

# Datenkommunikation und Sicherheit

## Kapitel 2: Bitübertragungsschicht

Klaus Wehrle

Communication and Distributed Systems

Chair of Computer Science 4

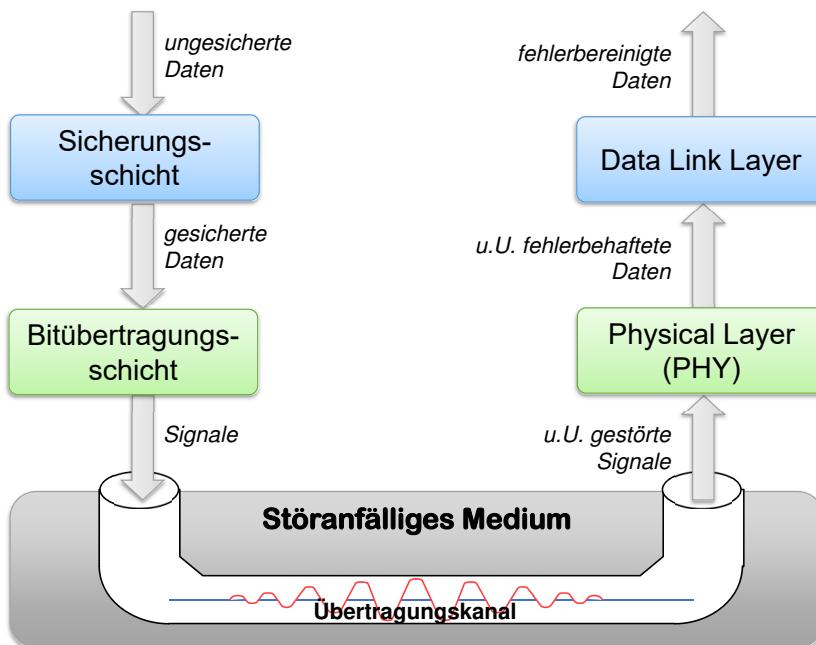
RWTH Aachen University

<http://www.comsys.rwth-aachen.de>



II-1

## Bitübertragungsschicht und Sicherungsschicht



Die beiden untersten Schichten sorgen gemeinsam für eine fehlerfreie Datenübertragung zwischen benachbarten Rechnern. „Benachbart“ heißt, dass die kommunizierenden Rechner durch ein physikalisches Medium direkt miteinander verbunden sind.

Die Bitübertragungsschicht bietet als Medium nachrichtentechnische Kanäle, die einen ungesicherten, längenbeschränkten, ungepufferten Nachrichtenaustausch zwischen einer beschränkten Anzahl von angeschlossenen Einrichtungen unterstützen:

- ungesicherte Verbindung zwischen Systemen (d.h. es können Fehler bei der Übertragung auftreten)
- Übertragung unstrukturierter Bitfolgen über das physikalische Medium
- Normung der physikalischen Schnittstellen zwischen Rechner und Medium
- Umsetzung von Daten in Signale

Die Sicherungsschicht erweitert einen nachrichtentechnischen Kanal zum eigenständigen, abstrakten Medium „gesicherter Kanal“. „Gesichert“ heißt hierbei: fehlerfrei:

- Zerlegung des Bitstromes in Rahmen (Frames) als Basiseinheit der Übertragung
- Fehlererkennung und –behandlung (Quittungen und Übertragungswiederholungen, siehe Alternating Bit Protocol)
- Flusskontrolle (Vermeidung der Überlastung/Pufferüberlauf des Empfängers)
- Regelung des Zugriffs auf ein Medium, welches gemeinsam von mehreren Stationen verwendet wird.

# Themenübersicht

## • Datenkommunikation und Sicherheit

- ▶ Dienste, Protokolle und Referenzmodelle
- ▶ Technische und nachrichtentechnische Grundlagen: Medien, Signale, Bandbreite, Leitungscodes und Modulation, Multiplexing
- ▶ Lokale Netze: Strukturierung des Datenstroms, Fehlererkennung/-behebung, Flusssteuerung, Medienzugriff, Ethernet
- ▶ Internet und Internet-Protokolle:
  - Vermittlungsschicht: IP, Routing
  - Transportschicht: TCP
- ▶ Grundlagen der Sicherheit in/von Kommunikationsnetzen
  - Grundlagen: Verschlüsselung, Authentifizierung, Integrität
  - Sichere Internet-Protokolle

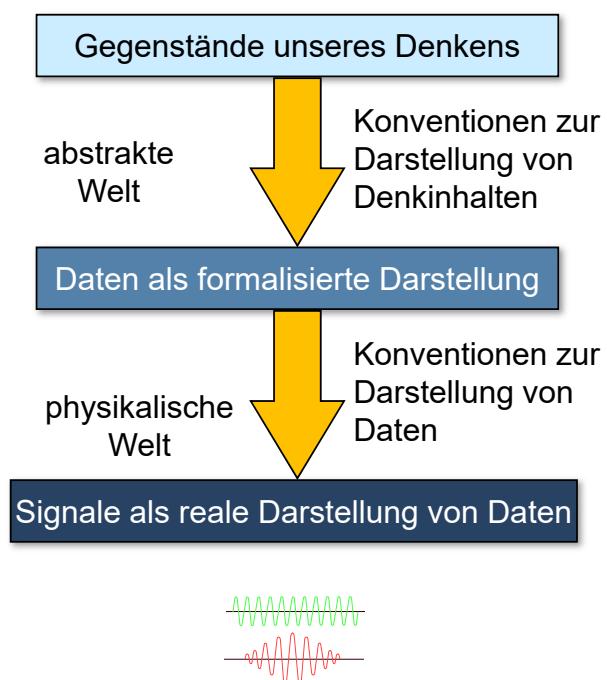
# Wiederholung: Daten und Signale

## • Daten

- ▶ Darstellung von Sachverhalten, Konzepten, Vorstellungen und Anweisungen in formalisierter Weise

## • Signal

- ▶ Physikalische Darstellung von Daten durch charakteristische räumliche und/oder zeitliche Veränderungen der Werte physikalischer Größen
- ▶ Reale physikalische Repräsentation der Daten



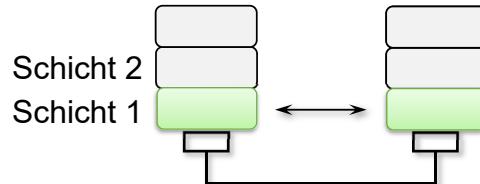
Kurze Wiederholung: Daten und Signale.

Gegenstände unseres Denkens (beispielsweise Fakten, Konzepte, Vorstellungen und Modelle) werden in formalisierter Weise dargestellt: als *Daten*. Unter dem Begriff „Daten“ versteht man also die Darstellung von Sachverhalten (Fakten), Konzepten, Vorstellungen und Anweisungen in formalisierter Weise, die für die Kommunikation, Interpretation und die Verarbeitung durch Menschen und/oder technische Mittel geeignet ist. Beispiele für Daten sind die gesprochene Sprache, die geschriebene Sprache oder Zeichen- und Gebärdensprache.

Durch entsprechende Konventionen können Daten in physikalische *Signale* gewandelt werden, beispielsweise in Form von sinusförmigen Schwingungen. Dies ist eine grundlegende Notwendigkeit – Signale sind eine Repräsentation der Daten, die über ein physikalisches Medium übertragen werden können. Die Art der verwendbaren Signale hängt direkt vom Medium selbst ab (Strom, Licht, ...).

- **Aufgaben der Bitübertragungsschicht (Schicht 1)**

- ▶ Englisch: Physical Layer, PHY
- ▶ Unterste Schicht, sitzt direkt auf dem physikalischen Medium
  - Übertragung unstrukturierter Bitfolgen über physikalisches Medium
  - Umfasst u.a. physikalischen Anschluss, Umsetzung Daten  $\Leftrightarrow$  Signale
  - Ungesicherte Verbindung zwischen Systemen
- ▶ Normung vor allem der physikalischen Schnittstelle Rechner/Medien
  - Beispiele (nur Schnittstelle, nicht die entsprechenden Protokolle):
    - Ethernet (Yellow Cable, BNC, RJ-45 etc.)
    - USB
    - Wi-Fi
    - LTE/5G



Die unterste Schicht im ISO/OSI-Modell ist die Bitübertragungsschicht (Physical Layer). Da die Bitübertragungsschicht direkt auf dem physikalischen Medium sitzt (z.B. ein Kabel, aber auch die Luftschnittstelle beim Mobilfunk), wird das physikalische Medium auch als „Schicht 0“ bezeichnet.

Die Aufgaben der Bitübertragungsschicht sind demzufolge hardwarenah: Festlegung des physikalischen Mediums und der Repräsentation digitaler Informationen auf dem Medium durch Signale, der Pinbelegung in Steckern, ...

Zu berücksichtigen ist, dass die Übertragung von Daten ungesichert ist: durch Störeinflüsse können Daten während der Übertragung verfälscht werden, aber es wird nicht versucht, solche Situationen zu erkennen oder mit Fehlern umzugehen – dies bleibt der nächsthöheren Schicht überlassen.

# Kapitel 2: Bitübertragungsschicht

- **Grundlagen**

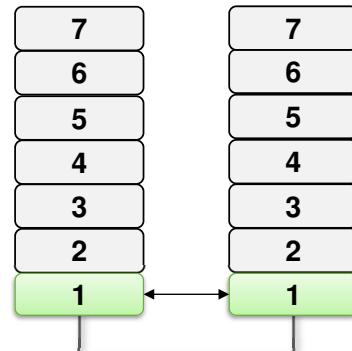
- ▶ Übertragungsmedien
- ▶ Signale und Bandbreite

- **Übertragung von Signalen**

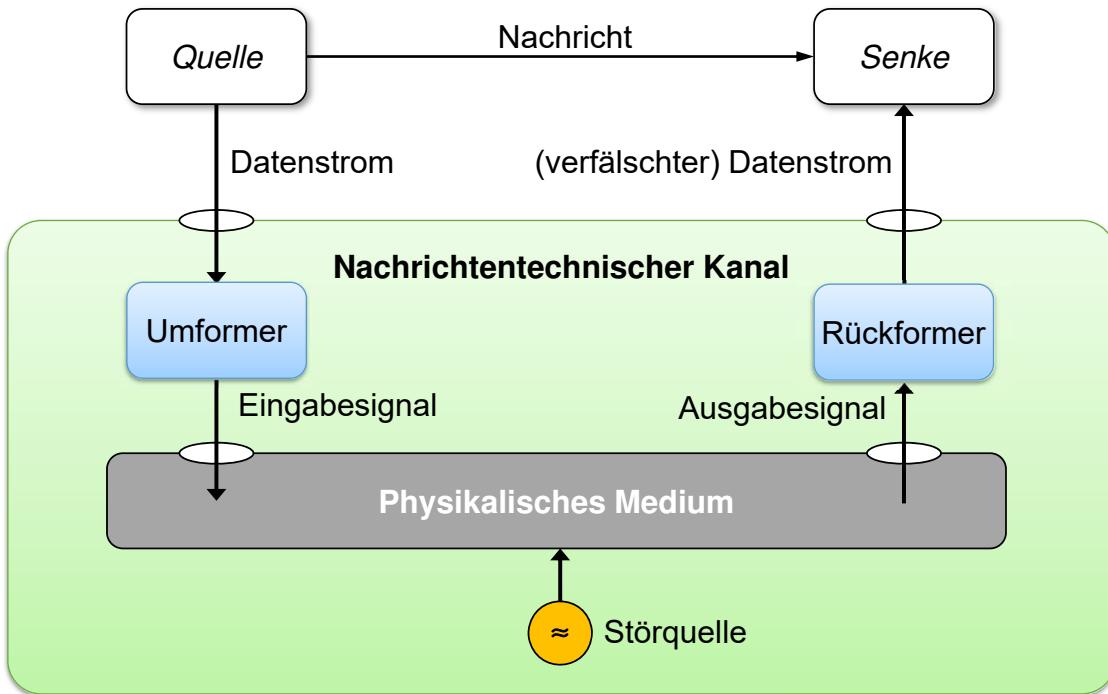
- ▶ Umformung, Basisband, Modulation
- ▶ Übertragungsparameter, Störeinflüsse
- ▶ Leitungscodes und Modulationsverfahren
- ▶ PCM

- **Kanalnutzung**

- ▶ Multiplexing



# Modell eines einfachen Übertragungssystems

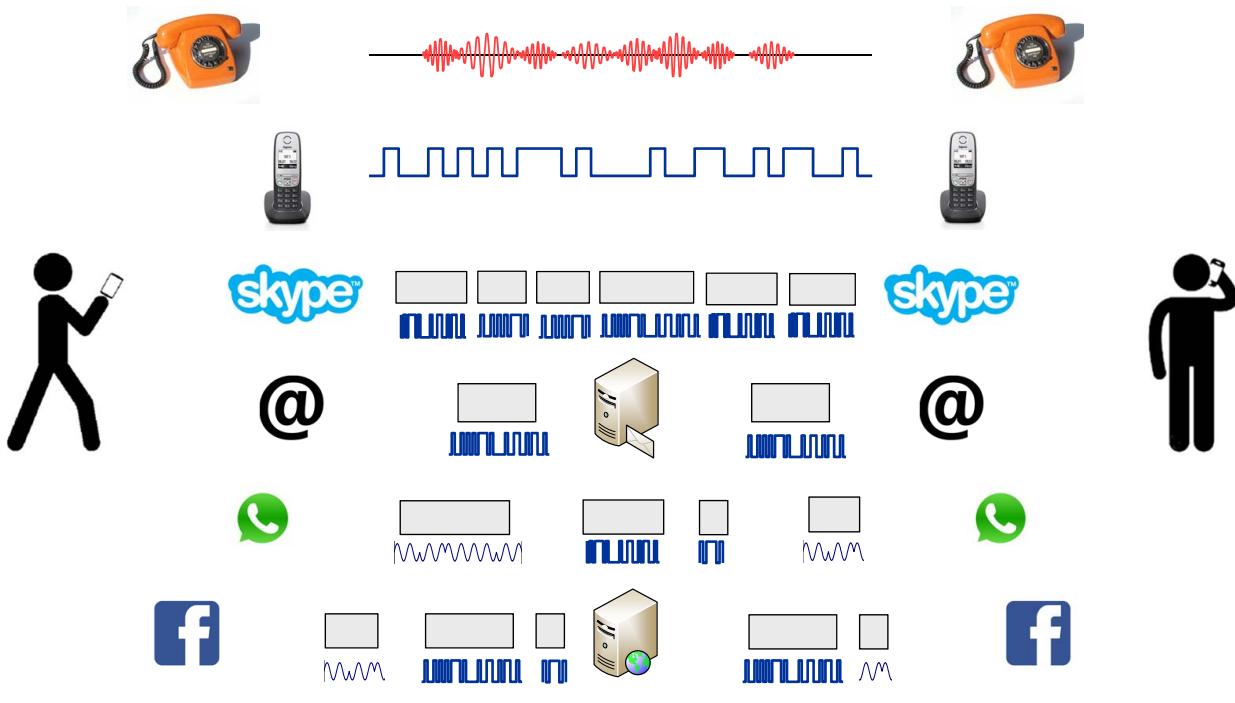


Im Folgenden werden Aspekte der Übertragungsmedien und der Schicht 1 betrachtet, d.h. nachrichtentechnische Grundlagen der Datenkommunikation. Die Behandlung dieser Problematik geht aber nur soweit, wie es für einen Informatiker relevant ist.

Das obige Modell eines einfachen Übertragungssystems unterscheidet folgende drei Ebenen:

- *Quelle*, die eine Nachricht (ein Folge von Eingabesignalen – meist digital vorliegende Daten, letztlich eine Folge von Bits) an die *Senke* überträgt
- *Nachrichtentechnischer Kanal*: zur Übertragung des Eingabesignals (der Daten / des Bitstroms) über ein konkretes physikalisches Medium müssen die Daten in andere Signale transformiert werden, die das Medium transportieren kann. Die Transformation muss so erfolgen, dass die entstehenden Signale gut übertragen und auf der Gegenseite eindeutig rücktransformiert werden können. Dafür sind die beiden Bestandteile *Umformer* und *Rückformer* im nachrichtentechnischen Kanal zuständig. Durch den Umformer entsteht ein Eingabesignal: eine physikalische Größe, wie etwa der Amplitudenwert einer elektrischen Spannung, dessen Wert sich im Verlauf der Zeit ändert.
- Das *Medium*, durch welches die räumliche Distanz zwischen Quelle und Senke letztendlich überbrückt wird. Das physikalische Medium gehört mit zum nachrichtentechnischen Kanal. Die Übertragung des Eingabesignals über das Medium ergibt auf der Seite der Senke ein Ausgabesignal. Während der Übertragung können Störungen auftreten, die zu einer Verfälschung des Signalverlaufs führen. Im Modell des nachrichtentechnischen Kanals werden alle möglichen auftretenden Störungen in einer Störquelle zusammengefasst. Das Ausgabesignal ist dann eine Funktion des Eingabesignals und des Signals der Störquelle. Die Senke erhält nach Rücktransformation des Ausgabesignals einen eventuell verfälschten Bitstrom.

# Übertragungssystem: Beispiele



Es gibt eine Vielzahl von möglichen Umsetzungen eines Übertragungssystems. Das älteste System ist das analoge Telefon. Hier wird das Eingabesignal (Sprache, ein analoges Signal) durch ein Mikrofon erfasst und so umgeformt (moduliert), dass sie auf dem Telefonkanal als elektromagnetische Welle (analog) übertragen werden können. Das Medium ist ein Kupferkabel.

Beim digitalen Telefon wird das Eingabesignal (Sprache) als digitales Signal auf das Medium (Kupferkabel) gesetzt. Das Medium ist also das gleiche wie beim analogen Telefon, nur die Umformung ist unterschiedlich. Auch das digitale Signal ist ein elektromagnetisches Signal.

Bei Voice-over-IP oder Videotelefonie wie mit Skype wird das Eingabesignal auch digital übertragen, allerdings nicht als Strom von Audiodaten (Bitfolge), sondern als Strom von Paketen, die jeweils einen Teil der Daten enthalten.

Neben diesen synchronen Formen der Kommunikation gibt es auch asynchrone Systeme, bei denen Quelle und Senke nicht gleichzeitig aktiv sein müssen. Dazu zählt E-Mail – die Quelle überträgt die Nachricht als Paket hin zu einem Mailserver, von dem die Senke die Nachricht jederzeit abrufen kann.

Bei WhatsApp wird eine Chatnachricht ebenfalls digital als Paket übertragen, wird der Senke allerdings direkt zugestellt. Hier erfolgt die Übertragung über ein

analoges Medium – einen Funkkanal.

Eine ganz andere Form der Übertragung sind Systeme wie Facebook – die Daten werden digital in Form von Paketen auf die Facebook-Server gepostet, wo andere Personen sie jederzeit abrufen können.

Während es diese Vielzahl von Kommunikationsformen gibt (analog/digital, synchron/asynchron, Bitstrom/Paketstrom, ...), interessiert uns auf der technischen Ebene nur die physikalische Übertragung der Daten – Pakete existieren auf dieser Ebene noch nicht, es werden nur unstrukturierte Bitfolgen betrachtet, die übertragen werden müssen. Dies kann digital oder analog erfolgen. Ebenso kann die Umformung von/zu digital/analog erfolgen.

Ganz generell haben analoge und digitale Signale allerdings eine Gemeinsamkeit: beide sind elektromagnetische Signale.

# Umformung digital/analog

- Mögliche Umformungen:

- *Analog → Analog:*

- Ursprüngliches Telefon (engl.: POTS = Plain Old Telephone System), (analoger) Rundfunk



- *Analog → Digital:*

- Digitale Telefonie, Voice-over-IP (VoIP)



- *Digital → Analog:*

- Digitaldatenübertragung über analoges Netz (MODEM-Technik, DSL) oder mittels Funk-/Satellitentechnik



- *Digital → Digital:*

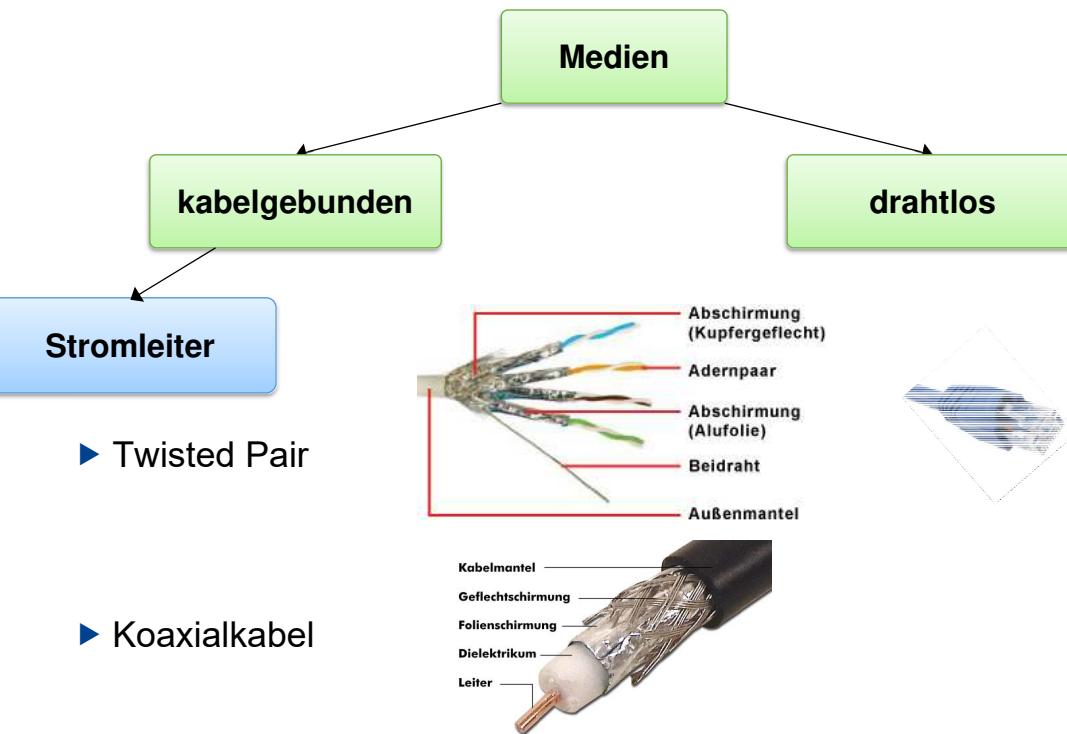
- Leitungscodierung im Basisbandverfahren



Ein wesentlicher Aspekt des Übertragungssystems ist, welche Art von Signalen verwendet werden, um Daten über ein bestimmten Medium zu transportieren, und wie die Umformung der zu übertragenen Daten auf das medienbezogene Signal stattfindet. Im Modell des Übertragungssystems ist eine Umformer- und eine Rückformer-Einheit vorgesehen, welche das Übertragungsverfahren durchführt.

Je nach Art der zu übertragenen Daten und des medienbezogenen Signals können vier Arten von Umformung gebildet werden.

# Physikalische Medien



Generell kann man Übertragungsmedien in kabelgebunden und drahtlos unterteilen. Betrachten wir zunächst die kabelgebundenen Medien – diese kann man noch weiter unterteilen. Eine Unterkategorie ist die der Stromleiter – auf diesen Medien können Daten analog als elektromagnetische Welle oder digital als Folge von Strompulsen übertragen werden.

Wichtige Stromleiter sind Twisted Pair (verdrillte Kupferdoppelader) und Koaxialkabel.

**Twisted Pair (TP):** Zwei Kupferdrähte werden verdrillt, um Störeinflüsse abzuschwächen. Solch ein Kabelpaar wurde bereits für das analoge Telefonnetz verwendet: die Sprache wurde aufmoduliert und als elektromagnetisches Signal über solche ein Adernpaar übertragen. Als TP-Kabel bezeichnet man heute vier solche Adernpaare die in einer gemeinsamen Ummantelung enthalten sind. Mittels sogenannter RJ45-Stecker wird diese Kabelform heutzutage z.B. beim Ethernet eingesetzt.

