegeben<sup>1</sup>. So benötigt

<sup>1</sup> Achtung: dort, wo Daten in paralleler Form verarbeitet werden, findet man oft die Angabe Byte/s, wobei 1 Byte/s = 8 bit/s entspricht.

die digitale Sprache bei 8 kHz Abtastfrequenz und 8 Bit pro Abtastwert eine *Übertragungsgeschwindigkeit* von 64 kbit/s<sup>2</sup>. Daher wird die Übertragungsgeschwindigkeit oft auch als *Bitrate* bezeichnet.

In den folgenden Betrachtungen werden digitale Informationen angenommen, daher ist die Übertragungsgeschwindigkeit von Interesse.

Verschiedene Dienste haben nicht nur einen sehr unterschiedlichen Bedarf an Übertragungsgeschwindigkeiten, sondern auch eine mehr oder weniger große Schwankung in ihrem Informationsgehalt. Sowohl Sprache als auch Video erzeugen meist kontinuierliche Datenströme. In der klassischen Datenkommunikation dagegen hat der Verkehr eine starke Ein-Aus-Charakteristik. Nimmt man das Surfen im World Wide Web (WWW), so wird mit einer kurzen Anfrage eine Web-Seite angefordert. Dann wird diese Seite zum Teilnehmer übertragen, der daraufhin die Seite liest. Vereinfacht ergibt sich eine Charakteristik, wie in Abbildung 4 dargestellt.

<sup>2</sup> Achtung: Umgangssprachlich wird oft auch in der Digitaltechnik der Begriff Bandbreite für die Übertragungsgeschwindigkeit verwendet, was aber formal falsch ist.

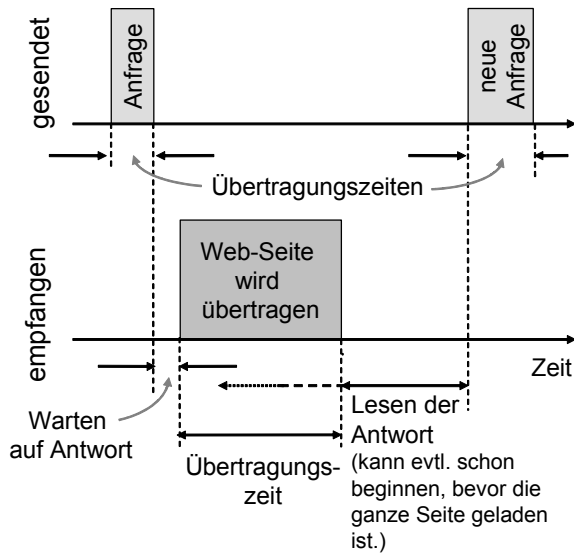


Abbildung 4: Charakteristik beim Web-Abruf

Wenn der Benutzer aber eine Anfrage stellt, dann soll die Antwort, z.B. eine neue Web-Seite in möglichst kurzer Zeit verfügbar sein.

In diesen Beschreibungen taucht jetzt die Übertragungsgeschwindigkeit nicht mehr auf. Der Grund liegt in der andersartigen Charakteristik solcher Daten: Sie werden über ein vorhandenes Netz übertragen und passen sich dessen Übertragungsgeschwindigkeit an. Bei gegebener Datenmenge dauert es in einem „langsamen“ Netz sehr viel länger, bis diese Datenmenge übertragen ist, als in einem Netz mit hoher Übertragungsgeschwindigkeit. Abbildung 5 veranschaulicht diesen Sachverhalt.

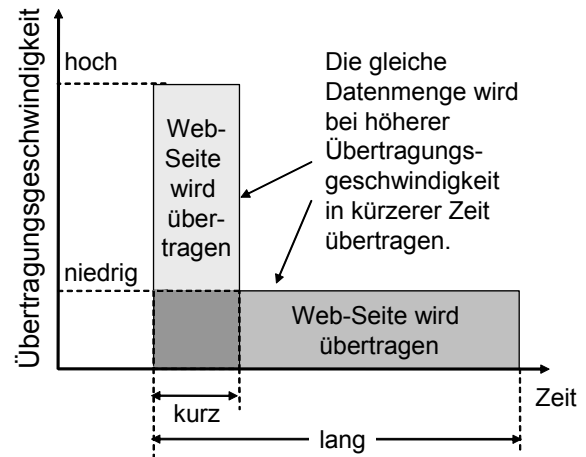


Abbildung 5: Übertragungszeit als Funktion der Übertragungsgeschwindigkeit

Hier kommt jetzt die „menschliche Zeitkonstante“ ins Spiel: wir akzeptieren nur eine kleine Verzögerung bis wir das Ergebnis erhalten; die halbe Sekunde kann schon zu viel sein. Besonders Menschen, die überwiegend mit dem Computer arbeiten, z.B. mit *Computer Aided Design* (CAD) konstruieren, benötigen die kurze Reaktionszeit in ihrer Arbeit, ansonsten entstehen Frust und damit Stress.

Betrachten wir die vorher erwähnten Anwendungen z.B. aus dem M2M-Bereich, so ist es nicht der Mensch, der hier eine Zeitbedingung aufstellt, sondern der maschinelle Prozess. Auch hier gibt es evtl. harte Zeitbedingungen, allerdings sind es eben die Prozesse, die jetzt die Parameter diktieren.

Da heute ein großer Teil der Kommunikation über das Internet abgewickelt wird oder zumindest in Netzen, die mit dem Internet-Protokoll arbeiten, muss untersucht werden, welchen Einfluss dieser Paketmodus für die Verzögerungszeit hat. Die allgemeine Definition der Verzögerungszeit geht von der Zeit aus, die ein Ereignis verzögert beim Empfänger ankommt. Der obere Teil von Abbildung 6 zeigt ein Signal, hier ein Flankenwechsel, wie er verzögert am Empfänger eintrifft. Relevant

sind damit hauptsächlich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals und eventuelle Verarbeitungszeiten in Knoten.

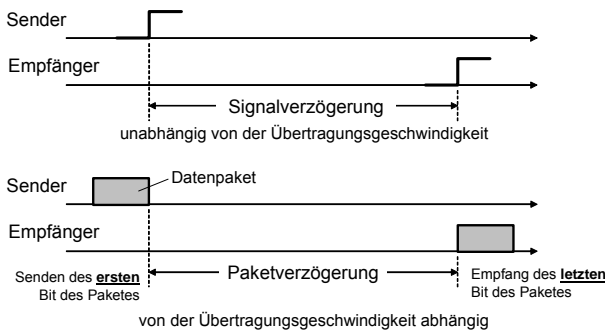


Abbildung 6: Verzögerungszeit-Definitionen

Heute ist aber kaum mehr ein so einfaches Signal wie ein Flankenwechsel interessant, sondern die Daten, die in einem Datenpaket übermittelt werden. Erst wenn das Datenpaket vollständig empfangen ist, wird es ausgewertet (Abbildung 6 unten). Damit werden neben den oben genannten Einflussfaktoren auch die Länge des Pakets und natürlich die Übertragungsgeschwindigkeit relevant.

Die Übertragungsgeschwindigkeiten in der Telekommunikation reichen heute bis 40 Gbit/s. An 100 Gbit/s wird gearbeitet und sogar 400 Gbit/s sind in Diskussion. Für die Zeiten die zur Übertragung der Daten benötigt werden, bedeutet dies eine radikale Verringerung. Die folgende Tabelle zeigt die Übertragungsdauer für ein typisches Datenpaket von 1500 Byte bei verschiedenen Übertragungsgeschwindigkeiten.

Übertragungsgeschwindigkeit	Übertragungsdauer für 1500 Byte
64 kbit/s (Telephoniekanal)	190 ms
2 Mbit/s (klassische Mietleitung)	6 ms
16 Mbit/s (DSL-Teilnehmeranschluss)	750 µs
155 Mbit/s (SDH STM-1)	77 µs
2,5 Gbit/s	4,8 µs
40 Gbit/s	300 ns
100 Gbit/s	120 ns
400 Gbit/s	30 ns

Stellt man diesen Werten die Laufzeit auf dem Medium gemäß Kapitel 0 gegenüber, z.B. 5 ns/m bzw. 100 µs für eine Strecke von 20 km, so wird deutlich, dass bei langsamen Übertragungsgeschwindigkeiten die Paketlänge dominierend zur Verzögerungszeit beiträgt, bei hohen Übertragungsgeschwindigkeiten fast nur noch die Laufzeit auf dem Medium.

**Fazit: Eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit wird nicht nur benötigt um große Datenmengen zu übertragen, sondern auch um kleine Datenmengen schnell zu übertragen.**

---

## 2.2.5 Schwankung der Verzögerungszeit

Im digitalen Telefonnetz wird eine Verbindung aufgebaut und alle Bits nehmen dann den gleichen Weg und erfahren damit auch die gleiche Verzögerung. Mit anderen Worten: ein synchroner Datenstrom kommt auf der Empfangsseite wieder als synchroner Datenstrom an, nur zeitlich verzögert.

Im Internet mit seiner Paketvermittlung muss jedes Datenpaket in jedem Knoten untersucht und in eine *Ausgangswarteschlange* (Pufferspeicher) geschrieben werden. Vom Füllstand dieser Warteschlange hängt dann der Zeitpunkt des Absendens des Pakets ab und damit auch die Verzögerungszeit in diesem Knoten. In einem Netz muss das Datenpaket viele Knoten durchlaufen, so dass sich bis zum Zielort für die Pakete sehr unterschiedliche Verzögerungszeiten ergeben können.

Je nach Dienst muss diese Schwankung auf der Empfangsseite wieder ausgeglichen werden, was nur durch einen weiteren Pufferspeicher realisiert werden kann. Er sorgt dann dafür, dass alle Datenpakete auf die maximale Verzögerungszeit gebracht werden. Die Schwankungsbreite dieser Verzögerungszeiten ist ein wichtiges Qualitätskriterium. Manchmal wird dafür der Begriff *Jitter* verwendet. Die Dimensionierung des Ausgleichspuffers ist damit direkt von der Schwankung der Verzögerungszeit abhängig.

**Fazit: In paketvermittelten Netzen schwankt die Verzögerungszeit. Es hängt vom Dienst ab, ob diese Schwankung akzeptiert oder ausgeglichen werden muss. Letzteres kostet wieder zusätzliche Zeit.**

## 2.2.6 Weitere Qualitätsparameter

Neben den hier betrachteten Qualitätsparametern Verzögerungszeit und Schwankung der Verzögerungszeit sind die folgenden wichtig:

- Verlust (engl. loss), in paketvermittelten Netzen: Paketverlust (engl. packet loss),
- Zuverlässigkeit (engl. reliability) und
- Verfügbarkeit (engl. availability).

Ob man die Übertragungsgeschwindigkeit selbst als Qualitätsparameter einstuft, ist Ansichtssache, aber die Garantie einer bestimmten Übertragungsgeschwindigkeit ist unbestritten wichtig.

Es geht übrigens nicht darum, immer eine hohe Qualität bereitzustellen, sondern differenzierte Qualitätsstufen. Das führt zu einem Kritikpunkt am Telefonnetz: es stellt immer eine – die höchste – Qualitätsstufe bereit. Das heutige Internet liegt am anderen Ende der Skala: es gibt keine definierte Qualität, man bezeichnet dies als *Best Effort*. Das nächste Kapitel zeigt einige Möglichkeiten für differenzierte Qualitäten.

Nicht zu unterschätzen sind auch Anforderungen aus Datensicherheit und Datenschutz, wobei hier auch der gesetzliche Rahmen einzuhalten ist.

### 2.3 Technische Ansätze zur Qualitätsbereitstellung

In IP-Netzen gibt es folgende Qualitäts-Ansätze:

- Best Effort – nur der Vollständigkeit halber: Best Effort steht in der Internet-Welt für „keine QoS-Unterstützung“. Jedes Paket wird so übertragen, wie es momentan eben möglich ist, es gibt keine Unterscheidung.
- Überdimensionierung, ist zwar technisch einfach aber teuer. Zudem ist keine Qualitäts-Unterscheidung möglich und die zusätzliche Kapazität wird oft sehr schnell wieder von neuen Anwendungen aufgefressen.
- Reservierung von Kapazitäten – das entspricht vom Grundsatz her der klassischen Telekommunikation, bei der eine Verbindung hergestellt wird und für diese Verbindung Ressourcen im Netz reserviert werden. Ein Ansatz in IP-Netzen ist als Integrated Services bekannt und nutzt das Protokoll RSVP.
- Prioritäten – hierbei werden die Verkehre durch spezielle Markierungen unterscheidbar gemacht, z.B. die Prioritätsbits im Ethernet oder das Type of Service Feld (ToS) im IP-Protokollkopf.
- Flusskontrolle – ein reaktiver Mechanismus, bei dem im drohenden Überlastfall der Sender veranlasst wird, seine Senderate zu reduzieren. Bekanntes Verfahren ist das Sliding Window, bei dem die signalisierte Fenstergröße dem Sender anzeigt, was er noch senden darf.
- Drosselmechanismen – dieser Mechanismus arbeitet proaktiv, drosselt also den Sender bevor es zum Überlastfall kommt.

Alle diese Mechanismen können Verluste in Netzen vermindern, aber wie sieht es mit der Reduzierung der Verzögerungszeiten aus? Eine Beschleunigung des gesamten Verkehrs kann kein Mechanismus dieser Art bewirken, aber eine Bevorzugung des Verkehrs, der eine geringere Verzögerungszeit benötigt gegenüber anderem Verkehr ist möglich. Das geht explizit über *Prioritäten*, wobei der kritische Verkehr eine höhere Priorität bekommt und bevorzugt abgewickelt wird. Implizit geht es auch über Reservierungen. Sie bauen auf einer Verbindung auf und beim Verbindungsaufbau ist es möglich, Verbindungen zu priorisieren.

Für die Zuweisung der Prioritäten ist ein geeignetes Verfahren notwendig. Überlässt man dies dem Kunden, muss eine gestaffelte Tarifierung vorgesehen werden, denn sonst bestünde für den Kunden kein Anreiz, seinen Verkehr nieder zu priorisieren. Es gibt aber auch andere Möglichkeiten Prioritätsklassen zuzuweisen:

- per Dienst, z.B. priorisieren von Telefonie im IP-Netz gegenüber E-Mail,
- per physikalischer Schnittstelle am Switch. So kann z.B. in einem Intranet der Verkehr eines spezifischen Servers priorisiert werden.

### 2.4 Service Level Agreement (SLA)

Sobald ein Kunde bei einem Netzbetreiber eine Leistung einkauft und diese mit einer bestimmten Qualität verbunden ist, wird es interessant, diese Qualität zu definieren und Regeln festzulegen, wie diese Qualität gemessen wird und welche Maßnahmen greifen, wenn die Qualität nicht bereitgestellt wird. Dazu dient das *Service Level Agreement* (SLA), ein Vertrag zwischen zwei Par-

---

teilen über eine bestimmte Qualität. Er kann zwischen zwei Netzbetreibern oder zwischen Netzbetreiber und Nutzer geschlossen werden.

Ein SLA bezieht sich per Definition auf unidirektionalen Verkehr, d.h. für beide Richtungen müssen zwei SLAs abgeschlossen werden. Im SLA werden gewisse Parameter festgelegt, wie z.B.:

- Verfügbarkeit des Netzes,
- maximale Paket-Durchlaufzeit und
- maximaler Paketverlust.

Um feststellen zu können, ob der Vertrag eingehalten wird, muss eine Überwachung des Verkehrs stattfinden. Dabei ist die Überwachung im Interesse beider beteiligten Parteien, denn ein Vertragspartner bezahlt für die Leistung und wird bei Verletzung des Vertrages sein Recht einklagen. Der andere Vertragspartner dagegen wird selbst Messungen durchführen, um festzustellen, ob er die Leistung wirklich nicht erbracht hat.

Damit wird auch eine Verwaltung der Ressourcen in einem Netz notwendig. Heute, im Best-Effort-Internet, wird neue Kapazität eingebaut, wenn die Klagen der Kunden über lange Wartezeiten zu groß werden. Bestehen aber Verträge müssen neue Verfahren der Messung und Steuerung im Netz eingeführt werden.

Ein Begriff in diesem Zusammenhang ist der *Bandwidth Broker*, eine Instanz innerhalb eines Netzes, die Ressourcen verwaltet, zuteilt und die Verkehrs-Steuerung vornimmt. Schaltet man mehrere Netze zusammen, entsteht natürlich die Notwendigkeit, dass die Bandwidth Broker der verschiedenen Netze miteinander kommunizieren, und dafür ist wieder ein geeignetes Protokoll notwendig.

## **2.5 Gibt es zu viele Randbedingungen oder gar Verhinderungsgründe?**

Das ist eine schwer zu beantwortende Frage. Natürlich hat jede Anwendung ihre spezifischen Anforderungen und diese sind meist nicht verhandelbar.

Es ist auch wahr, dass gewisse Anforderungen sich gegenseitig beeinflussen. Ein gutes Beispiel ist die Forderung nach fehlerfreier Übertragung und geringer Verzögerungszeit. Die sichere Übertragung kann durch Wiederholung im Fehlerfall (retransmission) oder durch eine Vorwärtsfehlerkorrektur realisiert werden. Erstere verzögert zwar nur die fehlerhaften Informationsblöcke, will man aber insgesamt einen kontinuierlichen Datenstrom übertragen, so ist auf der Empfangsseite eine künstliche Verzögerung einzufügen, so dass auch mit einer Wiederholung der kontinuierliche Datenstrom rekonstruiert werden kann. Aber auch ohne diese Forderung – es könnte ja gerade dieser fehlerhafte Block sein, der wichtig ist und schnell übertragen werden müsste.

Die Vorwärtsfehlerkorrektur fügt den Nutzdaten Redundanz hinzu, so dass Fehler auf der Empfangsseite korrigiert werden können. Dies erfordert generell, also auch ohne Fehler, eine höhere Kapazität und verzögert alle Datenblöcke.

### 3 Analyse der Protokolle und deren Implementierung

Die heute interessierenden Netze sind paketvermittelte Netze. In der Regel basiert die Schicht 2 auf *Ethernet*, *MPLS* und teilweise noch auf *ATM*, das aber in Zukunft keine Bedeutung mehr haben wird. Auf Schicht 3 hat sich das *Internet Protocol* (IP) durchgesetzt. Während klassisch die schaltenden Geräte auf Schicht 2 als *Switch* bezeichnet werden, ist das schaltende Gerät auf Schicht 3 der *Router*. Durch die komplexere Verarbeitung im Router galt dieser als langsamer als die schnelle Durchschaltung in einem *Switch*. Durch die Steigerung der Leistungsfähigkeit des Routers gilt das nicht mehr allgemein. Zudem haben sich die Grenzen verwischt. Moderne Verfahren verbinden teilweise die Schichten, wie z.B. *MPLS*, das eine enge Kopplung der Schichten vornimmt.

Moderne Netzknoten können daher meist sowohl als *Switch* als auch als *Router* arbeiten und „verstehen“ die Protokolle *Ethernet*, *MPLS* und *IP*. Daher werden nachfolgend zuerst prinzipielle Aussagen zu den Protokollen getroffen und dann im folgenden Hauptkapitel die Architekturprinzipien von Netzknoten dargestellt und deren Einfluss auf die Verzögerungszeit.

#### 3.1 Ethernet

In der ursprünglichen *Ethernet*-Spezifikation wurde die Übertragungsgeschwindigkeit auf 10 Mbit/s festgelegt. Das galt in der damaligen Zeit als absolut ausreichend. Inzwischen ist die Begehrlichkeit nach Kapazität aber rapide gestiegen und weitere Übertragungsgeschwindigkeits-Bereiche wurden erschlossen: 100 Mbit/s, 1 Gbit/s und 10 Gbit/s.

100 Gbit/s ist in der Umsetzung und an noch höheren Übertragungsgeschwindigkeiten wird gearbeitet. Auch die physikalischen Medien haben in ihrer Vielfalt immer mehr zugenommen. Das ursprüngliche Koaxial-Kabel ist nahezu vollständig von Kupferdoppeladern im niederratigen Bereich und Glasfasern im höherratigen Bereich verdrängt worden. Daneben ist es heute auch möglich, *Ethernet* über andere Infrastrukturen wie z.B. klassische Übertragungstechnische Netze zu übertragen.

Die Glasfaserübertragung erlaubt es, große Entfernungen zu überbrücken. So gibt es *Ethernet*-Varianten für bis zu 80 km Reichweite, also weit über den ursprünglichen Einsatz als LAN, also lokales Netz hinaus.

Abbildung 7 zeigt die standardisierten *Ethernet*-Rahmenstrukturen. Die Nutzdaten dürfen maximal 1500 oder 1492 Byte umfassen. Mit einem Fehlerschutz (Frame Check Sequence, FCS) wird der gesamte Rahmen geschützt. Will man auf der Empfangsseite sicher sein, einen fehlerfreien Rahmen der Weiterverarbeitung zu übergeben, muss also erst der ganze Rahmen empfangen und geprüft werden. Würden die Daten noch während des Empfangs weiter geleitet, könnten diese fehlerhaft sein.

Destination Address	Source Address	Type	Daten		PAD	FCS	
6	6	2	46 ... 1500			4	
Destination Address	Source Address	Length	LLC/SNAP	Daten		PAD	FCS
6	6	2	8	38 ... 1492			4

Alle Werte in Oktett

Abbildung 7: Ethernet-Rahmenstrukturen

Der Rahmen beinhaltet die zwei Adressen für Quelle und Ziel. Eigentlich sind diese unnötig, denn in den meisten Fällen transportiert der Ethernet-Rahmen IP-Pakete, die selbst Adressen beinhalten. Trotzdem muss sich das Netz mit diesen Ethernet-Adressen auseinandersetzen und mit einem speziellen Protokoll eine Abbildung der Adressen aufeinander vornehmen. Auf dieses geht Kapitel 3.3 kurz ein.

Ethernet kennt zwei grundsätzliche Betriebsarten:

- Bei Halbduplex arbeiten alle Stationen auf ein gemeinsames Medium. Es kann immer nur eine Station zu einer gegebenen Zeit senden. Um den Zugriff zu regeln, ist ein geeigneter Zugriffsmechanismus notwendig – beim Ethernet ist es das CSMA/CD-Verfahren. Damit entsteht eine nicht vorhersehbare Verzögerung, denn bei gleichzeitigem Sendewunsch muss eine Station warten. Ein ausgefeilter Prozess sorgt zwar für eine Fairness beim Zugriff, die Wartezeit ist aber vom Verkehr abhängig und daher nicht vorhersagbar.
- Vollduplex bedeutet, dass jeweils zwei Stationen in einer Punkt-zu-Punkt Konfiguration gleichzeitig senden und empfangen können. Das erfordert, dass das physikalische Medium diesen gleichzeitigen,

bidirektionalen Transport unterstützt, z. B. durch zwei einzelne Leitungspaare oder Glasfasern. Diese Betriebsart ist heute Standard.

Mit dem Vollduplex-Betrieb ergeben sich heute Sternverkabelungen, bei denen die Stationen an ein zentrales Gerät angeschlossen sind, üblicherweise ein Switch, der aufgrund der Ethernet-Adresse die Ethernet-Datenrahmen vermittelt. Dabei konkurrieren nur noch Stationen, die zum gleichen Ziel senden wollen. Im Switch ist daher ein Pufferspeicher vorzusehen, aus dem heraus die Datenpakete in geordneter Reihenfolge zum Ausgang geleitet werden. Das ergibt auch hier eine unvorhersehbare Wartezeit, allerdings nur noch abhängig von der Last auf diesem Ausgang, nicht abhängig vom Gesamtverkehr im LAN. Auf dieses Thema wird in Kapitel 4.1 näher eingegangen.

Bei der Spezifikation der 100-Mbit/s-Variante wurde übrigens neben dem klassischen Zugriffsverfahren ein zweites Protokoll spezifiziert, das *Demand Priority Protokoll* mit zwei Prioritätsstufen. Sein Ziel war es, auf dem LAN auch Dienste mit Echtzeit-Anforderungen wie Sprache und Video zu unterstützen. Allerdings konnte dieses sich dieses Protokoll nicht durchsetzen und ist vom Markt verschwunden.



### 3.2 Internet Protokoll

Die Basis des Internet und vieler privater Datennetze ist das einheitliche *Internet Protokoll* (IP) [19]. Es arbeitet paketorientiert und in verbindungsloser Technik, d.h. jedes Datenpaket ist selbständig und enthält alle notwendigen Informationen, um es von einem Endsystem zu einem anderen Endsystem zu senden. Die aktuelle Version ist Version 4. Durch die Adressknappheit dieser Version beginnt sich die nächste Protokollgeneration, die Version 6, langsam zu verbreiten. Die prinzipielle Arbeitsweise beider Versionen ist jedoch die gleiche.

Die beiden Hauptfunktionen des Internet Protokolls sind Adressierung und Routing. Dazu kommen noch eine Reihe unterstützender Funktionen. Abbildung 8 zeigt den IP-Protokollkopf und seine Elemente. Die folgenden Abschnitte gehen auf die Funktionen näher ein und analysieren eventuelle Beiträge zur Verzögerung.

#### 3.2.1 Identifikation und Schutz des Paketes

Die Versionsnummer in den ersten 4 Bit des Paketes erlaubt die Unterscheidung verschiedener Protokoll-Versionen.

Bei Paketen variabler Länge muss eine Information über die Größe des Paketes vorhanden sein. Die *Packet-Length* beschreibt die Gesamtlänge des Pakets, die bei IP 65535 Byte umfassen kann. Bei der Bildung vom Paketen muss berücksichtigt werden, dass ein langes Paket – je nach Übertragungsgeschwindigkeit – auch lange unterwegs ist. Um ein effizientes Multiplexen von Datenströmen zu ermöglichen, sollten die Pakete entsprechend klein sein. Andernfalls müssen andere Verkehre zu lange auf die Bedienung warten.

