

## White Paper



Foto: Alexander Turnbull Library, Wellington, New Zealand.

## Evolution der Breitbandtechnologie Teil 2: xDSL-Technologie



Convincing cabling solutions

## Technologie für eine Breitbandzukunft – Teil 2: xDSL-Technologie

### Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	3
2. Eigenschaften einer typischen (praxisnahen) TTP-Verbindung .....	3
3. Beeinträchtigungen einer analogen TTP-Verbindung für digitale Signale.....	4
4. Von der analogen zur digitalen Kommunikation .....	6
4.1. Digitale Protokolle – Übersicht.....	7
5. Mehrträgersysteme – Discrete Multi-Tone (DMT).....	10
6. ADSL als Beispiel für die DMT-Technologie.....	11
6.1. Praktische Überlegungen – Fehlerkontrolle.....	13
6.2. Vorwärtsfehlerkorrektur (FEC) .....	13
7. Very-High-Bit-Rate DSL (VDSL) .....	15
8. Schlussfolgerung.....	16

© Copyright 2008 Reichle & De-Massari AG (R&M). Alle Rechte vorbehalten.

Weitergabe und Vervielfältigung dieser Publikation oder von Teilen daraus sind, zu welchem Zweck und in welcher Form auch immer, ohne die ausdrückliche schriftliche Genehmigung durch Reichle & De Massari AG nicht gestattet. In dieser Publikation enthaltene Informationen können ohne vorherige Ankündigung geändert werden. Die Erstellung dieses Dokuments erfolgte mit größtmöglicher Sorgfalt; es enthält den zum Zeitpunkt der Erstellung aktuellen technischen Stand. Technische Änderungen vorbehalten.

Titelbild mit freundlicher Genehmigung der Alexander Turnbull Library, Wellington, Neuseeland. Eine Weiterverwendung dieses Bildes ist nur mit vorheriger Erlaubnis der Alexander Turnbull Library, Wellington, Neuseeland, gestattet.

## 1. Einführung

Ein vorangegangenes White Paper („Technologie für eine Breitbandzukunft – Teil 1“) gab einen allgemeinen Überblick über die Technologien und möglichen Anwendungen für Highspeed-Breitbandverbindungen zum Endnutzer. Die eingesetzten Technologien (DSL und PON) haben sich in den letzten zwanzig Jahren sehr schnell entwickelt und sind für viele Menschen schwer verständlich. In diesem

Dokument werden die allgemeinen Grundlagen der DSL-Technologien sowie die grundlegenden Innovationen, die deren effektiven Einsatz ermöglichen, erläutert. Die PON-Technologie (Passive Optical Network) wird in einem späteren White Paper behandelt.

Anwendung:	Public Networks
Format:	White Paper
Thema:	Technologie für eine Breitbandzukunft, TTP, DMT, xDSL, ADSL
Zielgruppe:	Entscheidungsträger, Planer
Autor:	Patrick Gaehwiler
Erschienen:	November 2008

## 2. Eigenschaften einer typischen (praxisnahen) TTP-Verbindung

Mit 750 Millionen Installationen weltweit ist das auf der Teilnehmerleitung basierende Telefonsystem die am häufigsten genutzte Kommunikationsumgebung der Welt. Die Leitung besteht aus einem Paar dünner Kupferadern, die ineinander verdreht und durch Papier oder Kunststoff isoliert sind (wird als Telephone-Twisted-Pair oder TTP bezeichnet). In einer TTP-Umgebung bestehen sternförmig von einem Endverzweiger (Vermittlungsstelle oder Telefonzentrale) ausgehende Verbindungen zu jedem einzelnen Teilnehmer.

Im dargestellten Fall führt ein Kabel mit 600 Adernpaaren zu einem Verteilerkasten an (oder unter) der Straße. In diesem Kasten können einzelne Paare aus dem Kabel separiert und zu einzelnen Gebäude weitergeführt werden; die meisten Paare werden jedoch zu anderen Kabeln mit weniger Paaren (z. B. 100) durchgeschaltet. Das Kabel mit 100 Paaren endet seinerseits ebenfalls in einem Verteilerkasten, in dem die einzelnen Paare mit Kabeln mit noch weniger Paaren (z. B. 20) verbunden werden, die dann zu einem weiteren Verteilerkasten führen. Am Ende haben wir pro Teilnehmer (TLN) ein einzelnes (verdrehtes) Paar.

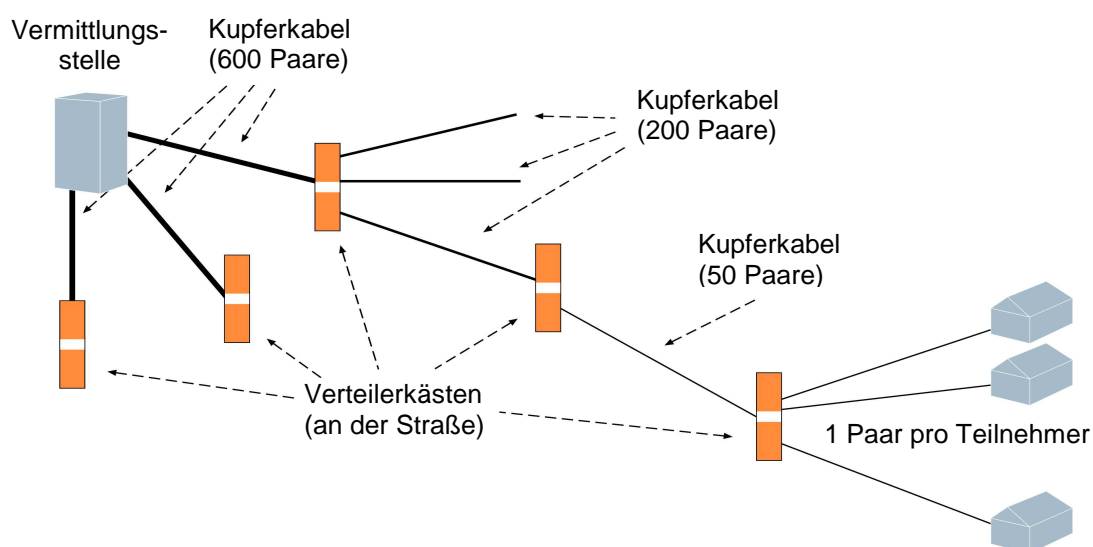


Abb. 1: Aufbau eines herkömmlichen Telefonzugangsnetzes

### 3. Beeinträchtigungen einer analogen TTP-Verbindung für digitale Signale

Wenn digitale Breitbandsignale über eine Teilnehmerleitung übertragen werden, bedeutet dies, dass ein Medium für einen Zweck verwendet wird, von dem seine ursprünglichen Entwickler nicht einmal geträumt haben. Viele Eigenschaften der Verbindungsleitung führen zu Beeinträchtigungen bei Übertragungen mit großer Bandbreite, aber nicht beim analogen Telefonieren.