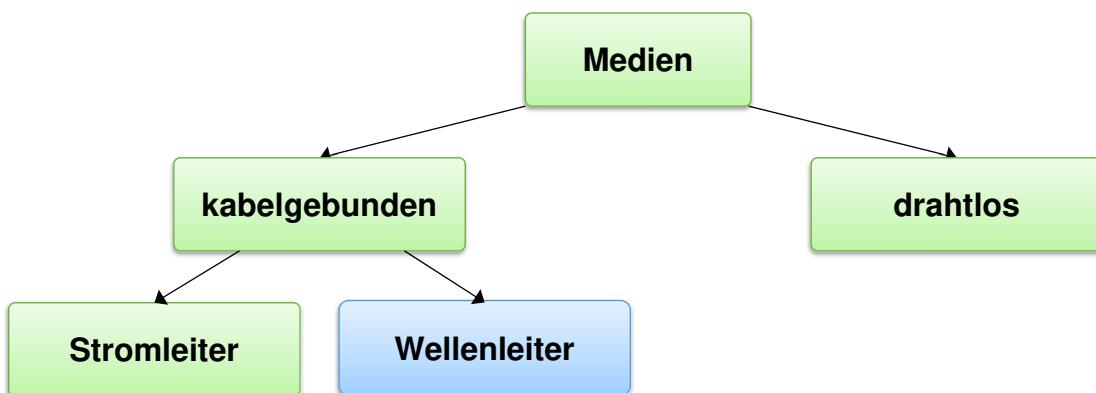
Die Basisvariante (vier Paare im Außenmantel) wird als „Unshielded Twisted Pair“ (UTP) bezeichnet. Neben UTP gibt es auch noch teurere, abgeschirmte Kabel (STP, Shielded Twisted Pair), bei denen die einzelnen Adernpaare durch Alufolie gegeneinander abgeschirmt werden und ein Kupfergeflecht die vier Adernpaare noch einmal nach außen hin abschirmt. Je mehr Abschirmung, desto weniger Störfelder erzeugen die Kabel in der Umgebung und umso weniger Störungen auf dem Kabel rufen elektromagnetische Störsignale in der Umgebung hervor.

TP-Kabel werden in unterschiedliche Kategorien aufgeteilt, UTP/STP 1 bis 7 (häufig auch als CAT 1 bis CAT 7 bezeichnet), die mit zunehmender Nummer eine größere Bandbreite bieten, die sich zur Übertragung nutzen lässt; eine größere Bandbreite bedeutet auch eine höhere erzielbare Datenrate. Zudem lassen sich bei höheren Kategorien größere Entfernungen überbrücken, ohne dass die Signalqualität stark vermindert wird. Bandbreite und Signalqualität werden im weiteren Verlauf des Kapitels noch genauer behandelt.

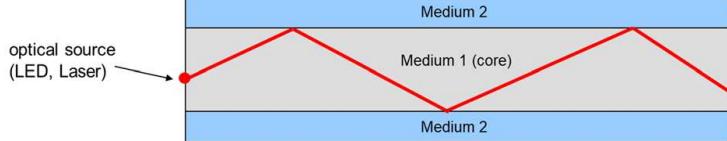
CAT 3 bis 7 werden für Netzwerke verwendet – CAT 3 dürfte noch in älteren Netzen zu finden sein, CAT-5-Kabel sind derzeit möglicherweise (noch) am weitesten verbreitet, CAT 6 oder 7 werden mittlerweile bevorzugt verlegt, da sie die größte Bandbreite bieten und damit die heute interessanten Datenraten erreichen können. Eine Kategorie 8 ist bereits auch geplant. Weitere Details zu den Kategorien sind hier uninteressant; bei Interesse sei z.B. auf Wikipedia verwiesen (<http://de.wikipedia.org/wiki/Twisted-Pair-Kabel>).

Koaxialkabel: Besser abgeschirmte Kupferkabel, die allerdings ziemlich unflexibel sind. Dadurch können eine höhere Bandbreite und eine bessere Signalqualität erzielt werden. In den Anfangszeiten in Ethernet benutzt, aufgrund der einfacheren Handhabung mittlerweile durch TP-Kabel abgelöst.

# Physikalische Medien



► Glasfaser



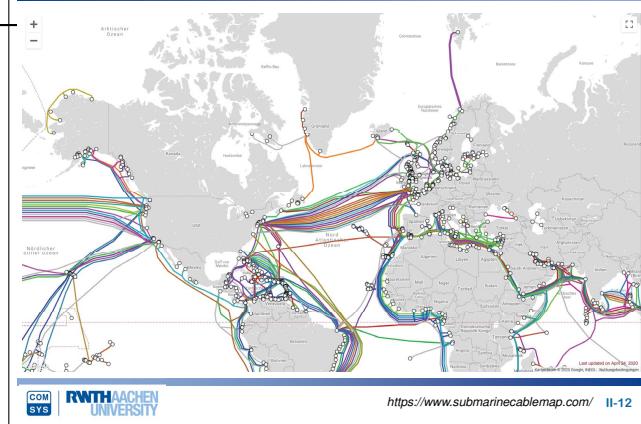
Bei Glasfaser werden Daten im Form von Licht übertragen – einer elektromagnetischen Welle.

Das Licht wird in den Glaskern des Kabels geleitet. Um den Kern herum befindet sich ein Mantel mit einer größeren optischen Dichte als der Glaskern, so dass es zur Totalreflexion kommt und die Lichtwellen sich nur innerhalb des Glaskerns ausbreiten. Durch eine schützende Ummantelung wird das Glas vor Beschädigungen geschützt, aber auch vor Störungen: es können keine Lichtsignale von außen eindringen und die Übertragung stören.

Glasfaserkabel haben typischerweise eine höhere Bandbreite als Kupferkabel, und die Signalqualität bleibt über längere Strecken sehr gut, so dass sehr hohe Datenraten über weitere Strecken erzielt werden können. Während Kupferkabel bevorzugt in lokalen Netzen eingesetzt werden, werden Glasfaserkabel in Backbones verwendet.

Wie bei den Kategorien von TP-Kabeln gibt es auch unterschiedliche Arten von Glasfaser, die sich in Bandbreite und Signalqualität unterscheiden (<http://de.wikipedia.org/wiki/Lichtwellenleiter>).

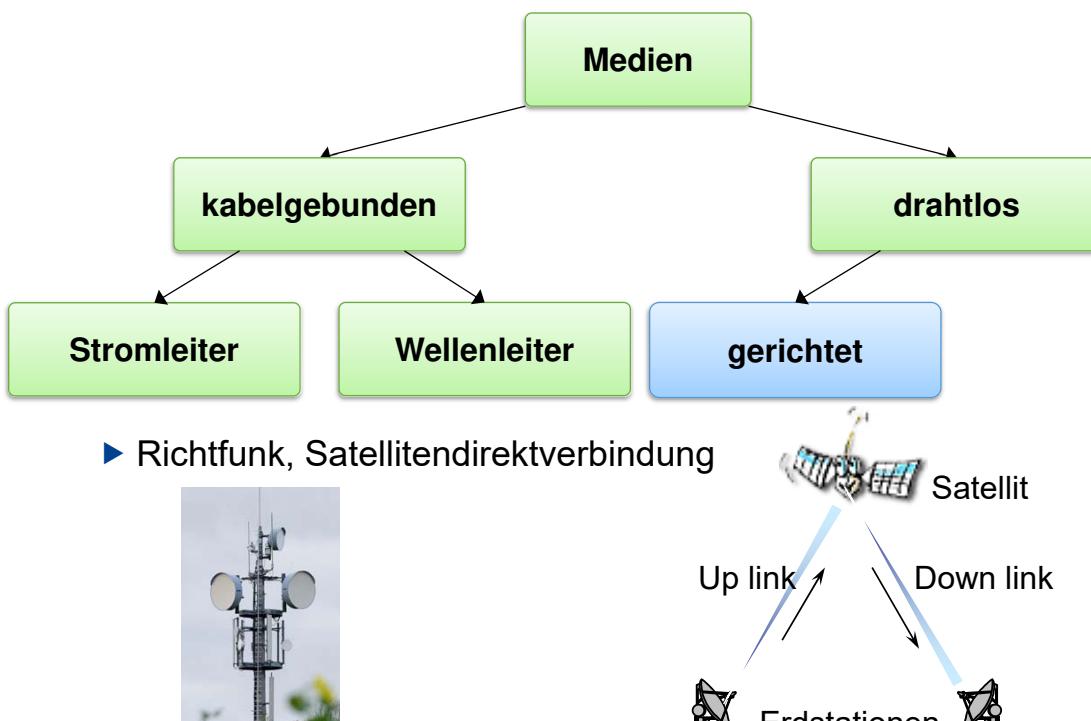
Physikalische Medien - Glasfaser



Video zur Unterwasserübertragung: <https://youtu.be/4xGxotBk8AM?t=23412>

(Das Video beinhaltet noch deutlich mehr drum herum, nicht von der Länge abschrecken lassen. Der Unterwasserteil beginnt bei ca. 6:30)

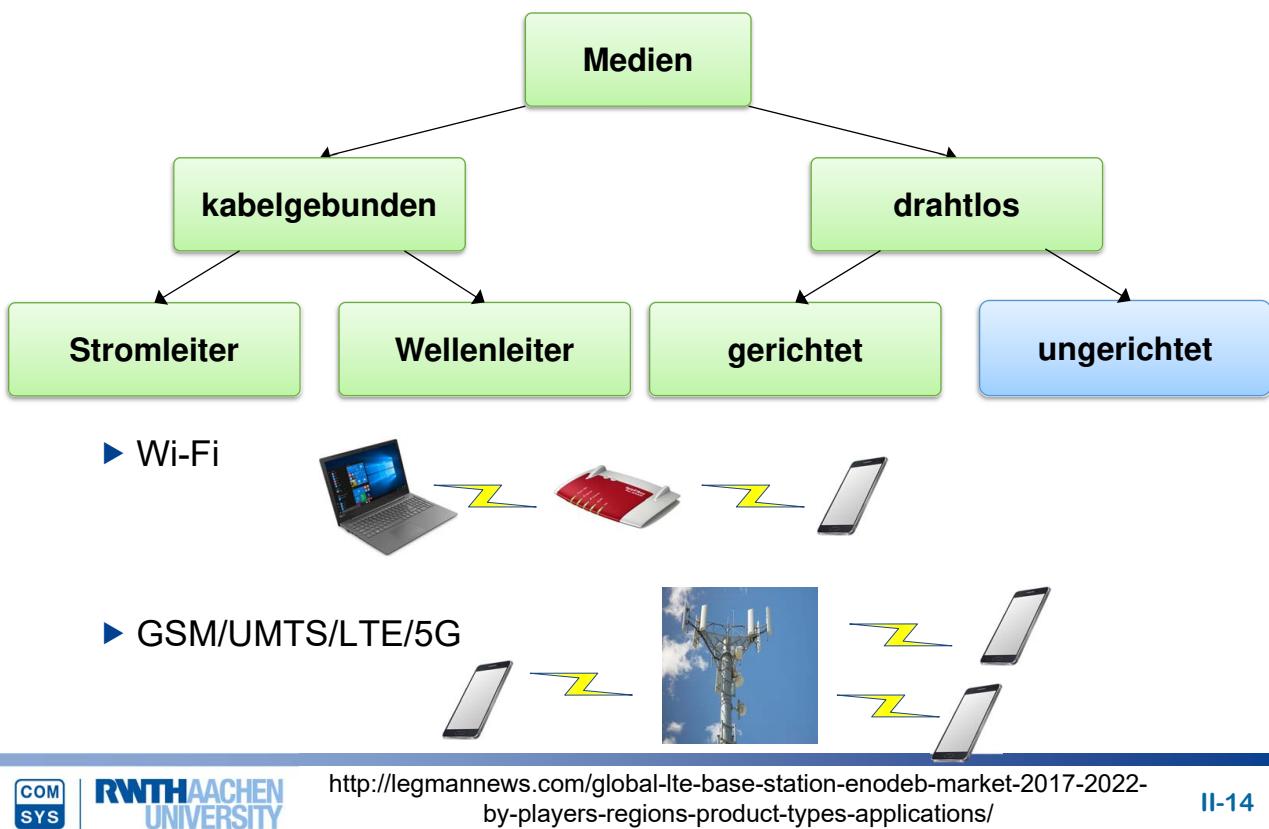
# Physikalische Medien



Auf drahtlosen Kanälen werden Daten analog als elektromagnetische Welle übertragen. Digitale Daten werden auf den Funkkanal aufmoduliert.

In gerichteten System verwendet man Frequenzen von  $10^9$  -  $10^{11}$  Hz. Beispiel Satellitendirektverbindung: ein Transponder im Satellit empfängt Daten auf einem Kanal und sendet auf einem anderen Kanal. Pro Kanal steht eine hohe Bandbreite zur Verfügung.

# Physikalische Medien

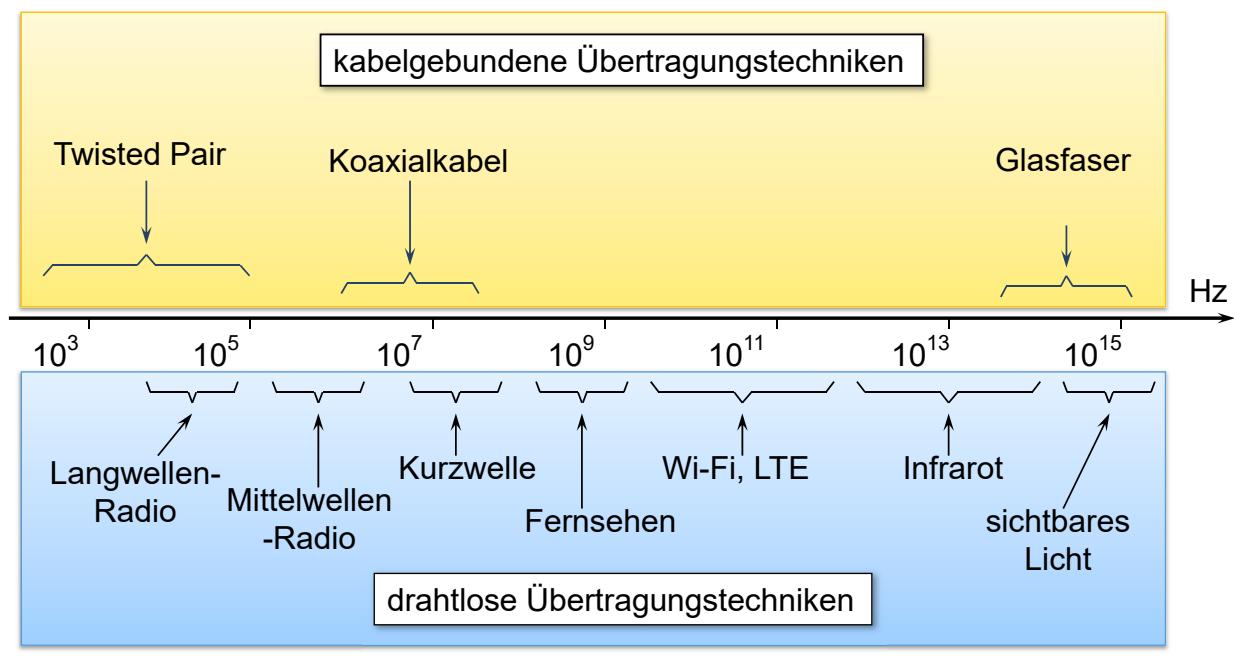


Auf drahtlosen Kanälen werden Daten analog als elektromagnetische Welle übertragen. Digitale Daten werden auf den Funkkanal aufmoduliert. Es werden Frequenzen im Bereich  $10^4$  -  $10^9$  Hz verwendet.

Bei ungerichteten Systemen gibt es meist eine Basisstation (oder Access Point), zu der sich alle Geräte in Empfangsreichweite verbinden. Die Geräte (Laptops, Smartphones, ...) kommunizieren über diese zentrale Komponente mit anderen drahtlosen Geräten oder in kabelgebundene Netze.

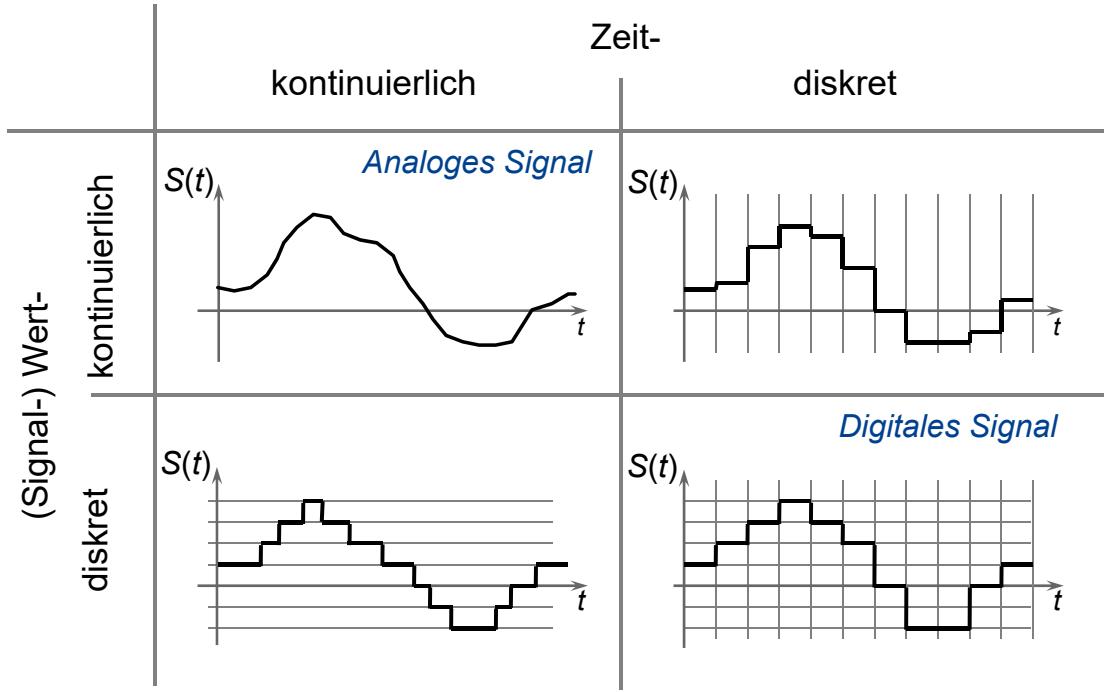
Das generelle Prinzip von Wi-Fi und Mobilfunknetzen wie LTE ist hierbei das gleiche. Nur die Umsetzung ist aufgrund des Einsatzzwecks unterschiedlich: Wi-Fi ermöglicht Kommunikation im lokalen Umfeld mit hohen Datenraten, Mobilfunknetze erzielen geringere Datenraten, bieten dafür aber eine sehr gute Mobilitätsunterstützung.

# Nutzung des elektromagnetischen Spektrums



Gemeinsam haben letztlich alle relevanten Medien, dass elektromagnetische Signale zur Datenübertragung genutzt werden. Gezeigt werden hier die Frequenzbänder verschiedener Übertragungsmedien.

# Signalklassen



Ganz allgemein kann der Begriff des Signals noch weiter gefasst und auf andere Bereiche angewendet werden. Ein Signal kann Informationen transportieren, indem die Signalparameter modifiziert werden (z.B. +1 Volt und -1 Volt Spannung auf einem Kupferkabel).

Neben den hier interessanten Signalen gibt es auch ortsabhängige und somit räumliche Signale, die für das Speichern von Daten verwendet werden. Dazu zählen beispielsweise optische Speicher (wie beschriebenes oder bedrucktes Papier), optische Platten (wie CD-R oder DVD) oder magnetische Speicher wie z.B. die Festplatte.

Interessant für uns sind zeitabhängige Signale, deren Parameter im Laufe der Zeit verändert werden, um z.B. eine Bitfolge übertragen zu können. Als Grundsatz gilt dabei: Jedes ortsabhängige Signal ist in ein zeitabhängiges Signal überführbar („Lesen“, Abtasten) und umgekehrt („Schreiben“, Aufzeichnen). Diese Vorlesung behandelt ausschließlich zeitabhängige Signale. Für die Klassifikation solcher Signale sind die Parameter „Zeit“ und „Signalwert“ von Interesse. Signale werden graphisch häufig durch Ihren von der Zeit abhängigen Signalwert dargestellt.

Die auf nachrichtentechnischen Kanälen eingesetzten Signale lassen sich in vier Klassen einordnen. Die Signalklassen machen eine Aussage über den Signalverlauf, welcher durch seinen Signalwert-Verlauf (y-Achse  $s$ ) über die Zeit (x-Achse  $t$ ) bestimmt ist. Die unterschiedlichen Signalklassen ergeben sich aus der Kombination des Wert- und Zeitverlaufs:

- Kontinuierlich: stetiger Verlauf (kein Abstand zwischen je zwei Punkten)
- Diskret: sprunghafter Verlauf (Einschränkung auf bestimmte Werte)

Der kontinuierliche und der diskrete Fall können in beliebigen Kombinationen auf Wert- und Zeitverlauf angewendet werden. Insgesamt können somit 4 Signalklassen unterschieden werden:

- Signal- und zeitkontinuierlich: z.B. analoges Telefon, Rundfunk: Weder der Signalwert, noch der Zeitverlauf wird zerhackt. Das entspricht dem klassischen analogen Signal.

- Signalkontinuierlich und zeitdiskret: z.B. periodisches Messen von analogen Werten eines technischen Prozesses: Der technische Prozess könnte z.B. ein Überwachungsprozess sein, in dem von einem Sensor alle 10 Sekunden oder auch auf Anfrage die bestehende Lichtintensität in [Lux] gemeldet wird.
- Signaldiskret: digitale Übertragung mit beliebigen Signalwechseln (zeitkontinuierlich) oder festem (meist isochronem) Taktraster (zeitdiskret). In diesem Fall spricht man von einem digitalen Signal.

Wenn möglich, wird heutzutage die physikalische Übertragung von Daten digital vorgenommen, da hierdurch eine Übertragung der Daten über weitere Strecken mit besserer Qualität möglich ist. Dies kann man sich einfach anhand des Beispiels „Sprache“ klar machen: überträgt man Sprachdaten analog, werden die Wellenformen im Laufe der Übertragung durch Störeinflüsse verzerrt, d.h. die Amplitudenwerte werden modifiziert. Da jeder Amplitudenwert gültig ist, kann der Empfänger nicht erkennen, wo eine Modifikation stattgefunden hat. Gibt man die Sprachinformation wieder, hat man im Hintergrund ein Rauschen. Müssen die Sprachinformationen weitergeleitet werden, werden sie bereits verzerrt weitergeleitet und auf der nächsten Teilstrecke weiter verfälscht. Digitale Signale sind nicht so anfällig – da nur bestimmte Signalwerte erlaubt sind, kann der Empfänger die erhaltene Signalfolge abtasten und die verzerrten Signale auf die nächsten erlaubten Werte korrigieren. So werden die meisten Störungen rausgefiltert und auch bei einer Weiterleitung über mehrere Strecken keine Fehler propagiert.

Die zweiwertige digitale Übertragung (Binärübertragung) ist ein Spezialfall des signaldiskreten Verlaufs, da hier die zulässigen Signalwerte auf zwei begrenzt werden. Dieser Spezialfall wird in der Praxis oft verwendet (siehe im weiteren Verlauf des Kapitels: Leitungscodes).

Es gibt mehrere Verfahren im Bereich der Datenkommunikation, um ein Signal einer bestimmten Klasse in ein Signal einer anderen Klasse zu wandeln.