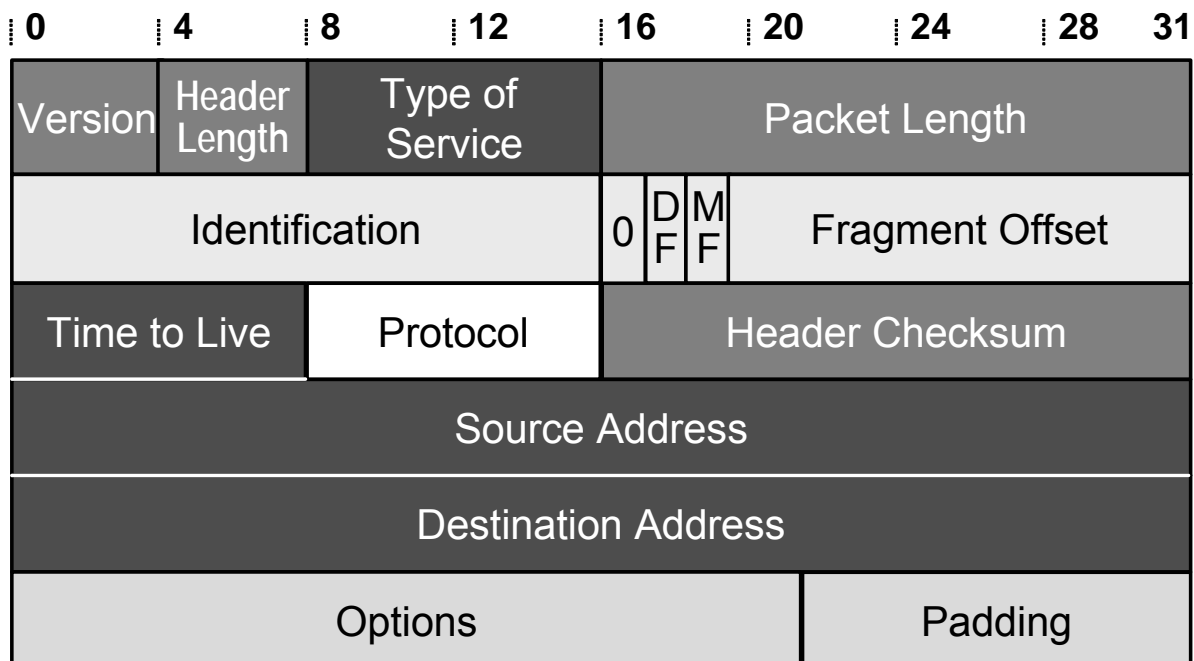


Abbildung 8: IP-Protokollkopf

---

Da durch den Optionen-Bereich der Paketkopf eine variable Größe aufweisen kann, wird in der *Header-Length* die Größe des Kopfes angegeben.

Prüfsummen lassen einen Rückschluss über die Qualität der Übertragung zu. Im IP wird eine einfache Prüfsumme nur für den Protokollkopf (*Header Checksum*) vorgesehen. Für die Verzögerungszeit bedeutet dies, dass zur Prüfung des Protokollkopfes auf Fehlerfreiheit dieser erst komplett eingelesen werden muss. Da es sich aber nur um wenige Bytes handelt, fällt dies nicht ins Gewicht.

### 3.2.2 Fragmentierung

IP-Pakete dürfen zwar wie erwähnt eine maximale Größe von 65535 Oktetts haben, die darunter liegenden Schicht-2-Protokolle haben aber in der Regel eine sehr viel kleinere maximale Rahmengröße. Dieser Wert wird *Maximum Transmission Unit (MTU)* genannt und liegt bei Ethernet bei 1492 oder 1500 Oktett, je nach Variante.

Ist jetzt ein IP-Paket zu übertragen, das größer ist als die Schicht 2 transportieren kann, dann „fragmentiert“ IP das Paket, teilt es also in eine Reihe kleinerer Pakete auf (Abbildung 9). Dieser Vorgang kann im Ursprung oder in einem beliebigen Zwischenknoten (Router) stattfinden. Ein einmal fragmentiertes Paket wird erst am Ziel wieder zusammengesetzt. Wichtig ist, dass ein IP-Fragment wieder wie ein normales IP-Paket aussieht. Daher ist auch das Längenfeld entsprechend anzupassen und die Prüfsumme neu zu berechnen.

Die Fragmentierung ist damit aufwändig und kostet Zeit, weshalb sie heute meist vermieden wird. Da in der Regel in jeder Verbindung irgendwo ein Ethernet als Schicht-2-Protokoll vorkommt, wird bei der Auslegung darauf geachtet, dass die IP-Pakete die Grenze des Datenfeldes von Ethernet von 1492 Oktett nicht überschreiten.

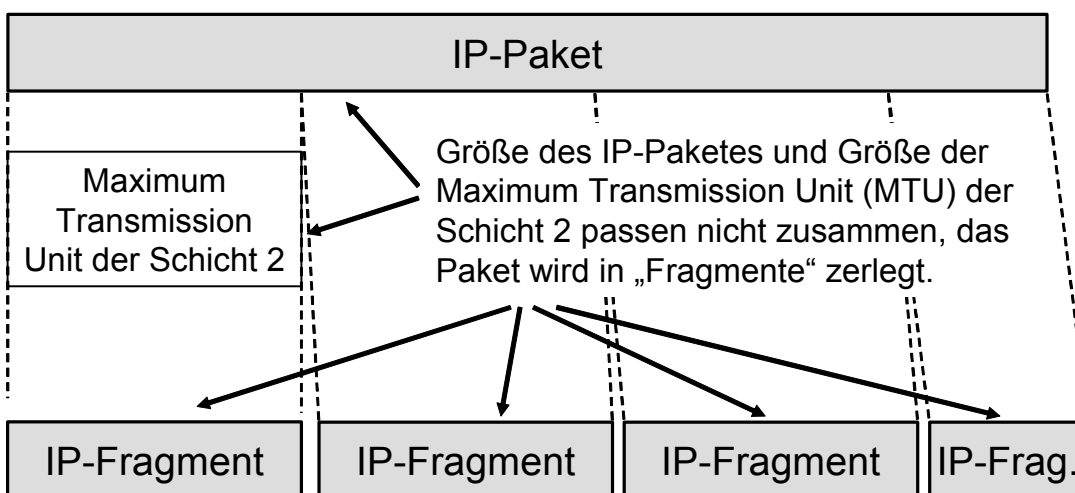


Abbildung 9: Fragmentierung

### 3.2.3 Qualitätskennzeichnung

Im klassischen Internet ist jeder Verkehr gleich viel „Wert“, es gibt keine Bevorzugung. Allerdings hatten schon die Erfinder des Internet Protokolls ein Feld vorgesehen, mit dem Qualitätsstufen unterschieden werden können. Dieses *Type of Service* (TOS) genannte Feld hat eine Struktur, die es erlaubt, 8 Prioritätsstufen zu unterscheiden, die *Precedence* genannt werden, sowie gewisse Kriterien an den Transport des Paketes zu legen wie Zuverlässigkeit (Reliability), Durchsatz (Throughput), Verzögerung (Delay) und Kosten (cost) [20].

Während die Prioritätsstufen heute in privaten IP-Netzen verwendet werden, sind die Kriterien für den Transport zu abstrakt und werden in der Regel nicht verwendet.

Es gibt einen neueren Qualitäts-Ansatz unter dem Namen *Differentiated Services* (DIFFSERV). Dort wird das TOS-Feld umdefiniert zu einem *Differentiated Services Feld* (DS) mit derzeit 21 Qualitätsstufen (siehe Kapitel 3.4.3).

Die Unterstützung von verschiedenen Prioritätsstufen macht den Knoten komplexer wie in Kapitel 4.2 gezeigt wird. Aber sie erlaubt im Gegenzug, gewissen Verkehr bevorzugt zu behandeln. So kann Verkehr, der eine kurze Verzögerungszeit fordert, in eine separate Warteschlange einsortiert werden, die z.B. häufiger abgearbeitet wird.

### 3.2.4 IP Routing

Routing bezeichnet den Vorgang, aufgrund einer gegebenen Zieladresse einen Weg von der Quelle zur Senke durch ein Kommunikationsnetz zu finden. Dabei können verschiedene Kriterien angelegt werden, Beispiele sind der schnellste Weg oder der billigster

Weg. Eine Grundvoraussetzung muss allerdings immer erfüllt sein: es darf keine Schleife im Weg auftreten, da sonst Datenpakete kreisen könnten und ihr Ziel nie erreichen würden.

Um solche Schleifen zu verhindern, wird in einem Kommunikationsnetz immer eine Baumstruktur gesucht. Selbst wenn die reale Implementierung eine Vermaschung bietet, wird für das Routing ein Baum aufgebaut, der dadurch gekennzeichnet ist, dass von jeder Quelle genau ein Weg zum Ziel führt und kein Knoten zweimal durchlaufen wird [21].

Legt man für die Verbindungen zwischen den Knoten Kostenfaktoren fest, so kann die Aufgabe erweitert werden: es gilt nun, nicht nur einen Weg ohne Schleifen, sondern den billigsten Weg zu finden. Auch dafür wurden entsprechende Algorithmen entwickelt.

Das Routing besteht also aus zwei Teilaufgaben:

- Festlegen der geeigneten, evtl. billigsten, Wege durch das Kommunikationsnetz. Dieser Vorgang wird durch Routing-Protokolle unterstützt. Mit ihrer Information werden Routing-Tabellen in den Knoten gefüllt, die für jede mögliche Zieladresse den richtigen Ausgang des Knotens angibt.
- Weiterleiten von ankommenden Paketen anhand deren Zieladresse sowie den Einträgen in der Routing-Tabelle. Dieser Vorgang kostet Zeit, denn der Knoten muss das Paket lesen, zumindest den Paketkopf, die Zieladresse extrahieren, in der Routing-Tabelle den richtigen Ausgang suchen und dann das Paket in die Warteschlange dieses Ausgangs schreiben. Besonders die Tabellensuche ist kritisch, da diese sehr viele Einträge umfassen kann.

---

In dynamischen Routing Protokollen kann es – trotz aller Vorkehrungen – zu Schleifen kommen. Um zu verhindern, dass ein Datenpaket ständig zwischen einigen Routern herumgereicht wird, wird mit jedem Durchlauf durch einen Router ein Zähler im Paketkopf dekrementiert. Er wird im Feld *Time to Live* (TTL) transportiert. Der Vorgang erfordert natürlich Rechenaufwand und kostet Zeit. Dabei ist es weniger das Dekrementieren des TTL-Feldes als die Neuberechnung der Prüfsumme für den geänderten Protokollkopf.

### 3.2.5 Adressierung höherer Protokoll-Schichten

Die IP-Schicht erhält ein Datenpaket von der unterliegenden Schicht und leitet es dann nach oben an die entsprechende höhere Protokoll-Schicht weiter. Sind nun mehrere Abnehmer, d.h. höhere Protokoll-Schichten vorhanden, dann muss eine Art Adressierung vorhanden sein.

Die Information dazu steckt im *Protocol-Feld* des IP-Protokollkopfes. Mit seiner Hilfe wird das entsprechende Transport-Protokoll adressiert.

### 3.3 Address Resolution Protocol (ARP)

Die IP-Datenpakete beinhalten eine IP-Adresse; die darunter liegende Schicht (z. B. Ethernet) arbeitet aber oft mit einer eigenen Adresse. Für die Abbildung aufeinander wurde eine eigene Prozedur geschaffen, das *Address Resolution Protocol* (ARP) [22]. Will ein Rechner an einen anderen ein Paket schicken, benutzt er die IP-Adresse, benötigt aber für die Schicht 2 die Schicht-2-Adresse. Per Broadcast wird jetzt der Zielrechner angefragt der darauf seine Schicht-2-Adresse

mitteilt. Dieser Vorgang verzögert die Übermittlung des Datenpaketes. Allerdings speichert ein Rechner diese Zuordnung von IP-Adresse zu Schicht-2-Adresse zwischen, so dass bei einem folgenden Datenaustausch direkt auf diese Werte zugegriffen werden kann.

## 3.4 Protokolle zur Qualitätsunterstützung

### 3.4.1 Einleitung

Im heutigen Internet gibt es keine unterschiedlichen Qualitäten – alles wird nach dem *Best-Effort-Prinzip* behandelt. Einzige Unterscheidung ist über den Zugang möglich (Varianten von DSL, HFC und Mobilfunk) und damit ist dann auch ein Preisunterschied verbunden. Anders in Intranets, dort werden heute schon Verkehre unterschieden.

Das im Internet meist angewandte Prinzip, einfach mehr Kapazität bereitzustellen ist nicht zielführend. Die Geschichte lehrt, dass nie „genügend“ Bandbreite vorhanden war, so wie auch nie „genügend“ Speicher vorhanden war. Jede Erweiterung hat auch neue Dienste und Anwendungen hervorgebracht, die dieses Potential wieder aufgebraucht haben.

Also bleibt nur, den Verkehr unterscheidbar zu machen und dann im Netz unterschiedlich zu behandeln, z. B. indem einzelne Verbindungen aufbaut und für jede Verbindung Ressourcen reserviert werden, oder indem man Prioritäten oder Verkehrsklassen einführt.

In der *Internet Engineering Task Force* (IETF) sind Protokolle spezifiziert, die zur Qualitätsunterscheidung und Unterstützung von Echtzeit-Verkehr dienen. Nachfolgend werden die Ansätze INTSERV und DIFFSERV kurz vor-

gestellt und ihr Einfluss auf die Verzögerungszeit der IP-Pakete betrachtet.

### 3.4.2 Integrated Services (INTSERV) & Resource Reservation Protocol (RSVP)

Um Echtzeit-Dienste unterstützen zu können, wurde unter dem Begriff *Integrated Services* (INSERV) eine Aktivität durchgeführt, deren Ziel die Spezifikation eines entsprechenden Protokolls war. Die Vorgaben für das Protokoll waren:

- Modifikation der Internet Infrastruktur so, dass sie „echtzeitfähig“ wird, dazu muss eine irgendwie geartete Steuerung und Überwachung der Paketverzögerung durchgeführt werden.
- Die Lösungen müssen Ergänzungen zum bestehenden Internet bilden, kein Ersatz.
- Das Internet-Protokoll (IP) sollte soweit wie möglich unangetastet bleiben und für alle Diensttypen universell nutzbar sein.

Um eine gewisse Qualitäts-Garantie bieten zu können, wird die Reservierung von Ressourcen – im einfachsten Fall von Kapazität – als notwendig angesehen. Zudem ist zu Beginn der Kommunikation zu prüfen, ob eine neue Anforderung überhaupt angenommen werden kann, z.B. ob die notwendigen Ressourcen verfügbar sind. *Resource Reservation* und *Admission Control* sind damit die Kernfunktionen.

Im Gegensatz zum Telefonnetz (das diese Funktionen schon immer beinhaltete) wollte man allerdings keine harte Reservierung bei der alle Netzelemente immer den Status der Verbindung kennen. Statt dessen wurde ein Ansatz gewählt, der mit „soft state“ bezeichnet wird. Hierbei wird mit einem einfachen Reservierungsprotokoll gearbeitet, das in re-

gelmäßigen Abständen die Reservierung auffrischt. Im Normalfall werden die Ressourcen über das Reservierungsprotokoll auch wieder freigegeben, bei einem Fehlerfall dagegen sorgt eine Zeitüberwachung (timeout) für die Freigabe der Ressourcen.

Man ging davon aus, dass der Empfänger am besten weiß, was er verarbeiten kann. Der Sender schickt dazu einen Reservierungsvorschlag an den Empfänger, aber erst dessen Antwort löst in den Routern die tatsächliche Reservierung aus.

Im Rahmen der INTSERV-Arbeiten wurde zwei Diensttypen mit unterschiedlichen Qualitätsanforderungen ausführlich beschreiben:

- Guaranteed Quality of Service [23]:

Ein Dienst, bei dem absolut kein Paketverlust auftreten darf und die Verzögerung der Pakete sich nur in einem eng begrenzten Rahmen bewegen darf. Für das Netz heißt dies, dass eine feste Kapazität reserviert werden muss.

- Controlled Load Network Element Service [24]:

Die Dienstqualität entspricht einem Best-Effort-Service unter Bedingungen niedriger Netzlast. Damit müssen im Netz genügend Ressourcen bereitstehen, der Dienst kann aber nicht von einer absoluten Qualität ausgehen.

Die als notwendig erachteten Funktionen zeigt die Abbildung 10. Für die Betrachtungen zur Paketverzögerung sind die Elemente im Datenpfad relevant:

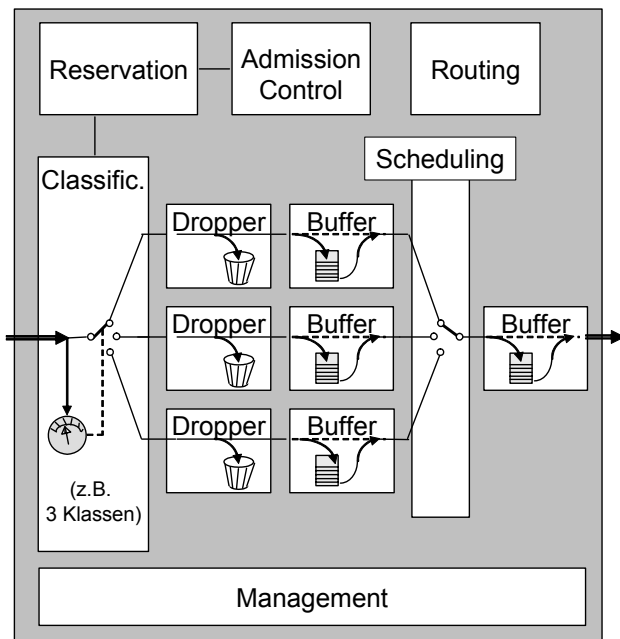


Abbildung 10: Referenzkonfiguration für INTSERV

- Packet Classification: Am Eingang des Netzes werden die Pakete in Klassen eingeteilt und einem Flow zugeordnet.
- Packet Scheduling: Die von der Packet Classification sortierten Pakete müssen jetzt in unterschiedliche Pufferspeicher (Warteschlangen) eingereiht und dann mit einer geschickten Strategie in den Ausgangspuffer weitergeleitet werden.
- Packet Dropping: Verwerfen von Paketen die nicht dem angemeldeten Verkehr entsprechen.

Das *Resource Reservation Protocol* (RSVP) ist die Lösung für INTSERV [25]. Mit RSVP erhält das verbindungslose IP einen verbindungsorientierter Zusatz erhält.

Kritiker sagen, dass RSVP seinem Anspruch nicht gerecht wird. Aber aus Sicht der Verzögerung im Netz würde RSVP helfen, denn es werden unterschiedliche Verkehre unterstützt, was eine Art Priorisierung erlaubt und

es werden Reservierungen durchgeführt, was hilft Überlastsituationen zu vermeiden.

RSVP hat sich aber nicht durchgesetzt. Es wird heute nur in Teilbereichen des Internets oder in Intranets eingesetzt.

### 3.4.3 Differentiated Services (DIFFSERV)

Die Nachteile von INTSERV versuchte man mit einem neuen Ansatz zu umgehen und trotzdem der Marktforderung nach Qualität im IP-Netz nachzukommen:

- Netzbereiche sollen unabhängig voneinander arbeiten können, also nicht unbedingt auf einen Nachrichtenaustausch dazwischen angewiesen sein.
- Das Verfahren muss skalierbar sein, also in großen Netzen noch funktionieren.
- Es soll nicht auf die Anwendungen und Endgeräte angewiesen sein.

Die Lösung dafür wurde unter dem Begriff *Differentiated Services* (DIFFSERV) diskutiert [26]. DIFFSERV verlässt das Prinzip der Behandlung einzelner Flows und behandelt stattdessen immer zusammengefasste Verkehrsströme, im Englischen mit *aggregate* bezeichnet.

Der Nutzer fordert einen bestimmten Qualitätslevel durch Markierung jedes entsprechenden Paketes an. Diese Markierung zeigt dem Netz also an, wie es dieses Paket behandeln muss, eine Eigenschaft, die als *Per-Hop Behaviour* (PHB) bezeichnet wird.

Bei DIFFSERV wird keine Verbindung aufgebaut, sondern der Kunde handelt mit seinem Netzbetreiber ein Profil aus, in dem festgelegt wird, welche Bitraten in jedem der Qualitätslevel an der Netzkante auftreten dürfen die *Service Level Specification* (SLS).

Abbildung 11 zeigt ein Beispiel mit den drei möglichen Verkehrsarten.

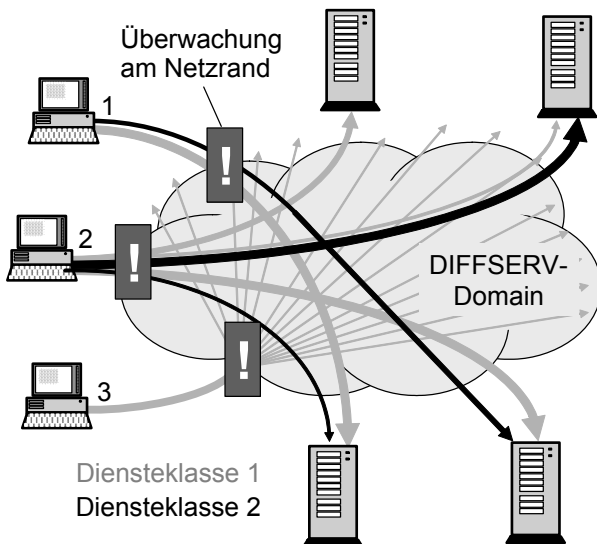


Abbildung 11: Behandlung der Diffserv Dienstklassen

1. Verkehr zu einem bestimmten Ausgangspunkt,
2. Verkehr zu einem definierten Satz von Ausgangspunkten,
3. Verkehr zu jedem beliebigen Ausgangspunkt.

Der Netzbetreiber fasst Verkehre gleicher Klasse aber verschiedener Teilnehmer zusammen und behandelt in seinem Netz nur noch diesen Summenverkehr. Innerhalb des Netzes gibt es keine feste Reservierung, sondern nur eine Überprüfung an der Netzkante. Daraus wird sofort ersichtlich: je besser die Nutzer ihre Ziele kennen und benennen können, um so besser kann der Netzbetreiber die Qualitäten bereitstellen bzw. sein Netz planen.

In einer DIFFSERV-Umgebung müssen die PHBs in jedem Paket transportiert werden.

Dazu wird das im IP Protokoll-Kopf vorhandene Feld *Type of Service* (TOS) umdefiniert und trägt bei DIFFSERV das 6 Bit große Feld *Differentiated Services* (DS) [27, 28].

Die Funktionen am Netzrand entsprechen ganz grob denen eines INTSERV-Knotens. Klassifizierung, Überwachung auf Einhaltung der Parameter, Verwerfen von Paketen, die nicht den Regeln entsprechen und Pufferspeicher mit einem ausgeklügelten Scheduling. Im Gegensatz zum INTSERV, wo jede Funktion in jedem Knoten vorhanden ist, tragen bei DIFFSERV nur die Knoten an den Rändern des Netzes alle Funktionen.

Aus Sicht der Verzögerung im Netz würde DIFFSERV helfen, denn es werden mehrere Prioritätsstufen unterstützt, aber auch DIFFSERV hat sich nicht durchgesetzt.

### 3.5 Multiprotocol Label Switching (MPLS)

Im Zusammenhang mit dem Transport von IP über ATM wurde ein Multilayer-Routing-Konzept entwickelt, *Multi-Protocol Label Switching* genannt [28]. Es stellt eine Verschmelzung oder zumindest enge Kopplung der Schicht-2- und der Schicht-3-Funktionalität dar. MPLS hat sich stark weiter entwickelt und ist nicht mehr auf ATM als Schicht 2 angewiesen. Dazu wurden eigene Protokollelemente für MPLS definiert.

Abbildung 12 will das verdeutlichen, wobei diese Darstellung so zu lesen ist, dass MPLS sowohl eine Kopplung zwischen der Schicht 2 und der Schicht 3, als auch eine eigene, zwischengeschobene Protokollschicht darstellen kann.

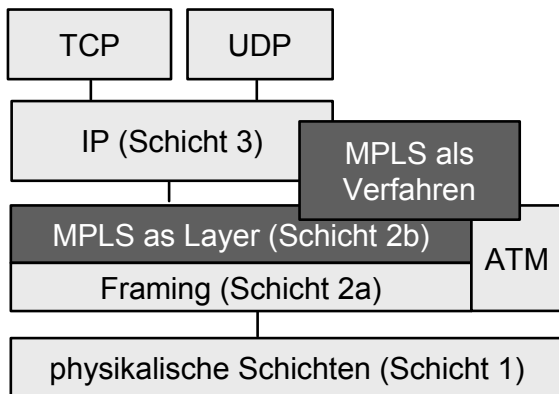


Abbildung 12: Protokoll-Modell von MPLS

Für die reine Rahmenbildung (Schicht 2a) wird ein anderes Protokoll benötigt, z.B. *Frame Relay* (FR) oder die *Generic Framing Procedure* (GFP).

Kern von MPLS ist die Trennung von Routenberechnung und Weiterleitung (forwarding). Wenn ein Pfad definiert ist, dann werden die Daten aufgrund eines einer kurzen Kennzeichnung mit lokaler Signifikanz, dem *Label*, weitergeleitet. Dieser Vorgang ist schneller als das Auswerten eines kompletten Paketkopfes auf der Schicht 3. Die vordefinierten Pfade werden in unterschiedlichen Qualitätsklassen bereit gestellt, die hier mit *Forward Equivalent Class* (FEC) bezeichnet werden.

Am Eingang einer MPLS-Domäne, also eines Netzbereiches, der mit MPLS arbeitet, müssen die Pakete mit dem Label versehen und klassifiziert werden. Dann werden sie in die entsprechenden Pfade einsortiert und aufgrund der Label-Werte weitergeleitet. Am Ende der MPLS-Domäne wird das Label entfernt.

Für die Label-Verwaltung und -Zuweisung wurde ein eigenes Steuerprotokoll geschaffen, das *Label Distribution Protocol* (LDP), es kann aber auch ein erweitertes RSVP verwendet werden.

MPLS vereint damit verschiedene Eigenschaften der anderen Verfahren:

- Verbindungsorientierter Ansatz wie bei INTSERV, aber
- Betrachtung von zusammen gefasstem (aggregiertem) Verkehr wie bei DIFFSERV.

MPLS erlaubt dem Netzbetreiber viel Einflussnahme durch das Netzmanagement. Daher ist es besonders bei den klassischen Telekommunikationsnetz-Betreiber weit verbreitet.

Aus Sicht der Paketverzögerung entsteht am Eingang der MPLS-Domäne ein zusätzlicher Aufwand durch die Label-Zuweisung und in den Zwischenknoten werden die Labels aufgrund von Tabelleneinträgen umgewertet. Zudem trägt der MPLS-Header ein *Time-to-Live-Feld* (TTL), das in jedem Knoten dekrementiert werden muss. Ob diese Vorgänge wirklich schneller ablaufen als ein standardmäßiges Routing auf IP-Ebene ist fraglich.

**Fazit: RSVP könnte sicher helfen, Verkehre zu unterscheiden und solche mit der Forderung nach geringer Verzögerungszeit zu unterstützen. Die Verbreitung ist aber sehr gering und die Akzeptanz schlecht. DIFFSERV kann als besondere Form der Priorisierung angesehen werden. Auch dafür ist die Verbreitung gering. MPLS ist aufgrund seiner guten Management-Fähigkeiten weit verbreitet. Durch die Unterstützung verschiedener Verkehrsklassen bietet es ein Art Priorisierung.**



### 3.6 Höhere Protokolle

Die Protokolle oberhalb von IP sind reine Ende-zu-Ende-Protokolle und werden normalerweise in den Netzknoten nicht ausgewertet. Allenfalls kann ein Netzknoten Informationen aus diesen Protokollen für eigene Entscheidungen heranziehen, z.B. die Portnummer, um dienstabhängig zu routen.

