

1.5 Grundlagen: Übertragung

Version: Jan. 2003

Inhalt

- Klassifizierung und Kenngrößen von Übertragungsmedien
- Kupferkabel, Koaxialkabel und Glasfaser
- Richtfunkstrecke und Satellitenstrecke
- Anschlusstechnik: Kupfer, Koaxialkabel, Glasfaser, Funk (Eigenschaften und Bitraten)
- Parallele vs. Serielle Übertragung, Basisband vs. Breitband Übertragung
- Bit- und Byteorientierte Übertragung
- Bit-, Byte- und Rahmen-Synchronisation
- Synchrone und asynchrone Übertragung
- Raum-, Frequenz-, Wellenlänge-, Zeit- und Codemultiplex
- Raum-, Frequenz-, Wellenlänge- und Zeitduplex
- Simplex-, Halbduplex- und Vollduplexübertragung
- Plesiochrone digitale Hierarchie (PDH)
- Synchrone digitale Hierarchie (SDH)
- Struktur von Übertragungsrahmen
- Taktrückgewinnung
- Synchronisation von Netzknoten

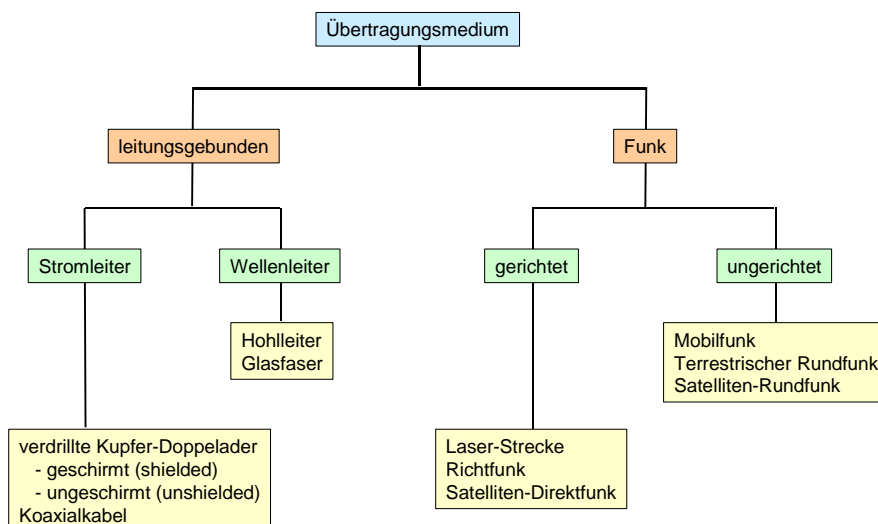


Bild: Klassifizierung von Übertragungsmedia

Übertragungsmedien

Für Datennetze können verschiedene Übertragungsmedien genutzt werden. Abhängig von den physikalischen Eigenschaften eines Mediums ergeben sich für die Anwendung verschiedene Vor- und Nachteile. In der Praxis werden bei leitungsgebundenen Übertragungsmedien für kurze Strecken (bis ca. 100 m) Kabel mit verdrehten Kupfer-Doppeladern und für längere Strecken Glasfaserkabel bevorzugt. Der zunehmende Einsatz von Funkübertragung (Freiraum-Übertragung) ist in vielen Anwendungen zu beobachten (drahtlose LANs, Bluetooth, drahtlose Netzzugänge).

Übertragungsmedien werden durch einige wichtige Kenngrößen beschrieben:

- **Bandbreite:** Bei höherer Bandbreite (in Hz, MHz) des Übertragungsmediums lässt sich eine höhere Datenrate (Bitrate, gemessen in bit/s, Mbit/s) erreichen. Der genaue Zusammenhang zwischen Bandbreite und Datenrate hängt wesentlich vom gewählten Codierungsverfahren ab.
- **Dämpfung:** Bei geringer Dämpfung lassen sich längere Distanzen überbrücken. Die Dämpfung ist sehr stark von der übertragenen Frequenz abhängig. Geringe Dämpfung ergibt auch ein höheres Signal-Rausch-Verhältnis, das zu einer niedrigeren Bitfehlerrate führt und/ oder den Einsatz einfacherer Empfänger erlaubt.
- **Laufzeit** (Signalausbreitungsgeschwindigkeit, propagation delay): Die Signalausbreitungsgeschwindigkeit liegt in der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit. Der genaue Wert ist vom Aufbau des Übertragungsmediums und von der Frequenz (Wellenlänge) abhängig.
- **Verzerrungen:** Digitale Signale werden als Impulse einer bestimmten Form (zeitlicher Verlauf der Spannung) gesendet. Infolge frequenzabhängiger Dämpfung und Laufzeit wird die Form der Impulse verzerrt. Die verzerrten Impulse überla-

gern sich zusätzlich. Damit eine fehlerfreie Signalrekonstruktion (Wiedererkennung des gesendeten Impulses) möglich ist, dürfen die Verzerrungen ein bestimmtes Maß nicht überschreiten.

- **Störungen:** Neben Rauschen, das aus physikalischen Gründen unvermeidlich ist, entstehen Störungen durch Reflexionen und eingekoppelte fremde Signale. Das Nebensprechen bei Kupferkabeln muss durch eine geeignete Auslegung der Übertragungsstrecken berücksichtigt werden. Einwirkungen durch systemfremde Störungen können zu einer erhöhten Bitfehlerrate oder zur zeitweisen Unterbrechung der Kommunikation führen. Derartige Probleme werden im Gebiet der EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit, EMC: Electromagnetic Compatibility) behandelt.
- **Verfügbarkeit:** Übertragungsstrecken können vorübergehend oder permanent ausfallen. Funkstrecken sind vom Zustand der Atmosphäre (Wetter) abhängig, was bei der Planung berücksichtigt werden muss. Ausfälle müssen durch das Netzmanagement erkannt und behandelt werden.