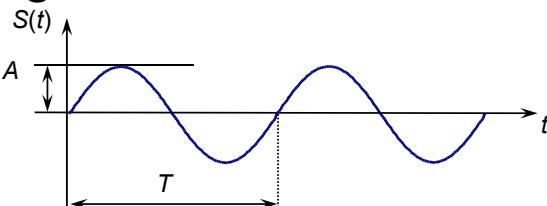
# Periodische und digitale Signale

- **Kenngrößen periodischer Signale:**

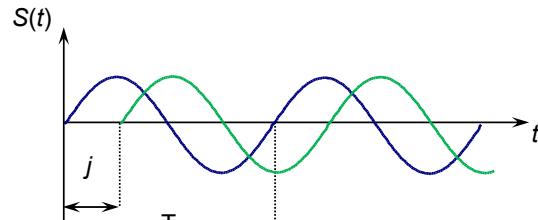
- ▶ Periode  $T$ , Frequenz  $f = 1/T$ , Amplitude  $A$ , Phase  $j$

- **Beispiele:**

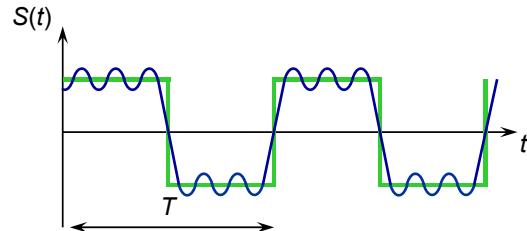
- ▶ Sinus-Schwingung



- ▶ Phasendifferenz  $j$



- ▶ Rechteckschwingung



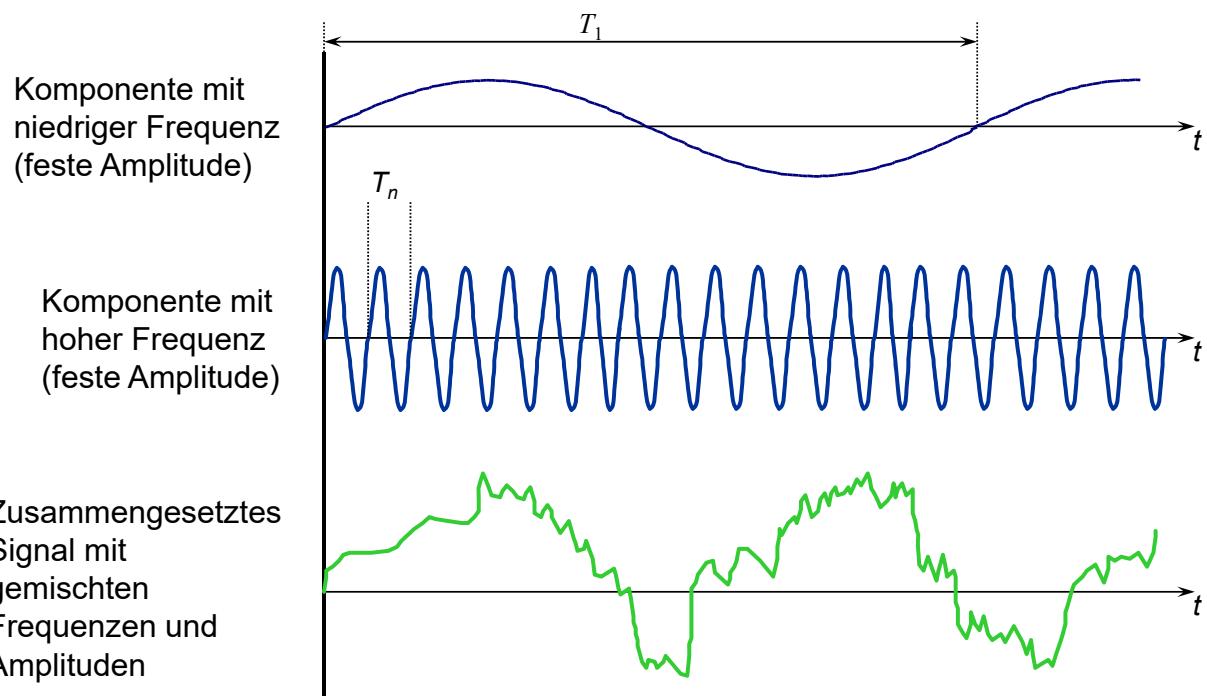
Zur Übertragung werden häufig periodische Sinus-Schwingungen verwendet, wie sie im ersten Beispiel dargestellt sind. Auf dieser Folie wird für die Darstellung der periodischen Signale eine Zeitfunktion gewählt, welche eine Zuordnung von Signalwert und Zeit vornimmt.

Sinus-Schwingungen sind durch die folgenden Parameter gekennzeichnet:

- Periode  $T$ : Gibt die zeitliche Dauer einer Schwingung an. Der Kehrwert der Periode ist die Frequenz  $f$ , die in Hertz [Hz] angegeben wird.
- Amplitude  $A$ : Die Amplitude beschreibt die maximale Auslenkung der Schwingung vom Mittelwert.
- Phase  $\varphi$ : Beschreibt die aktuelle Position im Ablauf einer Schwingung. Wird verwendet, um die Verschiebung des Beginns einer Sinus-Schwingung gegenüber einem idealisierten Nullpunkt anzugeben, wie im zweiten Beispiel gezeigt.

Zur Übertragung digitaler Signale kann z.B. eine Folge positiver und negativer Spannungen auf ein Kupferkabel gegeben werden: +1 Volt für eine 1, -1 Volt für eine 0. Auch dies kann als Schwingung angesehen werden. Mit Sinus-Schwingungen lässt sich, wie im dritten Beispiel angedeutet, solch eine (digitale) Signalfolge darstellen. Häufig wird dazu eine idealisierte Rechteckschwingung mit senkrechten Flanken angenommen, welche allerdings in der Realität nicht übertragen werden kann. Das liegt darin begründet, dass dazu theoretisch eine Sinus-Schwingung mit unendlich hoher Frequenz benötigt wird, was wiederum eine unendliche Bandbreite des Mediums voraussetzt (Erläuterung auf den nächsten Folien).

# Zusammengesetzte Signale

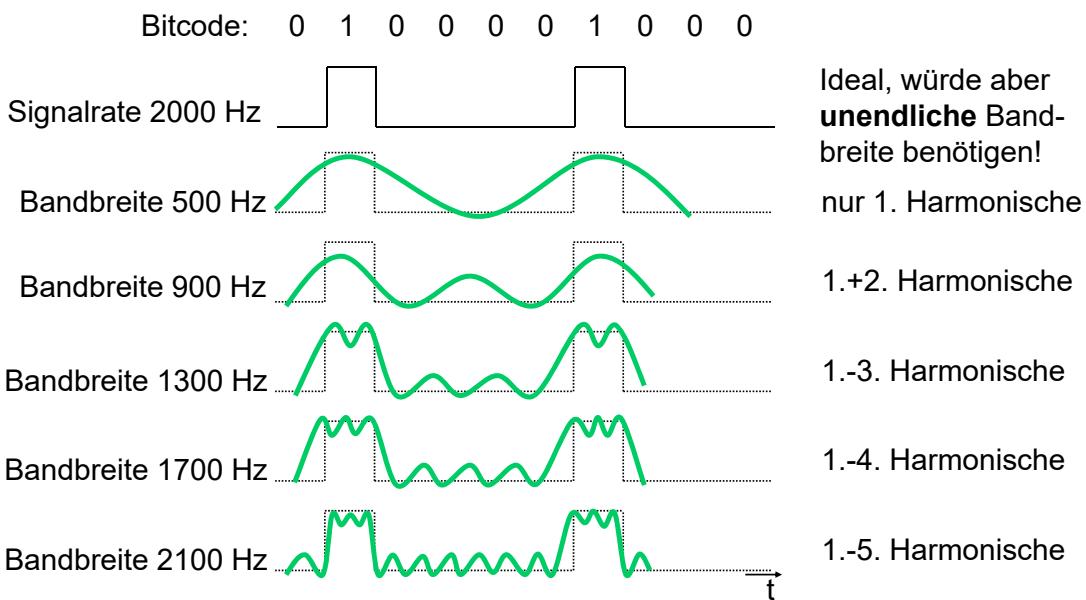


Eine Eigenschaft elektromagnetischer Schwingungen ist, dass sich verschiedene Schwingungen bei gleichzeitiger Übertragung über ein Medium vermischen: es entsteht eine Schwingung, deren Verlauf sich aus einer Addition der jeweils zu einem Zeitpunkt vorliegenden Amplituden aller Schwingungen ergibt.

Je nach Mischung verschiedener Sinus-Schwingungen entsteht eine mehr oder weniger irreguläre Schwingung, wie unten auf der Folie dargestellt.

Ideale Sinus- und Cosinus-Schwingungen werden auch harmonische Schwingungen genannt.

## Bandbreite des Übertragungssystems



**Bandbreite** eines Medium bestimmt, wie gut Rechteckschwingung approximiert werden kann

Betrachten wir dies umgekehrt: egal, auf welchem Medium man ein Signal überträgt, es setzt sich aus harmonischen Schwingungen zusammen.

Versucht man, ein digitales Signal zu übertragen (Rechteckschwingung, ganz oben auf der Folie), klingt dies erst mal simpel: warum nicht einfach für eine bestimmte Zeitdauer z.B. auf einem Kupferkabel für eine 1 einen Spannungspuls von +1 Volt erzeugen, für eine 0 einen Spannungspuls von -1 Volt. Auf einem Kupferkabel wird solch ein Signal dann allerdings als "Gemisch" von harmonischen Schwingungen übertragen, die überlagert die idealisierte Rechteckschwingung ergeben. Die sogenannte Fourier-Transformation erlaubt es, ein Eingangssignal dahingehend zu analysieren, welche harmonischen Schwingungen (Frequenz und Amplitude) überlagert werden müssen, um das Eingangssignal zu erzeugen. Die Fourier-Analyse soll hier nicht weiter betrachtet werden; wichtig ist nur das Ergebnis: zur Darstellung einer Rechteckschwingung werden unendliche viele harmonische Schwingungen benötigt, d.h. auch Schwingungen mit unendlich hoher Frequenz.

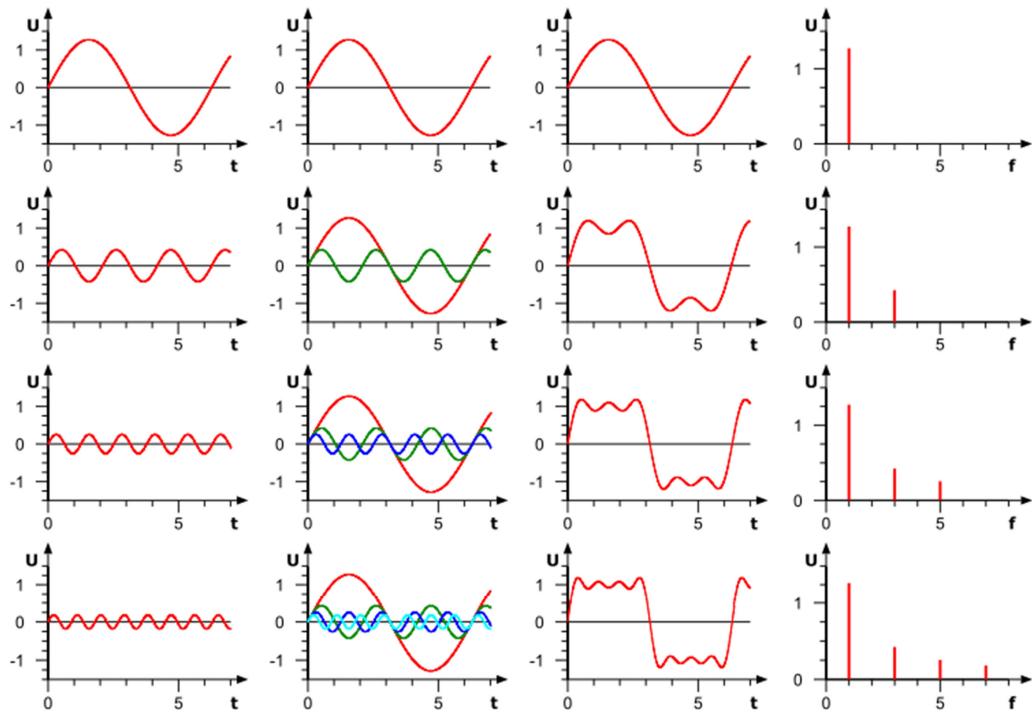
Dies ist aber nur bei unendlicher Bandbreite möglich. Mit Bandbreite bezeichnet man die Breite des Frequenzspektrums, welches über ein Medium übertragen werden kann. Um die harten Pegelwechsel an den Flanken der Rechteckschwingung darzustellen, braucht man unendlich hohe Frequenzen, damit auch eine unendliche Bandbreite. Je nachdem, welches Frequenzspektrum ein Medium übertragen kann, spricht man davon, welche Bandbreite es hat. Der Einfluss der Bandbreite auf die Darstellung der idealisierten Rechteckschwingung ist auf der Folie dargestellt.

Nebenbemerkung: die Grundschwingung des Signals wird als 1. Harmonische bezeichnet. Die 2. Harmonische hat die doppelte Frequenz der Grundschwingung, die 3. Harmonische die dreifache Frequenz usw. Die Periode der Grundschwingung entspricht bei periodischen Signalen der Periode der zu übertragenden Signals.

Von der nutzbaren Bandbreite hängt auch die erreichbare Signalrate ab (d.h. letztendlich auch die Datenrate, da mit jedem Signal eine bestimmte Anzahl von Bits übertragen wird) – je mehr Wechsel eines Parameterwerts man pro Sekunde vornimmt, desto höhere Frequenzen werden zur Darstellung benötigt, um das Signal auf Empfängerseite wieder korrekt interpretieren zu können; je geringer die Bandbreite ist, desto weniger Signale (und damit auch Bit) können pro Sekunde auf das Medium gegeben werden.

Die Abhängigkeiten zwischen Signalrate und Bandbreite werden durch die Formeln von Nyquist und Shannon beschrieben, die im Folgenden noch behandelt werden.

## Beispiel: Erzeugung einer Rechteckschwingung

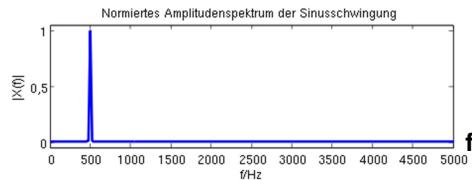
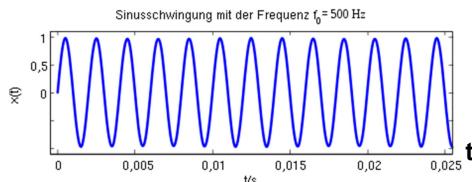


Auf der Folie sieht man dies noch einmal anders dargestellt: die erste Spalte zeigt verschiedene harmonische Schwingungen mit unterschiedlichen Amplituden. In der zweiten Spalte werden die zeilenweise hinzugefügten harmonischen Schwingungen gemeinsam gezeigt, die dritte Spalte zeigt jeweils das Signal, welches aus Überlagerung der betrachteten harmonischen Schwingungen resultiert. Man kann sehen, dass sich das Signal immer weiter einer Rechteckschwingung annähert.

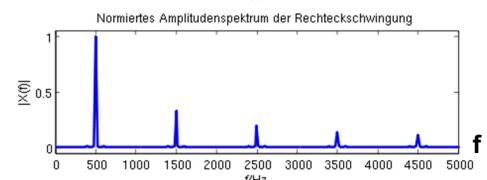
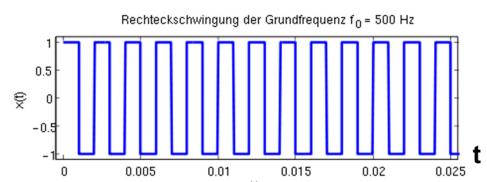
Die vierte Spalte zeigt eine übliche Darstellung, wie sie die Analyse eines überlagerten Signals liefern würde – es ist dargestellt, welche harmonischen Schwingungen mit welcher Amplitude im überlagerten Signal enthalten sind. Diese Darstellung ist äquivalent zu der in der zweiten Spalte, allerdings übersichtlicher.

# Approximation eines Rechtecksignals

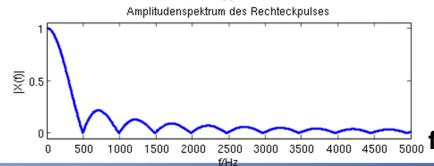
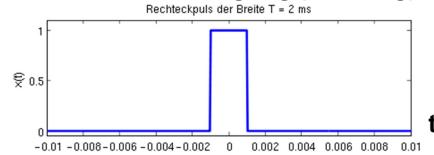
## Sinusschwingung (periodisch, endlos)



## Rechteckschwingung (periodisch, endlos)



## Rechteckschwingung (einmalig)



# Kapitel 2: Bitübertragungsschicht

- **Grundlagen**

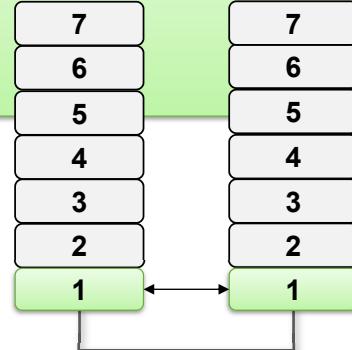
- ▶ Übertragungsmedien
- ▶ Signale und Bandbreite

- **Übertragung von Signalen**

- ▶ Umformung, Basisband, Modulation
- ▶ Übertragungsparameter, Störeinflüsse
- ▶ Leitungscodes und Modulationsverfahren
- ▶ PCM

- **Kanalnutzung**

- ▶ Multiplexing

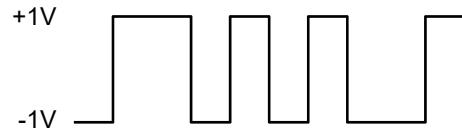


# Übertragungsverfahren und Umformung

- Bei digitalen Kanälen wird im Wesentlichen unterschieden zwischen:

- ▶ „Direkte“ Weitergabe des Eingabesignals

- Umformung digital → digital
    - **Basisbandübertragung**



- ▶ Aufprägung des Eingabesignals auf harmonische Trägerschwingung, d.h. Eingabesignale werden einer Trägerfrequenz aufmoduliert

- Umformung digital → analog



- Zudem: Umwandlung analog → digital

- ▶ Z.B. Digitalisierung von Sprache zur Übertragung über digitale Kanäle

Die Umformung analog → analog spielt in der Datenkommunikation keine große Rolle. Die anderen Konvertierungen sind allerdings (je nach verwendetem Medium) nötig.

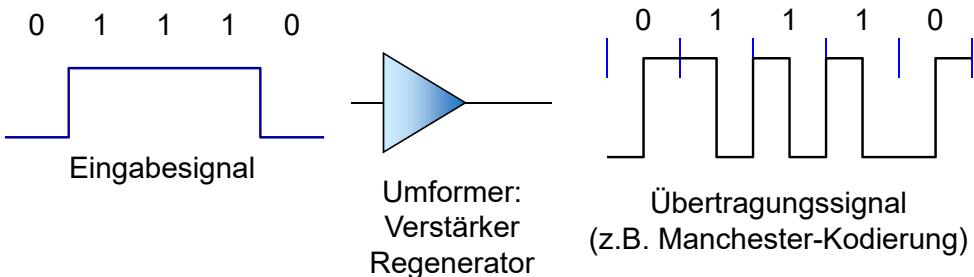
Die einfachste Form eines Übertragungsverfahrens besteht darin, das rechteckförmige digitale Signal direkt mit einer eventuellen Pegelanpassung (also Verstärkung) in das Medium einzuspeisen – z.B. indem zur Übertragung einer „1“ für eine definierte Dauer eine Spannung von +1 Volt an das Kabel angelegt wird, und zur Übertragung einer „0“ eine Spannung von -1 Volt. Dieses Übertragungsverfahren nennt man *Basisbandübertragung*. Es kommt beispielsweise auf Kupferkabeln in Ethernet zum Einsatz.

Durch die Art des Verfahrens erzeugt man eine Rechteckschwingung auf dem Medium. Wie auf Folie 18 dargestellt, verwendet man dadurch die gesamte Bandbreite des Mediums zur Übertragung. Während der Übertragung wird die Rechteckschwingung verzerrt, da das Medium nur eine begrenzte Bandbreite hat.

Bei der Übertragung über ein analoges Medium nutzt man eine geeignete Trägerschwingung dazu, das eigentliche (digitale) Nutzsignal zu transportieren. Die digital vorliegenden Daten werden der Trägerschwingung aufgeprägt, d.h. modifizieren ihre Parameter. Z.B. könnte man zur Übertragung einer „1“ die Trägerschwingung mit einer Amplitude von  $a$  aussenden, für eine „0“ mit einer Amplitude von  $2 \cdot a$ . Zur Übertragung des entstehenden Signals wird eine bestimmte Bandbreite benötigt, aber keine unendliche Bandbreite wie bei der Basisbandübertragung. Dieses Verfahren eignet sich also, wenn man nur einen Kanal mit einer begrenzten Bandbreite zur Verfügung hat und das Eingabesignal an diese Bandbreite anpassen muss. Der Umformer wird als Modulator, der Rückformer als Demodulator bezeichnet. Unterstützt das Übertragungssystem beide Übertragungsrichtungen, so werden die beiden Komponenten zusammengefasst als *Modem* bezeichnet.

Auch die Konvertierung analoger Quellsignale in digitale Signale ist möglich – dies findet z.B. bei der Telefonie statt, wo analoge Sprachsignale in digitale Signale überführt werden, die dann übertragen werden. Diese digitalen Sprachdaten werden dann allerdings wieder umgeformt, um auf einem Medium (Telefonkabel oder Funk) übertragen werden zu können. Mehrere Signalkonversionen können also hintereinander ausgeführt werden, wobei Analog Analog und Analog Digital nie verlustfrei ist!

## Basisbandübertragung



- **Einfachste Form der Signalwandlung:**

- ▶ Umformung digital → digital
- ▶ Eingabesignal muss an Mediencharakteristik angepasst werden
- ▶ Abbildungsvorschrift auf das Übertragungssignal wird als *Leitungscodierung* bzw. Übertragungscodierung bezeichnet

### Basisbandübertragungsverfahren

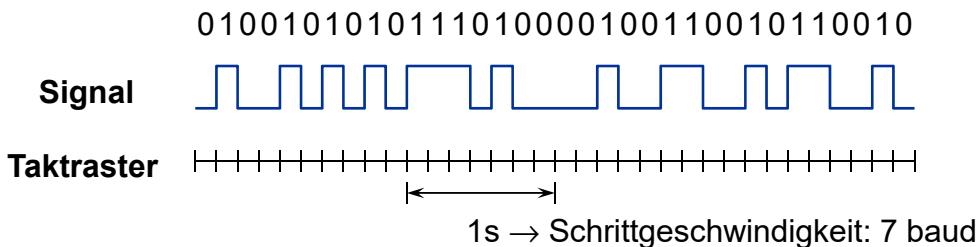
Hier werden die digitalen Daten einfach als digitale Signale, d.h. im Beispiel von Kupferkabel als Folge von Rechteckspannungen übertragen.

Die moderne digitale Übertragungstechnik verwendet Basisbandverfahren bis in den Gigabit-Bereich (Bekanntestes Beispiel: Ethernet). Dabei sind folgende Eigenschaften angestrebt:

- Da unter Umständen eine große Anzahl gleicher Werte auftreten kann (z.B. eine längere Folge von 111...11), kann eine Gleichstromkomponente auftreten. Gewünscht ist eine Eliminierung des Gleichstromanteils.
- Wiedergewinnung des Takts aus dem Signal (selbsttaktender Code)
- Erkennung von Signalfehlern auf Signalebene
- Hohe Effizienz, d.h. Übertragung möglichst vieler Bits pro Sekunde

Zum Erreichen dieser Eigenschaften benutzt man meist bestimmte Leitungscodes. Die Zuordnungsvorschrift, welche das digitale Eingabesignal auf das (ebenfalls digitale) Übertragungssignal abbildet, wird Leitungscodierung bzw. Übertragungscodierung genannt.