Die zwei wichtigsten Protokolle auf dieser Ebene sind das verbindungsorientierte *Transmission Control Protocol (TCP)* und das verbindungslose *User Datagram Protocol (UDP)*. TCP setzt auf das verbindungslose IP eine verbindungsorientierte Kommunikationsbeziehung mit allen Vorteilen einer Verbindung wie Fehlerkorrektur, Flusskontrolle, Qualitätsüberwachung usw. allerdings ohne Reservierungen im Netz. UDP stellt, da IP schon selbst verbindungslos ist, nur noch eine geringe Zusatzfunktionalität bereit.

Über diesen Transport-Protokollen residieren die Protokolle für die Applikationen. Sie sind auf die jeweilige Applikation zugeschnitten. Da das Internet als Datenkommunikationsnetz nur auf der IP-Ebene arbeitet, sind neue Entwicklungen im Applikationsbereich jederzeit möglich und z.B. mit dem *World Wide Web* auch geschehen.

#### 3.6.1 Transmission Control Protocol (TCP)

TCP ist ein zuverlässiges, verbindungsorientiertes Transportprotokoll [29]. Es finden aber keine Reservierungen von Ressourcen im Netz statt. TCP bietet ganz grob folgende Funktionen:

- Auf- und Abbau von Verbindungen auf der TCP-Ebene (nur Punkt-zu-Punkt, Ende-zu-Ende, Vollduplex),
- Flusskontrolle (Ende-zu-Ende),

- Reihenfolgesicherung,
- Zeitüberwachung und
- Prüfsummenbildung.

Die zu übertragenden Daten werden in TCP-Segmente variabler Länge aufgeteilt und mit einem mindestens 20 Oktett umfassenden Protokollkopf versehen.

Für den Aufbau der Verbindung wird ein Handshake-Verfahren verwendet, bei dem mit drei Nachrichten beide Seiten der Kommunikation sich synchronisieren. Ziel ist der Austausch von *Folgenummern*, mit deren Hilfe während der aktiven Phase der Kommunikation dann verlorengegangene oder in der Reihenfolge vertauschte Segmente erkannt werden.

TCP beinhaltet verschiedene Überlast-Mechanismen die darauf beruhen, einen Segmentverlust zu detektieren und darauf hin die Senderate zu drosseln [30].

Einige Punkte sind nicht ideal in einer TCP-basierten Umgebung:

- Einer der Vorteile von TCP ist auch gleichzeitig ein Nachteil: So führt die Flusskontrolle zwar zu einem Schutz des Netzes, bewirkt aber, dass Dienste, die eine konstante Übertragungsgeschwindigkeit oder zumindest eine bestimmte minimale Übertragungsgeschwindigkeit benötigen, nicht auf TCP aufbauen können. Deshalb nutzen alle zeitkritische Dienste im Internet heute UDP und bauen ihre Verbindungen in neuen Protokollschichten oberhalb von UDP auf.
- Ein anderer Kritikpunkt ist, dass TCP die Kapazität nicht fair unter allen Verbindungen aufteilt. So erhalten Verbindungen mit kurzen Paketlaufzeiten automatisch auch eine höhere Kapazität.

- 
- Der Überlast-Mechanismus kann bei lange anhaltenden Verbindungen zu einem Pumpen führen. Die Kapazität wird solange immer erhöht, bis ein Fehler auftritt. Dann wird wieder mit einem kleinen Wert begonnen.

### 3.6.2 User Datagram Protocol (UDP)

UDP ist verbindungslos [31]. Da IP selbst auch verbindungslos ist, stellt sich die Frage nach dem Sinn einer weiteren Schicht. Betrachtet man aber die Anwendungen, dann werden diese jeweils über eine spezifische *Portnummer* angesprochen. Damit liegt die Hauptaufgabe von UDP in der Bereitstellung dieser Portnummern. Da bei UDP keine Flusskontrolle stattfindet, wird es heute von allen zeitkritischen Diensten genutzt. Eine aktive Unterstützung für geringe Verzögerungszeiten findet aber nicht statt. Im Gegenteil, durch die fehlende Flusskontrolle sind Überlastsituationen wahrscheinlicher und damit steigende Verzögerungszeiten.

### 3.6.3 Weitere Schicht-4-Protokolle

Neben diesen beiden klassischen Transportschichten gibt es noch weitere Protokolle in dieser Ebene, z.B. das *Stream Control Transmission Protocol* (SCTP), das aus der Idee entstanden ist, Zeichengabennachrichten der Telekommunikation (#7-Protokoll) über IP zu transportieren [32].

Ob sich noch weitere etablieren, wird die Zukunft zeigen. Es gibt zwar immer wieder Kritik an TCP, so dass es nahe liegt hieran zu arbeiten. Aber andererseits ist TCP so breit etabliert, dass es nur schwer zu verdrängen ist.

**Fazit: Trotz Kritik werden TCP und UDP weiterhin die dominierenden Schicht-4-Protokolle bleiben. TCP ist aufgrund seiner Eigenschaften, besonders der Flusskontrolle, nicht für zeitkritische Dienste geeignet. Diese nutzen heute ausschließlich UDP. Aber Schicht-4-Protokolle können keine aktive Unterstützung für geringe Verzögerungszeiten bieten.**

## 4 Analyse der Netzstrukturen und Netzelemente

### 4.1 Einführung

Ähnlich wie bei den Protokollen werden die Netze untersucht, speziell Architekturen, Funktionen und Netzelemente. *Kommunikationsnetze* bestehen primär aus *Knoten* und *Verbindungen* zwischen den Knoten. Moderne Architekturen zeichnen sich dadurch aus, dass viele Funktionen, die nicht direkt mit dem Transport der Daten befasst sind, in Server ausgelagert werden. Zudem sind die Teilnehmer oftmals über spezielle Zugangnetze angeschaltet (Abbildung 13).

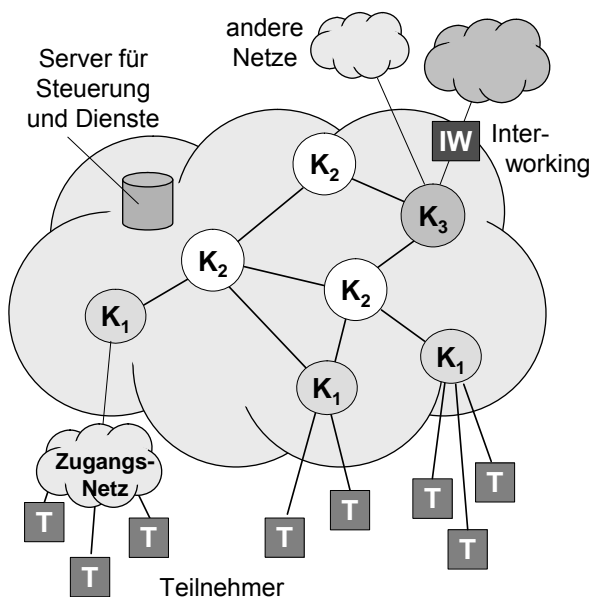


Abbildung 13: Netz (allgemein)

*Netzknoten* suchen aufgrund der vom Teilnehmer vorgegebenen Adresse das Ziel, bzw. den nächsten Knoten, der zum Ziel führt. Es sind also Elemente, die ankommenden Datenverkehr gezielt weiterleiten können.

In einem Netz sind unterschiedliche Knotentypen eingesetzt:

- Knoten, an die Teilnehmer angeschaltet sind. Sie beinhalten üblicherweise zusätzlich die Funktionen zur Verwaltung der Teilnehmer. (K1 in Abbildung 13) (Diese Funktion kann auch in Server ausgelagert sein.)
- Knoten innerhalb des Netzes. (K2 in Abbildung 13)
- Knoten mit Übergang in andere Netze. Das können Netze gleichen Typs aber von anderen Netzbetreibern sein oder auch Netze, die andersartig aufgebaut sind. Dann sind spezielle Umsetzungsfunktionen (Interworking) notwendig. (K3 in Abbildung 13)

Die *Verbindungen* bestehen aus den Leitungen zwischen den Knoten. In den Anfangsjahren des Telefons waren das wirklich einzelne Drähte. Heute liegt ein eigenes Übertragungstechnisches Netz vor, mit eigenen Knoten. Ziel ist die Mehrfachausnutzung einer Leitung, so dass z.B. viele Kommunikationsbeziehungen parallel über eine Leitung geführt werden können. Dieses *Multiplexen* kann auf verschiedene Arten erfolgen, wobei heute meist ein zeitliches Verschachteln der digitalen Informationen zur Anwendung kommt.

In den folgenden Kapiteln werden einige grundlegende Funktionen in Netzen beschreiben und ihr Beitrag zur Verzögerung beschrieben.

#### 4.1.1 Kommunikationsprinzipien

Betrachtet man die Knoten im Netz, so ist ihre Hauptaufgabe das Weiterleiten der Informationsströme in Richtung Ziel. Dazu gibt es eine Reihe von grundlegenden Prinzipien, die sich darin unterscheiden, ob eine explizite Verbindung aufgebaut wird oder nicht, und ob

---

die Informationen als kontinuierlicher Datenstrom oder in Form von Paketen übermittelt werden. Diese Grundprinzipien werden nachfolgend beschrieben.

Die klassische Telekommunikation arbeitet mit der *Leitungsvermittlung*. Sie hat ihren Namen daher, dass der Benutzer den Eindruck hat, für seine zu übertragende Information sei eine „Leitung“ reserviert, korrekter ist es ein Kanal. Wenn kein Kanal mehr frei ist, wird der Verbindungswunsch abgewiesen – im Telefonnetz ertönt das Besetztzeichen. Durch die Festlegung des Weges erfährt jede Information auf diesem Weg die gleiche Verzögerungszeit. Daher wäre die Leitungsvermittlung für zeitkritische Dienste gut geeignet, allerdings ist sie nicht sehr flexibel, weshalb heute die Paketvermittlung auch klassische Domänen der Leitungsvermittlung übernimmt.

Bei der *Paketvermittlung* wird die zu übertragende Information in handliche Portionen aufgeteilt, die dann mit einer Adresse versehen auf die Reise durch das Netz geschickt werden. Die vorhandene Kapazität wird nicht starr aufgeteilt sondern viele Informationsströme nutzen diese flexibel. Da in den Vermittlungsknoten jedes Paket individuell behandelt wird, erfährt auch jedes z.B. eine andere Verzögerung.

In einem Paketnetz kann mehr Verkehr zulassen werden als die Summe der Spitzenwerte der angeschlossenen Quellen. Da es statistisch gesehen unwahrscheinlich ist, dass alle Quellen zu einem gegebenen Zeitpunkt mit ihrer maximalen Kapazität senden, reicht es, wenn eine Art statistischer Mittelwert bereitgestellt wird. Oder anders ausgedrückt: man kann so viele Quellen zulassen, dass die Summe ihrer mittleren Verkehre nicht über der gegebenen Transportkapazität

liegt. Stößt man an die Grenze, dann werden alle transportierten Datenströme Qualitätseinbuße erfahren, z.B. durch die höhere Verzögerung von Datenpaketen bis hin zum Verlust von Paketen.

Eine *verbindungsorientierte Kommunikation*, wie sie im Telefonnetz angewendet wird, setzt sich aus drei Phasen zusammen:

- dem Verbindungsaufbau, der über eine Zeichengabe gesteuert wird und während dem der Weg gesucht wird,
- der eigentlichen Informationsübertragung, in der das Netz eine garantierte Qualität für die Übertragung von zeitkritischer Information bietet, und
- dem Verbindungsabbau, der dazu dient, die belegten Ressourcen wieder frei zu geben.

Der Hauptnachteil der verbindungsorientierten Kommunikation ist, dass Ressourcen für die Übertragung reserviert und auch vom Netz bereitgestellt sind, unabhängig davon, ob wirklich Nutzdaten übertragen werden oder nicht. Umgekehrt erhält der Nutzer einen Dienst entweder zu 100% oder gar nicht – es gibt keinen Leistungsabfall z.B. durch anderen Verkehr.

Dieses Verfahren wird in der klassischen Telekommunikation verwendet, allerdings kann auch ein paketvermitteltes Netz verbindungsorientiert arbeiten. Hier wird dann aber kein Kanal durchgeschaltet, sondern in den Knoten werden Beziehungen hergestellt und evtl. Kapazitäten reserviert. Man spricht in diesem Fall von einer virtuellen Verbindung oder auch logischen Verbindung. Damit kann der Begriff „verbindungsorientiert“ verschiedene Ausprägungen haben.

*Verbindungslose Kommunikation* ist nur in einem paketvermittelten Netz möglich. Dazu

erhalten die Datenpakete die vollständige Adressinformation und werden unabhängig von anderen Datenpaketen durch das Netz geleitet. Die Vorteile liegen darin, dass die Implementierung einfach ist, da keine Zeichengabe zu generieren und auszuwerten ist und dass sehr gut statistisch gemultiplext werden kann. Man erkaufte sich dieses aber mit einer Reihe von Problemen:

- Da jedes Paket individuell übertragen wird, erfährt es auch eine individuelle Verzögerung bei seiner Reise durchs Netz von einer bestimmten Quelle zu einem bestimmten Ziel. Das ist für die Übertragung einer Datei von Rechner zu Rechner kein Problem, will man aber Dienste übertragen, die harten Zeitbedingungen genügen müssen (z.B. Sprache oder Video), dann muss auf der Empfangsseite ein Laufzeitausgleich vorgenommen werden. Dieser kostet aber wieder Zeit.
- Aus dem gleichen Grunde der individuellen Verzögerung und der Tatsache, dass der Weg nicht vorbestimmt ist, ist eine Überholung von Paketen möglich. Damit kann es passieren, dass Pakete auf der Empfangsseite nicht mehr in der Reihenfolge ankommen, in der sie abgesendet wurden. Durch einen Paket-Folgezähler, der in der Regel in einer höheren Protokollschicht ausgetauscht wird, muss daher auf der Empfangsseite die Reihenfolge wieder hergestellt werden. Auch dieses kostet Zeit.
- Erreicht man die Grenze der Übertragungskapazität, dann werden Datenpakete verworfen. Solange keine unterschiedlichen Prioritäten unterstützt werden betrifft das statistisch verteilt alle Nutzer mehr oder weniger stark. Neben Priorisie-

rungen sind Reserverungen ein noch stärkeres Mittel, um hochpriorie Verkehrsklassen zu schützen.

Trotz dieser Nachteile überwiegt der Vorteil der Flexibilität. Durch technische Maßnahmen wie eine Fehlerkorrektur können viele Probleme gelöst werden.

#### 4.1.2 Mehrfachausnutzung von Übertragungsressourcen

Für die Mehrfachausnutzung von Übertragungsleitungen gibt es zwei grundsätzlich unterschiedliche Methoden:

- Multiplexen: dabei wird die Kapazität der Ressource relativ starr einzelnen Kommunikationsbeziehungen zugewiesen.
- Mehrfachzugriff: dabei konkurrieren die Anwendungen um die Ressource und ein Mechanismus sorgt für den fairen Zugriff und verhindert Kollisionen.

Die klassische Übertragungstechnik arbeitet mit Multiplex-Techniken, bei denen eine Aufteilung in einer der Dimensionen des Nachrichtenquaders stattfindet (Abbildung 14): Frequenz (bei optischer Übertragung auch Wellenlänge), Zeit oder Leistung.

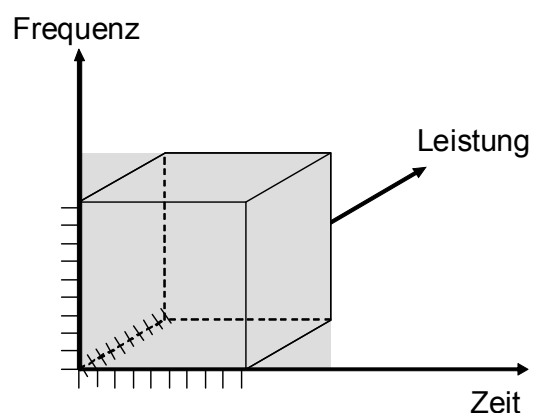


Abbildung 14: Nachrichtenquader

Bei Frequenz- und Wellenlängenmultiplex laufen die Signale relativ ungestört nebeneinander. Eine kleine Verzögerung entsteht allenfalls durch die Wandlung (Modulation). Zwar auch relativ ungestört aber etwas aufwändiger in der Generierung sind Systeme die per *Code Division Multiplex* die Leistung aufteilen. Anders beim *Zeitmultiplex*, wo die Informationen in einem Übertragungsrahmen einen festen Platz einnehmen. Daher müssen hier die Signale u.U. eine Rahmendauer abwarten, bis sie in den Multiplexstrom eingefügt werden können. Die übliche Rahmendauer in der Übertragungstechnik beträgt 125  $\mu$ s.

Viele Paketverfahren arbeiten mit Mehrfachzugriff. Ethernet bietet z.B. mit CSMA/CD ein spezielles Verfahren für Ressourcenzuteilung und Kollisionsbehandlung. Allerdings wird dieses heute in der Regel nicht mehr eingesetzt, da mit Ethernet-Switching alle Stationen per Punkt-zu-Punkt-Link an einen Switch angeschlossen sind, der aufgrund der Zieladresse den Datenrahmen an den richtigen Ausgang leitet. Damit stellt sich hier eine ähnliche Aufgabe wie beim IP-Routing und die Design-Herausforderung liegt in der internen Realisierung des Knotens – siehe Kapitel 4.2.

#### 4.1.3 Fehlerschutz

Viele Protokolle beinhalten einen Fehlerschutz. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Fehlererkennung und Fehlerkorrektur. Bei einer reinen Fehlererkennung muss der Empfänger eine Strategie für den Umgang mit dem Fehler haben. Es kann sein, der Fehler hat nur eine geringe Auswirkung auf die Kommunikation, führt z.B. in einer Sprachkommunikation zu einem Knacken. Kommt es auf Fehlerfreiheit an, z.B. weil Finanzda-

ten übermittelt werden, ist eine Korrektur unabdingbar.

Die klassische Methode der Fehlerkorrektur basiert auf (positiven) Bestätigungen (Acknowledgements) für die empfangenen Pakete. Empfängt der Sender nach einer gewissen Zeit keine Bestätigung für den Empfang, dann wird das Datenpaket nochmals gesendet. Diese Wartezeit muss so bemessen werden, dass die größte vorkommende Laufzeit noch keine Wiederholung auslöst, denn unnötige Wiederholungen können letztendlich zu Überlast im Netz führen.

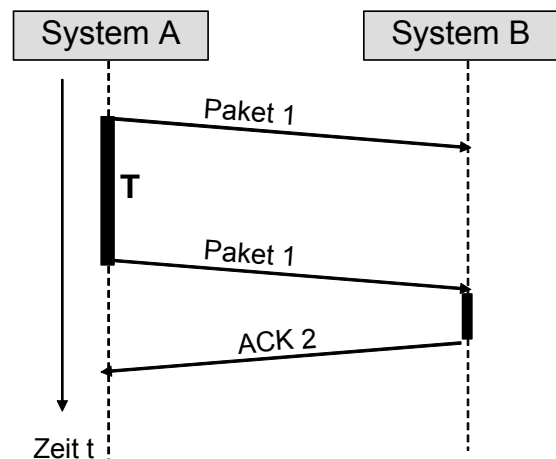


Abbildung 15: Wiederholung bei fehlender Bestätigung

Um bei fehlerhaften Paketen eine schnellere Wiederholung zu erzielen kann der Sender eine negative Bestätigung senden, Auf diese wird der Sender sofort ein Wiederholung schicken. Aber nicht alle Protokolle unterstützen dieses Verfahren.

Bei der *Vorwärtsfehlerkorrektur* (Forward Error Correction, FEC) werden immer Korrekturdaten mitgeschickt, die Redundanz damit künstlich erhöht. Aus Nutzdaten und Korrekturdaten können dann bei Fehlern in der Übertragung auf der Empfangsseite die Nutzdaten rekonstruiert werden.

Um besser gegen Bündelfehler gewappnet zu sein, wird ein sogenanntes *Interleaving* angewandt, d.h. ein größerer Datenblock wird gespeichert, zeilenweise mit Korrekturdaten versehen und Spaltenweise auf die Leitung geschickt, wie es Abbildung 16 zeigt.

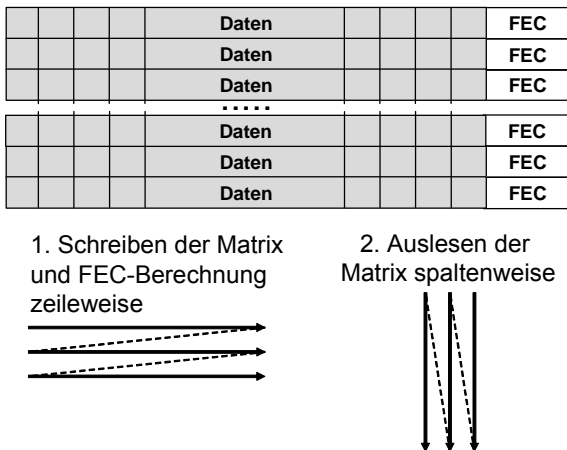


Abbildung 16: Interleaving bei der Fehlerkorrektur

Je größer der Datenblock, umso effizienter lassen sich Fehler korrigieren, allerdings auf Kosten der Verzögerungszeit, denn erst wenn der ganze Block zwischengespeichert ist, kann mit dem Auslesen begonnen werden. Auch auf der Empfangsseite muss erst der Block eingelesen werden, bevor mit der Rekonstruktion begonnen wird.

**Fazit: Jede Fehlerkorrektur kostet Zeit! Die Wiederholungsanforderung ist unvorhersehbar. Nur im Fehlerfall wird die Verzögerungszeit erhöht. Die Vorwärtsfehlerkorrektur verzögert alle Daten, allerdings ist ihre Verzögerungszeit immer gleich und ist durch die Stärke des Schutzes einstellbar.**

#### 4.1.4 Verschlüsselung

Soll der Übertragungskanal gegen ausspähen gesichert werden, dann ist eine Verschlüsselung notwendig. Hier können zwei Prinzipien unterschieden werden:

- Die Block-Verschlüsselung (block cipher) sammelt eine gewisse Menge an Nutzdaten (den Block), verschlüsselt diesen und sendet ihn dann ab.
- Die Strom-Verschlüsselung (stream cipher) arbeitet dagegen kontinuierlich. Jedes Zeichen des Nutzdatenstroms wird sofort mit einem Zeichen eines Schlüsselstroms verschlüsselt und gesendet.

Ist die Verzögerungszeit wichtig, dann muss mit einer Stromverschlüsselung gearbeitet werden.

#### 4.2 Architektur von Netzknoten

Die folgende Betrachtung gilt für paketbasierte Netzknoten allgemein, unabhängig von der Protokollschicht, auf der sie arbeiten. Daher wird für die zu schaltende Datenstruktur nur noch der Begriff „Paket“ gewählt.

Die Verarbeitung des Paketes im Netzknoten erfordert eine gewisse Zeit, wobei dieses neben der Leistung des eingesetzten Prozessors besonders von der Art der Vermittlung und der Strategie der Behandlung des Pakets abhängt. Bevor auf diese Unterschiede eingegangen wird, soll zuerst der Aufbau eines Netzknotens dargestellt werden.

Abbildung 17 zeigt ein Prinzipbild, wobei davon ausgegangen wird, dass unterschiedliche Prioritätsstufen unterstützt werden.

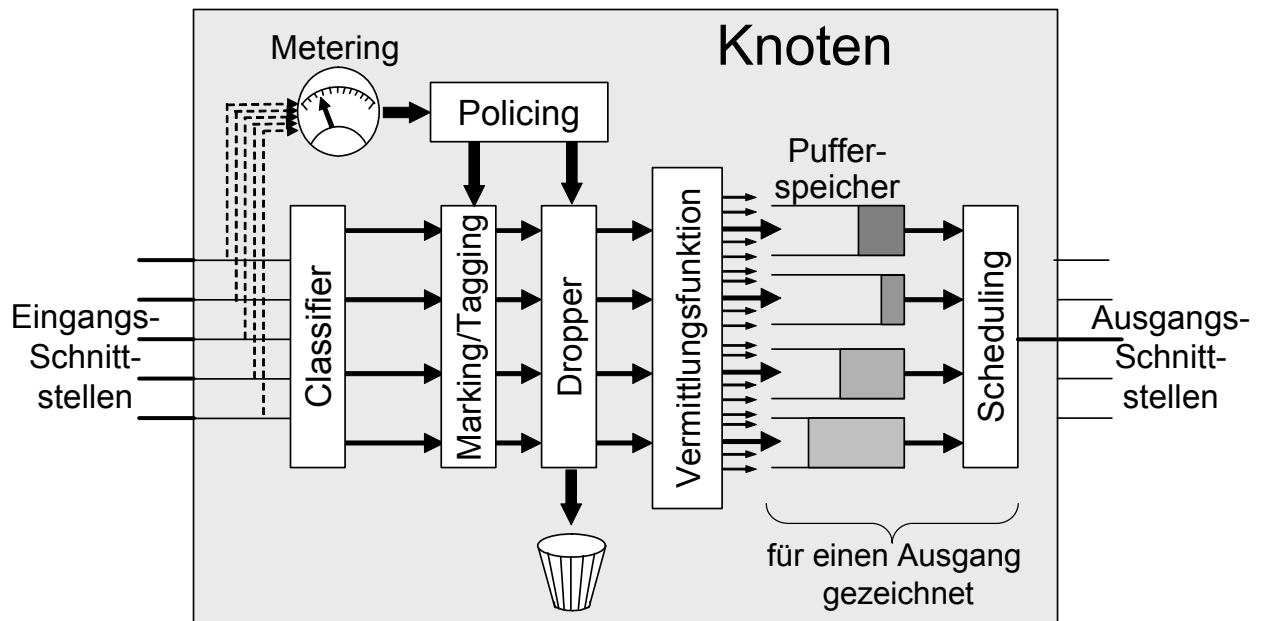


Abbildung 17: Knoten

Dazu müssen die Pakete am Eingang vom *Classifier* untersucht werden. Die Klassifizierung kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen z.B.:

- Physikalische Schnittstelle (Schicht 1),
- Schicht-2-Adresse,
- Quelladresse der Schicht 3,
- Zieladresse der Schicht 3,
- Qualitätskennung (alle drei betrachteten Protokolle – Ethernet, MPLS und IP – bieten drei zusätzlichen Bits im Kopf Pakets und lassen damit die Unterscheidung von 8 Prioritätsstufen zu, bei IP gibt es sogar mit DIFFSERV bis zu 21 Stufen),
- Typ des Schicht-4-Protokolls (Transportprotokoll),
- höhere Schichten (Anwendung).

