

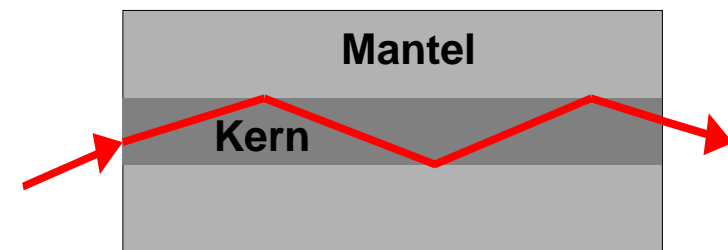
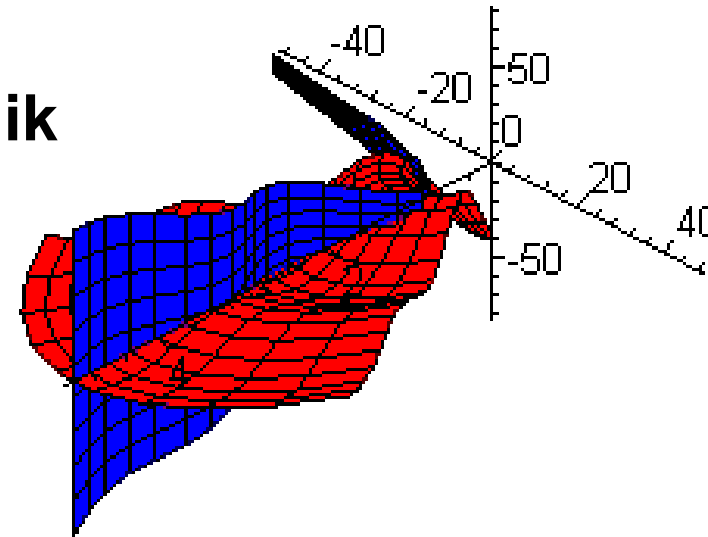


Grundlagen der Nachrichtentechnik

Teil 3

Grundlagen der Nachrichtentechnik

- 1. Grundbegriffe
- 2. Transportmedien
 - 2.1 Elektrische Leitungen
 - 2.2 Lichtwellenleiter
 - 2.3 Freie Wellenausbreitung
- 3. Nachrichtenübertragung
 - 3.1 Basisband-Übertragung
 - 3.2 Modulation
 - 3.3 Bandspreiztechnik, Spread-Spectrum Technique
 - 3.4 Zugriffsverfahren

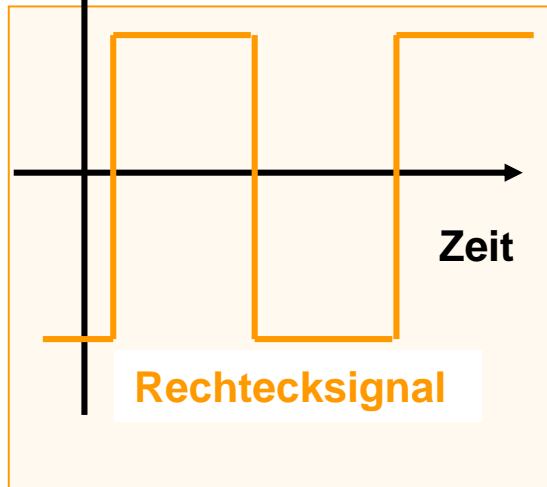


Grundbegriffe

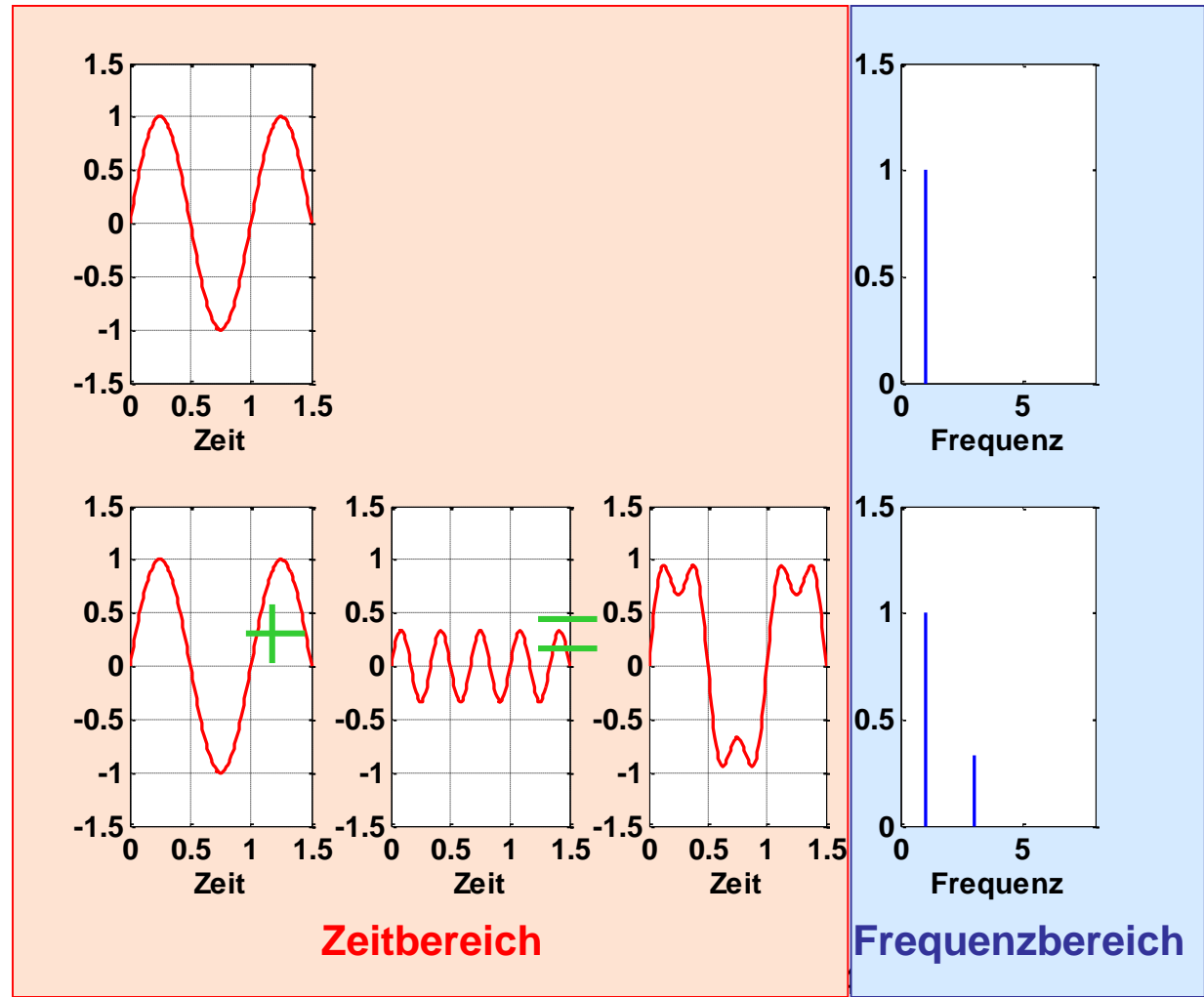
Zeitbereich und Frequenzbereich

■ Fourier-Reihenzerlegung für Rechtecksignale:

1. Annäherung durch **eine Sinuswelle** ➔



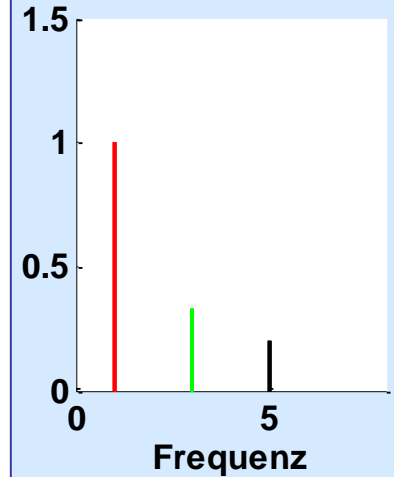
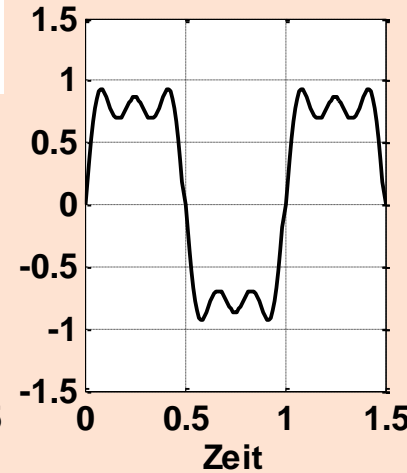
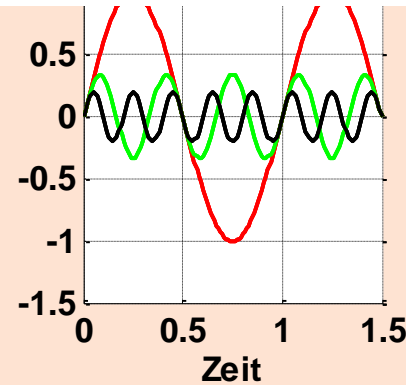
2. Annäherung durch **die Überlagerung von zwei Sinuswellen** ➔



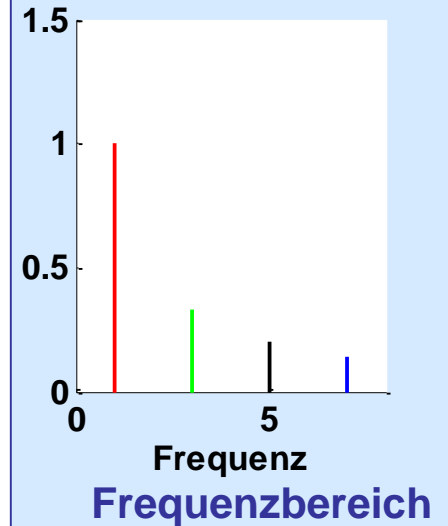
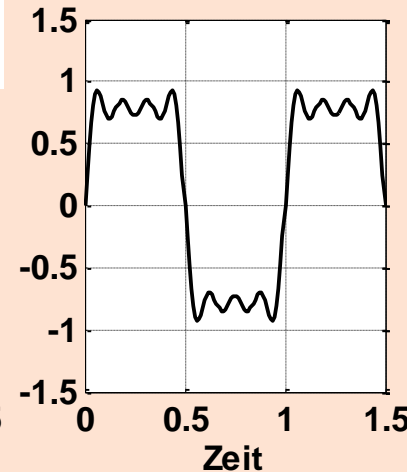
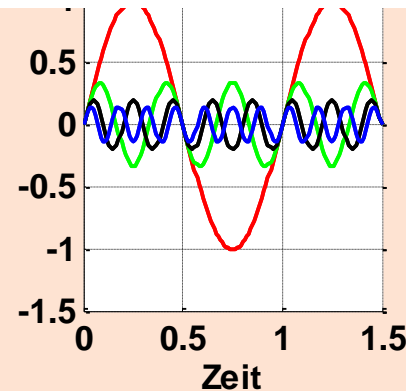
$$u(t) = \frac{4 \cdot U_0}{\pi} \left(\sin(\omega \cdot t) + \frac{1}{3} \sin(3 \cdot \omega \cdot t) + \frac{1}{5} \sin(5 \cdot \omega \cdot t) + \frac{1}{7} \sin(7 \cdot \omega \cdot t) + \frac{1}{9} \sin(9 \cdot \omega \cdot t) \dots \right)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Überlagerung von drei Sinuswellen



Überlagerung von vier Sinuswellen



Zeitbereich

■ Formeln zur Fourier-Reihenzerlegung

Beispiel: Rechtecksignal

$$u(t) = \frac{4 \cdot U_0}{\pi} \left(\sin(\omega \cdot t) + \frac{1}{3} \sin(3 \cdot \omega \cdot t) + \frac{1}{5} \sin(5 \cdot \omega \cdot t) + \frac{1}{7} \sin(7 \cdot \omega \cdot t) + \frac{1}{9} \sin(9 \cdot \omega \cdot t) \dots \right)$$

Unendliche Reihe:

$$f(t) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{4}{(2j-1)\pi} \sin((2j-1)\omega \cdot t)$$

Allgemeiner Ansatz:

Unendliche Reihe:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(\omega \cdot k \cdot t) + b_k \sin(\omega \cdot k \cdot t))$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$

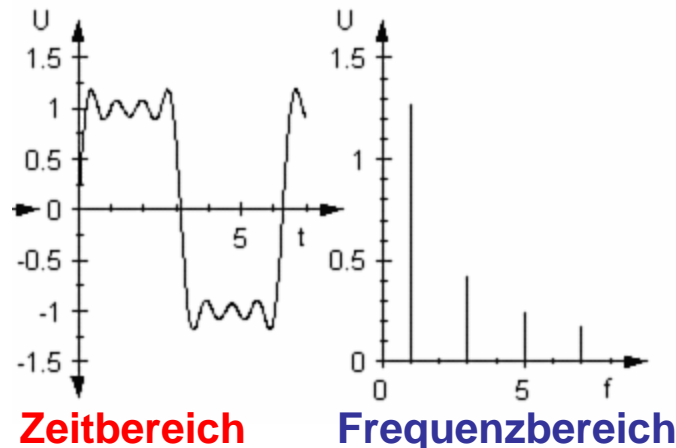
Koeffizienten:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi fkt) dt$$

T: Periodendauer

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi fkt) dt$$

- jede Zeitbereichsfunktion lässt sich durch eine Überlagerung von Sinus- und Kosinusfunktionen darstellen
- auch die Umkehrung ist gültig
- bei der Darstellung der Amplitude über der Frequenz spricht man von einer Frequenzbereichsdarstellung



äquivalente Darstellung von
einem Signal im Zeit- und
Frequenzbereich

- beide Darstellungen sind in der Regel äquivalent
- in Abhängigkeit von der Anwendung wird eine Frequenz- oder Zeitbereichsdarstellung gewählt
- verwandt mit der **Fourier-Reihe** ist die **Fourier-Transformation**

Analog- und Digitalsignal

Analogsignal

- als Analogsignal wird ein Signal bezeichnet, dessen Amplitude kontinuierlich jeden Wert zwischen einem Minimum und einem Maximum annehmen kann, im Gegensatz zu einem Digitalsignal sind hierbei auch beliebig kleine Änderungen darstellbar

Digitalsignal

- Ein Digitalsignal ist ein diskretes und quantisiertes Signal, es kann wertdiskret und/oder zeitdiskret sein
- oft nimmt man digitale Signale zur Beschreibung kontinuierlicher Phänomene - diese analogen Signale müssen mittels einer Kodierung in digitale Signale gewandelt werden
- eine Digitalisierung ist insbesondere dann notwendig, wenn das Signal von einem Computer oder einem anderen digitalen Gerät verarbeitet werden soll

Bit, Byte, Baud

■ Bit

ein Bit ist die kleinste Informationseinheit, jede Information ist an einen Informationsträger gebunden, die Informationsmenge 1 Bit entspricht der Information, welche von zwei möglichen Begebenheiten zutrifft

z.B.: die Stellung eines Schalters mit zwei Zuständen: 0 und 1

ein **Flipflop kann die Information 1 Bit speichern**

■ Byte

der Begriff Byte wird aufgrund der großen Verbreitung von Systemen, die auf acht Bit (beziehungsweise Zweierpotenzvielfache davon) basieren, für die Bezeichnung einer **acht Bit breiten Größe** verwendet
bei der Übertragung kann ein Byte parallel (alle Bits gleichzeitig) oder seriell (alle Bits nacheinander) übertragen werden

■ Baud

der Begriff gibt die Anzahl an Sendesymbolen an, welche pro Sekunde übertragen werden, oft - aber nicht immer - identisch mit Bit/s

Transportmedien

Einleitung

- neben der Verarbeitung und Aufbereitung von Informationen müssen diese zwischen den einzelnen informationsverarbeitenden Einheiten **transportiert** werden
- bei der elektrischen Informationstechnik liegt dabei die Information in Form der elektrischen Größen Strom oder Spannung vor
- in den einfachsten Fällen findet der Transport in elektrischen Leitungen aus Metall (meist Kupfer) statt
- bei großen Übertragungsentfernungen oder bei hohem Bandbreitebedarf kommen Lichtwellenleiter zum Einsatz
- soll eine Informationsübermittlung zu oder von einer mobilen Station erfolgen, muss der Transport drahtlos vor sich gehen
- diese drei unterschiedlichen Arten des Transports sollen im Folgenden behandelt werden

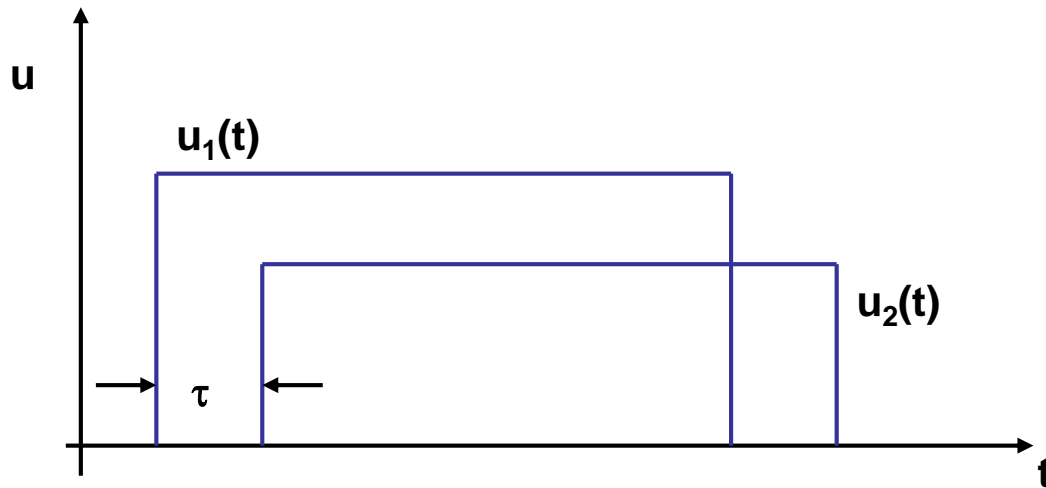
Elektrische Leitungen

- metallische Leitungen sind die ältesten und einfachsten Transportmedien für Daten in elektrischer Form
- die Leitung kann oft direkt elektrisch mit der Schaltung verbunden werden
- manchmal sind Leitungstreiber oder speziellen Sende- oder Empfangsbausteine notwendig
- die speziellen Eigenschaften von Leitungen wirken sich bei **hohen Signalfrequenzen** aus, so dass Leitungen einen wesentlichen Einfluss auf Systeme zur schnellen Datenübertragung ausüben



- **Es werden verschiedene Arten von Leitungen zur Informationsübertragung genutzt:**
 - **Zweidrahtleitungen (Abbildung auf Seite vorher)**
 - ***erweiterte Form:* Flachbandleitungen = zusammengefasste Zweidrahtleitungen (z. B. in PC's)**
 - **verdrillte Zweidrahtleitungen (twisted pair, z. B. 100-Mbit-LAN)**
 - **Koaxialleitungen (drahtförmiger Innenleiter von Außenleiter flächig umschlossen; z.B. Antennenleitungen)**
- **bei der Informationsübertragung befindet sich die Information zumeist im Spannungspegel**
- **wird ein Spannungsimpuls u_1 am Eingang in eine ideale Leitung zum Zeitpunkt t_1 eingespeist, erscheint ein Impuls u_2 mit niedrigerer Amplitude erst nach einer gewissen Verzögerung τ (sprich: tau) am Ausgang**

- die Leitung bewirkt bei der Übertragung des Signals also zweierlei:
 - das Signal wird um die *Laufzeit* τ des Signals verzögert.
 - die Amplitude des Signals verringert sich, das Signal erfährt eine *Dämpfung* a



- dieser Sachverhalt führt zu folgendem Ausdruck für $u_2(t)$:

$$u_2(t) = a \cdot u_1(t - \tau), \quad \text{mit } a < 1$$

Elektrische Leitungen - Wellenwiderstand und Leitungsabschluss

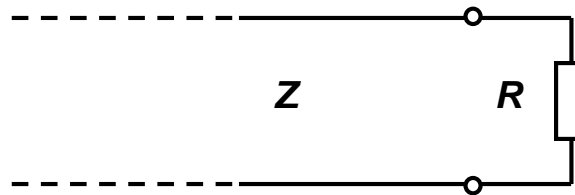
- die Laufzeit τ ist abhängig vom Leitungsmaterial zwischen den Leitern und liegt oberhalb der Laufzeit von Licht, als Größenordnung gilt für übliche Kabel eine Laufzeit pro Kabellänge l :

$$\frac{\tau}{l} \approx 5 \frac{ns}{m} \quad ns: 10^{-9} s$$

- die stets vorhandene Verzögerung der Signale durch die Laufzeit bringt es mit sich, dass Datenübertragungsprotokolle, die auf Handshake-Verfahren beruhen, nicht mit beliebig langen Leitungen genutzt werden können