1. **Dämpfung** verstärkt sich dramatisch in dem Maße, wie sich die Frequenz erhöht.
2. **Leistungsverbesserung (Pupinspulen).** In existierenden Netzen – bei Entfernungen von mehr als 5 km (und dickerem Kabel) – werden im Kabel Pupinspulen eingesetzt, um einen Teil der Verzerrung auszugleichen. Zwar sind solche Spulen eher in Geschichtsbüchern als in realen Netzen zu finden, aber falls tatsächlich vorhanden, müssen sie für *jede* Art von digitaler Übertragung entfernt werden.
3. **Unterschiedliche Drahtstärke.** In realen Netzen sind unterschiedliche Drahtstärken selten, verursachen aber dennoch eine Änderung der Impedanz. Ist dies der Fall, kann es dazu führen, dass gesendete Signale zum Sender zurück reflektiert werden.
4. **Rauschen.** Rauschen kann durch Kopplungseffekte mit anderen Paaren im selben Kabel und/oder durch andere Quellen in der Umgebung (z. B. Funksender) entstehen. Es ist zu beachten, dass einige Paare in einem dicken, mehrpaarigen Kabel durch Rauschen stark betroffen sein können, während andere Paare im selben Kabel nur wenig oder gar nicht beeinträchtigt werden.
5. **Nebensprechen (NEXT und FEXT).** Die Kopplung des Senders eines Geräts mit dem geräteeigenen Empfänger wird als Nahnebensprechen (Near-End CrossTalk oder NEXT) bezeichnet. Die Kopplung am Empfänger (ein Signal erreicht ein Empfangsgerät und wird zurück zum Sender gekoppelt) wird als Fernnebensprechen (Far-End CrossTalk oder FEXT) bezeichnet.
6. **Nebensprechen (zwischen Paaren).** Für eine unerwünschte Kopplung zwischen Paaren im selben Kabel kann es viele Ursachen geben. Wenn beispielsweise von einer herkömmlichen Telefonverbindung in einem Kabel die (veraltete) Impulswahl verwendet wird, kann dies ein Impulsgeräusch auf anderen Paaren im Kabel verursachen. Anfangs wurde angenommen, dass das Nebensprechen ein signifikantes Problem für moderne digitale Protokolle darstellen kann, wenn diese Protokolle von einer großen Zahl der Adernpaare in einem Kabel verwendet werden. In der Praxis hat sich gezeigt, dass dies bei einigen alten Kabeltypen der Fall ist (vor allem bei Kabeln mit Papierisolierung), aber bei Verwendung moderner Kabel keine große Rolle spielt.

7. **Parallel geschaltete Paare.** Im folgenden Diagramm wurde über ein einzelnes Paar in einem Kabel mit 600 Paaren eine Verbindung zum Haus mit dem Buchstaben A bereitgestellt. Später wurde die Telefonverbindung sowohl im Verteilerkasten, der dem Haus am nächsten liegt, als auch in der Vermittlungsstelle getrennt. Danach wird vom Verteilerkasten bei Buchstabe C eine Verbindung mit einem neuen Teilnehmer (bei Buchstabe B) aufgebaut. Dabei ist zu beachten, dass der Techniker *nicht* die ursprüngliche Leitung trennt, über die der Teilnehmer bei Buchstabe A verbunden ist! Das heißt, das Paar wird an einem der Verteiler „gesplittet“ (in eine Y-Konfiguration). Ein nicht abgeschlossenes Twisted-Pair-Kabel wurde an die Leitung angeschlossen. Dies ist für die analoge Sprachübertragung ohne Bedeutung, kann aber für DSL ein ernstes Problem darstellen.

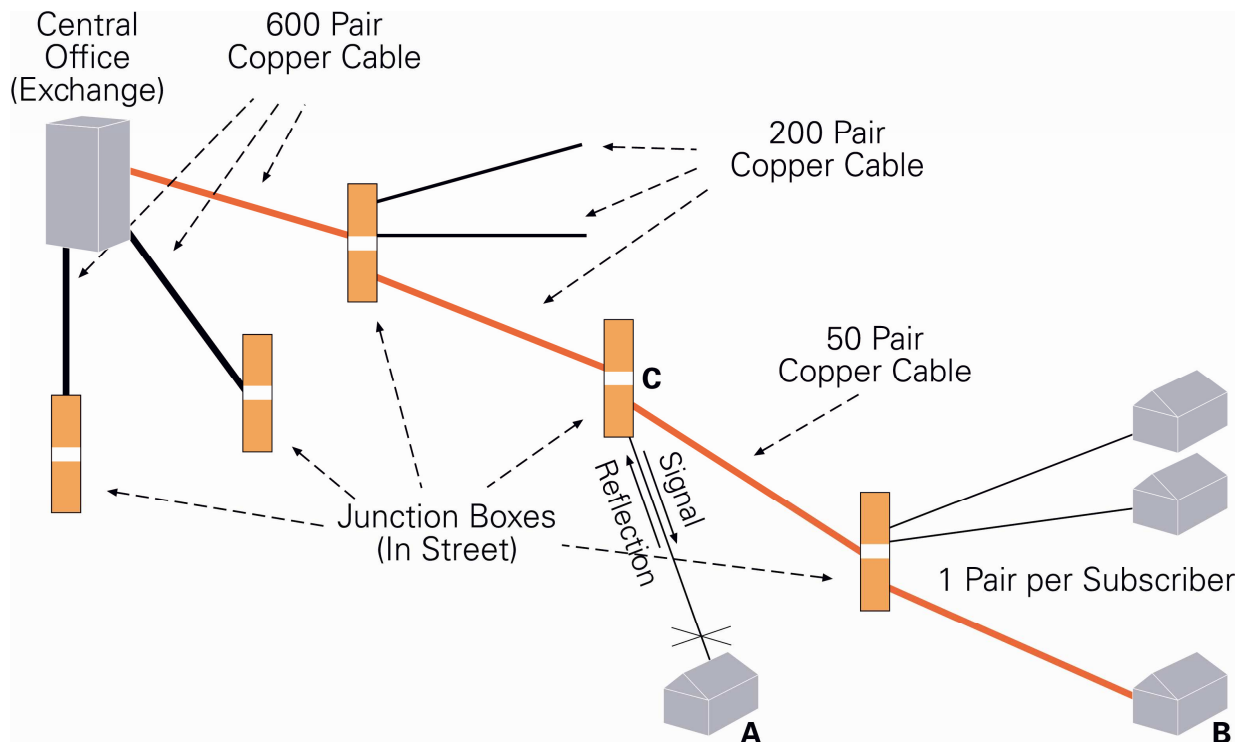


Abb. 2: Prinzip parallel geschalteter Paare

Wenn nun das Downstream-Signal am Verteiler (Buchstabe C) ankommt, wird es in beide Richtungen weitergeleitet. Sobald das Signal das nicht abgeschlossene Ende des Kabels (Haus A) erreicht, wird es zum Sender reflektiert. Dadurch wird am Sender eine Reflexion empfangen. Die Reflexion erreicht aber auch Haus B, wo sie lediglich als eine (sehr schwache) verzögerte Kopie des ursprünglichen Signals ankommt. Da es sich um eine Zweidrahtleitung mit Datenverkehr in beiden Richtungen handelt, erzeugt das parallel geschaltete Paar ein Rauschen für die Empfänger an beiden Enden der Leitung. In einigen öffentlichen Netzen gibt es in gut 30% aller Teilnehmerverbindungen mindestens ein parallel geschaltetes Leitungspaar, in vielen sogar zwei oder drei. Parallel geschaltete Leitungspaare können ein ernstes Problem darstellen – sie sind schwer zu finden und können nur durch den kostspieligen Einsatz eines Technikers beseitigt werden.