Der Classifier sorgt dann dafür, dass später an den Ausgangspuffern Pakete gleicher Klassen in die gleiche Warteschlange einsortiert werden. Vorher wird aber der Verkehr

durch das *Metering* gemessen. Das ist Voraussetzung für weitere Aktionen. *Policing* bezeichnet das Verfahren zur Durchsetzung einer Regel, einer „Policy“ z.B. ein maximaler Durchsatz pro Klasse. Verkehr der die Regeln verletzt kann:

- verworfen werden, das besorgt der Dropper oder
- markiert werden bzw. in der Priorität herabgestuft werden. Das besorgt die Funktion *Marking/Tagging*. Damit kann im Überlastfall ein Knoten im weiteren Verlauf der Kette diese Pakete bevorzugt verwerfen.

Für die *Vermittlungsfunktion* in einem Knoten gibt es drei verschiedene technische Realisierungen:

- Gemeinsamer Bus: hierbei handelt es sich im Prinzip um das klassische Shared Medium, jetzt allerdings geräteintern und in der Regel mit höherer Geschwindigkeit, so dass virtuell mehrere Verbindungen



parallel unterhalten werden können. Im Idealfall beträgt der Bustakt bei N Ausgangsschnittstellen das N-fache der Ausgangsgeschwindigkeit. Um Kollisionen beim Buszugriff der Eingänge zu vermeiden, benötigt jeder Eingang einen Pufferspeicher.

- **Gemeinsamer Speicher:** Alle Eingänge schreiben ihre Pakete in einen zentralen Speicher, aus dem sie der Prozessor dann zu den Pufferspeichern an den Ausgangsschnittstellen leitet. Der interne Prozessorbus ist hier das begrenzende Element.
- **Schaltmatrix:** bei dieser Technik werden für die Dauer der Datenübertragung eines Pakets Eingang und Ausgangspuffer direkt über eine entsprechend Schaltung verbunden. Vorteil ist, dass in der Matrix mehrere Kommunikationsbeziehungen gleichzeitig abgewickelt werden können.

Dann folgen die Warteschlangen in Form von *Pufferspeichern* an den Ausgängen. Sie werden vom *Scheduling* nach einer gewissen Strategie abgearbeitet. Die zwei wichtigsten Verfahren werden nachfolgend beschrieben:

- **Priority Queuing**, auch als **Low Latency Queuing (LLQ)** bezeichnet: Die Abarbeitung der Warteschlangen erfolgt strikt nach **Priorität**, d.h. Pakete niedriger Priorität werden erst dann gesendet, wenn keine Pakete höherer Priorität mehr warten. Das kann allerdings dazu führen, dass Pakete niedriger Priorität nie gesendet werden! (Abbildung 18)

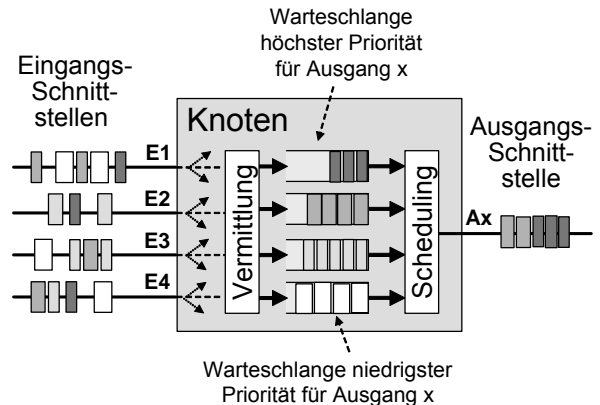


Abbildung 18: Priority Queuing

- **Fair Queuing (FQ) oder Weighted Fair Queuing (WFQ):** Jede Warteschlange erhält einen **Wichtungsfaktor** der angibt, wie viel Pakete der Scheduler in jedem Zyklus an die Ausgangs-Schnittstelle sendet. Die Warteschlangen werden zyklisch entsprechend der Gewichtung der Warteschlange abgearbeitet. Dadurch wird auch in Hochlast-Situationen gewährleistet, dass Pakete niedriger Priorität irgendwann zum Zuge kommen. In Überlast-Situationen ist zudem sichergestellt, dass jede Warteschlange nur den ihr zugeteilten Anteil an der Kapazität der Ausgangsschnittstelle erhält. (Abbildung 19)

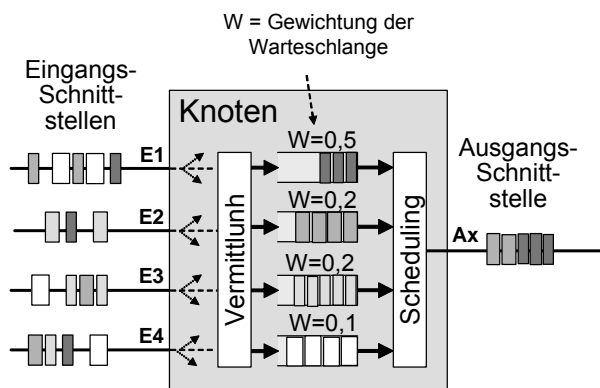


Abbildung 19: Fair Queuing

Wie immer bei reinen Priorisierungs-Verfahren kann keine absolute Qualität garantiert werden, sondern nur eine relative Qualität.

---

Ein Knoten wird, sobald er in Überlast gerät, Pakete niedriger Priorität zwischenspeichern und solche hoher Priorität bevorzugt weiterleiten. Bei weiterem Ansteigen der Last wird der Knoten schließlich Pakete niedriger Priorität verwerfen. Damit gibt es keine Garantie für Kapazität, Verzögerungszeiten und Jitter.

Insgesamt tragen folgende Einflussfaktoren zur Verzögerung in den Knoten bei:

- Verarbeitung im Knoten (Processing), abhängig von:
  - Geschwindigkeit des eingesetzten Prozessors (CPU),
  - Last auf dem eingesetzten Prozessor (CPU),
  - Architektur des Knotens (... Switch, Router ...),
  - Switching Mode,
  - Eigenschaften der Schnittstellen (Policies, ...).
- Warteschlange, Pufferspeicher (Queuing):
  - Anzahl und Größe der Pakete in der Warteschlange,
  - Kapazität der Ausgangsschnittstelle.

Für die interne Behandlung des Paketes gilt, dass zumindest die Zieladresse eingelesen sein muss, um in einer Routingtabelle nach der richtigen Ausgangsschnittstelle zu suchen. Allerdings wird oft erst das gesamte Paket eingelesen, um z.B. eine Fehlerüberprüfung durchführen zu können, bevor mit der weiteren Verarbeitung begonnen wird.

Bei Ethernet-Switches unterscheidet man daher drei Betriebsarten:

- *Cut Through* (manchmal auch als *On The Fly* bezeichnet): Der Switch liest die Schicht-2-Zieladresse, wertet sie aus und

schaltet den Datenstrom direkt zum Ziel durch. Um die Zieladresse zu lesen, müssen nur wenige Byte des Datenrahmens gelesen werden, somit ist die Verzögerung sehr gering. Der Nachteil ist, dass ungültige und defekte Datenrahmen weiter geleitet werden.

- *Store-And-Forward*: Der Switch speichert zuerst den gesamten Datenrahmen, dann wertet er die Prüfsumme aus und verwirft fehlerhafte Rahmen. Bei fehlerfreien Rahmen wird die Zieladresse ausgewertet und der Rahmen weiter geleitet. Die Verweilzeit ist groß und hängt von der Länge des Datenrahmens ab.
- *Fragment-Free*: Hier werden die ersten 64 Byte des Datenrahmens gespeichert. Das erlaubt es einerseits kurze Rahmen auf Fehler zu prüfen und sogenannten Trümmer (Reste einer Kollision) zu erkennen. Längere Rahmen können damit natürlich nicht auf Fehler geprüft werden.

Durch diese verschiedenen Strategien ergeben sich auch unterschiedliche Verzögerungszeiten. Beim Cut-Through muss der Datenrahmen soweit eingelesen werden, bis der Switch die Zieladresse sieht und dann aus der Adresstabelle den zugehörigen Ausgangsport bestimmen kann. Da die Zieladresse gleich am Anfang des Datenrahmens nach der Präambel steht, muss nur ein kleiner Teil des Rahmens zwischengespeichert werden, in Zahlen: 14 Bytes (8 Byte für die Präambel, 6 Byte für die Adresse). Beim weit verbreiteten 100-Mbit/s-Ethernet ergibt das 1,12 µs. (Manchmal wird die Schutzzeit zwischen zwei Datenrahmen, die *Interframe Gap* von 96 Bit mit in die Rechnung einbezogen; dann ergeben sich 2,08 µs.) Dazu kommt die Verarbeitungszeit, die Tabellenabfrage und evtl. das Durchschalten des Weges. Diese Aufgaben

hängen vom internen Takt des Prozessors ab.

Der Store-and-Forward-Switch speichert erst den gesamten Datenrahmen, bevor die Verarbeitung beginnt. Diese beginnt mit der Prüfung des Datenrahmens auf Fehlerfreiheit anhand der Prüfsumme (CRC). Da die Zieladresse schon lange vorliegt, kann bei fehlerfreiem Rahmen die Tabellensuche und die Durchschaltung erfolgen. Die Verzögerungszeit hängt jetzt von der Rahmengröße ab, die minimal 72 Byte beträgt, maximal 1526 Byte (mit Präambel, ohne VLAN-Tag). Die entsprechenden Verzögerungszeiten beim 100-Mbit/s-Ethernet sind 5,76  $\mu$ s und 122,08  $\mu$ s (Interframe Gap nicht berücksichtigt).

### 4.3 Netzstrukturen

Telekommunikationsnetze stellen einem Kunden eine Dienstleistung an einer genormten Schnittstelle bereit. Über ein Zugangsnetz wird der Verkehr in die inneren Bereiche des Netzes bis ins Kernnetz geleitet. Einerseits werden die Knoten und Leitungen immer leistungsfähiger, je weiter man in die inneren Bereiche des Netzes vordringt. Andererseits treten dort statistische Effekte immer stärker zu Tage. Diese inneren Bereiche sind nie so ausgelegt, dass jeder Teilnehmer aktiv und mit voller Kapazität kommunizieren kann. So lassen sich die Ressourcen effektiv einsetzen.

Konnte früher z.B. nur eine begrenzte Anzahl Teilnehmer von einer Vermittlungsstelle bedient werden, führte der Einsatz der Rechner-technik dazu, dass sehr viel mehr Teilnehmer von einem Knoten verwaltet werden konnten. Abgesetzte Einheiten, die von der Vermittlungsstelle gesteuert werden, sammelten die Teilnehmer auf.

Mit Einsatz der Internet-Technologie kam ein weiterer Schritt hinzu: die vollständige Trennung zwischen dem Transport und der Steuerung. Letztere wurde in Server ausgelagert, die sehr leistungsfähig viele Teilnehmer bedienen können. Ihre Standorte sind frei wählbar, denn alle Netzelemente sind durch das leistungsfähige Kernnetz verbunden.

Mit der Einführung von *IPTV*, dem Fernsehen über das Internet Protokoll, wurde eine stärkere Konzentration im Vorfeld durchgeführt. Bis zu drei Ebenen Ethernet-basierter *Aggregations-Switches* konzentrieren die Teilnehmer einerseits auf die breitbandigen Zugangsknoten und andererseits auf die IPTV-Server-Infrastruktur.

Einzigste Konstante ist das Kernnetz selbst. Große Netzbetreiber setzen hier MPLS-Knoten ein, das ihnen eine starke Einflussmöglichkeit auf das Netz und die Führung der Daten erlaubt.

Abbildung 20 zeigt die ursprüngliche Struktur des Netzes.

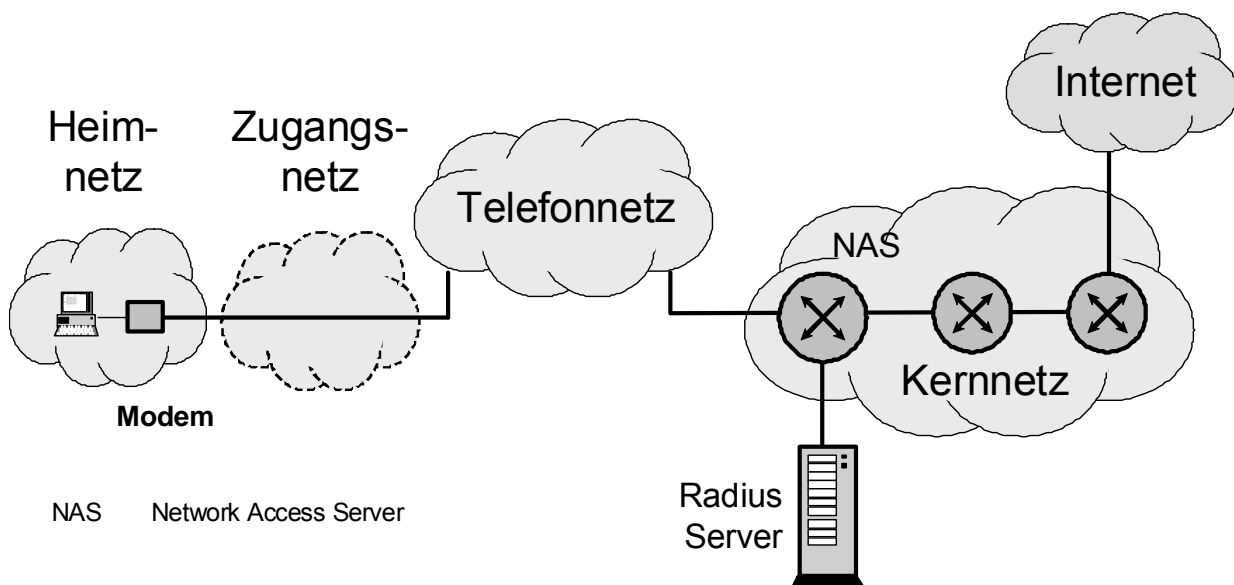


Abbildung 20: Netzstruktur mit Internet-Zugang via Modem

In den Anfangszeiten der Telefonie bestand das Zugangnetz aus einer reinen Kupferdoppelader. Im Laufe der Zeit wurden dort konzentrierende Elemente eingesetzt. Für das Internet gibt es ausgeprägte Zugangstechniken, die für die Datenübertragung über verschiedensten Medien optimiert sind.

Der erste Knoten, der auch Funktionen zur Verwaltung der Teilnehmer beinhaltet, trennt das Zugangnetz vom Kernnetz. Im Telefonnetz war dies die Ortsvermittlungsstelle, im Internet der Network Access Server (NAS). Die Teilnehmerverwaltung im Internet liegt im Radius-Server. Aus Sicht der Netzstrukturierung wird der NAS auch als *Edge* bezeichnet. Daran schließt sich das Kernnetz an, das aus mehreren Hierarchieebenen bestehen kann.

Der Internet-Zugang erfolgte früher entweder über das Telefonnetz per Modem oder direkt über eine Mietleitung, eine Lösung für Unternehmen. Das Zugangnetz bestand nur aus

der Teilnehmeranschlussleitung in Form einer Kupferdoppelader.

Der Wunsch nach größerer Übertragungsgeschwindigkeit führte im Zugangsbereich zu neuen Technologien, z.B. die DSL-Technik (Digital Subscriber Line) oder die Aufrüstung der Fernseekabelnetze. Abbildung 21 zeigt das Netz am Beispiel von DSL.

Durch steigenden Verkehr, z.B. durch die Übernahme des Fernsehens in die IP-Infrastruktur durch IPTV, wurde es notwendig den Verkehr frühzeitig zu konzentrieren. Dazu wurde zwischen dem Zugangnetz und dem NAS ein *Aggregationsnetz* zwischengeschoben, wie in Abbildung 22 gezeigt. Dieses arbeitet typischerweise auf der Protokollschicht 2, hier Ethernet. Erster Knoten der auf IP-Ebene ist weiterhin der NAS. Die Telefonie wird jetzt paketisiert als Voice-over-IP (VoIP) transportiert.

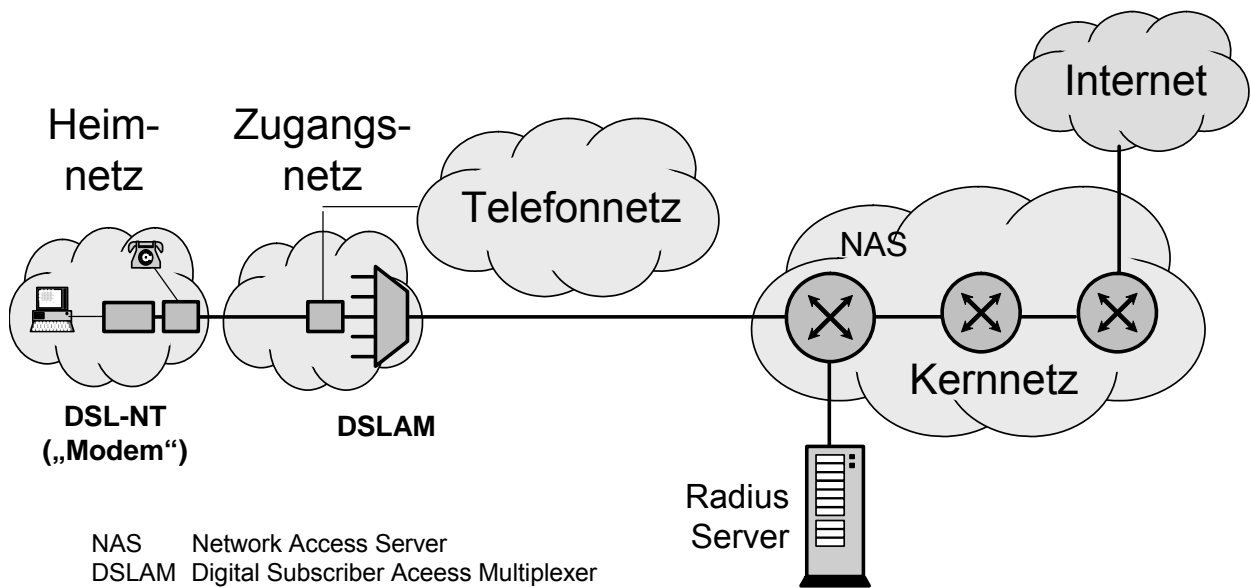


Abbildung 21: Netzstruktur mit Internet-Zugang via DSL

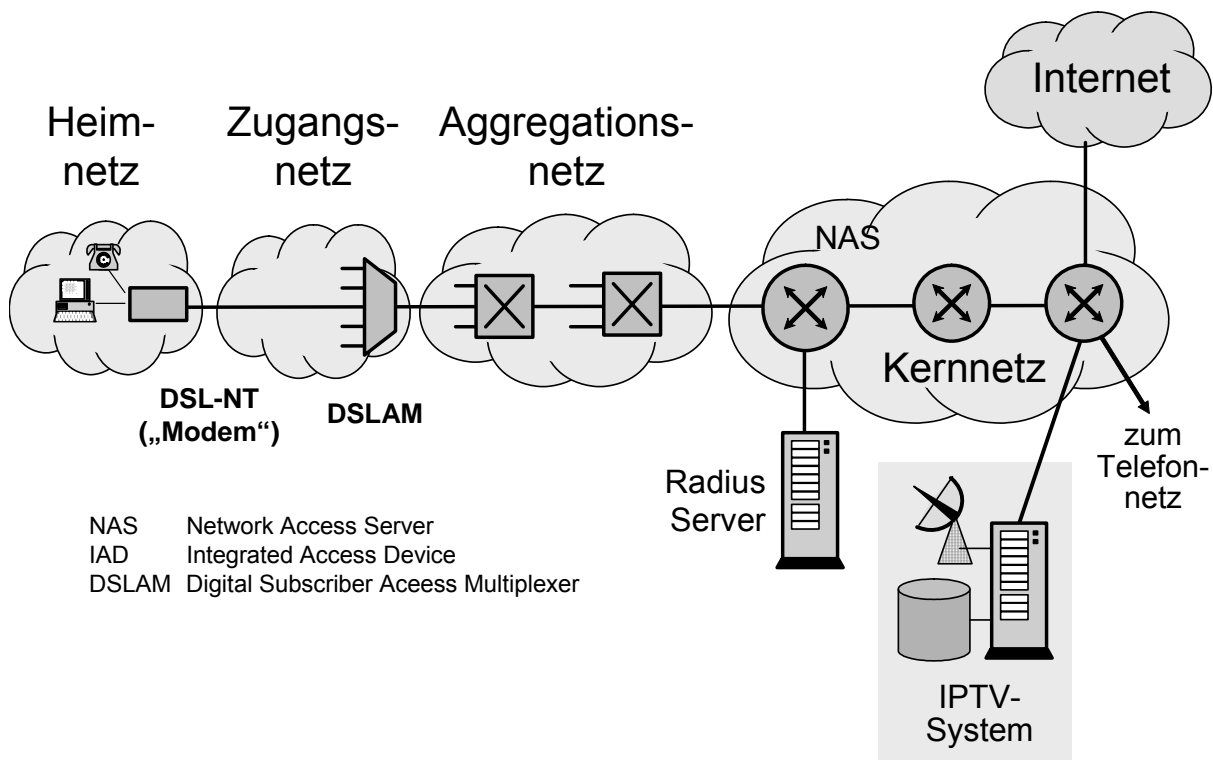


Abbildung 22: Netzstruktur mit Internet-Zugang via DSL und IPTV-Unterstützung

---

Die folgenden Kapitel gehen auf die verschiedenen Bereiche ein und analysieren sie in Hinblick auf die Verzögerungszeiten.

#### 4.4 Zugangsnetze

Zwischen den Netzknoten im Aggregationsbereich und denen im Kernnetz stehen heute große Übertragungskapazitäten zur Verfügung und diese werden noch weiter ausgebaut. Aber so wie eine Autobahn nicht direkt an die heimische Garage führt, sondern diese über ein Netz kleiner und kleinster Strassen erschlossen wird, so wird auch die Übertragungsgeschwindigkeit im Normalfall immer geringer, je näher man dem privaten Teilnehmer kommt. Früher endete das meist mit einem analogen Modem oder einem ISDN-Anschluss. Heute gibt es auch in diesem Bereich akzeptable Übertragungsgeschwindigkeiten, denn die Technologien für die Übertragung digitale Signale haben gewaltige Fortschritte gemacht. Die wichtigsten werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

##### 4.4.1 Telefonleitung (Kupferdoppelader)

Durch ausgefeilte Übertragungstechniken, Fortschritte in der digitalen Signalverarbeitung und der hochintegrierten Halbleitertechnologie ist es heute möglich, auf der klassischen Telefonleitung eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit zu realisieren, die unter dem Namen *Digital Subscriber Line* (DSL) firmiert. Dabei wurden mehrere Untervarianten definiert:

- *Asymmetric Digital Subscriber Line* (ADSL) mit hoher Übertragungsgeschwindigkeit vom Netz zum Teilnehmer und geringerer Übertragungsgeschwindigkeit vom Teilnehmer zum Netz, zugeschnitten

auf normalen Web-Verkehr und damit die meist verbreitete Variante.

- *Symmetric Digital Subscriber Line* (SDSL) mit gleicher Übertragungsgeschwindigkeit in beiden Richtungen, besonders für geschäftliche Anwendungen, bei denen auch in der Richtung vom Teilnehmer zum Netz eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit benötigt wird.
- *Very High Speed Digital Subscriber Line* (VDSL) eine Variante, bei der die Glasfaser bis in die Nähe des Teilnehmers geführt wird und nur die letzten, wenigen hundert Meter über das Kupferkabel laufen, wodurch eine sehr viel höhere Übertragungsgeschwindigkeit angeboten werden kann. Diese hohe Übertragungsgeschwindigkeit erlaubt es jetzt, auch Fernsehen über diesen Teilnehmerzugang anzubieten.

Durch Einflüsse der Leitungen wie Dämpfung, Nebensprechen und HF-Einstrahlungen ist die Reichweite begrenzt, bzw. zwischen Übertragungsgeschwindigkeit und Reichweite gibt es einen Zusammenhang. Die klassischen DSL-Varianten überbrücken die Strecke zwischen dem Teilnehmer und dem Ort des ersten Knotens der traditionellen Vermittlungstechnik, also einer Vermittlungsstelle oder einer *Abgesetzten Peripheren Einheit* (APE). Das können einige Kilometer sein. Bei VDSL wird nur noch die Strecke vom Kunden bis zu einem Verteilerschrank an der Straße überbrückt. Die Reichweite beträgt damit nur noch maximal wenige Hundert Meter, allerdings muss dann in dem Verteilerschrank die Leitung mit aktiver Technik terminiert werden. Weiter geht es dann per Glasfaser.

Bei DSL wird der ankommende Datenstrom aufgeteilt und auf bis zu 256 einzelne Trägerfrequenzen aufmoduliert. Als Modulationsver-

fahren kommt die Quadraturamplitudenmodulation (QAM) zum Einsatz. Bei ihr werden sowohl Amplitude als auch Phase des Trägers verändert. Je nach Qualität der Leitung bei der jeweiligen Frequenz können bis zu 4096 Konstellationen unterschieden werden, d.h. bis zu 12 Bit können in einem Einzelschritt übertragen werden.

Diese Aufteilung des Datenstroms für die Übertragung in den Einzelträgern kostet natürlich Zeit, genauso das auf der Empfangsseite erforderliche Aufsammeln und Rekonstruieren des ursprünglichen Datenstroms.

Zudem wird bei DSL ein Übertragungsrahmen von 250µs gebildet, in dem 68 Nutzrahmen und eine Synchronisationskennung untergebracht werden. Jeder Nutzrahmen beinhaltet selbst 7 Kanäle für die Nutzdaten. Die Verzögerung durch diese Rahmenbildung ist aber gering.

Ein dritter Beitrag zur Verzögerungszeit ist der Fehlerschutz, so er eingeschaltet ist. Hierbei werden mit einer Vorwärtsfehlerkor-

rektur (Forward Error Correction, FEC) Korrekturdaten mitgeschickt. Unter dem Begriff *Fastpath* wird ein Feature bezeichnet, bei dem diese Fehlerkorrektur abgeschaltet wird. Die Verzögerungszeit kann dadurch stark reduziert werden, allerdings auf Kosten der Fehlerkorrektur. Interessant dabei: Netzbetreiber haben früher Fastpath gegen eine monatliche Gebühr angeboten, d.h. für das Ausschalten eines Features – der Fehlerkorrektur – wurde eine Gebühr genommen.

Abbildung 23 zeigt die Information eines DSL-Modems. Unter „Latenz“ wird hier eine Verzögerungszeit von 16 ms für jede Übertragungsrichtung ausgewiesen.

DSL-Anschlüsse werden von den Telekommunikationsnetzbetreibern angeboten, entweder selbst oder weiterverkauft über Dienstanbieter. Fast überall, wo ein Telefonanschluss verfügbar ist, lässt sich dieser in einen DSL-Anschluss wandeln.