- die Leitung kann mathematisch mit einer **partiellen Differentialgleichung** beschrieben werden, die als Lösung eine **Welle** hat, die sich vom Leitungsanfang zum Leitungsende fortbewegt und eine Welle, die sich in umgekehrte Richtung ausbreitet
- damit ist prinzipiell ein bidirektionaler Betrieb (gleichzeitig) jeder Leitung möglich
- die zwei Ausbreitungsmöglichkeiten sind auch dann von Interesse, wenn die Leitung eine Störung aufweist
- an einer Störstelle wird ein Teil der sich ausbreitenden Welle reflektiert und läuft als rücklaufende Welle zum Ausgangspunkt zurück
- eine Störstelle kann eine **Verbindungsstelle** von zwei Leitungsstücken, eine **Unterbrechung** oder ein **Kurzschluss** sowie das Ende der Leitung sein
- eine für diesen Reflexionsvorgang wichtige Kenngröße der Leitungen ist der Wellenwiderstand Z , auch als Leitungsimpedanz bekannt
- typische Werte für den Wellenwiderstand sind
 - $Z=50\Omega$ oder 75Ω : Antennenleitung (Koaxialleitung)
 - $Z\approx 100\Omega$: 100-Mbit-Twisted-Pair-LAN (verdrillte Zweidrahtleitung)

- Wenn eine unendlich lange Leitung mit dem Wellenwiderstand Z am Ende mit einem Widerstand R verbunden ist, dann wird an diesem Widerstand R von dem über die Leitung ankommenden Spannungssignal ein gewisser Teil reflektiert (Analogie mit anderen physikalischen Wellen)



- ein Maß dafür, wie groß der reflektierte Anteil von der Spannung ist, ist der **Reflexionsfaktor r** für die Spannung

$$r = \frac{R - Z}{R + Z}$$

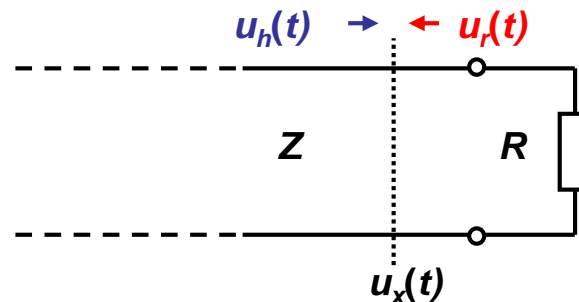
■ Spezialfälle der Reflexion:

- $R \rightarrow \infty$ (Leerlauf): $r=1$
- $R=0$ (Kurzschluss): $r=-1$
- $R=Z$ (keine Reflexion): $r=0$

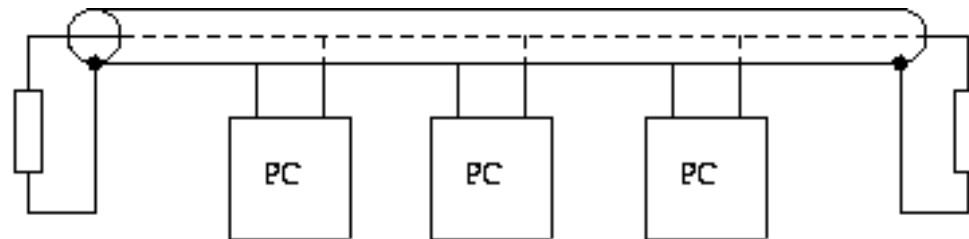
■ der Fall $r=0$ ist der wichtige Fall der Anpassung, bei dem kein Teil des einfallenden Signals reflektiert wird

■ der Vorgang der Reflexion am Ende der Leitung führt dazu, dass sich an jeder Stelle x der Leitung die Spannung $u_x(t)$ aus der Überlagerung der hinlaufenden Spannung u_h und der reflektierten, rücklaufenden Spannung u_r am Orte x ergibt

$$u_x(t) = u_{h,x}(t) + u_{r,x}(t)$$

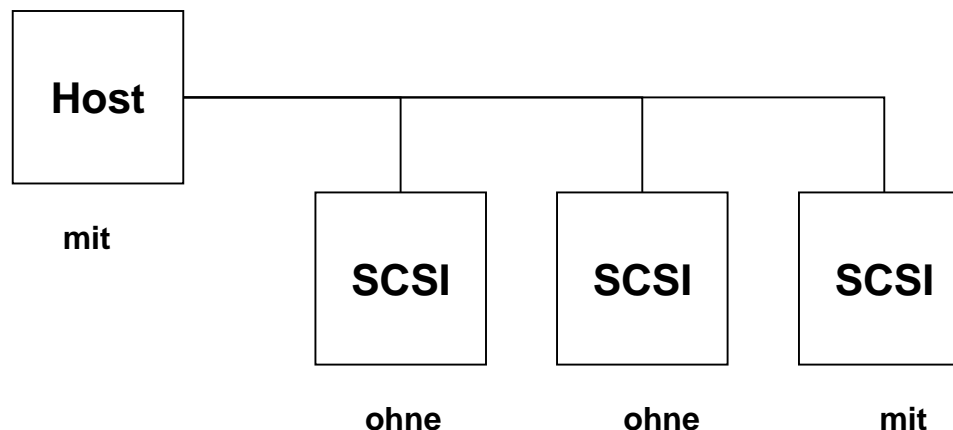


- nur wenn die Leitung am Ende angepasst abgeschlossen ist, werden Reflexionen vollständig vermieden
- dies ist wichtig für Datenübertragungen, da das reflektierte Signal das gesendete logische Signal überlagern würde und damit letzteres nur schwer oder im Extremfall nicht detektierbar ist
- ein Beispiel hierfür ist das früher häufig verwendete Thin-Ethernet-LAN (Datenübertragung über Koaxialleitung)



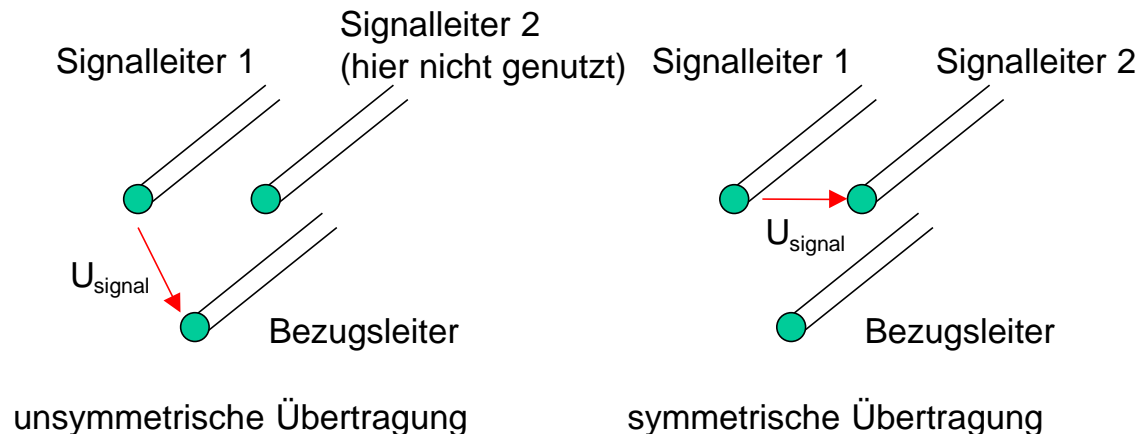
- **die von den Rechnern eingespeisten Impulse werden bei angepasst abgeschlossener Leitung nicht reflektiert: die Kommunikation ist möglich**
- **bei fehlerhaftem Abschluss werden die Signale reflektiert und die Überlagerung der reflektierten mit den eigentlichen Signalen ist für die PC's nicht dekodierbar: die Kommunikation ist gestört**
- **die früher in den PC's verwendeten Netzwerkkarten mit Koax-Anschluß (BNC) sind so ausgelegt, dass sie an den Anschlussstellen nicht als Störstelle in Erscheinung treten, d.h. ihr Innenwiderstand ist deutlich höher als der Wellenwiderstand des Kabels**
- **Auch die heute häufig verwendeten CAT-x Kabel haben einen definierten Wellenwiderstand und sind in der Regel mit dem Wellenwiderstand abgeschlossen**

- ein weiteres Beispiel ist das SCSI-Bussystem im PC, bei dem die Terminierung im letzten der angeschlossenen Geräte realisiert ist
- die Terminierung an einem anderen als dem Gerät am Ende des Busses würde eine Fehlanpassung bedeuten; das System würde evtl. nicht funktionieren

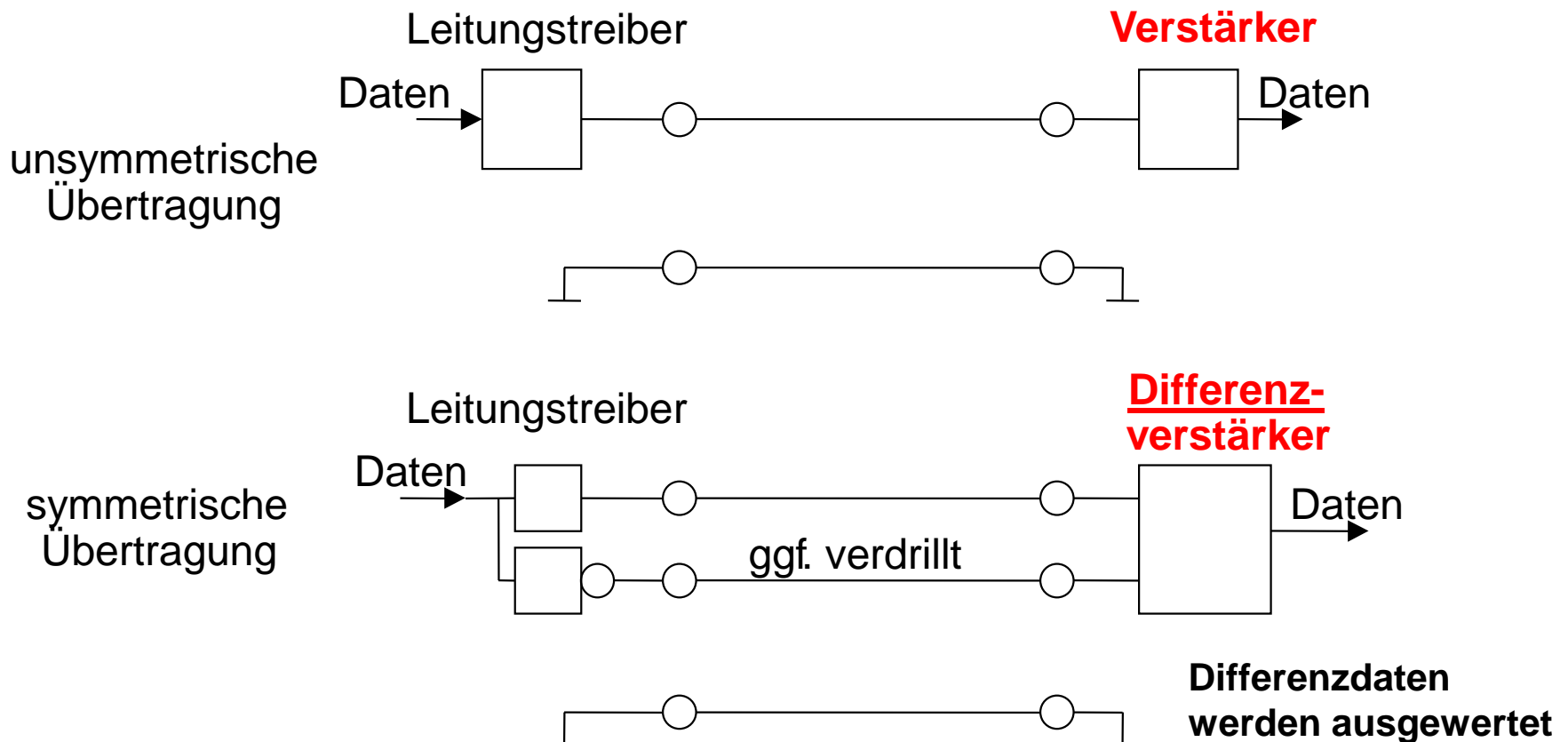


Elektrische Leitungen - Symmetrische und unsymmetrische Übertragung auf Leitungen

- bei mehradrigen Leitungen bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten der Informationsübertragung
- die Übertragungsspannung kann entweder zwischen einem der Signalladern und einem Bezugsleiter oder aber zwischen zwei gleichwertigen Signalladern liegen
- der Bezugsleiter ist entweder ein separater im Kabel enthaltener Leiter, die Kabelabschirmung bei abgeschirmten Leitungen oder bei Fahrzeugen auch die Karosserie



Symmetrische und Unsymmetrische Übertragung auf Leitungen



- bei der unsymmetrischen Übertragung sind für n Signale $n+1$ Leiter erforderlich
- ältere Schnittstellen von Computern (Centronics, RS-232) nutzten diese Art der Verschaltung, bei der Centronics-Schnittstelle wird der Bezugsleiter meist durch mehrere parallel geschaltete Leiter gebildet
- die unsymmetrische Übertragung hat einige Nachteile speziell wenn der Bezugsleiter in größerem Abstand zu den Signalleitern liegt:
 - Überkopplung von Störungen oder benachbarten Signalen
 - Störaussendung
 - Störfestigkeit
 - Variation der Leitungsparameter

Nachteile, die besonders bei unsymmetrischer Übertragung auftreten

Überkopplung

- es kann zwischen den einzelnen Signalleitern zu Überkopplungen kommen; bei größeren Leitungslängen kann dieser Effekt so stark werden, dass die übertragenen Signale nicht mehr erkannt werden können
- Störungen werden hier nicht kompensiert

Störaussendung

- Signale auf einer Leitung können wie von einer Antenne abgestrahlt werden, die Abstrahlung kann zu Beeinträchtigungen im Rundfunkempfang in der Umgebung der Leitung führen
- bedingt durch die unsymmetrischen Signale werden ausgesendete Störungen nicht kompensiert

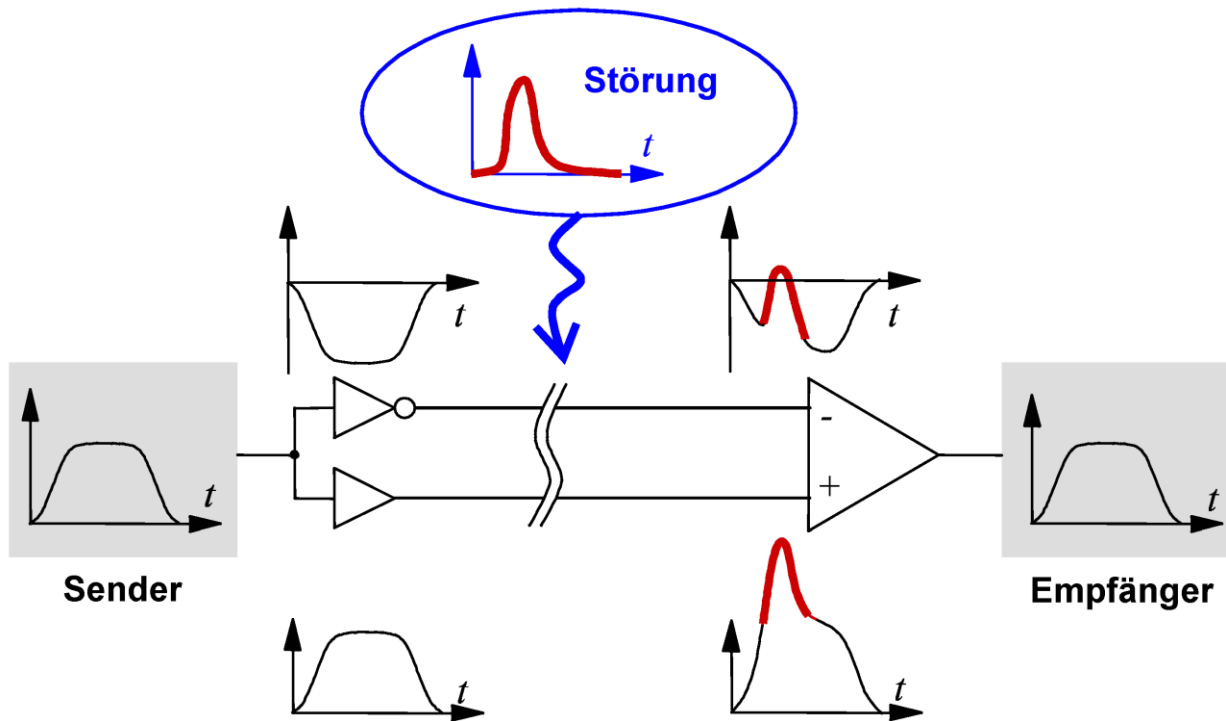
Störfestigkeit

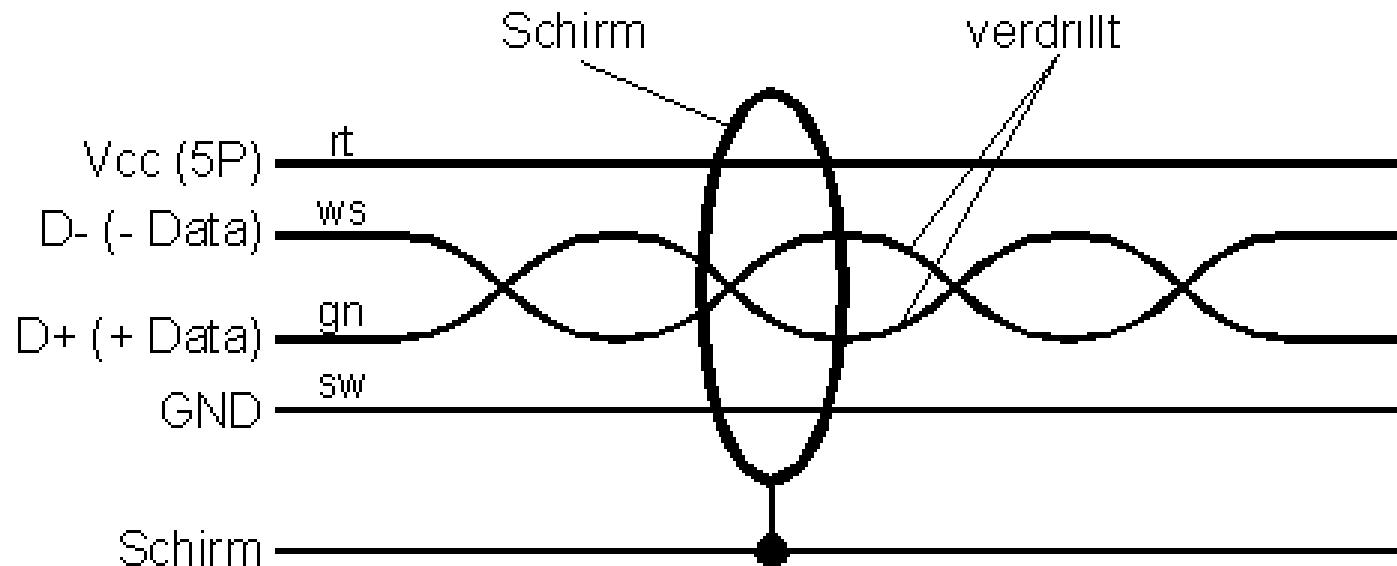
- da die Leitung ein passives lineares Bauelement darstellt, ist das Phänomen der Abstrahlung umkehrbar
- äußere elektromagnetische Felder, z.B. durch ein in der Nähe betriebenes Mobiltelefon verursacht, führen zu einer eingekoppelten Spannung, die sich der Signalspannung überlagert
- überschreitet die eingekoppelte Spannung eine bestimmte Größenordnung, kann das übertragene Signal nicht mehr korrekt erkannt werden

Variation der Leitungsparameter

- die Lage des Signalleiters zum Bezugsleiter kann entlang der Leitung variieren (Leitungen nicht verdreht, kein Flachbandkabel), dadurch sind die Leitungsparameter, wie z.B. der Leitungswellenwiderstand (kennzeichnet die Übertragungseigenschaften der Leitung), nicht mehr konstant
- die Leitung kann nicht mehr vollständig reflexionsfrei abgeschlossen werden und in der Leitung selbst können Reflexionen auftreten; darunter leidet die Signalqualität.