Vergleich von leitungsgebundenen Übertragungsmedien

Medium	verdrillte Kupferadern	Koaxialkabel, Basisband	Koaxialkabel, Breitband	Lichtwellenleiter
Merkmal				
Übertragungsart	analog, digital	digital	analog, digital	digital
Betriebsart	uni- / bidirektional	bidirektional	unichrektional	unidirektional
Datenrate	100 Mbit/s	bis 60 Mbit/s	bis 600 Mbit/s	bis 10 Gbit/s
Bitfehlerrate	10^{-5}	10^{-7} bis 10^{-8}	10^{-8} bis 10^{-9}	$< 10^{-11}$
Abhörsicherheit	gering	1)	1)	hoch
Stöempfindlichkeit	groß	2)	2)	sehr gering
Verlegbarkeit	sehr gut	gut	gut, erfordert Sorgfalt	schwierig
Kosten	gering	hoch	hoch	relativ hoch

1) gute Abschirmung möglich, Kabel jedoch leicht anzapfbar

2) durch elektromagnetische Felder möglich

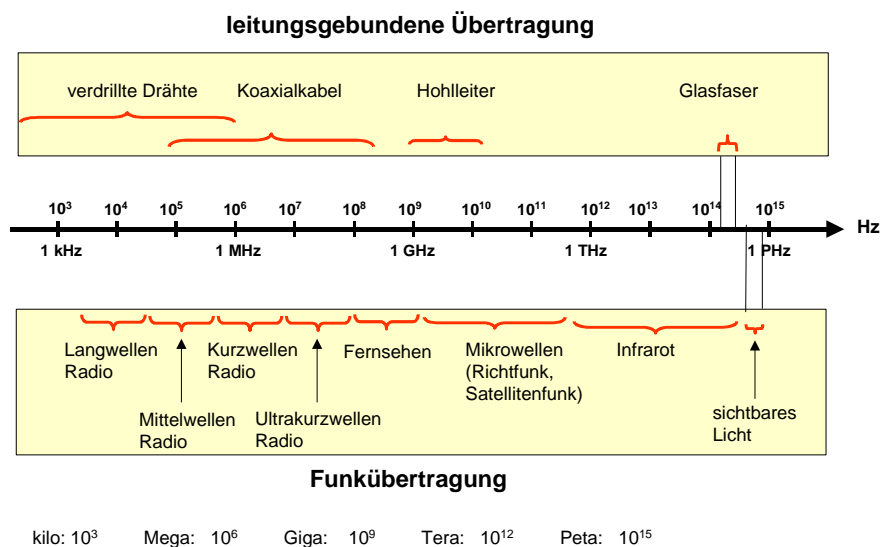
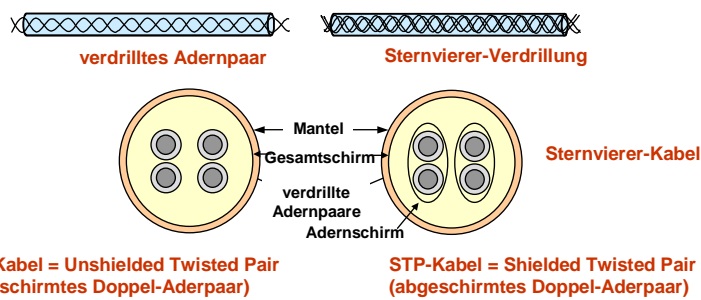


Bild: Elektromagnetisches Spektrum



UTP-Kabel = Unshielded Twisted Pair
(ungeschirmtes Doppel-Aderpaar)

STP-Kabel = Shielded Twisted Pair
(abgeschirmtes Doppel-Aderpaar)

Unsymmetrische elektrische Kabel (Koaxialkabel)

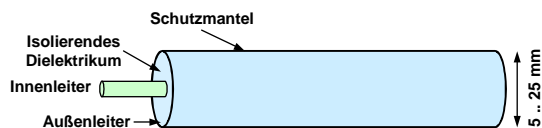


Bild: Elektrische Kabel

Metallische Leiter

Metallische Leiter werden in Form von verdrehten Kupfer-Doppeladern und von Koaxialkabeln eingesetzt. Mehrere Kupfer-Doppeladern fasst man in der Regel zu einem Kabel zusammen.

Kupferkabel sind aus mehreren **Doppeladern** aufgebaut. Bei Kabeln des Typs UTP (Unshielded Twisted Pair) und STP (Shielded Twisted Pair) ist jede Doppelader für sich verdreht, bei STP zusätzlich abgeschirmt. Das gesamte Kabel kann zusätzlich abgeschirmt sein, was durch die Bezeichnung **S/STP** bzw. **S/UTP** (das erste S steht für Screened) ausgedrückt wird. Für die Zwecke der strukturierten Verkabelung wurden in Normenwerken Kabelklassen definiert.

Zusätzlich zu den allgemein gültigen Kenngrößen sind hier weitere Größen von Bedeutung:

- **Wellenwiderstand:** Der Wellenwiderstand Z eines Kabels ist eine charakteristische Größe, die durch Geometrie und Material des Kabelaufbaus bestimmt wird. Ein Kabel muss beidseitig mit seinem Wellenwiderstand abgeschlossen sein, damit keine Reflexionen entstehen, die die Datenübertragung stören bzw. verhindern würden.
- **Nahnebensprechen** (NEXT: Near End Crosstalk): Dieses entsteht durch elektromagnetische Kopplungen zwischen Adernpaaren in einem Kabel. Das Nahnebensprechen ist besonders störend, da ein Empfänger beim Empfang eines schwachen Signals zusätzlich das (relativ starke) Nebensprechen eines benachbarten Senders empfängt. Gemessen in dB.
- **Fernebensprechen** (FEXT: Far End Crosstalk, auch FECT): Nebensprechen, das von einem Sender am entfernten Ende der Übertragungsstrecke eingekoppelt wird. FEXT ist in der Regel schwach gegenüber NEXT.
- **Verhältnis von Dämpfung zu Übersprechen** (ACR: Attenuation Crosstalk Ratio): ACR wird berechnet als Differenz zwischen NEXT und der Dämpfung a , die beide in dB gemessen werden. Ein höherer Wert von ACR bedeutet, dass das Nahnebensprechen gegenüber dem empfangenen Nutzsignal schwächer wird und somit die Übertragungssicherheit steigt.

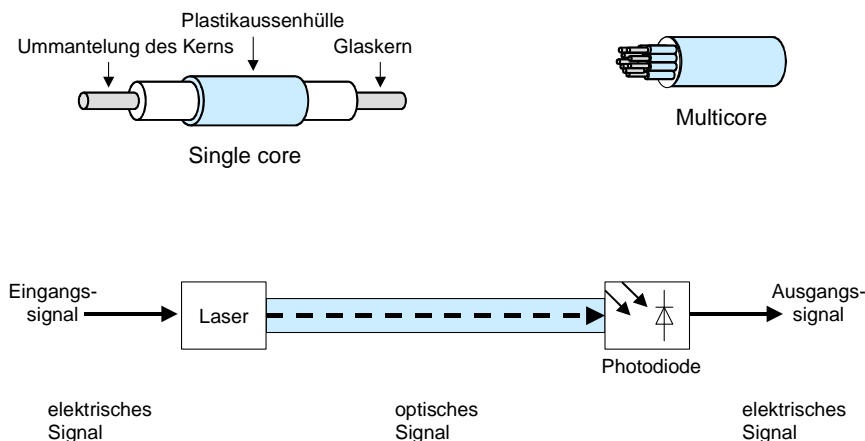


Bild: Glasfaser und optische Übertragung

Als Werkstoffe können Glas oder Kunststoff verwendet werden. Für Anwendungen in der Kommunikationstechnik wird Glas bevorzugt. Es bietet eine geringere Dämpfung als Kunststoff, ist jedoch teurer.