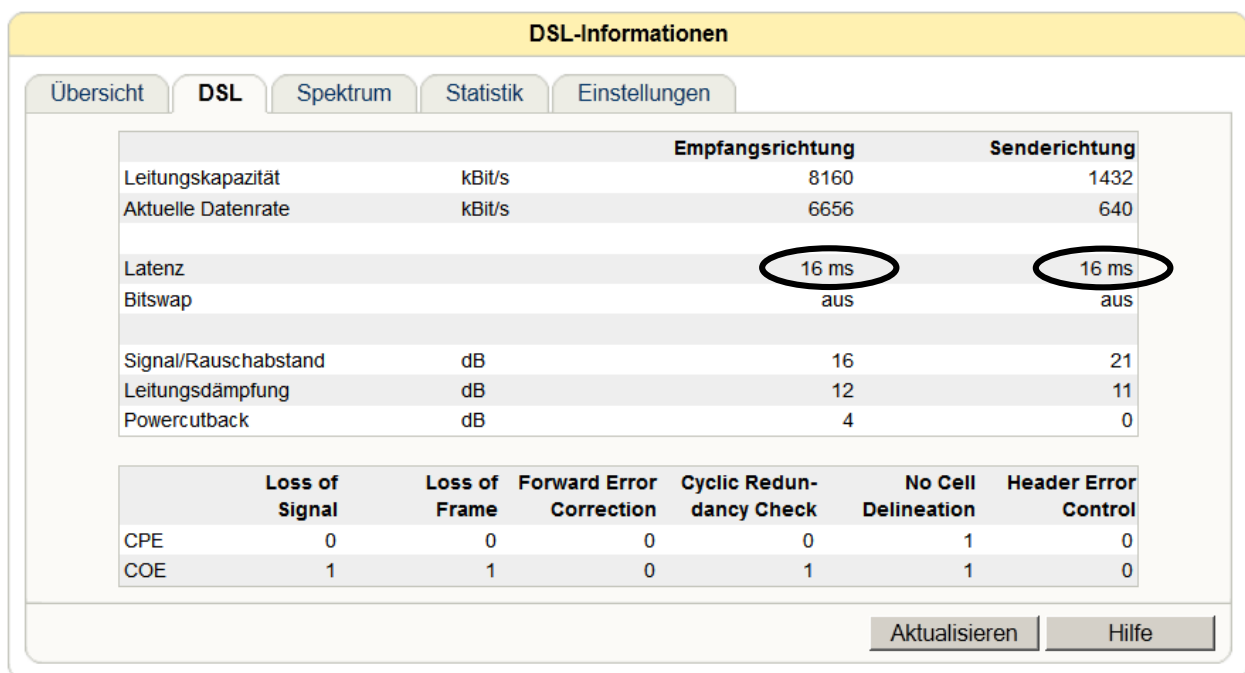


Abbildung 23: Beispiel für DSL-Informationen eines DSL-Modems

#### 4.4.2 Fernseh-Kabelnetz (Koaxialkabel)

*Hybrid Fiber Coax* (HFC) stellt eine Weiterentwicklung des Fernseh-Verteilnetzes dar. In seiner ursprünglichen Form nur zur Verteilung von Fernsehprogrammen entwickelt, konnte durch den Einsatz von Glasfasern die Leistungsfähigkeit des Netzes gesteigert und eine Kommunikation in der Rückrichtung, also vom Teilnehmer zur Zentrale ermöglicht werden.

In einem *Head End* werden die Fernsehprogramme eingespeist. Ein optischer Verstärker treibt mehrere Hubs, diese versorgen dann ihrerseits eine Vielzahl von *Broadband Optical Network Terminations* (BONT), die einen elektrisch-optischen Wandler beinhalten. Der letzte Abschnitt zum Teilnehmer bleibt als Koaxialkabel bestehen. Nach dem Hausübergabepunkt folgt eine Inhouse-Verdrahtung mit Koaxialkabel, an der sowohl die Fernsehgeräte als auch die für die Datenkommunikation zuständigen *Cable Modems*

(CM) angeschlossen sind. Abbildung 24 zeigt die Architektur des HFC-Systems, wobei der Datenpfad hervorgehoben ist.

Die Rückrichtung geht vom Cable Modem über die Infrastruktur, entweder über eigene Glasfasern oder eine irgendwie geartete Richtungstrennung, z.B. durch unterschiedliche Wellenlängen auf der Glasfaser, zu einem *Cable Modem Termination System* (CMTS) genannten Gerät das den Übergang ins Internet bereitstellt. Die Übertragung der Daten zwischen Cable Modem und CMTS erfolgt gemäß der *Data over Cable Interface Specification* (DOCSIS), ein ursprünglich in Amerika entwickelter, später auch an europäische Verhältnisse angepasster Übertragungsstandard. Die Telefonie wird in einem solchen Netz paketiert als VoIP transportiert.

Die Daten werden in einem HFC-Netz auf einen Fernsehkanal aufmoduliert. Als Modulationsverfahren kommt die Quadraturamplitudenmodulation mit verschiedenen Stufenzah-

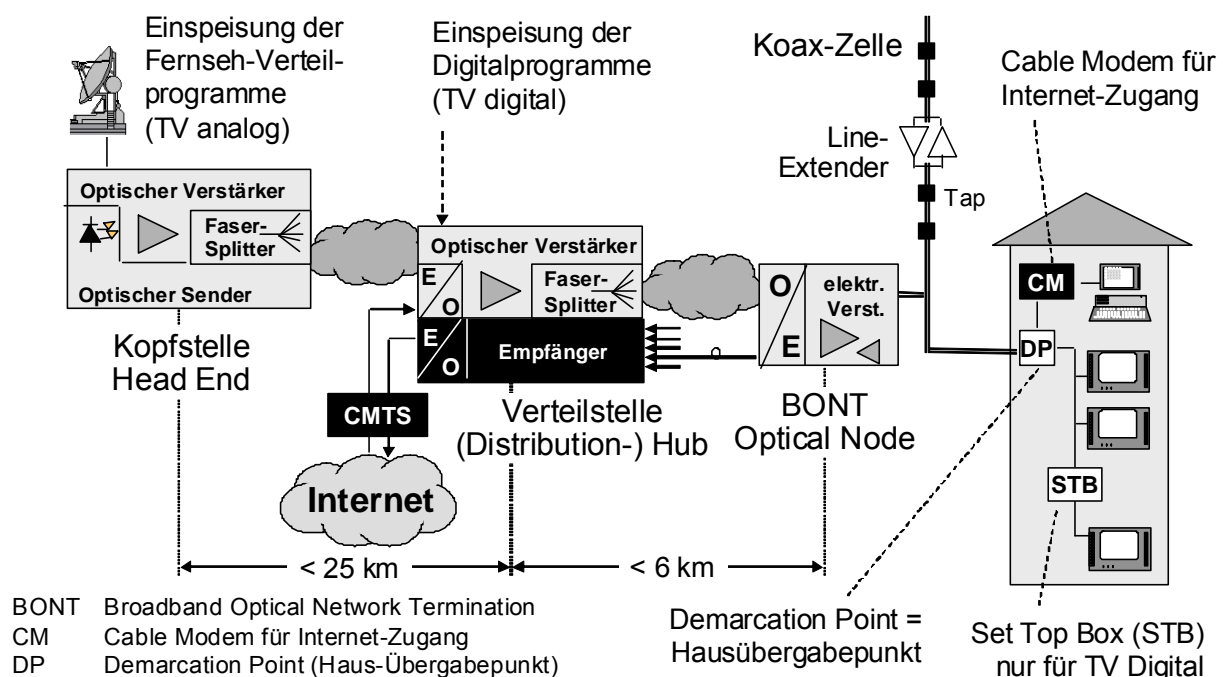


Abbildung 24: HFC-System



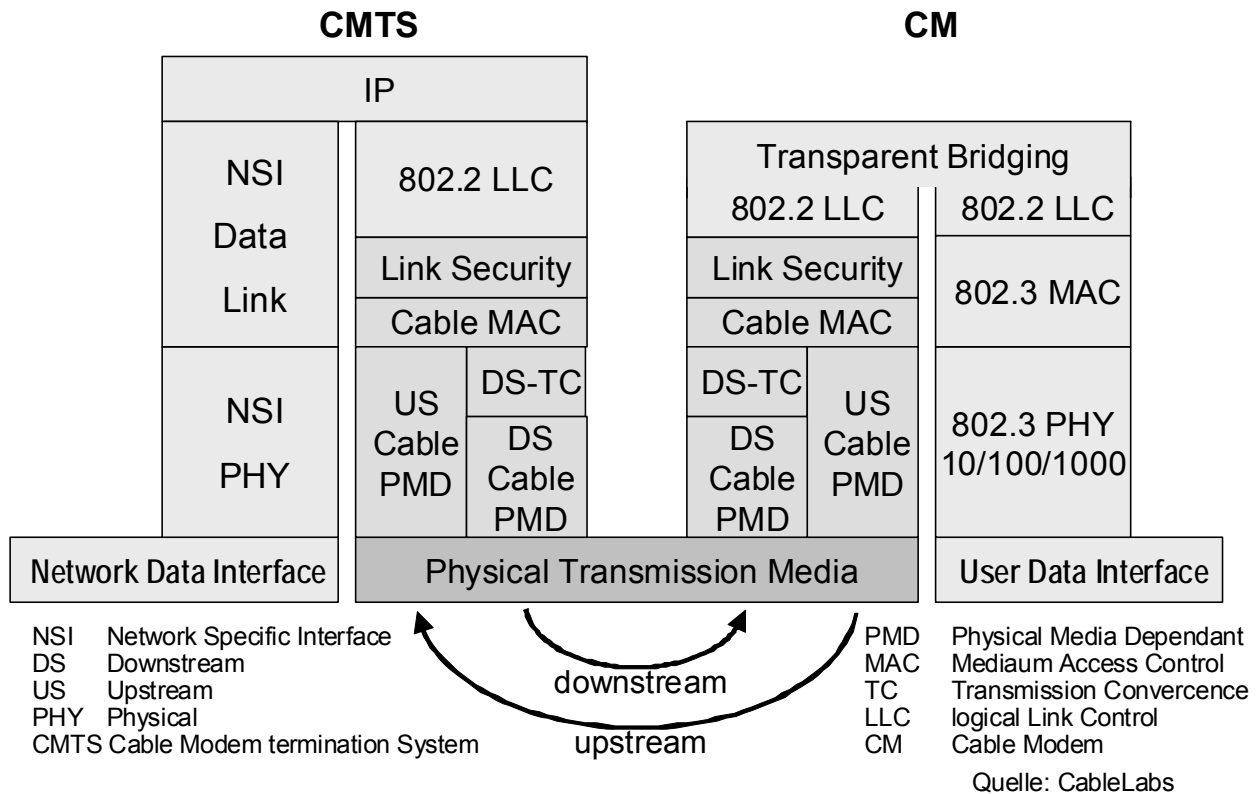


Abbildung 25: Protokollstack Data over Cable/HFC

len zum Einsatz. Vergleichbar zu DSL wird auch in diesen Netzen eine Vorwärtsfehlerkorrektur mit Interleaving angewandt.

Abbildung 25 zeigt den Protokollstack für den Datenpfad über ein HFC-Netz. Die unteren Schichten sind für die beiden Richtungen unterschiedlich. Gemeinsam ist die vom IEEE spezifizierte *Logical Link Control* Schicht (LLC), die dort im Rahmen der LAN/MAN-Aktivitäten entstanden ist.

#### 4.4.3 Glasfaser

Seit vielen Jahren wird die Glasfaser auch im Zugangsnetz als die einzig zukunftsfähige Lösung propagiert. Der flächendeckenden Einführung stehen aber die Kosten entgegen, denn jeder Anschluss eines privaten Teilnehmers würde eine hohe Investition erfor-

dern. Dabei ist es nicht die Glasfaser selbst, sondern die Verlegearbeit (das „Graben“) ist der Hauptkostenfaktor.

Trotzdem könnte sich das Blatt wenden und andere Finanzierungsmodelle könnten der Glasfaser doch noch zu einer größeren Verbreitung verhelfen. Beispiele sind: der Teilnehmer trägt die Kosten selbst oder ein Dritter stellt die Glasfaser bereit, z.B. ein Energieversorger.

Daher wurden und werden Zwischenlösungen implementiert, die die Glasfaser in die Nähe des Teilnehmers bringen und nur noch wenig Kabelverbindungen brauchen. Man unterscheidet daher folgende Varianten:

- Fiber to the Home (FTTH)
- Fiber to the Building (FTTB)
- Fiber to the Curb (FTTC)

---

Nur FTTH bringt die Glasfaser direkt bis zum Teilnehmer. Als Techniken kommen heute Gigabit Passive Optical Network (GPON) oder Ethernet Passive Optical Network (EPON) zum Einsatz.

Alle anderen Techniken benötigen noch ein letztes Stück Kabel. Bei FTTB ist es ein klassisches Datenkabel (CAT5), da es nur innerhalb des Hauses verlegt ist. Bei FTTC wird im Vorfeld eine aktive Technik benötigt, die die Glasfaser terminiert und per Kabel die Teilnehmer versorgt. Die DSL-Variante VDSL nutzt hier den klassischen Kabelverzweiger und rüstet diesen auf. Den letzten Abschnitt zum Teilnehmer überbrückt die Kupferdoppelader. Die HFC-Netze nutzen den Standort eines Kabelverstärkers zur Wandlung. Den letzten Abschnitt zum Teilnehmer überbrückt das Koaxialkabel.

Daher findet man heute FTTB und FTTH entweder in Neubaugebieten oder in geförderten Versuchsnetzen. Dabei stellt sich immer mehr heraus, dass eine Trennung von Infrastruktur und Dienst die Verbreitung fördern kann. Der Hintergrund ist, dass andere Marktteilnehmer als die klassischen Telekommunikationsnetzbetreiber besseren Zugang zu Kunden haben, diese aber oft keine Erfahrung als Dienstanbieter haben. Das Schlagwort heißt *Open Access* und vor allem lokale Energieversorger können hier ihren bestehenden Zugang zum Kunden (Strom, Gas, Fernwärme) mit einer Glasfaser ergänzen. Für das Dienstangebot werden ein oder mehrere Telekommunikationsdienstleister zugezogen, die die Infrastruktur mieten.

Die Übertragungsgeschwindigkeit reicht theoretisch weit in den Gigabit/s-Bereich. Hier wirkt das Netz des Netzbetreibers begrenzend. Da die FTTx-Techniken meist auf passiven optischen Netzen (PON) basieren,

muss für die Richtung zum Teilnehmer ein Multiplexen, für die Richtung zum Netz ein Mehrfachzugriff, z.B. per TDMA, implementiert sein. Beide Verfahren verursachen Verzögerungszeiten

#### 4.4.4 Drahtlose Anschlüsse

Seit einigen Jahren wird immer wieder vorgeschlagen, in schlecht erschlossenen Gebieten einen schnellen Internet-Zugang auf Basis einer Funktechnik anzubieten, *Wireless Local Loop* (WLL) genannt. Allerdings war bis jetzt keine solche Technik wirtschaftlich. Die letzte Entwicklung war WiMAX, die noch vor der Verbreitung schon in der Versenkung verschwindet.

Dadurch, dass im Bereich um 800 MHz Frequenzen frei gemacht wurden und die neueste Mobilfunkgeneration LTE (Long Term Evolution) ansehnliche Übertragungsgeschwindigkeiten bietet, wird jetzt dieser Bereich für den Anschluss von seither nicht oder schlecht erreichbaren Teilnehmern eingesetzt. Auf die LTE-Technik geht Kapitel 4.6 ein.

#### 4.4.5 Satelliten

Nur der Vollständigkeit halber soll hier noch die Satellitenverbindung erwähnt werden. In Gegenden, in denen keine der vorstehend genannten Techniken verfügbar ist, kann der Netzzugang auch über Satelliten erfolgen. Da hierzu üblicherweise geostationäre Satelliten benutzt werden, ist die Verzögerungszeit sehr hoch. Der Grund liegt darin, dass die Bahnhöhe solcher geostationärer Satelliten bei ca. 36 000 km liegt. Alleine die Einweglaufzeit beträgt damit ca. 120 ms. Für die gesamte Kommunikationsstrecke muss dieser Wert verdoppelt werden (Hin- und Rückweg), dazu kommt noch eine Verarbeitung im Satelliten und den Bodenstationen. Betrachtet man nun die Gesamtverzögerung vom Starten einer Anfrage bis zum Eintreffen einer Antwort, so muss die Satellitenstrecke viermal überwunden werden. Die Verzögerungszeiten liegen damit im Bereich 500 ... 700 ms.

#### 4.4.6 Stromleitung

Die *Powerline-Technik* (Powerline Communication, PLC) als Zugang zum Internet ist stark unter Druck, denn das Störpotenzial ist groß und die Effizienz nicht sehr hoch. Es muss eine hohe Sendeleistung in das Kabel eingekoppelt werden, um über große Entfernungen eine ausreichende Übertragungsgeschwindigkeit zu gewährleisten. Viele Firmen – Hersteller von Ausrüstung und Netzbetreiber – sind daher wieder ausgestiegen. Allein im Inhouse-Bereich hält sich diese Technik als Alternative neben dem WLAN.

#### 4.5 Kernnetz

Das *Internet* ist in seiner Struktur ein Konglomerat von Netzen unterschiedlicher Betreiber. Über verschiedene Maßnahmen werden diese Netze miteinander verbunden. Daher ist es generell schwierig, Qualitätsaussagen zu treffen und besonders Qualitätsgarantieren zu geben.

*Kernnetze* sind Netze, die Zugangsnetze verbinden und an weitere Kernnetze (z.B. anderer Netzbetreiber) angeschaltet sind. Sie bilden das Rückgrat der Kommunikation und sind entsprechend gut ausgebaut mit leistungsfähigen Netzknoten und Verbindungen mit hoher Übertragungsgeschwindigkeit. Zudem haben sie eine hohe Zuverlässigkeit, z.B. durch redundante Wege.

Abbildung 26 zeigt eine mögliche Konfiguration eines Kernnetzes. Die Zugangsnetze sind direkt oder über Aggregationsnetze an den Edge-Bereich angeschlossen. Dort nehmen die *Network Access Server* (NAS) den Verkehr auf. Wie viele Hierarchiestufen darauf aufbauen hängt von der Anzahl der Teilnehmer und der verfügbaren Technologie ab. Generell gilt, dass ihre Anzahl gering gehalten werden sollte.

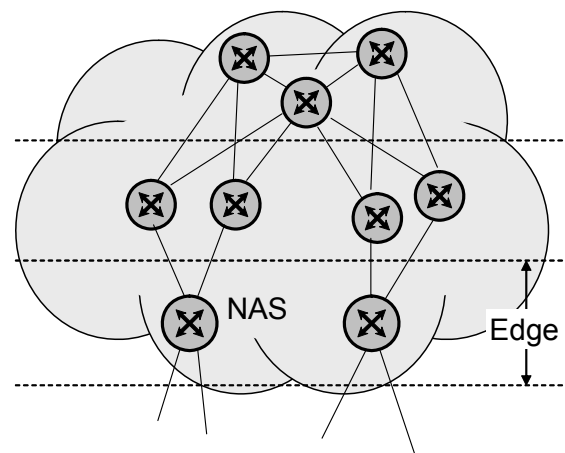


Abbildung 26: Kernnetz

---

Im Bild liefern die NAS ihren Verkehr an eine mittlere Hierarchieebene, wobei aus Redundanzgründen jeder NAS an zwei weiterführende Knoten angeschaltet ist. Dieses Prinzip wird beim Übergang in die nächste Hierarchiestufe beibehalten. Diese oberste Stufe ist aus Gründen der Verkehrsverteilung und der Redundanz voll vermascht.

Aus Sicht der Verzögerungszeit sollten für eine Kommunikationsbeziehung so wenig Knoten wie möglich durchlaufen werden. Die dargestellte Topologie unterstützt diese Forderung, denn zwischen zwei NAS liegen maximal 4 Knoten, auf jeder Seite einer der mittleren Ebene und durch die Vollvermaschung maximal zwei auf der oberen Ebene.

Die Netzwerkschicht basiert heute unbestritten auf dem Internet Protokoll. Bei den unteren Protokollschichten zeigen sich noch Unterschiede zwischen Betreibern aus der klassischen Datenkommunikation und den früheren Telekommunikationsunternehmen. Während erstere auf reine Glasfaserverbindungen und Ethernet setzen, bevorzugen die Telekommunikationsunternehmen noch eine klassische Übertragungstechnik sowie MPLS. Die Hintergründe liegen in den besseren Möglichkeiten des Netzmanagements und der eher verbindungsorientierten Natur von MPLS. Allerdings verwischen sich zunehmend die Grenzen. Auch Ethernet holt hier inzwischen auf und bietet vergleichbare Funktionen.

Das Kernnetz bietet in der Regel auch Übergänge in andere Netze, z.B. Kernnetze anderer Betreiber, dazu dienen Gateways, die – wenn beide Seiten durch IP-Netze realisiert sind – *Packet-to-Packet-Gateways* sind. Dabei werden die Pakete zum Schutz des eigenen Netzes und evtl. zur Überwachung ana-

lysiert und im Regelfall ins andere Netz weiter geleitet, ein Vorgang, der Zeit kostet.

## 4.6 Mobilfunk

### 4.6.1 Einführung

Gegenüber dem Festnetz bietet der Mobilfunk zwei zusätzliche Leistungsmerkmale, die dem Nutzer die Mobilität erlauben:

- *Handover*, das Weiterreichen des Nutzers von einer Basisstation zur nächsten im Falle der Nutzer bewegt sich, und
- *Roaming*, das Benutzen fremder Netze, z.B. im Ausland.

Beides kann, je nach Realisierung, eine geraume Zeit beanspruchen und damit jegliche Betrachtungen zur Verzögerungszeit sehr schwierig machen. Daher werden in den folgenden Kapiteln diese Aspekte außer Acht gelassen.

Heute sind drei Mobilfunkgenerationen in Betrieb:

- *Global System for Mobile Communications* (GSM), für den Datenverkehr aufgerüstet mit dem *General Packet Radio Service* (GPRS)
- *Universal Mobile Telecommunication Service* (UMTS) und
- *Long Term Evolution* (LTE).

Sie werden nachfolgend kurz vorgestellt und Überlegungen zur Verzögerungszeit ange stellt.

#### 4.6.2 Global System for Mobile Communications (GSM)

Auf der GSM-Funkschnittstelle wird mit einer Kombination aus Frequenz- und Zeitmultiplex gearbeitet. Auf jeder von 125 möglichen Frequenzen wird ein Rahmen von 4,6 ms übertragen, bestehend aus 8 Zeitschlitzten oder Kanälen.

Die erste Methode, Daten im GSM-Mobilfunk zu übertragen war die Nutzung eines Sprachkanals (*Circuit Switched Data*, CSD). Die Übertragungsgeschwindigkeit betrug erst 9,6 kbit/s, später 14,4 kbit/s. Unter dem Namen *High Speed Circuit Switched Data* (HSCSD) verbirgt sich eine Kanalbündelung. Damit waren theoretisch 115,2 kbit/s erreichbar, praktisch wurden aber nur 57,6 kbit/s im Downlink angeboten.

Der Vollständigkeit halber muss noch der *Short Message Service* (SMS) erwähnt werden, der allerdings nur Datenblöcke von 140 Byte unterstützt. Durch eine spezielle Codierung lassen sich 160 Text-Zeichen übertragen. Diese Nachrichten werden im Zeichengabekanal übermittelt.

Da all diese Möglichkeiten aus Sicht der Datenübertragung unbefriedigend sind (z.B. verbindungsorientierte Technik und geringe Übertragungsgeschwindigkeit), wurde ein Paketmodus entwickelt, der *General Packet Radio Service* (GPRS). Es ist eine Kombination von Kanalbündelung und gemeinsame Nutzung der Kanäle durch mehrere Kommunikationsbeziehungen. Die Übertragungsgeschwindigkeit hängt von der Anzahl gebündelter Kanäle und der Anzahl der Teilnehmer bzw. dem Verkehrsaufkommen ab.

Der letzte Entwicklungsschritt bei GSM war unter dem Namen *Enhanced Data Rates for GSM Evolution* (EDGE) die Einführung einer

höherwertige Codierung auf der Funkschnittstelle: Anstelle von *Gaussian Minimum Shift Keying* (GMSK) tritt eine 8-stufige *Phase Shift Keying* (PSK), die die Übertragungsgeschwindigkeit verdreifacht. Wird eine Kommunikation per EDGE gestartet, dann dauert es eine gewisse Zeit, bis die volle Übertragungsgeschwindigkeit erreicht wird. Auch ist die Verzögerungszeit noch recht hoch.

#### 4.6.3 UMTS

Während GSM ursprünglich für die Telefonie entwickelt wurde und die Unterstützung für Daten nachgerüstet wurde, hat man bei UMTS diese gleich im Design vorgesehen. Die erzielbaren Übertragungsgeschwindigkeiten sind höher. Dabei wurde auch dem Trend, Sprache über IP abzuwickeln, Rechnung getragen. Der Datenpfad von GPRS und UMTS ist nahezu identisch (Abbildung 25).

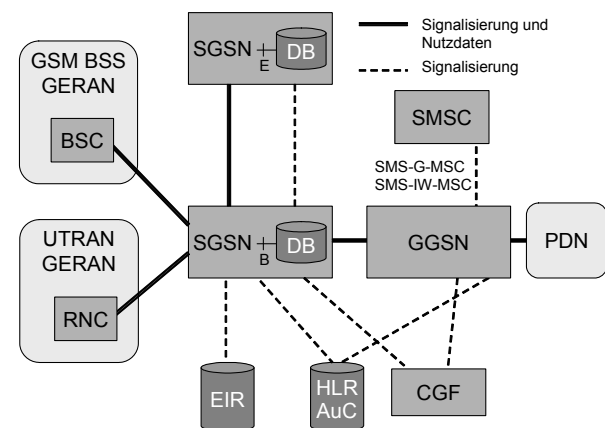


Abbildung 27: Architektur der PS-Domäne von UMTS

Die Übertragungsgeschwindigkeit kann theoretisch bis zu 384 kbit/s betragen. Auf der Funkschnittstelle wird mit CDMA gearbeitet, ein Codemultiplex, bei dem die „Kanäle“ parallel im gleichen Frequenzspektrum übertragen werden, getrennt durch unterschiedliche

Codierungen. Wartezeiten auf den Zeitschlitz im Rahmen entfallen, allerdings kostet auch die Codierung etwas Verarbeitungszeit.

Wie bei EDGE dauert es eine gewisse Zeit, bis die volle Übertragungsgeschwindigkeit erreicht wird. Das macht sich dann auch bei den Verzögerungszeiten bemerkbar: bei laufender Datenübertragung sind 130 bis 150 ms erzielbar, bei sporadischen Daten kann sich der Wert verdoppeln.