- diese Nachteile kann man zum großen Teil durch eine symmetrische Übertragung umgehen
- der Aufwand für diese Übertragungsart ist sowohl bei Kabel als auch bei den Sende- und Empfangselementen deutlich höher
- da in vielen Fällen ebenfalls ein Bezugsleiter verwendet wird, müssen zur Übertragung von n Signalen $2n+1$ Leiter verwendet werden
- eine gute Symmetrie der Übertragung bei gleichzeitig geringen Leitungskosten kann durch die Verdrillung der beiden beteiligten Signalleiter erreicht werden
- in den sogenannten „Twisted-Pair“-Kabeln sind die entsprechenden Leiter paarweise miteinander verdrillt; mit solchen Systemen können Signale auch über größere Entfernungen übertragen werden, z.B. RS-485 (Profibus in Industrieanlagen) oder CAN





USB-Kabel

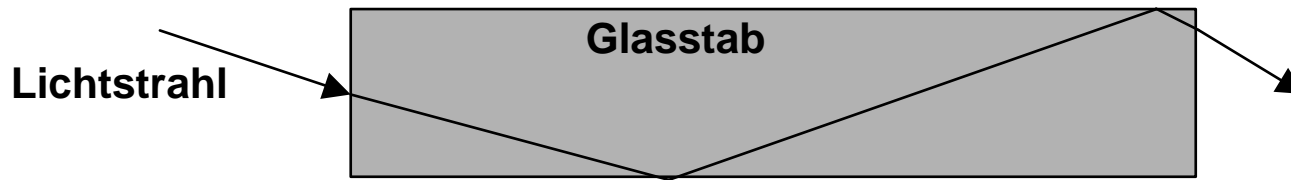
Elektrische Leitungen - Parallele und serielle Übertragung

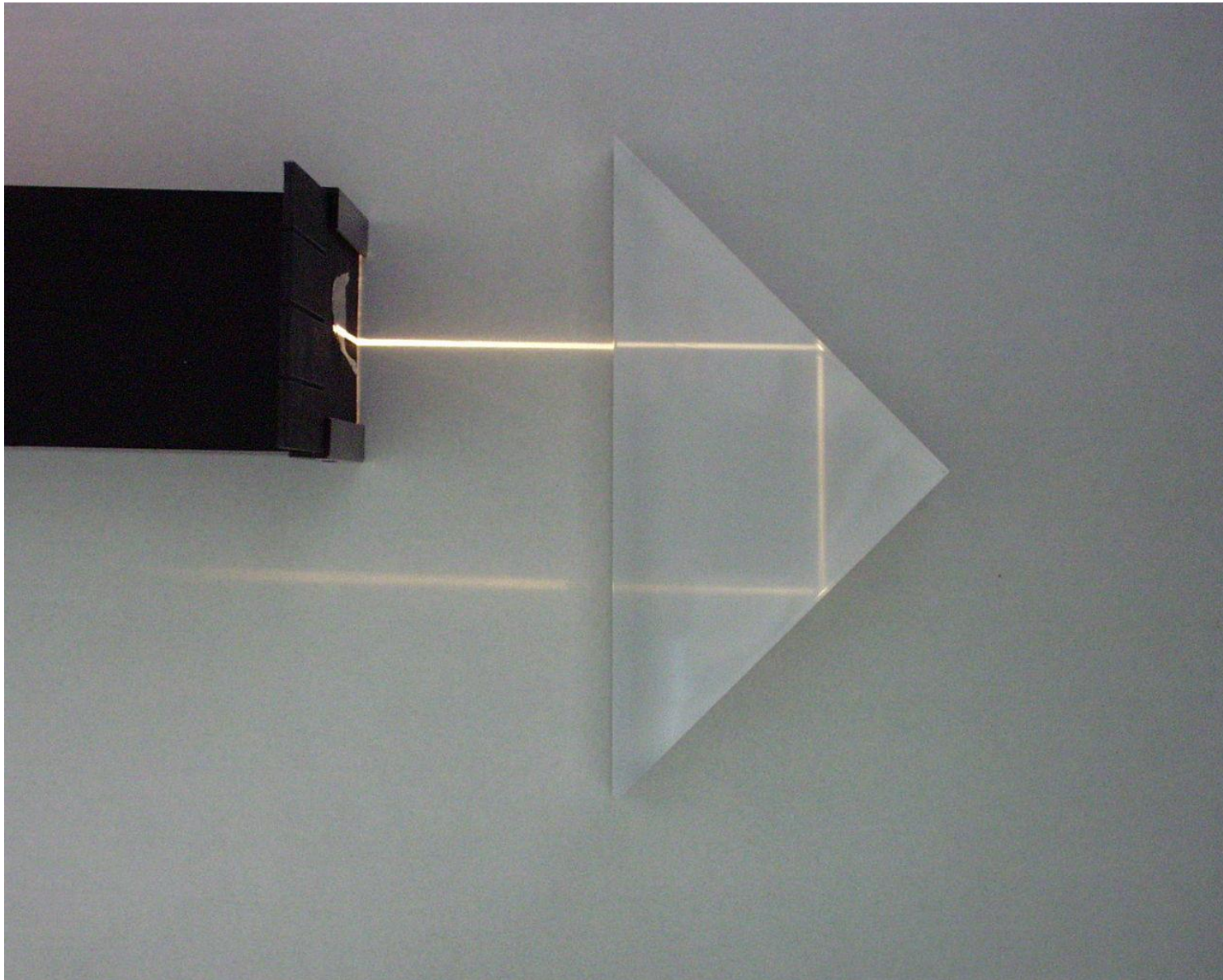
- steht nur eine einzige Leitung für die Datenübertragung zur Verfügung, so müssen die Daten nacheinander über die Leitung transportiert werden (serielle Übertragung)
- Beispiele für eine solche Übertragung ist die RS-232-, USB-, Firewire-, S-ATA
- steht eine genügend hohe Anzahl von Leitungen zur Verfügung, können diese parallel für die Übertragung genutzt werden (parallele Übertragung); ein Beispiel dafür ist die Anbindung von Festplatten über die IDE-Schnittstelle (P-ATA)
- der Aufwand (Kosten, Platz, Gewicht) für eine parallele Übertragung ist bezüglich der n-fachen Ausführung von Leitung, Sende- und Empfangsstufe ungleich höher als bei der seriellen Übertragung, jedoch kann bei gleicher Leitungsqualität auch ein n-facher Datendurchsatz realisiert werden

Lichtwellenleiter

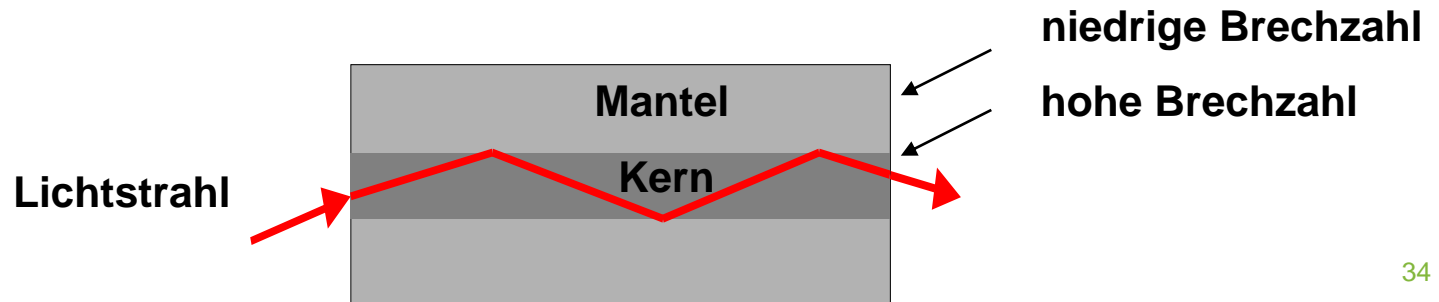
- **Daten lassen sich auch auf optischem Weg übertragen, dies wird ohne spezielles Medium bei einer Infrarot-Fernbedienung oder der IrDA-Schnittstelle genutzt**
- **erforderlich werden Lichtquellen, die schnell elektrisch ein- und ausgeschaltet werden können, sowie Fotoempfänger, die Lichtstärkeänderungen wieder in elektrische Signale umwandeln können**
- **die überbrückbare Entfernung ist mit solch einfachen Anordnung mit einigen Metern recht gering, mit entsprechenden Lichtquellen (gerichtete Laser) lässt sich diese auf einige 100 m erweitern (optische Richtstrecken)**
- **die optische Übertragungstechnik wurde durch die Entwicklung von Lichtwellenleitern technisch bedeutsamer, denn damit sind Übertragungsstrecken im Bereich bis einige 10 km problemlos möglich**
- **damit bestehen große Vorteile speziell für die Übertragung großer Datenmengen über weite Strecken**

- **Lichtwellenleiter bestehen aus Quarzglas, dessen Brechzahl durch Einbringen von Fremdstoffen variiert werden kann, sie besitzen je nach Wellenlänge des Lichts eine außerordentlich geringe Dämpfung (bis zu **0,2 dB/km**, d.h. nach 50 km ist immer noch ein Zehntel der eingestrahlten Lichtleistung messbar)**
- **im Prinzip wäre ein Glasstab zum gerichteten Transport von Licht ausreichend, dazu muss der Einfallswinkel des Lichts genügend klein sein, damit es an der Grenze von Glas zu Luft zu einer Totalreflexion kommt**
- **diese Totalreflexionen wiederholen sich entlang des Stabes mehrmals**

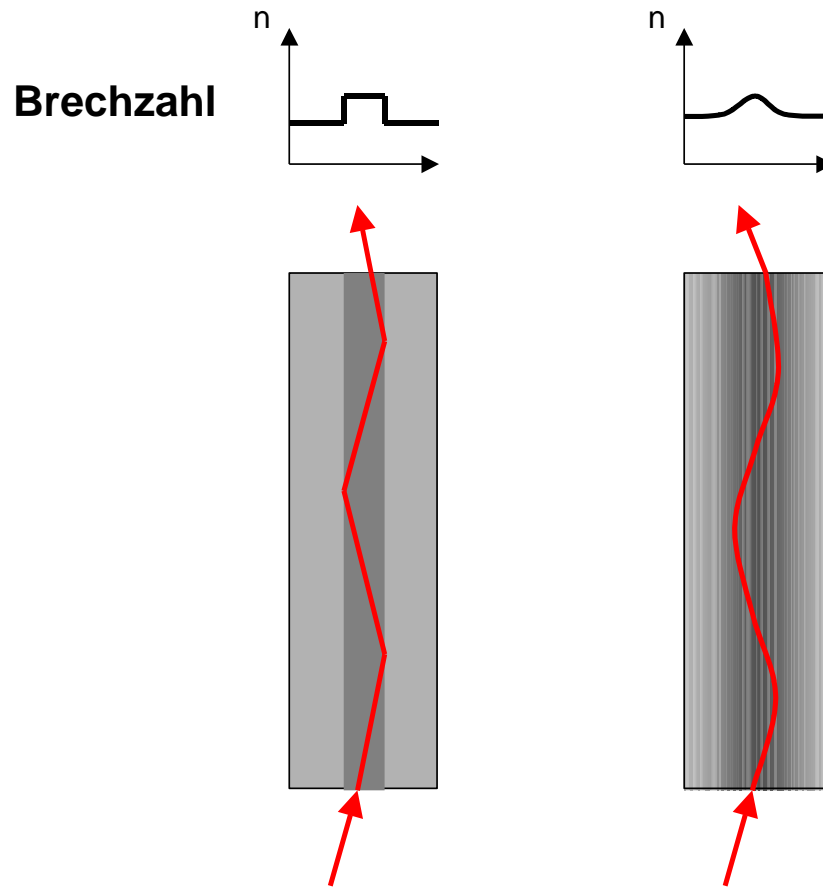




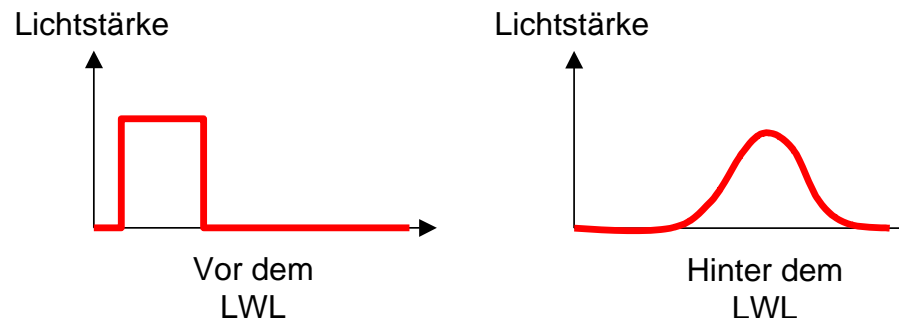
- aufgrund der Eigenschaften der Luft würde aber bei jeder Totalreflexion ein Teil der Leistung verloren gehen, so dass bei einer solchen Anordnung die Dämpfung deutlich höher als die Dämpfung des reinen Quarzglas wäre
- technische Lichtwellenleiter werden so konstruiert, dass die Totalreflexion nicht an der Oberfläche zur Luft, sondern an einer Grenzschicht im Quarzglas selbst stattfindet
- Voraussetzung dafür ist die Nutzung von Materialien mit unterschiedlichen Brechzahlen
- man unterscheidet den Kern des Lichtwellenleiters mit einer hohen Brechzahl und den Mantel mit einer niedrigeren Brechzahl, das Grundmaterial ist bei beiden Quarzglas, dessen Brechzahl durch gezielte Verunreinigungen variiert wird

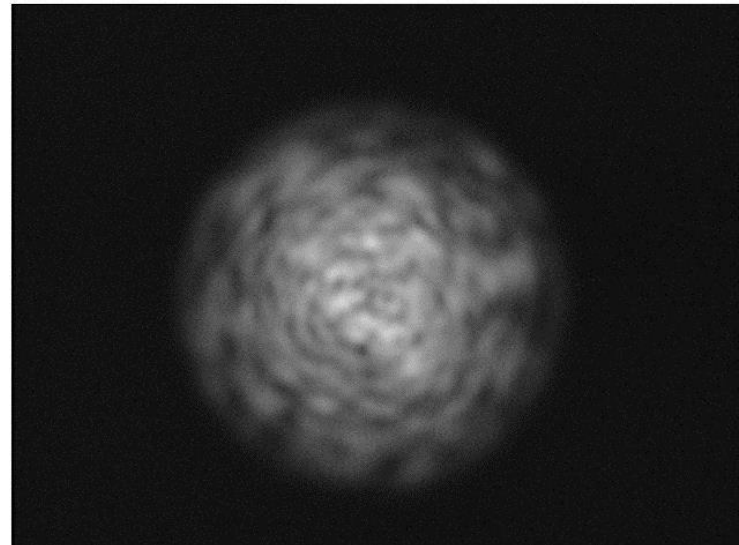
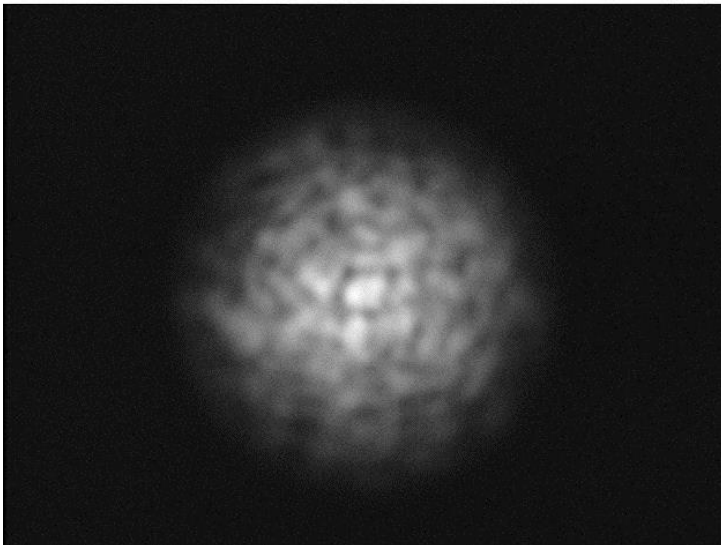
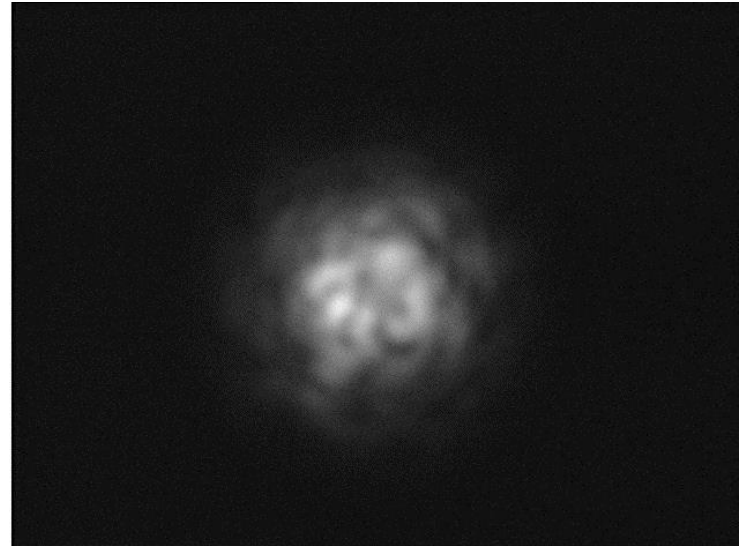
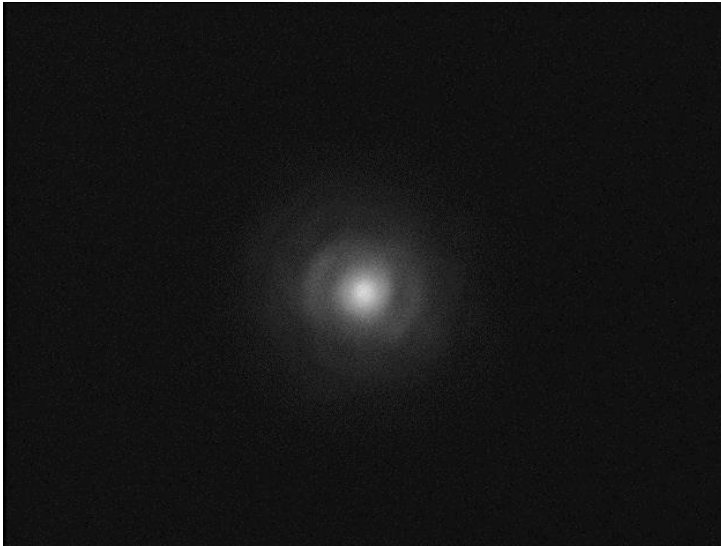


- neben einem sprungförmigen Übergang (Stufenprofil) zwischen Mantel und Kern kann dieser auch kontinuierlich erfolgen, so dass die „Lichtstrahlen“ nicht mehr zickzackförmig, sondern in Form von Sinusbahnen durch den Lichtwellenleiter laufen; ein solcher Lichtwellentyp wird Gradientenfaser genannt



- bei den Lichtwellenleitern kann das Licht auf mehreren Wegen vom einem Ende zum anderen Ende gelangen, der Weg hängt maßgeblich von der Art der Einstrahlung ab (Einstrahlwinkel, Frequenz, Polarisation)
- üblicherweise ist eine Lichtquelle nicht völlig gerichtet und scharf gebündelt, so dass in einem realen Lichtwellenleiter durch das Licht gleichzeitig mehrere Pfade genutzt werden
- insbesondere wenn die Weglänge oder genauer die Zeit zum Zurücklegen der Weglänge für diese Pfade unterschiedlich sind, erreicht ein Teil des Lichts das Ende des Lichtwellenleiters vor einem anderen Teil
- wird also ein Lichtimpuls eingespeist, der beim Einstrahlen eine rechteckförmige Kontur hat, so kann am Ausgang des Lichtwellenleiters der Impuls verschliffen und verbreitert erscheinen; dieser Effekt vermindert die Übertragungsbandbreite und/oder die nutzbare Länge der Leitung





- die möglichen unterschiedlichen Wege innerhalb der Leitung werden auch als Moden bezeichnet, die skizzierten Lichtwellenleiter werden daher Multimode-Fasern genannt
- solche Multimode-Fasern sind mit Manteldurchmessern von $125\mu\text{m}$ - $250\mu\text{m}$ und Kerndurchmessern von $50\mu\text{m}$ - $80\mu\text{m}$ lieferbar
- als mechanischer Schutz ist um die eigentliche Glasfaser eine Hülle aus Kunststoff (Coating) gezogen.
- wenn nur ein Pfad durch den Lichtwellenleiter möglich ist, kann der Effekt der Impulsverbreitung minimiert werden
- ein solcher Lichtwellenleiter wird Monomode-Faser genannt, dabei handelt es sich um eine Faser mit Stufenindexprofil, bei der der Kern aber extrem dünn ($3\mu\text{m}$.. $8\mu\text{m}$) ausgeführt wird
- in der Weitverkehrstechnik werden ausschließlich solche Fasern eingesetzt.