Elektrische Signale werden durch elektrooptische Sender (LED Light Emitting Diode oder Laserdiode) in optische Signale gewandelt. Nach der Übertragung auf der Glasfaser findet beim Empfänger eine Optoelektronische Wandlung (Fotodiode) statt.

Glasfaser (Optische Wellenleiter, optische Faser, optical fiber) dienen zum Transport von Lichtstrahlen, die mit den zu übertragenden Daten moduliert sind. Eine Faser besteht aus einem Kern (core) und einem Mantel (cladding). Der Brechungsindex des Mantels ist niedriger als der des Kerns. Dadurch wird Licht, das in den Kern eingestrahlt wird, durch Totalreflexion am Übergang Kern-zu-Mantel im Kern gehalten und breitet sich zickzackförmig im Kern aus. Die Faser wird durch eine weitere Hülle mechanisch geschützt.

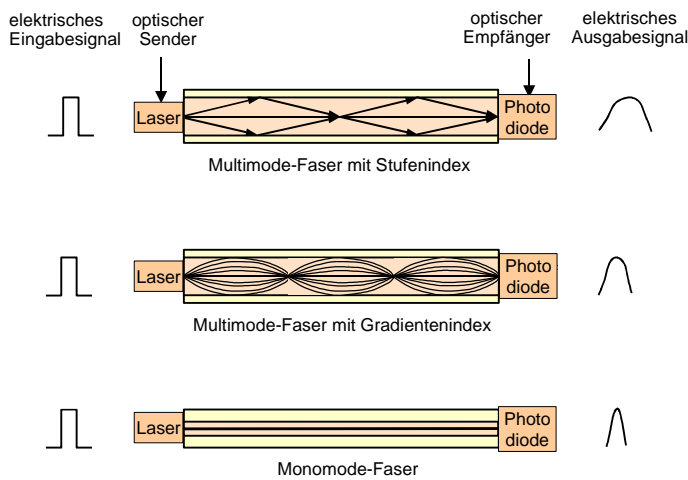


Bild: Glasfaser-Typen

Multimode-Faser: In der Faser können sich mehrere Moden ausbreiten. Die Pfadlängen und damit die Laufzeiten sind dabei unterschiedlich. Diese so genannte Modendispersion führt zur Verzerrung der gesendeten Lichtimpulse und begrenzt dadurch das Bandbreite-Länge-Produkt (Produkt aus Übertragungsdistanz und nutzbarer Bandbreite). Multimode-Fasern können als Stufenindex-Faser oder als Gradientenindex-Faser realisiert werden. Mit der Stufenindex-Faser wird ein Bandbreite-Länge-Produkt der Größenordnung 10 (Mbit/s) x km erreicht, bei der Gradientenindex-Faser sind es ca. 4 (Gbit/s) x km.

Monomode-Faser: Durch die Verwendung eines sehr kleinen Kerndurchmessers (wenige μm) kann erreicht werden, dass nur ein Mode existieren kann. Dadurch entfällt die Modendispersion. Es zeigt sich aber, dass nun die Materialdispersion eine Grenze darstellt. Mit einem Bandbreite-Länge-Produkt der Größenordnung 250 (Gbit/s) - km liegt dieses jedoch um Größenordnungen höher als bei Multimode-Fasern.

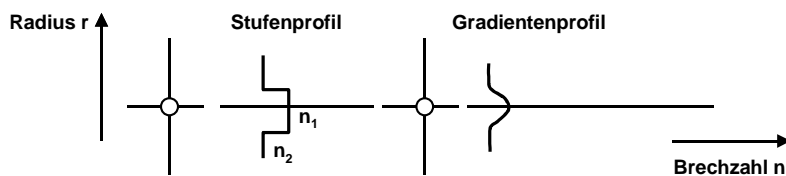
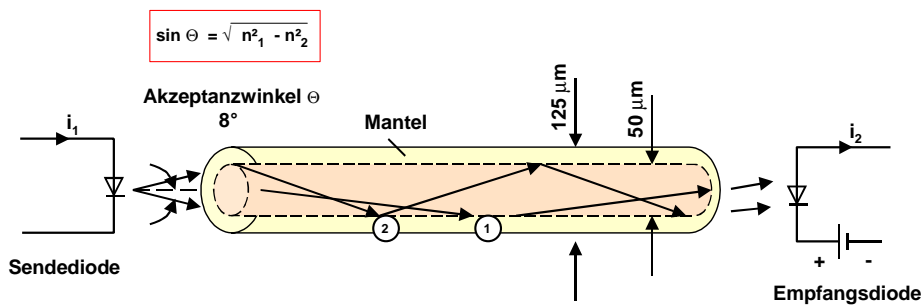


