

1.5 Grundlagen: Kommunikationsverfahren

Version: Okt. 2003

- Aufbau einer Kommunikationsstrecke
- Systemkomponente einer Kommunikationsstrecke
- Begriffe Quellen-, Leitungs-, Kanalcodierung
- Begriffe Störungen, Fehlersicherung
- Begriffe Signale, Bits, Rahmen, Pakete, Nachrichten
- Datenmodems
- xSDL-Systeme

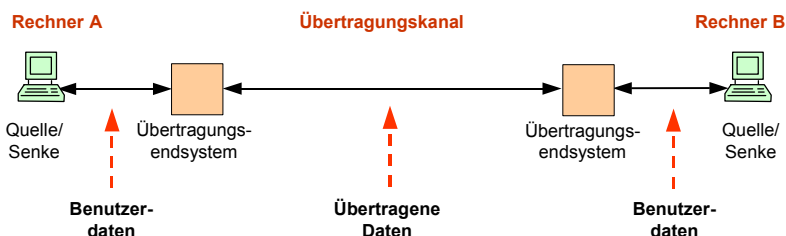


Bild: Kommunikationsmodell

Das einfache Kommunikationsmodell betrachtet einen Übertragungskanal zwischen zwei Übertragungsendsystemen. Dabei werden Benutzerdaten einfach als übertragene Daten transportiert ohne die Einzelheiten der physikalischen Übertragung zu berücksichtigen.

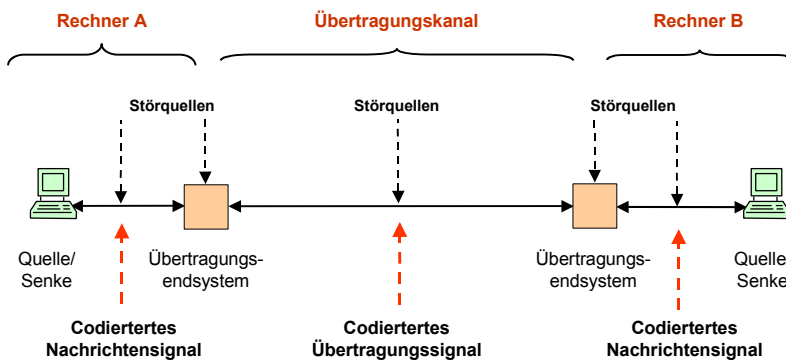


Bild: Übertragungstechnisches Modell

Das übertragungstechnische Modell konzentriert sich auf die Übertragung zwischen zwei Übertragungsendsystemen. Dazu werden codierte Nachrichtensignale als codierte Übertragungssignale zwischen beiden Endsystemen ausgetauscht. Dabei müssen alle Störeinflüsse betrachtet werden.

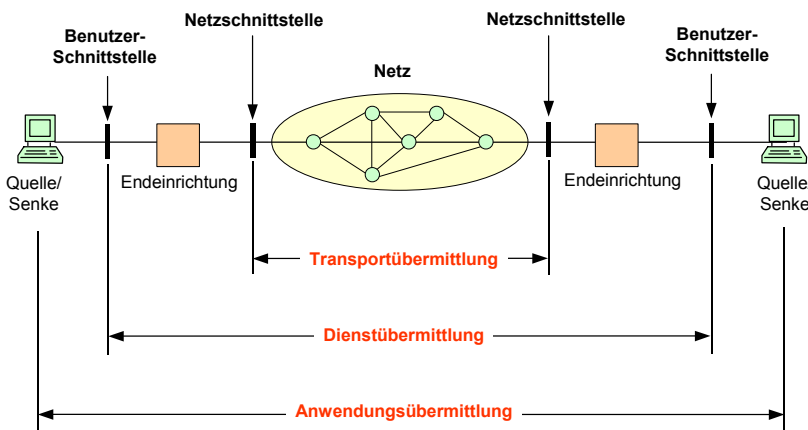
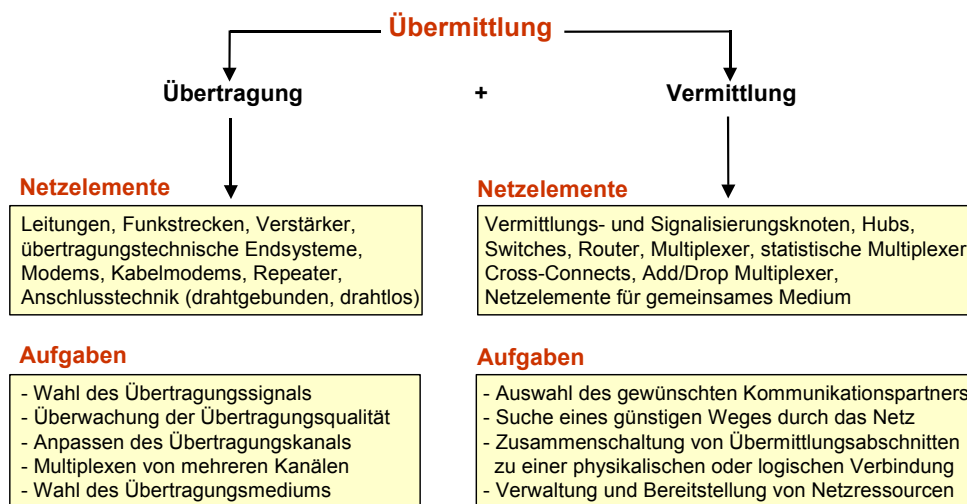


Bild: Netztechnisches Modell

Das netztechnische Modell betrachtet die Netzeigenschaften. In erster Linie gibt es Benutzer- und Netzschnittstellen. Zwischen den Netzschnittstellen findet die Transportübermittlung statt. Zwischen den Benutzerschnittstellen spricht man von der Dienstübermittlung und zwischen den Anwendungssystemen ist die Anwendungsübermittlung angesiedelt. Wichtig ist, dass die Transportübermittlung sich zusammensetzt aus einer Aneinanderreihung von Transport- oder Übertragungskanälen.



Die Kombination von Übertragung und Vermittlung wird als Übermittlung bezeichnet. Jeder Bereich hat spezielle Netzelemente und Aufgaben.

Bild: Übertragung und Vermittlung

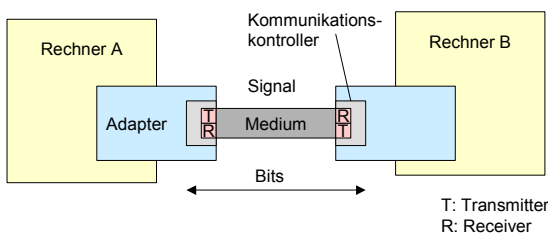


Bild: Datenkommunikation

Einfaches Szenario: Zwei direkt benachbarte Rechner kommunizieren über ein Medium (z. B. Kupferadern, Radiowellen oder Glasfaser).

- Anschluss der Rechner an das Medium über Adapter,
- Kommunikationskontrollierer auf dem Adapter regelt den Ablauf der Kommunikation.

Folgende Probleme sind unter anderem zu lösen

- Codierung der Signale,
- Organisation der Übertragung

Übertragungssystem

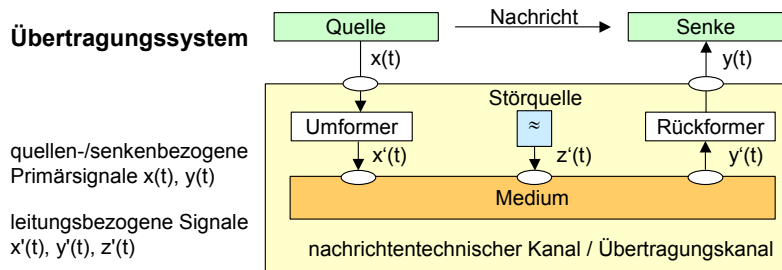
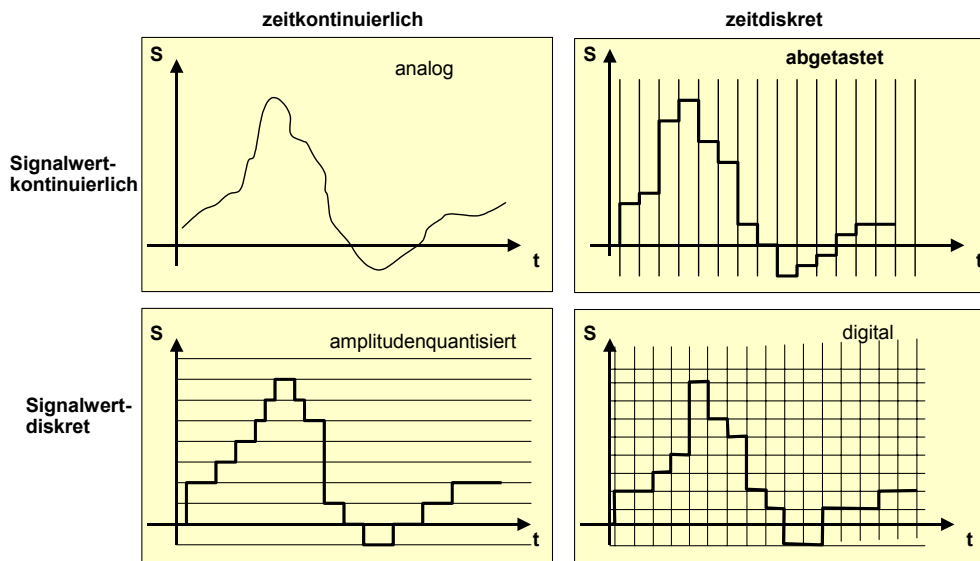


Bild: Übertragungskanal / Übertragungssystem

Für die mathematische Beschreibung des Übertragungskanals werden die Primärsignale an der Quelle und an der Senke durch zeitliche Signalverläufe $x(t)$ bzw. $y(t)$ beschrieben. Die leitungsbezogenen Signale sind $x'(t)$ und $y'(t)$. Störungen werden durch Überlagerung von $z'(t)$ und $x'(t)$ berücksichtigt.



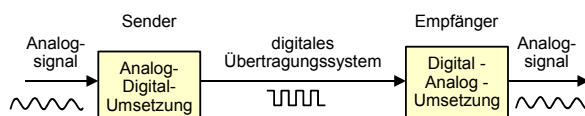
Analoges Signal: Kontinuierlich in Zeit und Signalwert.

Digitales Signal: Diskret in Zeit und Signalwert.

Bild: Signalquellen

Sprache	analog	3 kHz	GSM	13 kbit/s
	digital		Telefonie	64 kbit/s, 32 kbit/s, 9,6 kbit/s
Audio	analog	20 kHz	CD-Qualität	4 bis 6 Mbit/s
	digital		MP3-komprimiert	etwa 128 kbit/s
Video	analog	5-6 MHz	Fernsehen in Studioqualität	60 / 100 Mbit/s
	digital		Video (unkomprimiert)	100 - 600 Mbit/s
	digital		Video (komprimiert)	2 - 100 Mbit/s
	digital		HDTV (unkomprimiert)	1500 Mbit/s
	digital		HDTV (komprimiert)	150 Mbit/s
Text	digital		50 kbit/s - 10 Mbit/s	
Daten	digital		Datentransfer	1 - 150 Mbit/s
	digital		Telekonferenzen	< 150 Mbit/s
	digital		Graphiken	einige 100 kbit/s
Bilder	digital		Fotos	einige Mbit/s
	digital		Hochauflösende Bilder	< 150 Mbit/s

Bild: Zeitabhängige Signale



- Übertragung analoger Signale über digitale Übertragungssysteme:

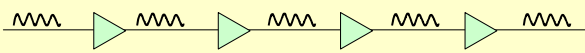
Umwandlung

- wertkontinuierlich → wertdiskret (Quantisierung)
- zeitkontinuierlich → zeitdiskret (Abtastung)

- Ziel: Rekonstruierbarkeit des originalen Signals beim Empfänger

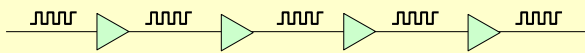
Bild: Digitalisierung analoger Signale

Übertragung von analogen Signalen



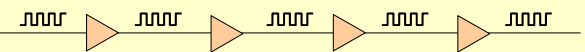
- Regeneratoren verstärken Nutz- und Rauschsignal
- Dadurch wird das analoge Nutzsignal immer schlechter
- **Beim Empfänger: schlechtere Qualität als das gesendete Nutzsignal**

Übertragung von digitalen Signalen (elektronische Verstärker)



- Regeneratoren können das digitale Nutzsignal vollständig rekonstruieren
- 3R-Regeneration: Amplitude, Impulsform, zeitliche Lage
- **Beim Empfänger: gleiche Qualität wie das gesendete Nutzsignal**

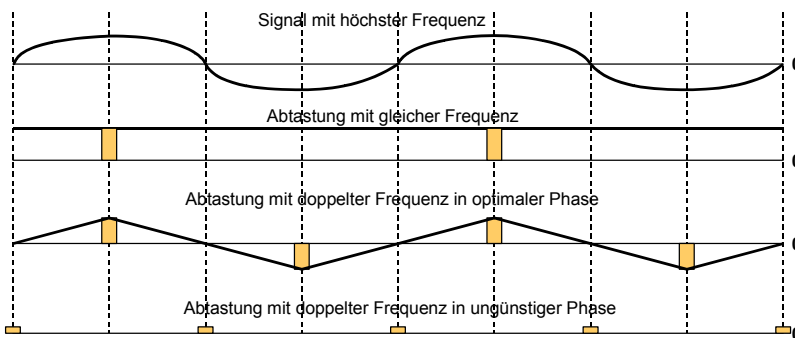
Übertragung von digitalen Signalen (optische Verstärker)



- Optische Regeneratoren verstärken alle Nutzsignale auf jeder Wellenlänge gleichzeitig, aber dafür nur in der Amplitude (1R-Regeneration)
- In regelmäßigen Abständen müssen alle Nutzsignale im einzelnen elektronisch rekonstruiert werden (optische 3R-Regeneratoren in Labors verfügbar)
- **Beim Empfänger: gleiche Qualität wie das gesendete Nutzsignal**

Im Bild sind die Unterschiede zwischen der analogen und digitalen Übertragung angegeben. Im wesentlichen geht es darum, dass digitale Signale beliebig oft regeneriert werden können, sodass am Empfänger das gesendete Signal komplett rekonstruiert werden kann. Vollständige Regeneration (3R-Regeneration) rekonstruiert die Amplitude, die Impulsform und die zeitliche Lage des Pulses. Zu unterscheiden sind elektronische oder optische Verstärker, wobei heute die optischen Verstärker nur eine 1R-Regeneration (Amplitude) schaffen.

Bild: Vorteile digitaler Übertragungssysteme



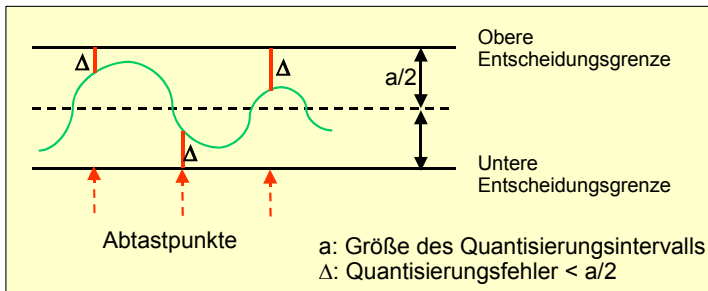
Die vollständige Rekonstruktion basiert auf das Abtasttheorem von Shannon. Dabei kann ein Signal wiedergewonnen werden, wenn die Abtastfrequenz doppelt so hoch ist als die höchste Frequenzkomponente im Ursprungssignal.