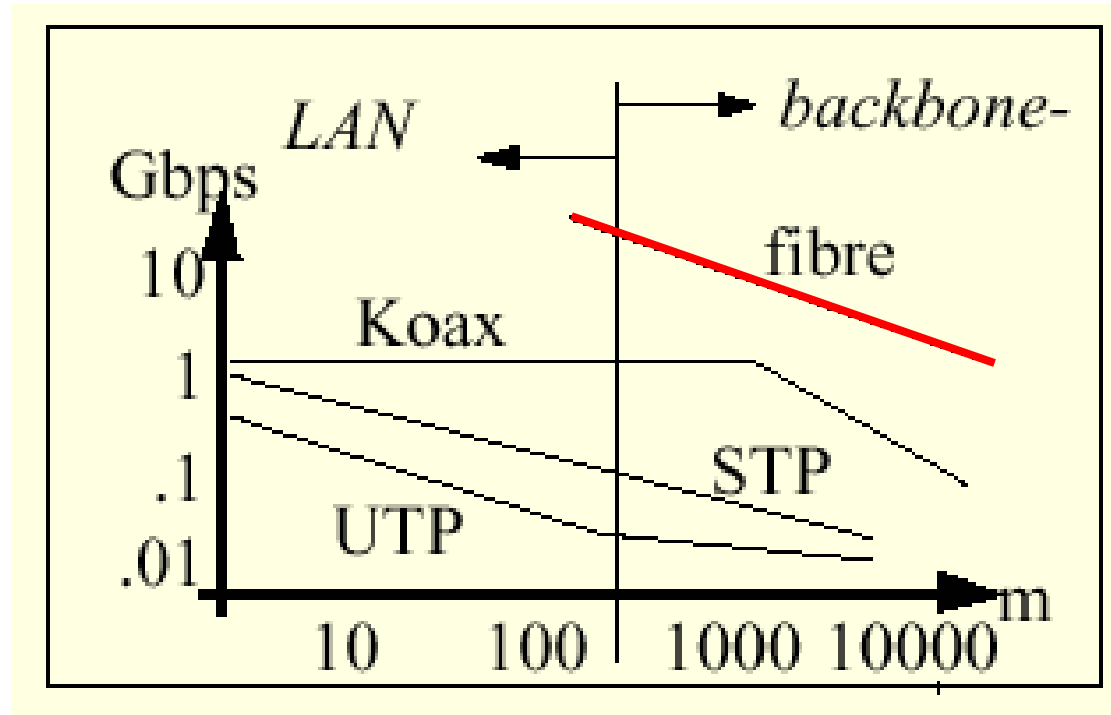
Lichtwellenleiter – Sende- und Empfangselemente

- als Sendeelemente (Lichtquellen) kommen heute nur Halbleiterdioden zum Einsatz
- je nach Einsatzgebiet werden spezielle Leuchtdioden (hohe Leuchtdichte, kleiner Leuchtfleck) für niedrige Ansprüche und Laserdioden für hohe Ansprüche eingesetzt
- die optische Nachrichtentechnik nutzt fast ausschließlich Strahlung mit großer Wellenlänge im Infrarot-Bereich; gebräuchlich sind die Wellenlängen 830nm, 1300nm und 1550nm, die Strahlung ist also nicht sichtbar, was die Fehlersuche in optischen Systemen erschweren kann

Lichtwellenleiter – Sende- und Empfangselemente

- **Empfangselemente sind Photodioden, d.h. Halbleiterdioden, deren p-n-Übergang vom Licht durch ein Fenster erreicht werden kann**
- **die Dioden werden in Sperrrichtung betrieben, so dass sich die Sperrschicht, also eine an Ladungsträgern verarmte Schicht, aufbaut**
- **durch ein Lichtquant kann in der Sperrschicht spontan ein Elektron aus dem Gitterverbund gelöst werden, wobei ein freies Elektron und ein Loch entstehen die zu einem Strom führen**
- **der Strom in Sperrrichtung der Diode wird umso größer, je höher die Lichtstärke ist, damit können Lichtstärkeänderungen wieder in elektrische Signale umgeformt werden**

■ Vergleich von optischen Fasern mit elektrischen Leitungen



- **fibre:** Lichtwellenleiter
- Koax:** Koaxialkabel
- STP:** geschirmtes verdrehtes Kabel (shielded twisted pair)
- UTP:** ungeschirmtes verdrehtes Kabel (unshielded twisted pair)

- **auch wenn optische Systeme wünschenswerte Eigenschaften haben, gibt es dennoch einen recht gravierenden Nachteil zu beachten: Die Anbindung einer Leuchtdiode, Laserdiode oder Photodiode an eine optische Faser ist enorm aufwändig**
- **da der Kern von Lichtwellenleitern sehr dünn ist, müssen Steckverbindern extrem präzise gefertigt werden, sie sind daher verglichen mit elektrischen Steckverbindern teuer**
- **auch die Verlegung von Lichtwellenleitern ist problematischer als die von Kupferkabeln; Lichtwellenleiter können leichter brechen, was bei der Verlegung berücksichtigt werden muss**

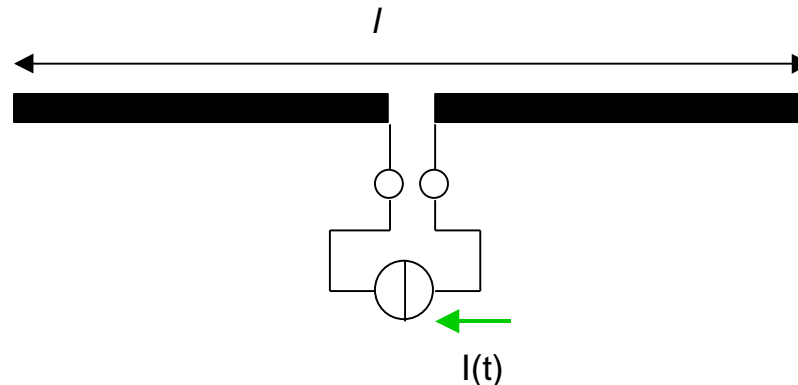
Freie Wellenausbreitung

- bei den oben vorgestellten Übertragungsmedien erfolgt die Übertragung entlang eines materiellen Mediums, dies macht diese Art der Übertragung für mobile Systeme ungeeignet
- optische Systeme ohne Lichtwellenleiter eignen sich zwar prinzipiell für mobile Systeme, sind aber auf einige Meter Reichweite begrenzt
- für mobile Systeme können daher nur Funksysteme verwendet werden; bei diesen erfolgt die Signalausbreitung ohne die Erfordernis eines Übertragungsmediums, weshalb sie auch unter den Vakuumbedingungen des Weltraums funktionieren
- auch für die Versorgung großer Gebiete mit Informationen gibt es kaum Alternativen zur Funkübertragung
- die Information wird in Form eines elektromagnetischen Feldes übertragen

- ein elektromagnetisches Feld setzt sich aus einem zeitveränderlichen elektrischen und einem zeitveränderlichen magnetischen Feld zusammen
- ein zeitveränderliches elektrisches Feld erzeugt ein magnetisches Feld, das wiederum ein elektrisches Feld erzeugt
- so breiten sich die Felder immer weiter in den Raum aus
- die Besonderheit bei mit hoher Frequenz sich verändernden Feldern ist die im Vergleich zu statischen (sich nicht verändernden) Feldern nur sehr geringe Dämpfung
- soll ein beliebiger Datenstrom übertragen werden, muss folglich dafür gesorgt werden, dass die bei der Übertragung entstehenden Felder sich mit der Zeit verändern
- es ist zweckmäßig, sinusförmige Felder zu erzeugen, die eine bestimmte Frequenz f haben
- die Zeitfunktion ist dann z.B.:

$$E(t) = E_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi)$$

- die zu übermittelnden Daten können dementsprechend in einer der Größen E_0 , f oder φ verpackt sein, dies bezeichnet man als Modulation, die später näher erläutert wird.
- zur Erzeugung der elektromagnetischen Felder aus einer Spannungs- oder Stromquelle nimmt man eine Antenne; auch die empfindliche Sensierung von elektromagnetischen Feldern in der Umgebung ist damit möglich
- eine Antenne ist im einfachsten Fall ein metallischer Stab, der in der Mitte unterbrochen und mit Anschlussklemmen versehen ist, eine solche Antenne wird elektrischer Dipol oder nur kurz Dipol genannt



- wird an die Klemmen eine Stromquelle angelegt, die einen sinusförmigen Strom

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi)$$

erzeugt, so werden bei der positiven Halbwelle Elektronen aus der linken Stabhälfte auf die rechte befördert

- die Information darüber, dass an der linken Klemme Elektronen entnommen (Elektronenverarmung) und an der rechten Klemme zugefügt werden (Elektronenverdichtung) kann nur in endlicher Zeit von den Klemmen zu den Stabenden gelangen
- dieser Elektronendichteimpuls (Stromwelle) wird am Ende des Stabes ähnlich wie eine Spannungswelle an einem offenen Leitungsende reflektiert und gelangt nach der Laufzeit τ wieder zurück zu den Klemmen
- hat in der Zwischenzeit die Stromquelle ihr Vorzeichen geändert, so wird die Stromwelle durch die Stromquelle noch verstärkt, in diesem Fall sagt man, dass der Dipol in Resonanz ist

- als Resonanzbedingung kann abgeleitet werden:

$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau \stackrel{!}{=} \pi \quad \Rightarrow \quad f = \frac{1}{2 \cdot \tau}$$

- ist die Umgebung des Stabes Vakuum oder Luft, so breitet sich die Stromwelle mit Lichtgeschwindigkeit c_0 aus. Für die Laufzeit τ gilt dann:

$$\tau = \frac{2 \cdot \frac{l}{2}}{c} = \frac{l}{c}$$

Weg=Geschwindigkeit x Zeit

$$c_0 \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

- und damit:

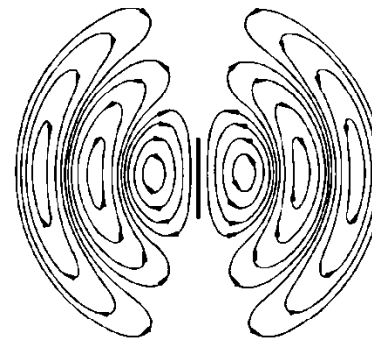
$$f = \frac{c}{2 \cdot l}$$

- mit der Definition der Wellenlänge λ $\lambda = \frac{c}{f}$

- lässt sich für die Resonanzbedingung schreiben: $l = \frac{\lambda}{2}$

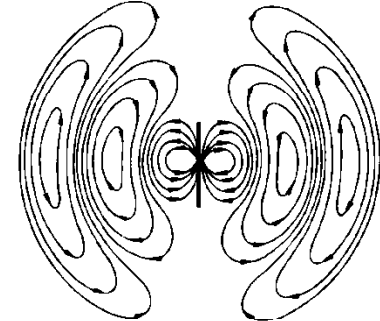
- der Dipol heißt daher auch $\lambda/2$ -Dipol

- herrscht auf der einen Stabhälfte ein Elektronenüberschuss und auf der anderen Hälfte Elektronenmangel, muss sich zwischen den beiden Stabhälften ein elektrisches Feld ausbilden
- der Stromfluss durch den Stab wiederum ruft ein magnetisches Feld um den Stab hervor
- insgesamt ergibt sich im Außenbereich der Antenne ein sogenanntes elektromagnetisches Feld, das sich von der Antenne löst und sich um die Antenne ausbreitet
- im Fernbereich der Antenne stehen die Vektoren von elektrischem und magnetischem Feld senkrecht aufeinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung
- diese Art elektromagnetischer Wellen wird TEM-Welle genannt



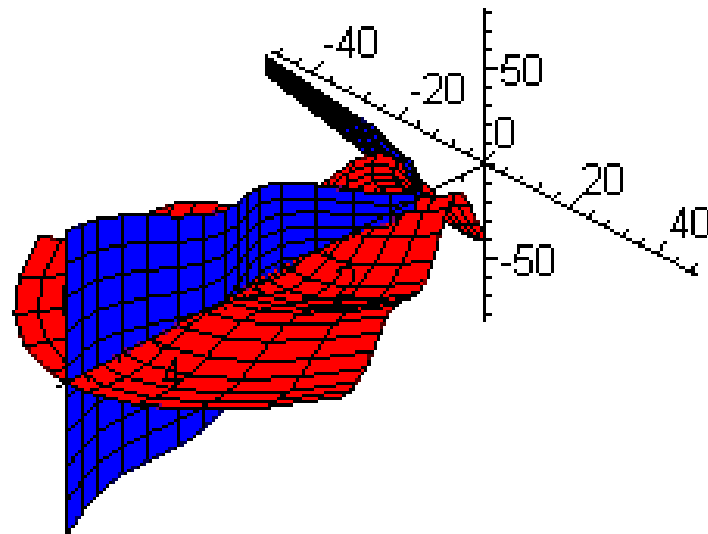
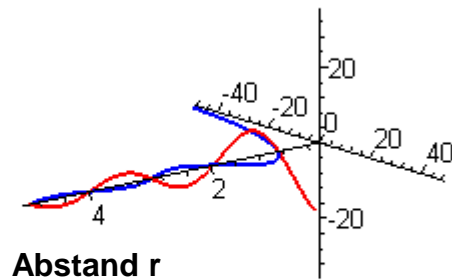
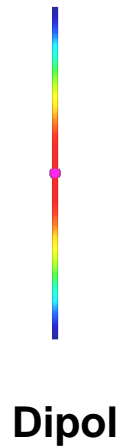
$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot t = 0$$

elektrisches
Feld



$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot t = \pi/2$$

elektrisches Feld
magnetisches Feld



- ebenso wie die Erzeugung elektromagnetischer Wellen können mit Antennen elektromagnetische Felder empfangen werden
- ist ein solcher Dipol einem elektromagnetischen Feld ausgesetzt, so ist an den Dipolklemmen eine Spannung messbar
- die Spannung wird maximal, wenn die Resonanzbedingung des Dipols erfüllt ist
- je niedriger die Frequenz ist, desto größer ist nach $c=\lambda f$ die Wellenlänge und desto größer muss eine an die Resonanzbedingung angepasste Antenne sein
- in der Praxis werden häufig komplexere Antennen eingesetzt, die Optimierungen bezüglich geometrischer Größe, Richtwirkung oder anderer Eigenschaften bieten
- für das grundsätzliche Verständnis der Anregung freier elektromagnetischer Wellen sind diese jedoch hier nicht von Interesse

- **da die Reichweite von elektromagnetischen Wellen sehr groß sein kann (im Kurzwellenbereich kann durch Nutzung von Reflexionen an den oberen Schichten der Erdatmosphäre der Erdball nahezu umrundet werden), muss eine weltweit tätige Organisation für Ordnung bei der Frequenznutzung sorgen**
- **von der Organisation ITU (International Telecommunications Union) ist der Frequenzraum in folgende wichtige Nutzungsbänder untergliedert**

Service	Frequenzbereich	typ. Leistung	typ. Feldstärken	im Abstand
LF-Rundfunk und Seefunk	0,014-0,5 MHz	2500 kW	5,5 - 0,55 V/m	2-20 km
AM-Rundfunk	0,2-1,6 MHz	50-800 kW	12,5 - 0,78 V/m	0,5 - 2 km
Radioamateur	1,8 - 30 MHz	1 kW	22,1 - 2,21 V/m	10 - 100 m
HF-Nachrichten dienst und KW	1,6 - 30 MHz	10 kW	0,7 - 0,04 V/m	1 - 20 km
CB-Funk	27 - 28 MHz	12 W	2,4 - 0,24 V/m	10 - 100 m
Amateurfunk	50 - 52 MHz 144 - 146 MHz 432 - 438 MHz 1290 - 1300 MHz	1 - 8 kW 1 - 8 kW 1 - 8 kW 1 - 8 kW	63 - 0,44 V/m	10 - 500 m
Feste und mobile Kommunikation	29 - 40 MHz 68 - 87 MHz 146 - 174 MHz 422 - 432 MHz 438 - 470 MHz 860 - 990 MHz	50 - 130 W 50 - 130 W 50 - 130 W 50 - 130 W 50 - 130 W 50 - 130 W	40 - 0,25 V/m	2 - 200 m
Mobiltelefon	860 - 960 MHz 1880-1990MHz	5 W 1 W	15,6 - 1,56 V/m 14 - 0,7 V/m	1 - 100 m 0,5 - 10 m
VHF - TV	48 - 68 MHz 174 - 230 MHz	100 - 320 kW	8 - 1,11 V/m	0,5 - 2 km
FM-Rundfunk	88 - 108 MHz	100 kW	8,9 - 2,2 V/m	0,25 - 1 km
UHF- TV	470 - 853 MHz	500 kW	10 - 1,6 V/m	0,5 - 3 km
Radar	1 - 30 GHz	1 kW - 10 GW	350 - 1,6 V/m (peak)	2 - 20 km

- **wie wertvoll aufgrund der intensiven Nutzung Frequenzen geworden sind, ist eindrucksvoll an den bei der Versteigerung der UMTS-Lizenzen umgesetzten Beträgen (49 Milliarden € in Deutschland) zu erkennen**
- **Versteigerung im Jahr 2010 erzielte einem Erlös von 4,4 Mrd. €. Versteigerte Frequenzen lagen in den Bereichen 800 MHz, 1,8 GHz, 2 GHz, und 2,6 GHz. (Freigeworden durch die Umstellung des Rundfunks auf die Digitaltechnik). Sie sollen vor allem genutzt werden, um das schnelle Internet auf dem Land zügig auszubauen.**
- **dennoch sind einige Frequenzen für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Hochfrequenzgeräte (ISM-Geräte) freigehalten, um deren Funktion zu ermöglichen**
- **diese Frequenzen werden heute durch eine Vielzahl technischer Funkssysteme verwendet, womit die Lizenzierung umgangen werden kann**
- **die bekanntesten Vertreter sind die Bereiche um 433 MHz (Fernbedienung für Schließsysteme im PKW und Garagen, Funkkopfhörer,...) sowie um 2,45 GHz (Video-Übertragungssysteme, Bluetooth ...)**
- **diese Frequenzen genießen allerdings keinen Schutz vor einer gegenseitigen Beeinflussung anderer im gleichen Bereich arbeitenden Systeme**

Nachrichtenübertragung

Einleitung

- im Folgenden werden die Verfahren vorgestellt, die notwendig sind, um über die jetzt bekannten Transportmedien Nachrichten zu übertragen
- die Übertragung soll über eines der vorgestellten Medien erfolgen und es wird davon ausgegangen, dass nur ein Medium (nur ein Kabel oder Lichtwellenleiter oder ein Funkkanal) verwendet wird
- aufgrund der Eigenschaften des Medium steht für die Nachrichtenübertragung eine bestimmte Frequenzbandbreite zur Verfügung, im Bereich des Funks ist dies ein Frequenzband, das durch Lizenzvergabe zugewiesen ist
- bei elektrischen Leitungen und Lichtwellenleitern begrenzen die physikalischen Eigenschaften der Leitungen die maximal mögliche Frequenz, die übertragen werden kann
- einer einfachen Telefonleitung für Sprache inklusive Verteilklemmen und der Vermittlungsstellen lässt sich beispielsweise eine Bandbreite von etwa 3000 Hz zuordnen, durch Einschränkung der Länge und spezielle Vermittlungsstellen, kann die Frequenz aber deutlich erhöht werden

- wird die zur Verfügung stehende Bandbreite für eine analoge Übertragung verwendet, so lassen sich Signale (Spannungen oder Ströme) mit genau dieser Bandbreite übertragen
- ein Videokanal der heutigen Qualität (PAL-System) benötigt etwa 7-8 MHz inklusive Stereo-Ton
- ein solches Signal kann auch digitalisiert werden, dazu wird es hinreichend oft zeitlich (Abtastrate mindestens zweifache maximale Signalfrequenz) abgetastet
- der in analoger Form vorliegende Spannungs- oder Stromwert wird dann noch in ein digitales Wort einer bestimmten Wortbreite kodiert, die Wortbreite legt fest, wie viele diskrete Spannungswerte möglich sind
- bei einer Wortbreite von 8 bit sind es beispielsweise 256 diskrete Spannungspegel

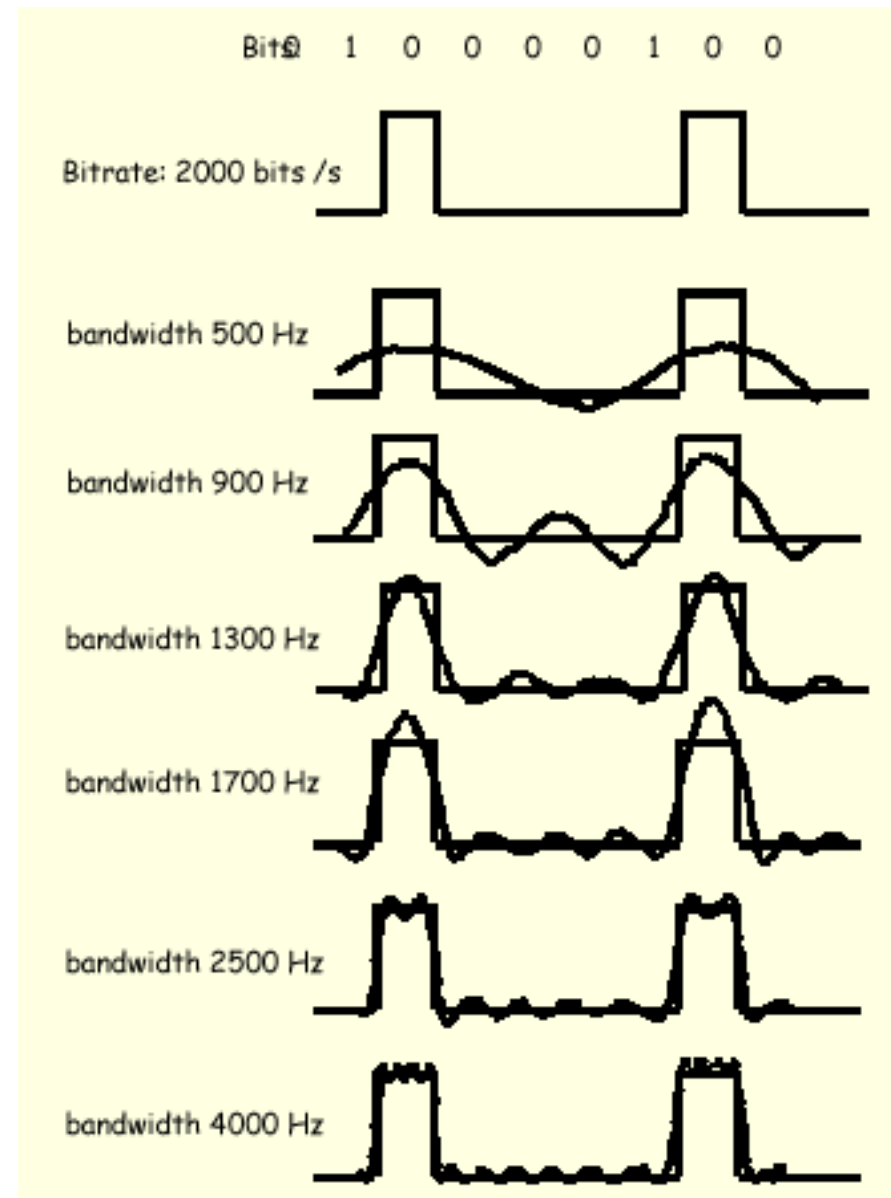
- für die Übertragung im Mobiltelefonstandard GSM lässt sich die erforderliche Datenrate aus der Abtastrate (2 x maximale Signalfrequenz = 8000 Hz, Nyquist-Shannonsche Abtasttheorem -> $f_{abast} > 2 f_{max}$), der Anzahl der Bits pro Wort (8 bit) sowie einigen Bits Overhead zu 64 kbit/s bestimmen