Bild: Multimode Glasfaser

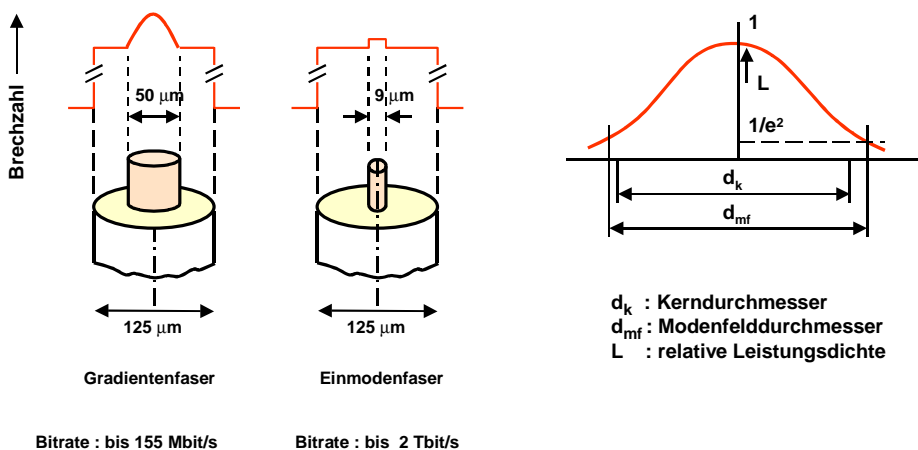


Bild: Singlemode Glasfaser

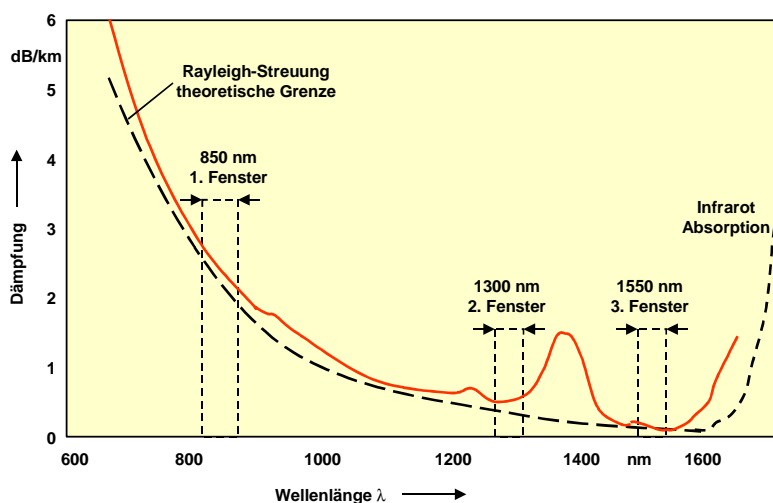
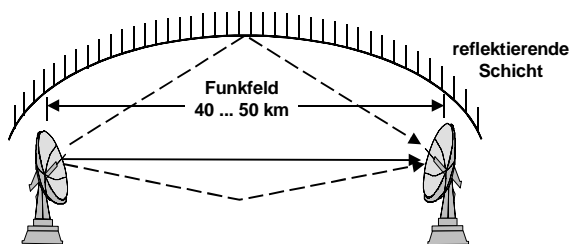


Bild: Dämpfungsverlauf von Glasfasern

Die genutzten optischen Wellenlängen ergeben sich aus dem typischen Verlauf der Dämpfung in Abhängigkeit von der Wellenlänge:

- Ein **erstes optisches Fenster** findet man bei einer Wellenlänge um 850 nm. Die erreichbare Dämpfung liegt bei 2 dB/km.
Grund: billige optische LED-Komponenten.
- Bei einer Wellenlänge von 1,3 μm gibt es ein **zweites optisches Fenster** mit geringerer Dämpfung mit 0,35 dB/km.
Grund: Dispersionsminimum.
- Bei 1,55 μm existiert ein **drittes optisches Fenster** mit 0,2 dB/km.
Grund: Minimale Dämpfung.

Bei 850 nm Wellenlänge werden Multimode-Fasern zusammen mit **LEDs** als Sender verwendet. Die erreichbaren Distanzen sind entsprechend gering. Bei 1,3 μm und 1,55 μm kommen Monomode-Fasern mit (den gegenüber LED wesentlich teureren) **Laserdioden** zum Einsatz. WDM (Wavelength Division Multiplexing) wird bei Glasfasern eingesetzt, um mehrere Datenströme über eine Faser zu übertragen.



Funkübertragung mit ungerichteter Ausbreitung

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im freien Raum ermöglicht eine leitungsungebundene Informationsübertragung. Bei relativ niedrigen Frequenzen strahlt eine Antenne isotrop, d. h. gleichmäßig in alle Richtungen. Damit kann ein Sender auf einer bestimmten Frequenz alle Empfänger erreichen, die auf derselben Frequenz empfangen und deren Distanz zum Sender hinreichend klein ist.

- Einsatz von Relais-Stationen für Strecken > 50 km

- Einsatzschwerpunkt: 2 GHz - 8 GHz

Bild: Richtfunkstrecke

Diese Broadcast-Eigenschaft hat den Nachteil, dass auf einer Frequenz nur ein Sender zu einem Zeitpunkt senden darf. Eine Halbduplex-Verbindung zwischen zwei Kommunikationspartnern ist so ebenfalls möglich. Falls eine Vollduplex-Verbindung erforderlich ist, werden zwei Frequenzen benötigt. Bei der Funkübertragung sind Frequenzen immer knapp. Ein Ausweg ist die Bildung von Funkzellen durch geringe Sendeleistungen und eine Basisstation pro Funkzelle. Damit wird eine Wiederverwendung von Frequenzen möglich. Bei sorgfältiger Planung kann die Ebene durch Funkzellen mit nur sieben verschiedenen Frequenzen überdeckt werden.

Funkübertragung mit gerichteter Ausbreitung

Elektromagnetische Wellen können mit geeigneten Antennen gerichtet abgestrahlt und empfangen werden. Dazu muss die Antennenstruktur größer sein als die verwendete Wellenlänge. Insbesondere für Mikrowellen (Frequenzen von ca. 1 GHz bis ca. 20 GHz, entsprechende Wellenlängen von 30 cm bis ca. 1 cm) ist die Abstrahlung mit sehr kleinen Öffnungswinkeln machbar. Entsprechende Punkt-zu-Punkt-Verbindungen werden im terrestrischen (erdgebundenen) Richtfunk und bei der Satellitenübertragung (extraterrestrischer Richtfunk eingesetzt. Trotz relativ geringer Sendeleistung können erhebliche Distanzen überbrückt werden. Dabei ist eine Bandbreite verfügbar, die auch eine rasche Übertragung digitaler Daten zulässt.

Simplex- und Duplex-Übertragungsverfahren

Bei einem Übertragungssystem lassen sich hinsichtlich der Gleichzeitigkeit der Übertragung mehrere Betriebsarten unterscheiden:

- Simplexbetrieb
- Halbduplexbetrieb
- Duplex- bzw. Vollduplexbetrieb

Bei der **Simplexübertragung** werden Nachrichten nur in einer Richtung gesendet. Die Übermittlung mehrerer Nachrichten kann zeitlich überlappend erfolgen. Beim **Halbduplex-Betrieb** ist eine Übertragung in beiden Richtungen möglich, allerdings nicht gleichzeitig, sondern wahlweise in Hin- oder Rückrichtung, z. B. alternierend, nach dem Prinzip der Wechsel-sprechanlage. Im Unterschied zum **Vollduplexbetrieb** vereinfacht sich insbesondere bei Zweidrahtsystemen das Übertragungs-system erheblich, da eine Störung des Empfangskanals, z. B. durch Echos eigener Sendesignale, nicht auftreten kann. Der Halbduplexbetrieb bedeutet eine Einschränkung der Kommunikationsfähigkeit.