Unter dem Namen *High Speed Packet Access* (HSPA und HSPA+) werden auch hier höherwertige Modulationsverfahren eingeführt (16- oder 64-QAM) sowie mehrfache Übertragungswege vorgesehen (MIMO), was eine Steigerung der Übertragungsgeschwindigkeit erlaubt.

#### 4.6.4 Long Term Evolution (LTE)

LTE bietet eine noch höhere Übertragungsgeschwindigkeit als UMTS und eine geringere Verzögerungszeit [33]. Auf der Funkchnittstelle wird mit *OFDMA* gearbeitet, eine Mehrträgertechnik, bei der die Träger dynamisch den Kommunikationsbeziehungen zugewiesen werden.

Bei LTE gibt es keinen separaten Sprachpfad mehr, sondern man geht immer von Sprache über IP aus. Die grundlegende Architektur von LTE (Abbildung 28) entspricht der Packet-Domäne von UMTS allerdings wurden Netzelemente eingespart. Zudem findet eine striktere Trennung zwischen Transport und Steuerung statt.

Die Verbesserungen resultieren aus besseren Modulationsverfahren (z.B. 64-QAM), flexiblerer Frequenznutzung, Mehrverbindungs-techniken (MIMO) und größeren Kanalbandbreiten (20 MHz, 100 MHz). Nicht alles lässt sich schon am Anfang umsetzen, aber auch so sind die Übertragungsgeschwindigkeiten mit ca. 75 Mbit/s beachtlich.

Die Verzögerungszeiten liegen unter 30 ms, wobei in Zukunft 10 ms angestrebt werden. Damit liegt LTE in der Größenordnung eines DSL-Anschlusses. Erreicht wird dies u.a. durch die Verkürzung des *Transmission Time Intervals* (TTI), bestimmt durch die Datenblöcke, die von höheren Protokollschichten an die Funkstrecke (radio layer) übergeben werden. Bei LTE liegt das TTI bei 1 ms, bei UMTS zwischen 10 und 80 ms.

Allerdings gelten die kleinen Verzögerungszeiten nur bei schwacher Auslastung des

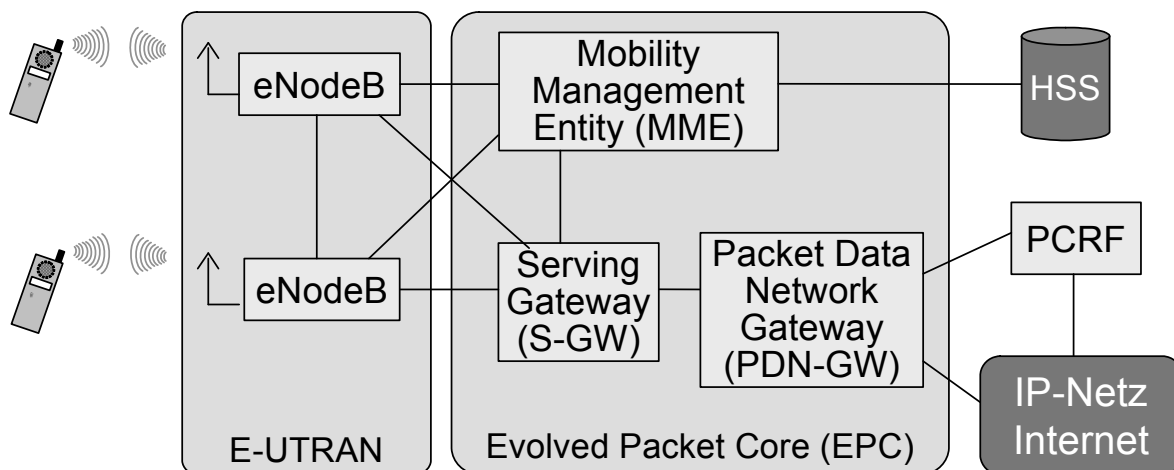


Abbildung 28: Architektur von LTE

Netzes. Bei vielen Nutzern im Netz kann die Zeit bis über 100 ms ansteigern [34, 35]. Trotzdem, mit LTE sind schon Cloud-Gaming-Dienste möglich [36].

#### 4.6.5 Zukünftige Generationen

LTE hat noch Entwicklungspotential. Die Anzahl der Antennen der MIMO-Technik kann gesteigert werden, geplant ist 8x8 im Downlink. Kanäle lassen sich bündeln, auch über verschiedene Frequenzbereiche hinweg (carrier aggregation). Relay Nodes erlauben eine Verbesserung der Abdeckung in Randbereichen der Zelle. Diese Erweiterung wird *LTEadvanced* genannt.

Noch weiter reichen Überlegungen zu einer „5. Generation“ des Mobilfunks. Hier gibt es noch keine allgemein akzeptierten Kriterien, aber folgende Punkte werden in der Diskussion genannt:

- Weitere Steigerung der Übertragungsgeschwindigkeit (im Bereich von 10 Gbit/s),
- Verbesserung der Qualität der Übertragung,
- Verbesserung der Verbindungssicherheit,
- Senkung des Stromverbrauchs der Geräte,
- Nutzung hoher Frequenzbereiche (oberhalb GHz),
- Senkung der Verzögerungszeit im Netz (im Bereich 1 ms).

Die Verzögerungszeit ist damit eindeutig im Fokus. Auch die hohe Übertragungsgeschwindigkeit hilft, diese Zeit zu reduzieren.

#### 4.6.6 Zusammenfassung

Mit jeder neuen Mobilfunkgeneration wurde also nicht nur die Übertragungsgeschwindigkeit gesteigert, sondern auch die Verzögerungszeit im Netz verringert.

Typische Verzögerungszeiten in Mobilfunknetzen liegen damit bei [37]:

- GSM/GPRS: 500 ms und mehr,
- EDGE: 300 .. 400 ms,
- UMTS: 170 ...200 ms,
- HSPA: 60 ...70 ms,
- LTE: 10 ... 30 ms.

**Fazit: Erst mit der neuesten Mobilfunkgeneration LTE kommen die Verzögerungszeiten in den Bereich der drahtgebundenen Techniken wie z.B. DSL und werden damit für zeitkritische Dienste nutzbar.**

#### 4.7 Kurzstreckenfunk

Inzwischen gibt es eine Vielzahl von Funktechniken für kurze Entfernungen. Jede dieser Techniken wurde für eine spezifische Anwendung entwickelt, aber natürlich sind auch andere Anwendungen denkbar. Die wichtigsten werden kurz vorgestellt.

##### 4.7.1 WLAN

WLAN ist eine weit verbreitete Technik zur Vernetzung von Komponenten der Datenverarbeitung [38]. Die Frequenzbereiche liegen bei 2,4 GHz und 5 GHz mit unterschiedlichen Modulationsverfahren. Die Reichweite ist sehr situationsabhängig und kann bis zu 300

---

m betragen. Inzwischen wird auf stromsparendes Design geachtet. Die Verzögerungszeit wird in einem Vergleich mit 150 ms angegeben. [39]

#### 4.7.2 Bluetooth

Bluetooth ist eine Kurzstreckenfunktechnik bei 2,4 GHz, die bis zu 8 Netzelemente unterstützt bei einer Reichweite von bis zu 100 m [40]. Verschiedene Versionen erlauben Übertragungsgeschwindigkeiten bis zu 2,1 Mbit/s. Ausgeklügelte Prozeduren erlauben einen einfachen Verbindungsaufbau und verschiedene Profile sind auf die unterschiedlichen Anwendungen zugeschnitten. Die letzte Version ist stromsparend ausgelegt. Bluetooth wurde für das einfache Verbinden von Zusatzgeräten mit Mobiltelefonen entwickelt. Die Verzögerungszeit wird in einem Vergleich mit 200 ms angegeben. [39]

#### 4.7.3 Zigbee

Zigbee ist eine Kurzstreckenfunktechnik für den Einsatz mit Sensoren [41]. Sie ist langsam (20 ... 250 kbit/s) aber auch stromsparend. Bis zu 255 Elemente werden in einem Netz unterstützt, die Reichweite beträgt 30 ... 50 m.

#### 4.7.4 Near Field Communication (NFC)

Das Entwicklungsziel von NFC war eine Datenübertragung über nur wenige Zentimeter zu ermöglichen, auch als Ersatz für eine Infrarot-Übertragung [42]. Die geringe Reichweite dient dem Datenschutz. Die Funktechnik arbeitet bei 13,56 MHz mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von max. 424 kbit/s.

#### 4.7.5 Wireless M-Bus

Seinen Ursprung hat der Wireless M-Bus im drahtgebundenen M-Bus, ein einfacher, langsamer Zweidraht-Bus in Master-Slave-Konfiguration, gedacht für das Auslesen von Zählern für Strom, Gas, Wasser usw. [43]. Der Wireless M-Bus ist die Umsetzung des M-Busses auf drahtlose Technik, wobei das 868-MHz-Band benutzt wird, die Übertragungsgeschwindigkeit beträgt 16,4 kbit/s. Die Reichweite beträgt üblicherweise 15 ... 25 m, es gibt aber auch Module, die mehrere Kilometer überbrücken können.

**Fazit: Die gängigen Kurzstreckenfunktechniken haben alle spezifische Einschränkungen. Keine hatte eine geringe Verzögerungszeit als Entwicklungsziel.**

#### 4.8 Übertragungstechnik

Die Übertragungstechnik hat im Laufe der Jahre eine kontinuierliche Evolution durchlaufen, die stark vom Wunsch der Netzbetreiber geprägt war, mit einem guten Management den internen und externen Kunden schnell eine qualitativ hochwertige Übertragungskapazität bereitzustellen und die Trassen möglichst gut auszunutzen, wofür ein effizientes Multiplexverfahren diente. Hier werden heute auf Glasfasern Zeitmultiplexsysteme der *Synchronous Digital Hierarchy* (SDH) sowie Wellenlängenmultiplexsystem der *Optical Transport Hierarchy* (OTH) eingesetzt.

Mit diesen Systemen ist es möglich, schaltende Geräte in der jeweiligen Ebene einzuführen, die Cross-Connects. Da SDH auf einer Rahmenstruktur von 125  $\mu$ s basiert, müs-



sen beim Multiplexen die Informationen u.U. nahezu eine Rahmendauer warten, bis sie in den Rahmen eingepasst werden können. Das passiert in jedem Gerät, das multiplext oder schaltet. Die Übertragungsgeschwindigkeit von SDH reicht heute bis 40 Gbit/s.

OTH basiert ebenfalls auf Rahmenstrukturen, deren Dauer geringer ist als bei SDH aber von der Hierarchiestufe abhängt, So ist der Rahmen bei 10 GHz z.B. ca. 12  $\mu$ s lang. Damit geht das Multiplexen schneller. OTH stellt eine Vorwärtsfehlerkorrektur zur Verfügung, die allerdings innerhalb des Rahmens durchgeführt wird, also kaum zusätzliche Zeit benötigt. Die Übertragungsgeschwindigkeit von OTH reicht heute bis 100 Gbit/s pro Wellenlänge.

Durch die Steigerung der Leistung der Netzknoten auf den höheren Protokollschichten werden vermehrt Funktionen dort abgewickelt und die Übertragungstechnik dient nur noch der Anpassung an die Glasfaser, z.B. durch

eine geeignete Leitungscodierung, Fehlererkennung und Alarmierung. Daher nutzen manche Netzbetreiber kaum noch die Schaltmöglichkeiten, wie sie Cross-Connects bieten, sondern demultiplexen in jedem Netzknoten bis auf die Paketebene.

Die Verarbeitung in höheren Protokollschichten kostet zwar mehr Zeit als die Schaltung in einem übertragungstechnischen Cross-Connect, aber durch die höhere Leistung der Netzknoten werden weniger solcher Knoten im Netz benötigt. Ob sich aus Sicht der Gesamtverzögerungszeit diese Effekte in Summe positiv oder negativ bemerkbar machen, kann nicht pauschal beantwortet werden.

Ein Schalten auf der hochbitratiger Zeitmultiplex- oder Wellenlängenebene ist unabhängig von der Netzstruktur in vielen Fällen für Ersatzschaltungen und Netzmanagement sinnvoll.

---

## 5 Bestehende Ansätze

Dieses Kapitel geht der Frage nach, ob es schon Systeme und Protokolle gibt, die die Probleme in Teilbereichen lösen oder zumindest bei der Lösung unterstützen können

### 5.1 Industrial Ethernet

Zu Beginn der Industrialisierung war die menschliche Arbeitskraft in ausreichender Anzahl und zu billigen Löhnen verfügbar. Das erlaubte es jeder Maschine, jedem Gerät, einen Bediener beizustellen.

Im Laufe der Entwicklung versuchte man Personal einzusparen. Das wurde möglich, indem Maschinen und Geräte fernüberwacht und fernsteuerbar wurden. Der Bediener benötigt jetzt von jeder Maschine Zustandsinformationen – erfasst von Sensoren – und die Möglichkeit des Eingriffs – dazu dienen Aktoren.

Im ersten Schritt wurde jeder Sensor und jeder Aktor mit einer eigenen elektrischen Leitung an die zentrale Stelle geführt. Man nannte dies eine *Parallelverdrahtung*, sie war aufwändig und schwierig zu erweitern.

In den 1980er Jahren wurde damit begonnen, diese Parallelverdrahtung durch *Bussysteme* zu ersetzen. Jetzt teilen sich alle angeschlossene Geräte eine gemeinsame, digitale Kommunikationsinfrastruktur. Jeder Kommunikationsteilnehmer muss nun eindeutig adressierbar sein. Diese Systeme nannte man *Feldbus*. Da eine Unterbrechung dieses Bussystems eine große Wirkungsbreite haben kann, versucht man das System ausfallsicher zu gestalten. Dazu werden gerne Ringstrukturen eingesetzt.

Ein großer Nachteil dieser Feldbusse ist nicht-technischer Art: es gibt fast 40 ver-

schiedene Feldbus-Systeme. Die Standardisierung hat zu spät gegriffen und wurde nicht konsequent durchgeführt, sicher aufgrund der Vielzahl an beteiligten Firmen und deren bestehendem Produktportfolio.

Durch den großen Erfolg des Ethernets in der Datenkommunikation wurde in einem neuen Ansatz dessen Tauglichkeit für Feldbussysteme untersucht und schließlich unter dem Begriff *Industrial Ethernet* oder *Echtzeit-Ethernet* eine Feldbus-Version geschaffen, heute als zweite Generation Feldbus bezeichnet [44].

Gegenüber einem Ethernet in einer Büroumgebung werden an ein Industrial Ethernet völlig andere Anforderungen gestellt. Die sind einerseits den Umgebungsbedingungen geschuldet wie z.B. Temperaturbereich, Schutzklasse (Schutz gegen Staub, Schmutz, Wasser, Öl usw.), EMV-Störsicherheit, Stromversorgung (24V Gleichspannung). Aber ganz wichtig sind auch die Anforderungen an die Reaktionszeit, die das System zu einem Echtzeitsystem machen. Will man z.B. 1ms Zykluszeit erreichen, dann kann diese Forderung nur durch spezielle Hardware, Netzstruktur (z.B. redundante Ringstrukturen) und angepasster Einsatz der Protokolle erfolgen. Dahinter steht meist, dass die zeitkritische Kommunikation direkt auf das Ethernet aufsetzt, also nicht den im Internet üblichen Protokollstack (IP, TCP, UDP) benutzt.

**Fazit: Ideen des Industrial Ethernet können für lokale Netze Anwendung finden, evtl. auch für begrenzte Vernetzungen, wenn der (öffentliche) Netzbetreiber Ethernet-Dienste anbietet. ISPs setzen allerdings auf IP auf.**

## 5.2 Realtime Transport Protocol (RTP)

Die größte Herausforderung beim Transport von Echtzeit-Informationen über ein Paketnetz (wie es das Internet darstellt) ist die naturgetreue Rekonstruktion der Information auf der Empfängerseite. Dazu wurde das *Real Time Transport Protocol* (RTP) spezifiziert [45], das oberhalb von UDP arbeitet und damit ein Ende-zu-Ende Protokoll darstellt. RTP geht davon aus, dass die darunter liegenden Schichten alle erforderlichen Ressourcen bereitstellen. RTP beinhaltet also keine Reservierung von Ressourcen im Netz und auch keine Flusssteuerung. Damit kann RTP aber auch keine Qualität garantieren.

Die folgenden Funktionen werden vom RTP bereitgestellt:

- *Sequencing*: Da ein verbindungsloses Paketnetz sowohl Pakete verlieren kann, als auch durch unterschiedliche Wege die Pakete nicht mehr in der richtigen Reihenfolge beim Empfänger ankommen können, wird eine Sequenznummer bereitgestellt, die es erlaubt, sowohl den Verlust eines Paketes zu entdecken als auch Pakete in falscher Reihenfolge wieder richtig zu sortieren. Letzteres erfordert natürlich, dass einige Pakete zwischengespeichert werden, was zu einer Erhöhung der Gesamtverzögerung führt.
- *Intra-media Synchronization*: Die Pakete, die zu einem Datenstrom gehören, können im Netz eine unterschiedliche Verzögerung erfahren. Diese Verzögerungsschwankungen müssen beim Empfänger wieder ausgeglichen werden, mehr noch, ein evtl. vorhandener Zeitbezug zwischen aufeinanderfolgenden Paketen auf der Sendeseite muss auf der Empfangsseite wieder hergestellt werden. Auch hierfür sind entsprechende Puffer auf der Emp-

fangsseite notwendig und zusätzlich werden Zeitmarken (time stamp) mitgesendet, die den relativen Bezug wieder herstellen. Alle diese Maßnahmen erhöhen die Gesamtverzögerung!

- *Payload Identification*: Zu den Nutzdaten werden begleitende Informationen übermittelt, z.B. in welcher Art die Information codiert ist. Das ist nicht nur für den Empfänger wichtig, sondern kann auch im Netz verwendet werden. Als Beispiel kann eine Umcodierung im Netz stattfinden, wenn plötzlich weniger Kapazität zur Verfügung steht. Auch eine solche Funktion erhöht die Gesamtverzögerung.
- *Frame Indication*: Viele Datenströme sind in Rahmen strukturiert. Es ist wichtig für den Empfänger, Anfang und Ende solcher Rahmen sicher zu erkennen um den höheren Protokollschichten diese Rahmen richtig übergeben zu können.

RTP transportiert seine Daten in einem zusätzlichen Paketkopf, der mindestens 12 Byte umfasst, für spezifische Informationen aber auch erweitert sein kann. Die Felder des RTP-Kopfes bilden direkt die vorher genannten Funktionen ab.

RTP liefert keinen add-on zu dem von UDP bereitgestellten Dienst – es wird nur zusätzliche Information übermittelt. Weiterhin findet in der RTP-Ebene kein Multiplexen unterschiedlicher Datenströme statt; so werden die Audio- und Video-Komponenten einer Video-Konferenz in unterschiedlichen RTP-Sessions übertragen.

Das RTP stellt neben dem eigentlichen Protokoll noch eine Steuerung bereit, das *Real Time Control Protocol* (RTCP). Es bietet folgende Funktionen:

- *QoS Feedback*: Damit gibt der Empfänger eine Indikation über die empfangene Qualität (Paketverlust, Verzögerung, Verzögerungs-Schwankung) an den Empfänger zurück. So kann z.B. der Sender durch andere Codierungen oder Hinzufügen weiterer Fehlerkorrektur-Mechanismen auf eine Verschlechterung der Qualität reagieren.
- *Inter-media Synchronization*: Nicht zu verwechseln mit der Intra-media Synchronization des RTP: während dort die Synchronisation in einem einzelnen Datenstrom behandelt wurde, handelt es sich hier um die Synchronisation zwischen verschiedenen Datenströmen, die zur gleichen Kommunikationsbeziehung gehören, z.B. Audio und Video.
- *Identification*: Dient zum Austausch von Informationen, die die Beteiligten identifizieren, z.B. Name, Telefonnummer oder E-Mail-Adresse.
- *Session Control*: Hiermit können die Beteiligten in begrenzter Form Informationen untereinander austauschen oder eine Session verlassen.

Pakete mit RTCP werden an die gleiche Adresse wie die RTP-Pakete gesendet, allerdings an eine andere Portnummer. Üblicherweise werden RTCP-Pakete periodisch gesendet, was besonders für QoS-Feedback wichtig ist. Der Anteil der RTCP-Pakete sollte nicht mehr als 5% der gesamten RTP-Pakete betragen.

**Fazit: RTP und RTCP unterstützen die Übermittlung von Echtzeithalten, sind aber aufgrund ihre Lage weit oben im Protokollstack auf die unterliegenden Transportdienste angewiesen. RTP kann gewisse negative Einflüsse auf das Echtzeitverhalten korrigieren, aber immer nur durch das Einfügen von weiteren Verzögerungszeiten.**

### 5.3 Realtime Streaming Protocol (RTSP)

Multimedia-Inhalte können auf zwei Arten generiert werden: direkt online (bzw. interaktiv), also mit Kamera und Mikrofon, oder aus einem Speicher wie ihn z.B. eine Sprach-Mailbox oder ein Video-Server bereitstellt. Besonders gespeicherte Inhalte erfordern eine Möglichkeit der Einflussnahme auf die Präsentation der Inhalte, um z.B. anzuhalten, schnelles Vor- oder Zurückspulen oder auch auf Aufnahme zu schalten (z.B. bei einer Sprach-Mailbox). Die Begriffe lehnen sich eng an die eines Tonbandgerätes oder Videorecorders an.

Um solche Funktionen zu übermitteln, wurde das *Real Time Streaming Protocol* (RTSP) definiert [46]. Die eigentlichen Datenströme werden in der Regel über RTP-Sessions übermittelt und in einem separaten Protokoll beschreiben. RTSP stellt dann die notwendige Steuerung bereit. Dabei kann RTSP sowohl TCP als auch UDP als Transport benutzen.

Es handelt sich um ein Client-Server-Protokoll, das ähnlich aufgebaut ist, wie das *Hypertext Transfer Protokoll* (HTTP) [47], das dem erfolgreichen World Wide Web zugrunde liegt. Es ist also ein rein Text-basiertes Protokoll. Es gibt aber einen grundlegenden Un-

terschied: während HTTP nur immer eine definierte Reaktion auf eine spezifische Nachricht hervorruft, bewirken RTSP-Nachrichten, dass das System verschiedenen Stadien durchläuft – im Englischen mit *stateful* bezeichnet. Das ist aber verständlich, weil ja auch die Anwendung *stateful* ist: ein PLAY-Befehl ändert z.B. den Status des Servers in „Abspielen eines Informations-Stromes“. Es ist also notwendig, dass beide Kommunikationspartner immer den gleichen Status haben.

Für die Steuerung des Servers sind eine Reihe von Nachrichtentypen definiert, z.B.

- SETUP - stellt die RTSP-Verbindung mit dem Server her
- PLAY - Steuerung des Informations-Stromes, startet das Abspielen des Films
- RECORD - Steuerung des Informations-Stromes, startet die Aufnahmen
- PAUSE - Steuerung des Informations-Stromes, hält die laufende Aktion vorübergehend an
- TEARDOWN - beendet die Session

**Fazit: RTSP dient der Steuerung einer Session und hat mit der Übertragung der Inhalte direkt nichts zu tun, hat also keinen Einfluss auf die Verzögerung des Nutzinhalts.**

#### 5.4 Hypertext Transfer Protocol Version 2 (HTTP 2.0)

Die nächste Protokollgeneration des im Web benutzten *Hypertext Transfer Protocols* – HTTP 2.0 – bietet einige Features, die den Web-Zugriff optimieren helfen [48]. Neben einer besseren Abbildung auf die unterliegende

Protokollschicht sind es besonders das Interleaving und die Priorisierung. Ersteres erlaubt auf einer Verbindung mehrere *Request-Response-Beziehungen* zu transportieren. Damit werden weniger TCP-Verbindungen benötigt und die bestehenden sind langlebiger. Mit der Priorisierung können bestimmte Requests bevorzugt und damit schneller bedient werden.

**Fazit: HTTP 2.0 optimiert die Anwendungsschicht und hilft, die Transportschicht optimaler zu benutzen, muss aber auf die Dienste der unterliegenden Schichten vertrauen.**

#### 5.5 Web Real Time Communication (WebRTC)

Bei WebRTC handelt es sich um eine innerhalb des Web-Browsers laufende Ergänzung für die Echtzeitkommunikation [49]. Ziel ist die Übertragung von Multimedia-Inhalten zwischen Browsern. Die Übertragung erfolgt über RTP mit verschiedenen Erweiterungen. WebRTC wird als Konkurrenz (oder Alternative) zu Skype gesehen. Der entsprechende Standard ist derzeit in der Entstehung.

**Fazit: Ähnlich zu HTTP 2.0 werden bei WebRTC neue Funktionen in der Anwendungsschicht angesiedelt. Es muss aber auf die Dienste der unterliegenden Schichten vertrauen.**

---

## 6 Standardisierung

In den vorherigen Kapiteln wurden die Probleme benannt und mögliche Problemlösungen vorgestellt. Das muss auch für die Standardisierung ein Thema sein. Daher werden kurz einige relevante Gremien und Dokumente analysiert.

### 6.1 International Telecommunication Union (ITU)

In der ITU beschäftigt sich die Studiengruppe 12 mit Qualitätsfragen in der Telekommunikation (dort in der „Question 17“). Die Dokumente der Serie Y befassen sich mit *Global Information Infrastructure, Internet Protocol Aspects and Next Generation Networks*. Drei relevante ITU-Dokumente werden kurz vorgestellt.

#### **Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance Parameters Y.1540 [50]**

Das Dokument beschreibt sowohl für Ende-zu-Ende-Kommunikationsbeziehungen als auch für Abschnitte davon relevante Qualitätsparameter. Dabei wird hauptsächlich auf die Ereignisse eingegangen, die am Ort des Empfangs für ein Paket beobachtet werden können. Das Dokument nennt dies *outcomes*:

- erfolgreich übertragenes Paket (successful),
- fehlerhaftes Paket (errored),
- verloren gegangenes Paket (lost) und
- fehlgeleitetes Paket (spurious).

Neben diesen grundlegenden *outcomes* gibt es eine Reihe weitere wie z.B.:

- Pakete kommen nicht in der richtigen Reihenfolge an und
- duplizierte Pakete.

Unter den Performance-Parametern werden die Verzögerungszeiten gelistet. *IP Packet Transfer Delay* (IPTD) ist definiert als die Einweg-Verzögerungszeit, gemessen zwischen zwei Messpunkten auf der Sende- und Empfangsseite. Sollten Pakete auf dem Weg fragmentiert werden, so gilt als Empfangszeit diejenige, zu der alle Fragmente eingetroffen sind.