# Digitale Signalübertragung



- *Schritt*

- Minimales Zeitintervall  $T_{min}$  zwischen aufeinanderfolgenden Änderungen der Signalkoordinate
    - Wird auch als *Schrittdauer* bezeichnet
  - Wichtig: Digitales Signal mit fester Schrittdauer  $T$  („Schritt-Takt“)

### • *Schrittgeschwindigkeit*

- ▶ Bei Digitalsignalen mit festem Zeitraster: Kehrwert der Schrittdauer
  - ▶ Einheit: *baud* = 1/s

Im Zusammenhang mit dem digitalen Signal existieren zahlreiche Begriffe, die fest im Sprachgebrauch innerhalb des Datenkommunikationsbereichs verankert sind.

Den Ausgangspunkt bildet das oben angegebene digitale Signal, welches in diesem Fall zwei diskrete Signalwerte annehmen kann. Ein Begriff, welcher im Zusammenhang mit der Diskretisierung des Zeitverlaufs relevant ist, ist das Taktraster. Beim Empfänger definiert das Taktraster den Zeitpunkt, zu welchem ein Signal detektiert werden kann. Darauf bezogen ist ein Signalschritt die minimale Zeiteinheit, in der ein Sender ein Signal auf das Medium geben kann.

Die Schrittgeschwindigkeit ist die Anzahl der Signalschritte pro Zeiteinheit, welche in [baud] gemessen wird. Sie gibt an, wie viele Signale (und damit in Folge auch: wie viele Bit) ein Sender pro Sekunde auf das Medium setzen kann.

Bitte beachten: ein Signal entspricht nicht notwendigerweise genau einem Bit, so dass die Datenrate (Übertragungsrate) auf einem Medium, die in Bit/s gemessen wird, zwar von der Schrittgeschwindigkeit abhängt, aber nicht den gleichen Wert haben muss.

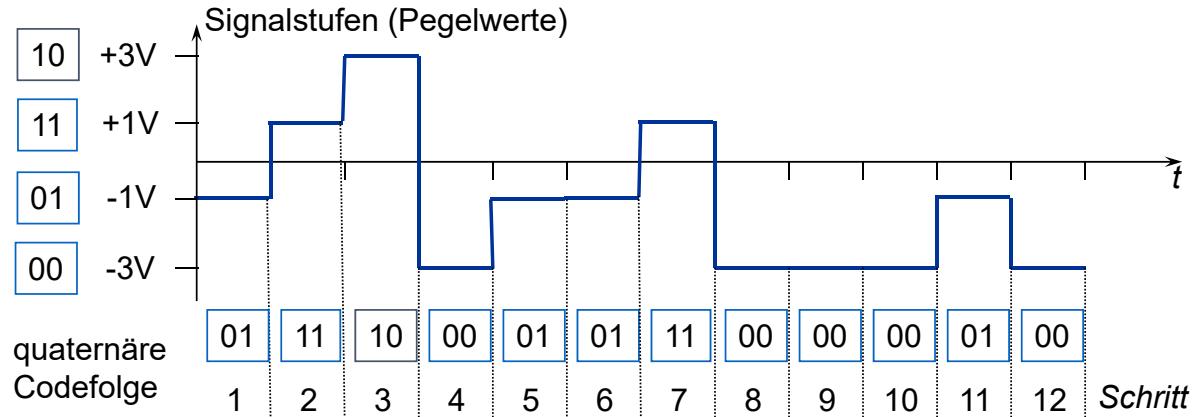
# Mehrwertiges Digitalsignal

- **Zweiwertiges Signal**

- **Zweiwertiges Signal**
  - ▶ Digitales Signal mit nur zwei Werten des Signalparameters

- **Mehrwertiges Signal**

- **Mehrwertiges Signal**
  - ▶ Die (diskrete) Signalkoordinate kann mehr als zwei Werte annehmen
  - ▶ Z.B. 2B1Q (ISDN): zwei Bit pro Koordinatenwert (quaternäres Signal)



Bei dem vorherigen Beispiel sind wir davon ausgegangen, dass ein Signal immer genau ein Bit codiert. In diesem Fall spricht man von einem *zweiwertigen Signal*: der Signalparameter kann nur zwei Zustände annehmen. Jedoch besteht die Möglichkeit, mit einem Signalschritt mehrere Datenwerte (eine sog. *Codefolge*) zu codieren, wie das obige Beispiel zeigt. In diesem Fall spricht man von *mehrwertigen* oder *mehrstufigen* Signalen, d.h. die (diskrete) Signalkoordinate kann mehr als zwei Werte annehmen. Die Anzahl  $n$  der diskreten Werte (Kennwerte, Stufen), die ein Signalelement annehmen kann, wird wie folgt gekennzeichnet:

- $n = 2$ : binär (= zweiwertiges Signal)
- $n = 3$ : ternär
- $n = 4$ : quarternär (= DIBIT)
- ...
- $n = 8$ : oktonär

Gehen wir von einem gleichen Taktraster aus, so können also bei mehrwertigen Signalen mehr Daten übertragen werden als bei zweiwertigen Signalen. Hier wird jetzt der Unterschied zwischen der *Schrittgeschwindigkeit* und der *Übertragungsgeschwindigkeit (Datenrate)* klar. Die Schrittgeschwindigkeit (in baud) bezieht sich ausschließlich auf das Taktraster, also die Anzahl der potentiellen Signalparameterwechsel. Im Gegensatz dazu bezieht sich die Übertragungsgeschwindigkeit auf die Menge der tatsächlich übertragenen Daten. Für zweiwertige Signale wird in jedem Schritt ein Bit codiert. Deshalb gilt in diesem Fall:

- *Schrittgeschwindigkeit in baud = Übertragungsgeschwindigkeit in bit/s*

Die Übertragungsgeschwindigkeit wird in diesem Fall als *Bitrate* (oder auch *Datenrate*) bezeichnet.

Für mehrstufige Signale (mit  $n$  möglichen Wertestufen) gilt:

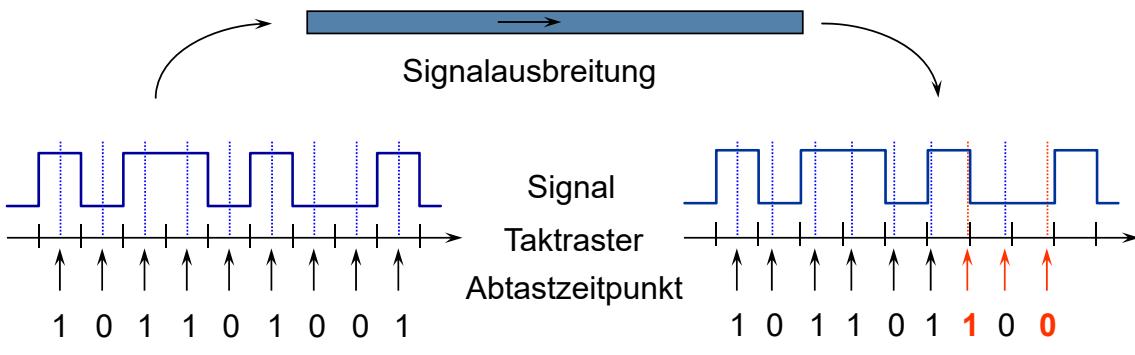
- *Übertragungsgeschwindigkeit in Bit/s = Schrittgeschwindigkeit \* ld(n)*

wobei  $ld$  für den Logarithmus zur Basis 2 steht. Bei DIBIT wäre demnach  $1 \text{ baud} = 2 \text{ bit/s}$ .

(Bitte beachten: dies ist eine Brutto-Übertragungsgeschwindigkeit, also das erreichbare Maximum. In der Praxis kann die erzielbare Datenrate niedriger liegen, in Abhängigkeit von der gewählten Codierung.)

## Fehlerquelle: Bitfehler durch fehlerhafte Synchronisation

- Wesentlich für eine fehlerfreie Übertragung sind korrekt *synchronisierte* Sender und Empfänger
  - ▶ Ungenaue Abtastzeitpunkte können u.U. zu sporadischen Bitfehlern führen, obwohl die Signalfolge korrekt übertragen wurde
  - ▶ Falsch synchronisierte Sender und Empfänger führen häufig zu einer vollständig falsch interpretierten Bitfolge



Es gibt eine Vielzahl an Leitungscodes, die im Laufe der Zeit entwickelt wurden, um im Basisband zu übertragen. Generell versucht man eine Robustheit gegenüber Störungen zu schaffen (üblicherweise nur Verwendung binärer Codes, damit die Signalwerte nicht zu ähnlich sind) und Probleme durch Taktverlust oder Gleichstromübertragung zu vermeiden (häufiger Wechsel des Übertragungspegels).

Das Beispiel auf dieser Folie zeigt die Auswirkung von Taktverlust - ungenaue Abtastzeitpunkte, die zu sporadischen Bitfehlern führen. Das Problem resultiert schlicht daraus, dass die Uhren zweier Rechner nicht exakt gleich schnell laufen und daher die Dauer eines Schritts auf beiden Rechnern unterschiedlich ist.

Der weitaus schlimmere Fall tritt ein, falls Sender und Empfänger gänzlich falsch synchronisiert sind und den Beginn einer Bitfolge unterschiedlich interpretieren. Dies führt in der Regel zu einem vollständigen Ausfall der Kommunikation, da Sender und Empfänger sich nicht mehr verstehen können.

Ein unvermeidbares Problem hierbei ist, dass eine exakte Synchronisation zweier beliebiger Rechner nicht möglich ist; die internen Rechneruhren, die den Takt vorgeben, laufen mit leicht unterschiedlichen Geschwindigkeiten, so dass das auf der Folie gezeigte Problem über einen längeren Zeitraum hinweg definitiv auftreten wird. Vermieden werden kann es entweder durch einen externen Taktgeber, durch eine künstliche Beschränkung der Länge von Bitfolgen, die übertragen werden können, oder durch eine Selbsttaktung innerhalb des verwendeten Codes.

Die völlig falsche Synchronisation kann vermieden werden, indem man der Übertragung einen „Startcode“ vorstellt; dieser wird als Präambel bezeichnet, siehe nächstes Kapitel.

# Aspekte beim Design von Leitungscodes

- **Effizienz**

- ▶ Wie viele Bits können pro Schritt codiert werden?

- **Robustheit**

- ▶ Wie kann man eine Fehlinterpretation eines empfangenen Signals aufgrund von Verzerrungen vermeiden?

- **Synchronisation/Taktrückgewinnung**

- ▶ Ist eine Synchronisation zwischen Sender und Empfänger nötig oder kann zusammen mit den Daten ein Takt codiert werden?

- **Gleichstromfreiheit**

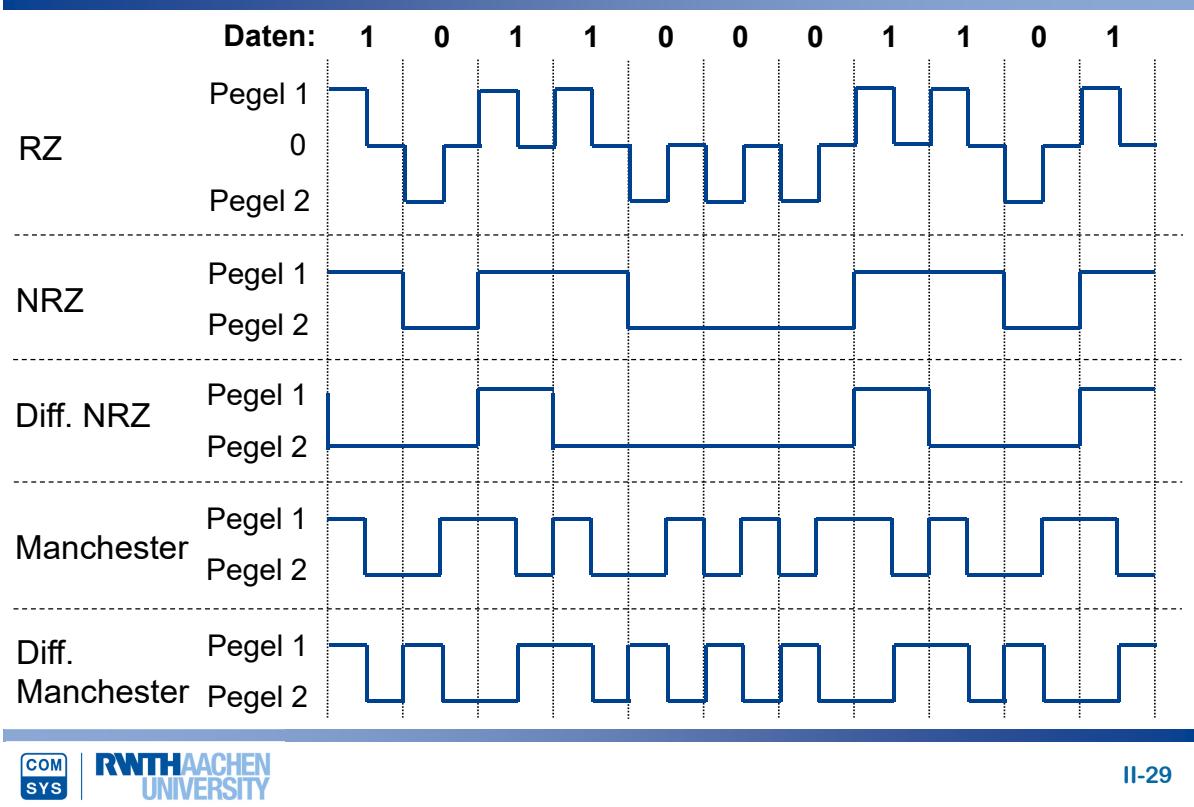
- ▶ Eine Gleichspannung kann nicht über lange Strecken übertragen werden, daher müssen Pegelwechsel erfolgen

Probleme mit Gleichstrom treten dadurch auf wenn längere Zeit auf einem Pegel übertragen wird. Beim einfachen Code, der bisher als Beispiel verwendet wurde, hätte man z.B. einen Gleichstrom, der über die Leitung fließt, wenn 1000 1en am Stück übertragen würden (1000 Schittdauern +1 Volt).

Gleichstrom möchte man aus mehreren Gründen vermeiden. Zum einen ist die Übertragung eines Gleichstroms über lange Leitungen nicht möglich, da jedes Kabel als Widerstand auf den Gleichstrom wirkt und ihn abschwächt. Zum anderen kann man bei Verwendung gleichstromfreier Codes über das gleiche Kabel Daten übertragen und gleichzeitig sogenannte Repeater (siehe nächstes Kapitel) mittels Gleichstrom fernspeisen. Zudem würden bei Verwendung von Gleichstrom zur Datenübertragung z.B. Kondensatoren in Repeatern oder anderen Netzkomponenten immer weiter aufgeladen, bis sie voll wären und gar kein Strom mehr fließen würde.

Im Folgenden werden mehrere mögliche Leitungscodes betrachtet, die im Laufe der Zeit entwickelt wurden, um Robustheit, Taktrückgewinnung und Gleichstromfreiheit zu erzielen und trotzdem effizient Daten übertragen zu können.

## Leitungscodes - Beispiele



Der RZ-Code codiert eine die Bitwerte 1 und 0 durch zwei unterschiedliche Pegel. Dies können z.B. +1 und -1 Volt sein: für eine “1” würde für einen Schritt ein Puls von +1 Volt auf die Leitung gesetzt, für eine “0” ein Puls von -1 Volt. Nach der Übertragung eines Bits geht der RZ-Code auf einen dritten Pegel über – für einen Schritt wird ein Pegel von 0 gehalten. Daher resultiert der Name dieses Codes: nach der Übertragung jedes Bits kehrt man zum Nullwert zurück. Durch diese konstante Rückkehr zum Nullwert bettet man ein Taktsignal in die Übertragung ein: pro Bit benötigt man nun zwei Schritte und wechselt bei jedem Schritt garantiert den Pegel. Dadurch ist Taktrückgewinnung garantiert. Allerdings auf Kosten der Effizienz: der RZ-Code hat eine Effizienz von 50%, da er pro Schritt sozusagen nur ein halbes Bit darstellt. Da die Schrittgeschwindigkeit nicht beliebig erhöht werden kann (Bandbreite, siehe folgende Folien), kann mit diesen Codes nur die Hälfte der Datenrate erreicht werden wie bei Verwendung von NRZ-Codes. Auch Gleichstromfreiheit kann der RZ-Code nicht garantieren – werden lange 1- oder 0-Folgen übertragen, sendet man nur auf einem Pegel (plus 0-Pegel).

NRZ-Codes (Non-Return-to-Zero) nutzen nur zwei unterschiedliche Pegel, um Signale darzustellen. Dies können z.B. wie oben +1 und -1 Volt sein. Pro Schritt wird ein Bit übertragen, indem für die Schrittdauer ein konstantes Signal auf einem der Pegel auf die Leitung gesetzt wird. Beim einfachen NRZ (in der Literatur auch NRZ-L genannt) wird für eine “1” ein Puls von z.B. +1 Volt ausgesendet, für eine “0” ein Puls von -1 Volt. Dies wurde bisher bereits als Beispiel verwendet. Einen 0-Pegel gibt es hier nicht – daher in Anlehnung an den RZ-Code der Name NRZ. Eine Variante ist das differentielle NRZ (auch NRZI-M oder NRZ-M), bei dem eine “1” durch einen Wechsel des Pegels dargestellt wird und eine “0” durch Beibehaltung des Pegels. Die Bezeichnung “differentiell” bezieht sich also darauf, dass jeder Bitwert nun basierend auf dem vorher anliegenden Pegel codiert wird. Die Codes dieser Kategorie erreichen keine Selbstdtaktung und Gleichstromfreiheit, falls lange Folgen des gleichen Eingabesignals übertragen werden müssen. Bei differentiellem NRZ sorgen lange 0-

Folgen für Probleme, bei einfachem NRZ zusätzlich auch lange 1-Folgen.  
Dafür sind diese Codes allerdings effizient, da pro Schritt ein Bit übertragen werden kann, und robust, da die Pegelwerte gut voneinander unterschieden werden können.  
(Mehrwertige Codes wäre effizienter, da sie pro Schritt mehrere Bits übertragen können, aber im Normalfall auch weniger robust, da der Empfänger aufgrund von Verzerrungen mehr Probleme haben kann, den korrekten Signalwert zu identifizieren.)

Eine weitere wichtige Klasse sind sogenannte Biphase-Codes. Diese sind selbsttaktend und vermeiden Gleichstrom, da sie regelmäßige Pegelwechsel wie RZ, aber ohne 0-Pegel garantieren.

Beim Manchester-Code (auch Biphase-L) wird die 1 durch einen Wechsel vom hohen zum niedrigen Pegel dargestellt, die 0 durch einen Wechsel vom niedrigen zum hohen Pegel.  
Beim differentiellen Manchester-Code wird wieder differentiell codiert: zur Darstellung der 0 wird am Anfang des Bitwerts der Pegel gewechselt, zur Darstellung der 1 wird am Anfang des Bitwerts weiterhin der Pegel verwendet, auf dem zuvor übertragen wurde.  
Hier hat man wie beim RZ-Code wieder ein Effizienzproblem: Biphase-Codes benötigen zwei Schritte, um ein einzelnes Bit zu übertragen

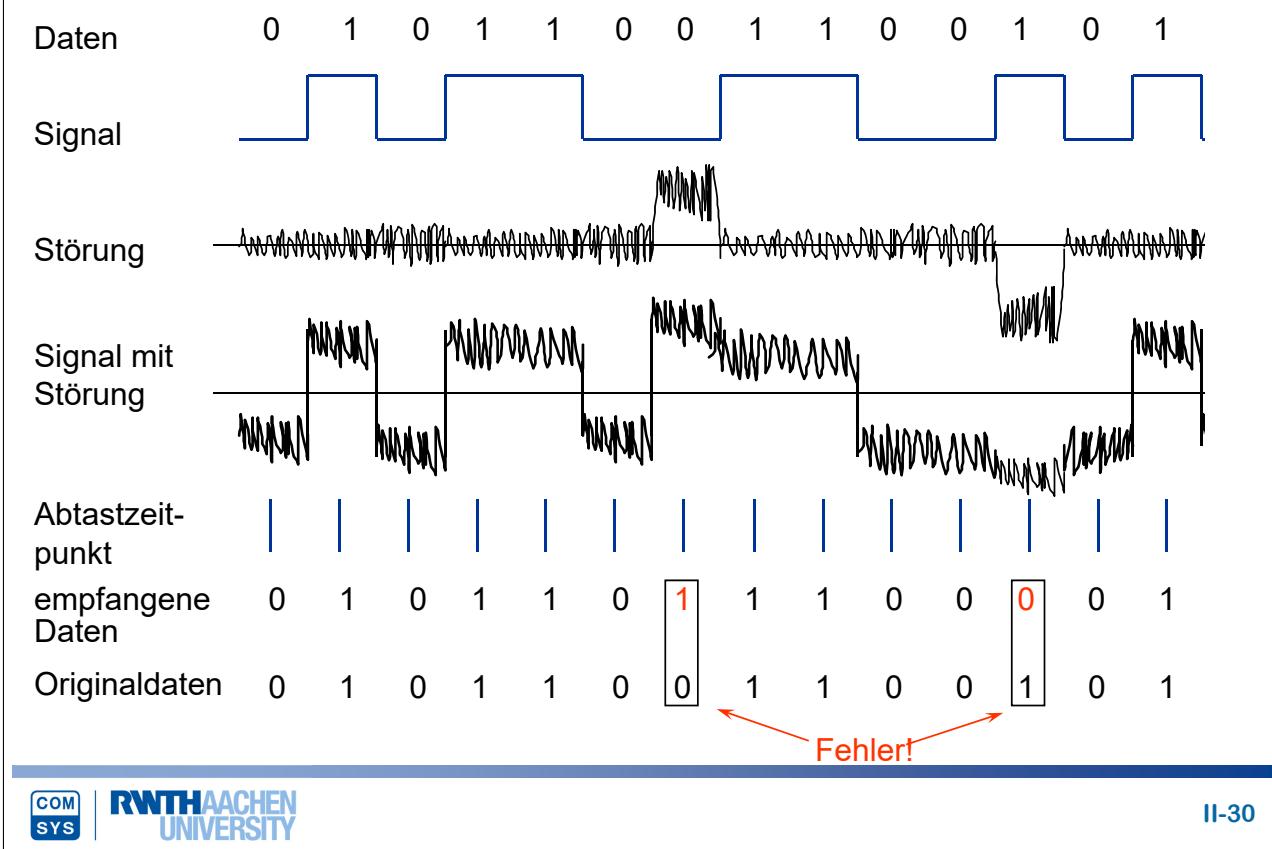
Es hängt also von der Codierung ab, ob tatsächlich die komplette mögliche Datenrate ausgenutzt werden kann oder nicht.

Bei dem Manchester- und dem differentiellen Manchester-Code gibt es leider je zwei Definitionen, bei denen die Darstellung der 1 und der 0 vertauscht sind. Daher ist es in der Praxis wichtig, darauf zu achten, welche Variante eingesetzt wird, bevor man einen Netzwerkkartentreiber schreibt. Daher soll es z.B. für die Klausur auch ausreichen, wenn man das Prinzip kennt, aber 1- und 0-Repräsentation verwechselt.

(Sollten entsprechende Übungsaufgaben kommen, wird allerdings genau die hier abgebildete Variante erwartet!)

Des Weiteren gibt es noch viele Varianten von RZ-, NRZ- und Biphase-Codes, die hier allerdings nicht weiter betrachtet werden.

## Robustheit: Auswirkung von Störungen



Störeinflüsse können sich derart auswirken, dass das empfangene Signal nicht mehr korrekt interpretiert werden kann. Im Beispiel wird eine NRZ-codierte Signalfolge angenommen. Dieser wird ein Störsignal überlagert, welches zwei Spitzen aufweist. Diese Spitzen bewirken, dass der Empfänger anstelle eines niedrigen Pegels einen hohen detektiert (wie im ersten Fehler) beziehungsweise umgekehrt (im zweiten Fehler). Durch diese falsche Interpretation wird die ursprünglich gesendete Bitfolge fehlerhaft reproduziert und weitergegeben.