Beispiel: Telefonsignale im Frequenzband 300 bis 3400 Hz werden mit 8 kHz abgetastet.

Zur fehlerfreien Rekonstruktion des Signalverlaufs der abgetasteten Analogsignale ist eine Mindestabtasthäufigkeit (Abtastfrequenz f_A) bei periodischem Abtastzyklus erforderlich

Die Abtastfrequenz f_A muss mehr als doppelt so hoch sein wie die höchste im abzutastenden Signal vorkommende Grenzfrequenz (f_S): **$f_A > 2f_S$**

Bild: Abtasttheorem nach Shannon



Bei der Digitalisierung der Signale mit Hilfe einer Quantisierung entsteht die sogenannte Quantisierungsfehler, die als Mittelwert bleibt. Bei der Codierung von mehreren Amplitudenstufen entsteht die Pulse Code Modulation (PCM), die bei Digitaltelefonie (z.B. ISDN) verwendet wird. Eine mit 8 kHz abgetastete Sprachprobe wird mit 8 Bit codiert, so dass ein konstanter Sprachstrom mit 64 kbit/s generiert wird.

- Wertebereich des Analogsignals wird in endliche Anzahl von Quantisierungsintervallen eingeteilt, denen jeweils ein fester diskreter Wert zugeordnet wird
- Anstelle des ursprünglichen Analogsignals wird das mit dem **Quantisierungsfehler** $\Delta < a/2$ behaftete digitale Signal übertragen
- Zuordnung des Mittelwerts des Intervalls beim Empfänger
- Beispiel:** Pulse Code Modulation (PCM)

Bild: Quantisierung und Codierung

Schon 1924 hat H. Nyquist die Existenz einer fundamentalen Grenze der Datenrate eines Kanals erkannt und eine Gleichung abgeleitet, die die maximale Datenrate für einen rauschfreien Kanal mit eingeschränkter Bandbreite angibt. 1948 führte Claude Shannon die Arbeit von Nyquist fort und entwickelte eine Gleichung für einen Kanal aus mit zufälligem (thermodynamischem) Rauschen (Shannon, 1948).

- maximale Datenrate D für einen rauschfreien Kanal mit eingeschränkter Bandbreite
- $$D = 2 \cdot B \cdot \log_2(N) \text{ bit/s}$$
 - B : Bandbreite des Kanals [Hz]
 - N : diskrete Signalstufen
- Beispiel:
 - Kanal mit 3000 Hz, binäres Signal ($N=2$)
 - maximale Datenrate: 6 kbit/s

Bild: Nyquist-Theorem

Nyquist bewies, wenn ein beliebiges Signal durch einen Tiefpassfilter der Bandbreite B geführt wird, das gefilterte Signal vollständig durch $2B$ Abtastwerte pro Sekunde wiederhergestellt werden kann. Mehr als $2B$ Abtastwerte pro Sekunde sind überflüssig, da Anteile mit höherer Frequenz, die durch eine höhere Abtastrate entdeckt werden konnten, bereits ausgefiltert wurden. Besteht ein Signal aus N diskreten Stufen, lautet das Nyquist-Theorem wie im Bild angegeben.

Ein rauschfreier 3-kHz-Kanal kann beispielsweise binäre (d.h. zweistufige) Signale mit einer maximalen Rate von 6 kbit/s übertragen.

- Maximale erzielbare Bitrate C hängt vom Signal-Rausch-Abstand ab

$$C = B \cdot \log_2(1 + S/N)$$

- B : Kanalbandbreite
- S : Energie des Signals
- N : Energie der Störquelle (Energie \sim Quadrat der Amplitude)

- Beispiel
 - 3000 Hz Kanal
 - SNR (signal-to-noise ratio) [dB] = 30 dB = $10 \log_{10}(S/N)$ dB
 - $C = 3000 (\log_2(1+1000)) \approx 3000 \cdot 10 = 30 \text{ kbit/s}$

Bild: Kanalkapazität nach Shannon

Bis jetzt wurde ein rauschfreier Kanal betrachtet. Ist zufälliges Rauschen vorhanden, verschlechtert sich die Situation sehr schnell. Der Umfang des vorhandenen thermischen Rauschens wird durch das Verhältnis vom Signal S zum Rauschsignal N (d.h. durch den Rauschabstand S/N) bestimmt.

Normalerweise wird nicht dieses Verhältnis angegeben, sondern der Wert $10 \log_{10} S/N$. Diese Einheiten werden Dezibel (dB) genannt. Ein Verhältnis S/N von 10 ist 10 dB, ein Wert von 100 ergibt 20 dB, ein Wert von 1.000 ergibt 30 dB usw.

Die Hersteller von Stereoverstärkern geben die Bandbreite (den Frequenzbereich), über den sich ihr Produkt linear verhält, durch die jeweilige Frequenz von 3 dB an. An diesen Punkten wird die Verstärkung ungefähr halbiert. Shannons wichtigste Erkenntnis ist die, dass die maximale Datenrate eines rauschenden Kanals mit einer Bandbreite von B Hz und einem Rauschabstand von S/N wie im Bild angegeben.

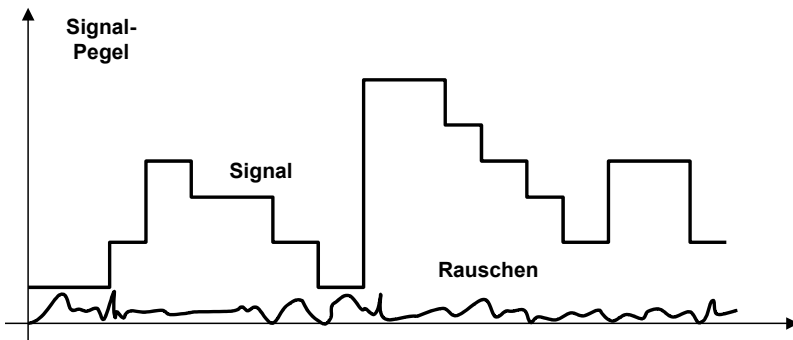


Bild: Kanalkapazität (Shannon)

So kann z.B. ein Kanal mit 3 kHz Bandbreite und einem Rauschabstand von 30 dB (typische Parameter des Telefonsystems) nie mehr als 30 kbit/s übertragen, gleichgültig, wie viele oder wenn die Signalstufen benutzt werden und wie oft oder selten Abtastwerte abgenommen werden. Shannons Ergebnis wurde mit Argumenten der Informationstheorie abgeleitet und ist auf jeden Kanal, der dem Gaußschen (thermischen) Rauschen unterliegt, anwendbar.

Die Einheit Dezibel (dB) ist eine wichtige Größe in der Elektrotechnik. Es wird dadurch ein logarithmisches Leistungsverhältnis definiert, z.B. Signal-zu-Rausch Leistung. Allgemein gilt: $L = 10 \lg (P_1/P_2)$ in dB.

Neben der systematischen Beeinflussung des Signals durch

- Dämpfung
- Laufzeitverzerrungen

können Signalstörungen durch

- transiente, stochastische Prozesse
 - weißes Rauschen
 - Impulsstörungen
- auftreten

Lange anhaltende Störungen: Bündelfehler (Echobildung, Nebensprechen, (thermisches)Rauschen, Anschalten von induktiven Lasten (Motor), 50Hz Netzbrummen stets auf einer Leitung, ...)

Elektrische Signale sind störungsanfällig. Neben Übertragungstechnischer Beeinflussung der Signalpulsform durch Dämpfung und Laufzeitverzerrung, gibt es zahlreiche beeinträchtigende Signalstörungen von außen.

Bild: Übertragungsstörungenursachen durch Rauschen

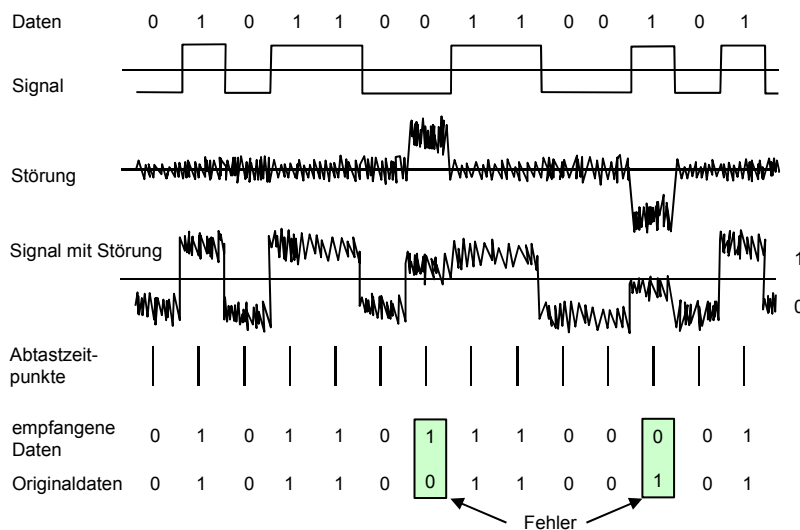
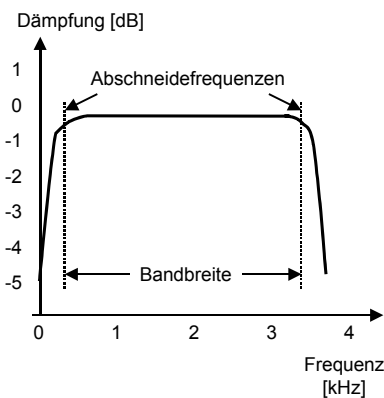


Bild: Übertragungsstörung durch Rauschen



Endliches Frequenzband zur Übertragung

Bandbreite in Hz: Frequenzbereich, der über ein Medium (einschließlich der im Übertragungssystem enthaltenen Filter, Verstärker usw.) übertragen werden kann

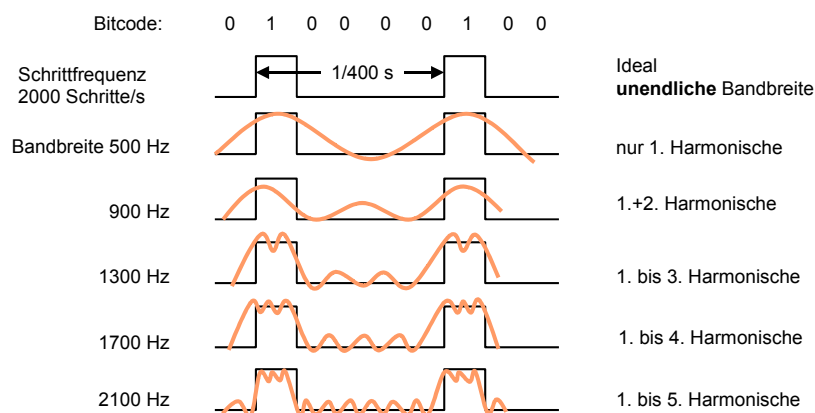
Bandbreite ergibt sich aus der Differenz der höchsten und niedrigsten übertragbaren Frequenzen

Wegen nicht-idealer Bandbegrenzungen Festlegung von Abschneidefrequenzen erforderlich

Signale müssen an die Übertragungscharakteristik des Mediums angepasst werden

Zur Übertragung benötigt man ein Frequenzband, das durch sogenannte Abschneidefrequenzen begrenzt wird. Man spricht von einer bandbegrenzten Übertragung. Die Begrenzung wird durch Filter realisiert: Tiefpass, Hochpass und Bandpass.

Bild: Bandbegrenztes Medium



- Min. Bandbreite für Übertragung einer beliebigen Bitfolge mit bestimmter Schrittfrequenz nötig
- Berechnung der minimalen Bandbreite nach den Formeln von Shannon/Nyquist

Bild: Bandbreite und digitales Signal

Codierung und Modulation

Eine Codierung kann unter anderem folgende **Ziele** verfolgen:

- Darstellung alphanumerischer **Zeichen** in einer standardisierten Form. Beispielsweise wird das lateinische Alphabet häufig durch den ASCII-Code dargestellt.
- Codierung von **Zahlen**, Zahlenwerte können prozessorintern unterschiedlich dargestellt sein. Für ihre Übertragung in Netzen sind ebenfalls standardisierte Codes erforderlich.
- Codierung von **Symbolen** (beliebige Zeichen, einzelne Bits oder Bitketten) zur Übertragung über einen physikalischen Kanal.
- Codierung von **Signalen** der realen Welt (z.B. Sprache, Bilder) so, dass zur Übertragung eine möglichst geringe Bandbreite benötigt wird.

Reale Signale (z.B. Sprache: Schallwellen, Bilder: zweidimensionale Verteilung der Lichtintensität) werden in der Regel zuerst in eine analoge elektrische Darstellung gebracht. Die Spannungsverläufe sind also kontinuierlich. Für die Verarbeitung und Übertragung werden jedoch meistens und noch zunehmend digitale (wertediskrete) Darstellungen bevorzugt. Zur Umwandlung zwischen den Signaldarstellungen existieren verschiedene Verfahren.

Im Hinblick auf die Signalübertragung unterscheidet man die folgenden Codierungsarten: Leitungscodierung, Kanalcodierung und Quellencodierung. Die Codierungsarten erfüllen unterschiedliche Aufgaben. Die gestellten Anforderungen unterscheiden sich ebenfalls. Wenn alle Codierungsarten eingesetzt werden (beispielsweise bei der Sprach- oder Bildübertragung über Paketnetze) ist beim Sender die Folge Quellen-, Kanal- und Leitungscodierung zu durchlaufen. Beim Empfänger ist die Reihenfolge umgekehrt.

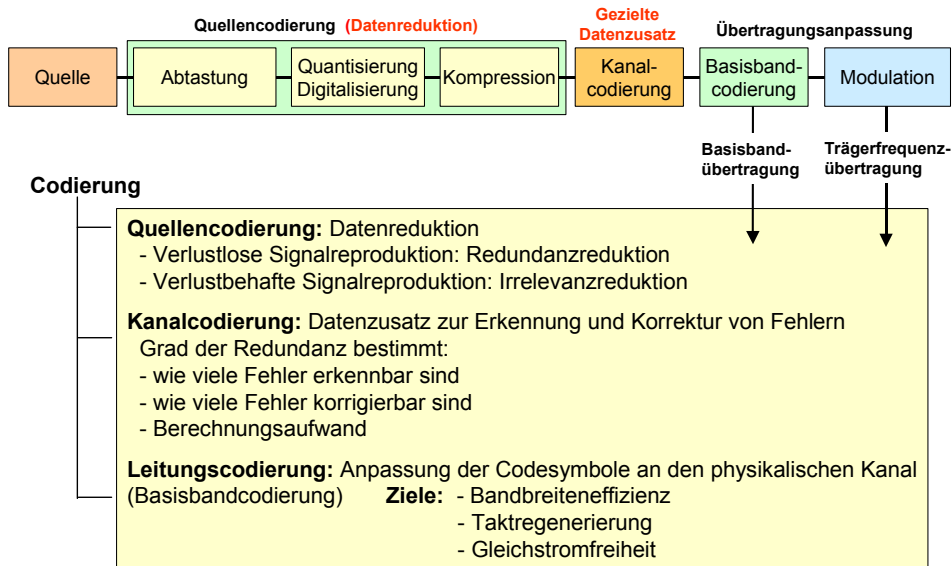


Bild: Codierung: Quellen-, Kanal- und Leitungscodierung

Quellencodierung/Datenkompression (source coding, data compression)

Bei der Kanalcodierung wird die zu übertragende Datenmenge vergrößert. Die Datenkompression verfolgt hingegen das Ziel, die Datenmenge zu reduzieren. Verfahren zur Datenkompression lassen sich einteilen in Entropiecodierung, Quellencodierung und hybride Codierung. Die Entropiecodierung ist verlustfrei, d. h. die Originaldaten können exakt wiederhergestellt werden. Dazu entfernt der Sender die im Signal enthaltene Redundanz, der Empfänger fügt sie wieder hinzu. Beispielsweise kann eine Folge n gleicher Zeichen durch ein Zeichen und den Wiederholungsfaktor n übertragen werden. Die Quellencodierung verwendet Wissen über die zu codierenden Signale. Sie entfernt die im Signal enthaltene Irrelevanz (dies sind Anteile, die der Empfänger nicht oder nur schlecht wahrnehmen kann, z. B. Farbverläufe bei rasch veränderlichen Kanten in Bildern). Die Quellencodierung ist meistens verlustbehaftet, erreicht aber dafür wesentlich höhere Kompressionsgrade als die Entropiecodierung.