8. Während sich die meisten der oben genannten Beeinträchtigungen auf Übertragungen mit hohen Frequenzen auswirken, haben sie nur geringe oder gar keine Auswirkungen auf die herkömmliche analoge Sprachübertragung (obwohl es auch Fehlerbedingungen auf schlechten Verbindungen gibt, die zwar herkömmliche Sprachübertragungen ernsthaft beeinträchtigen oder sogar verhindern, ADSL-Verbindungen überraschenderweise aber nicht beeinträchtigen!).

## 4. Von der analogen zur digitalen Kommunikation

Die digitale Kommunikation über Kupferdrähte über große Entfernungen hinweg wurde bereits viele Jahre vor Einführung des Telefons praktiziert. Sowohl das Telegrafie- als auch das Telexsystem verwenden eine einfache Form der digitalen Codierung.

Am Ende der 1950er Jahre, als es erforderlich wurde, Terminals mit einem fernen Mainframe-Computer zu verbinden, wurden bestehende Telegrafiesysteme und -codes an den neuen Zweck angepasst. Da das Telefonnetz einen fast universellen Zugang bot, wurden diese Systeme über Standardtelefonleitungen betrieben. An dieser Stelle muss hervorgehoben werden, dass bei diesen Systemen sowohl für den Anschluss des Teilnehmers am Ende der Leitung als auch für Verbindungen zwischen Vermittlungsstellen eine Telefonverkabelung verwendet wurde. Diese Verkabelung umging die Telefonvermittlungsstelle, da die Vermittlungsstellentechnik die Telegrafieprotokolle nicht hätte verarbeiten können (was normalerweise ohnehin nicht erforderlich war).

Diese frühen Systeme arbeiteten in der Regel mit sehr niedrigen Datenübertragungsraten (normalerweise zwischen 100 und 150 Bit/s) und verwendeten eine sehr einfache Ein/Aus-Zeichengabe bei (nach heutigen Standards) hohen Spannungen (60-80 Volt). Trotzdem wurden diese Systeme häufig über Entfernungen von bis zu 30 km betrieben! Sie wurden in erster Linie vom Militär sowie von Luftfahrtgesellschaften und Geldinstituten genutzt.

In den 1960er Jahren ging die Computerentwicklung sehr schnell voran, verbunden mit dramatisch steigenden Anforderungen nach höheren Geschwindigkeiten und niedrigeren Kosten. Die oben beschriebenen Systeme der ersten Generation verwendeten von Endpunkt zu Endpunkt ein festgeschaltetes Kupferadernpaar. Zu dieser Zeit ersetzten die meisten Netzbetreiber die mehrpaarigen Kabel, die Vermittlungsstellen miteinander verbanden, durch Multiplexsysteme.

In den neuen Systemen wurden zwischen den Vermittlungsstellen Sprachkanäle in Funkfrequenzen umgewandelt und im Multiplexbetrieb auf Koaxialkabel übertragen. Dies hatte zur Folge, dass die Netzbetreiber nicht mehr die technischen Möglichkeit besaßen, festgeschaltete Kupferaderleitungen von Endpunkt zu Endpunkt bereitzustellen. Hinzu kam, dass die Möglichkeit zur Nutzung einer Wählverbindung immer attraktiver wurde.

Zur gleichen Zeit kamen die ersten MODEMs (MODulator-DEModulator-Geräte) auf den Markt, die das einfache digitale Ein/Aus-Signal in Audiotöne umwandelten, die über einen Standardtelefonkanal übertragen werden konnten. Ein Standardtelefonkanal verfügt über eine (nominale) analoge Bandbreite von 4 kHz. Modems wurden mit der Zeit immer intelligenter und konnten immer höhere Geschwindigkeiten verarbeiten (bis zu 56 KBit/s). Dies ermöglichte eine deutlich höhere Leistung bei drastisch reduzierten Kosten.

Die Begrenzung der analogen Bandbreite auf 4 kHz war nie durch die Eigenschaften der Verbindungen mit Kupferleitungen bedingt. Sie wurde zunächst durch die Eigenschaften von Fernverbindungsmultiplexern und später durch die Tatsache verursacht, dass ein Sprachkanal (innerhalb der Vermittlungsanlage) immer als digitales Signal transportiert wurde.

In den frühen 1970er Jahren begannen die Netzbetreiber, digitale Techniken für die Schaltvorgänge in Vermittlungsanlagen einzusetzen. Schon kurze Zeit später ersetzten sie die ersten analogen Fernvermittlungsmultiplexer durch digitale Schaltkreise. Dies führte dazu, dass die Telefonnetze intern digital arbeiteten, aber zu den Teilnehmern analoge Verbindungen bestanden. Es war offensichtlich, dass sich durch den Ausbau von vollständig digitalen Verbindungen zu den Teilnehmern ein erheblich besseres System bereitstellen ließe (in Unternehmen waren PABX-Anlagen mit vollständig digitalen Verbindungen zu den einzelnen Telefonen bereits verfügbar).

ISDN (Integrated Services Digital Network) wurde in den frühen 1980er Jahren standardisiert, um einen digitalen Zugang zu den Telefonteilnehmern zu ermöglichen. Der ISDN-Basisanschluss (b\_ISDN) verwendet eine relativ einfache Form der digitalen Zeichengabe, ist jedoch in der Lage, zwei digitale Sprachkanäle mit



64 Kbit/s und einen Daten-/Zeichenkanal mit 16 Kbit/s auf der standardmäßigen Twisted-Pair-Telefonleitung für Entfernungen von bis zu 5 km bereitzustellen (beim Einsatz von Verstärkern sogar bis zu 20 km).