## 4B/5B – Kodierung

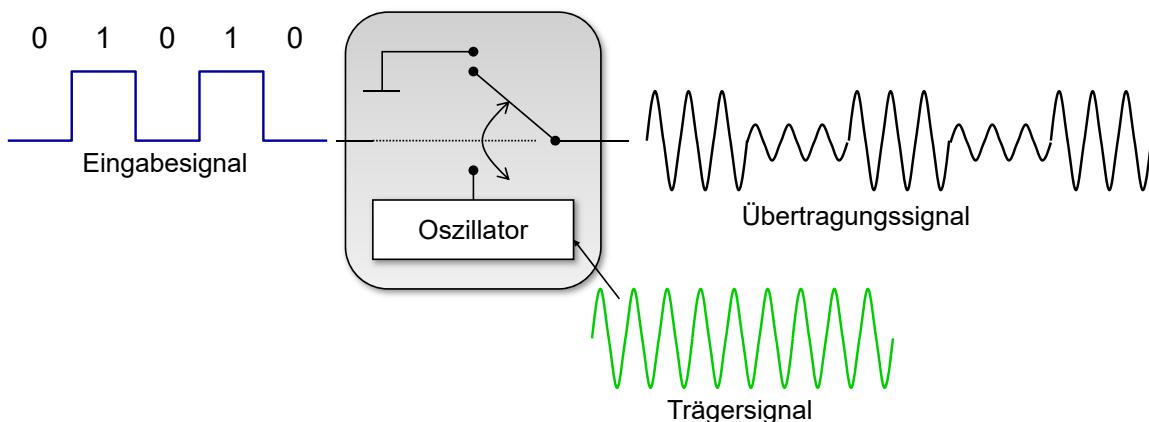
Symb.	Code Gruppe	Binärdarstellung	Symb.	Code Gruppe	Bedeutung
0	11110	0000	Q	00000	Quiet
1	01001	0001	I	11111	Idle
2	10100	0010	H	00100	Halt
3	10101	0011	J	11000	1st of sequential SD-Pair
4	01010	0100	K	10001	2nd of sequential SD-Pair
5	01011	0101	T	01101	End
6	01110	0110	R	00111	Reset
7	01111	0111	S	11001	Set
8	10010	1000			
9	10011	1001			
A	10110	1010			
B	10111	1011			
C	11010	1100			
D	11011	1101			
E	11100	1110			
F	11101	1111			

- ▶ Verwende differentielles NRZ mit vorheriger Codierung der Daten
- ▶ Übertragung von 4 Bit in 5 Takten
- ▶ Code-Effizienz: 80%

Heutige Codierungsverfahren kombinieren Taktung mit höherer Effizienz. Der einfachste Code dieser Art ist der 4B/5B-Code. Dieser verwendet das differentielle NRZ-Verfahren, welches bei Übertragung einer 1 einen Pegelwechsel vornimmt, bei der Übertragung einer 0 den vorherigen Pegelwert im nächsten Schritt beibehält. Damit sind lange 0er-Folgen bezüglich Taktung und Gleichstrom problematisch – aber diese werden durch eine Codierung der Daten vor der Umformung beseitigt. Man bildet je 4 Bit der zu übertragenden Daten auf 5 Bit Eingabesignal ab, die auf dem Medium codiert werden. Da man dazu nur 16 der 32 möglichen 5-Bit-Codewörter benötigt, kann man sich diejenigen mit möglichst wenigen Nullen aussuchen, so dass bei der Übertragung maximal drei Nullen in Folge auftreten können.

Die nicht benötigten 5-Bit-Codewörter kann man zur schnellen Übertragung von Steuersignalen nutzen.

## Amplitudenmodulation



- ▶ Primäres Signal wird durch *Amplitudenveränderung* auf Trägersignal *moduliert*.
- ▶ Amplitudenmodulation ist sehr störanfällig

### Modulierte Übertragung

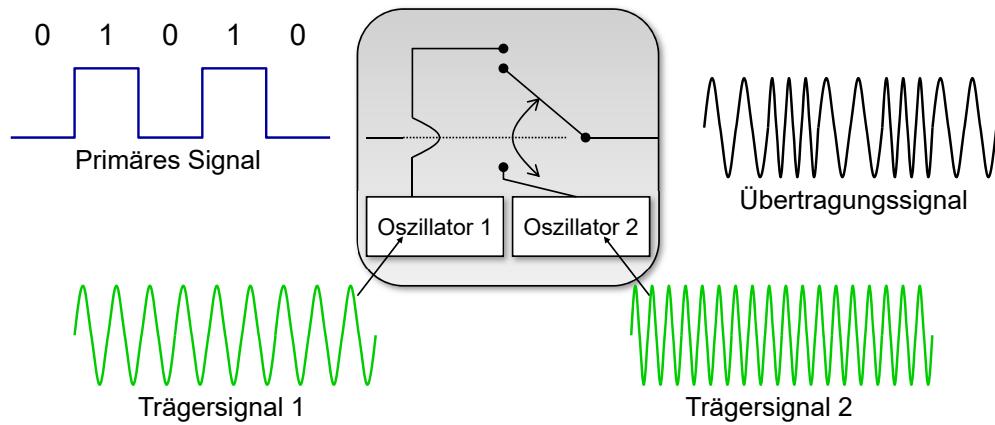
Eine Basisbandübertragung ist nur möglich, wenn man das gesamte Frequenzspektrum des Mediums nutzen kann. Bei Funkübertragung beispielsweise ist dies nicht möglich – das gesamte Frequenzspektrum bei Funkübertragung ist aufgeteilt in einzelne Kanäle, die für bestimmte Zwecke genutzt werden dürfen (Rundfunk, TV, WLAN, GSM, UMTS, LTE, ...). Im Gegensatz zu Basisband wird dieses Vorgehen Breitband genannt.

Ist die Übertragung digitaler Daten mittels der Basisbandübertragung nicht möglich, kann man die digitalen Daten an ein analoges Trägersignal (harmonische Schwingung) binden und durch Veränderung seiner Parameter (Amplitude, Frequenz, Phase) die digitalen Daten übertragen. Man nennt den Vorgang der Beeinflussung der Parameter des Trägersignals durch das zu sendende Signal *Modulation*. Es gibt drei Arten von Modulation: Amplitudenmodulation, Frequenzmodulation und Phasenmodulation.

**Amplitudenmodulation:** Hier wird, abhängig vom Zustand des Modulationssignals die Amplitude des Trägers eingestellt. Im Beispiel auf der Folie entspricht eine „1“ im Übertragungssignal einer Trägerschwingung mit hoher Amplitude, eine „0“ wird durch eine Trägerschwingung mit niedriger Amplitude angegeben. Im Extremfall könnte man auch eine Null-Amplitude verwenden – was einfach „kein Signal“ ist, wir senden also für eine „0“ nichts aus. Amplitudenmodulation ist jedoch sehr störanfällig, da die meisten Störeinflüsse die Amplitude eines Signals verfälschen.

Der Begriff des Schritts findet auch bei den Modulationsverfahren Anwendung. Auch hier ist eine Änderung der Signalkoordinate (in dem Fall der Amplitude) nötig, so dass auch hier Schrittgeschwindigkeiten festgelegt werden müssen. Diese hängen wieder von der Bandbreite des verwendeten Kanals ab (siehe folgende Folien).

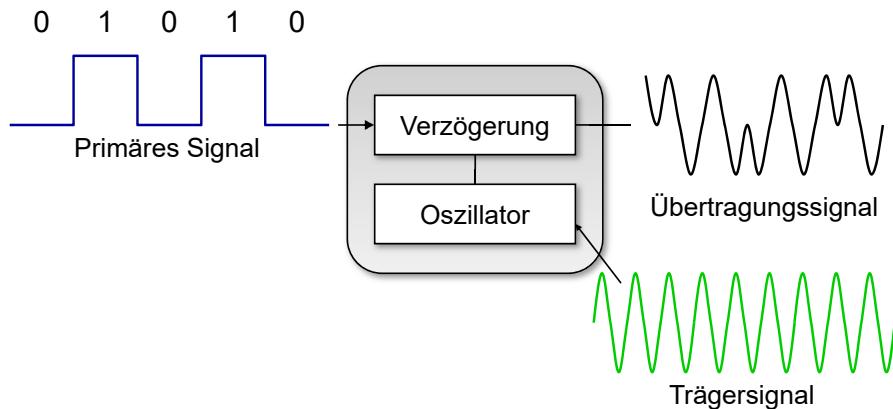
## Frequenzmodulation



- ▶ Primäres Signal wird durch gezielte Änderung der Frequenz des Trägersignals moduliert

*Frequenzmodulation:* Hier verwendet man mehrere Frequenzen, die nicht sehr weit auseinander liegen, aber trotzdem noch eindeutig erkennbar sind. Der Sender sendet nun für eine „0“ oder „1“ für eine Schrittdauer ein Signal auf der dem Bitwert zugeordneten Frequenz aus. Dieses Verfahren wird beispielsweise beim Rundfunk auf der Ultrakurzwelle verwendet.

## Phasenmodulation



- ▶ Primäres Signal wird mittels gezielter *Phasensprünge* des Trägersignals moduliert.
- ▶ Für Datenkommunikation bestes Verfahren

**Phasenmodulation:** Hier werden die digitalen Signale durch Verschieben der Phase des Signals codiert. Dies ist das beste, aber auch das aufwendigste Verfahren der analogen Übertragung. Das röhrt daher, dass Phasensprünge besser zu detektieren sind als Frequenz- oder Amplitudenänderungen. Zusätzlich ist die Wahrscheinlichkeit der Beeinflussung von Phasensprüngen durch externe Ereignisse wesentlich geringer als etwa bei der Amplitudenmodulation.

Hier gezeigt ist eine differentielle Phasenmodulation: soll eine 0 codiert werden, wird ein Phasenwechsel um  $180^\circ$  vorgenommen, zur Codierung einer 1 erfolgt kein Phasenwechsel.

Bitte beachten: man kann sowohl analoge als auch digitale Primärsignale auf ein Trägersignal aufmodulieren. Zur besseren Unterscheidung wird in der Praxis für die Modulation digitaler Primärsignale oft der Begriff des „Keyings“ verwendet: Amplitude Shift Keying (ASK), Frequency Shift Keying (FSK), Phase Shift Keying (PSK).

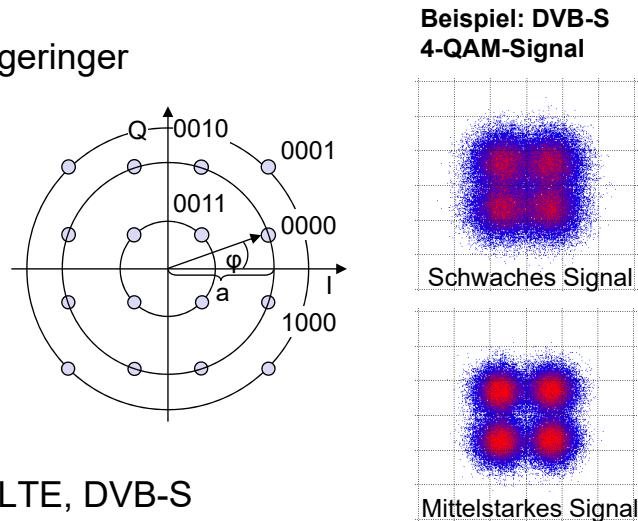
Die vorgestellten Modulationsarten (Amplituden-, Frequenz- und Phasenmodulation) können auch beliebig miteinander kombiniert werden. Dies geschieht beispielsweise bei dem QAM-Verfahren (Quadratur-Amplituden-Modulation).

# Kombination der Modulationsverfahren möglich

## • Beispiel Quadraturamplitudenmodulation (QAM):

- ▶ Kombiniert Amplituden- und Phasenmodulation
- ▶ Möglichkeit,  $n$  Symbole in einen Taktschritt zu kodieren
- ▶  $2^n$  diskrete Signalwerte
- ▶ Bitfehlerrate wächst mit  $n$ , aber geringer als vergleichbare (reine) Phasenmodulationsverfahren
- ▶ Beispiel: 16-QAM (Signalwerte repräsentieren 4 Bit)
  - Bis hin zu 32768-QAM

- ▶ Verwendet z.B. in DSL, WLAN, LTE, DVB-S



Wie bei mehrwertigen digitalen Signalen können auch auf analogen Medien mehrere Bit pro Signal kodiert werden. Dies kann durch Verwendung mehrerer Amplitudenlevel, Trägerfrequenzen oder Phasenlagen vorgenommen werden (was z.B. in den ersten Modems gemacht wurde, um die Bitrate zu erhöhen).

Durchgesetzt hat sich allerdings QAM, da es sich als robuster erwiesen hat, mit einer gleichzeitigen Modifikation zweier Signalparameter zu arbeiten. In heutigen Kommunikationsnetzen wird dieses Verfahren sehr oft verwendet, z.B. bei DSL, WLAN, LTE, ...

Auf der Folie dargestellt ist zur Veranschaulichung 16-QAM: 16 Zustände erlauben die gleichzeitige Übertragung von 4 Bit in einem Signal, z.B. (vereinfacht dargestellt, die tatsächliche physikalische Realisierung ist komplexer):

Symbole 0011 und 0001 haben gleiche Phase  $\varphi$ , aber unterschiedliche Amplituden  $a$ .

0000 und 1000 haben unterschiedliche Phasen, aber gleiche Amplitude.

Üblich sind heute aber höhere Schemata, z.B. 256-QAM.

Zu beachten ist allerdings: je mehr Signalwerte erlaubt werden, desto ähnlicher werden benachbarte Werte einander. Wenn Störinflüsse im Medium auftreten, welche die Signalwerte verfälschen, dann sind beim Empfänger die einzelnen Signalwerte umso schwerer voneinander zu unterscheiden, je mehr Signalwerte verwendet wurden. Deshalb implementieren unsere Kommunikationssysteme üblicherweise adaptive Verfahren, die die Bitrate reduzieren, wenn zu starke Störungen vorliegen, indem eine QAM-Variante mit weniger Zuständen verwendet wird.

Bei der Variante 4-QAM (4 Zustände, Codierung von 2 Bit pro Signal) liegen alle Zustände auf einem Kreis gleicher Amplitude. Diese Variante hat den speziellen Namen QPSK (Quaternary Phase Shift Keying), da die Unterscheidung der Signalformen nur über die Phase erfolgt.

# Ausbreitungsgeschwindigkeit von Daten

- Max. Lichtgeschwindigkeit ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ) im Vakuum

► *Ausbreitungsgeschwindigkeit* auf Leitungen < Lichtgeschwindigkeit

- z.B. näherungsweise  $0,6 \cdot c$  bei Kupferkabel

- Führt zu *Latenz* (Ausbreitungsverzögerung, Signallaufzeit)

► *Bandbreiten-Verzögerungs-Produkt* (auch: Speicher-/Pfadkapazität)

des Mediums durch begrenzte Ausbreitungsgeschwindigkeit

► Beispiel: Übertragung RWTH → UPM:

- Strecke: 1.400 km;  
Latenz:  $1.400 \text{ km} / 2 \cdot 10^8 \text{ m/s} \rightarrow 7 \text{ ms}$

- Bei einer Übertragungsrate von  
64 kBit/s: 448 Bit Speicherkapazität

- Bei einer Übertragungsrate von  
2 MBit/s: 14.000 Bit Speicherkapazität



Ein wichtiger, nicht zu unterschätzender Faktor, der sich aus der Schrittgeschwindigkeit ergibt, ist die Tatsache, dass jedes Medium eine gewisse Speicherkapazität besitzt, die beispielsweise bei Zugriffsprotokollen berücksichtigt werden muss (im nächsten Kapitel behandelt). In der Literatur findet sich dafür häufig der Begriff des „Bandbreiten-Verzögerungsprodukts“. (ACHTUNG: mit Bandbreite ist hier die Datenrate gemeint!)

Diese Speicherkapazität, welche durch die begrenzte Ausbreitungsgeschwindigkeit entsteht, kann durchaus gravierende Dimensionen annehmen. Im gezeigten Beispiel stehen über größere Distanzen meist Leitungen mit einer hohen Übertragungsrate zur Verfügung, über welche die Daten aus mehreren lokalen Netzen geleitet werden. Als Beispiel: Ein einziger Kanal mit 622 Mbit/s erreicht bei einer Länge von 5.000 km dadurch eine Speicherkapazität von  $25\text{ms} \cdot 622\text{Mbit/s} = 15,55 \text{ MBit}$ ! Das bedeutet, dass der Sender bereits 15,55 Mbit gesendet hat, bevor das erste Bit beim Empfänger ankommt.

Die Verzögerung bei der Zustellung von Daten über eine Leitung wird auch *Latenz* genannt. Eine anschauliche Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Latenz und der Datenrate in Abhängigkeit von der Paketgröße der übertragenen Daten findet sich hier:

[http://media.pearsoncmg.com/aw/aw\\_kurose\\_network\\_2/applets/transmission/delay.html](http://media.pearsoncmg.com/aw/aw_kurose_network_2/applets/transmission/delay.html)

Bitte beachten: in der Rechnung auf der Folie wurde angenommen, dass eine direkte Verbindung zwischen Aachen und Madrid existiert. In der Realität hat man eine Vielzahl von Teilstrecken, über die die Daten übertragen werden, die durch Router oder Switches gekoppelt sind. Innerhalb dieser Komponenten tritt noch weitere Latenz auf: eingehende Datenpakete werden zunächst gepuffert, bis sie verarbeitet und weitergeleitet werden können. Wie lange sie gepuffert werden, hängt davon ab, wie viele weitere Pakete der Router/Switch bereits in seiner Warteschlange hat, die vorher weitergeleitet werden müssen. Wir haben also eine variable Pufferungslatenz (Queuing Latency). Ist ein Paket an der Reihe, wird es verarbeitet – auch dies erzeugt eine (konstante) Latenz. In der Realität wäre daher das Bandbreiten-Verzögerungs-Produkt noch wesentlich höher.

## Zusammenfassung: wichtige Begriffe

### • Wesentliche Parameter der Kommunikation

#### ► Schritt

- Zeitintervall, in dem ein Signal auf das Medium gegeben wird

#### ► Schrittgeschwindigkeit

- Anzahl der Signale pro Sekunde, die auf das Medium gegeben werden können

#### ► Datenrate (Übertragungsrate, Übertragungsgeschwindigkeit, Kapazität)

- Anzahl der Bit pro Sekunde, die auf das Medium gegeben werden können

- *Sendedauer einer Bitfolge*: Dauer, alle Bits auf das Medium zu geben

#### ► Ausbreitungsgeschwindigkeit (Signalgeschwindigkeit)

- Geschwindigkeit, mit der ein Signal sich auf dem Medium ausbreitet

#### ► Latenz (Ausbreitungsverzögerung, Signallaufzeit)

- Zeitverzögerung zwischen Aufsetzen eines Signals auf das Medium durch den Sender und Empfang des Signals durch den Empfänger

Zusammenfassend: aus der Schrittgeschwindigkeit und der gewählten Codierung ergibt sich die Datenrate. Aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Länge des Mediums (Entfernung zwischen Sender und Empfänger) ergibt sich die Latenz.

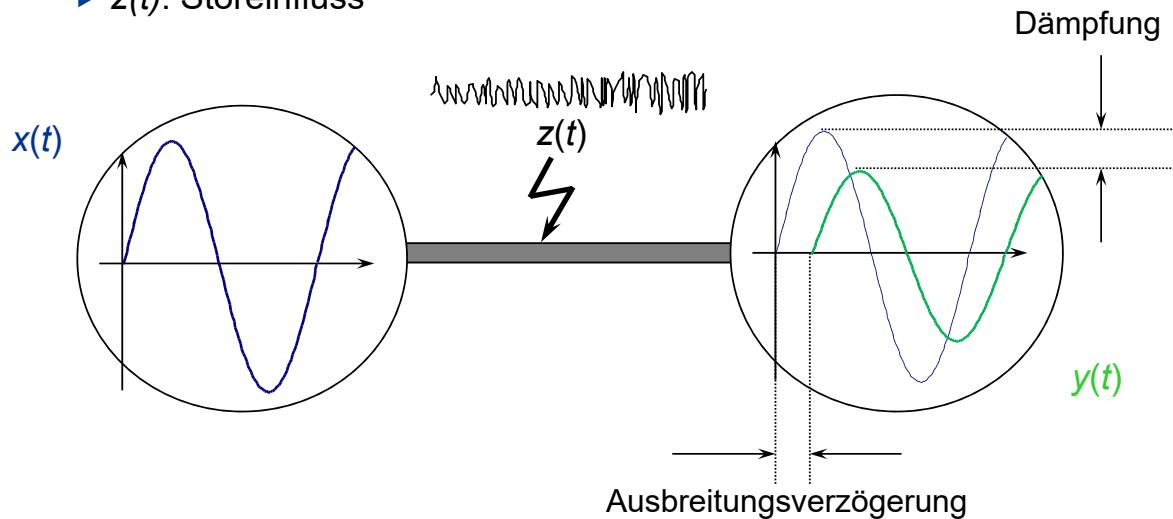
Datenrate und Latenz zusammen bestimmen zwei wesentliche Faktoren:

- Wird nicht ein einzelnes Bit betrachtet, sondern eine Bitfolge, die übertragen werden soll, setzt sich die gesamte Zeit, bis der Empfänger die Datenfolge erhalten hat, zusammen aus der gesamten Sendedauer für diese Bitfolge (wie lange dauert es, bei gegebener Datenrate alle Bits aufs Medium zu geben) und der Latenz (wie lange dauert es, bis das letzte Bit nach Aufsetzen aufs Medium beim Empfänger ankommt).
- Bandbreiten-Verzögerungs-Produkt: eine gewisse Menge an Daten befindet sich zu jeder Zeit im Transfer (auf dem Medium); wie groß diese Datenmenge ist, hängt vom Verhältnis der Datenrate und der Latenz ab (wie viele Bits können auf das Medium gegeben werden, bevor das erste Bit den Empfänger erreicht).

# Signalübertragung über ein Medium

- $y(t) = F(x(t), z(t))$ , mit ...

- ▶  $x(t)$ : Eingabesignal
- ▶  $y(t)$ : Ausgabesignal
- ▶  $z(t)$ : Störeinfluss



Nun werden Qualitätsaspekte von Medien betrachtet, welche interessanterweise unabhängig von den diversen Medientypen behandelt werden können, da bei allen Medien die gleichen Einflüsse die Qualität eines Signals beeinflussen können.

Auf Seiten des Empfängers wird ein Ausgabesignal  $y(t)$  abgetastet und in das Primärsignal rücktransformiert. Dieses Ausgabesignal hängt vom Eingabesignal  $x(t)$  sowie von Störeinflüssen  $z(t)$  während der Übertragung auf dem Medium ab:  $y(t) = F(x(t), z(t))$ .

Zwei Einflüsse, die das Eingabesignal  $x(t)$  während der Übertragung modifizieren, sind die Ausbreitungsverzögerung und die Dämpfung. Die Ausbreitungsverzögerung ist unkritisch, wenn sie konstant bleibt. Bei Verwendung von drahtloser Kommunikation z.B. können allerdings sowohl Sender als auch Empfänger mobil sein, so dass sich die Entfernung zwischen ihnen und somit auch die Signalverzögerung kontinuierlich ändert. Dies führt zu Verzerrungen im Signal, die der Empfänger erkennen und herausfiltern muss.

Die Dämpfung ist eine Eigenschaft jedes Mediums. Ein elektromagnetisches Signal wird während der Ausbreitung auf dem Medium abgeschwächt (die Amplitude verringert sich). Je größer die zurückgelegte Strecke eines Signals über das Medium ist, desto stärker wird ein Signal gedämpft. Wird die Amplitude zu gering, kann der Empfänger die Signale nicht mehr eindeutig erkennen. Durch die Dämpfung wird daher die maximal mögliche Distanz bestimmt, über die kommuniziert werden kann. So ist z.B. ein wesentlicher Vorteil eines optischen Mediums (Glasfaserkabel), dass dieses eine um den Faktor  $10^2$  bis  $10^3$  geringere Dämpfung aufweist als ein Kupferkabel.