Kanalcodierung (channel coding)

Ziel der Kanalcodierung ist es, die Kommunikation gegen Übertragungsfehler zu sichern. Dazu werden die Daten als Codewörter codiert, die den Eigenschaften des Übertragungskanals angepasst sind. Grundsätzlich kann die Kanalcodierung fehlererkennende oder fehlerkorrigierende Codes verwenden (error detection bzw. error correction). Damit Fehler erkannt bzw. korrigiert werden können, müssen die Nutzdaten durch redundante Daten ergänzt werden, die aus den Nutzdaten abgeleitet sind und zusammen mit diesen übertragen werden. Der Empfänger kann dann die von ihm empfangenen, redundanten Daten mit denen vergleichen, die er selbst aus den empfangenen Nutzdaten berechnet hat. Wenn er dabei Unterschiede feststellt, kann er davon ausgehen, dass Übertragungsfehler aufgetreten sind.

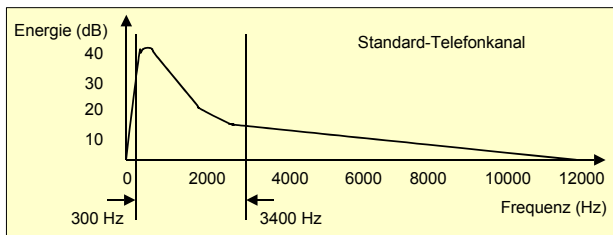
Leitungscodierung (line coding)

Die Leitungscodierung ordnet einem oder mehreren Bits ein **bestimmtes Symbol (Signalelement)** zu, das auf der Leitung übertragen wird.

Dabei sollen die folgenden Kriterien bestmöglich erfüllt werden:

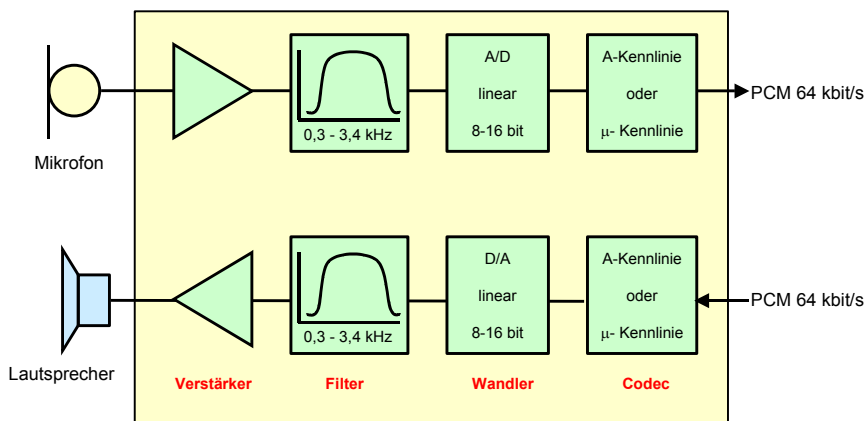
- **Bandbreiteneffizienz:** Die für eine vorgegebene Datenrate (Anzahl der pro Zeiteinheit zu übertragenden Datenbits) erforderliche Bandbreite soll möglichst gering sein bzw. die auf einer Leitung mit gegebener Bandbreite mögliche Datenrate soll maximal sein.
- **Taktregenerierbarkeit:** Der Empfänger muss die Symbolzeiten (die Anfangs- und Endzeitpunkte eines Symbols) aus dem empfangenen Signal wiedergewinnen, da ihm der ursprüngliche Sendetakt nicht zur Verfügung steht.
- **Gleichspannungsanteil:** Bei der Übertragung über Leitungen, die keine Gleichspannungen übertragen können (deren untere Grenzfrequenz also größer als null ist), darf im Frequenzspektrum des Sendesignals der Wert null nicht vorkommen. Andernfalls ist es für den Empfänger schwierig bis unmöglich, das Signal korrekt zu erkennen.

Im einfachsten Fall werden für Leitungscodes zweiwertige Symbole mit unipolaren (U^+ , 0) oder bipolaren (U^+ , U^-) Spannungspegeln verwendet. Der Spannungspegel kann für die Symboldauer konstant sein oder er kann sich zu bestimmten Zeitpunkten ändern. Für verfeinerte Codes werden mehrwertige (ternäre, quaternäre) Spannungspegel verwendet. Zudem können Bitketten der Länge n in Symbolketten der Länge m ($m \neq n$) abgebildet werden. Für einige wichtige Codes sind Zeitdiagramme der Pegelverläufe zusammengestellt.



- + Frequenzbereich: 300 - 3400 Hz = 3,1 kHz Bandbreite
- + Abtastfrequenz höher als 6,8 kHz (Shannon-Abtasttheorem)
- + Abtastfrequenz für PCM-Digitalisierung: $f_A = 8 \text{ kHz}$
- + Abtastperiode: $T_A = 1/f_A = 1/(8000 \text{ Hz}) = 125 \mu\text{s}$
- + 256 Quantisierungsintervalle, d.h. 8 Bit für binäre Codierung
- + Bitrate für digitalisierten Fernsprechkanal: $8 \text{ kHz} \cdot 8 \text{ bit} = 64 \text{ kbit/s}$

Bild: Pulse Code Modulation (PCM)



A/D: Analog/digital-Wandler
D/A: Digital/analog -Wandler

Codec: Codierer / Decodierer
PCM : Pulse Code Modulation

Bild: Codierung und Decodierung von Sprache

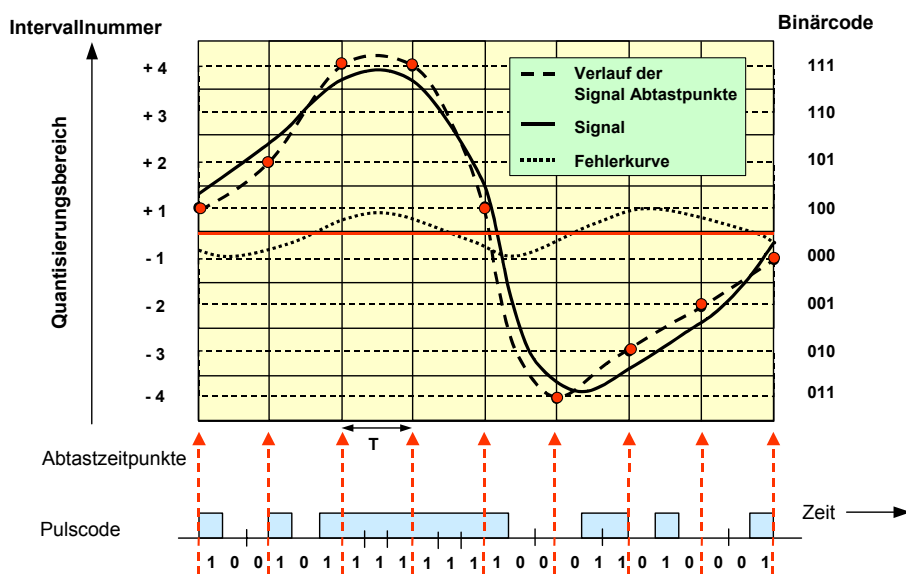
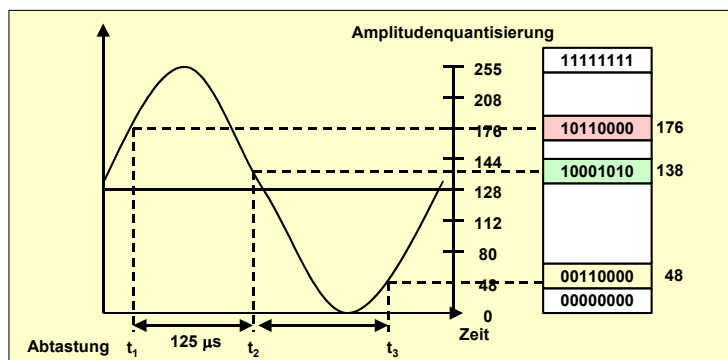


Bild: Prinzip der Pulscode modulation (PCM)



Gleichförmige Quantisierung: gleich große Intervalle

- Quantisierungsfehler machen sich bei kleinen Signalwerten stärker bemerkbar (Quantisierungsrauschen)
- Kleine Unterschiede werden bei leisen Signalen stärker wahrgenommen als bei lauten

Deshalb:

Kompressor/Expander bei Sender /Empfänger mit logarithmischen Kompressionskennlinien

Bild: Logarithmische Quantisierung

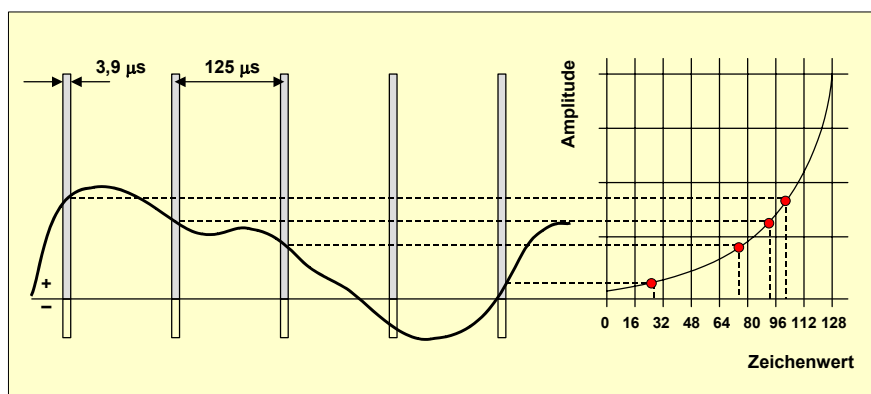
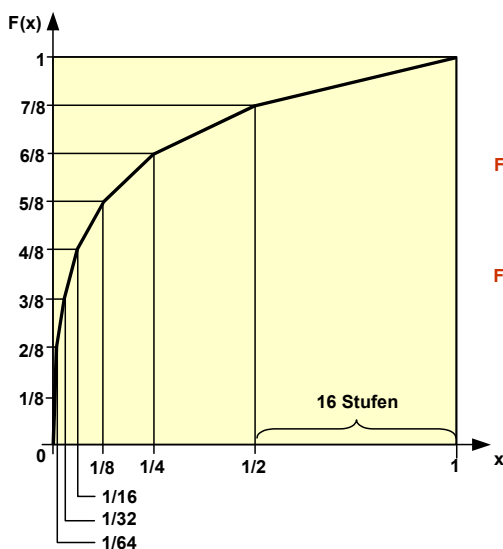


Bild:

Kompandierung des Signals bei PCM



$$F(x) = \text{Sgn}(x) \cdot [(1 + \lg(A \cdot |x|)) / (1 + \lg A)]$$

$$\text{für } 1/A \leq |x| \leq 1$$

$$F(x) = \text{Sgn}(x) \cdot [(A \cdot |x|) / (1 + \lg A)]$$

$$\text{für } 0 \leq |x| \leq 1/A$$

X Eingangssignal, normiert auf die halbe Maximalspannung
F(x) Kompressor Ausgangsspannung, normiert auf die halbe Maximalspannung

Bild: Positiver Ast der A-Kennlinie

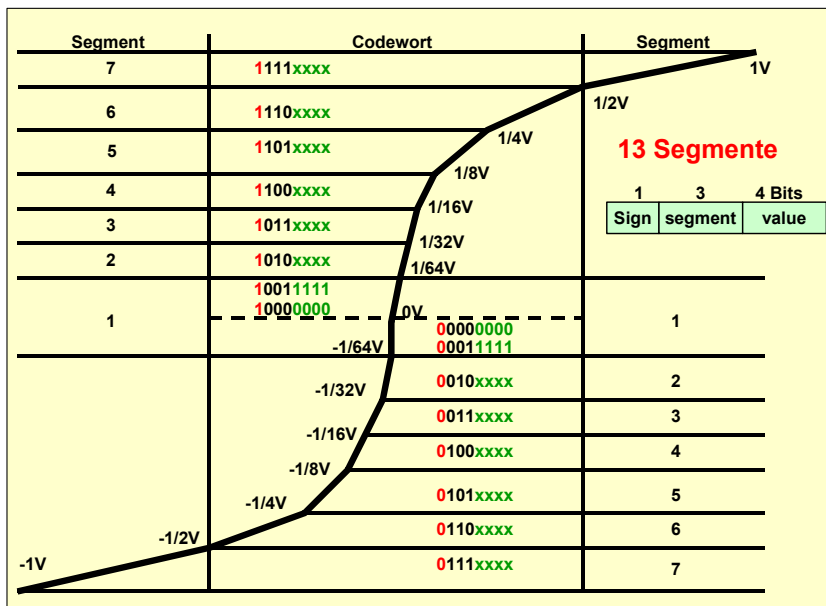


Bild: A- Kennlinie (A-Law) - Europa

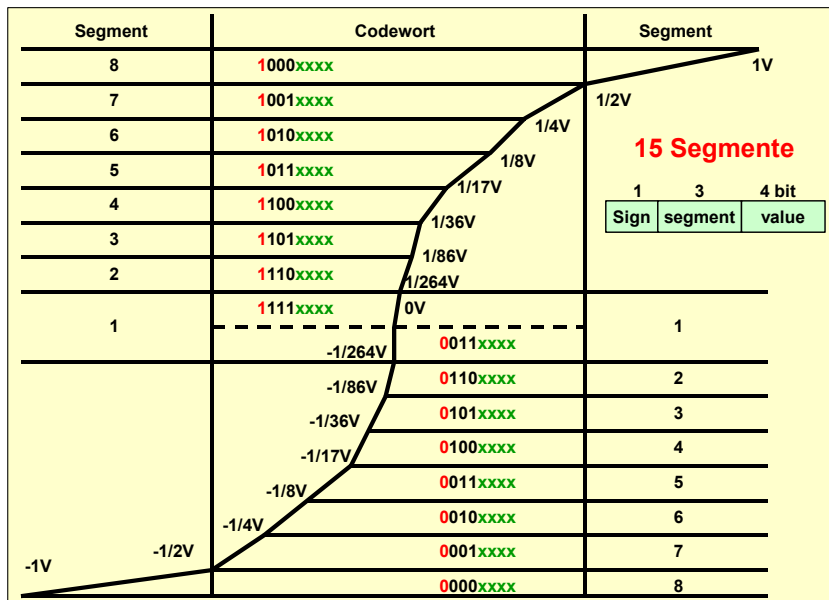
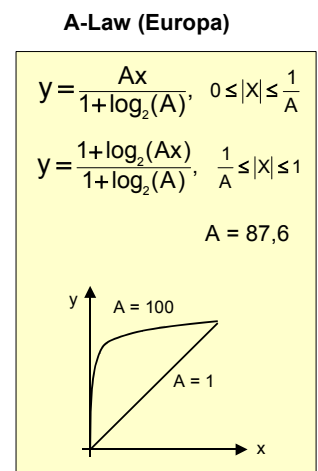
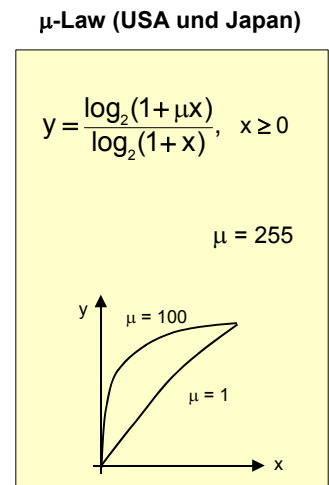