- nach **Nyquist** ist die maximal mögliche Datenrate eines Kanals

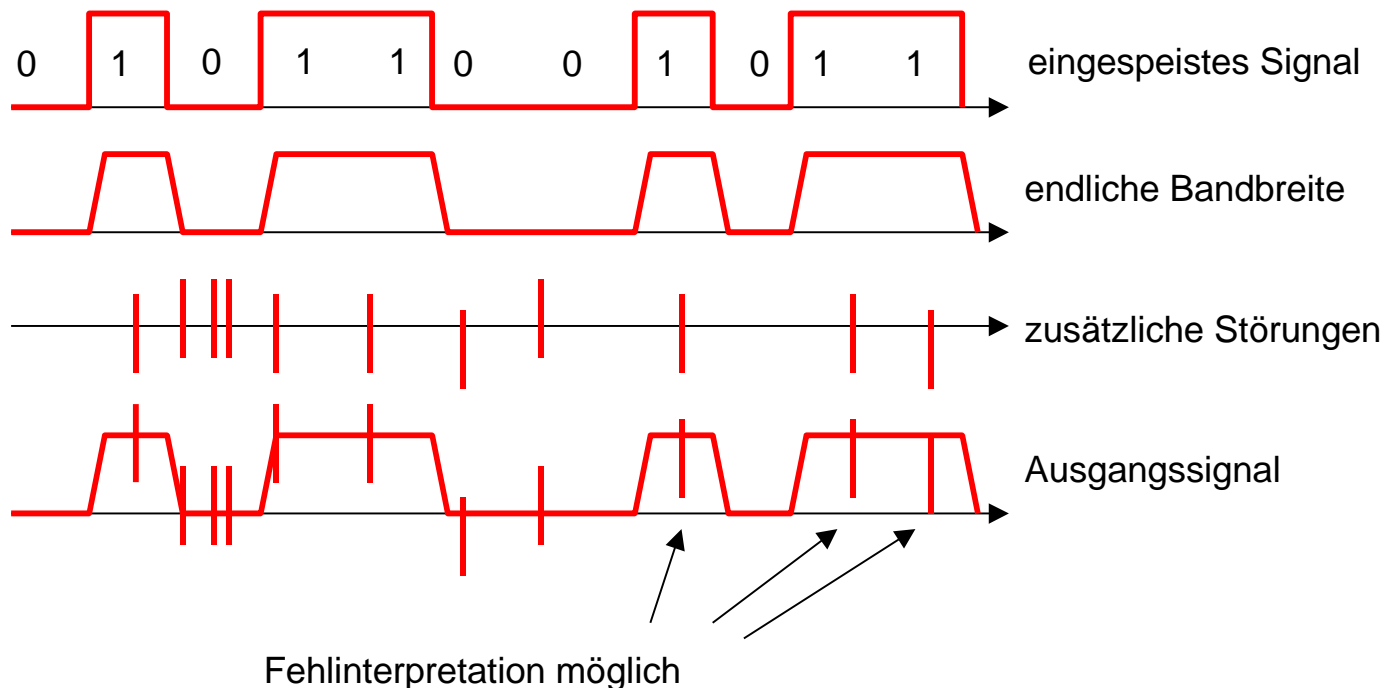
$$DR = 2 \cdot B \cdot \lg L$$

- dabei ist B die Bandbreite in Hz, L die Anzahl der diskreten Pegelwerte, lg ist die Logarithmusfunktion zur Basis 2
- für eine rein binäre Übertragung ($L=2$) bedeutet dies für die Übertragung über eine Telefonleitung ($B=3000$ Hz) eine Datenrate von $DR=6000$ bit/s

- **Spannung am Ausgang einer Leitung, die eine eingeschränkte Bandbreite hat bei einem Eingangssignal mit 2000 bit/s (binäre Übertragung)**
- **Annäherung einer Pulsfolge durch überlagerte Sinuswellen (Fourier-Reihe)**
- **ersichtlich ist die Signalqualität umso besser, je höher die Bandbreite des Kanals ist; dies wird unmittelbar im Bereich des Rundfunks deutlich, wenn ein **Mittelwellensender (Bandbreite 10 kHz)** mit einem **UKW-Sender (Bandbreite 120 kHz)** verglichen wird**



- theoretisch könnte man auf die Idee kommen, beliebig viele diskrete Stufen ($L \rightarrow \infty$) zu nutzen, um dann zu einer unendlich hohen Übertragungsrate zu gelangen
- dies ist nicht möglich, da auf einem Kanal Störungen auftreten können, die verhindern, dass der Pegel am Ausgang wieder eindeutig einem der diskreten Werte zugeordnet werden kann



Signal-zu-Störverhältnis

- offensichtlich ist das Verhältnis von Signalstärke zur Stärke der Störungen interessant
- dieses Verhältnis wird Signal-zu-Stör(Rausch)verhältnis S/N (Signal / Noise Ratio - SNR) genannt
- da die Signalleistung S bei vielen technischen Anwendungen um mehrere Größenordnungen größer ist als die Rauschleistung N , ist es sinnvoll, das Signal-Rausch-Verhältnis SNR (Signal-Noise-Ratio) im logarithmischen Maßstab darzustellen, man benutzt dazu die Pseudoeinheit Bel (Einheit) (B) beziehungsweise deziBel (dB)

$$SNR = 10 \cdot \lg \left(\frac{\text{Signalleistung}}{\text{Rauschleistung}} \right) = 10 \cdot \lg \left(\frac{S}{N} \right)$$

lg: Logarithmus zur Basis 10

- nach Shannon ist die über einen gestörten Kanal maximal übertragbare Datenrate (DR) unter **Berücksichtigung von Störungen** in einem Kanal, welche die Anzahl der nutzbaren diskreten Signalpegel herabsetzen:

$$DR = B \cdot \lg \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

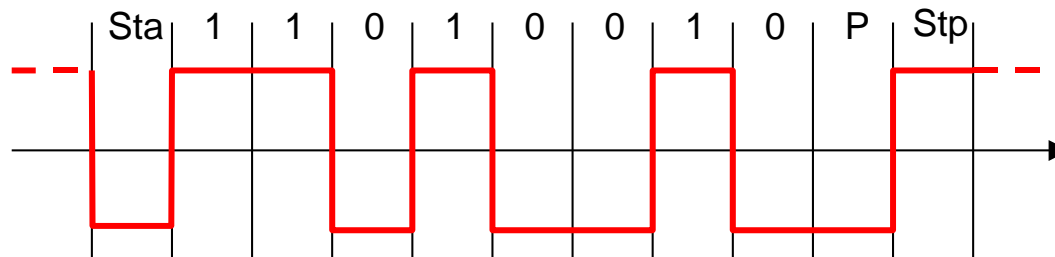
- B =Kanalbandbreite; \lg =Logarithmus zur Basis 2
- am Beispiel der Telefonleitung, die einen Signal-Störabstand von 30dB haben soll, ergibt sich eine maximale Datenrate von 30kbit/s
- die Datenrate darf nicht mit der Baudrate einer Übertragung verwechselt werden
- die Baudrate ist die Anzahl der Wechsel des Signalpegels pro Sekunde, werden mehr als zwei diskrete Signalpegel zugelassen, wird die Datenrate höher sein als die Baudrate
- andererseits führt oft der Overhead bei einer **binären** Übertragung zur Synchronisation dazu, dass die Baudrate höher ist als die Datenrate
- dies ist beispielsweise bei der seriellen Übertragung nach RS-232 der Fall

Basisband-Übertragung

- bei elektrischen Leitungen besteht die Möglichkeit, den Datenstrom direkt ohne weitere Maßnahmen über die Leitung zu übertragen, eine solche Art der Übertragung wird Basisband-Übertragung genannt
- indirekt ist diese Übertragung auch mit Lichtwellenleitern möglich, wenn der Lichtwellenleiter mit den Sende- und Empfangselementen zu einem Übertragungssystem zusammengefasst wird
- streng genommen handelt es sich bei Licht aber auch um eine elektromagnetische Welle mit einer extrem hohen Frequenz
- auf dem Lichtwellenleiter findet die Übertragung also in einem sehr hohen Frequenzbereich statt

- die einfachste Möglichkeit zur Übertragung eines Datenstroms ist die NRZ (non return to zero)-Kodierung, die beim PC in der seriellen Schnittstelle, aber auch bei der parallelen Schnittstelle verwendet wird
- bei der RS-232-Schnittstelle werden zwei diskrete Spannungspegel definiert, die einer „0“ (Pegel < -3V..-15V) und einer „1“ (Pegel > 3V-15V) entsprechen, der Datenstrom wird umgesetzt in diese Spannungspegel einfach auf die Übertragungsleitung geschaltet
- da bei dieser Kodierung je nach Inhalt der Daten über längere Zeit statische Pegel anliegen (z.B. Übertragung vieler „0“-Bits), hätte der Empfänger Schwierigkeiten, herauszufinden, wo die zeitlichen Grenzen der einzelnen Bits sind; daher ist eine Synchronisation zwischen Sender und Empfänger notwendig
- bei einer synchronen seriellen Schnittstelle ist dies eine separate Übertragungsleitung, die ein Taktsignal führt
- bei der weitaus häufigeren asynchronen seriellen Schnittstelle wird pro übertragenem Wort ein Synchronisationscode mit übertragen, wodurch sich ein gewisser Overhead ergibt

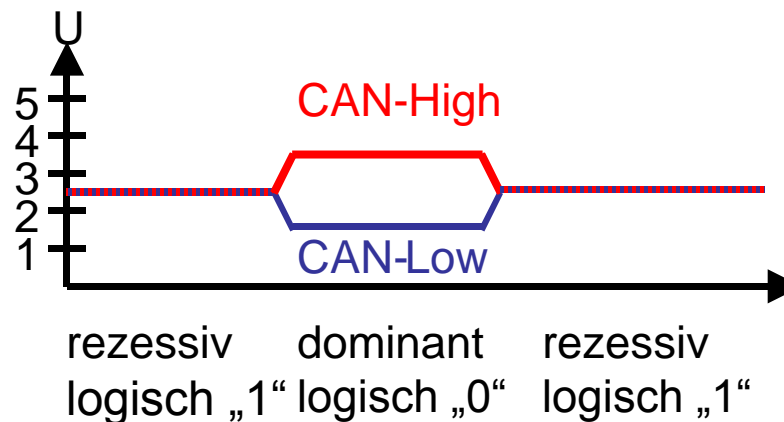
- **der Pegelwechsel vom Stopbit (Stp) des vorangegangenen Datenworts zum Startbit (Sta) des aktuellen Datenworts wird im Empfängerbaustein zur Synchronisation genutzt**
- **der Empfänger kann dann die Pegel äquidistant nach der vereinbarten Baudrate abtasten (Bei modernen Empfängerbausteinen führt jede Pegeländerung zu einer Nachsynchronisation)**
- **um auch bei gestörtem Kanal eine einigermaßen sichere Übertragung zu gewährleisten, ist ein Prüfsummenbit (Parity P) im Datenwort enthalten, so dass der Empfänger überprüfen kann, ob bei der Übertragung ein Bit verfälscht wurde**
- **werden mehrere solcher Prüf-Bits mit übertragen, bzw. werden mehrere Datenbits in eine höhere Anzahl von zu übertragene Bits kodiert, so ist nicht nur eine Fehlererkennung, sondern auch eine Fehlerkorrektur möglich**



- neben Spannungspegeln sind bei der Übertragung auch Strompegel möglich; gegenüber Spannungspegeln hat diese Übertragung eine höhere Störfestigkeit und eignet sich daher für größere Übertragungsentfernungen
- mit seriellen Übertragungen lassen sich nicht nur Punkt-zu-Punkt-Verbindungen realisieren (wie bei der RS-232), sondern durch Nutzung von Open-Kollektor (Open-Drain) oder Tristate-Ausgangsstufen auch Busverbindungen
- an einer Übertragungsleitung können also mehrere Busteilnehmer angeschlossen sein

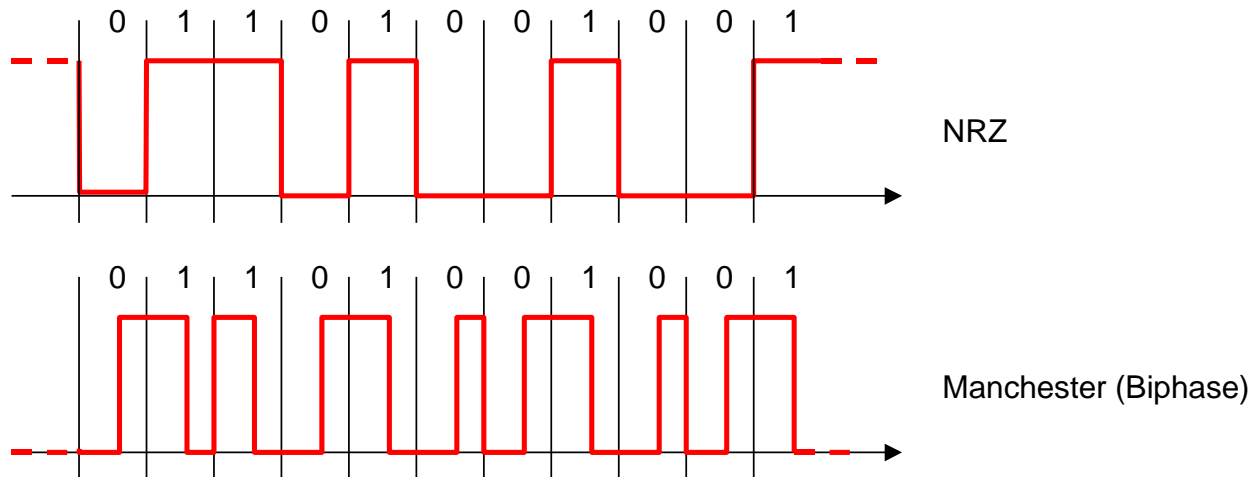
- ein Beispiel dafür ist der z.B. im Fahrzeugbereich eingesetzte CAN-Bus, der ebenfalls NRZ, aber Open-Kollektor-Ausgangsstufen nutzt
- ein **hohes Maß an Störfestigkeit** erzielt der CAN-Bus dadurch, dass er zwei Übertragungsleitungen (CAN-High und CAN-Low) nutzt, auf denen der Datenstrom mit unterschiedlichem Pegeln übertragen wird (symmetrische Übertragung)

High-Speed-CAN (<1MBAud)



- bei der Übertragung eines Datenpakets werden „0“ und „1“ in die Zustände „dominant“ und „rezessiv“ kodiert
- **dominant** ist der Zustand, bei dem beide Ausgangstransistoren des Treiberbausteins durchschalten
- beim **rezessiven** Zustand sperren beide Transistoren, was den anderen Teilnehmern entweder den logischen Zustand oder Bus inaktiv signalisiert
- welcher der beiden Fälle vorliegt, ergibt sich aus dem Kontext der Übertragung
- einem rezessiver Zustand, der längere Zeit andauert, können die Busteilnehmer entnehmen, dass gerade kein anderer Busteilnehmer sendet und ihrerseits mit dem Senden eines Datenpakets beginnen

- aufgrund der notwendigen Synchronisation zu Beginn eines Datenpakets und der variierenden Zeitbasen von Sender und Empfänger ist die maximale Länge eines Datenpaketes mit NRZ begrenzt
- daher werden bei Übertragungsstrecken mit starken Störungen und bei besonderen Sicherheitsansprüchen Verfahren eingesetzt, die eine häufigere Synchronisation ermöglichen
- ein solches Verfahren ist die Manchester-Kodierung, bei der die logischen Bits nicht in Form eines statischen Pegels, sondern als Übergang von „0“ auf „1“ (positiver Flankenwechsel) (für logisch 0) bzw. von „1“ auf „0“ (negativer Flankenwechsel) (für logisch 1) repräsentiert werden
- dieser Pegelübergang wird in der zeitlichen Mitte des Übertragungsbits realisiert
- aus einem Datenstrom 0 1 1 0 1 0 0 1 0 0 1 werden also die „Symbole“ 01 10 10 01 10 01 01 10 01 01 10



- wird Manchester-Kodierung mit NRZ verglichen, fällt auf, dass die Frequenz auf der Leitung höher ist
- für einen Manchester-kodierten Datenstrom ist also eine höhere Bandbreite notwendig
- die Manchester-Kodierung wird beispielsweise beim Ethernet verwendet
- bei einem 10 Mbps-Ethernet führt ein Datenstrom 101010 zu einer Rechteckschwingung mit 5 MHz, ein Datenstrom 00000 oder 11111 zu einer Rechteckschwingung mit 10 MHz
- als elektrische Leitung sind heute bei Ethernet hauptsächlich verdrehte Leitungen mit oder ohne Schirm im Einsatz

Modulation – Übertragung eines Signals nach Umsetzung

- Basisbandsignale eignen sich nicht direkt für eine drahtlose Übertragung
- im Bereich der drahtlosen Übertragung von Nachrichten werden Verfahren benötigt, um Signale in hochfrequente Sinusschwingungen zu verpacken oder umzuwandeln; solche Verfahren werden **Modulationsverfahren** genannt

Definition Modulation: *Die Modulation ist ein Vorgang, bei dem ein oder mehrere Merkmale einer Trägerschwingung entsprechend dem Signal einer zu modulierenden Schwingung verändert werden*

- **die Modulationsverfahren sind prinzipiell sowohl für drahtlose als auch drahtgebundene Dienste nutzbar, meist entscheiden ökonomische Randbedingungen darüber, welches der Verfahren eingesetzt wird**
- **als wesentlicher Grund, bei Leitungen eine Modulation zu verwenden, gilt die Mehrfachnutzung, dies wird an den folgenden Beispielen deutlich**

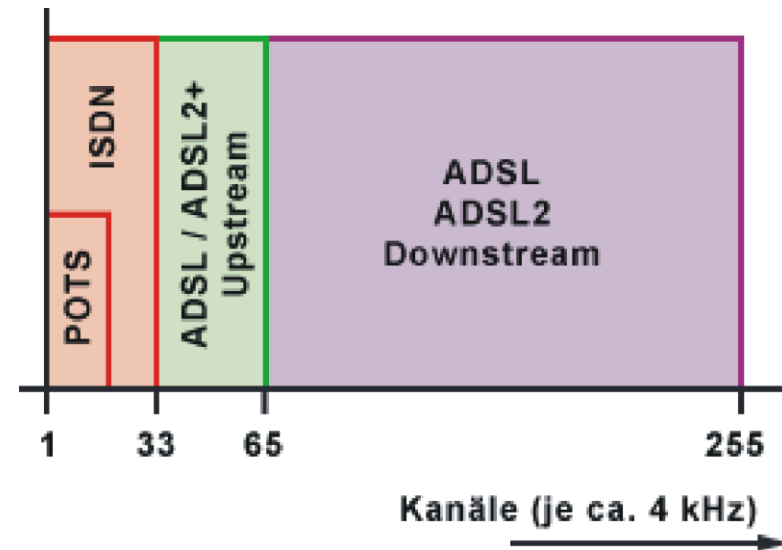
Modulation - Beispiele

Breitbandkabelnetz:

- es werden verschiedene Rundfunk- und Fernsehprogramme übertragen; jedes dieser Programme nutzt einen bestimmten Frequenzbereich (Kanal), die Audio- und Videosignale werden dafür durch Modulation in den zu nutzenden Frequenzbereich gebracht

Telefonkabel:

- klassische Nutzung ist sicherlich die Telefonie mit der entsprechenden Analogbandbreite von etwa 3 kHz, im Zuge der Einführung von schnellen Internetzugängen wird beim ADSL-System durch Modulation ein Datentransfer im Frequenzbereich oberhalb von 10 kHz möglich, der den normalen Telefonbetrieb nicht stört (Aufgabe des „DSL-Splitters“)



Powerline:

- **primäre Aufgabe von Stromversorgungsleitungen ist die Verteilung elektrischer Energie (50 Hz), durch Aufprägen eines hochfrequenten Signals lässt sich auch hier z.B. ein schneller Zugang zum Internet realisieren**

- die Modulation ist ein Vorgang, bei dem ein oder mehrere Merkmale einer Trägerschwingung entsprechend dem Signal einer zu modulierenden Schwingung verändert werden
- wenn von einem sinusförmigen Spannungsverlauf (Trägerschwingung)