Am Ende der 1980er Jahre hatten die Netzbetreiber ein Problem mit den Standleitungen T1 (1,544 Mbit/s) und E1 (2 Mbit/s). Diese wurden für Verbindungen zu Standorten mit relativ wenigen (24 oder 30) Telefonleitungen verwendet. Die damalige Technologie nutzte zu diesem Zweck Vierdrahtverbindungen und erforderte ungefähr alle 1,5 km den Einsatz eines Verstärkers.

Es wurden Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten aufgenommen mit dem Ziel, den Abstand (zwischen Verstärkern) zu vergrößern und, wenn möglich, ein einziges Adernpaar anstelle von zwei zu verwenden. Das Ergebnis war High-Bit-Rate Digital Subscriber Line (HDSL). Den HDSL-Architekten fiel es nicht schwer, die erforderliche Übertragungsgeschwindigkeit von 2 Mbit/s zu erreichen, der Zweidraht-Vollduplexbetrieb erwies sich aber zunächst als problematischer. Sie erkannten jedoch, dass die Technologie auch höhere Geschwindigkeiten bewältigen konnte, wenn die Übertragung vorrangig in einer Richtung verlief.

Um 1990 boten Kabelfernsehbetreiber in den USA erstmals Telefonverbindungen über ihre Kabelnetze an. Als Antwort darauf suchten die Telefonnetzbetreiber nach Möglichkeiten, Fernsehprogramme über ihre Telefonverkabelung anzubieten. Dies gab den Anstoß zur Entwicklung der ADSL-Technologie (Asymmetric Digital Subscriber Line), da die Fernsehübertragung vorwiegend unidirektional verläuft.

Neue Komprimierungsverfahren ermöglichten den Transport von einem und in einigen Fällen auch zwei Fernsehsignalen in Broadcast-Qualität innerhalb der maximalen ADSL-Geschwindigkeit von 6 Mbit/s. ADSL erfüllte also die Anforderung sehr gut. Es wurden zwar einige Versuche unternommen, aber man glaubte nicht daran, dass ADSL jemals eine wirklich bedeutende Rolle in diesem Bereich spielen würde.

Mitte der 1990er Jahre hatte der Internet-Boom eingesetzt, und der Bedarf von Endbenutzern nach Verbindungen mit immer höheren Geschwindigkeiten stieg. ADSL war dafür hervorragend geeignet, denn der meiste Datenverkehr im Internet verläuft vom Server (Netz) zu den Endbenutzern. Als dann noch höhere Geschwindigkeiten gefordert wurden, wurde mit VDSL ein anderes, sehr einfaches Protokoll entwickelt. Mit VDSL können deutlich höhere Geschwindigkeiten als mit ADSL erreicht werden, allerdings über kürzere Entfernungen.

Im Jahre 2008 wird das Internet von vielen Menschen als wesentlicher Faktor für die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung angesehen, wobei Bewegtbildvideo in Echtzeit nur eine der Anwendungen ist. Viele Menschen verlangen schnelle Übertragungszeiten bei großen Dateien, und daneben gibt es immer noch das herkömmliche Telefon. Deshalb ist davon auszugehen, dass noch höhere Geschwindigkeiten nötig sein werden.

## **4.1. Digitale Protokolle – Übersicht**

Es gab Vorschläge für Dutzende von digitalen Protokollen, und viele davon wurden standardisiert. Jedes Protokoll besitzt seine eigenen einzigartigen Eigenschaften. Im Folgenden werden die wichtigsten Protokolle kurz beschrieben:

### ***Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)***

ADSL wurde in erster Linie für Breitbandverbindungen zu Wohnhäusern entworfen. Das Protokoll ist asymmetrisch, d. h., die Kanalgeschwindigkeit in der einen Richtung (downstream) ist deutlich höher als die Geschwindigkeit in der anderen Richtung. Ursprünglich sollte das Protokoll eine Video-on-Demand-Anwendung unterstützen, aber es erfüllt auch die Anforderungen, die bei der Internetnutzung an die Datenrate gestellt werden. Die in der Norm festgelegten maximalen Datenraten sind 6 Mbit/s downstream und 640 Kbit/s upstream. Die Norm bietet Geräteherstellern jedoch einen gewissen Spielraum, auch höhere Übertragungsgeschwindigkeiten anzubieten. Geschwindigkeiten von bis zu 8 Mbit/s downstream und 760

Kbit/s upstream sind angekündigt. Die tatsächlich erreichbare Datenrate kann abhängig von der Entfernung und Leitungsqualität unter der maximal möglichen Rate liegen. Bei größeren Entfernungen ist die maximale Datenrate deutlich niedriger. Unter Umständen (vor allem in ländlichen Gebieten) ist das verfügbare Kabel dicker als in der Norm angegeben. In diesem Fall kann die mögliche Entfernung über die in der Norm empfohlene Entfernung hinausgehen. Die einem Kunden tatsächlich zur Verfügung stehende Datenrate kann auch aufgrund der Art der Bereitstellung des Dienstes unter der maximalen Geschwindigkeit liegen. Beispielsweise kann ein Service-Provider Dienste mit 1,5 Mbit/s, 3 Mbit/s und 6 Mbit/s zu unterschiedlichen Preisen anbieten.

***ADSL-Lite (auch G.lite)***

Ein Kostenproblem von ADSL besteht darin, dass es die Nutzung von analogen Telefonen und Breitbanddaten auf derselben Leitung unterstützt. In Wohnhäusern mit mehreren Telefonanschlüssen bedeutet dies, dass am Eintrittspunkt des Wohnhauses ein (passiver) Splitter vorhanden sein muss, der Sprach- und Datensignale voneinander trennt. Damit ist eine neue Verkabelung erforderlich. Das Problem ist, dass der Splitter und die neuen Kabel durch einen Techniker installiert werden müssen – was erhebliche Zusatzkosten verursacht.

Das ADSL-lite-Protokoll bietet die Möglichkeit, einfache verteilte Filter direkt an die Geräte des Teilnehmers (z. B. das Telefon und das Modem) anzuschließen. In bestimmten Situationen werden keine Filter benötigt. Dadurch entfällt die Notwendigkeit, dass ein Techniker die Installation durchführt (was die Kosten senkt). Dies hat jedoch sehr starke Auswirkungen auf die maximale Datenrate. Die definierten Maximalgeschwindigkeiten betragen 1,5 Mbit/s downstream und 512 Kbit/s upstream.

***High-Bit-Rate Digital Subscriber Line (HDSL)***

Standard-HDSL basiert auf einer anderen Technologie als ADSL. Es bietet jedoch 1,5 Mbit/s oder 2 Mbit/s in beiden Richtungen auf zwei (oder drei) Adernpaaren! In gewisser Weise kann HDSL als kostengünstiger Ersatz für die Leitung T1 (1,544 Mbit/s) in den USA bzw. die Leitung E1 (2 Mbit/s) im Rest der Welt betrachtet werden. Je nach Leitungsqualität kann HDSL Entfernungen von bis zu 6 km überbrücken, was eine deutliche Verbesserung gegenüber der alten T1/E1-Technologie darstellt, bei der alle 1,5 km ein Verstärker erforderlich war.