Bild: μ-Kennlinie (μ-Law) - USA, Japan



Schritt

- + Charakteristisch für zeitdiskrete Signale ist die Existenz eines minimalen Zeitintervalls T_{\min} zwischen aufeinanderfolgenden möglichen Änderungen der Signalkoordinate (Schrittdauer, kurz: Schritt als Signal definierter Dauer)
- + **Wichtig:** Digitales Signal mit fester Schrittdauer T (Schritt-Takt)

Isochrones (isochronous) Digitalsignal

- + Ein Digitalsignal ist isochron, wenn seine Kennzeitpunkte, d.h. die Zeitpunkte des Übergangs von einem Signalelement zum nächsten, in einem festen Zeitraster liegen

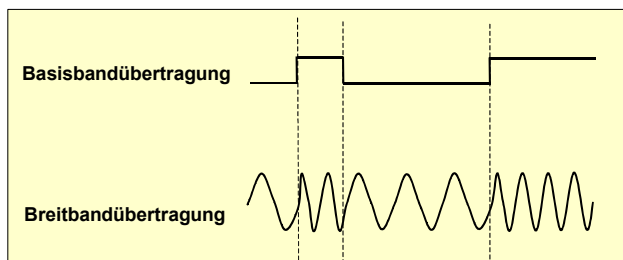
Anisochrones (anisochronous) Digitalsignal:

- + Ein nicht-isochrones Digitalsignal

Schrittgeschwindigkeit

- + bei isochronen Digitalsignalen: Kehrwert der Schrittdauer: $1/T$
- + Einheit: baud = $1/s$

Bild: Digitale Signalübertragung



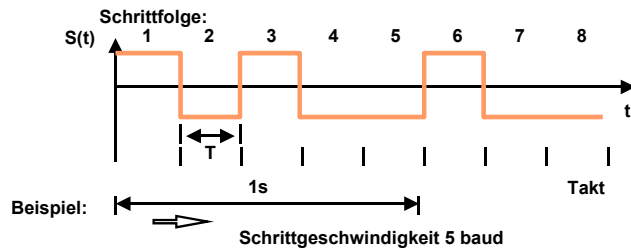
+ Basisbandübertragung

- direkte Übertragung des rechteckförmigen Quellensignal (z.B. Strom / kein Strom)
- Eigenschaften der Codes
 - Bittakrückgewinnung
 - Vermeiden von Gleichstromanteilen
 - Codierung mehrerer Zeichen
 - Resynchronisation durch Rahmenbildung

+ Breitbandübertragung

- Modulation

Bild: Digitale Signale zur Datenübertragung



Schrittgeschwindigkeit (Baudrate)

- + Zahl der Signalparameter-Zustandswechsel
- + Einheit: baud (1/s) (nach Jean Marc Baudot)
- + entspricht bei isochronem Takt der Taktfrequenz
- + auch als *Baudrate* bezeichnet

Übertragungsgeschwindigkeit (Bitrate)

- + Anzahl der übertragbaren Bitstellen pro Zeiteinheit
- + Einheit: bit/s

Schrittgeschwindigkeit = Übertragungsgeschwindigkeit

- + Nur für binäre Signale, bei denen jeder Schritt als Signalelement genau ein Bit als Codeelement darstellt

Bild: Übertragungsgeschwindigkeit versus Schrittgeschwindigkeit

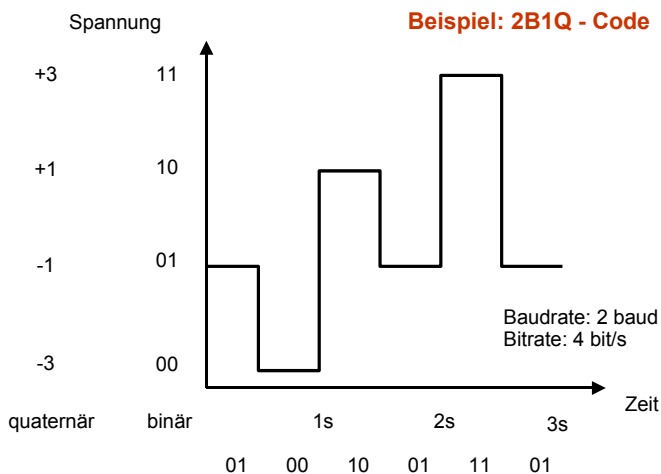


Bild: Beispiel einer Baudrate (Symbolrate)

Zweiwertiges Digitalsignal (Binärsignal)

- + Digitales Signal mit nur zwei Werten des Signalparameters (Digitales Signal, bei dem die Signalelemente binär sind)

Mehrwertiges (mehrstufiges) Digitalsignal

- + Die (diskrete) Signalkoordinate kann mehr als zwei Werte annehmen; Beispiel: DIBIT = zwei Bit pro Koordinatenwert (quaternäres Signalelement)
- + Die Anzahl n der diskreten Werte (Kennwerte, Stufen), die ein Signalelement annehmen kann, wird wie folgt gekennzeichnet:

- n = 2 binär (binary)
- n = 3 ternär (ternary)
- n = 4 quaternär (quarternary)
- ...
- n = 8 oktonär (octonary)
- n = 10 denär (denary)

Bild:

Zwei- und mehrwertige Digitalsignale

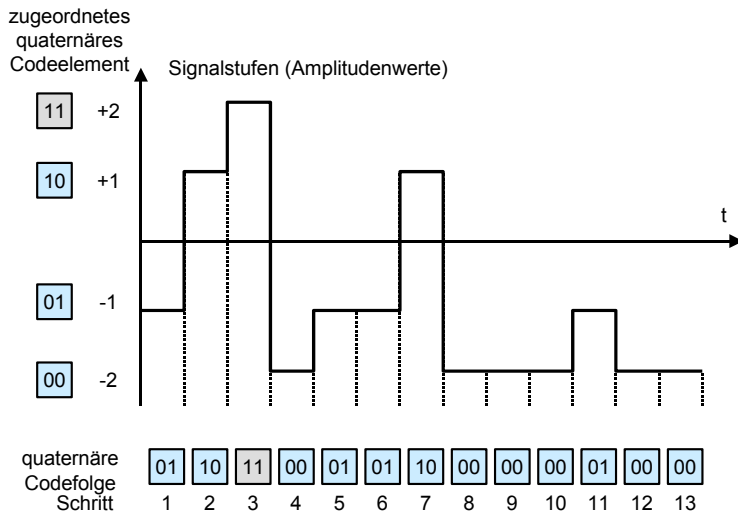


Bild: Mehrwertiges Digitalsignal

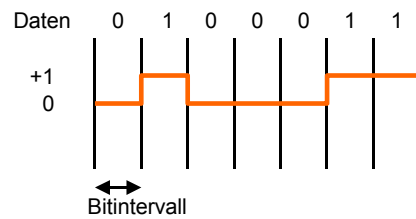
Wichtige Eigenschaften eines Leitungscodes

- + **Taktrückgewinnung**
 - Den Signalwerten können Zeichenwerte und Takt entnommen werden
 - Die Taktrückgewinnung ist erforderlich, wenn keine separate Taktleitung zur Verfügung steht
 - Taktgehalt eines Codes sollte möglichst unabhängig vom Inhalt der übertragenen Daten sein
- + **Gleichstromanteil**
 - Auf manchen Übertragungsstrecken darf wegen der angeschlossenen Geräte kein Gleichstrom auftreten
 - Kann meist nicht absolut, sondern nur im statistischen Mittel erfüllt werden
- + **Fehlererkennung**
 - Signalfehler sollten auf Signalebene erkannt werden
- + **Übertragungsbereich**
 - Hängt mit der Betriebsdämpfung zusammen. Hohe Frequenzen werden stärker gedämpft als niedrige
- + **Anzahl gemeinsam codierter Zeichen**
 - In einem Signalwert kann mehr als ein Zeichenwert codiert werden
- + **Resynchronisation**
 - Wird meist durch Rahmenbildung ermöglicht

Bild: Leitungscodierung digitaler Signale

- + **Binäre Leitungscodes**
 - Symbolwerte werden durch Signalwert bestimmt
- + **Biphase Leitungscodes**
 - Symbolwerte werden durch Phasensprünge codiert
- + **Ternäre Leitungscodes**
 - Die beiden Symbolwerte 0 und 1 werden in drei Codiersymbole (-1, 0, +1) abgebildet
- + **Blockcodes**
 - m Informationsbits werden als Block zusammengefasst und zu einem neuen Block der Länge n codiert (4B/5B, 5B/6B,)
- + **Faltungscodes**
 - Codebits werden nicht blockweise, sondern kontinuierlich erzeugt
 - Das Codegedächtnis m gibt an, wie viele Informationsbits ein Codebit beeinflussen
 - Coderate $r = k / n$: pro Takt werden aus k Informationsbits n > k Codebits erzeugt (typische Coderaten 1/3 bis 7/8)

Bild: Unterteilung der Leitungscodes



Binärer Code

Kennzeichen

- + fester Pegel während eines Bitintervalls
- + Signalübergänge (Signalwechsel) erfolgen an den Intervallgrenzen

Non-Return to Zero

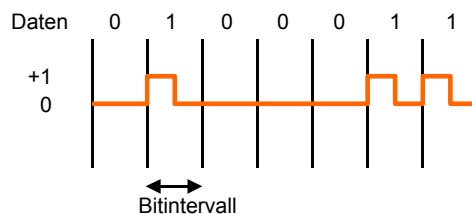
- "1" hoher Pegel
- "0" niedriger Pegel

Eigenschaften

- + sehr einfach zu implementieren
- + NRZ ist Standard innerhalb von Digitalgeräten (Rechnern, usw.)
- + Entspricht Einfach- oder Doppelstromverfahren bei der Telegrafie
- + Gleichstromkomponente kann hoch sein
- + eignet sich nicht zur Taktrückgewinnung

Bild: NRZ: Non-Return to Zero

Der **NRZ-Code** (*Non-Return to Zero*) verwendet als Signalelement eine Spannung von (beispielsweise) 0 V für eine logische 0 und (beispielsweise) +5 V für eine logische 1. Beide Signalelemente weisen für die Symboldauer, die hier der Bitdauer entspricht, konstante Werte auf. Beim **RZ-Code** (*Return to Zero*) ist das Signalelement für eine logische 1 eines Pulses (+5 V für die erste Hälfte der Symboldauer, 0 V für die zweite Hälfte).



Binärer Code

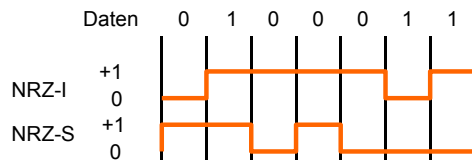
Einfacher Ansatz: "1" wird als high-Signal dargestellt; "0" als low-Signal

- + Zwei Klassen solcher Codes, um Bitfolgen zu codieren
 - RZ (Return to Zero)
 - NRZ (Non-Return to Zero)

Return to Zero

- + Gekennzeichnet durch einen Rechteckimpuls in der 1. Hälfte des Bitintervalls für das Datenelement "1"
- + Danach Rückkehr in Grundzustand (Zero)
- + Baudrate (Schrittgeschwindigkeit) ist im Extremfall (Folge von "1") doppelt so hoch wie Bitrate
- + Bei Null-Folge keine Taktrückgewinnung möglich
- + Gleichstromanteil kann hoch werden

Bild: RZ: Return-to-Zero



Es wird nicht der absolute Signalwert in der Zuordnungsvorschrift verwendet, sondern der Signalwert in Abhängigkeit von der Polarität des vorhergehenden Signalelements codiert

- + Biphase Code
- + Vorteil: Unter Einfluss von Störungen sind Signalwechsel leichter zu erkennen als Signalpegel, die mit einer Schwelle verglichen werden müssen

NRZ-I (Inverse)

- + Übergang in den entgegengesetzten Signalwert zur Darstellung einer übertragenen "1"
- + kein Wechsel bei "0"
- + hoher Gleichstromanteil möglich
- + Taktrückgewinnung nicht immer gegeben

NRZ-S (Space)

- + Wie NRZ-I, aber Signalwechsel bei übertragener "0"

Bild: Differentielle Codierung

Non-Return to Zero (NRZ)

- 1 = hoher Pegel
- 0 = niedriger Pegel

Non-Return to Zero Inverse (NRZ-I)

- 1 = Signalübergang zu Intervallanfang
- 0 = kein Signalübergang

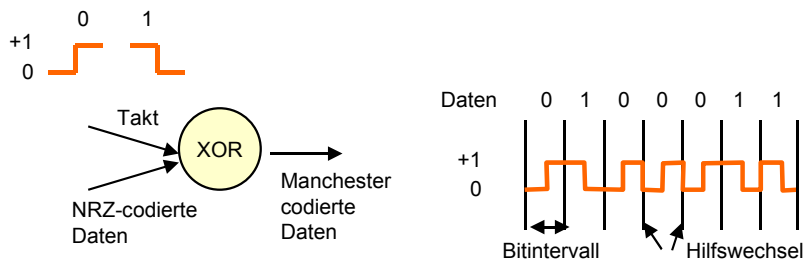
Non-Return to Zero Space (NRZ-S)

- 1 = kein Signalübergang
- 0 = Signalübergang zu Intervallanfang

Return to Zero (RZ)

- 1 = Signalübergang am Intervallanfang und Rücksetzung in der Mitte des Bit-Intervalls
- 0 = kein Signalübergang

Bild: Zusammenfassung der NRZ und RZ Codes



Biphase Code

Mindestens ein Signalwechsel pro Bitintervall; Maximal zwei Signalwechsel pro Bit
 + 1 = Signalübergang vom hohen Pegel zum niedrigen Pegel in der Intervallmitte
 + 0 = Signalübergang vom niedrigen Pegel zum hohen Pegel in der Intervallmitte
 + Erzeugbar über XOR-Verknüpfung von NRZ-codierten Daten und dem Takt
 Hilfswechsel erforderlich (erhöht Baudrate)

Vorteile

- + Leichte Taktrückgewinnung, da stets mindestens ein Signalwechsel pro Bitintervall
- + Keine Gleichstromkomponente
- + Fehlererkennung auf Signalebene: Fehlen eines erwarteten Übergangs erkennbar (Verwendung: Ethernet)

Nachteile

- + Verdoppelt die Rate von Signalwechseln auf der Leitung (Baudrate steigt)
- + im schlimmsten Fall ist Bitrate = 50% Baudrate, (d.h. Baudrate größer als Bitrate)
- + Baudrate kann auch kleiner als Bitrate sein
- + Übertragung von vier unterschiedlichen Signalen

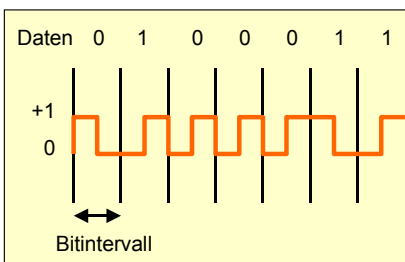
Signalelemente des Manchester-Codes, die bipolare Spannungspegel U_+ und U_- sowie eine Flanke zur Bitmitte (deshalb auch als Biphase-Code bezeichnet) aufweisen.