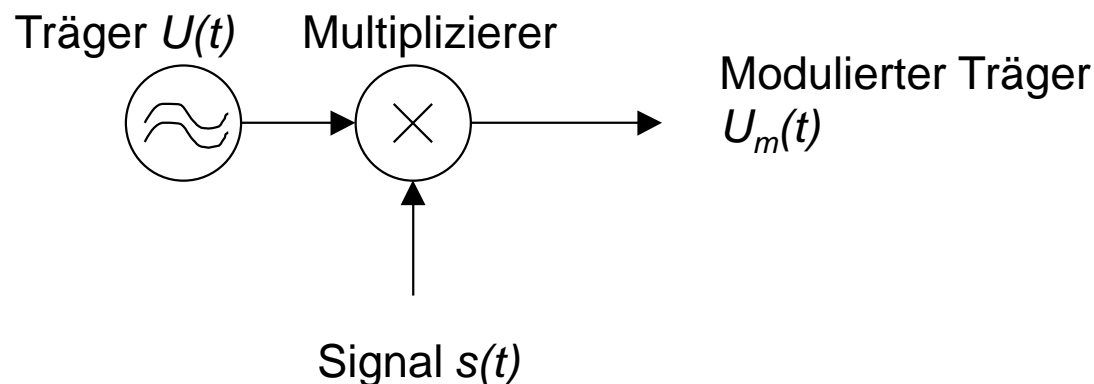
$$U(t) = U_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi)$$

ausgegangen wird, so wird erkennbar, dass sich ein Signal oder Datenstrom in einen der drei Parameter **Amplitude U_0** , **Frequenz f** und **Phase φ** verpacken lässt

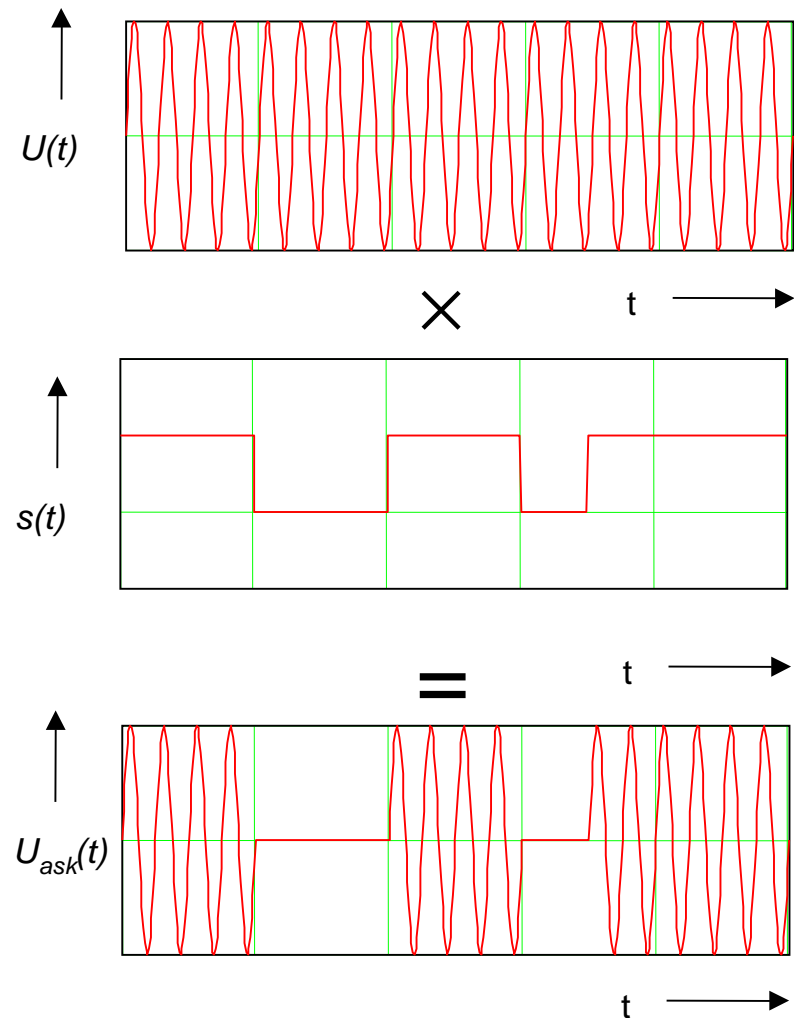
- je nach Parameterwahl wird die Modulation Amplitudenmodulation, Frequenzmodulation oder Phasenmodulation genannt
- daneben sind auch Kombinationen üblich (z.B. Amplituden- und Phasenmodulation)
- eine Besonderheit stellt das Bandspreizverfahren dar, das nicht unmittelbar anhand obiger Formel ersichtlich ist, aber in der Technik eine wichtige Rolle spielt

Modulation – Amplitudenmodulation (AM)

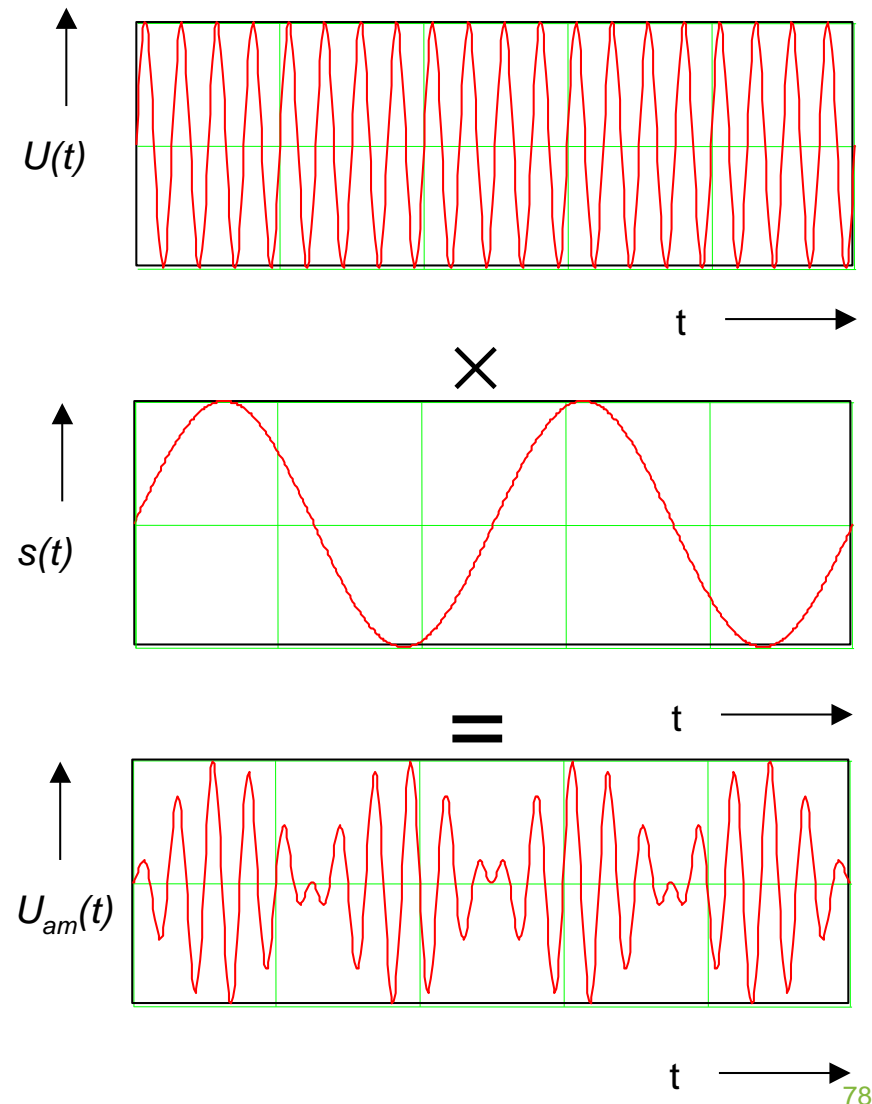
- bei der Amplitudenmodulation wird die Amplitude des Trägers durch das zu übertragenden Signal oder dem Datenstrom beeinflusst
- handelt es sich um einen binären Datenstrom spricht man auch von Amplitudentastung (Amplitude Shift Keying, ASK)
- wenn ein Signal oder ein Datenstrom als zeitveränderliche Funktion $s(t)$ dargestellt wird, so ergibt sich das modulierte Signal, indem der Träger mit dieser Funktion $s(t)$ multipliziert wird; der Modulator ist also ein Multiplizierer



- ist $s(t)$ ein digitales Signal, das bei logischer „0“ den Pegel 0V und bei logischer „1“ den Pegel 1V einnimmt, ergibt sich folgendes Bild für das Ausgangssignal:



- soll ein sinusförmiges Signal übertragen werden, entspricht die Modulation einer Multiplikation des Trägers mit diesem Signal; es ergibt sich folgendes Bild:



- anhand der einfachen Sinusfunktionen kann die belegte Bandbreite recht einfach abgeschätzt werden, mit einem Additionstheorem ergibt sich für das modulierte Signal:

$$U_{am}(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi f_s t) \cdot \sin(2\pi f t) = \frac{U_0}{2} \left[\cos(2\pi(f - f_s)t) - \cos(2\pi(f + f_s)t) \right]$$

- dabei ist f die Trägerfrequenz und f_s die Frequenz des zu übertragenden Sinussignals
- während der unmodulierte Träger in dem betrachteten Fall nur eine einzige Frequenz f belegt, hat das amplitudenmodulierte Signal offensichtlich zwei belegte Frequenzen $f-f_s$ und $f+f_s$
- diese rechts und links der Trägerfrequenz liegenden Frequenzen werden Seitenbänder genannt
- insgesamt ist also für dieses Signal die Bandbreite $(f+f_s)-(f-f_s)=2f_s$ erforderlich, dies gilt für die Amplitudenmodulation ganz allgemein
- ein Signal, das im Basisband eine bestimmte Bandbreite B besitzt, belegt als amplitudenmoduliertes Signal die Bandbreite $2B$

- die Regenerierung des Signals geschieht dadurch, dass auf Empfängerseite das eintreffende modulierte Signal erneut mit der Trägerfrequenz multipliziert wird; dabei ergibt sich:

$$U_{dem}(t) = \frac{U_0}{4} \cdot \left[2 \sin(2\pi f_s t) + \sin(2\pi(2f - f_s)t) + \sin(2\pi(2f + f_s)t) \right]$$

- neben zwei Frequenzen im Abstand f_s um die zweifache Trägerfrequenz herum entsteht wieder ein **Anteil im Basisband mit der Frequenz f_s**
- da üblicherweise die Trägerfrequenz sehr viel größer ist als die zu übertragende Signalfrequenz, kann durch eine Filterung das Nutzsignal im Basisband von den höherfrequenten Anteilen getrennt werden
- das gesamte Verfahren zur Rückgewinnung des übertragenen Signals wird Demodulation genannt, die technische Realisierung ist der Demodulator

- die Nutzung der zweifachen Bandbreite ist nicht sehr effektiv, denn letztlich wird die Information redundant übertragen
- wichtiger Vorteil ist die einfache technische Realisierbarkeit
- oft wird von der „gewöhnlichen Amplitudenmodulation“ Gebrauch gemacht, bei der zusätzlich zu den beiden Seitenbändern der Träger selbst übertragen wird; mathematisch wird also das Signal

$$U(t) = U_0 \cdot m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) + U_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

gebildet

dabei ist m der Modulationsgrad ($m \leq 1$), d.h. der Grad mit dem die Schwingungsamplitude eingestellt wird

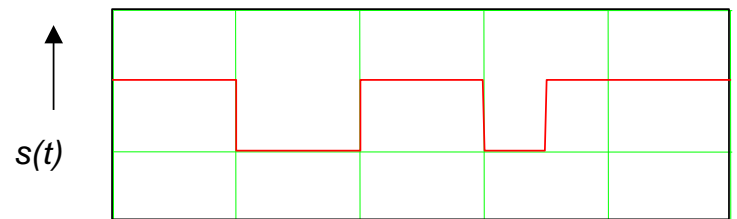
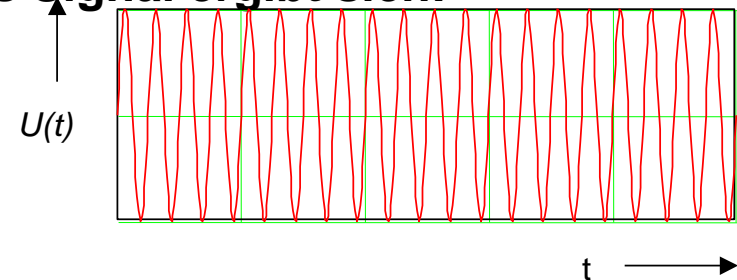
- insgesamt werden bei diesem modulierten Signal die Frequenzen f , $f-f_s$ und $f+f_s$ belegt
- zum Regenerieren auf der Empfängerseite reicht aber eine Seite des belegten Bandes aus
- bei der Einseitenband-AM werden daher mit einem Filter die Frequenzanteile rechts oder links des Trägers abgeschnitten
- einzelne Kanäle können dann in einem Frequenzbereich dichter zusammengepackt werden
- das Demodulationsverfahren ist identisch mit dem Verfahren zur Demodulation des einfachen amplitudenmodulierten Signals
- die einfache (nicht Einseitenband-AM) Amplitudenmodulation wird für den Langwelle-, Kurzwelle- und Mittelwellerundfunk sowie für das Videosignal für die konventionellen terrestrischen Fernsehprogramme verwendet

Modulation – Frequenzmodulation (FM)

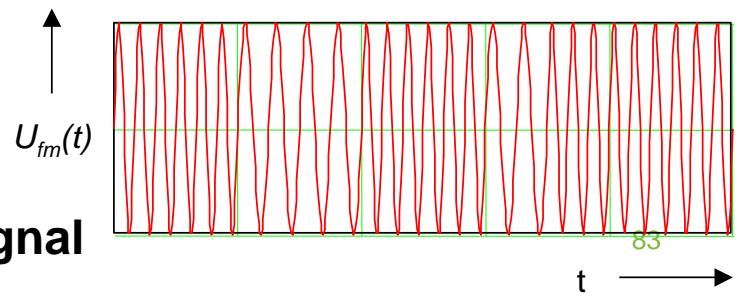
- bei der Frequenzmodulation wird die Frequenz des Trägers durch das zu übertragende Signal variiert
- für ein zu übertragendes sinusförmiges Signal ergibt sich:

$$U_{fm}(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi \cdot (f + f_{Hub} \cdot \sin(2\pi f_s t)) \cdot t)$$

- die Größe f_{Hub} ist der Modulationshub, der angibt, wie stark sich die Trägerfrequenz ändert
- für einen binären Datenstrom spricht man von Frequency Shift Keying (FSK)



=



Beispiel für ein FSK-Signal

- die sich ergebenden Frequenzanteile können durch sogenannte Zylinder- oder Besselfunktionen (spezielle Funktionen wie Sinus, Kosinus, Sinh ...) beschrieben werden
- die vom frequenzmodulierten Signal belegte Bandbreite geht ohne weitere Maßnahmen weit über die im Basisband erforderliche Bandbreite hinaus
- so wird für ein analoges Sprach/Musik-Signal im UKW-Rundfunk eine Bandbreite von 120 kHz verwendet, was letztlich auch zur hohen Störsicherheit und damit zur guten Übertragungsqualität beiträgt; wird diese volle Bandbreite genutzt spricht man von der Breitband-FM
- die hohe Bandbreite bedeutet natürlich auch eine große Redundanz, die bei wirtschaftlicher Frequenznutzung z.B. im Sprechfunkbereich nicht zweckmäßig ist, daher wird durch Filterung in diesen Bereichen die Bandbreite auf das notwendige Maß (im Sprachfunk 10 kHz) herabgesetzt, dies wird Schmalband-FM genannt

- **in der Digitaltechnik wurde FSK in der Vergangenheit für die Datenübertragung über Telefonleitung mit Analogmodems genutzt**
- **bedingt durch die zu diesem Zeitpunkt möglichen niedrigen Trägerfrequenzen (0→1200Hz, 1→2400Hz) konnten nur sehr niedrige Übertragungsraten realisiert werden, so dass für heutige Modems höherwertige Verfahren eingesetzt werden**
- **ein erweitertes FSK wird z.B. für das Bluetooth-System eingesetzt**

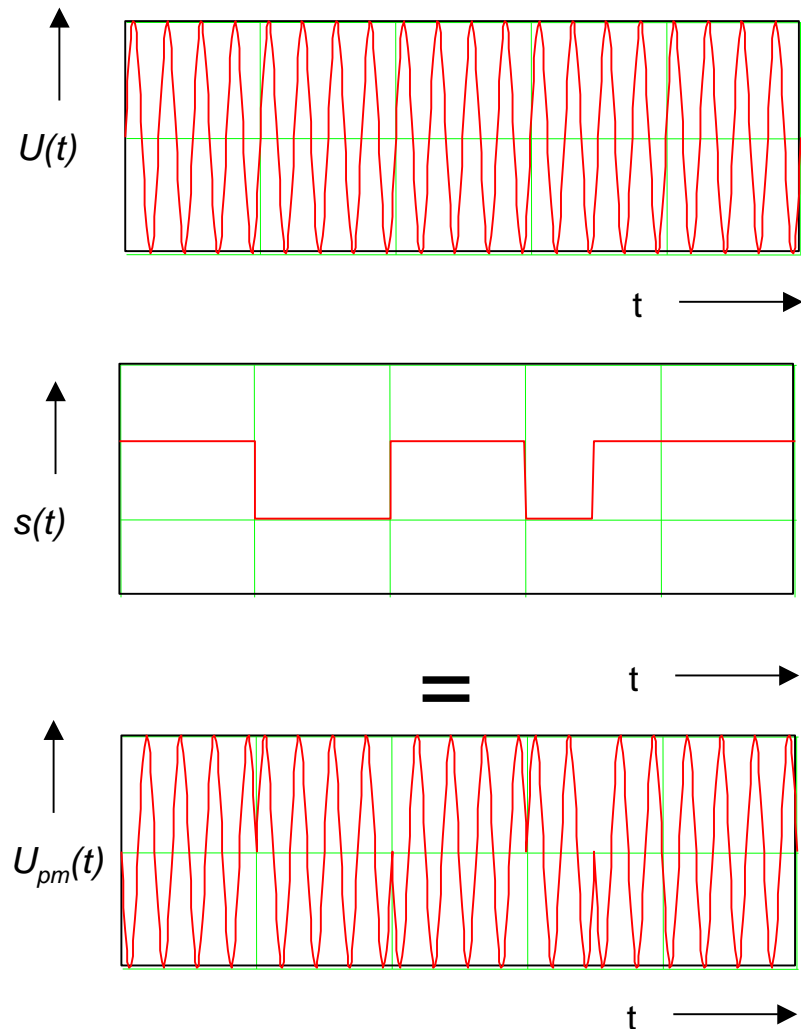
Modulation – Phasenmodulation (PM)

- die Phasenmodulation (für binäre Übertragung Phase Shift Keying PSK) ist mit der Frequenzmodulation verwandt, da in beiden Fällen das zu übertragende Signal im Argument der Sinusfunktion für den Träger untergebracht wird
- hinsichtlich des belegten Frequenzbandes zeigt sich entsprechend auch ein ganz ähnliches Verhalten
- bei der Phasenmodulation wird der Phasenwinkel durch das zu übertragende Signal variiert. Für ein analoges sinusförmiges Signal gilt:

$$U_{pm}(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + p_{Hub} \cdot \sin(2\pi f_s t))$$

- darin bezeichnet p_{Hub} den Phasenhub

- für ein digitales Signal spricht man auch von „Binary Phase Shift Keying“ **BPSK**
- in dem skizzierten Beispiel entspricht die logische „0“ einer Phasenverschiebung 0° und die „1“ einer Phasenverschiebung von 180°
- werden jeweils zwei zu übertragende Bits zusammengefasst, so ergeben sich insgesamt vier Möglichkeiten (Symbole), die in entsprechende diskrete Phasenwerte übersetzt werden können



- beispielsweise kann dies durch die Zuordnung:

00 \Rightarrow 0°

01 \Rightarrow 90°

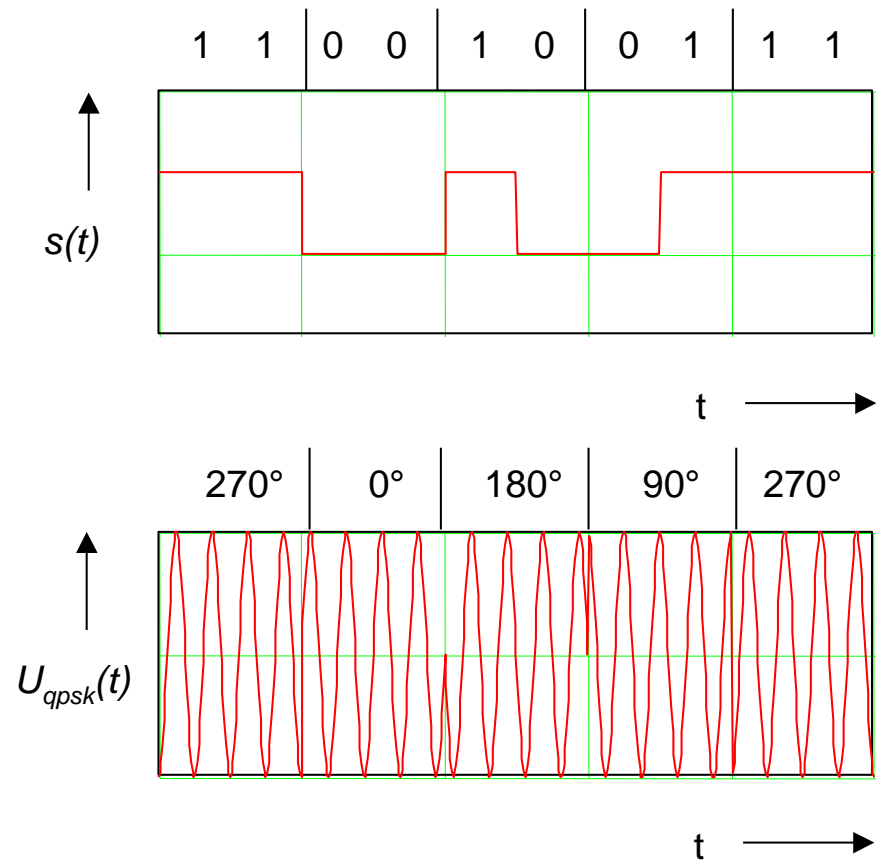
10 \Rightarrow 180°

11 \Rightarrow 270°

erfolgen

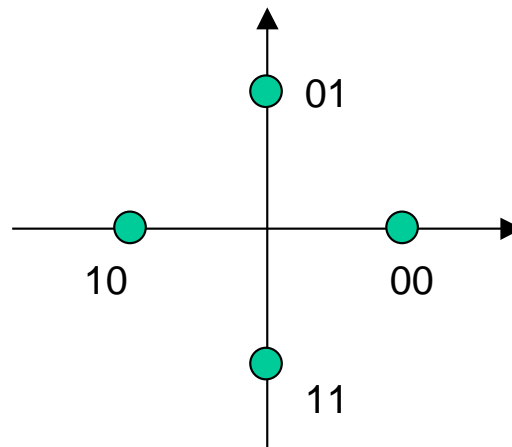
- in diesem Fall spricht man von Quaternary Phase Shift Keying (QPSK)

- ein Beispiel für eine übertragene Bitfolge zeigt die nebenstehende Abbildung

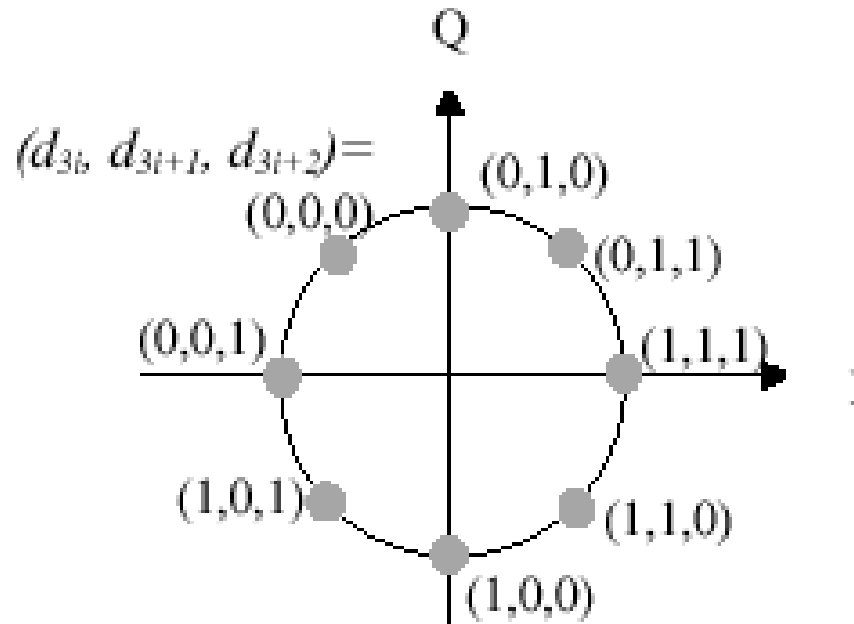


Beispiel für Quaternary Phase Shift Keying (QPSK)

- **durch die gleichzeitige Übertragung von 2 bit innerhalb eines Symbols unterscheiden sich bei dieser Art der Modulation die Datenrate und die sogenannte Symbolrate**
- **bei QPSK wäre folglich für eine Datenrate von 2 Mbit/s eine Symbolrate von 1 MBaud erforderlich**
- **zur Verdeutlichung der Zuordnung von Bitfolgen zu Symbolen werden die Phasenwinkel oft in ein Koordinatensystem eingetragen:**



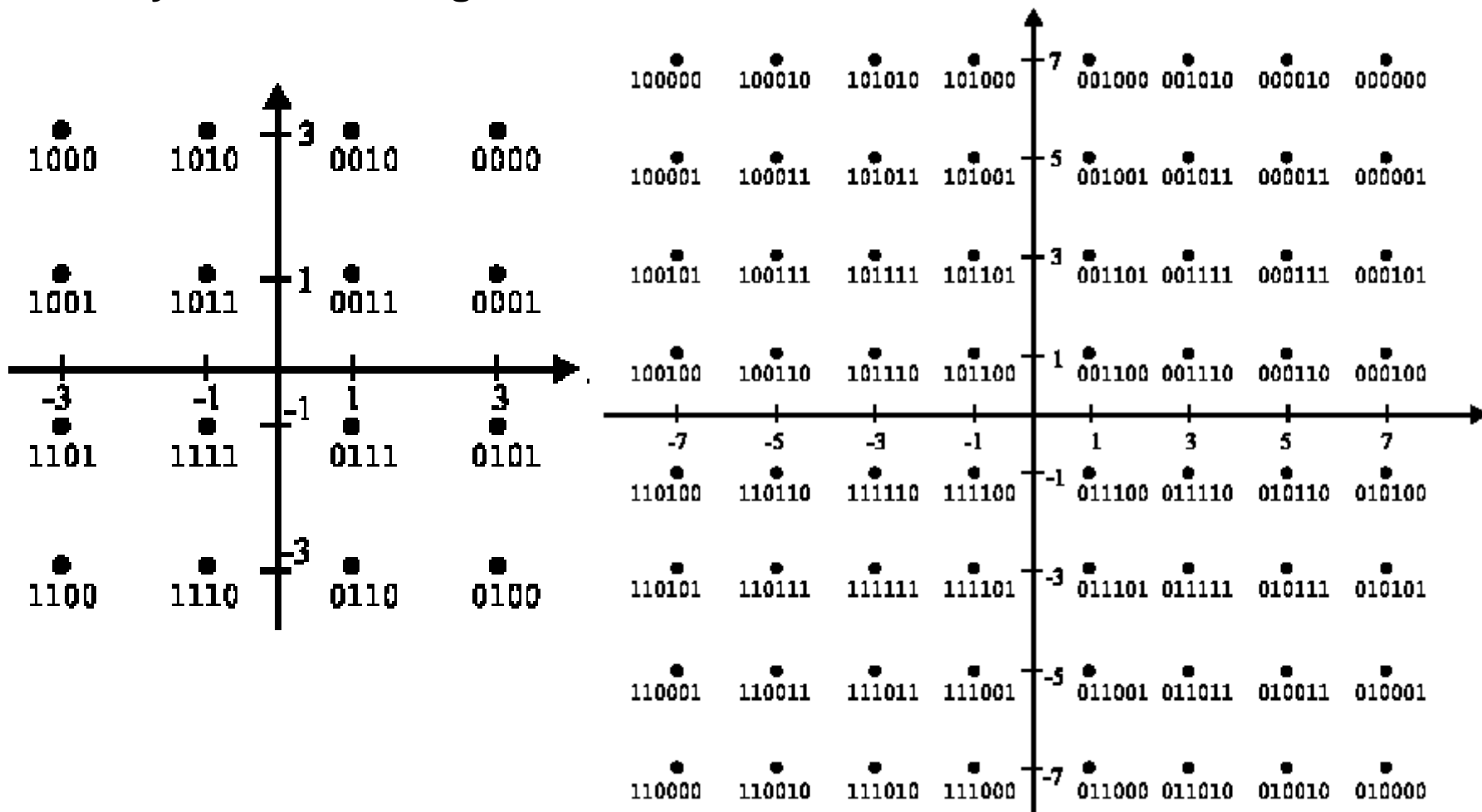
- **das Mobilfunksystem GSM („D-Netz“ und „E-Netz“) nutzt ebenfalls diese Art der Modulation**
- **jedoch werden hier 3 Bits zu einem Symbol zusammengefasst, wodurch Phasenwinkel im 45° -Raster verwendet werden**
- **diese Modulation wird auch 8-PSK genannt, da insgesamt 8 mögliche Zustände im Phasenwinkel abgebildet werden**



Modulation – Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

- die Fortsetzung dieses Prinzips der Zuordnung mehrerer Bits zu einem Symbol führt mit der QAM zu sehr effizienten Modulationsverfahren
- bei der QAM wird nicht nur die Phase moduliert, sondern zeitgleich auch die Amplitude
- bei Darstellung in einem Koordinatensystem wird neben dem Winkel auch der Abstand der Symbole zum Koordinatenursprung relevant
- der Winkel führt zu einer Modulation des Phasenwinkel, der Abstand zum Koordinatenursprung führt zur Modulation der Amplitude; insofern handelt es sich bei der QAM um eine Mischung aus Amplituden- und Phasenmodulation
- üblich sind die Modulationsarten 16-QAM und 64-QAM, bei denen 16 Zustände (4 bit) bzw. 64 Zustände (6 bit) zu einem Symbol zusammengefasst werden

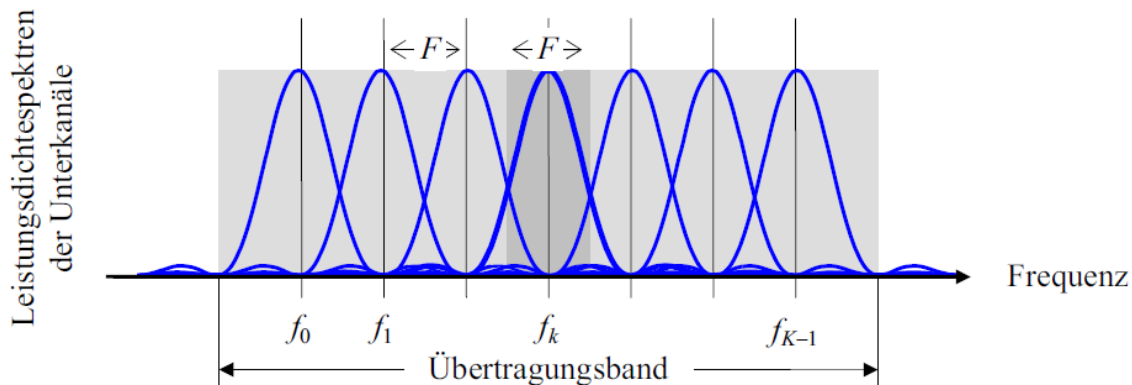
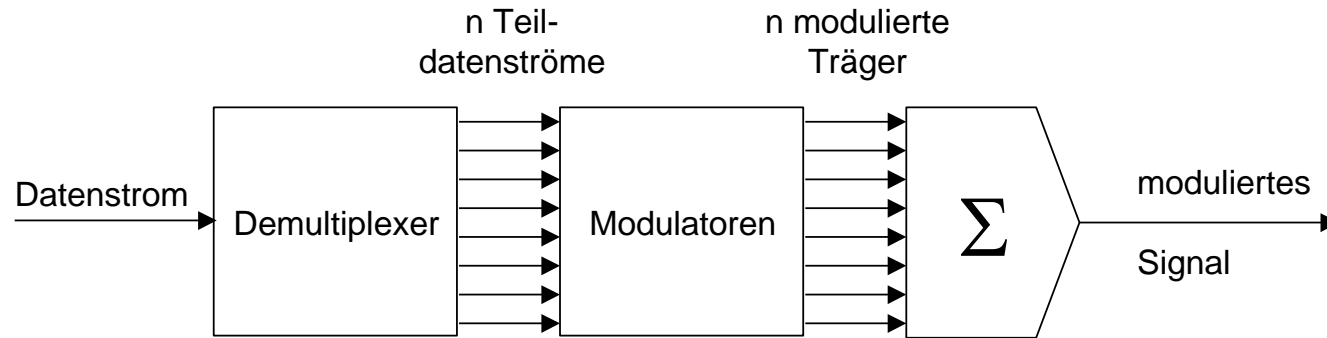
- QAM wird in dem terrestrischen digitalen Fernsehsystem (Digital Video Broadcasting DVB) genutzt
- Symbolzuordnungen für 16-QAM und 64-QAM:



Modulation – Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM

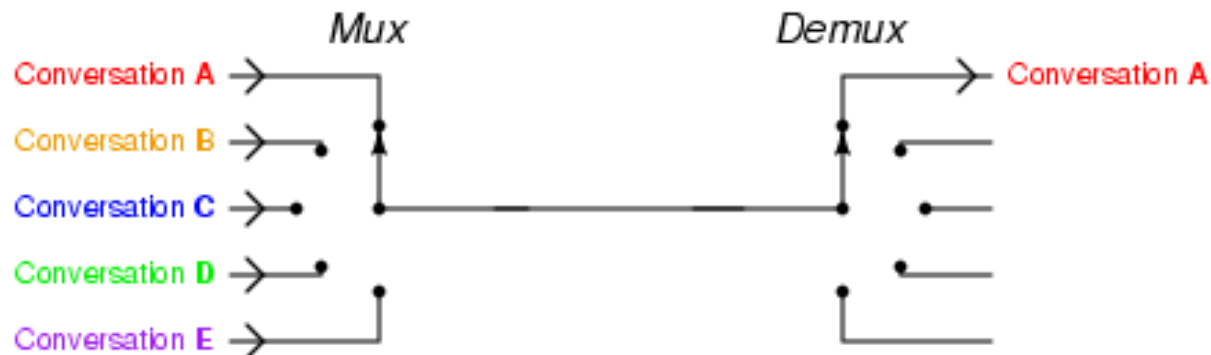
- die bisher vorgestellten Modulationsverfahren modulieren Amplitude, Frequenz oder Phase einer einzelnen Trägerschwingung
- wird eine höhere Datenrate benötigt, so muss bei diesen Verfahren eine entsprechende Bandbreite zur Verfügung gestellt werden
- die volle Bandbreite wird nur bei einem raschen Wechsel der Symbole benötigt, so dass statistisch betrachtet **die weiter vom Träger entfernten Spektrallinien** nur sehr wenig genutzt werden
- wird das Spektrum in viele Kanäle mit kleiner Bandbreite unterteilt, so lässt sich die Gesamtbandbreite erheblich effizienter nutzen, dies ist die Idee des OFDM
- der Datenstrom wird in viele parallele Datenströme kleinerer Übertragungsrate zerlegt und auf eine Vielzahl von Trägern aufmoduliert, dabei sind einige hundert bis zu einigen tausend Träger üblich
- beim digitalen Fernsehen DVB-T werden beispielsweise bis zu 8192 Träger verwendet, die einzelnen Datenströme werden mit einem der vorgenannten Modulationsverfahren moduliert

- **der Frequenzunterschied zwischen den einzelnen Träger ist gerade so bemessen, dass sich die einzelnen Träger im Empfänger nicht gegenseitig beeinflussen können, insgesamt entsteht dadurch ein Spektrum, das nahezu eine Rechteckkontur besitzt**

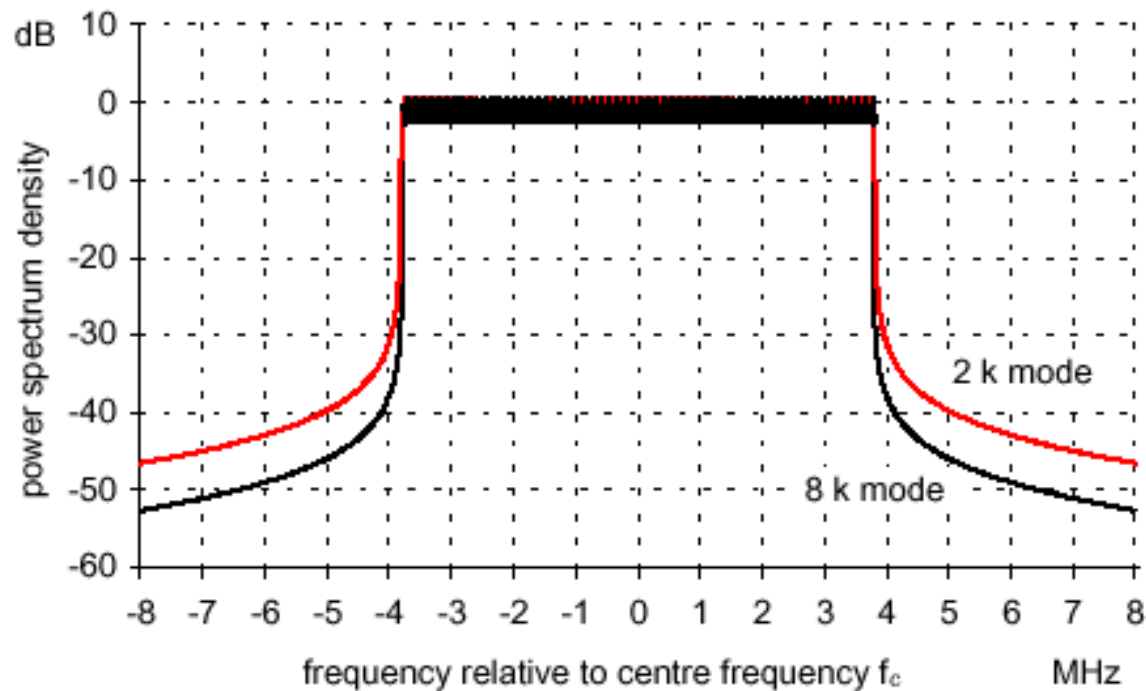


Demultiplexer

- ein Demultiplexer ist das Gegenstück zu einem Multiplexer
- mit dem Demultiplexer wird ein serielles Eingangssignal auf einen von mehreren Ausgänge geschaltet
- zur Steuerung besitzt der Demultiplexer Steuereingänge, die für die Umschaltung seiner Schalter notwendig sind
- die Umschaltung kann statisch oder periodisch bzw. zyklisch erfolgen, setzt dann aber immer eine zeitliche Abstimmung zwischen der Schalterstellung von Multiplexer und Demultiplexer voraus
- die Sicherstellung des zeitlichen Zusammenhanges erfordert spezielle Synchronisationseinrichtungen.