HDSL kann von kleinen Unternehmen für herkömmliche Anwendungen, z. B. PBX-Verbindungen und herkömmliche Datenübertragungen, genutzt werden. Außerdem ist es besser als ADSL für kleine Websites geeignet, da es eine deutlich höhere Upstream-Datenrate bietet.

***SHDSL***

SHDSL ist eine aktuelle Weiterentwicklung von HDSL unter Verwendung der DMT<sup>1</sup>-Technologie, derselben Technologie wie bei ADSL. Es bietet dieselben Eigenschaften wie HDSL, außer dass nur ein Adernpaar genutzt wird. SHDSL ist in der ITU-Norm G.991.2 beschrieben.

***Symmetric Digital Subscriber Line (SDSL)***

SDSL ist ein Protokoll, das HDSL sehr ähnlich ist. SDSL arbeitet bidirektional mit 784 Kbit/s in einem einzelnen Twisted-Pair-Kupferkabel (TTP). Als Übertragungsprotokoll dient das relativ einfache 2B1Q-Protokoll. Dank seiner Einfachheit ist es relativ kostengünstig. Es bietet eine symmetrische Vollduplex-Verbindung in einem „freien Kanal“ bei Benutzerdatenraten von bis zu 768 Kbit/s und Entfernungen von bis zu 6 km. Natürlich sind auch diese Werte von der Leitungsqualität abhängig.

---

<sup>1</sup> Informationen zu DMT finden Sie in Abschnitt 5.



### ***ISDN Digital Subscriber Line (IDSL)***

IDSL ist in seiner Struktur mit SDSL vergleichbar, verwendet aber Standardchipsätze und die Standardinfrastruktur von ISDN (Basisanschluss). Der Unterschied zwischen IDSL und ISDN besteht darin, dass ISDN 2 Schmalbandkanäle (64 Kbit/s) und einen Zeichenkanal für Paketübertragung mit 16 Kbit/s bereitstellt. SDSL stellt eine einzelne Bit-Pipe mit 128 Kbit/s bereit. Dies bietet eine maximale Datenrate von 128 Kbit/s, ermöglicht aber den Einsatz von ISDN-Verstärkern für Entfernungen von bis zu 20 km!

### ***Rate Adaptive DSL (RADSL)***

Dies ist eine alternative Version von ADSL, die auf der Bitübertragungsschicht ein anderes Protokoll verwendet. Es ist in der Lage, die Übertragungsrate abhängig von der Qualität der verfügbaren Leitung dynamisch anzupassen.

### ***VDSL und VDSL-2***

VDSL und VDSL-2 sind zurzeit die führenden Technologien. Sie werden später in diesem White Paper beschrieben.

## 5. Mehrträgersysteme – Discrete Multi-Tone (DMT)

Je mehr die Geschwindigkeit bei Übertragungen über Twisted-Pair-Kupferkabel erhöht wird, desto mehr werden Fehler und Beeinträchtigungen zu einem Problem. Bei niedrigen Geschwindigkeiten kann eine einfache Ein/Aus-Codierung sehr effektiv eingesetzt werden. Je mehr die Geschwindigkeit erhöht wird, desto intelligenter müssen die Codierung und die Übertragungsprotokolle sein, damit das gewünschte Ergebnis erreicht wird. Dies bedeutet normalerweise, dass die Eigenschaften des Signals an die Eigenschaften der Leitung angepasst werden.

In den frühen 1980er Jahren wurde ein revolutionäres neues Konzept für Übertragungsprotokolle vorgeschlagen. Es wird als Mehrträgerübertragung bezeichnet. Das in ADSL und VDSL verwendete System ist ein solches Multiträgersystem mit dem Namen DMT (Discrete Multi-Tone).

Bei genauerer Betrachtung der Probleme bei der Nutzung der Teilnehmerleitung für Breitbandübertragungen fällt als erstes auf, dass **Beeinträchtigungen auf unterschiedliche Weise in verschiedenen Bereichen des Frequenzspektrums auftreten**. Störungen durch Rauschen treten nur bei einigen sehr spezifischen Frequenzen auf; die Dämpfung verändert sich mit der Frequenz, und auch die Reflexions- und Nebensprecheffekte sind sehr frequenzspezifisch.

Ein Signal einer bestimmten Bandbreite enthält Komponenten aller Frequenzen in dem betreffenden Band. Wenn ein kleiner Bereich des Bandes beeinträchtigt ist, wirkt sich das auf das gesamte Signal aus. Was wäre, wenn statt eines einzelnen breitbandigen Signals mit hoher Datenrate eine Vielzahl von schmalbandigen Signalen (Kanälen) mit niedriger Datenrate im Frequenzmultiplexverfahren gesendet würden? In diesem Fall würden sich Störungen durch Rauschen und Verzerrungen in einem Unterkanal nicht auf die anderen Kanäle auswirken. Dies ist das zentrale Konzept von DMT.

Auf den ersten Blick erscheint die ganze Idee absurd! Wenn in einem konventionellen System mehrere (Frequenzmultiplex-) -Signale auf demselben Medium gesendet werden, müssen sie durch Schutzfrequenzbänder getrennt sein, um den Umstand zu berücksichtigen, dass die notwendigen Filter zur Isolierung der einzelnen Kanäle am Empfänger nicht perfekt sind. Dadurch würde ein großer Teil der Bandbreite verschwendet. Wenn zusätzlich noch für jeden Unterkanal ein separates Empfangsgerät benötigt würde, hätte dies extrem hohe Kosten zur Folge. Da die Signale jedoch von einem einzelnen Übertragungspunkt an einen einzelnen Empfänger gesendet werden, können digitale Signalverarbeitungstechniken verwendet werden, um alle Unterkanäle über *dieselbe* Sender-/Empfänger-Einrichtung zu verarbeiten. Außerdem sind keine Schutzfrequenzbänder mehr erforderlich.

## 6. ADSL als Beispiel für die DMT-Technologie

DMT kann viele Formen annehmen. Im Folgenden wird die ADSL-Implementierung von DMT beschrieben.