Für einen uneingeschränkten bidirektionalen Betrieb wird ein Kanal im Vollduplex betrieben. Dabei kann gleichzeitig gesendet und empfangen werden. Um bei der Übertragung über Zweidrahtleitungen Störungen der Empfangssignale zu minimieren, können z. B. Echokompensationsverfahren verwendet werden.

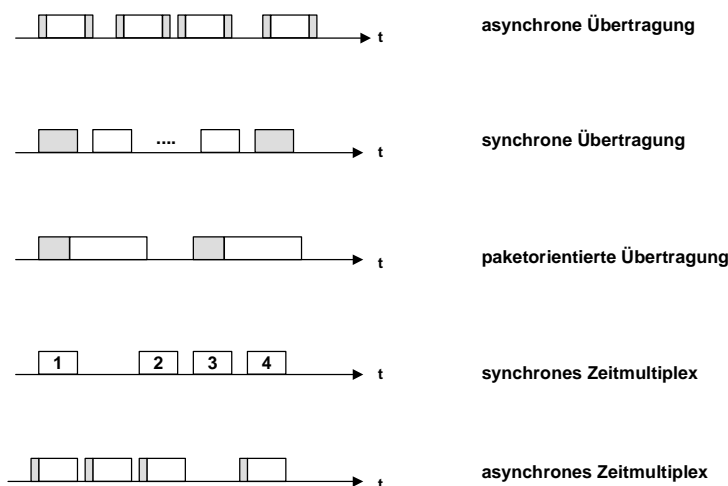


Bild: Übertragungsverfahren

Taktsynchrone Übertragung

Bei der synchronen Übertragung arbeiten Sender und Empfänger taktsynchron. Diese Synchronität kann entweder durch Mitführen des sendeseitigen Taktsignals in einer eigenen Taktleitung oder durch Taktrückgewinnung aus dem Empfangssignal erreicht werden.

In Kommunikationsnetzen wird aus technischen Gründen (zu große Entfernung, unterschiedliche Laufzeit auf Takt- und Datenleitung) und aus Kostengründen meist die zweite Methode angewandt. Dazu ist auf der Empfangsseite eine Taktrückgewinnungseinrichtung erforderlich, z.B. auf der Basis eines Phasenregelkreises (Phase Lock Loop). Das empfangene Signal wird mit dem rückgewonnenen Taktsignal abgetastet.

Wenn die Taktsignale von Sender und Empfänger nominell gleich sind und nur eine geringe zeitliche Schwankung aufweisen, kann die Anpassung der beiden Bitraten durch Stopfen erreicht werden.

Synchronisation bei bitserieller Übertragung

• Asynchrone Übertragung

- Übertragung eines Datenblocks kann zu jedem Zeitpunkt erfolgen
- Anfang und Ende müssen vom Sender speziell markiert werden
 - Start/Stop-Verfahren
 - Präambel mit 0/1-Folge
- Sender und Empfängertakt können voneinander abweichen dadurch beschränkte Datenrate und Rahmengröße

• Synchrone Übertragung

- Übertragung der Daten nur zu festen Zeitpunkten
- Permanente Synchronisation auch wenn keine Nutzdaten gesendet werden
 - gemeinsames Taktsignal
 - Leitungs-codes mit Bittaktrückgewinnung (eventuell mit Verwürfeln (Scrambling) der Daten)

Bild: Bitsynchronisation

Asynchrone Übertragung

Sehr häufig verwenden Sender und Empfänger Taktsignale, die voneinander unabhängig sind. Wenn die Asynchronität bestimmte Grenzen nicht überschreitet, kann mit dem Verfahren der empfangsseitigen Überabtastung das übertragene Signal fehlerfrei detektiert werden. Für die weitverbreitete asynchrone Übertragung von Zeichen im ASCII, hier mit 7 Schritten, davon 1 Start- und 1 Stop-Bit). Jedes Zeichen Z_i wird in nahezu beliebigem Abstand zum vorhergehenden gesendet (zeichenasynchron), d.h., der zeitliche Abstand zwischen zwei Zeichen Z_i und Z_{i+1} ist fast beliebig groß. Innerhalb des Zeichens ist der Schritttakt näherungsweise konstant.

Empfangsseitig steht ein unabhängiges Taktsignal zur Verfügung, dessen Rate das m-fache des Nennwerts des Takts beträgt, mit dem die empfangenen Zeichen gesendet wurden. Ein typischer Wert von m ist 16. Mit Hilfe dieses hochratigen Empfangstakts wird das ankommende Signal jeweils möglichst in der Mitte eines Bitschritts abgetastet, also dort, wo das sogenannte Auge des Empfangssignals in der Regel am weitesten geöffnet ist.

Zeichen- bzw. Symbolsynchronisierung

Bei einer Asynchronität hinsichtlich des Zeichenflusses (oder Symbolflusses) ist eine Synchronisierung des Empfängers auf Zeichen bzw. Symbolgrenzen erforderlich, damit diese richtig erkannt werden.

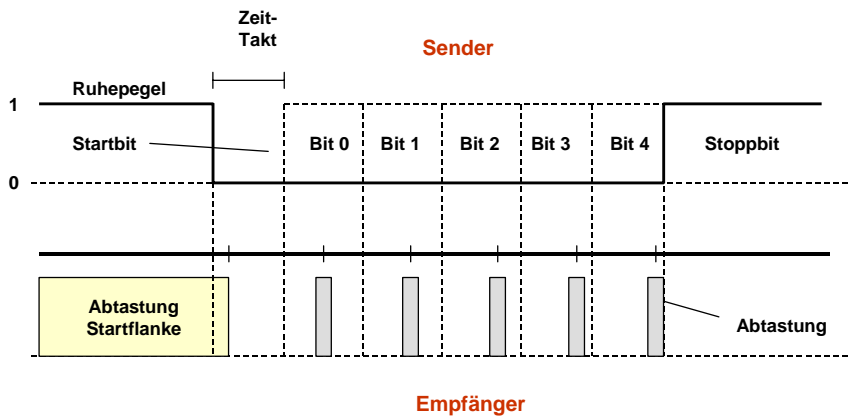


Bild: Asynchrone Übertragung

Synchronisierung des Empfängers auf Zeichen bzw. Symbolgrenzen.

Dies kann wie folgt erfolgen:

- durch Start-Stop-Bits;
- durch Erkennung bestimmter eindeutiger Bitfolgen (Kennungen, Flags);
- durch periodisches Übertragen spezieller Sync-Symbole;
- durch Korrelation, z. B. mittels mitgeführter CRC-Prüfzeichen;
- durch spezielle Codierungen (z.B. definierte Codeverletzungen).