Aus dem IPTD werden folgende Werte abgeleitet, wobei immer eine bestimmte Menge an Paketen betrachtet wird (population of interest):

- *Mean IPTD* ist der arithmetische Mittelwert der IPTDs.
- *Median IPTD* ist der 50%-Punkt der IPTDs
- *IP Packet Delay Variation* (IPDV) ist der Abstand zwischen der IPTD des aktuellen Paketes und eines Referenzpakets, Damit kann IPDV positiv oder negativ werden. Es bietet sich an, *Minimum IPTD* als Referenzwert zu nehmen. Dann ist IPDV immer positiv. Aus technischer Sicht, z.B. zur Dimensionierung eines Pufferspeichers, bietet es sich an, eine Obergrenze des IPTD vorzugeben, z.B. 99,9% aller Pakete müssen Berücksichtigung finden. Abbildung 29 zeigt beispielhaft eine Verteilung der Verzögerungszeiten und die Obergrenze der Schwankung.

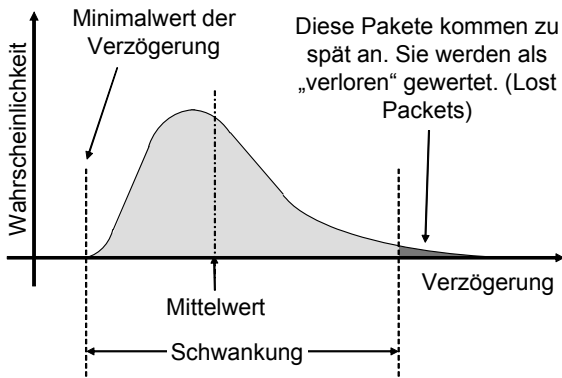


Abbildung 29: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verzögerungszeit

**Network performance objectives for IP-based Services Y.1541 [51]**

Während Y.1540 die Parameter definiert, werden in Y.1541 reale Werte angegeben. Interessant ist eine Tabelle, in der 5 Qualitätsklassen definiert sind. Sie ist nachfolgend reproduziert:

Zwei strengere Klassen (6 und 7) verschärfen IPLR und IPER, nicht jedoch IPTD und IPDV.

Die Werte gelten für eine Ende-zu-Ende-Kommunikation in öffentlichen IP-Netzen, wobei Pakete mit 1500 Nutzbytes und 1 Minute Messzeit angenommen werden.

Für das Taktile Internet wird nur die Klasse 0 von Interesse sein. Ein Mittelwert von 100 ms für die Verzögerungszeit und eine Variation von 50 ms ergibt einen Maximalwert von 150 ms. Dabei gilt dieser Wert für 99,9% der Pakete.

In einer weiteren Tabelle werden Anwendungen sowie Maßnahmen gelistet, mit denen diese Werte erzielt werden sollen. Die Anwendungen werden mit „real-time, jitter sensitive, high interaction (VoIP, VTC)“ charakterisiert. Also hier taucht wieder der Begriff Echtzeit auf, sowie als Beispiele die klassischen Dienste wie Sprache (hier über IP). Als Me-

Network Performance parameter	Nature of network performance objective	QoS Class 0	QoS Class 1	QoS Class 2	QoS Class 3	QoS Class 4	QoS Class 5 unspecified
<b>IPTD</b>	Upper bound on the mean IPTD	100 ms	400 ms	100 ms	400 ms	1 s	unspec.
<b>IPDV</b>	Upper bound on the 1-10 <sup>-3</sup> quantile of IPTD minus the minimum IPTD	50 ms	50 ms	unspec.	unspec.	unspec.	unspec.
<b>IPLR</b>	Upper bound on the packet loss probability	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	unspec.
<b>IPER</b>	Upper bound on the packet error probability	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	unspec.

chanismen für die Knoten werden genannt: „separate queue with preferential servicing, traffic grooming“, für das Netz selbst: „constrained routing, and distance“ – also im Kern: Priorisierungen und geeignete Routing-Verfahren.

In einem nicht-normativen Anhang (siehe nachfolgende Tabelle) werden Verzögerungszeiten für Router angegeben, abhängig von ihrer Rolle im Netz:

Role	Average total Delay (sum of queuing and processing)	Delay variation
Access Gateway	10 ms	16 ms
Internetworking Gateway	3 ms	3 ms
Distribution	3 ms	3 ms
Core	2 ms	3 ms

### One Way Transmission Time G.114 [52]

Dieses Dokument beschäftigt sich zwar primär mit der Telefonie, gibt aber einige allgemeine Hinweise. Für die Telefonie gelten drei Eckwerte:

- Bis zu 25 ms sind keine Echosperrungen nötig. Das sind in der Regel nationale Netze.
- Bis zu ca. 100 ms ist ein akzeptables Telefonieren möglich. Darüber hinaus ist es schwierig, einen Dialog zu führen.

- Ab ca. 400 ms ist das Telefonieren so schwierig, dass es als nicht akzeptabel eingestuft wird.

In einem Annex werden Planungswerte für die Verzögerung einzelner Elemente im Netz angegeben, allerdings sind diese sehr auf die Telefonie bezogen (z.B. digitale Vermittlungsstelle, Coder, usw.), so dass sie für das Taktile Internet nicht hilfreich sind.

## 6.2 European Telecommunications Standards Institute (ETSI)

In ETSI gibt es ein Technisches Komitee, das sich mit *Machine-to-Machine Communication* beschäftigt. Angestoßen wurde diese Aktivität durch das Mandat M/441 der Europäischen Kommission, das sich mit dem Smart Meter beschäftigt. Man hat aber die Aktivität breit angelegt und viele andere Bereiche mit erfasst, so z.B. E-Health, die IKT-Unterstützung im Gesundheitswesen.

Da viele Standards zu Teilthemen schon existieren, soll das Technical Committee M2M die Bruchstücke zusammen bringen, die Lücken identifizieren und zusammen mit anderen Gruppen die fehlenden Standards erstellen.

Vielfach werden Kurzstreckenfunktechniken für M2M zum Einsatz kommen, aber auch der Mobilfunk ist ein geeigneter Kandidat, besonders wenn die Entfernungen größer werden. Die Teilnehmer an einer M2M-Kommunikation zeigen ein anderes Verhalten als der herkömmliche menschliche Teilnehmer. Daher wird eine Optimierung bzw. Anpassung in den Telekommunikationsnetzen notwendig werden, was eine entsprechende Standardisierung erfordert.

Aus der Vielzahl der Dokumente sollen drei hervorgehoben und kurz vorgestellt werden.



### **M2M Service Requirements** ETSI RTS 102 689 [53]

Das Dokument listet die Ende-zu-Ende-Anforderungen an ein M2M-System auf. Nicht jede Anwendung wird auf die gelisteten Anforderungen in gleichem Maße Wert legen.

Die Themen sind:

- General Requirements – hauptsächlich die Kommunikationsfähigkeiten betreffend,
- Management,
- Functional Requirements – aus der Dienstsicht,
- Security – Authentication Confidentiality, Integrity, Privacy,
- Naming, Numbering, Addressing.

Die Anforderungen sind sehr allgemein gehalten und gehen nicht im Detail auf Parameter des Netzes ein.

### **M2M Functional Architecture** ETSI TS 102 690 [54]

Das sehr umfangreiche Dokument beschreibt die funktionale Architektur, bestehend aus Funktionsblöcken und Schnittstellen, sowie die Beziehung zu den existierenden Netzen, auf denen die M2M-Architektur aufbaut. Dabei wird davon ausgegangen, dass diese Netze IP-fähig sind, wobei aber andere Kommunikationsdienste wie SMS ebenfalls berücksichtigt werden.

### **mla, dla and mld Interfaces** ETSI TS 102 921 [55]

Im Architektur-Dokument ETSI TS 102 690 sind die Referenzpunkt *mla*, *dla* und *mld* definiert. Werden an diesen Stellen Schnittstellen vorgesehen, dann müssen diese spezifiziert werden. Das betrifft Protokolle, APIs, Datenmodelle und Codierungen. Das vorlie-

gende Dokument enthält die entsprechende Stage-3 Beschreibung.

Keines der Dokumente gibt Hinweise auf Werte für Verzögerungszeiten.

### **6.3 oneM2M**

Im Juli 2012 wurde von 7 Standardisierungsgremien unter dem Namen „oneM2M“ eine globale Organisation gegründet, die Spezifikationen im Bereich M2M erstellen soll. Da ETSI eines der Gründungsmitglieder ist, werden sicher die dort schon erarbeiteten Standards in oneM2M einfließen [56].

### **6.4 Internet Engineering Task Force (IETF)**

Sucht man bei der für die Internet-Protokolle zuständigen *Internet Engineering Task Force* (IETF) nach dem Begriff „realtime“, so erhält man 4400 Ergebnisse. Einige Dokumente befassen sich mit Performance-Parametern

#### **IP Performance Metrics (IPPM) RFC2330 [57]**

Dieses Dokument legt die Grundlagen für IPPM. Wie in der ITU werden auch hier sowohl Ende-zu-Ende-Kommunikationsbeziehungen betrachtet als auch Abschnitte des Netzes (IP clouds). Das Dokument definiert die relevanten Begriffe und setzt sich mit Messverfahren und Ungenauigkeiten in der Messung auseinander.

#### **A One-way Delay Metric for IPPM RFC2679 [58]**

In diesem Dokument wird gezielt die Verzögerungszeit in Netzen behandelt. Hier wird ein *Type-P-One-way-Delay* definiert als die Zeit vom Absenden des ersten Bis eines Pa-

---

ketes auf der Sendeseite bis zum Empfang des letzten Bits eines Paketes auf der Empfangsseite, wie in 2.2.4 beschrieben. Dieses gilt für ein einzelnes Paket. Aus mehreren Messungen (*samples*) lässt sich auf einen statistischen Wert schließen.

**IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM) RFC 3393 [59]**

behandelt die Schwankung der Verzögerungszeit, und in

**Packet Delay Variation Applicability Statement” RFC 5481 [60]**

werden schließlich die in RFC 3393 sehr breit definierten Möglichkeiten für die Schwankung der Verzögerungszeit eingegrenzt und praktische Vorschläge unterbreitet.

In keinem der Dokumente werden Werte angegeben, weder als Zielvorgaben noch von Messungen.

## **6.5 Vorschlag für weiteres Vorgehen**

Die Standardisierung legt in der Regel nur Parameter fest, keine realen Werte. Die ITU geht in der Y.1541 schon weit über die üblichen Standards hinaus. Zwar ist es möglich, dass z.B. ETSI in *Technical Reports* oder *Guides* solche Werte propagiert, aber vielleicht könnte hier ein Gremium einspringen, dass nicht dem Zwang untersteht, formale Standards oder Normen zu erstellen. Das oneM2M könnte ein geeigneter Kandidat sein.

## 7 Technische Möglichkeiten und Vorschläge

Die vorstehenden Kapitel haben den aktuellen Stand der Technik beschrieben. Jetzt stellt sich die Frage, wie weiter vorzugehen ist, um kürzere Verzögerungszeiten in den Netzen zu erzielen. Das könnte z.B. durch Änderungen und/oder Ergänzungen von Bestehendem oder auch durch Einführung von Neuem realisiert werden:

- Änderungen und/oder Ergänzungen vorhandener Protokolle,
- Einführung neuer Protokolle,
- Änderungen und/oder Ergänzungen der Netzstrukturen.

Dann stellen sich aber auch die Fragen:

- Wie sollen die Vorschläge unterstützt werden?
- Wo liegen die Hemmnisse?

Ethernet und das Internet Protokoll sind stabile Größen und Änderungen an den entsprechenden Protokollen nur langsam möglich. Diese Protokolle sind zu einer Zeit entwickelt worden, in der weder die heutigen Übertragungsgeschwindigkeiten noch die heutigen Anwendungen überhaupt vorstellbar waren. So bedauert z.B. der Erfinder des Ethernets heute seine damalige Festlegung auf die maximale Rahmengröße von 1500 Byte.

Betrachtet man die heutigen Netzstrukturen und Protokollstacks, so fallen doch einige Punkte auf, mit denen die Verzögerungszeit beeinflusst werden kann:

1. Änderungen an der Netzarchitektur,
2. Steigerung der Leistung der Netzknoten,
3. Reduktion der Anzahl der Netzknoten,

4. Reduktion der Typen an Netzknoten,
5. Steigerung der Übertragungsgeschwindigkeit,
6. Reduktion der Protokollschichten,
7. Reduktion der Protokollvielfalt.

Wie bei der Vorstellung der Netze schon gezeigt, sind einige dieser Maßnahmen schon in der Umsetzung. Die folgenden Unterkapitel gehen auf diese sieben Punkte näher ein.

### 7.1 Änderungen an der Netzarchitektur

Das ist ein schwieriges Thema, denn die Netzarchitektur unterliegt einigen Randbedingungen. So hat ein Netzbetreiber Gebäude und Räume für seine Technik. Auch eine neue Technik müsste dort untergebracht werden. Ähnliches gilt für die Verbindungen dazwischen. Leitungstrassen sind vorhanden und müssen genutzt werden. Neues Graben ist teuer und evtl. sogar nicht möglich.

Auch die Aufteilung in Zugangsnetze und Kernnetz wird sicher bestehen bleiben, denn im Bereich der Zugangsnetze wird die Vielfalt eher noch zunehmen. Bis jeder Kunde die eigene Glasfaser bekommt wird sicher eine lange Zeit vergehen. Kernnetze sind heute teilvermascht. Hier könnte u.U. eine stärkere Vermaschung (bis hin zur Vollvermaschung) Vorteile bieten.

Ein anderer Aspekt ist die Zuordnung von Funktionen zu Netzelementen. Hier gibt es interessante neue Ansätze, die eine noch striktere Trennung zwischen dem reinen Transport der Daten und der Steuerung der Einrichtungen vorsieht. Schlagworte sind *Software Defined Networking* (SDN) und *Network Function Virtualization* (NFV) [61]. Beides sind Konzepte die nicht direkt zur Reduktion der Verzögerungszeit beitragen, aber

---

eventuell indirekt durch die damit erreichbare bessere Steuerung der Netzelemente. Damit können evtl. Engpässe im Netz vermieden werden. Die Elemente zur reinen Weiterleitung der Daten verlieren Intelligenz – diese wird in Server ausgelagert – sie werden aber in ihrer Kernfunktion immer leistungsfähiger.

## 7.2 Steigerung der Leistung der Netzknoten

Netzknoten beinhalten sowohl Prozessoren und Speicher als auch spezielle Hardware. Wie jeder an seinem PCs selbst erfahren hat, ist die Leistung der Geräte kontinuierlich gestiegen, meist sogar bei gleichem Preis. Das betrifft sowohl den Prozessor, dessen Taktfrequenz heute im Gigahertz-Bereich liegt, als auch die Speicherkapazität. Neben diesen Standardbauteilen werden heute vermehrt Hardwarekomponenten eingesetzt, die auf spezielle Funktion zugeschnitten sind. Das sind meist *Application-specific Integrated Circuits* (ASIC) oder *Field Programmable Gate Arrays* (FPGA).

Relevant für die Verzögerungszeit sind alle Funktionen, die für das Weiterleiten der Pakete direkt verantwortlich sind, wie z.B.

- Auswerten des Paketkopfes (Lesen der Zieladresse und der Priorität),
- Zwischenspeichern des Pakets im Puffer,
- Suche der Ausgangsschnittstelle aus einer Tabelle,
- Abarbeiten der Warteschlangen und Ausgabe der Pakete am Ausgangsport (scheduling).

Die meisten dieser Funktionen können durch den Einsatz schneller Bauteile (Prozessoren, Speicher usw.) beschleunigt werden. Beim

Scheduling ist auch eine gute Strategie notwendig.

Viele neue Funktionen von Netzknoten haben keinen direkten Einfluss auf die Weiterleitung der Pakete.

## 7.3 Reduktion der Anzahl der Netzknoten

Durch die Steigerung der Leistungsfähigkeit von Netzknoten war es schon im digitalen Telefonnetz möglich, die Anzahl der Knoten zu reduzieren und die Anzahl der Hierarchieebenen von 4 auf 3 zu reduzieren. Im Internet ist eine ähnliche Entwicklung auszumachen. Mit dem Wachsen des Internets musste auch die Zahl der Netzelemente gesteigert werden. Dann jedoch wurden die Netzelemente leistungsfähiger und weiteres Wachstum konnte durch diese Leistungssteigerung abgedeckt werden.

Wie schon in Kapitel 4.5 gezeigt, sollten wenige Hierarchiestufen im Netz ausreichen. Durch eine Vollvermaschung in der obersten Hierarchieebene werden für eine Kommunikationsbeziehung dort nur maximal zwei Knoten durchlaufen.

## 7.4 Reduktion der Typen an Netzknoten

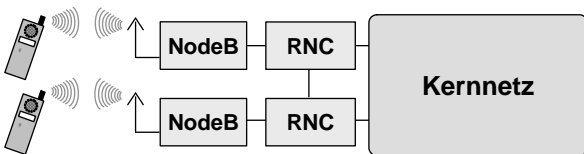
Interessant ist die Frage der Knotentypen. Betrachtet man die Entwicklung der Netze von *Internet Service Providern* (ISP), dann ist der erste Knoten, der die IP-Pakete des Teilnehmers auswertet, ein *Network Access Server* (NAS). Der IP-Verkehr wird ihm über bestehende oder neue Zugangsnetze zugeführt. Das war in der Vergangenheit das Telefonnetz oder eine Mietleitung, heute DSL, HFC, FTTx und Funktechnik. Hier wird mit ausge-

feilten Techniken das physikalische Medium ausgereizt.

Mit wachsender Kundenbasis wurde zwischen Kunde und NAS ein auf Ethernet basierendes Aggregationsnetz eingeschoben. Da moderne Knoten auf verschiedenen Protokollebenen arbeiten können, stellt sich die Frage, ob nicht die NAS-Funktion weiter zum Kunden verlagert werden könnte. Damit wäre zwar der Kernbereich größer, aber homogen.

Am Beispiel des Mobilfunks kann die Reduktion der Typen gezeigt werden. Abbildung 30 zeigt, wie im Mobilfunk beim Schritt von UMTS zu LTE ein Netzelement, der *Radio Network Controller* (RNC) eingespart wurde. Seine Funktion wird von den benachbarten Elementen übernommen.

**UMTS:**



**LTE:**

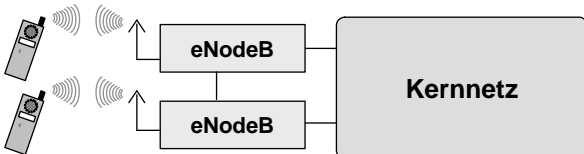


Abbildung 30: Vereinfachung des Mobilfunknetzes

**7.5 Steigerung der Übertragungsgeschwindigkeit**

Die Steigerung der Übertragungsgeschwindigkeit ist ein permanenter Prozess. Das gilt in der klassischen Übertragungstechnik, die mit dem Primärmultiplex bei 2 Mbit/s begann, sich über die erste Stufe der Synchronen Digitalen Hierarchie mit 155 Mbit/s bis auf 100 Gbit/s pro Wellenlänge gesteigert hat. Ein

weiterer Freiheitsgrad ergibt sich mit der Nutzung des Wellenlängenmultiplex, bei dem über eine Glasfaser bis zu 160 Wellenlängen übertragen werden können.

Auch beim Ethernet kann eine stetige Steigerung beobachtet werden. Die erste Ethernet-Spezifikation legte die Übertragungsgeschwindigkeit auf 10 Mbit/s fest. Derzeit ist das 100-Gbit/s-Ethernet definiert, die Spezifikation von 400 Gbit/s wurde begonnen.

Selbst die Zugangsnetze werden immer schneller. Beim ADSL sind es 25 Mbit/s, beim VDSL schon 100 Mbit/s. Im Kabelnetz ist die Kapazitätszuweisung in Grenzen flexibel. Auch hier sind 100 Mbit/s möglich. Kommt dann die Glasfaser wirklich bis ins Haus (FTTB, FTTH), dann sind auch Gbit/s-Geschwindigkeiten möglich.

Beim Zugangsnetz begrenzen oft nicht die technischen Parameter sondern die Kosten den weiteren Ausbau.

**7.6 Reduktion der Protokollschichten**

Die klassische Aufteilung der Protokollschichten zeigt Abbildung 31.

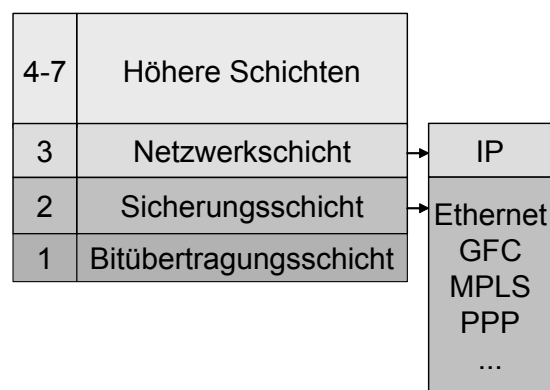


Abbildung 31: Schichtenmodell

Über einer physikalischen Schicht – der Übertragungstechnik – liegt die Sicherungs-

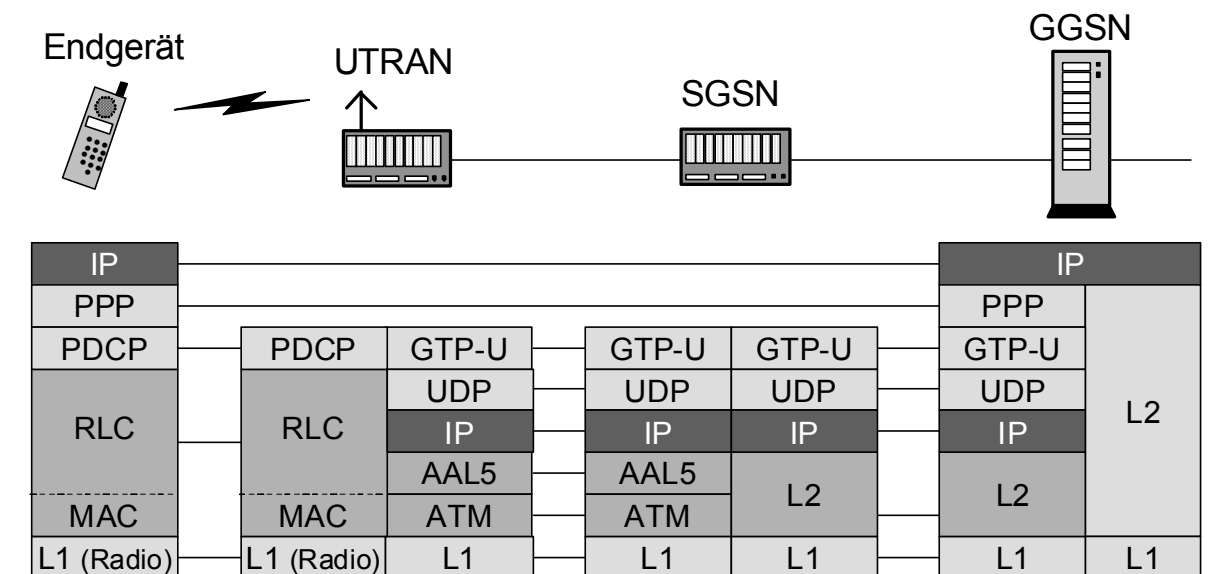


Abbildung 32: UMTS- Protokollstack

schicht, z.B. Point-to-Point-Protocol (PPP), Ethernet, Multi-Protocol Label Switching (MPLS) oder Generic Framing Procedure (GFP). Das Internet Protocol (IP) bildet nahezu unangefochten die Netzwerkschicht.

Nun haben sich die Protokolle zum Teil unabhängig voneinander entwickelt und die Entwickler haben meist mehr Funktionalität eingebaut, also in der jeweiligen Schicht notwendig wäre. So kann die klassische Übertragungstechnik (SDH, OTH) Pfade schalten und auch die Schicht-2-Protokolle Ethernet und MPLS können Datenrahmen aufgrund einer Adresse oder Kennung schalten. Aber Wegewahl und Schalten ist eine Funktion der Netzwerkschicht. Somit würde eigentlich eine simple Übertragungstechnik in Schicht 1 und eine Rahmenbildung in der Schicht 2 ausreichen.

Ein weiterer Aspekt zeigt sich beim Betrachten der Protokollstacks der Zugangsnetze und des Mobilfunks: Dort gibt es oft Schichten der gleichen Ebene, die übereinander ge-

schichtet sind. So wird beim DSL PPPoE verwendet, bei dem über das Ethernet das Point-to-Point Protokoll geschichtet ist. Und ob PPP wirklich notwendig ist, darf bezweifelt werden. Kunden von IPTV haben im Prinzip zwei Pfade ins Netz: den klassischen Internet-Zugang mit PPP und den Zugriff zu den IPTV-Servern ohne PPP. Im Kabelnetz wird heute schon direkt auf Ethernet aufgesetzt.

Auch im Mobilfunk ist ein mehrfach geschichteter Protokollstack vorhanden. Hier fällt besonders die IP-über-IP-Konfiguration auf. Neben der IP-Schicht, die der Kunde für seinen Verkehr nutzt, gibt es eine netzinterne IP-Kommunikation. Hier ist zu hinterfragen, ob das die richtige Technologie an dieser Stelle ist. Das kann allerdings allenfalls in einer späteren Mobilfunkgeneration geändert werden.

## 7.8 Reduktion der Protokollvielfalt

Eine andere Betrachtung der Protokollstacks konzentriert sich auf die Protokollvielfalt. Das Internet-Protokoll ist – zumindest nach derzeitigem Stand – unbestritten. Die aktuelle Version 4 des Protokolls wird derzeit langsam auf die Version 6 umgestellt. Hauptgrund ist die Adressknappheit bei der Version 4. Allerdings verläuft der Umstellungsprozess sehr langsam, denn viele Work-Arounds helfen noch eine gewisse Zeit zu überbrücken. Das ist ein Problem, denn zwischen den Teilen des Netzes mit unterschiedlichen Protokollversionen ist ein aufwändiges Interworking notwendig. Ziel muss es daher sein, sobald wie möglich wieder eine homogene Protokollwelt zu schaffen.

Bei dieser Umstellung sollte der Verteilung der Adressen bessere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Eine geografische Verteilung in der Form, dass große Adressbereiche den Regionen der Welt zugewiesen werden, vereinfacht und beschleunigt das Absuchen der Routingtabelle.

Auch die unter IP liegenden Schichten erfordern eine detailliertere Analyse. Wir finden hier im Zugangsbereich hauptsächlich Ethernet und ATM, im Kernnetz Ethernet und MPLS. ATM wird derzeit nicht neu installiert, wird also mittelfristig aus den Netzen verschwinden.

Solange sich an einer Übergangsstelle ein Router befindet, ist es kein Problem, wenn die Schicht-2-Protokolle links und rechts unterschiedlich sind. Die Frage ist aber, ob immer ein Router notwendig ist. Vielleicht würde ein Switch reichen.