Die Signalelemente J und K entsprechen nicht dieser Definition und werden deshalb als **Codeverletzungen** (code violation) bezeichnet. Diese werden für besonders wichtige Kennzeichnungen eingesetzt, z. B. Rahmenanfang oder -ende.

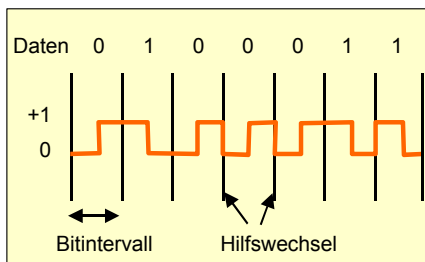
Die Manchester-Codierung setzt für jedes zu codierende Bit das entsprechende Signalelement ein. Dabei können sich weitere Flanken zwischen aufeinander folgenden Signalelementen ergeben.

Bild: Manchester Code

Differentielle Manchester Code



Manchester Code



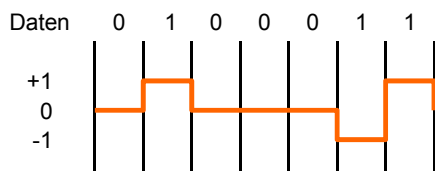
Beim differentiellen Manchester-Code hängt die Auswahl eines Signalelements vom vorhergehenden Signalelement wie folgt ab: für eine logische 0 muss zum Symbolanfang eine Ranke (Übergang 0 zu 1 oder umgekehrt) entstehen, bei einer logischen 1 darf hingegen keine Flanke auftreten.

Biphase Code

Signalwechsel in der Mitte jedes Bitintervalls
 Signalwechsel am Anfang eines Bitintervalls nur, wenn "0" codiert wird
 + Ausgabesignal von Startlevel abhängig
 + Polaritätsunabhängig

Diese Art der Codierung wird beispielsweise im lokalen Netz Token Ring eingesetzt

Bild: Differentieller Manchester Code



Beim **AMI-Code** (Alternate Mark Inversion) wird als Symbol für eine logische 1 abwechselnd ein konstanter Wert von +5 V bzw. -5 V verwendet.

Bild: AMI-Code (Alternate Mark Inversion)

Ternärer Code

Leitungscodierung mit mehr als zwei Signalwerten

- + keine Gleichstromkomponente
 - Problem: lange "0"-Folgen
 - Lösung: Zwei aufeinanderfolgende "0"en werden durch eine "0" und eine umgekehrte "1" codiert
- + einfache Taktrückgewinnung

Beispiel: AMI-Codierung (Alternate Mark Inversion)

- + AMI-NRZ: Darstellung von "1" abwechselnd durch positiven oder negativen Impuls in der 1. Hälfte des Bitintervalls
- + AMI-RZ: in der Mitte von einer 1-Codierung wird auf den Null-Wert gewechselt

Bild: AMI-Code (Alternate Mark Inversion)

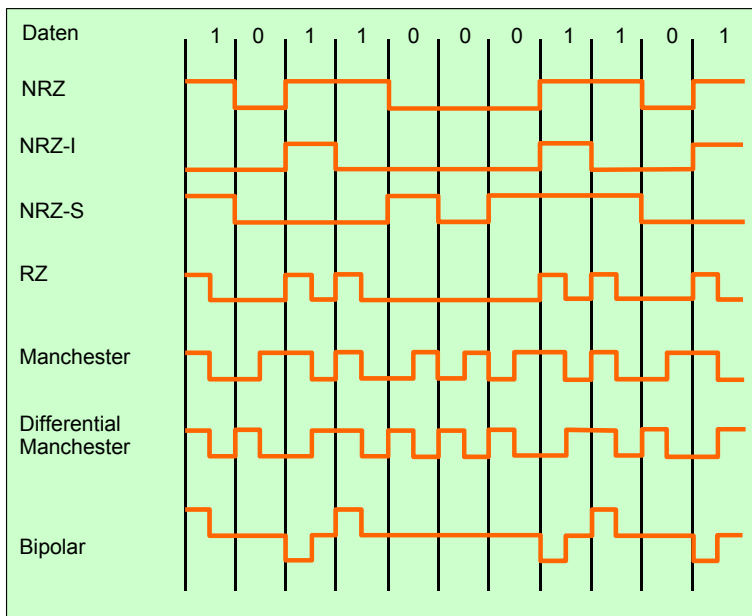


Bild: Leitungscodes

4-Bit Daten	5-Bit Code
0000	11110
0001	01001
0010	10100
0011	10101
0100	01010
0101	01011
0110	01110
0111	01111
1000	10010
1001	10011
1010	10110
1011	10111
1100	11010
1101	11011
1110	11100
1111	11101

- + Einfügen zusätzlicher Bits, um "0" bzw. "1"- Folgen zu vermeiden
- + 4 Bit Daten werden in 5 Bit Code codiert
 - nicht mehr als eine führende "0"
 - nicht mehr als zwei abschließende "0"
- + Übertragung mit NRZ-I
- + 80% Effizienz

Bild: Blockcode: 4B/5B-Code

Der 4B5B-Code ist ein Beispiel eines (m-zu-n)-Codes. Dabei werden 16 verschiedene Bitkombinationen auf 32 Codewörter abgebildet. Die Hälfte der 32 Codewörter kann demnach für die Codierung zusätzlicher Informationen genutzt werden, die entsprechenden Codewörter können als Codeverletzungen betrachtet werden. Die Codewörter werden so gewählt, dass nie mehr als zwei Nullen nacheinander auftreten. Zusätzlich wird eine NRZI-Codierung (Non-Return to Zero Invert) eingesetzt. Diese codiert eine Null mit demselben Spannungspegel wie das vorhergehende Bit, bei einer Eins wird der Spannungspegel invertiert. Insgesamt erhält man ein Leitungssignal mit zahlreichen Übergängen (gute Taktregenerierung) und einer gegenüber der NRZ-Codierung nur um 25 % höheren Bandbreite. Weitere Codes (8B10B, 8B6T).

Biphase-Codes werden in lokalen Netzen bis zu einer Datenrate von ca. 10 Mbit/s eingesetzt, nicht aber für Weitverkehrsnetze

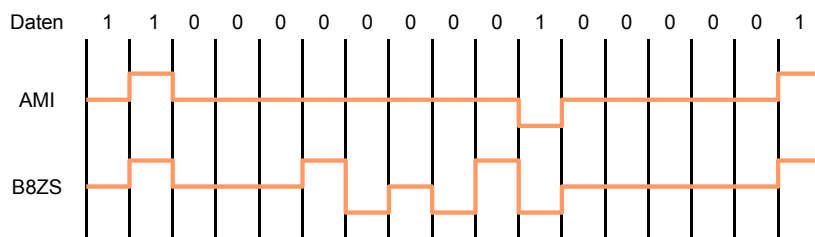
Zielsetzung

- + Sequenzen von Bits, die über eine längere Zeit keine Signalwechsel erzeugen, werden durch Füllsequenzen ersetzt, um die Synchronisation aufrecht zu erhalten
- + Füllsequenz muss vom Empfänger erkannt und durch die Originalsequenz ersetzt werden
- + Die Länge der Füllsequenz entspricht derjenigen der Originalsequenz

Beispiele

- + B8ZS: Bipolar with 8-zeros substitution (häufig in Nordamerika verwendet)
- + HDB3: High-density bipolar with 3 zeros (häufig in Europa und Japan eingesetzt)

Bild: Verwürfelung (Scrambling)



Basiert auf AMI

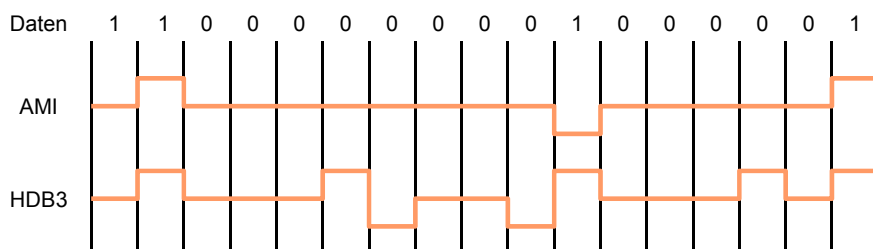
- + Bei AMI können lange Nullfolgen zum Synchronisationsverlust führen

Auftreten von 8 Nullen in Folge

- + Letzter vorangegangener Puls positiv: 8 Nullen werden als 000+-0-+ codiert
- + Letzter vorangegangener Puls negativ: 8 Nullen werden als 000-+0+- codiert

Führt zu zwei Coderegelerletzungen innerhalb eines Wortes

Bild: B8ZS: Bipolar with 8-Zeros Substitution



Basiert auf AMI

- + Bei AMI können lange Nullfolgen zum Synchronisationsverlust führen

- + Auftreten von 4 Nullen in Folge

Ersetzungen

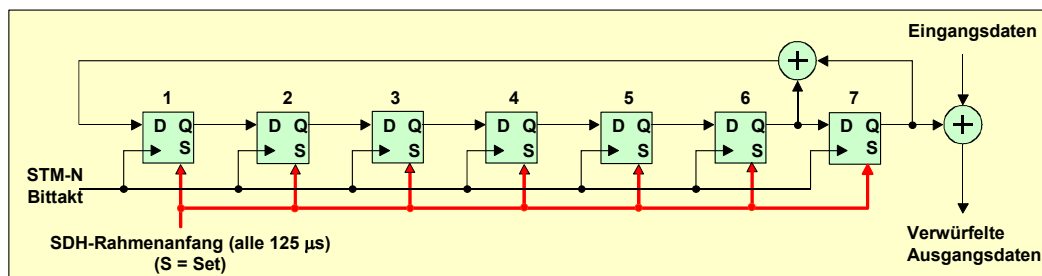
Anzahl von Pulsen
seit letzter Ersetzung

Letzter Puls	Gerade	Ungerade
Negativ	000-	+00+
Positiv	000+	-00-

Bild: HDB3: High-Density Bipolar with 3 Zeros

Ein Scrambler und Descrambler dienen der Taktrückgewinnung. Es ist wichtig, dass der im Empfänger erzeugte Takt dem Sendetakt genau entspricht. Die Taktrückgewinnung wird durch eine quasi zufällige Bitfolge wesentlich erleichtert. Deshalb setzt man im Sendeteil einen Scrambler (Verwürfler) ein. Er erzeugt aus der zu sendenden Bitfolge nach einer Operation A eine Pseudozufallsfolge. Dabei muss auf der Empfangsseite durch einen kompatiblen Descrambler (Entwürfler) nach einer Umkehroperation A' die ursprüngliche Bitfolge wiederhergestellt werden. Die Scrambler-Operation A wird in Modem-Standards festgelegt. Ein Scrambler und Descrambler besteht aus einem mehrstufigen Schieberegister mit entsprechenden

Rückkopplungen. Der Scrambler verwürfelt die einzelnen Bits in der zu sendenden Folge, so dass lange Sequenzen von Nullen oder Einsen unterdrückt werden. Dadurch kann der Empfänger sicherer den Takt aus dem Empfangssignal ableiten.



- Polynom: $1 + x^6 + x^7$
- Anfangswert am Anfang jedes SDH-Rahmens = 1111111
- Entwürfler gleich (Verwürfelte Eingangsdaten \rightarrow Ausgangsdaten)
- Verwürfler (Scrambler); Entwürfler (Descrambler)

Bitraten: STM-1 = 155 Mbit/s
 STM-4 = 622 Mbit/s
 STM-16 = 2,5 Gbit/s
 STM-64 = 10 Gbit/s

STM : Synchronous Transfer Module



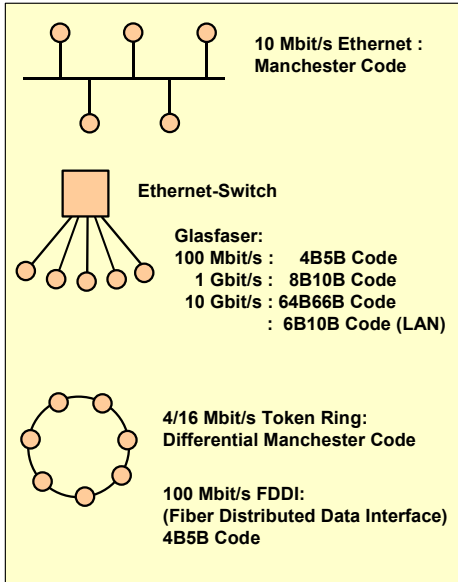
Modulo 2 Addition oder XOR (exclusive OR) :

$1 + 1 = 0$	$1 + 0 = 1$
$0 + 0 = 0$	$0 + 1 = 1$

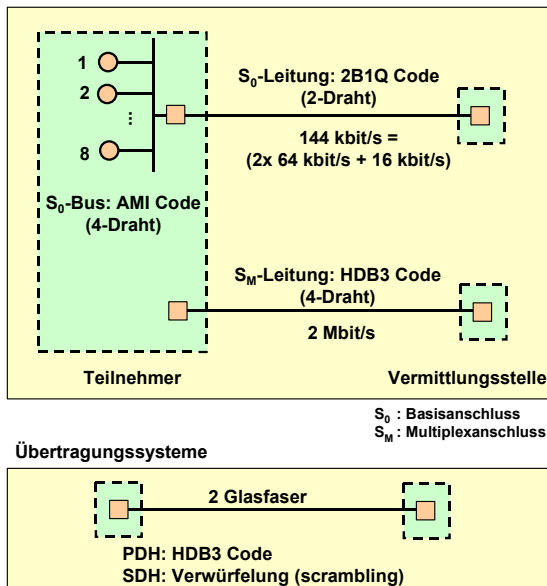
Bild: Synchroner SDH-Verwürfler (Scrambler)

Beim synchronen SDH-Scrambler werden die Eingangsdaten mit den Registerdaten aufgrund einer XOR-Verknüpfung verwürfelt. Alle 125 μ s (Anfang des SDH-Rahmens) wird der Schieberegister mit lauter Einsen initialisiert. Das Verfahren am Sender und am Empfänger ist gleich.

Lokale Netze



ISDN (Integrated Services Digital Network)



Das Bild zeigt die Leitungscodes für einige Netzsysteme.

Bild: Verwendung der Leitungscodes

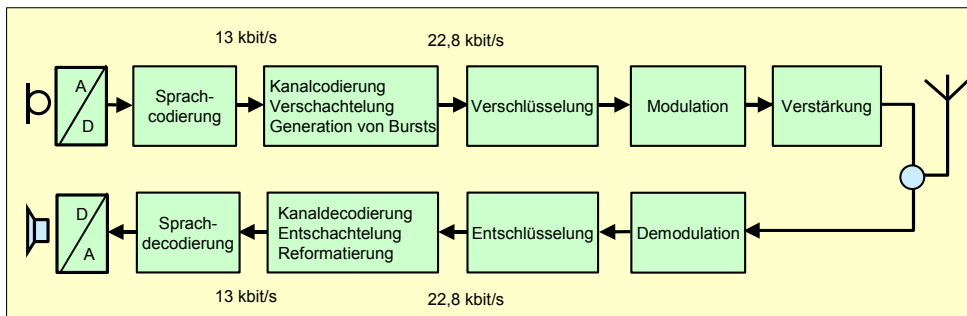


Bild: GSM-Codierung im Mobilgerät

In GSM wird eine spezielle Sprachcodierung verwendet. Sie unterdrückt Gesprächspausen und komprimiert die Sprachinformation. Nach dieser Quellencodierung wird zur Übertragung über den schlechten Funkkanal Zusatzinformation hinzugefügt.