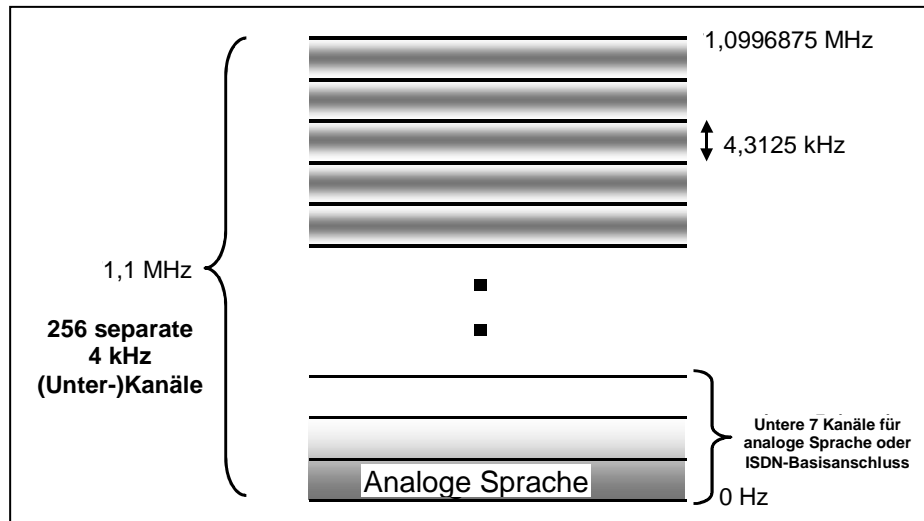


Abb. 3: DMT-Kanalzuteilung in ADSL – Darstellung des Prinzips.

Bei der normalen ADSL-Implementierung arbeitet DMT mit 249 separaten Kanälen. Bei Verwendung der digitalen Signalverarbeitung werden alle Kanäle gemeinsam in einem einzigen Vorgang gesendet und empfangen (beim Senden mit umgekehrter schneller Fourier-Transformation und beim Empfangen mit schneller Fourier-Transformation). Noch vor wenigen Jahren wäre dies undenkbar gewesen, denn es erfordert eine sehr große Rechenkapazität. Angepasste VLSI-Chips führen diese Funktionen heute jedoch zu relativ geringen Kosten aus.

In ADSL wird jeder einzelne Unterkanal als separate Einheit behandelt, die 0 bis 15 Informationsbits pro Signalperiode (Baud) transportiert! Technisch ausgedrückt heißt das, es wird QAM (Quadratur-Amplitudenmodulation) mit Trellis-Codierung verwendet.<sup>2</sup> Ein Baud ist eine Leitungszustandsänderung (Signalperiode oder Symbol) pro Sekunde. Mit 4.000<sup>3</sup> Datensymbolen pro Sekunde ist die Baudrate in DMT tatsächlich sehr niedrig. Jeder Unterkanal besitzt andere Eigenschaften. Bei der Initialisierung analysiert der ADSL-Transceiver jeden Unterkanal, um dessen Qualität und Eigenschaften zu ermitteln. Anschließend teilt er jedem abhängig von seiner Qualität eine Anzahl Bits zu (von 0 bis 15).

Ein ADSL-System verhält sich so, als ob alle 256 Unterkanäle vorhanden wären. Einige werden unterdrückt (auf Nullamplitude gesetzt), wenn sie nicht genutzt werden. Für den Systembetrieb gelten ein paar grundsätzliche Regeln:

- Eine Signalperiode (oder Baudzeit) entspricht 246,37 Mikrosekunden.
- Alle Unterkanäle arbeiten synchron. Das heißt, die Signalperiode beginnt für alle Kanäle zum selben Zeitpunkt.
- Innerhalb der Signalperiode sendet jeder Kanal ein gleich bleibendes Signal. Das heißt, er sendet eine Sinuswelle der speziellen Amplitude und Phase, die für den jeweiligen Unterkanal während der gesamten Signalperiode erforderlich ist. Für den Kanal mit der niedrigsten Nummer bedeutet dies, dass nur eine vollständige Sinuswellenperiode ausgeführt wird (auch wenn der Kanal nicht genutzt wird). Im

<sup>2</sup> Dies entspricht im Prinzip dem Betrieb eines normalen Sprachband-Wählmodems.

<sup>3</sup> Bei Berücksichtigung des Synchronisationssymbols sind es 4.058,8 Baud.

Kanal mit der höchsten Nummer finden in einer einzigen Signalperiode 256 vollständige Wiederholungen derselben Sinuswelle statt (Frequenz, Phase und Amplitude).

- Informationen werden in Rahmen übertragen/verarbeitet. Jeder Rahmen – er kann mehr als 2000 Bits enthalten – wird in einer einzigen Signalperiode gesendet.

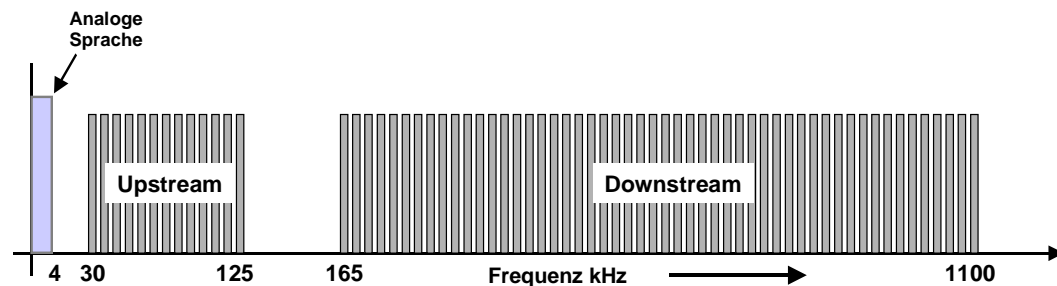


Abb. 4: Grundlegende ADSL-Unterkanalzuteilungen

Abbildung 4 zeigt die unidirektionale Option von ADSL. Diese ist relativ einfach umzusetzen, weil keine besondere Rücksicht auf Reflexionen und Echos in der Leitung genommen werden muss.

Werden Daten jedoch bidirektional gesendet, kann dies die Downstream-Datenraten erhöhen. In neueren Systemen (VDSL-2) erfolgt eine Zuteilung im so genannten „Zipper“-Verfahren, bei dem Unterkanäle abwechselnd in gegensätzlichen Richtungen betrieben werden.

Bei ADSL führen die oben genannten Kanalraten zu folgenden theoretisch möglichen maximalen Datenraten:

- **Upstream** (Nutzer an Netz):  $25 \text{ Kanäle} \cdot 15 \text{ Bits/Symbol/Kanal} \cdot 4 \text{ Kbaud} = 1,5 \text{ Mbit/s}$
- **Downstream** (Netz an Nutzer):  $249 \text{ Kanäle} \cdot 15 \text{ Bits/Symbol/Kanal} \cdot 4 \text{ Kbaud} = 14,9 \text{ Mbit/s}$

Voraussetzungen für diese Raten sind die Existenz eines perfekten Kanals und einer bidirektionalen Übertragung. Im Rahmen der geltenden Standards bieten reale ADSL-Systeme eine maximale Downstream-Rate zwischen 6 und 9 Mbit/s.