Der Ausfall der Synchronität muss möglichst schnell erkannt werden. Daher ist im synchronisierten Zustand eine fortlaufende Prüfung des Synchronzustands und - im Falle des Außertrittfallens - ein schneller Übergang in den Zustand Wiedersynchronisieren erforderlich.

Speicherung oder Pufferung in Bytes (8 Bits) oder Worte (16, 32, 64 Bits)

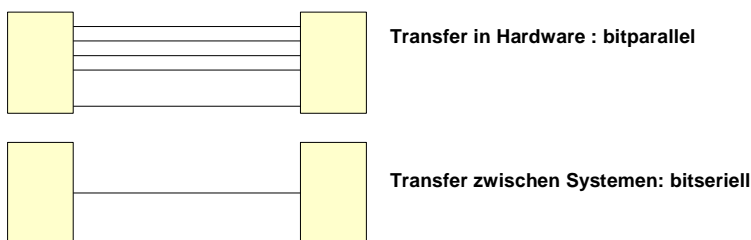


Bild: Informationsdarstellung und -transfer

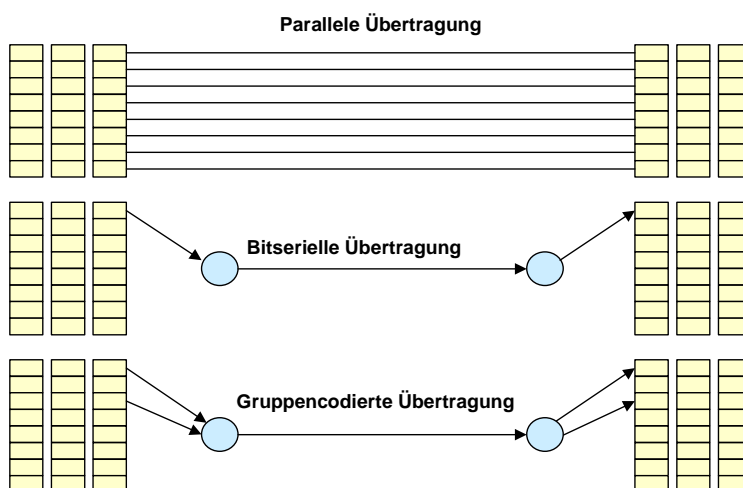


Bild: Übertragungsweisen

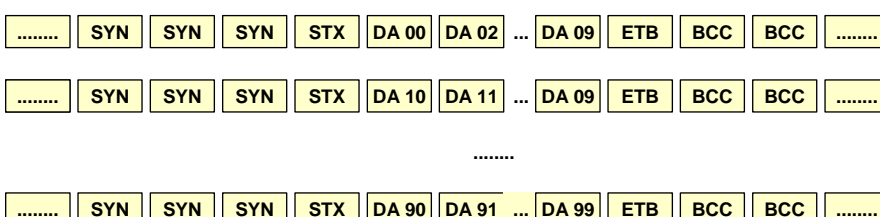
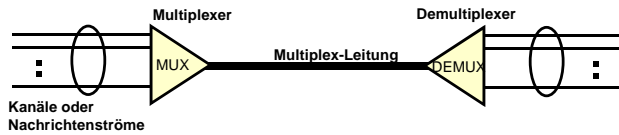
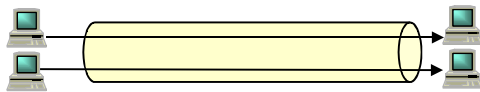


Bild: Übertragungsblöcke



- Raummultiplex
- Frequenzmultiplex
- Wellenlängenmultiplex
- Zeitmultiplex
- Codemultiplex

Aufspaltung der gesamten Übertragungskapazität eines Übertragungsweges auf verschiedene Sender-Empfänger-Paare

Bündelung/Multiplexen = Zusammenfassung von Übertragungskanälen auf einem Übertragungsweg

Bild: Multiplexverfahren



Mehrere Kupfer-Aderpaare oder Glasfaser in einer Kabel

Bild: Raummultiplex (Space Division Multiplex)

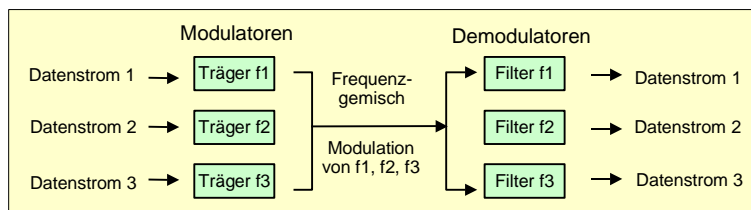
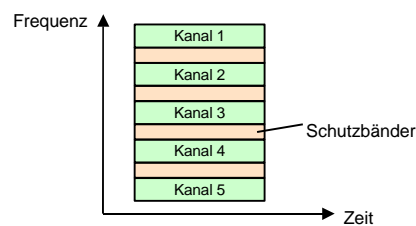


Bild: Frequenzmultiplex (Frequency Division Multiplex)

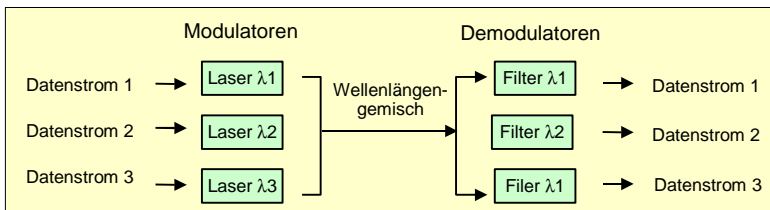
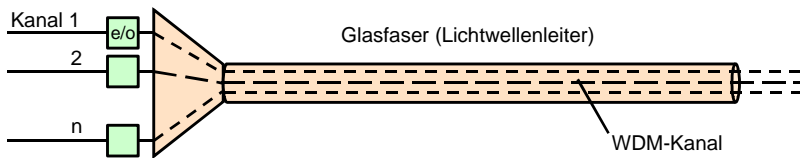


Bild: Wellenlängenmultiplex (Wavelength Division Multiplex)