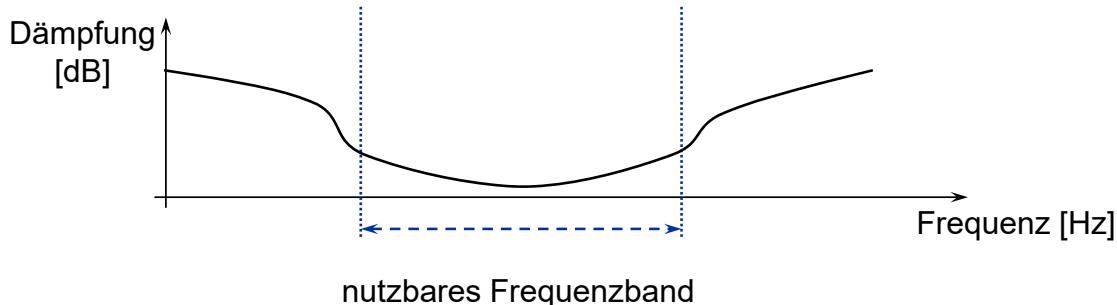
Ausbreitungsverzögerung und Dämpfung führen dazu, dass der Empfänger ein abgeschwächtes und verzerrtes Signal erhält.

$z(t)$  ist eine abstrakte Größe, die sich aus mehreren Störeinflüssen zusammensetzen kann. Generell beschreibt sie, dass fremdinduzierte Signale (Rauschen) sich mit dem eigentlichen Eingabesignal überlagern und es dadurch weiter verzerren. Störeinflüsse sind medienabhängig.

# Bandbreite und Dämpfung

## • Bandbreite

- ▶ Für Übertragung aufgrund der Dämpfung nutzbares Frequenzband



- ▶  $[dB] = 10 \cdot \log_{10}(S_1/S_2)$
- ▶  $10 \text{ dB} = 10, 20 \text{ dB} = 100, 30 \text{ dB} = 1000, -20 \text{ dB} = 0,01, 0 \text{ dB} = 1$

Die Dämpfung, die das Signal während des Transports auf dem jeweiligen Medium erfährt, bestimmt letztendlich auch die Bandbreite dieses Mediums. Der Zusammenhang zwischen Dämpfung und Bandbreite ergibt sich aufgrund folgender Eigenschaft der Dämpfung:

- Die Dämpfung ist frequenzabhängig. Es lässt sich ein Frequenzspektrum angeben, außerhalb dessen die Dämpfung keine Auswertung des Ausgabesignals mehr zulässt. Dies ist abhängig von der Länge des verwendeten Mediums – je größer die zu überbrückende Distanz wird, desto größere Teile des Frequenzspektrums werden zu stark gedämpft, so dass die nutzbare Bandbreite abnimmt.

Die Dämpfung ist eine zentrale Kenngröße eines Mediums. Aus der Bandbreite lässt sich auf die maximale Schrittgeschwindigkeit (d.h. Anzahl der Pegelwechsel bei Leitungscodes) schließen, mit der ein Kanal betrieben werden kann.

Daher gibt es auch Längenbeschränkungen für alle Medien, um das für eine Zieldatenrate notwendige Frequenzspektrum trotz Dämpfung noch verwenden zu können.

Ist es nötig, größere Entfernung zu überbrücken, können sogenannte Repeater eingesetzt werden, die in regelmäßigen Abständen (bevor das Signal zu stark gedämpft wurde) im Kabel (bzw. der Funkstrecke) zwischengeschaltet werden. Ein Repeater tastet die empfangenen Signale ab und rekonstruiert den Bitstrom. Dieser Bitstrom wird auf dem anderen Ausgang nach dem verwendeten Leitungscode/Modulationsverfahren neu in Signale mit voller Stärke gewandelt. Damit kann die Reichweite eines Netzes trotz Dämpfung prinzipiell ins Unendliche gesteigert werden.

Nötig ist dies z.B. auch bei den Unterseekabeln – alle 50 km wird ein Repeater benötigt.

*Hinweis:* Bei der physikalischen Einheit Dezibel (dB) handelt es sich um eine logarithmische Größe, die das Verhältnis zwischen zwei Werten ausdrückt. Hier ist  $S_1$  das Eingabesignal,  $S_2$  das Ausgabesignal. Bitte beachten: es gibt auch negative Dezibelwerte; in diesem Fall wäre der Wert negativ, wenn  $S_2 > S_1$  ist, also eine Verstärkung stattgefunden hätte.

## Störeinflüsse

- Die bisher behandelten Kenngrößen stellen medienbedingte Abweichungen dar
  - ▶ Zusätzlich können *Störungen* auftreten, die das Signal beeinflussen
- Beispiel für Störeinflüsse:
  - ▶ Weißes Rauschen (Grundstöranteil)
  - ▶ Echobildung (durch zeitverschobenes Eingabesignal)
  - ▶ Nebensprechen ( gegenseitige Medienbeeinflussung)
  - ▶ Brummsignale (niederfrequente Störsignale)
  - ▶ Störimpulse (kurzzeitig mit hoher Amplitude)
  - ▶ Weitere/ähnliche Störfaktoren bei Funkübertragung:
    - Beugung, Brechung, Reflektion (Mehrwegeausbreitung), etc.
    - Siehe Vorlesung „Mobile Internet Technology“



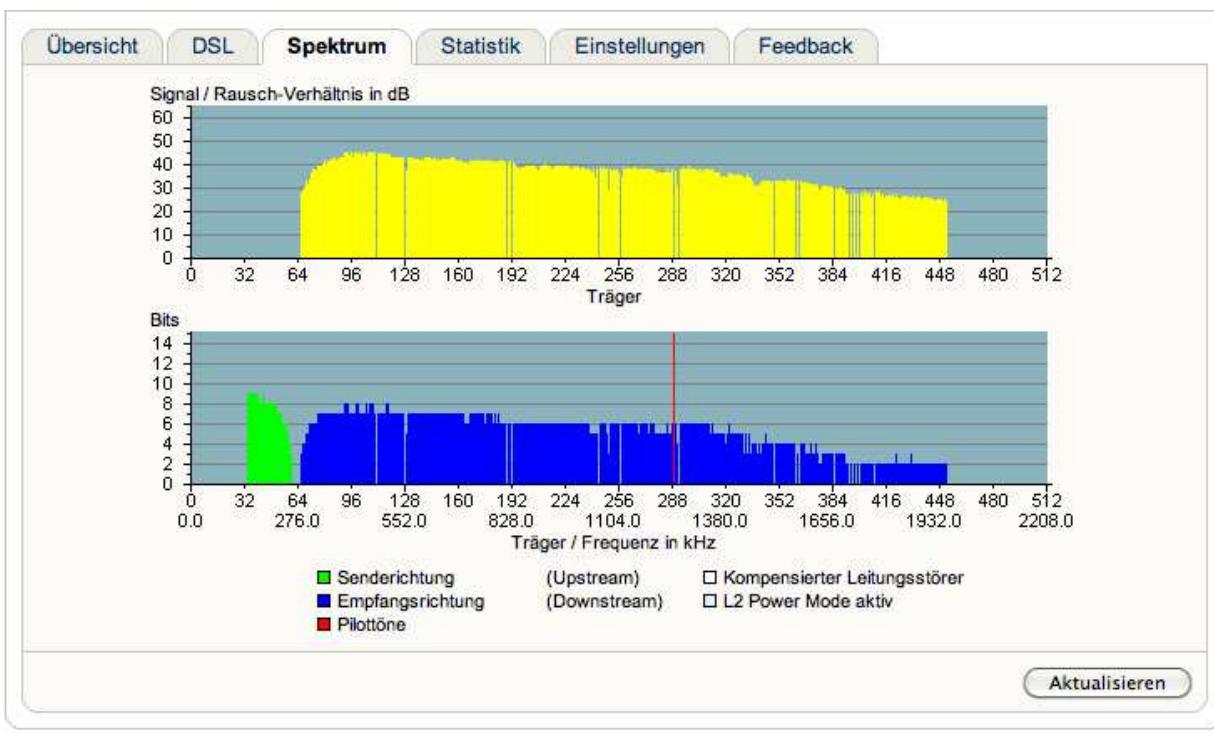
Störeinflüsse sind folgendermaßen charakterisiert:

Die Störeinflüsse (im Modell unter  $z(t)$  zusammengefasst) sind additive Komponenten zu den medienbedingten Abweichungen, die in ihrem genauen Verlauf nicht vorab bestimmbar sind.

Bei den oben angegebenen Arten von Störeinflüssen lassen sich solche feststellen, die im Grundsatz ständig vorhanden sind, wie das weiße Rauschen (Grundstöranteil) oder auch die Brummsignale (niederfrequente Störungen - Beispiel: 50 Hz, die von Stromversorgungsleitungen stammen). Andere Störeinflüsse können von anderen benachbart verlaufenden Medien erzeugt werden, wie etwa das Nebensprechen (Störungen von nebenliegenden Leitungen). Man kann aber auch quasi sich selbst stören, nämlich dann, wenn Echo-Bildungen von den eigenen Signalen entstehen. Die letzte Art, die Störimpulse, fasst alle weiteren Störungen zusammen, deren Ursache häufig gar nicht genau festgestellt werden kann (z.B. ein Umschaltvorgang im Medium, der kurzfristig zu Störimpulsen führen kann).

Störeinflüsse können sowohl kurzfristig als auch langfristig auftreten. Kurzfristige Störungen können beispielsweise durch transiente, stochastische Prozesse oder Impulsstörungen auftreten. Lange anhaltende Störungen werden beispielsweise durch Bündelfehler (Echobildung, Nebensprechen, (thermisches) Rauschen, Anschalten von induktiven Lasten (z.B. Motor)), aber auch durch Synchronisationsfehler hervorgerufen.

# Signal/Rausch-Verhältnis bei DSL



Beispiel DSL: dargestellt ist hier ein Beispiel der Signalqualität in Abhängigkeit der Frequenz bei einer DSL-Leitung. In Relation dazu sieht man im unteren Teil der Abbildung die erzielte Datenrate auf der Leitung – bei höherem Signal/Rausch-Abstand hat man die Möglichkeit, mehr Signalstufen zu verwenden und erzielt damit höhere Datenraten.

# Nyquist- und Shannon-Theorem

## • H. Nyquist (1924):

► *Störungsfreier Kanal* mit eingeschränkter Bandbreite:

- Maximale Datenrate [Bit/s] =  $2 \cdot B \cdot \text{Id}(n)$ 
  - $B$ : Bandbreite des Kanals
  - $n$ : Anzahl diskreter Signalstufen



## • C. Shannon (1948)

► Bandbreitenbeschränkter Kanal mit *zufälligem Rauschen*:

- Maximale Datenrate [Bit/s] =  $B \cdot \text{Id}(1 + S/N)$ 
  - $S$ : Stärke des empfangenen Signals
  - $N$ : Stärke des Störsignals
  - $S/N$ : Signal-Rausch-Abstand (*Signal to Noise Ratio, SNR*)



Zwei wichtige Theoreme für die Datenrate, die theoretisch auf einem gegebenen Kanal erreicht werden kann, wurden von Nyquist und Shannon aufgestellt.

Nyquist geht von einem Kanal ohne Störungen aus. Dieser Kanal erlaubt aufgrund von Dämpfung nur die Verwendung einer bestimmten Bandbreite  $B$ . Das Nyquist-Theorem erlaubt die Berechnung der maximalen Datenrate, die auf diesem Kanal unter Verwendung einer Codierung mit  $n$  Signalstufen erreicht werden kann.

Shannon vernachlässigt die verwendete Codierung, berücksichtigt dafür aber Störsignale, die durch externe Einflüsse auf den Kanal einwirken. In Abhängigkeit von der Stärke der Störsignale kann nur eine bestimmte Datenrate erzielt werden. Der Faktor  $S/N$  ist hierbei der Signal-Rausch-Abstand – das Verhältnis von Signalstärke zu Stärke des Rauschens. (Dieser wird in der Praxis auch oft in Dezibel angegeben.)

Für die Berechnung der in der Praxis erzielbaren Datenrate sind beide Faktoren von Bedeutung – bei vorgegebener Bandbreite ist stets das *Minimum* der Ergebnisse der beiden Theoreme maßgeblich, um die maximal erzielbare Bandbreite abzuschätzen. Bitte beachten Sie, dass es sich tatsächlich nur um eine Abschätzung handelt, da die beiden Theoreme theoretisch erzielbare Datenraten ermitteln. In der Praxis können weitere Effekte dazu führen, dass noch geringere Datenraten erreicht werden. Diese ignorieren wir hier.

## Beispiel: Nyquist- und Shannon-Theorem

- **Gegebener Kanal:**

- ▶ Bandbreite von 3.000 Hz
- ▶ Zweiwertiges Signal (Z.B. NRZ-Codierung)
- ▶ Signal-Rauschabstand von 30 dB

- **Maximale Datenrate  $R_{max}$ :**

- ▶ *Nyquist:*

- $R_{ny} = 2 \cdot 3000 \text{ [Hz]} \cdot \text{ld } 2 \text{ [Bit]} = 6.000 \text{ Bit/s}$

- ▶ *Shannon:*

- $30 \text{ dB} = 10 \cdot \log_{10}(S/N) \rightarrow S/N = 10^3 = 1.000$

- $R_{Sh} = 3000 \cdot \text{ld}(1 + 1000) \approx 30.000 \text{ Bit/s}$

- ▶  $R_{max} = \min\{R_{ny}, R_{Sh}\} = 6.000 \text{ Bit/s}$

Umrechnung von Dezibel in absolute Werte für S/N:

$$S/N = 1000 \rightarrow 30 \text{ dB}$$

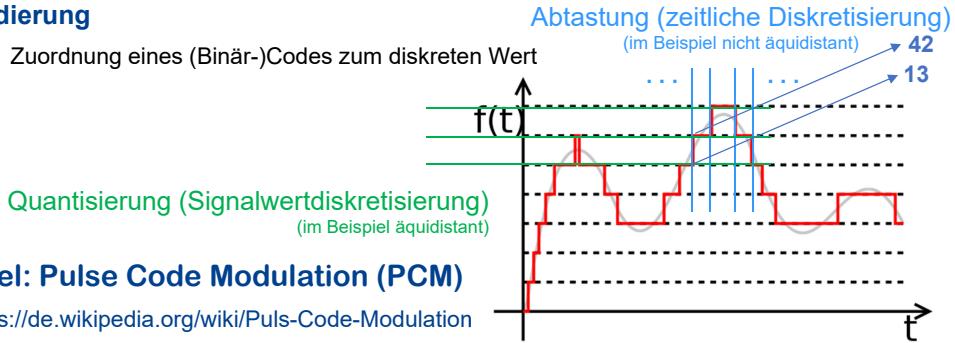
$$= 100 \rightarrow 20 \text{ dB}$$

$$= 10 \rightarrow 10 \text{ dB}$$

## Wandlung kontinuierlicher in diskrete Werte

- Konvertierung analoger in digitale Werte und zurück

- ▶ Übertragung analoger Signale in digitaler Darstellung
  - z.B. bei digitalen Telefonkanälen (ISDN, GSM, ...)
  - Verwendung von (Binär-)Codes zur Codierung der digitalen Werte
- ▶ **Abtastung** des analogen Signals in regelmäßigen Intervallen (Zeitdiskretisierung)
- ▶ **Quantisierung** der abgetasteten Werte (Signalwertdiskretisierung)
  - Definition von Quantisierungsintervallen
- ▶ **Codierung**
  - Zuordnung eines (Binär-)Codes zum diskreten Wert



- Beispiel: Pulse Code Modulation (PCM)

- ▶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Puls-Code-Modulation>

Bisher ausgespart wurde die Übertragung analoger Signale in digitaler Darstellung, da der Fokus der Vorlesung auf der Übertragung digitaler Signale liegt. Zum Abschluss soll aber auch dieser Fall kurz betrachtet werden.

Zur Übertragung von analogen Signalen über digitale Übertragungssysteme muss man die Signale vorher *digitalisieren*, d.h. in digitale Daten umsetzen. Dies erreicht man durch eine zeitdiskrete *Abtastung* des analogen Signals und eine anschließende Umsetzung des abgetasteten, kontinuierlichen Wertes in einen diskreten Wert. Bei dieser Umsetzung teilt man die analoge Werteskala in endlich viele Bereiche ein. Jedem der Bereiche (*Quantisierungsintervalle*) ordnet man einen digitalen Wert zu (*Codierung*). Da den analogen Werten eines Quantisierungsintervalls mit der Breite  $a$  nur ein digitaler Wert zugeordnet wird, erhält man einen Quantisierungsfehler von max.  $\pm a/2$ . Diesen Wert kann man bei genügend Intervallen in Kauf nehmen, da dieser Fehler der maximale Fehler ist, den man auch nach der Übertragung hat. Bei einer analogen Übertragung würden noch Störsignale hinzukommen, die meist noch durch analoge Komponenten verstärkt werden, und einen größeren Fehler als  $a/2$  verursachen.

Ein Standardverfahren ist die sogenannte Pulse Code Modulation.

## Abtasttheorem

### • Abtasttheorem von Nyquist/Shannon u.A.

- ▶ Zur fehlerfreien Rekonstruktion des Signalverlaufs eines abgetasteten Analogsignals ist eine *Mindestabtasthäufigkeit* (Abtastfrequenz  $f_A$ ) erforderlich
- ▶ Eine Signalfunktion, die nur Frequenzen im Frequenzband  $B$  (bandbegrenztes Signal) enthält, wobei  $B$  gleichzeitig die höchste Signalfrequenz ist, wird durch ihre diskreten Amplitudenwerte im Zeitabstand  $t_0 = 1/(2B)$  vollständig bestimmt
- ▶ Andere Formulierung:
  - Die Abtastfrequenz  $f_A$  muss mindestens doppelt so hoch sein wie die höchste im abzutastenden Signal vorkommende Frequenz  $f_{Grenz}$ :
    - $f_A \geq 2 * f_{Grenz}$

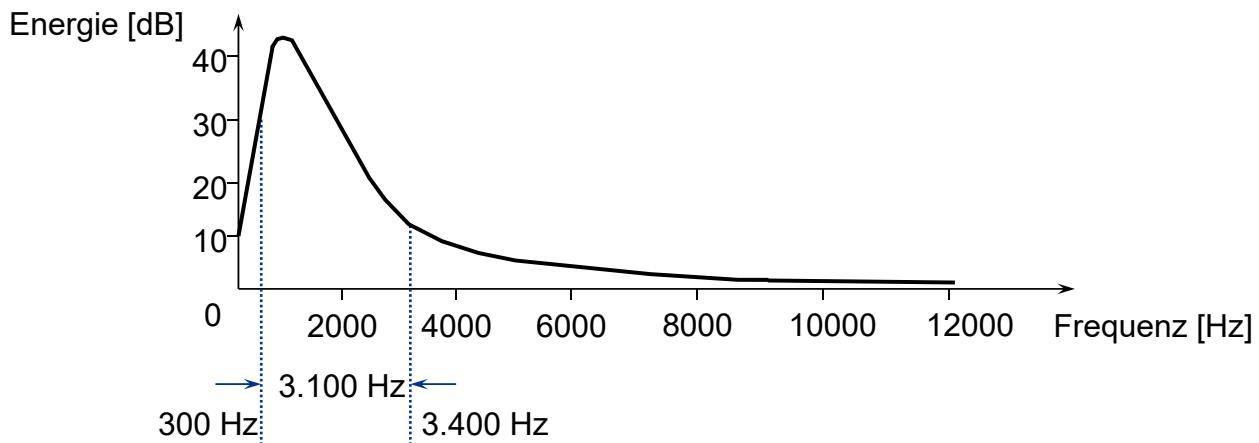


Für die Abtastung eines Signals ist es erforderlich, dass die Abtastrate mindestens doppelt so hoch ist wie die maximale relevante Frequenz, die im Signal vorkommen kann. Dies wird durch das Abtasttheorem festgelegt. (Dieses Ergebnis wurde von mehreren Forschergruppen unabhängig voneinander erzielt, so dass das Theorem auch unter verschiedenen Namen zu finden ist. Generell ist es am einfachsten, nur schlicht „Abtasttheorem“ zu sagen.)

## Frequenzspektrum eines Signals

- **Bandbegrenztes Signal:**

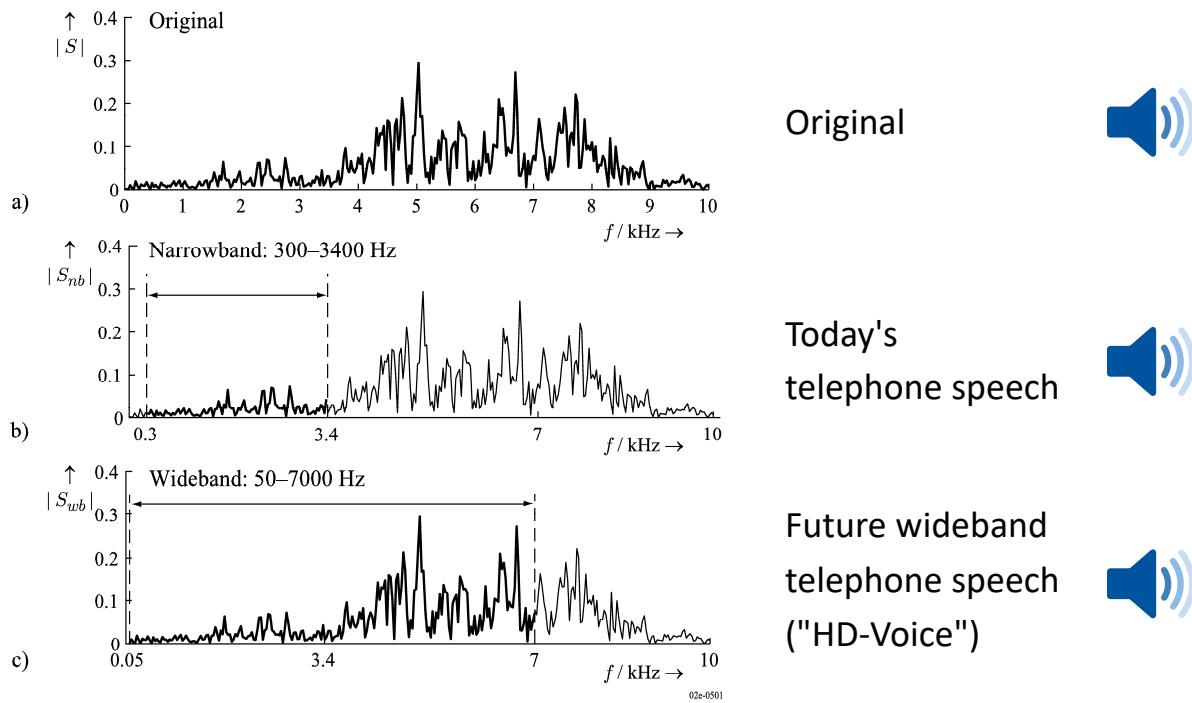
- ▶ Signale können ein natürlich begrenztes Frequenzspektrum umfassen oder durch technische Mittel auf einen Ausschnitt ihres Spektrums (Bandbreite) begrenzt werden
  - Beispiel: ITU-Standardtelefonkanal – Kontinuierliches Frequenzspektrum der menschlichen Stimme begrenzt auf 300 – 3.400 Hz



Wenden wir das Abtasttheorem oder generell PCM nun auf ein Beispiel an: die Übertragung von Sprache über ein Telefonnetz. Das ursprüngliche Telefonnetz war analog, und hier wurde die Designentscheidung getroffen, die Bandbreite der menschlichen Sprache künstlich zu beschränken, so dass nur die wichtigsten Signalkomponenten übertragen werden. Diese Begrenzung wurde genormt auf den Bereich von 300 – 3.400 Hz.

Bei der Einführung digitaler Telefonie war die Bedingung, dass die Sprachqualität des analogen Netzes beibehalten werden sollte. Daher wurde 3.400 Hz als die obere zu berücksichtigende Grenzfrequenz festgelegt.