Die Kanalcodierung besteht auf drei Stufen: Blockcodierung, Faltungscodierung und Bitverschachtelung. Eine zusätzliche Verschlüsselung ist für die Abhörsicherheit erforderlich. Die Modulationsstufe verschiebt das digitalcodierte Basissignal auf einen der GSM-Trägerfrequenzen. Für Daten entfällt die Quellencodierung. Auf der Funkschnittstelle ist die GSM-Bitrate 22,8 kbit/s (inklusive 9,8 kbit/s Kanalcodierung).

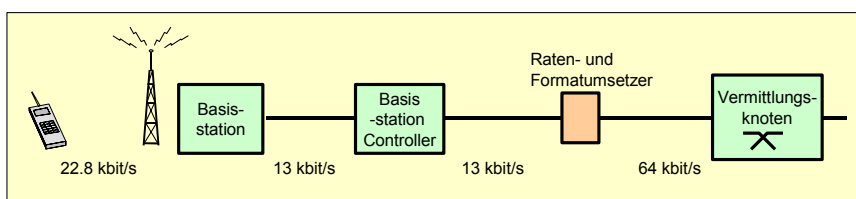


Bild: GSM-Bitraten

Zwischen Basisstation und einem sogenannten TRAU (Transcoding and Rate Adaptation Unit) gilt die GSM-Grundrate von 13 kbit/s, die auf die in Sprachnetzen übliche Kanalrate von 64 kbit/s umgesetzt werden muss. Gleichzeitig muss die GSM-Codierung auf PCM (A-law oder μ -law) umcodiert werden.

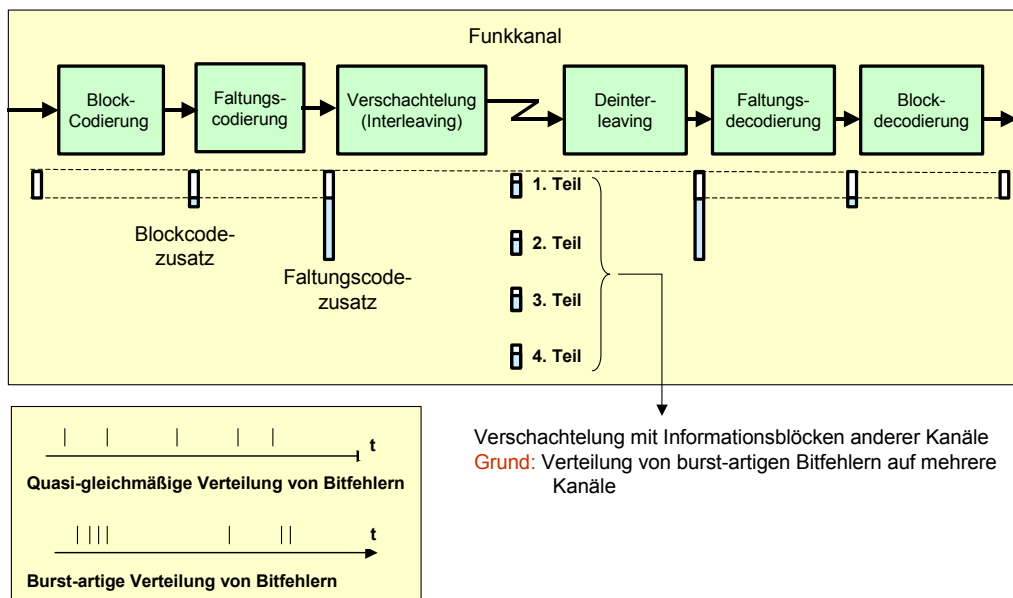


Bild: Codierungsstufen über GSM-Funkkanal

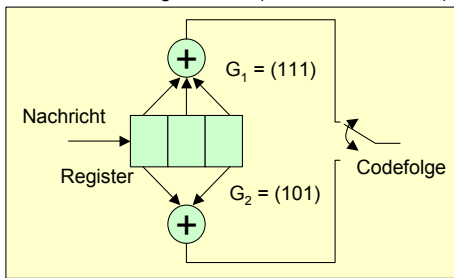
Das Bild illustriert die Zunahme der Zusatzinformation sowie die Verschachtelung in Informationsblöcken (transmission burst), damit büschelartig auftretende Bitfehler über mehrere Sprach- oder Datenverbindungen verteilt werden.

Faltungscodes

Faltungscodes (convolutional codes) erzeugen aus den Informationsbits die Codebits nicht blockweise, sondern gleitend, wie bei einer Faltungsoperation (convolution), so z. B. für ein neues Informationsbit zwei neue Codebits. Statt der Blocklänge ist hier das Codegedächtnis M bzw. die Einflusslänge maßgebend. Letztere gibt an, von wievielen Informationsbits ein Codebit beeinflusst wird. Werden pro Takt aus K Informationsbits $N > K$ Codebits erzeugt, so spricht man von der Coderate $R = K/N$.

Die Anzahl K ist üblicherweise klein (1 bis 7) und Coderaten von $1/3$ bis $7/8$ sind typisch. Die Codebits werden im allgemeinen von $(M + 1) K$ Informationsbits erzeugt.

Einfacher Faltungscodierer (Convolutional Coder)



Coderate $r = \frac{1}{2}$ (1 Bit \Rightarrow 2 Bits)
 Registertiefe $K = 3$
 Eingangsbits per Takt $k = 1$
 Verknüpfungsregel 1: $G_1 = (111)$
 Verknüpfungsregel 2: $G_2 = (101)$

Einlaufende Bitstrom ...00101
 Startwert (000): Codefolge 11,10,00,10,11
 Startwert (100): Codefolge 01,01,00,10,11

Bild: Faltungscodierung

Registeranfangswert: 000

Takt	Register	Codewort
Start	000	00
1	100	11
2	010	10
3	101	00
4	010	10
5	001	11

Registeranfangswert: 100

Takt	Register	Codewort
Start	100	11
1	110	01
2	011	01
3	101	00
4	010	10
5	001	11

Das Bild zeigt einen einfachen Faltungscodierer. Die Registertiefe K ist 3. Bei jedem Takt wird ein neues Bit im Register aufgenommen und das älteste Bit vernichtet. Bei jedem Takt werden auch zwei Verknüpfungen $G_1(111)$ und $G_2(101)$ durchgeführt. Bei Verknüpfungsregel 1 werden alle drei Bits XOR des Registers verknüpft. Bei Verknüpfungsregel 2 werden Bits 1 und 3 XOR verknüpft. Bei jedem Takt werden dadurch zwei Codebits erzeugt. Das Bild zeigt ein Beispiel für einen bestimmten Bitstrom am Eingang. Dabei werden zwei Registeranfangswerte betrachtet: Anfangswert 000 und Anfangswert 100.

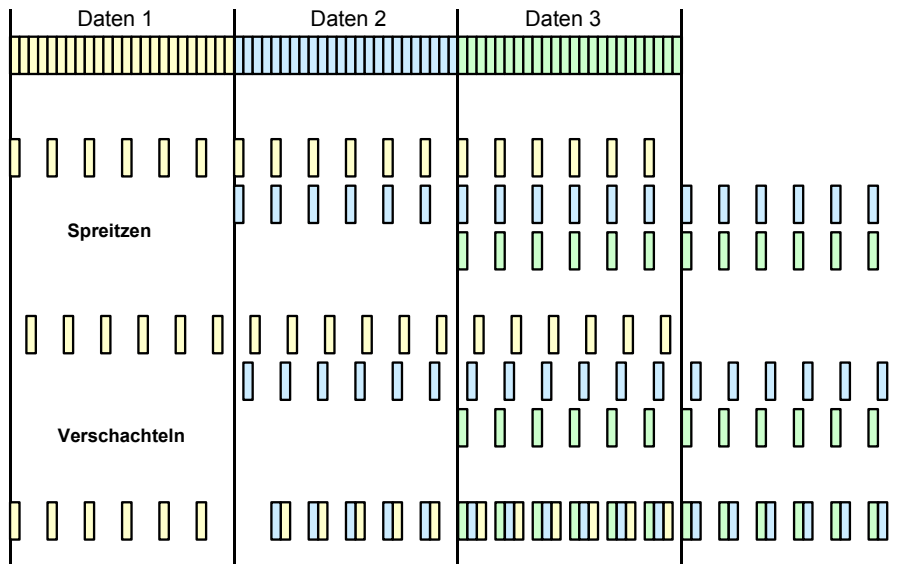
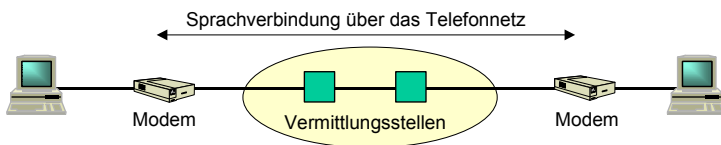


Bild: Verschachtelung (Interleaving)

Das illustriert die Verschachtelung von Informationsblöcken durch Aufspreizen mit zeitlichen Verzögerungen, einer Zusatzverzögerung und Überlagerung. Beim Empfänger ist die Umkehrvorgang notwendig.

Datenmodems



- + **Datenübertragung über das analoge Telefonnetz**
Telefonnetz überträgt Frequenzen zwischen 300 Hz und 3400 Hz
- + **Modulation**
 - Änderung von Signalparametern (Amplitude, Frequenz, Phase) eines Trägersignals durch ein modulierendes Signal
 - Wandlung digitaler in analoge Signale
- + **Demodulation**
 - Rückgewinnung des modulierenden Signals
 - Wandlung analoger in digitale Signale

Bild: Analoge Übertragung digitaler Daten

Der Begriff Modem ist ein Kunstwort aus Modulation und Demodulation. Diese zwei Begriffe repräsentieren die wichtigsten. Ein Modem sorgt dafür, dass die von einem Rechner (häufig von einem PC) ankommenden digitalen Datensignale für die Übertragung über eine analoge Leitung oder über ein analoges Fernsprechnetz in analoge Datensignale umgewandelt werden. Dieser Vorgang wird als Modulation bezeichnet. Sie beruht auf den Veränderungen eines Trägersignals durch das digitale Datensignal und wird an der Sendeseite im Modulator durchgeführt. Umgekehrt erfolgt am Ziel die Umwandlung der analogen Datensignale in digitale Datensignale. Dies nennt man Demodulation, und sie wird im Demodulator realisiert.

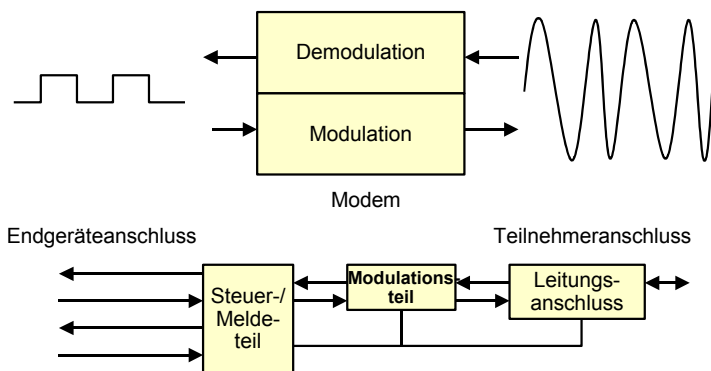


Bild: Modem (Modelator - Demodulator)

In jedem Modem sind zwei Gruppen von Komponenten zu unterscheiden, die folgende Teile bilden:

- Sendeteil: Hierzu gehören folgende Funktionsmodule: Scrambler, Codierer, Modulator und Ausgangsfilter.
- Empfangsteil: Zu diesem Teil gehören: Eingangsfilter, Entzerrer, Demodulator, Decodierer und Descrambler.

Zusätzlich muss ein Taktgeber vorhanden sein, der die erforderlichen Taktsignale erzeugt. Als Schnittstelle DTE/DCE wird in diesem Fall oft die Schnittstelle V.24 eingesetzt.

Eine Steigerung der Übertragungsrate bei gleichzeitiger Verbesserung der Übertragungsqualität ist in den high-speed (HS) Modems durch die zusätzliche Umcodierung nach dem Verwürfeln im Scrambler der zu sendenden Daten realisiert. Insbesondere in Modems nach den ITU-T-Standards V.32, V.32bis und V.34 wird die sogenannte Trellis-Codierung eingesetzt. Diese Codierung ist durch die zugefügte Redundanz gekennzeichnet, die eine Fehlererkennung und -korrektur ermöglicht.

Die umcodierte Bitfolge wird weiter im Modulator in analoge Signale umgewandelt. Im Ausgangsfilter werden die irrelevanten Frequenzanteile des analogen Datensignals ausgefiltert. Der Ausgangsverstärker übernimmt die Anpassung der Sendeleistung an die Leitungsanforderungen.

Die empfangenen analogen Datensignale werden nach entsprechender Verstärkung dem Entzerrer zugefügt. Mit dem Entzerrer werden die Signalverzerrungen (Signalverletzungen) beseitigt, die während der Übertragung entstanden sind. Eine genaue Entzerrung bieten erst adaptive (selbstanpassende) Entzerrer. Solche Entzerrer werden vor allem in HS-Modems eingesetzt. Die analogen Signale werden nach der Entzerrung im Demodulator in eine digitale Bitfolge umgewandelt. Diese Bitfolge wird im Decodierer in eine binäre Bitfolge umcodiert, aus der im Descrambler die Daten zurückgewonnen werden.

Da es bei Modems verschiedene Bitraten gibt, wurden ITU-T-Standards - sogenannte V-Standards - definiert, damit Modems unterschiedlicher Hersteller miteinander kommunizieren können. Bei der Datenübertragung über Modem müssen beide Seiten den selben Modem-Standard unterstützen.

Modulation

Informationstragende elektrische Signale sind in der Regel Basisbandsignale (Tiefpasssignale), die einen Frequenzbereich von 0 bis f_{\max} belegen. In LANs werden die Basisbandsignale direkt übertragen. Für die Nutzung von Multiplex-Verfahren und bei der drahtlosen Übertragung muss jedoch der Frequenzbereich nach höheren Frequenzen verschoben werden. Dazu wird die Modulation genutzt. Das Nutzsignal wird auf einen Träger (carrier) aufmoduliert und liegt dann als so genanntes Breitbandsignal (auch Bandpasssignal) in einem Frequenzbereich zwischen f_{\min} und f_{\max} vor. Dabei unterscheidet man:

- Analoge Modulation: Der Träger ist eine sinusförmige Schwingung.
- Digitale Modulation: Der Träger ist ein Puls (eine periodische Folge von Impulsen einer bestimmten Form, deshalb auch die Bezeichnung Pulsmodulation).