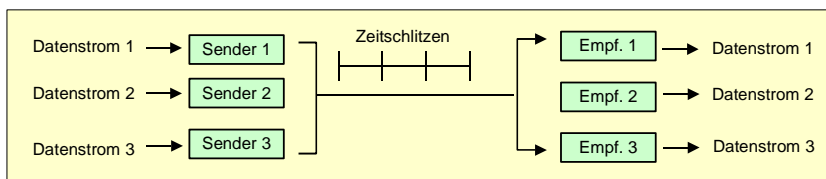
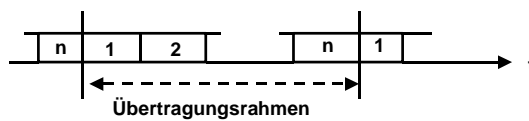


Bild: Zeitmultiplex (Time Division Multiplex)

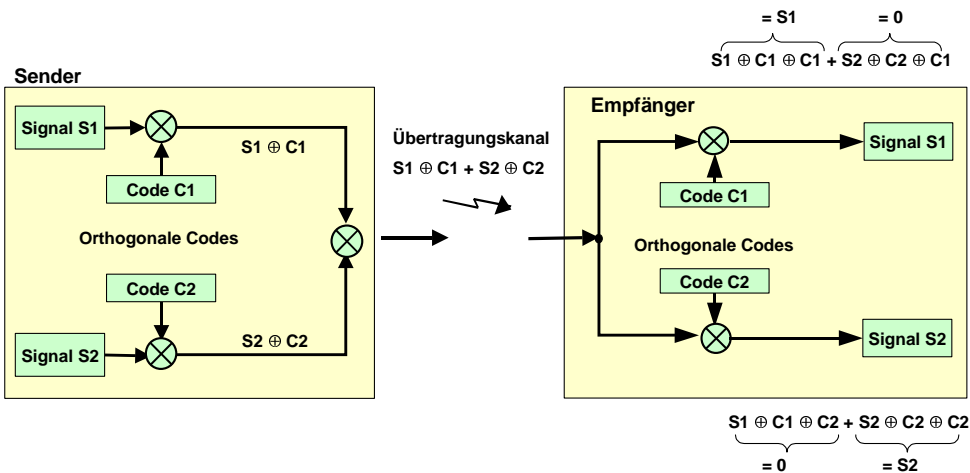


Bild: Codemultiplex (Code Division Multiplex)

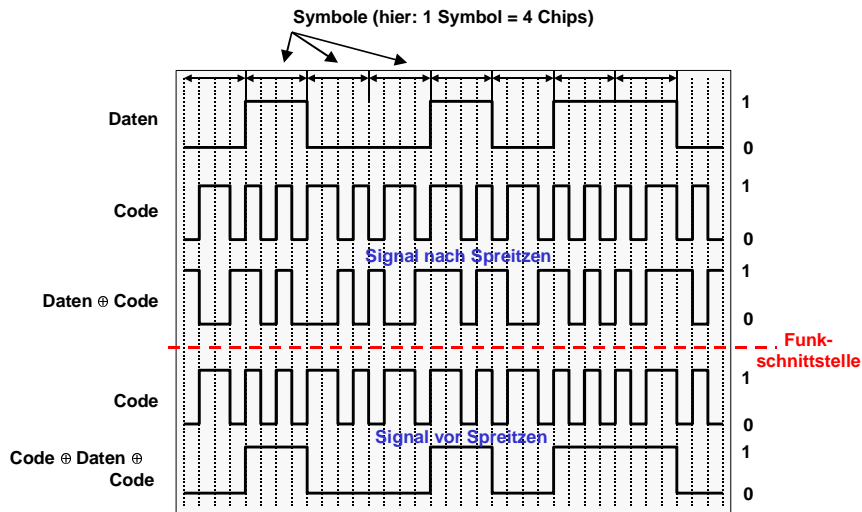


Bild: Bit – Chip – Symbol

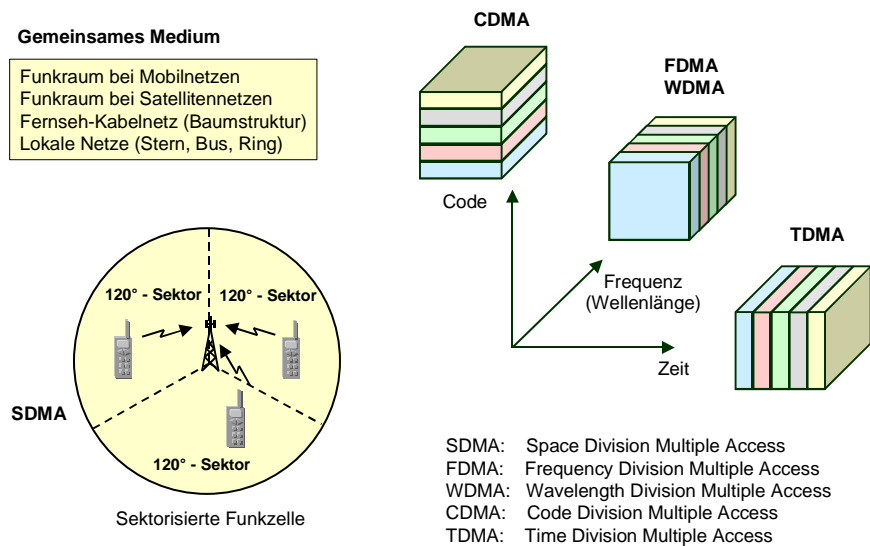
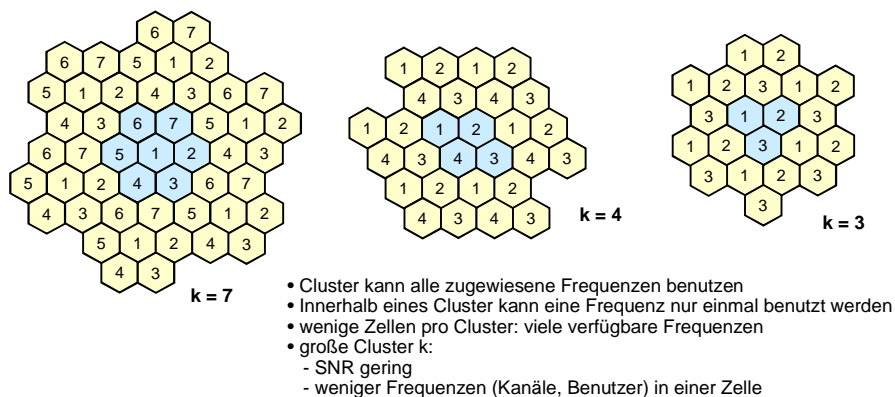