## Comparison: Telephone Speech and Wideband Speech



Quelle: Vorlesung Digital Speech Transmission | Prof. Dr.-Ing. Peter Jax  
02e-0501

- b) ist der Normale“ Telefonkanal 300-3400Hz (z.B. Codec G.711)
- c) ist „High Definition Sound Performance (HDSP)“ bzw. HD-Voice (Codec G.722)

## Pulse Code Modulation (PCM) – Beispiel

- **Beispiel digitale Sprachübertragung:**

- ▶ Grenzfrequenz: 3.400 Hz
- ▶ Abtastfrequenz: 8.000 Hz ( $> 6.800$  Hz)  
d.h. alle  $125 \mu\text{s}$  wird abgetastet
- ▶ Kodierung der Signalwerte: 8 Bit (entspricht  $2^8 = 256$  Intervallen)
- ▶ Datenrate:  $8.000 \text{ Hz} \cdot 8 \text{ Bit} = 64.000 \text{ Bit/s} = 64 \text{ kBit/s}$

Die Digitalisierung der Sprache erfolgt nun mittels PCM. Die obere Grenzfrequenz wurde auf 3.400 Hz festgelegt. Nach Abtasttheorem ergibt sich daraus eine (theoretische) Abtastrate von mindestens 6.800 Hz. In der Praxis wird ein Faktor von mindestens 2,2 verwendet, da unsere Hardware nicht perfekt ist und die Verwendung von Faktor 2 Störsignale erzeugen würde. (Die Details sind hier nicht relevant.)

Daher sollte man eine Abtastrate von mindestens 7.480 Hz verwenden. Da Informatiker gerne in Bytes denken und 8 somit eine Schöne Zahl ist, wurde auf 8.000 Hz aufgerundet.

8.000 Mal die Sekunde wird somit die Amplitude des analogen Eingabesignals gemessen und in einen digitalen Wert umgewandelt. Hier hat man für die Telefonie festgelegt, dass die Approximation des Originalsignals gut genug ist, wenn 256 verschiedene Amplitudenwerte möglich sind. Jeder abgetastete Wert wird daher mit 8 Bit codiert.

Dadurch erzeugt man einen Datenstrom mit 64.000 Bit/s. Dieser Wert hat sich bis heute als nötige Datenrate für die Übertragung von Sprache gehalten.

(Schaut man genauer in Standards wie GSM – LTE hinein, stellt man fest, dass deutlich geringere Datenraten verwendet werden. Dies liegt daran, dass eine Komprimierung der Sprachdaten erfolgt.

# Kapitel 2: Bitübertragungsschicht

- **Grundlagen**

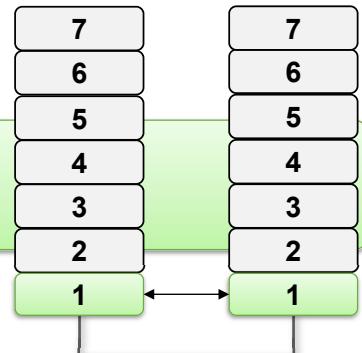
- ▶ Übertragungsmedien
- ▶ Signale und Bandbreite

- **Übertragung von Signalen**

- ▶ Umformung, Basisband, Modulation
- ▶ Übertragungsparameter, Störeinflüsse
- ▶ Leitungscodes und Modulationsverfahren
- ▶ PCM

- **Kanalnutzung**

- ▶ Multiplexing



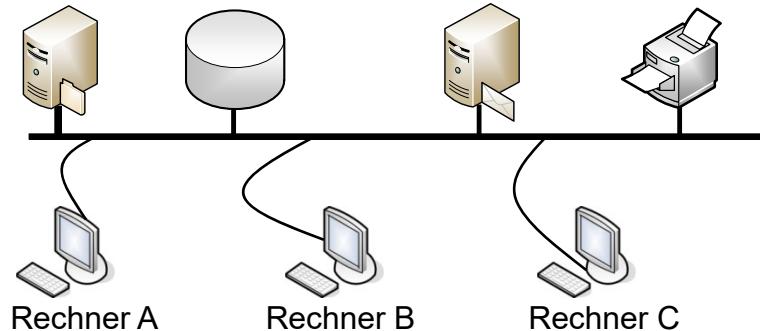
## Dedizierter und mehrfach genutzter Kanal

- **Dedizierter Kanal**

- ▶ Nachrichtentechnischer Kanal verbindet genau eine Quelle mit genau einer Senke
- ▶ Betriebsarten: simplex, halbduplex oder duplex

- **Mehrfach genutzter Kanal (*Shared Medium*)**

- ▶ Mehr als zwei Dienstnutzer greifen auf dasselbe Medium zu
- ▶ Beispiel: Lokales Netz (Wifi) im Büro oder zu Hause



Der letzte Aspekt, welcher im Zusammenhang mit dem nachrichtentechnischen Kanal behandelt wird, betrifft die Frage, wie dieser eigentlich genutzt wird. Bisher wurde i.d.R. vom einfachsten und bequemsten Fall ausgegangen, dass der Kanal von genau zwei Dienstnutzern, der Quelle und der Senke, genutzt wird. In diesem Fall sagt man, dass der Kanal diesen beiden Dienstnutzern gewidmet ist; man spricht von einem dedizierten Kanal. Hierbei lässt sich weiter zwischen verschiedenen Betriebsarten unterscheiden:

- *simplex*: Senden nur in eine Richtung möglich
- *halbduplex*: Senden nur in eine Richtung zur Zeit erlaubt, aber Wechsel der Senderichtung möglich
- *duplex*: Senden in beiden Richtungen gleichzeitig möglich

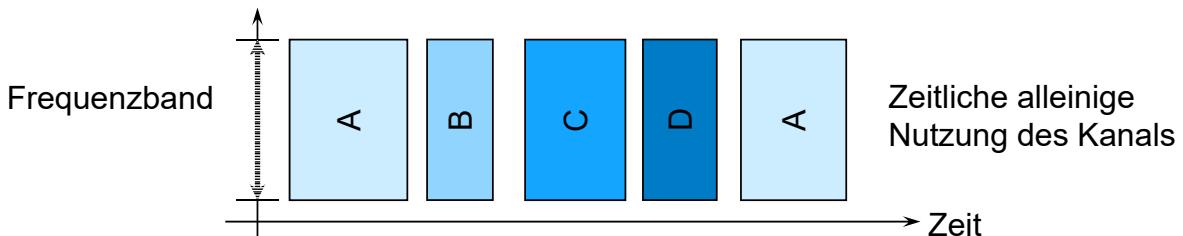
Sehr viel mehr protokolltechnische Überlegungen muss man sich machen, wenn man es mit einem Halbduplex-Kanal zu tun hat, der von mehreren Dienstnutzern gleichzeitig genutzt werden möchte und daher vor der sinnvollen Nutzung als erstes zugeteilt bzw. reserviert werden muss. Bei einem von mehreren Dienstnutzern genutzten Kanal sind aufgrund konkurrierender Sendeversuche zusätzliche Maßnahmen zur Zugriffskontrolle nötig. Andererseits bietet ein solcher Kanal aber auch den Vorteil von Broadcasts, d.h. die Daten werden nur einmal auf das Medium gegeben und gleichzeitig von allen Teilnehmern empfangen, die an dieses Medium angeschlossen sind.

# Mehrfachnutzung von Medien: Zeitmultiplex

Geteiltes Medium / Kanal

Zeitliche Unterteilung  
(Zeitmultiplex)

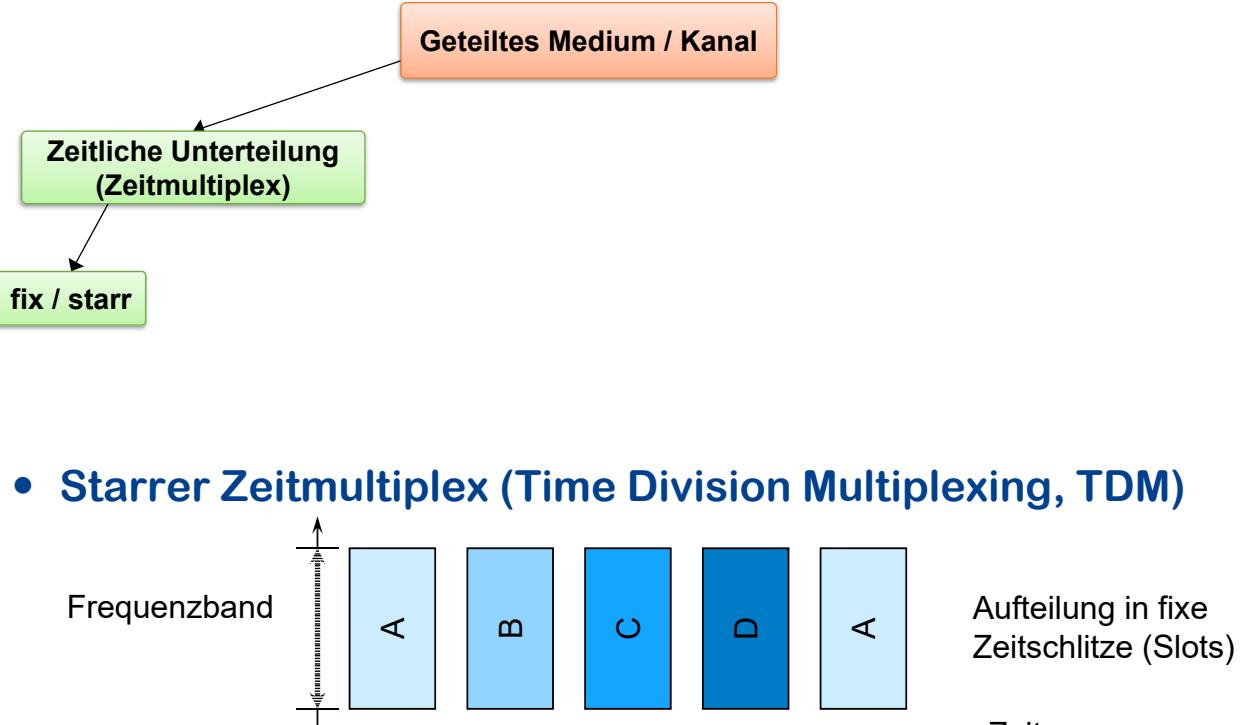
- **Zeitmultiplex (Time Division Multiplexing, TDM)**



Oft hat man ein Medium mit einer hohen Bandbreite, die von einem Sender alleine nicht ausgenutzt wird. Zusätzlich hat man mehrere Sender, die das Medium benutzen wollen. Also müssen sich diese Sender das Medium teilen. Dieses Teilen nennt man auch *Multiplexen* (Bündelung) des physikalischen Mediums. Man bezeichnet das ganze Medium, welches von allen benutzt wird als Übertragungsweg. Die einzelnen virtuellen Kanäle, die durch Multiplexen entstehen, werden als *Übertragungskanal* bezeichnet. Somit besteht ein Übertragungsweg aus mehreren Übertragungskanälen, die man auf unterschiedliche Art erzeugen kann.

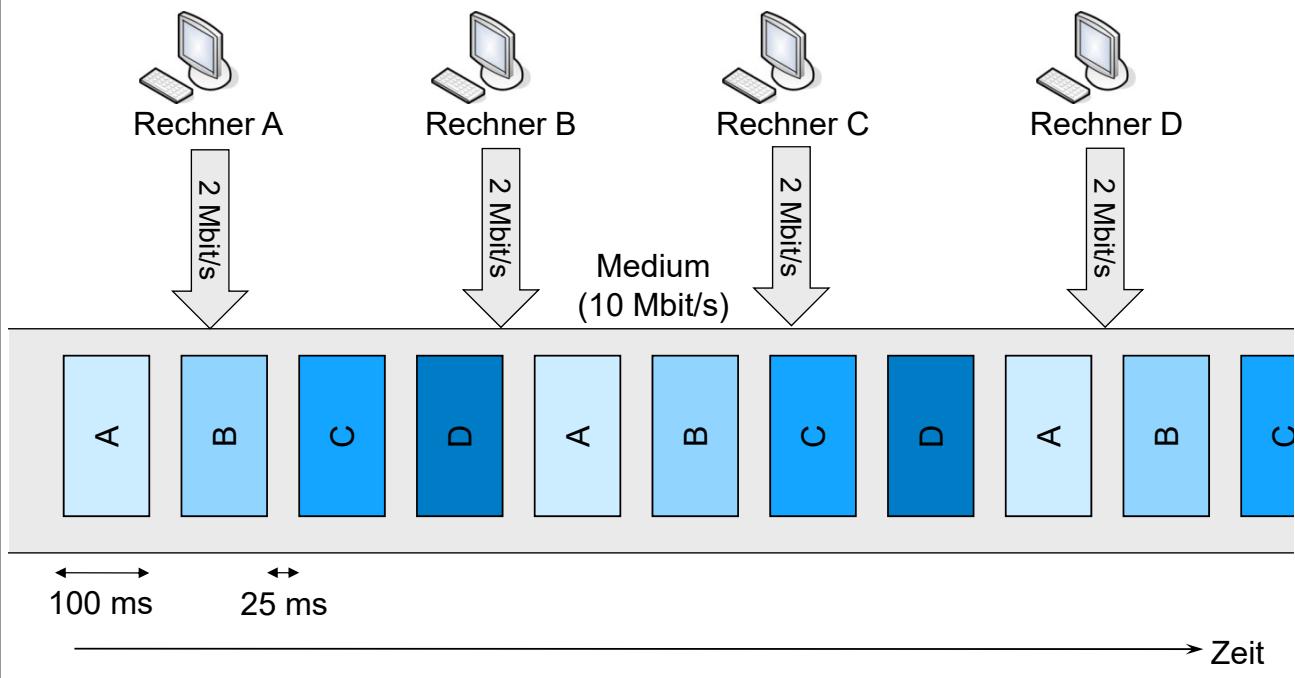
**Zeitmultiplex:** Bei diesem Multiplexverfahren bekommt ein Sender das Medium nur für eine gewisse Zeitperiode zugeteilt, besitzt aber in dieser Zeitspanne die volle Bandbreite des Mediums. Zwischen den einzelnen Zuteilungen des Mediums liegt meist noch eine kleine Schutzzeit, um die einzelnen Zeitschlüsse vor Störungen benachbarter Übertragungen zu schützen.

## Mehrfachnutzung von Medien: Zeitmultiplex

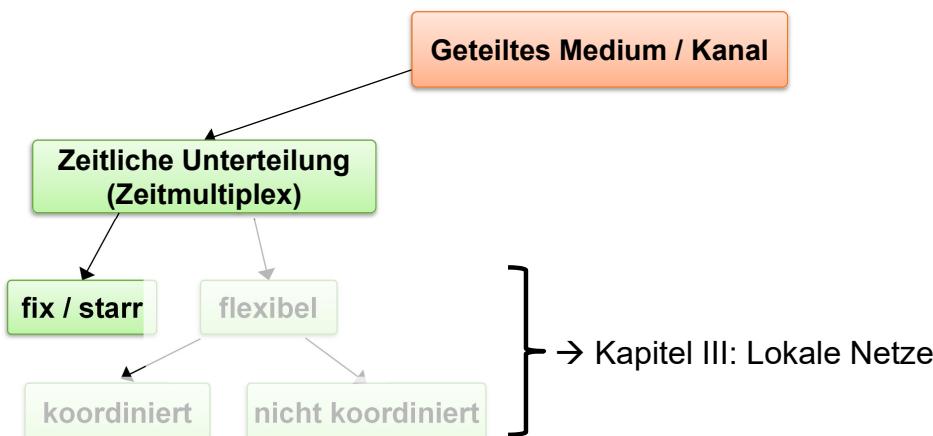


Eine einfache Implementierung ist die Verwendung eines starren Schedules – es gibt einen Scheduler, der entscheidet, welche Slots welcher Station zugeteilt werden. Dabei bekommt jede Station immer den x. Zeitslot, um eine feste Datenrate zu garantieren. Hier bekommt jede Station jeden vierten Slot.

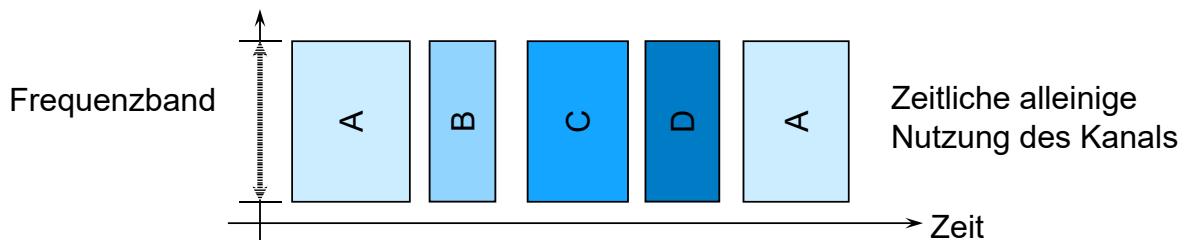
## Zeitmultiplex



# Mehrfachnutzung von Medien: Zeitmultiplex



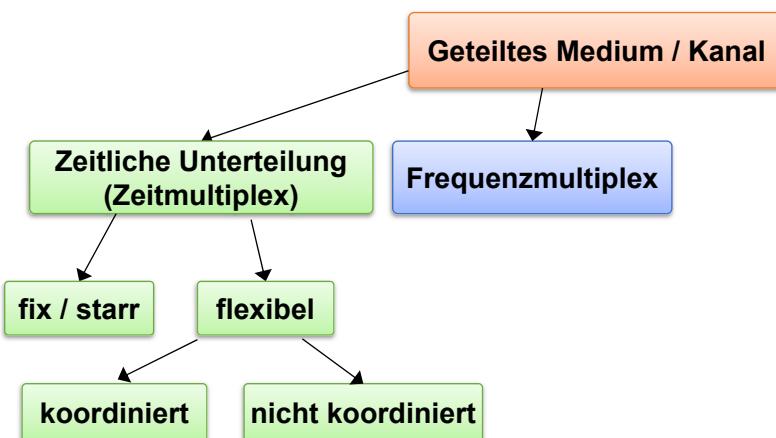
## • Flexible Zeitmultiplex (Time Division Multiplexing, TDM)



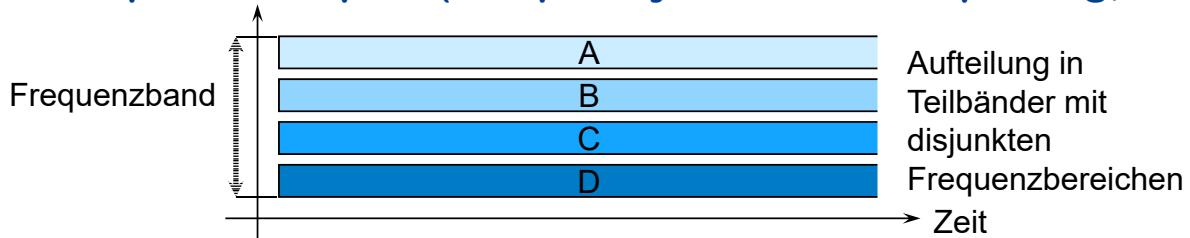
TDMA kann aber auch flexibel implementiert werden. Dies kann koordiniert geschehen (ein Scheduler kann dynamisch Slots zuweisen bzw. alle Stationen einigen sich untereinander auf einen Schedule) oder nicht koordiniert (Stationen treten in Wettbewerb). Dies kann man mit Slots gleicher Größe, aber auch mit variabler Slotgröße implementieren.

Ein paar Varianten werden im nächsten Kapitel anhand der Beispiele Token Ring und CSMA/CD detaillierter betrachtet.

# Mehrfachnutzung von Medien durch Multiplexen



## • Frequenzmultiplex (Frequency Division Multiplexing, FDM)



**Frequenzmultiplex:** Bei einer breitbandigen Übertragung kann man das Frequenzspektrum in mehrere Frequenzbereiche aufspalten und somit Unterkanäle erzeugen. Diese Kanäle können dann unabhängig von den anderen benutzt werden. Sie besitzen natürlich nur einen Teil der ursprünglichen Bandbreite. Meist ist die Summe der Bandbreiten der Unterkanäle sogar kleiner als die gesamte Bandbreite, da man zwischen den Kanälen kleine Bereiche frei lässt, um gegenseitige Störungen der einzelnen Bänder zu verhindern. Dieses Verfahren eignet sich nicht für die Übertragung im Basisband, es ist eine Modulation der Daten auf einen Kanal notwendig.

**Wellenlängenmultiplex:** Beim Wellenlängenmultiplex handelt es sich physikalisch betrachtet um eine spezielle Variante des Frequenzmultiplex (Frequenz  $f$  und Wellenlänge  $\lambda$  besitzen eine feste Beziehung: Lichtgeschwindigkeit ist im Vakuum  $c = \lambda * f$ , daher sind Frequenz und Wellenlänge begrifflich austauschbar), bei der verschiedene Wellenlängen über eine einzelne Glasfaser übertragen werden – dies ist möglich, da sich die einzelnen Wellenlängen kaum oder nicht beeinflussen. Da die Frequenzen im optischen Bereich liegen, hat sich der Begriff Wellenlängenmultiplex (WDM, Wavelength Division Multiplex) durchgesetzt.

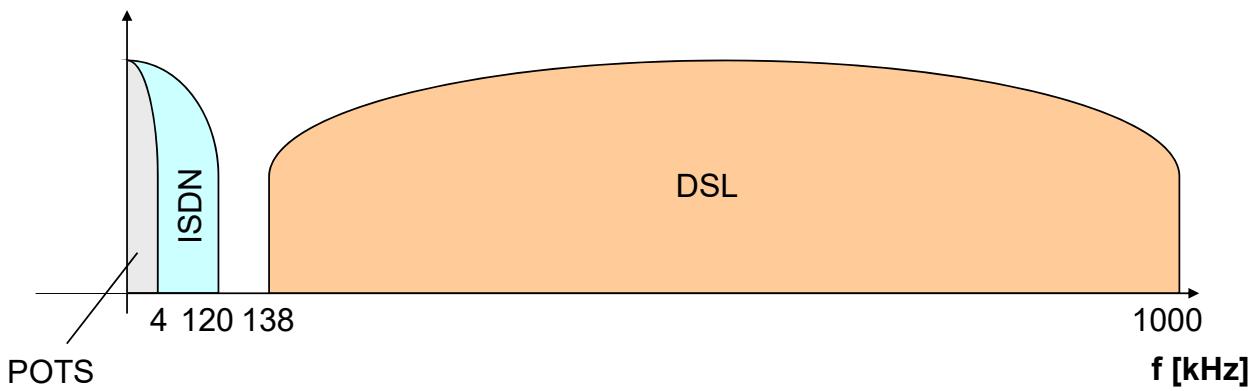
## Multiplexing bei DSL

- **Klassische Telefonkanalstruktur**

- ▶ Analoges Telefon: 300 – 3400 Hz
- ▶ ISDN: bis 120 kHz

- **DSL**

- ▶ Nutze Frequenzbereich von 138 kHz bis in den MHz-Bereich



Bereits zu Zeiten des analogen Telefonnetzes konnten mithilfe eines Modems digitale Daten über den analogen Kanal verschickt werden: durch Modulation auf die Bandbreite bis 3.400 Hz wurden Datenraten bis 56 kbit/s möglich.

Ein enormer Fortschritt war ISDN (Integrated Services Digital Network) – es ermöglichte Datenraten bis 144 kbit/s, indem einfach eine größere Bandbreite zugelassen wurde. Dies erforderte den Austausch der Hardware auf beiden Seiten des Telefonkabels, so dass nicht nur Signale bis 3.400 Hz, sondern bis 120 kHz berücksichtigt wurden.