Das Diagramm „Übertragungsprozess im Überblick“ (siehe Abb. 5) zeigt den gesamten Übertragungsvorgang. Es werden eine Reihe weiterer Funktionen (z. B. Tone Ordering) zur Optimierung der Übertragungseigenschaften jedes einzelnen Unterkanals ausgeführt, die jedoch keine Auswirkung auf das Gesamtprinzip haben. Das Ergebnis der IFFT ist ein Vektor aus 512 Signalamplituden, die während der Signalperiode (Baudzeit) in gleichmäßigen Intervallen an den D/A-Wandler geliefert werden.

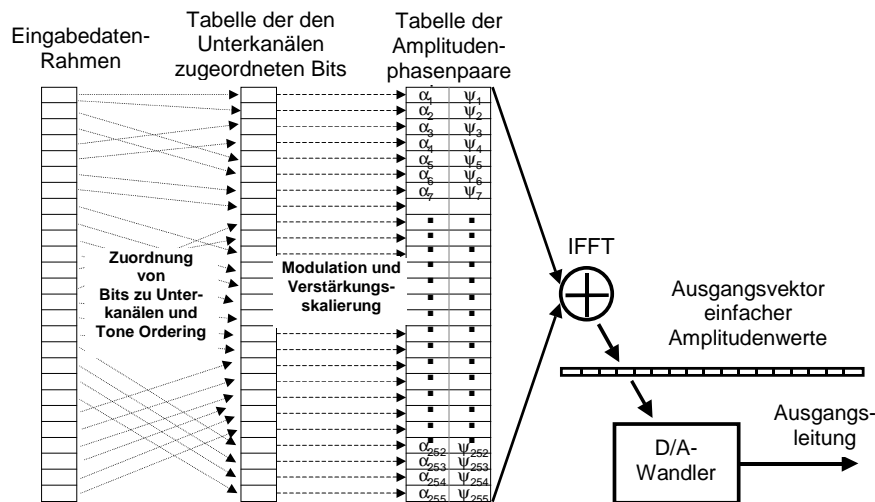


Abb. 5: Übertragungsprozess im Überblick

## 6.1. Praktische Überlegungen – Fehlerkontrolle

Im vorherigen Abschnitt wird lediglich ein Prinzip im Überblick dargestellt. Zur erfolgreichen Nutzung einer realen DMT-basierten Verbindung muss noch das Problem von *Fehlern* betrachtet werden. Einige Übertragungsfehler betreffen nur einzelne Unterkanäle. Andere führen möglicherweise dazu, dass mehrere Unterkanäle gleichzeitig unterbrochen werden.

Bei einigen Übertragungsarten (z. B. digitale Sprache oder Video) können fehlerhafte Daten möglicherweise einfach verworfen und die in das System gelangten „statischen Störungen“ toleriert werden. In anderen Fällen muss versucht werden, die Auswirkungen von Fehlern auf das System zu minimieren, indem so viele Fehler wie möglich *korrigiert* werden.

## 6.2. Vorwärtsfehlerkorrektur (FEC)

Die Vorwärtsfehlerkorrektur (Forward Error Correction, FEC) hat das Ziel, so viele Fehler wie möglich zu erkennen und zu korrigieren. Dabei wird an Benutzerdatenblöcke (mit fester Länge) eine Prüfsequenz angehängt, die nach mathematischen Regeln aus den Nutzdaten gebildet wird. Tritt ein einzelner Fehler auf, kann dieser korrigiert werden.

Ob mehrere Fehler korrigiert werden können, ist von der Anzahl der verwendeten Prüfbytes abhängig. Das Problem ist, dass sich ein Impulsrauschen auf zahlreiche Bytes in einem einzelnen übertragenen Rahmen auswirken kann. Überdies wirkt es sich häufig sogar auf mehrere aufeinanderfolgende Rahmen aus.

Die Lösung besteht darin, Benutzerdaten in kurze Datenpakete aufzuteilen, zu jedem Paket Fehlerkorrekturinformationen hinzuzufügen und die Daten dann *verteilt auf viele Übertragungsrahmen* zu senden! Dies bedeutet, dass in jedem Übertragungsrahmen Teile von mehreren aufeinanderfolgenden Benutzerdatenpaketen gesendet werden. Bei ADSL können Datenpakete (fester Länge) aus bis zu 255 Bytes bestehen (auch wenn es in der Regel weniger sind); darin enthalten sind bis zu 16 Bytes Prüfinformationen. Bei Ausnutzung der maximal möglichen 16 Bytes an Prüfinformationen können bis zu 7 fehlerhafte Bytes pro Paket korrigiert werden.

Die Daten können so organisiert werden, dass in jedem Übertragungsrahmen nur wenige Bytes aus jedem der vielen Datenpakete transportiert werden. Wenn ein einzelner Übertragungsrahmen stark durch Fehler (Impulsrauschen) betroffen ist, wirkt sich dies nur auf ein oder zwei Bytes jedes Benutzerdatenpakets aus. Da die Fehlerkorrektur auf der Ebene der Benutzerdatenpakete stattfindet, werden die Fehler korrigiert!

Dieses Verfahren bringt jedoch ein großes Problem mit sich: Da ein einzelnes Benutzerdatenpaket verteilt auf viele Übertragungsrahmen gesendet werden kann, tritt eine Verzögerung bei der Datenübertragung ein. Bei einem Datenpaket, das (beispielsweise) verteilt auf 16 Übertragungsrahmen gesendet wird, käme es zu einer Verzögerung von  $16 \cdot 250$  Mikrosekunden (4 Millisekunden<sup>4</sup>). Wenn bei ADSL die maximale Interleaving-Länge (132) genutzt wird, kann die Verzögerung bis zu 32 Millisekunden betragen. Dies kann in vielen Anwendungen bedeutsam sein.

Deshalb enthält die ADSL-Definition zwei Latenzzeitklassen. Es gibt eine Klasse für schnelle Übertragungen für Situationen, in denen ein Benutzerdatenpaket und die zugehörige FEC in einem einzigen Übertragungsrahmen (oder einem Teil davon) gesendet werden. Dabei findet zwar nur eine elementare Fehlerkontrolle statt, aber die Latenzzeit wird minimiert. Eine andere Datenklasse ist für Situationen definiert, in denen mehrere Benutzerdatenpakete im Interleaving-Verfahren und verteilt auf viele Übertragungsrahmen gesendet werden. Dies bietet die bestmögliche Fehlerkontrolle, allerdings auf Kosten längerer Verzögerungszeiten.