■ Beispiel für ein realisiertes DVB-Spektrum:



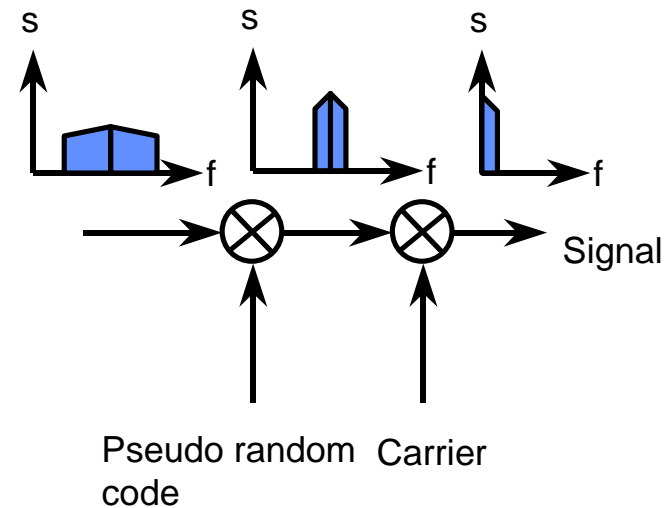
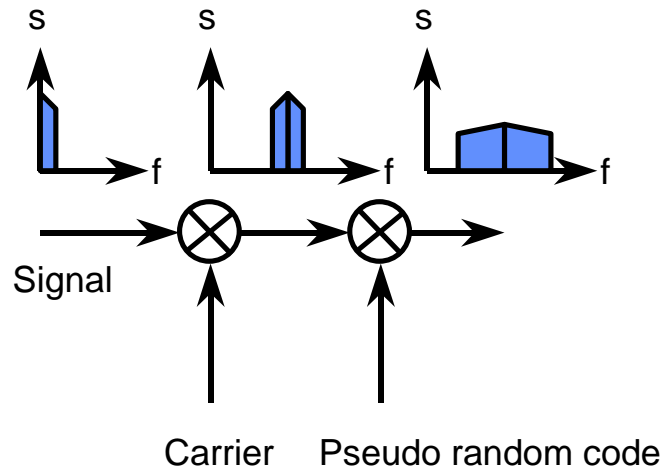
- mit OFDM werden derzeit sehr viele Übertragungssysteme aufgebaut
- das ADSL-System (Asynchronous Digital Subscriber Line) ist ein typischer Vertreter der Technik
- wird die Redundanz durch Zufügen weiterer Bits in den Datenstrom erhöht (Forward Error Correction, FEC), so können sogar einzelne Träger durch Störungen auf dem Übertragungsweg ausfallen, ohne das damit die Gesamtübertragung gefährdet würde
- auch kann die Nutzung der einzelnen Träger dynamisch nach Zustand der Übertragungsstrecke angepasst werden
- im Fall einer lang andauernden Störung bei einzelnen Frequenzen kann der entsprechende Träger einfach ausgeblendet werden und der entsprechende Teildatenstrom auf die anderen Träger verteilt werden
- die Realisierung der einzelnen Funktionsblöcke Demultiplexer und der Modulatoren geschieht in Prozessoren, die speziell für Signalverarbeitungsaufgaben optimiert sind (Digitale Signalprozessoren - DSP)
- weitere Systeme, die OFDM nutzen sind DRM und DAB

Bandspreiztechnik, Spread-Spectrum Technique

- die Bandspreiztechnik wurde ursprünglich im militärischen Bereich genutzt
- das im Basisband eine bestimmte Bandbreite belegende Spektrum des zu übertragenden Datenstroms wird auf einen wesentlich breiteren Frequenzbereich abgebildet
- bei dieser Verbreiterung der belegten Bandbreite wird anschaulich die zu übertragende Information auf ein sehr breites Frequenzband verteilt
- dadurch wird einerseits eine hohe Störresistenz gegen zufällige und absichtliche Störsignale erzielt, andererseits kann das modulierte Signal hinsichtlich Amplitude und Signalcharakter so gestaltet werden, dass es für einen Fremden nahezu „unsichtbar“ ist
- Die Verbreiterung des Spektrums wird z.B. dadurch realisiert, dass nach der Modulation auf einen Träger (Carrier) in einer weiteren Modulationsstufe die Modulation durch die Multiplikation mit einer binären Pseudozufallsfolge erfolgt
- man spricht vom Direct Sequencing Spread-Spectrum-Verfahren DSSS

- auf der Empfängerseite muss zunächst eine Demodulation mit exakt dieser Pseudozufallsfolge und anschließender Demodulation ins Basisband durchgeführt werden, um das übertragene Signal zu regenerieren
- für die erfolgreiche Regenerierung muss diese Pseudozufallsfolge bekannt sein, sie stellt daher einen Schlüssel oder Code dar, so dass die Attraktivität für militärische Anwendung schnell klar wird
- interessant ist, dass eine Signalregenerierung auch dann möglich ist, wenn die Übertragungsstrecke stark gestört ist; bei einer drahtlosen Übertragung können im Extremfall im Übertragungsfrequenzbereich andere starke Sender arbeiten
- für die fremden (konventionellen) Übertragungssysteme erscheint ein Spread-Spektrum Signal als zusätzliches Rauschen, das nicht vom Hintergrundrauschen oder dem normalen Rauschen des Empfängers zu unterscheiden ist
- auf der anderen Seite ist es durch die hohe Redundanz der Übertragung tolerierbar, dass durch einen konventionellen Sender eine Störung der Spread-Spektrum-Übertragung auftritt

- eine sehr prominente Anwendung stellt das System zur Satellitennavigation (Global Positioning System GPS) dar
- die einzelnen Satelliten strahlen ständig mittels Bandspreiztechnik modulierte Signale ab, die von einem Empfänger, dem die entsprechenden Codes bekannt sind, empfangen werden können
- durch Messen der Laufzeitunterschiede der von verschiedenen Satelliten stammenden Signale kann die genaue geographische Position des Empfängers bestimmt werden
- das GPS wurde vom amerikanischen Verteidigungsministerium entwickelt und steht zur Hälfte einer zivilen Nutzung zur Verfügung
- die entsprechenden Codes sind bekannt und ermöglichen Ortungen im Bereich bis herunter zu etwa 15 m
- die Satelliten stellen auch einen weiteren verschlüsselten Dienst zur Verfügung, dessen Code nur dem Militär bekannt ist, und das eine Ortung im Bereich unterhalb von 1 m ermöglicht
- auch das europäische System Galileo basiert auf einer ähnlichen Technik



- die Bandspreiztechnik kommt auch im Mobilfunkstandard UMTS zur Anwendung
- auch im Bereich der drahtgeführten Kommunikation wird die Bandspreiztechnik erprobt
- gerade wegen der durch andere Geräte recht stark gestörten Stromversorgungsleitungen wird sie im Bereich der Powerline Communication konkurrierend zur OFDM eingesetzt.

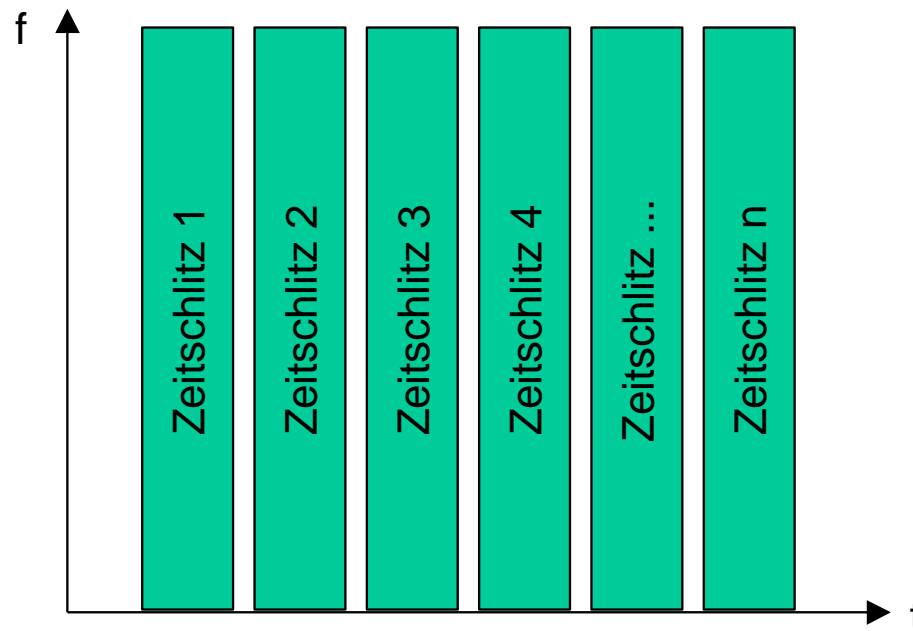
Zugriffsverfahren

- oft erfolgt eine Kommunikation über eine Übertragungsstrecke (drahtgeführt oder drahtlos) bidirektional, d.h. es werden von jeder Station Daten gesendet und auch empfangen
- darüber hinaus werden oft mehr als zwei Stationen mit einer einzigen Übertragungsstrecke verbunden um einen wahlfreien Datentransfer von einer Station auf eine beliebige andere Station zu ermöglichen
- dieses Ziel kann nur erreicht werden, wenn trotz eines physikalischen Übertragungsmediums durch die Art der Übertragung dafür gesorgt wird, dass sich die verschiedenen Datenübertragungsaufgaben nicht gegenseitig beeinflussen
- der Zugriff einer Station auf das physikalische Medium muss also eindeutig sein
- zwei Stationen dürfen nicht in gleicher Weise auf dasselbe Medium zugreifen
- eine Unterscheidung kann im Zeitbereich (Time domain), Frequenzbereich (Frequency domain) oder Codebereich (Code domain) erfolgen

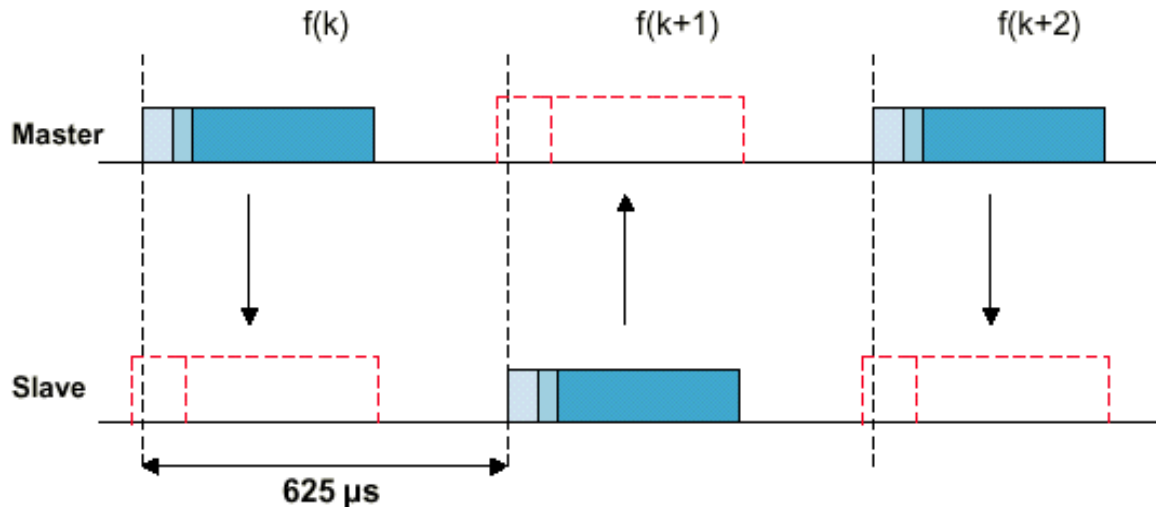
Zugriffsverfahren - Time Division Multiple Access, TDMA

- bei der Zeitbereichsunterteilung erfolgt der Zugriff auf das physikalische Medium zeitlich nacheinander (Multiplexverfahren)
- eine Station bekommt z.B. durch eine Basisstation einen Zeitschlitz zugewiesen, in dem es senden darf
- in den übrigen Zeiten ist kein Sendebetrieb möglich, dies macht es erforderlich, den Datenstrom in kleinere Einheiten, den sogenannten Datenpaketen oder Datentelegrammen zu unterteilen
- die Länge dieser Datenpakete muss hoch genug sein, um eine gute Nettoübertragungsrate (ohne Overhead zur Synchronisation und Steuerung) zu erzielen, und niedrig genug, um anderen Stationen ebenfalls die Möglichkeit zur Übertragung zu geben
- für jeden Zeitschlitz wird normalerweise die komplette zur Verfügung stehende Bandbreite verwendet

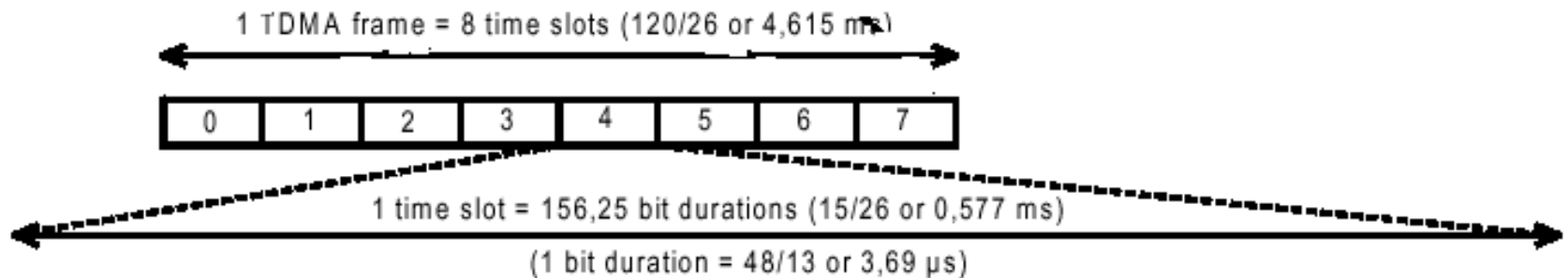
■ Unterteilung des Datenstroms in kleinere Einheiten



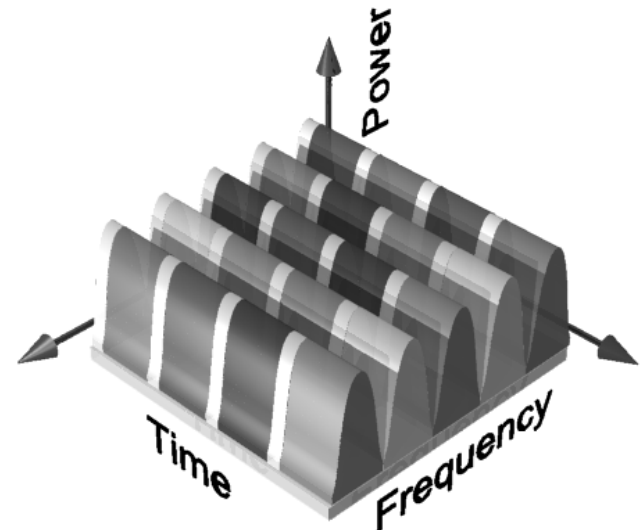
- ein Beispiel für eine Unterteilung der Übertragungskapazität in Zeitschlitz für den drahtlosen Fall ist das Bluetooth-System, bei dem eine Station die Funktion des „Masters“ übernimmt, alle anderen Stationen sind „Slaves“
- der Datenaustausch wird über den Master gesteuert, der nacheinander die Slave-Stationen zur Datenübertragung auffordert



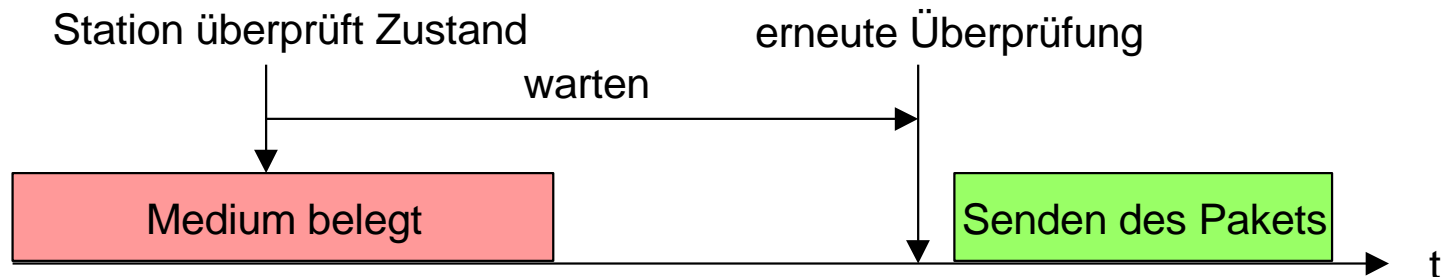
- beim Mobilfunksystem GSM geschieht die Übertragung nicht abwechselnd, sondern innerhalb eines Rahmens (Frame), in dem acht Zeitschlitz für einzelne Stationen zur Verfügung stehen



- zur Vermeidung von Übertragungsproblemen bei bestimmten Frequenzen wird bei GSM zusätzlich nach einem festgelegten Schema die Frequenz geändert (Frequency hopping)
- insofern wird hier TDMA mit FDMA vermischt



- bei den beiden genannten Beispielen ist die Steuerung der Zeitschlitz durch einen Master oder eine Basisstation notwendig
- gerade im Bereich von Netzwerken, bei denen Computer über eine gemeinsame Leitung oder Leitungssystem Daten austauschen, ist es wichtig, dass eine Kommunikation auch ohne eine solche Steuerung möglich ist
- jede Station in einem solchen System muß also in der Lage sein, zu erkennen, ob das Übertragungsmedium gerade nicht belegt ist
- in diesem Fall kann ein Senden eines Datenpaketes direkt erfolgen, andernfalls muss gewartet werden, bis das Medium frei ist
- ein solches Verfahren heißt „Carrier Sense Multiple Access“ CSMA

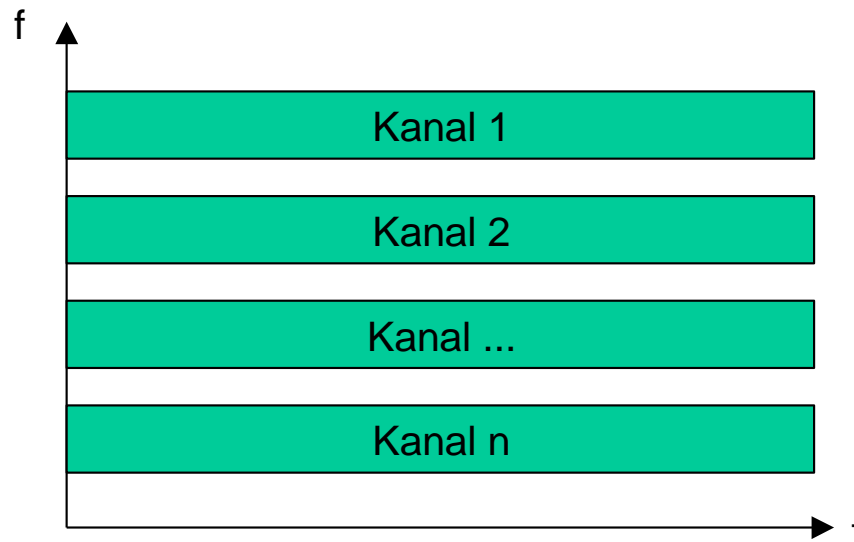


- je nach Gestaltung des Verfahrens kann das Medium ständig überprüft werden, bis es frei wird, um dann unmittelbar zu senden, oder es wird eine zufällige Zeit bis zur erneuten Überprüfung gewartet
- wenn zwei Stationen zeitgleich feststellen, dass das Medium frei ist, werden sie nahezu gleichzeitig senden, es tritt eine Kollision auf dem Medium auf
- aufgrund der Laufzeit auf einer elektrischen Leitung wird der Zustand „Leitung belegt“ erst verzögert erkannt, weshalb die Wahrscheinlichkeit solcher Kollisionen mit wachsender geometrischer Größe des Netzes steigt

- **daher werden entsprechende Netzwerkkarten so ausgelegt, dass sie Kollisionen erkennen können (Collision Detect, CD). Man spricht von CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Detect)**
- **die Strategie zum Zugriff auf das Medium im Falle von Kollisionen sieht beim Ethernet, das CSMA/CD verwendet, folgendermaßen aus:**
 - **wenn 1. Kollision erkannt wird: Warten (zufällige Zeit innerhalb eines vorgegebenen Zeitrasters) und erneuter Sendeversuch**
 - **jede wiederholte Kollision: zufällige Wartezeit wird verdoppelt, erneuter Sendeversuch**
 - **wenn Übertragung erfolgreich ist, wird wieder altes Zeitraster verwendet**

Zugriffsverfahren - Frequency Division Multiple Access, FDMA

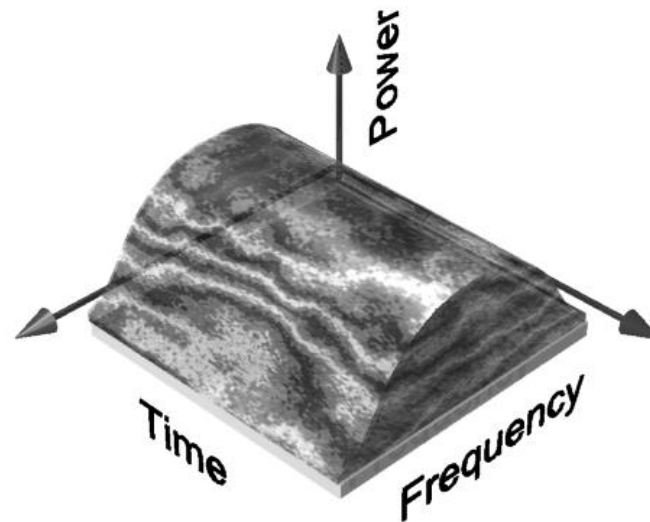
- neben der Einteilung im Zeitbereich ist die Einteilung im Frequenzbereich möglich
- dabei werden verschiedene Frequenzbereiche für die Datenübertragung definiert und den Stationen zugewiesen
- der Übertragungskanal steht einer Station normalerweise beliebig lange zur Verfügung



- **die Nutzung des Funkspektrums durch verschiedene Rundfunk- und Fernsehsender stellt letztlich ein solches FDMA-System dar, wenngleich hier die Aufteilung der einzelnen Kanäle eher historisch bedingt ist und statisch ist**
- **beim „Terrestrial Trunked Radio“-System TETRA, das für eine Neugestaltung von allgemeinen Funkaufgaben (Taxifunk, Flottenmanagement für Speditionen und andere Unternehmen, Betriebsfunk, TETRAPOL für Polizeifunk) definiert wurde, erfolgt die Zuweisung der einzelnen Kanäle dynamisch und variiert je nach Einsatzort**
- **allerdings ist TETRA eine Mischung aus FDMA und TDMA, denn jeder FDMA-Kanal wird noch zusätzlich in vier Zeitschlitzte für ein TDMA-Verfahren unterteilt**

Zugriffsverfahren - Code Division Multiple Access, CDMA

- bei der Bandspreiztechnik muss zur Regenerierung des übertragenen Signals der Bandspreizcode bekannt sein, mit einem anderen Code liefert der Demodulator allenfalls ein Rauschen
- genau diese beiden Eigenschaften lassen es zu, dass auf einem physikalischen Medium mehrere mit der Bandspreiztechnik modulierte Signale gleichzeitig in einem einzigen (breiten) Frequenzbereich übertragen
- Voraussetzung dafür ist, dass jedes Signal einen anderen Code verwendet, der so gestaltet sein muss, dass Ähnlichkeiten zwischen den Codes ausgeschlossen sind (orthogonale Codes)
- ein Empfänger kann durch Anwenden des richtigen Codes das an ihn gerichtete Datentelegramm aus dem „diffusen Signalnebel“ herausfischen.
- auf diese Art erscheinen Signale aus verschiedenen Quellen im Frequenz- und Zeitbereich verschmiert



- dies wird beispielsweise beim GPS angewandt
- sämtliche empfangbaren Satelliten (mindestens vier Satelliten sind zur dreidimensionalen Ortung notwendig) senden zur gleichen Zeit im selben Frequenzbereich
- der Empfänger kann durch Kenntnis der Codes die entsprechenden Signale extrahieren
- auch das Mobiltelefonsystem UMTS nutzt CDMA