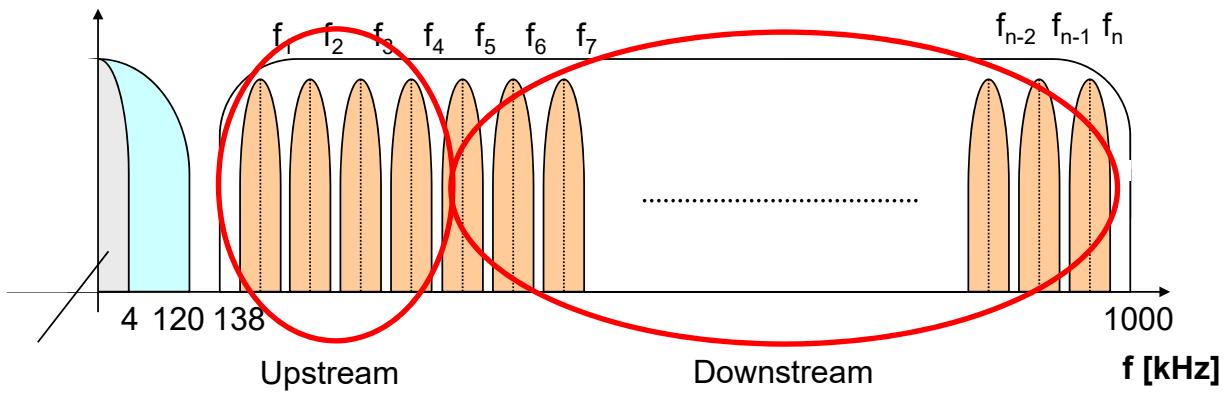
DSL (Digital Subscriber Line) führt das Grundkonzept von ISDN konsequent fort: nutzt ein größeres Frequenzband (eine größere Bandbreite) auf der existierenden Telefonverkabelung, um höhere Datenraten erzielen zu können.

# DSL: Kanalstruktur

## • DSL

► FDM: erstelle Unterkanäle mit je 4 kHz Bandbreite

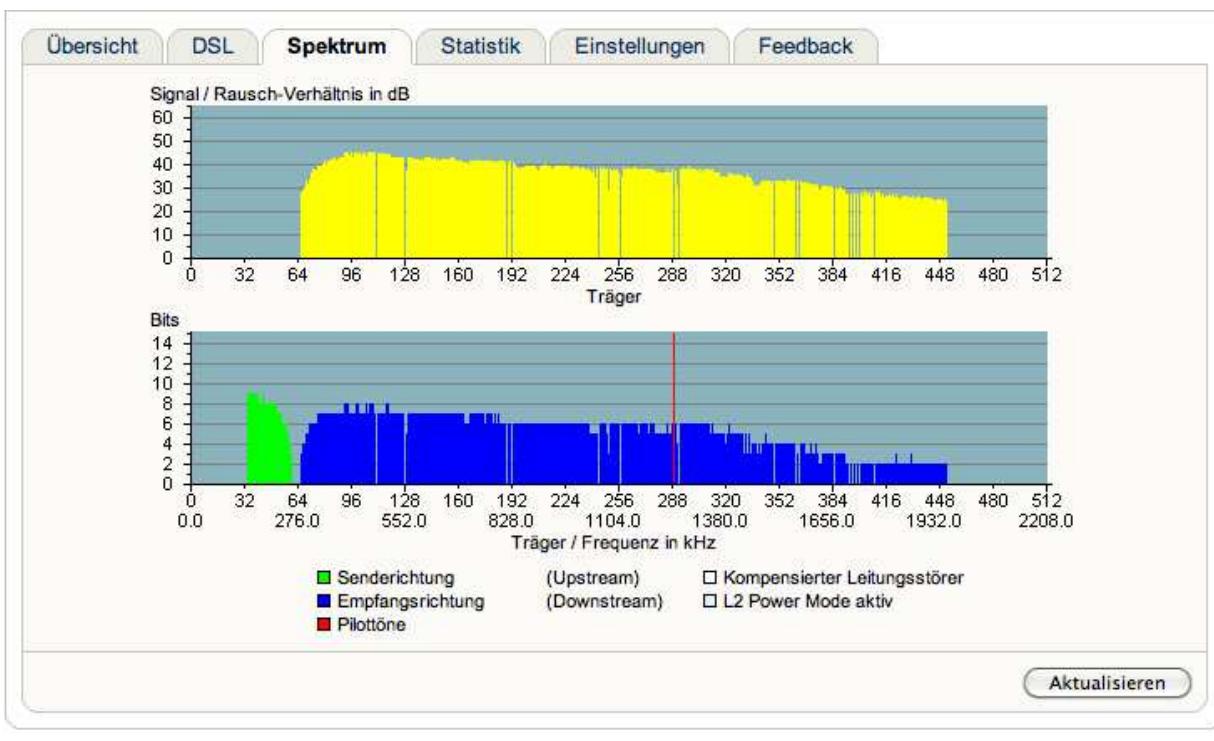
- Dämpfungs-/Störungsabhängige Verwendung der Kanäle
- Modulation pro Kanal anpassbar



DSL unterteilt den Frequenzbereich ab 138 kHz in Kanäle zu je 4 kHz Bandbreite. Dadurch wird es möglich, unabhängig voneinander mehrere Unterdatenströme parallel über das Kabel zu übertragen. Dies hat mehrere Vorteile:

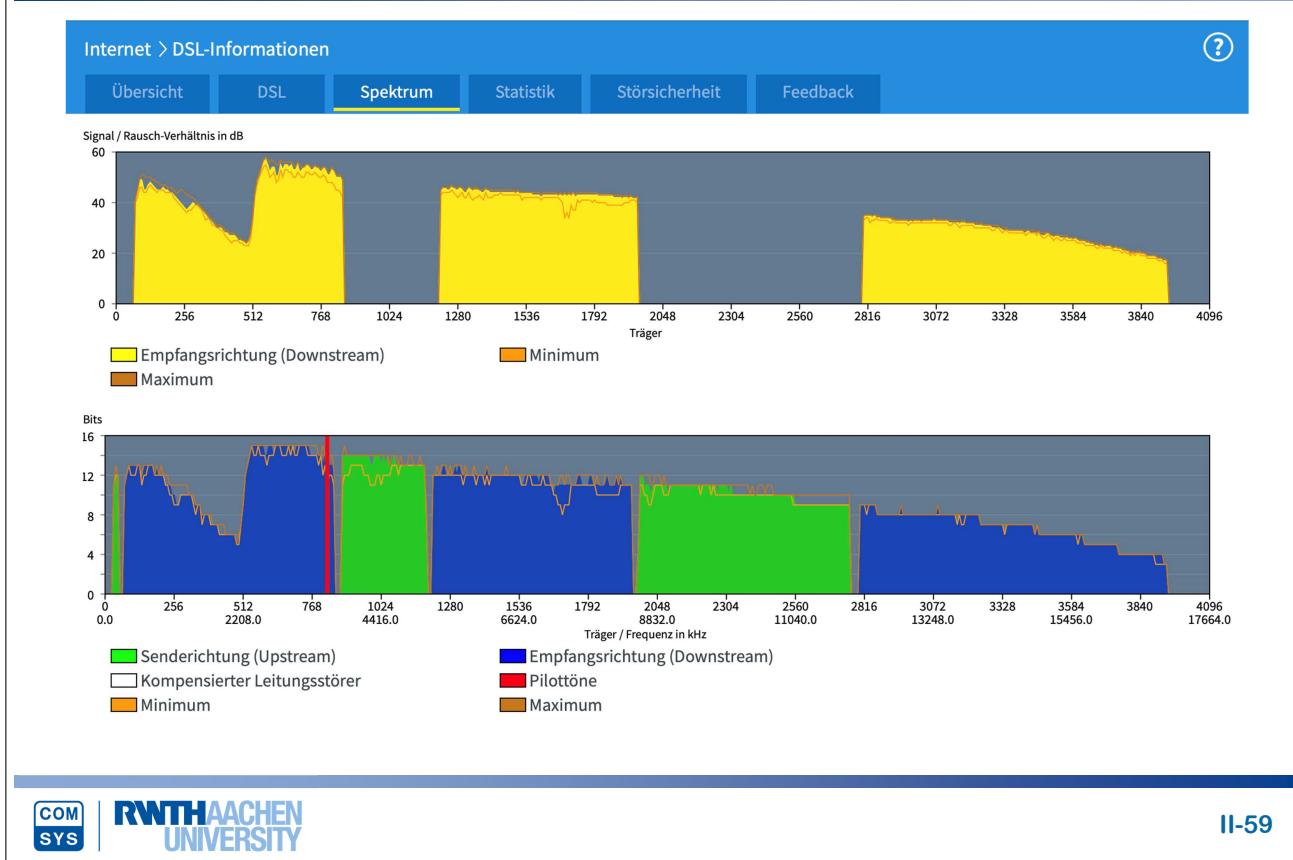
- Es wird auf einem einzigen Kabel eine Duplexkommunikation ermöglicht. Noch dazu erlaubt das Prinzip, je nach Bedarf die Anzahl der Unterkanäle auf Up- und Downstream zu verteilen, um unterschiedliche Datenraten in beide Richtungen erzielen zu können.
- Auf jedem Kanal kann QPSK oder QAM mit unterschiedlicher Zahl an Zuständen verwendet werden. Je nach SNR auf einem bestimmten Kanal kann die Modulation angepasst werden, um die maximal mögliche Datenrate ohne zu hohe Bitfehlerrate zu erreichen. Pro Kanal wird bei Systemstart eine Messung durchgeführt, um die erzielbare Modulation ermitteln zu können.
- Durch Dämpfung auf dem Kabel sind Kanäle in Abhängigkeit ihrer Positionierung im Frequenzbereich nur über eine bestimmte Strecke nutzbar. Je nach Abstand eines DSL-Anschlusses von der nächsten Vermittlungsstelle kann entschieden werden, wie viele Kanäle verwendet werden können (da hohe Frequenzen stärker gedämpft werden als niedrige). Aus diesem Grund können in Abhängigkeit des Wohnortes (d.h. der Distanz zur nächsten Vermittlungsstelle) auch unterschiedliche Datenraten erreicht werden.

# Signal/Rausch-Verhältnis bei DSL



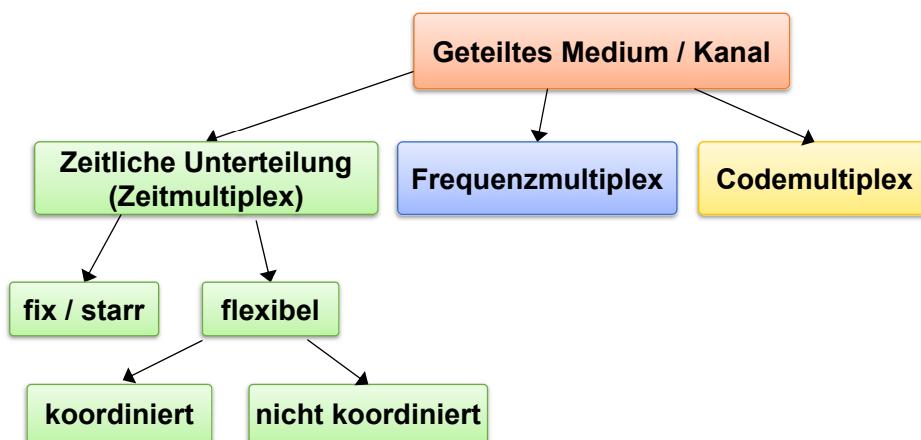
Beispiel DSL: dargestellt ist hier ein Beispiel der Signalqualität in Abhängigkeit der Frequenz bei einer DSL-Leitung. In Relation dazu sieht man im unteren Teil der Abbildung die erzielte Datenrate auf der Leitung – bei höherem Signal/Rausch-Abstand hat man die Möglichkeit, mehr Signalstufen zu verwenden und erzielt damit höhere Datenraten.

# Signal/Rausch-Verhältnis bei VDSL



Beispiel DSL: dargestellt ist hier ein Beispiel der Signalqualität in Abhängigkeit der Frequenz bei einer DSL-Leitung. In Relation dazu sieht man im unteren Teil der Abbildung die erzielte Datenrate auf der Leitung – bei höherem Signal/Rausch-Abstand hat man die Möglichkeit, mehr Signalstufen zu verwenden und erzielt damit höhere Datenraten.

# Mehrfachnutzung von Medien: Codemultiplex



## Mehrfachnutzung von Medien: Codemultiplex

### • Codemultiplex:

- ▶ Alle Sender nutzen das gleiche Frequenzband und senden gleichzeitig

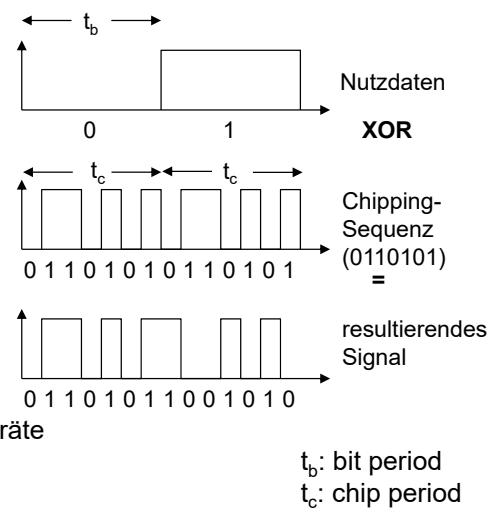
- ▶ Signal (Bit) wird auf der Senderseite mit einer für den Sender eindeutigen Pseudozufallszahl (Chipping-Sequenz) XOR-verknüpft

- ▶ Empfänger kann mittels bekannter Chipping-Sequenz und einer Korrelationsfunktion das Originalsignal restaurieren

- ▶ Einsatz bspw bei UMTS

- Variable Codes/Codelängen für mobile Geräte

- 1,92 Mbps = 4 Bit Code
- 30 kbps = 256 Bit Code



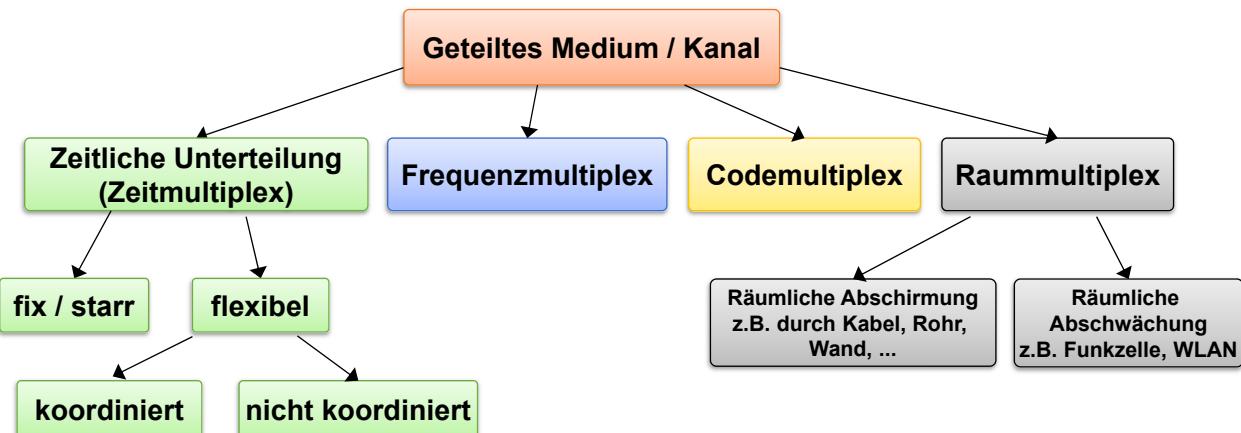
$t_b$ : bit period  
 $t_c$ : chip period

*Codemultiplex*: eine weitere Möglichkeit besteht darin, alle Sender gleichzeitig die komplette Bandbreite nutzen zu lassen, indem statt eines einzelnen Bits jeweils eine bestimmte Bitfolge (Chipping-Sequenz, Codefolge) übertragen wird. Die Übertragungen der unterschiedlichen Sender überlagern sich auf dem Medium, aber bei geeigneter Wahl der Chipping-Sequenzen kann ein Empfänger eine einzelne Übertragung herausfiltern. Am besten funktioniert das “herausfiltern”, wenn die verwendeten Codes *orthogonal* zueinander sind – in dem Fall stören sich verschiedene Übertragungen gar nicht. Verwendet man Codes, die nicht orthogonal sind, erzeugt jede Übertragung etwas Rauschen für die anderen Übertragungen.

Dieses Multiplexprinzip sollte eine Alternative zur gemeinsamen Verwendung von FDM und TDM darstellen und wird z.B. bei UMTS genutzt.

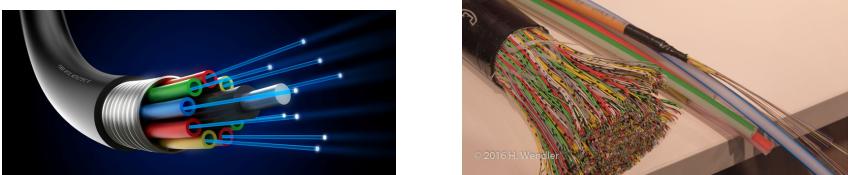
Generell gilt der Zusammenhang: je länger die Codefolge, umso geringer die Nutzdatenrate. Dafür erhöht sich die Anzahl möglicher Nutzer, bzw. verringert sich die Sendeleistung. Je nach Anwendung können den Sendern unterschiedlich lange Codemuster zugewiesen werden. Dies wird z.B. bei UMTS gemacht: für eine Bruttodatenrate von 1,92 Mbps wird bei diesem Verfahren eine Codefolge mit der Länge 4 Bit verwendet. Bei 30 kbps ist die Codefolge 256 Bit lang. Dabei wird eine konstante Chip-Rate von 3,84 Mcps eingesetzt.) (c = Chips)

# Mehrfachnutzung von Medien: Raummultiplex



## • Raummultiplex („Kupfermultiplex“)

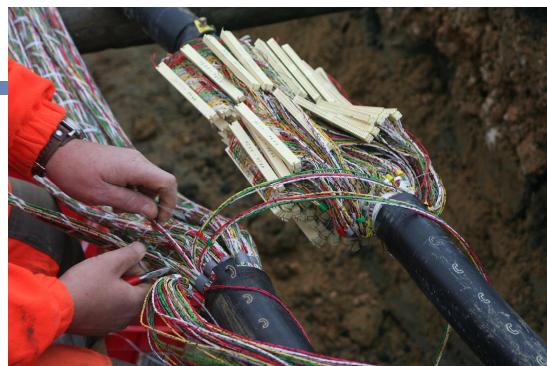
Bündelung von Adern(paaren)



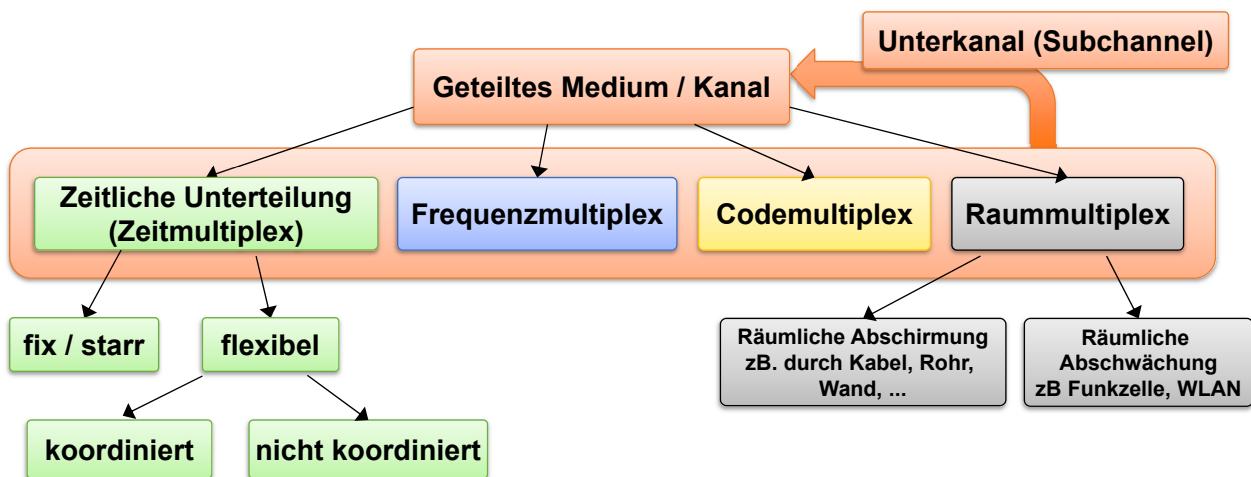
<https://mg-heute.de/karnevalsscherz-deutsche-glasfaser-macht-moenchengladbach-fit-fuer-die-zukunft/>  
<https://www.fiercetelecom.com/telecom/at-t-level-3-centurylink-slower-spending-result-lower-north-american-optical-capex-says> II-62

**Raummultiplex:** Die Mehrfachnutzung des Mediums wird beim Raummultiplex dadurch realisiert, dass mehrere physikalische Leitungen (Adern(paare) bei Kupfer- oder Glasfaserkabel, Zellen bei drahtlosen Netzen, ...) zusammengefasst werden.

## Beispiele Raummultiplex ;-)



## Weitere Unterteilung von Kanälen in Unterkanäle



- **Submedium = Shared Medium?**

- ▶ Verwendung von FDM zur Einteilung des Mediums in Frequenz(unter)kanäle
- ▶ Verwendung von TDM pro Frequenzkanal
- ▶ Z.B. GSM, UMTS, LTE, (Wi-Fi)

Multiplexverfahren können auch in Kombination eingesetzt werden – oft wird ein gegebenes Frequenzband mittels FDM in schmalere Kanäle unterteilt und die einzelnen Frequenzkanäle danach mittels TDM weiter unterteilt, um Slots koordiniert oder nicht koordiniert Stationen zuzuteilen.

Diese Kombination findet man z.B. bei GSM: das gesamte GSM-Frequenzspektrum wird in Frequenzkanäle unterteilt und pro Frequenzkanal weist ein Scheduler den Stationen nach einem festen Schedule Slots zu (immer jeder achte Slot).

Bei UMTS und LTE findet dieses Prinzip auch Verwendung, allerdings mit bedarfsgesteuerten Schedules.

Bei Wi-Fi wird das Frequenzspektrum auch in Frequenzkanäle eingeteilt, allerdings überlappen diese Frequenzkanäle. Daher kann man eigentlich nicht von FDM sprechen sondern von irgendwas-wie-beinahe-FDM, aber der generelle Ansatz ist gleich. Jeder Frequenzkanal wird mittels nicht-koordinierter TDM weiter unterteilt.

Denkbar ist auch das umgekehrte Vorgehen: das Medium wird mit TDM unterteilt und jeder Slot noch einmal weiter mittels FDM. Dies erfordert allerdings eine aufwendigere Koordination.

## Zusammenfassung

---

- **Umformung von Quellsignalen in Signale im Medium**
  - ▶ Anpassung digitaler Daten an das Medium, z.B. Strom auf Kupferkabel
- **Mediencharakteristiken und Übertragungsparameter**
  - ▶ Bandbreite eines Mediums bestimmt zusammen mit der gewählten Codierung die maximal erzielbare Datenrate
  - ▶ Datenrate und Latenz als Charakteristiken einer konkreten Übertragungsstrecke
- **Codierung und Multiplexing**
  - ▶ Leitungscodes im Basisband, Modulationsverfahren im Breitband
  - ▶ Multiplexverfahren zur Aufteilung einer Übertragungsstrecke in Kanäle

## Lessons learned

---

- **Wichtige Begriffe/Konzepte des Kapitels**

- ▶ Digitale vs. analoge Signale
  - Beide sind elektromagnetische Signale
- ▶ Bandbreite
  - Beschränkt die minimale Dauer eines Schritts und damit die Datenrate
- ▶ Leistungscodierung/Modulation
  - Anpassung der Daten an die Mediencharakteristiken: Basis-/Breitband
- ▶ Latenz
  - Verzögerung eines Signals bei der Übertragung über ein Medium
- ▶ Nyquist- und Shannon-Theorem
  - Bestimmung der möglichen Datenrate
- ▶ Multiplexing
  - Gemeinsame Nutzung eines Mediums (meist TDM und/oder FDM)