Analoge Modulation

Die allgemeine Form einer modulierten Sinusschwingung lautet: $a_m(t) = (1 + a) \sin(2\pi f t + \varphi)$

Dabei ist $a_m(t)$ der Augenblickswert der Amplitude des modulierten Signals (hier dimensionslos angegeben), $(1+a)$ die Amplitude f die Frequenz und φ die Phase des Trägers. Die Größen a , f und φ können durch das aufzumodulierende Nutzsignal verändert werden.

Entsprechend ergeben sich die analogen Modulationsarten:

- AM, Amplitudenmodulation (Amplitude Modulation): a wird moduliert,
- FM, Frequenzmodulation (Frequency Modulation): f wird moduliert
- PM, Phasenmodulation (Phase Modulation): φ wird moduliert.

Die Verfahren unterscheiden sich bezüglich des Aufwandes für Modulation und Demodulation (Rückgewinnung des Nutzsignals aus dem modulierten Signal), der für das modulierte Signal erforderlichen Bandbreite und Störsicherheit der Übertragung. Die analogen Modulationsverfahren können in Kombination eingesetzt werden, was bei Modems, xDSL und bei der Funkübertragung häufig genutzt wird.

Digitale Modulation

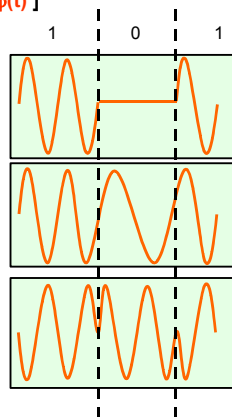
Digitale Modulationsverfahren verwenden als Träger einen Puls (Pulsfolge). Ein Puls ist eine periodische Folge von Impulsen einer bestimmten Amplitude A , Frequenz $f = 1/T$ und Impulsdauer D .

Die wichtigsten digitalen Modulationsverfahren sind:

- **PAM (Pulsamplitudenmodulation):** Für jeden Impuls ist die Amplitude A proportional zum augenblicklichen Wert des Nutzsignals.
- **PFM (Pulsfrequenzmodulation):** Die augenblickliche Frequenz $f = 1/T$ der Impulsfolge ist proportional zum Augenblickswert des Nutzsignals.
- **PPM (Pulsphasenmodulation):** Die Phase eines Impulses (die Abweichung seines Startzeitpunktes vom Startzeitpunkt im unmodulierten Fall) ist proportional zum Augenblickswert des Nutzsignals. Die Frequenz der Pulsfolge ist konstant.
- **PDM (Pulsdauermodulation):** Die Dauer D eines Impulses ist proportional zum Augenblickswert des Nutzsignals, Die Frequenz der Pulsfolge ist konstant.
- **PCM (Pulscodemodulation):** Hier werden binäre Impulsfolgen als Zahlenwerte interpretiert, die den Nutzsignalwert repräsentieren.
- **DPCM (Differenzielle PCM) und DM (Deltamodulation)** unterscheiden sich von der PCM dadurch, dass nur Differenzen zwischen aufeinander folgenden Signalwerten übertragen werden. DPCM und DM können als Verfahren zur Quellencodierung betrachtet werden, die bei Signalen mit langsam veränderlichen Signalwerten eine erhebliche Redundanzminderung bewirken.

Modulationssignal: Sinusschwingung: $S(t) = A(t) \sin [2\pi f(t) + \varphi(t)]$
Informationssignal: digitale Bitfolge

+ Amplitudenmodulation (AM)	
–	technisch einfach, benötigt wenig Bandbreite, störanfällig
–	Beispiel: Kurzwellenfunk, optische Übertragung
+ Frequenzmodulation (FM)	
–	größere Bandbreite
–	verändert die Frequenz des Trägersignals
–	Beispiel: Hörfunkübertragung
+ Phasenmodulation (PM)	
–	verändert Phase der Sinus-Schwingung
–	Arten
•	phasenkohärent: Vergleich mit Referenzsignal
•	differenziell: Sprung gegenüber letzter Phase (z.B. 90°/270°)
–	robust
–	Beispiele: Richtfunk, Mobilfunk, Modems, xDSL
+ Kombination von Amplituden- und Phasenmodulation	



Modulationsprinzipien

Im allgemeinen besteht die Modulation in der Veränderung von Parametern einer analogen Schwingung, die als Datenträgersignal dient, durch die zu sendenden Daten. Als Signalparameter einer Sinusschwingung kommen die Amplitude, die Frequenz und die Phase in Betracht. Die einfachste Form der Modulation beruht auf der Veränderung nur eines Parameters, so dass man von Amplituden-, Frequenz- oder Phasenmodulation spricht.

Andere Bezeichnung: Umtastung (Shift Keying)

Bild: Modulation

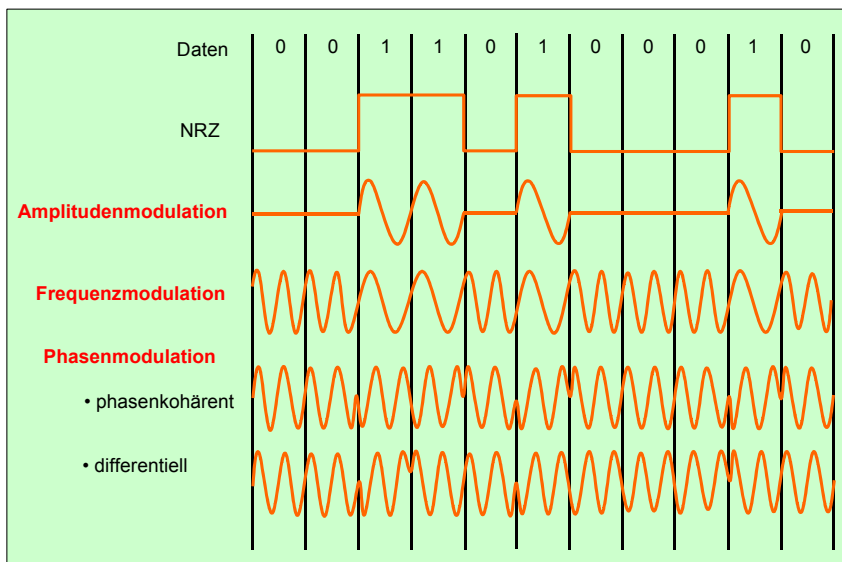
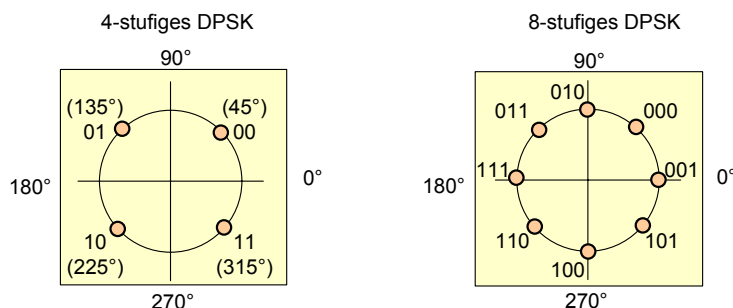


Bild: Modulationsverfahren

Bei der Phasenmodulation (PM) wird die Phase einer Trägerschwingung in Abhängigkeit vom zu übertragenden Bitstrom verändert. Zur Wiedergewinnung von Daten an der Empfangsseite muss ein Phasenvergleich der Phase des empfangenen Datensignals mit einer Bezugsphase durchgeführt werden. Da es aufwendig ist, die Phasendemodulation zu realisieren, verwendet man in der Praxis die Phasendifferenzmodulation, die kurz als DPSK (Differential Phase Shift Keying) bezeichnet wird. Der Vorteil der DPSK liegt in der einfachen Art der Demodulation.



- Binary PSK (BPSK)
 - Erzeugen eines positiven oder negativen Signals (Phasenwinkel 180°)
- Quaternary PSK (QPSK)
 - 4 Phasenwinkel: 0°, 90°, 180°, 270°
- Differentielle PSK (DPSK)
 - Codierung nicht durch absolute Phasenverschiebung, sondern durch Änderung des Phasenzustands (z.B. Phasensprünge um 0°, 90°, 180° und 270°)
 - $\pi/4$ -DPSK: Phasensprünge um 45°, 135°, -135°, -45°
- Offset PSK
 - Vermeiden von großen (z.B. 180°) Phasensprüngen durch mehrere kleine (z.B. zweimal 90°)

Bild: Phase Shift Keying (PSK)

Der Hauptvorteil aller mehrstufigen Modulationsarten beruht darauf, dass die Übertragungsrate auf der Leitung als Symbolrate nur ein Teil der Übertragungsgeschwindigkeit ist. Bei der 4stufigen bzw. 8stufigen DPSK geht die Schrittgeschwindigkeit auf die Hälfte bzw. auf ein Drittel der Übertragungsgeschwindigkeit zurück.

Die zu sendenden Symbole (als Gruppen von Bits) bei einer mehrstufigen Modulation können in dem Signalraum in Form eines Signalzustandsdiagramms dargestellt werden. Das Signalzustandsdiagramm nach ITU-T Empfehlung V.26 (sog. Alternative A) für die 4-stufige DPSK. Es ist hier zu bemerken, dass die einzelnen Symbole (Dibits) als Punkte gleichmäßig verteilt sind. Dadurch sind die Abstände zwischen den benachbarten Punkten möglichst groß und somit lassen sich Fehlentscheidungen vermeiden.

Bei der Amplitudenmodulation (AM) wird die Amplitude eines analogen Daten-trägers (z. B. Sinusschwingung) entsprechend dem Verlauf von Daten verändert. Eine AM mit einem binären Datensignal besteht in der einfachsten Form aus dem Ein- und Ausschalten einer Trägerschwingung. Reine Amplitudenmodulation hat keine Bedeutung in der Praxis.

Bei der Frequenzmodulation (FM) werden die zu übertragenden Daten durch die Frequenzänderung der Trägerschwingung dargestellt. Die Schwingung mit der höheren Frequenz entspricht der binären "0". Die Frequenzmodulation ermöglicht nur die Übertragungsgeschwindigkeiten bis 1.2 kbit/s und wird in Modems nach V.21 und V.23 eingesetzt.

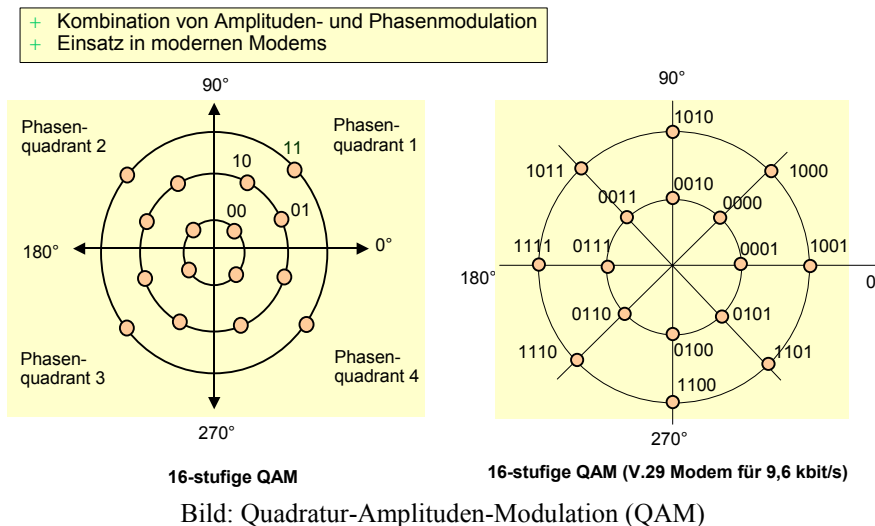
In Modems für die Übertragungsgeschwindigkeiten 1.2, 2.4 und 4.8 kbit/s wird mehrstufige DPSK eingesetzt, so dass der ankommende binäre Datenstrom umcodiert werden muss. Diese Umcodierung besteht bei der 4-stufigen DPSK darin, dass jeweils zwei Bits zu einem Dibit zusammengefasst werden. Den einzelnen Dibit Zuständen werden entsprechende Phasensprünge zugeordnet. Bei der 8-stufigen DPSK werden jeweils drei Bits zu einem Tribit zusammengefasst und den einzelnen Tribit-Zuständen werden entsprechende Phasensprünge zugeordnet.

Im allgemeinen besteht eine mehrstufige Modulation darin, dass die zu übertragenden Bits zu den (Daten-) Symbolen zusammengefasst und den einzelnen Symbolen entsprechende Trägersignale zugeordnet werden. Die Anzahl der Symbole pro Sekunde stellt die Symbolrate (Symbol Rate) dar, die auch als Schrittgeschwindigkeit bezeichnet wird.

Da alle Punkte auf einem Kreis liegen, haben die zu sendenden Trägersignale für alle Symbole die gleiche Amplitude. Der Modulationsvorgang bei der 4-stufigen DPSK läuft wie folgt ab:

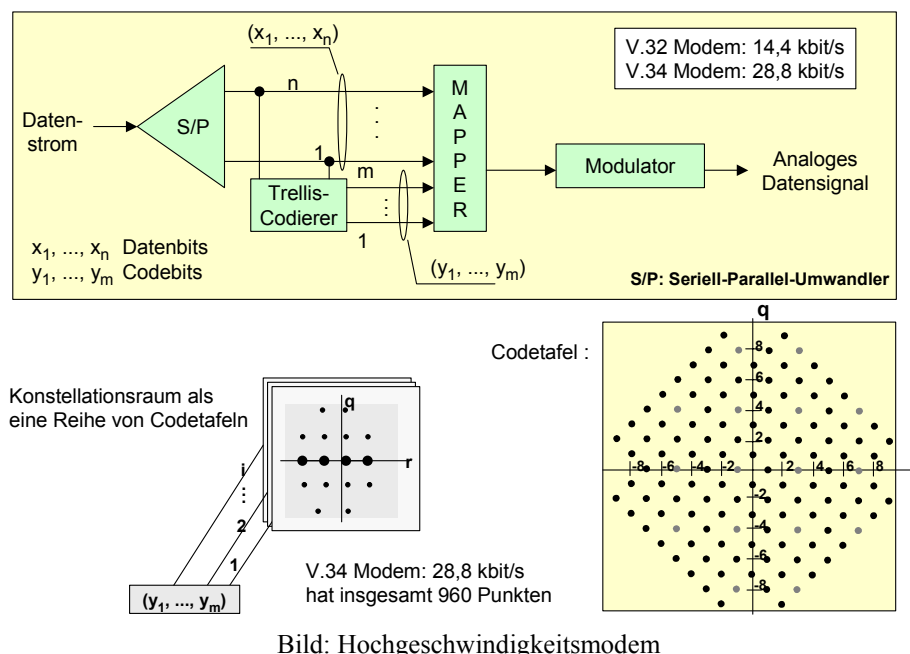
- Wird 00 gesendet, so erfolgt der Phasensprung um 45° .
- Wird 01 gesendet, so erfolgt der Phasensprung um 135° usw. Jeder Phasensprung bezieht sich auf die vorherige Phasenlage. Eine absolute Bezugsphase ist nicht erforderlich.

Das Signalzustandsdiagramm nach ITU-T-Empfehlung V.27 für die 8-stufige DPSK ist ebenfalls gezeigt. Aus diesem Diagramm kann die Zuordnung der Phasensprünge von Trägersignalen für die einzelnen Symbole (Tribits) abgelesen werden.



Bei den mehrstufigen DPSK-Verfahren sind die Punkte in den Zustandsdiagrammen auf einem Kreis verteilt. Dies bedeutet, dass die Trägersignale für alle Symbole die gleiche Amplitude haben. Eine weitere Erhöhung von Modulationsstufen kann durch die Veränderungen der Amplitude von Trägersignalen erfolgen. Dies führt zur sogenannten Quadraturamplitudenmodulation (QAM: Quadrature Amplitude Modulation). Unter der QAM ist im allgemeinen eine kombinierte Amplituden- und Phasendifferenzmodulation zu sehen.