Derzeit ist nicht erkennbar, ob neue Protokolle hilfreich wären. Da das Internet-Protokoll derzeit nicht angreifbar ist, bleibt die Schicht 2. Dadurch, dass die Router immer leistungs-

fähiger werden, reicht eine Schicht 2 die ihre Basisaufgaben gemäß OSI-Protokollmodell erfüllt: Sicherung des Links. Eine Adressierung in der Schicht 2 ist nicht notwendig. Ein entsprechendes Protokoll existiert: die *Generic Framing Procedure* (GFP). Ihre Verbreitung ist allerdings noch gering.

Da die höheren Protokollschichten allenfalls weitere Verzögerungszeiten zufügen, sind Aktivitäten an dieser Stelle nicht zielführend.

## 7.9 Was ist zu tun?

Wie oben gezeigt, sind viele Vorschläge schon in der Umsetzung. Allerdings ist das Beharrungsvermögen sehr stark, d.h. es geht sehr langsam und kann allenfalls durch massive Forderungen der Kunden beschleunigt werden.

Durch die niedrigen Tarife für den Internet-Zugang besteht bei den Netzbetreibern nicht unbedingt der Wille zu Investition ins Netz. Erst mit qualitätsabhängiger Tarifierung könnte sich das ändern. Dem steht aber die Tatsache entgegen, dass das Internet ein Konglomerat von Netzen ist und Qualität erst dann zur Verfügung gestellt werden kann, wenn alle Netze in einer Kommunikationsbeziehung diese Qualitätsdifferenzierung unterstützen.

Anders sieht es aus, wenn Dienste nur innerhalb des ISP angeboten und genutzt werden. Dann hat er Einfluss auf die Qualitätsbereitstellung. IPTV ist dafür ein prominentes Beispiel: die Fernsehversorgung bei IPTV kommt aus Servern im eigenen Netz des Netzbetreibers. Anders dagegen bei WebTV, wo die Server irgendwo auf der Welt stehen können und der Zugang über fremde Netze geht.

Und schließlich Intranets – diese unterliegen der Kontrolle einer einzigen Organisation und können daher einfach an die Anforderungen angepasst werden.

### 7.10 „TeraStream“ – ein Beispiel

Dass viele der vorgeschlagenen Änderungen auch bei den Netzbetreibern diskutiert werden zeigt die „TeraStream“-Aktivität der Deutschen Telekom [62, 63, 64]. Drei Bereiche werden adressiert:

- homogenes IP-Netz mit IPv6,
- Network Functions Virtualization (NFV),
- Software Defined Networking (SDN).

Während SDN und NFV hauptsächlich auf

die Flexibilität, die schnelle Anpassung an Marktgegebenheiten und Unabhängigkeit von der Hardware abzielen, konzentrieren sich die Themen beim IP-Netz auf die Vereinfachung des Netzes, die Integration von optischer- und IP-Schicht und die Einführung von IPv6. IPv4 und MPLS laufen dann als Service über IPv6.

Die Vereinfachung des Netzes besteht in der Reduktion der Anzahl der Netzelemente und der Reduktion der Hierarchiestufen. Nur noch zwei Router-Typen bilden das IP-Netz: Typ R1 sitzt am Netzrand und sammelt von der Aggregations-Ebene die Kunden ein, die per Kupferdoppelader (DSL), Glasfaser (FTTx, OLT) oder Mobilfunk an entsprechende Zugangsknoten angeschaltet sind. Jeder Typ-1-Router ist aus Redundanzgründen mit zwei

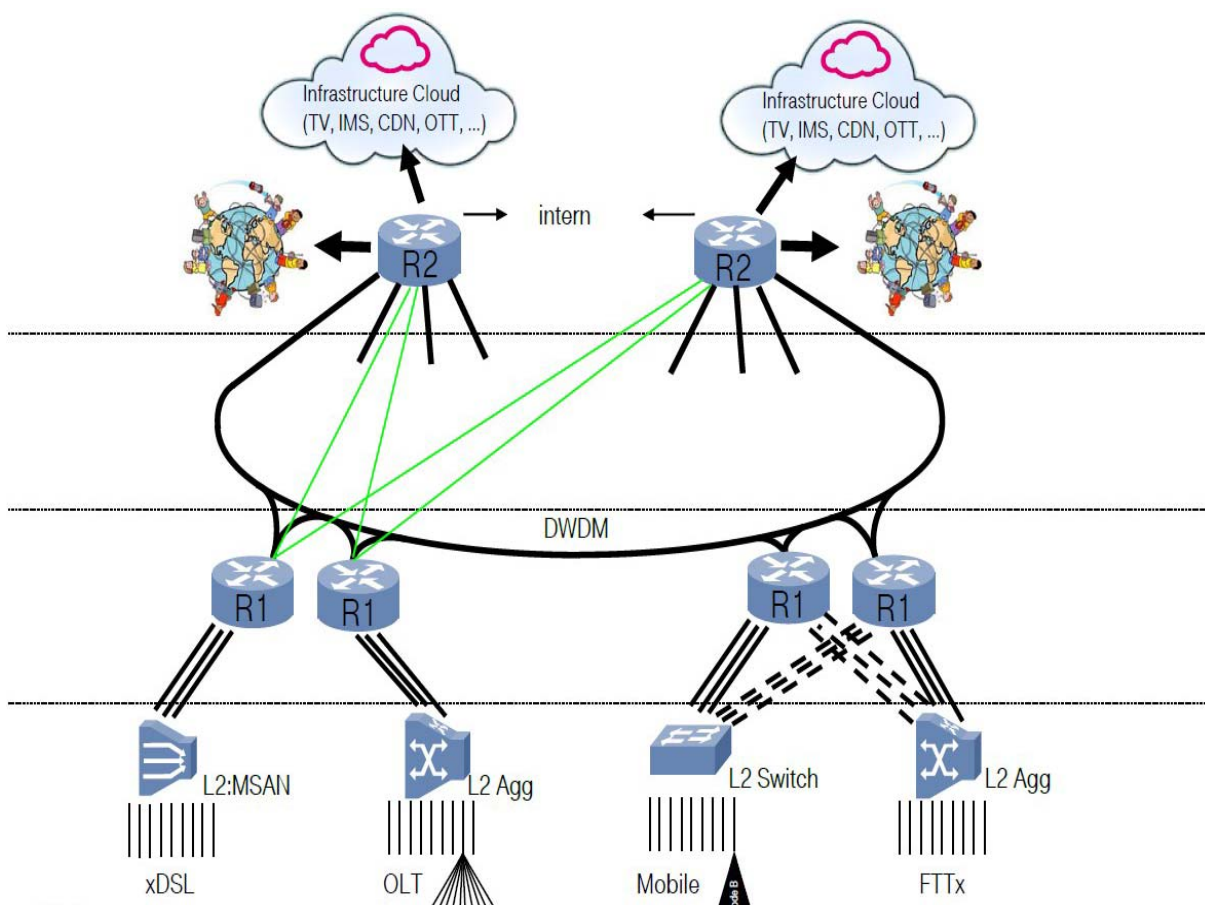


Abbildung 33: TeraStream im Überblick (Quelle: Deutsche Telekom [63])



Typ-2-Routern (R2) verbunden. Der Typ 2 ist der Router im Kernnetz. Alle Typ-2-Router sind vollvermascht, in Abbildung 33 als optischer Ring gezeichnet.

Hinter der Integration von optischer und IP-Schicht verbirgt sich der Abbau von Schichten und die Reduktion der Protokollvielfalt.

Die Einführung von nativem IPv6 als einzigem Netzwerkprotokoll und das Angebot, andere Protokolle darüber zu tunneln ist der Versuch die Protokollvielfalt einzudämmen.

Es finden sich also in der TeraStream-Architektur viele der in den vorstehenden Kapiteln genannten Maßnahmen wieder.

---

## 8 Ausblick

Es ist unbestritten, dass das Internet bzw. die Kommunikationsnetze auf Basis der Internet-Technologie in Zukunft dominieren werden. Die Leistungsfähigkeit wurde und wird auch weiterhin gesteigert werden. Galt dies in der Vergangenheit fast ausschließlich für die Übertragungsgeschwindigkeit, werden in Zukunft auch andere Parameter an Bedeutung gewinnen, wie z.B. Qualitätsunterscheidungen und die Zuverlässigkeit. Besonders zeitkritische Anwendungen werden kürzere Verzögerungszeiten im Netz fordern, wobei es eine offene Frage ist, inwieweit sich solche Anwendungen auf das Netz verlassen werden. Viele Funktionen werden lokal oder weiterhin über Spezialnetze abgewickelt werden. Trotzdem, das Thema Verzögerungszeit steht auf der Agenda und Lösungen sind gefragt.

Stellschrauben sind die Protokolle und die Netze, hier Netzstrukturen und Netzelemente. Die Parameter moderner IP-Transportnetze zeigen bereits gute Werte und weitere Verbesserungen werden graduell sein. Der Mobilfunk dagegen hat große Entwicklungen durchgemacht. LTE mit seiner flachen IP-Hierarchie erreicht inzwischen die Werte des Festnetzes. Im nächsten Entwicklungsschritt werden gezielt die Parameter in den Fokus genommen.

Aussagen zu Protokollen sind schwer zu treffen. IPv6 ist sicher nicht die letzte Version, bringt sie doch außer dem großen Adressbereich kaum wirklich bahnbrechende Neuerungen. Mit jeder weiteren Version wird sich das Interworking-Problem aber neu stellen.

Technologischer Fortschritt bringt die Netzelemente voran. Sie werden leistungsfähiger und reicher an Funktionalität. Das erlaubt es, die Topologie der Netze zu vereinfachen. Beides hilft, die Verzögerungszeiten zu senken. Dieser Netzbau ist im Gange, wie das Beispiel der Deutschen Telekom zeigt.

Auch die Standardisierung ist auf dem richtigen Weg, allerdings geht es dort vergleichsweise langsam voran. Zudem legt die Standardisierung keine Werte fest, sondern definiert Parameter und allenfalls Meßmethoden. Die Festlegungen z.B. von Netzarchitekturen und Mechanismen im Netz unterstützen aber das Ziel, hier zu guten Werten zu gelangen.

## 9 Anhang: Referenzen

- [1] [http://business.chip.de/news/Taktiler-Touchscreen-macht-Finger-zum-Gaspedal\\_44171280.html](http://business.chip.de/news/Taktiler-Touchscreen-macht-Finger-zum-Gaspedal_44171280.html) abgerufen am 10.5.2013
- [2] <http://www.elektor.de/elektronik-news/taktiler-touchscreen.2007594.lynkx> abgerufen am 10.5.2013
- [3] <http://winfuture.de/news,59853.html> abgerufen am 10.5.2013
- [4] <http://de.engadget.com/2013/01/08/hands-on-tixel-taktilen-pixeln-auf-der-morphenden-touchscreen-t/> abgerufen am 10.5.2013
- [5] [http://fazjob.net/ratgeber-und-service/beruf-und-chance/-ingenieure/122546\\_Uns-fehlt-die-Neugier-auf-neue-Technologien.html](http://fazjob.net/ratgeber-und-service/beruf-und-chance/-ingenieure/122546_Uns-fehlt-die-Neugier-auf-neue-Technologien.html) abgerufen am 10.5.2013
- [6] IKT 2020 Fakten – Trends – Positionen, VDE-Positionspapier, März 2010
- [7] Echtzeit-Internet – Sie wurden gefunden, Carsten Knop, Holger Schmidt, FAZ 12.12.2009; <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/netzwirtschaft/echtzeit-internet-sie-wurden-gefunden-1899645.html> abgerufen am 18.5.2013
- [8] Netz-Sozialisierung - Vom Überall-Netz ins Echtzeit-Internet, Sascha Lobo, c't 6/10; <http://www.heise.de/ct/artikel/Netz-Sozialisierung-939907.html>
- [9] <http://trendreport.betterplace-lab.org/trend/echtzeit>
- [10] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN V 19233: Leittechnik - Prozessautomatisierung - Automatisierung mit Prozessrechnersystemen, Begriffe
- [11] <http://www.digitalmusician.net> abgerufen am 8.7.2013
- [12] VST Connect SE als Zusatz zu CuBase Version 7 der Firma Steinberg; [http://www.steinberg.net/de/products/vst/vst\\_connect\\_se\\_performer.html](http://www.steinberg.net/de/products/vst/vst_connect_se_performer.html) abgerufen am 8.7.2013
- [13] High Frequency Trading und Marktimplikationen - Eine Einschätzung aus Notenbanksicht, Rede von Dr. Joachim Nagel Mitglied des Vorstands der Deutschen Bundesbank [http://www.bundesbank.de/Redaktion/DE/Reden/2012/2012\\_07\\_04\\_nagel\\_hft\\_und\\_martkimplikationen.html](http://www.bundesbank.de/Redaktion/DE/Reden/2012/2012_07_04_nagel_hft_und_martkimplikationen.html) abgerufen am 4.7.2013
- [14] Financial Information eXchange (FIX) Protocol; <http://www.fixprotocol.org/> abgerufen am 4.7.2013
- [15] <http://de.wikipedia.org/wiki/FIX-Protokoll> abgerufen am 4.7.2013
- [16] Machine-to-Machine communications (M2M) - M2M service requirements, ETSI TS 102 689 V2.1.1 (2013-07)
- [17] Der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik in Stromnetzen - ein Nachhaltiges Energieinformationsnetz, Harald Orlamünder, Stiftungsreihe 85, Alcatel-Lucent Stiftung für Kommunikationsforschung, 2009
- [18] [http://de.wikipedia.org/wiki/Cloud\\_Computing](http://de.wikipedia.org/wiki/Cloud_Computing) abgerufen am 23.7.2013
- [19] RFC 791: Internet Protocol – DARPA Internet Program – Protocol Specification; J. Postel; September 1981

- 
- [20] RFC 1349: Type of Service in the Internet Protocol Suite; P. Almquist; July 1992
- [21] R. Perlman: Interconnections - Bridges and Routers; Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1992; ISBN 0-201-56332-0
- [22] RFC 826: An Ethernet Address Resolution Protocol -- or -- Converting Network Protocol Addresses to 48.bit Ethernet Address for Transmission on Ethernet Hardware; D. Plummer, November 1982
- [23] RFC 2212: Specification of Guaranteed Quality of Service; S. Shenker, C. Partridge, R. Guerin; September 1997
- [24] RFC 2211: Specification of the Controlled-Load Network Element Service; J. Wroclawski; September 1997
- [25] RFC 2205, Resource ReSerVation Protocol (RSVP) -- Version 1 Functional Specification; R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, S. Jamin; September 1997
- [26] RFC 2475; An Architecture for Differentiated Services; S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, W. Weiss; December 1998
- [27] RFC 2474; An Architecture for Differentiated Services; S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, W. Weiss; December 1998
- [28] RFC 3031; Multiprotocol Label Switching Architecture; A. Viswanathan, R. Callon; January 2001
- [29] RFC 793: Transmission Control Protocol – DARPA Internet Program – Protocol Specification; J.Postel; September 1981
- [30] RFC 2581. TCP Congestion Control; M. Allman, V. Paxson, W. Stevens; April 1999
- [31] RFC 0768: User Datagram Protocol; J.Postel; 28 August 1980
- [32] RFC 2960: Stream Control Transmission Protocol; R. Stewart, Q. Xie, K. Morneault, H. Schwarzbauer, T. Taylor, I. Rytina, M. Kalla, L. Zhang, V. Paxson; October 2000
- [33] Eike Gutt; LTE – Long Term Evolution; Neue Dimension mobiler Breitbandnutzung - Eine technische Einführung; 7.10.2010, Neue Dimension mobiler Breitbandnutzung - Eine technische Einführung; <http://www.ltemobile.de/lte-technik/> abgerufen am 17.8.2013
- [34] Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS of connections from current technologies to LTE for delay sensitive applications; ETSI TR 103 122 V1.1.1 (2012-11)
- [35] ETSI TR 103 122: Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS of connections from current technologies to LTE for delay sensitive applications; V1.1.1; 2012-11
- [36] Ubitus und die Telekom stellen Cloud-Gaming Dienst über LTE vor; 11.09.2011; <http://www.ltemobile.de/news/newsdetails/ubitus-und-die-telekom-stellen-cloud-gaming-dienst-ueber-lte-vor/> abgerufen 17.8.2013
- [37] Datenübertragung im Mobilfunk; <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/-0910141.htm> abgerufen 13.8.2013
-

- [38] IEEE 802.11TM Wireless Local Area Networks:  
<http://www.ieee802.org/11/index.shtml>
- [39] Bluetooth vs Wifi  
[http://www.diffen.com/difference/Bluetooth\\_vs\\_Wifi](http://www.diffen.com/difference/Bluetooth_vs_Wifi) abgerufen am 31.8.2013
- [40] Webseiten der Bluetooth Special Interest Group:  
<https://www.bluetooth.org/>,  
<http://www.bluetooth.com>
- [41] Webseite des Near Field Communication Forum: <http://www.nfc-forum.org/home>
- [42] Webseite der ZigBee Alliance:  
<http://www.zigbee.org/>
- [43] Webseite der Universität Bremen zum M-Bus: <http://www.mbus.org/>
- [44] <http://de.wikipedia.org/wiki/Feldbus> abgerufen 15.5.2013
- [45] RFC 3550: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications; H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, V. Jacobson; July 2003
- [46] RFC 2326: Real Time Streaming Protocol (RTSP); H. Schulzrinne, A. Rao, R. Lanphier; April 1998
- [47] RFC 2616: Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.1; R. Fielding, J. Gettys, J. Mogul, H. Frystyk, L. Masinter, P. Leach, T. Berners-Lee; June 1999
- [48] Hypertext Transfer Protocol Version 2.0 (draft-ietf-httpbis-http2-04); M. Belshe, R. Peon, M. Thomson, A. Melnikov; July 8, 2013
- [49] <http://www.webrtc.org/> abgerufen am 23.7.2013
- [50] ITU-T Empfehlung Y.1540: SERIES Y: GLOBAL INFORMATION INFRASTRUCTURE, INTERNET PROTOCOL ASPECTS AND NEXT-GENERATION NETWORKS; Internet protocol aspects – Quality of service and network performance; Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance Parameters (3/2011)
- [51] ITU-T Empfehlung Y.1541: SERIES Y: GLOBAL INFORMATION INFRASTRUCTURE, INTERNET PROTOCOL ASPECTS AND NEXT-GENERATION NETWORKS; Internet protocol aspects – Quality of service and network performance; Network performance objectives for IP-based services (13/2011)
- [52] ITU-T-Empfehlung G.114: SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS – International telephone connections and circuits – General Recommendations on the transmission quality for an entire international telephone connection – One-way transmission time (05/2003)
- [53] Draft ETSI TS 102 921: mla, dla and mld Interfaces; V2.0.10; 12013-07
- [54] Draft ETSI TS 102 690: Functional Architecture; V2.0.14; 2013-07
- [55] ETSI RTS 102 689: M2M Service Requirements; V2.1.1; 2013-07
- [56] <http://www.onem2m.org/> abgerufen am 9.8.2013
- [57] RFC 2330: V. Paxson, G. Almes, J. Mahdavi, M. Mathis: Framework for IP Performance Metrics; May 1998
- [58] RFC 2679: G. Almes, S. Kalidindi, M. Zekauskas: A One-way Delay Metric for IPPM; September 1999

- 
- [59] RFC 3393: C. Demichelis P. Chimento: IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM); November 2002
- [60] RFC 5481: A. Morton: Packet Delay Variation Applicability Statement; March 2009
- [61] Network Functions Virtualisation – An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges & Call for Action; Introductory White Paper;  
[http://portal.etsi.org/NFV/NFV\\_White\\_Paper.pdf](http://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf)
- [62] Deutsche Telekom tests TeraStream, the network of the future, in Croatia; <http://www.telekom.com/media/company/168008> (10.12.2012)
- [63] Axel Clauberg, Vice President CTO-ATI, IP Architecture, Transport & Aggregation, Deutsche Telekom AG: IPv6 Deployment in Germany and Croatia (23.1.2013)
- [64] DTAG testet vereinfachtes IP-Netz; IP-Insider; 4.3.2013; <http://www.ip-insider.de/specials/carrier-provider/standards/articles/396508/>

**10 Anhang: Abkürzungen**

AAL	Ambient Assisted Living	GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	GPRS	General Packet Radio Service
APE	Abgesetzten Peripheren Einheit	GSM	Global System for Mobile Communication
ARP	Address Resolution Protocol	HFC	Hybrid Fiber Coax
ASIC	Application-specific Integrated Circuit	HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
ATM	Asynchroner Transfer Mode	HSPA	High Speed Packet Access
CAD	Computer Aided Design	HTTP	Hypertext Transfer Protokoll
CIX	Commercial Internet Exchange	IETF	Internet Engineering Task Force
CM	Cable Modem	IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
CMTS	Cable Modem Termination System	INTSERV	Integrated Services
CPU	Central Processing Unit	IP	Internet Protocol
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access / Collision Detect	IPPM	IP Performance Metrics
DIFFSERV	Differentiated Services	IPTD	IP Packet Transfer Delay
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.	IPTV	Television via Internet Protocol
DSL	Digital Subscriber Line	ISDN	Integrated Services Digital Network
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution	ISP	Internet Service Provider
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	ITU	International Telecommunication Union
FCS	Frame Check Sequence	LAN	Local Area Network
FEC	Forward Equivalent Class	LDP	Label Distribution Protocol
FEC	Forward Error Correction	LLC	Logical Link Control
FIX	Financial Information eXchange	LLQ	Low Latency Queuing
FPGA	Field Programmable Gate Arrays	LTE	Long Term Evolution
FQ	Fair Queuing	M2M	Machine-to-Machine-Kommunikation
FR	Frame Relay	MAC	Medium Access Control
FTTB	Fiber to the Building	Mae	Metropolitan Area Exchange
FTTC	Fiber to the Curb	MAN	Metropolitan Area Network
FTTH	Fiber to the Home	MIDI	Musikinstrumente Digital Interface
GFP	Generic Framing Procedure	MIMO	Multiple Input – Multiple Output
		MPLS	Multi-Protocol Label Switching
		MTU	Maximum Transmission Unit

---

NAS	Network Access Server	SDLS	Symmetric Digital Subscriber Line
NFV	Network Function Virtualization	SDN	Software Defined Networking
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	SLA	Service Level Agreement
OTH	Optical Transport Hierarchy	SLS	Service Level Specification
PAD	Padding	SMS	Short Message Service
PC	Personal Computer	SNAP	Subnetwork Access Protocol
PCM	Pulse Code Modulation	TCP	Transmission Control Protocol
PHB	Per-Hop Behaviour	TTI	Transmission Time Interval
PLC	Powerline Communication	TTL	Time to Live
PON	Passive Optical Network	UDP	User Datagram Protocol
PPP	Point-to-Point-Protocol	UMTS	Universal Mobile Telecommunication Service
PPPoE	Point-to-Point-Protocol over Ethernet	USB	Universal Serial Bus
PSK	Phase Shift Keying	VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
QAM	Quadraturamplitudenmodulation	VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
QoS	Quality of Service	VoIP	Voice over IP
RSVP	Resource Reservation Protocol	WebRTC	Web Real Time Communication
RTCP	Real Time Control Protocol	WFQ	Weighted Fair Queuing
RTP	Realtime Transport Protocol	WLAN	Wireless Local Area Network
RTSP	Realtime Streaming Protocol	WLL	Wireless Local Loop
SCTP	Stream Control Transmission Protocol	WWW	World Wide Web
SDH	Synchronous Digital Hierarchy		



**Autor**

Harald Orlamünder, Jahrgang 1952, Studium der Nachrichtentechnik an der Universität Stuttgart, 1979 Abschluss als Diplomingenieur.

Übernahme von Aufgaben im Bereich neuer Mikrorechner und Multiprozessorsysteme im Forschungszentrum der damaligen Standard Elektrik Lorenz AG.

Ab 1985 im Bereich Netzstrategie und Standardisierung Beschäftigung mit Fragen der Breitband-Netzgestaltung, -Netzevolution und -Netzübergängen.

Ab 1987 aktiver Teilnehmer an der internationalen Standardisierung bei ITU und ETSI.

Ab 2003 im Bereich „Zentrale Unternehmensentwicklung“ Untersuchung von Themengebieten jenseits der reinen Telekommunikation auf Markt und Umsetzbarkeit.

Ab 2009: Selbständiger Berater für Informations- und Kommunikationstechnik und Lehrbeauftragter an der Hochschule Pforzheim und der Hochschule der Medien, Stuttgart.

Autor zahlreicher Veröffentlichungen und Bücher, z.B. 2000: „High Speed Netze“, Hüthig-Verlag; 2000, 2001 und 2002: Beiträge in den Jahrbüchern Telekommunikation und Gesellschaft; 2005: „Paket-basierte Kommunikationsprotokolle“, Hüthig-Telekommunikation.

Mitglied in VDE/ITG und IEEE/Comsoc, Mitglied im ITG-Fachausschuss „Kommunikationsnetze“, sowie Mitarbeit in der DKE in Fragen des IKT-Einsatzes in der Energieversorgung.





Alcatel-Lucent  
Stiftung für  
Kommunikations-  
forschung

## **Alcatel-Lucent Stiftung**

Die Alcatel-Lucent Stiftung für Kommunikationsforschung ist eine gemeinnützige Förderstiftung für Wissenschaft insbesondere auf allen Themengebieten einer „Informationsgesellschaft“, neben allen Aspekten der neuen breitbandigen Medien speziell der Mensch-Technik-Interaktion, des E-Government, dem Medien- und Informationsrecht, dem Datenschutz, der Datensicherheit, der Sicherheitskommunikation sowie der Mobilitätskommunikation. Alle mitwirkenden Disziplinen sind angesprochen, von Naturwissenschaft und Technik über die Ökonomie bis hin zur Technikphilosophie.

Die Stiftung vergibt jährlich den interdisziplinären „Forschungspreis Technische Kommunikation“, Dissertationsauszeichnungen für WirtschaftswissenschaftlerInnen sowie Sonderauszeichnungen für herausragende wissenschaftliche Leistungen.

Die 1979 eingerichtete gemeinnützige Stiftung unterstützt mit Veranstaltungen, Publikationen und Expertisen ein eng mit der Praxis verbundenes pluridisziplinäres wissenschaftliches Netzwerk, in dem wichtige Fragestellungen der Informations- und Wissensgesellschaft frühzeitig aufgenommen und behandelt werden.

*[www.stiftungaktuell.de](http://www.stiftungaktuell.de)*

### **Kontakt**

Alcatel-Lucent Stiftung  
Lorenzstraße 10, 70435 Stuttgart  
Telefon 0711-821-45002  
Telefax 0711-821-42253  
E-Mail [office@stiftungaktuell.de](mailto:office@stiftungaktuell.de)  
URL: <http://www.stiftungaktuell.de>