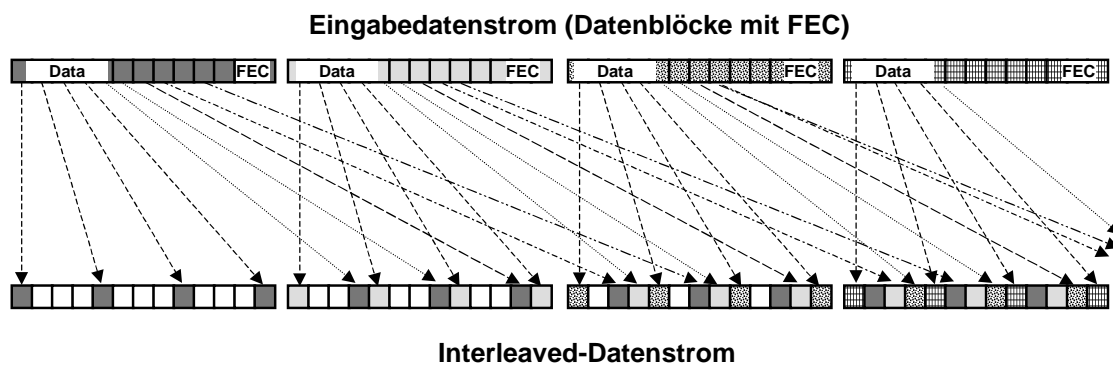


Abb. 6: Interleaving-Verfahren

<sup>4</sup> Die tatsächliche Verzögerung (Latenzzeit) ist doppelt so hoch, da die benötigten Zeiten zur Aufbereitung der Daten für die Übertragung und zu ihrer Zusammenführung beim Empfänger hinzukommen.



## 7. Very-High-Bit-Rate DSL (VDSL)

Wie bereits im vorhergehenden White Paper erwähnt, können deutlich höhere Geschwindigkeiten erreicht werden, wenn die Entfernung zwischen der Vermittlungsstelle und dem Teilnehmer „verkürzt“ wird. Zu diesem Zweck wird an einer beliebigen Stelle entlang der bestehenden Kabelstrecke ein Schaltschrank mit aktiven Komponenten platziert. Das (mehrpaarige) Upstream-Kupferkabel wird durch ein Glasfaserkabel ersetzt, während die Kupferkabelverbindung zum Teilnehmer belassen wird. Die DSL-Ausrüstung wird im Schaltschrank untergebracht. Das kürzere Kabel ermöglicht deutlich höhere Frequenzen und ist viel weniger Störungen ausgesetzt.

In einer solchen Umgebung kann die Datenrate der Verbindung deutlich erhöht werden. Dazu wird zunächst eine größere Frequenzbandbreite als bei ADSL genutzt. Dies bedeutet, dass mehr Unterkanäle vorhanden sind. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Symbolrate zu erhöhen (VDSL-2 arbeitet mit 8 Kbaud). Um eine viel schnellere Signalverarbeitung zu erreichen, sind alle diese Maßnahmen erforderlich, die aber bereits zu relativ geringen Kosten durchführbar sind.

VDSL-2 ist die zurzeit führende Technologie und wird auf relativ kurzen Entfernungen von 350 m bis 3 km und einer maximalen Geschwindigkeit von 100 Mbit/s in beiden Richtungen eingesetzt. Außerdem bietet VDSL-2 den entscheidenden Vorteil, dass es mit bestehenden ADSL- und ADSL-2-Teilnehmergeräten kompatibel ist. Das heißt, die Netzbetreiber können ihre ADSL-Ausrüstung auf VDSL-2 umstellen, ohne dass die Teilnehmer irgendetwas ändern müssen. Natürlich können Teilnehmer die höhere Geschwindigkeit erst nutzen, nachdem sie ihre Geräte ebenfalls modernisiert haben.

Protokoll	Maximale Distanz	Geschwindigkeit		Analog Sprache	Paare	Bitübertragungsprotokoll
		downstream	upstream			
ADSL	3,5 km	6,144 Mbit/s	640 Kbit/s	ja	1	DMT/CAP
	5,5 km	1,536 Mbit/s	176 Kbit/s	ja		
ADSL-lite	5,5 km	1,536 Mbit/s	512 Kbit/s	ja	1	DMT/CAP
HDSL USA	4,6 km	1,536 Mbit/s FDX <sup>5</sup>		nein	2	2B1Q/CAP
HDSL Welt	4,6 km	2,320 Mbit/s FDX		nein	2/3	2B1Q/CAP
HDSL2	4,6 km	2,320 Mbit/s FDX		nein	1	OPTIS
SHDSL	4,6 km	2,320 Mbit/s FDX		nein	1	DMT
SDSL	6,9 km	768 Kbit/s FDX		nein	1	2B1Q
IDSL	5,5 km	144 Kbit/s FDX		nein	1	2B1Q
RADSL	3,5 / 5,5 km	6,144 Mbit/s	640 Kbit/s	ja	1	CAP
VDSL	1,5 km	13 Mbit/s	640 Kbit/s	ja	1	QAM/DMT
	350 m	52 Mbit/s	2,3 Mbit/s	ja		
VDSL-2	3 km	55 Mbit/s	30 Mbit/s	ja	1	DMT
	350 m	100 Mbit/s	100 Mbit/s	ja		

Tabelle 1: Digitale Protokolle – Zusammenfassung

<sup>5</sup> FDX = Full Duplex (Vollduplex) bzw. bidirektionaler Datentransfer

## 8. Schlussfolgerung

Die meisten Industrieländer verzeichnen einen stark ansteigenden Bedarf an sehr schnellen Internet-Zugängen sowohl für Privatanwender als auch für Unternehmen. Hinzu kommt, dass sich bei der Fernsehübertragung eine revolutionäre Veränderung abzeichnet. Gleichzeitig besteht ein nach wie vor starker Bedarf an zuverlässigen Zugängen zum herkömmlichen Telefondienst.

Die vorhandenen, auf Kupferkabeln basierenden Zugangsnetze, sind nicht geeignet, die Weiterentwicklung der Dienste zu unterstützen. Aus technischer Sicht ist die Nutzung von Glasfaserkabeln in der einen oder anderen Form eine gute Lösung des Problems, wobei ein durchgängiges Glasfasersystem (bis zum Hausanschluss = FTTH) jedoch sehr hohe Investitionen erfordert.

Wo TTP-Kupferkabel von guter Qualität bis zum Haus des Kunden verlegt sind, kann ein FTTN-System (Fiber to the Node) bei Verwendung der VDSL-Technologie für die letzten 350-1000 Meter eine wirtschaftliche Möglichkeit darstellen, die Kapazität auch mit geringeren Investitionen deutlich zu erhöhen. Diese Lösung hat den besonderen Vorteil, dass bei Bedarf ein späterer Ausbau hin zu einem durchgängigen Glasfasersystem möglich ist, ohne dass Investitionen verloren gehen. Wenn eine neue Infrastruktur installiert werden soll, stellen PON-Systeme (Passive Optical Network), und hier vor allem GPON, eine schnelle, umfassende und wirtschaftliche Lösung dar, die zudem Möglichkeiten für zukünftige Entwicklungen offen hält. PON-Systeme werden im nächsten White Paper dieser Serie beschrieben.

Weitere Informationen zu den Produkten und Lösungen finden Sie im Internet unter [www.rdm.com](http://www.rdm.com)