Bei der QAM werden mehrere Amplitudenstufen der Trägersignale für die zu übertragenden Symbole verwendet. Bei der QAM nach V.29 in den Modems mit der Bitrate 9.6 kbit/s werden jeweils vier Bits zu einem Symbol (Punkt) zusammengefasst. Das Bild zeigt die Verteilung dieser Symbole im Signalzustandsdiagramm. Ein Signalzustandsdiagramm wird bei der QAM auch als Konstellationsgitter bezeichnet.



Die QAM wird in Modems verwendet, in denen die Übertragungsgeschwindigkeiten 7.2 und 9.6 kbit/s unterstützt werden. Eine weitere Steigerung der Übertragungsgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Verbesserung der Übertragungsqualität ist durch die sogenannte Trellis-Codierung (in Deutsch: Gitter-Codierung) zu erreichen. Diese Codierung wird in Modems mit der QAM eingesetzt. Dadurch lassen sich die Übertragungsgeschwindigkeiten 14.4 und 28.8 kbit/s erreichen. Die Modems mit diesen Übertragungsgeschwindigkeiten werden auch als High Speed Modems (kurz HS-Modems) bezeichnet.

In HS-Modems wird die QAM mit der Trellis-Codierung verwendet. Auf diese Codierung beziehen sich die Modem-Standards V.32, V.32bis und V.34.

Die zu sendenden Bits werden nach der Seriell/Parallel-Wandlung zu den Bitgruppen (x_1, \dots, x_n) zusammengefasst und an einen Mapper weitergeleitet. Die Bitgruppen werden als Symbole (Punkte) im Konstellationsgitter dargestellt. Der Mapper hat die Aufgabe, das zu sendende Symbol einem Punkt im Konstellationsgitter optimal anzuordnen. Die Konstellation besteht z. B. beim Modems nach V.34 aus einem Gitter mit insgesamt 960 Punkten. Eine so große Anzahl von Punkten wird auf eine Reihe von Tafeln verteilt. Die einzelnen Tafeln werden durch die Codewörter am Ausgang des Trellis-Codierers ausgewählt.

Die Verteilung der zu sendenden Symbole auf mehrere Tafeln ermöglicht die Vergrößerung der Abstände zwischen den benachbarten Symbolen auf den einzelnen Tafeln. Dies führt zu Vermeidung der Fehlentscheidungen an der Empfangsseite. Dieses Prinzip hat nur dann Vorteile, wenn die Nummer der Tafel (d. h. Codewort am Ausgang des Trellis-Codierers) fehlerfrei ist. Dies bedeutet, dass die Tafelnummern besonders zuverlässig übertragen werden müssen.

Im Trellis-Codierer wird sendeseitig eine Redundanz zugefügt, die eine Fehlererkennung und -korrektur ermöglicht. Diese Redundanz ist von den zuvor verarbeiteten Signalen (d. h. von der Vorgeschichte) abhängig. Die Vorgeschichte wird an der Empfangsseite ebenfalls berücksichtigt. Hierfür wird ein sogenannter Viterbi-Decoder verwendet, in dem mit Hilfe des Viterbi-Algorithmus die Vorgeschichte ermittelt wird. Der Decodierungsvorgang beruht darauf, dass alle möglichen Signalabläufe zurückverfolgt werden und der wahrscheinlichste Signalverlauf als der richtige ausgewählt wird. Mit diesem Verfahren lassen sich einzelne Bitfehler mit großer Wahrscheinlichkeit korrigieren. Bei den Gruppenbitfehlern funktioniert dieses Verfahren nicht immer sicher.

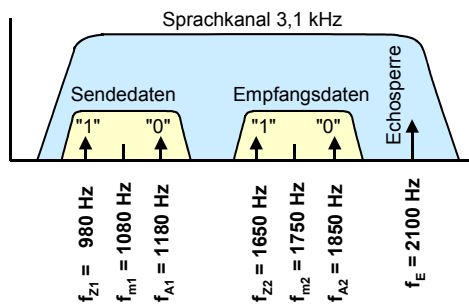
Standard	Modulationsverfahren	Anwendung
V.21	2 PSK	Duplexmodem mit 300 bit/s für Wahlleitungen
V.22	4 PSK	Duplexmodem mit 600 oder 1200 bit/s für Wahlleitungen
V.22bis	16 QAM	Duplexmodem mit 1200 oder 2400 bit/s für Wahlleitungen
V.32	32 QAM	Duplexmodem mit 4800 oder 9600 bit/s für Wahlleitungen
V.32bis	128 QAM	Duplexmodem bis 14400 bit/s für Wahlleitungen
V.34	960 QAM	Duplexmodem bis 33600 bit/s für Wahl- und Mietleitungen
V.90	128 PAM	Asymmetrisches Duplexmodem bis 56000 bit/s downstream und 33600 bit/s upstream
V.92	128 PAM	Erweiterung von V.90 mit diversen Zusatzmerkmalen sowie PCM-Übertragung

Bild: Datenmodems



- **MODulator - DEModulator**
 - Modulation: Digitales Signal in analoges Signal
 - Demodulation: Analoges Signal in digitales Signal
- **Begrenzung der Übertragungskapazität durch Bandbreitenbeschränkung**
 - Sprachband: 300-3400 kHz
- **Begrenzung durch Signal/Rausch Verhältnis (SNR)**
 - SNR typisch 30-35 dB
 - max. 30-35 kbit/s

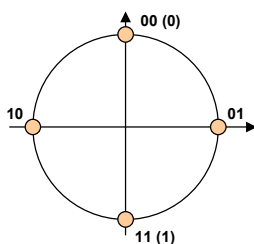
Bild: Modemübertragung



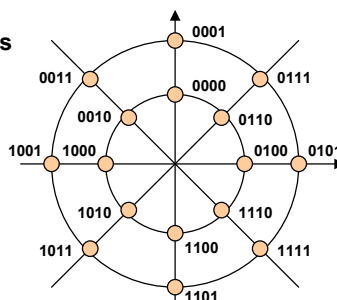
- Modulationsverfahren: 2-PSK
- Nutzung des Telefonkanals bis 300 bit/s, Vollduplex-Betrieb

Bild: Datenmodem: V.21

V.22



V.22bis



Modulation:
Phase Shift Keying (4-PSK)
Datenrate 1,2 kbit/s (600 Baud, 2 Bit)
Vollduplex
- Upstream: 1200 Hz
- Downstream: 2400 Hz

Modulation:
Quadrature-Amplitude Modulation (16-QAM)
Datenrate 2,4 kbit/s (600 Baud, 4 Bit)
Vollduplex
- Upstream: 1200 Hz
- Downstream: 2400 Hz

Bild: Datenmodems: V.22 und V.22bis

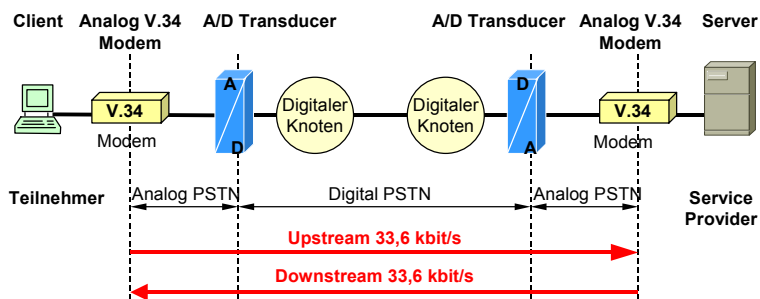
V.32

- Modulation QAM
- Datenrate 9,6 kbit/s (2400 Baud, 5 Bit - 1 Redundanzbit)
- Up/Downstream: 1800 Hz
- Echokompensation

V.32bis

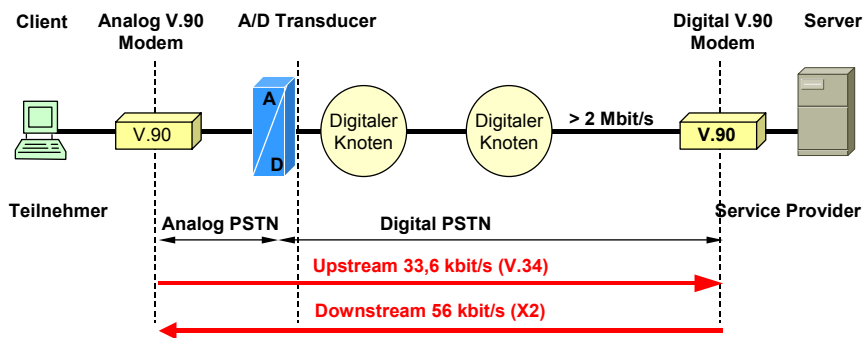
- Modulation QAM
- Datenrate 14,4 kbit/s (2400 Baud, 7 Bit - 1 Redundanzbit)
- Up/Downstream: 1800 Hz
- Echokompensation

Bild: Datenmodems: V.32 und V.32bis



- Modulation QAM
- Datenrate 33,6 kbit/s (2400-3200 Baud)
 - max. 35 kbit/s durch Quantisierungsrauschen des A/D-Wandlers
- Datensicherung und Datenkompression V.42
 - Kompressionsfaktor max. 4

Bild: Datenmodem: V.34



- Weniger Rauschen in Downstream Richtung durch optimale A/D-Wandlung (PCM) in modernen Vermittlungsstellen
- Nichtlineare A/D Wandlung (A-Law, μ -Law)
 - nur 7 Bit (56 kbit/s) von 8 Bit (64 kbit/s) können genutzt werden
- Ende-zu-Ende nur eine A/D-Wandlung möglich - Upstream V.34

Bild: Datenmodem: V.90

- **PCM Upstream**
 - max. 48 kbit/s
- **Modem-On-Hold**
 - Call Waiting Service ermöglicht das Anhalten der Modemverbindung um eingehende Anrufe zu beantworten.
- **Quick Connect**
 - Modem speichert Leitungscharakteristik und ermöglicht so einen schnelleren Verbindungsaufbau (<10 Sekunden).
- **V.44-Kompression**
 - V.42bis wird durch V.44 abgelöst. V.44 kann die Daten um rund 25% besser komprimieren (bis max 300 kbit/s).
- **V.59-Protokoll**
 - minimiert Störungen beim Datenaustausch

Bild: Datenmodem: V.92

xDSL (Digital Subscriber Line)

Dies ist eine Technologie, die im allgemeinen. ungenutzte Frequenzbereiche von Kupferadern für Datenübertragung verwendet. Verschiedene Varianten wie ADSL, SDSL oder VDSL werden zusammenfassend als xDSL bezeichnet. Die Entwicklungsfänge gehen auf das Jahr 1987 zurück. Das erste DSL-Verfahren wurde entwickelt, um Video-on-Demand und interaktives Fernsehen über Kupferkabel übertragen zu können. Als klar wurde, dass eine flächendeckende Glasfaserverkabelung an alle denkbaren Standorte (Consumer-Market) nicht möglich war (Preis), und es zudem die Liberalisierung des Telekommunikationsmarktes begann, wurde die DSL-Idee ab 1996 neu belebt.

	Datenrate Downstream - Upstream	Entfernung km	Modulation	Bandbreite
VDSL	25 Mbit/s – 1,6 Mbit/s	0.9	QAM (DMT)	~30 MHz
ADSL	8 Mbit/s - 1 Mbit/s	5.5	DMT/CAP	~1 MHz
HDSL	1,5 Mbit/s – 1,5 Mbit/s	4.6	2B1Q/CAP	~240 kHz
SDSL	784 kbit/s - 1784 kbit/s	6.9	2B1Q/CAP	~240 kHz
IDSL	144 kbit/s - 144 kbit/s	5.5	2B1Q (4B3T)	~80 (120) kHz

DSL: Digital Subscriber Loop HDSL: High Bit Rate DSL QAM: Quadrature Amplitude Modulation
 VDSL: Very High Bit Rate DSL SDSL: Symmetric DSL DMT: Discrete Multi-Tone Modulation
 ADSL: Asymmetric DSL IDSL: ISDN-DSL CAP: Carrierless Amplitude/Phase Modulation

Bild: xDSL Technologien

- **ADSL:**
 - meist verbreitetste DSL-Lösung
 - unterschiedliche Up- und Downstream-Geschwindigkeiten
 - Downstream bis zu 8 Mbit/s
 - Upstream bis zu 0,8 Mbit/s
 - parallele Übertragung von Daten und Sprache über eine Kupferdoppelader
 - gutes Verhältnis zwischen Bandbreite und überbrückbarer Entfernung
 - Adaptives Modulations-Verfahren, welches sich dynamisch an die Leitungsqualität anpaßt (DMT, CAP)
- **Standards**
 - ITU-T G.992.1
 - ANSI T1.413-1998

Bild: ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)

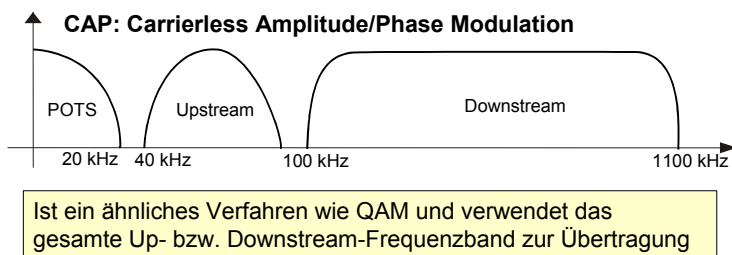
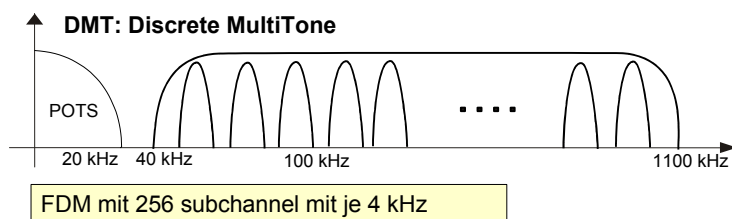


Bild: ADSL-Modulationsverfahren

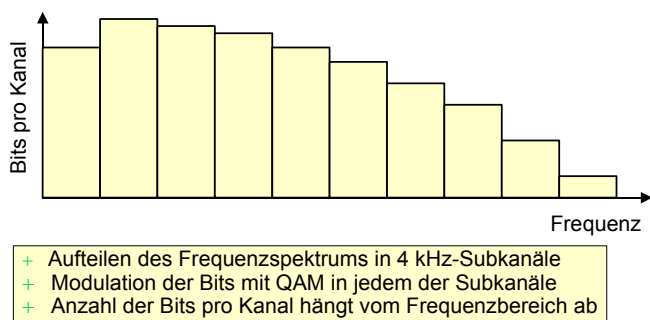


Bild: Discrete Multi-Tone Modulation (DMT)

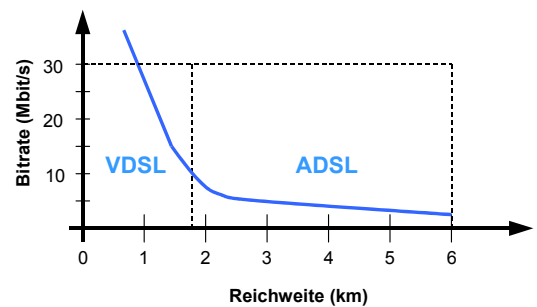


Bild: ADSL-Reichweite