Bild: Mehrfachzugriff auf gemeinsames Medium



Clustergröße $k = i^2 + i \cdot j + j^2$ $i, j = 0, 1, 2, 3, \dots$ $i \geq j$

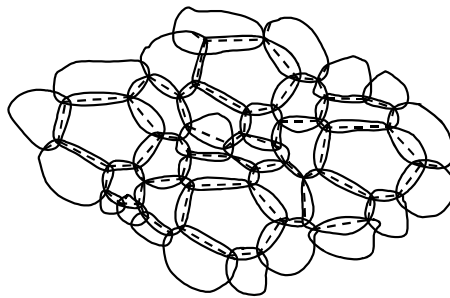
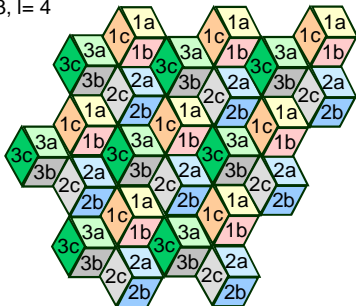
Nächste Zelle mit gleicher Frequenz:
 i Zellen in einer Richtung, danach Drehung um 60°
 gegen den Uhrzeigersinn und j Zellen in gleicher Richtung

i	1	1	2	2	3	2	3	4
j	0	1	0	1	0	2	1	0
k	1	3	4	7	9	12	13	16

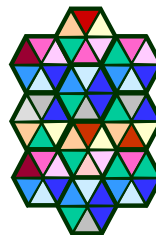
Bild: Zellorganisation in GSM-Netzen

Zellen ungleich und teilüberlappend

$k = 3, l = 4$



$k = 2, l = 8$



Sektorisierte Zellen

- Gerichtete Antennen haben sektorisierte Abstrahlung
- dadurch geringere Interferenzen mit Nachbarzellen

Bild: Zellstrukturen

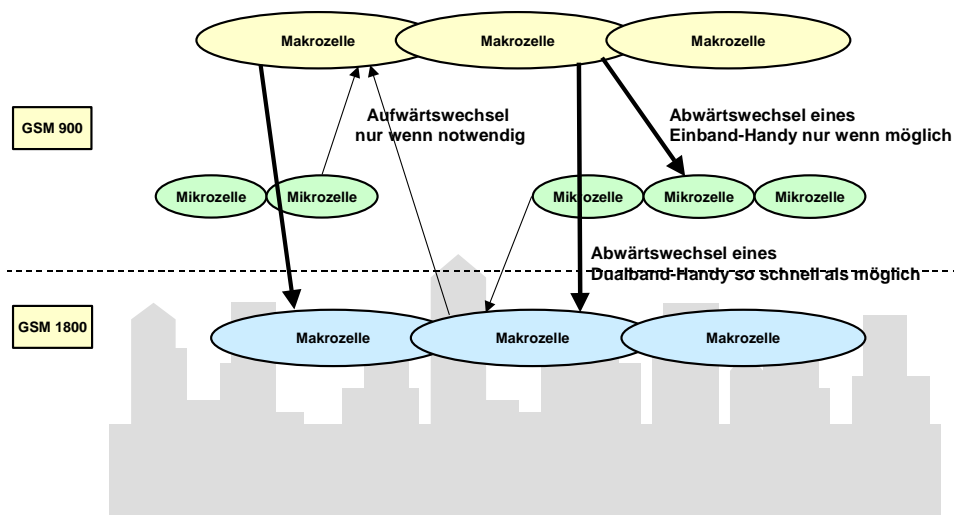
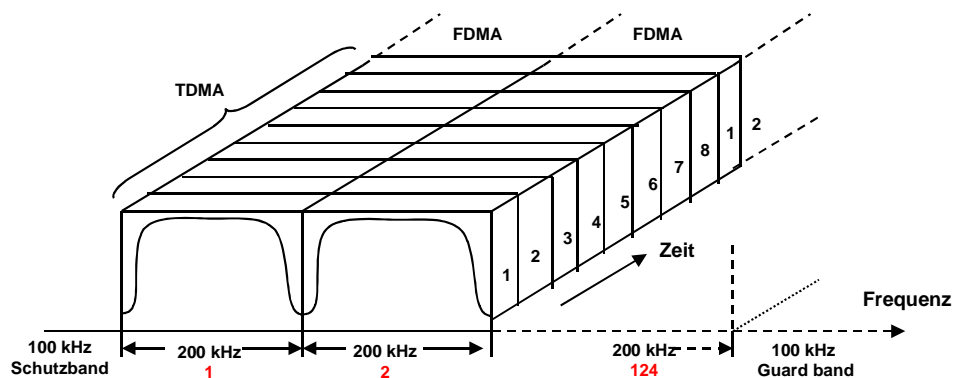


Bild: Hierarchische Zellstruktur



FDMA: 124 Trägerfrequenzen im 900 MHz Frequenzband
TDMA: 8 Zeitschlitz pro Träger

GSM 900	124 Kanäle
GSM 1800	374 Kanäle
GSM 1900 (USA)	299 Kanäle

Bild: Kombierter TDMA und FDMA bei GSM

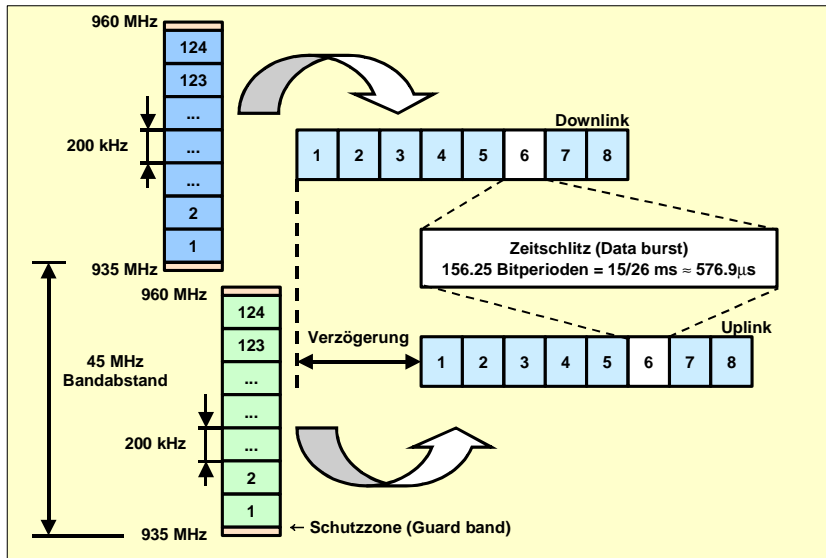


Bild: GSM: Trägerfrequenzen und TDMA-Rahmen

Bild: DECT: Digital Enhanced Cordless Telephone

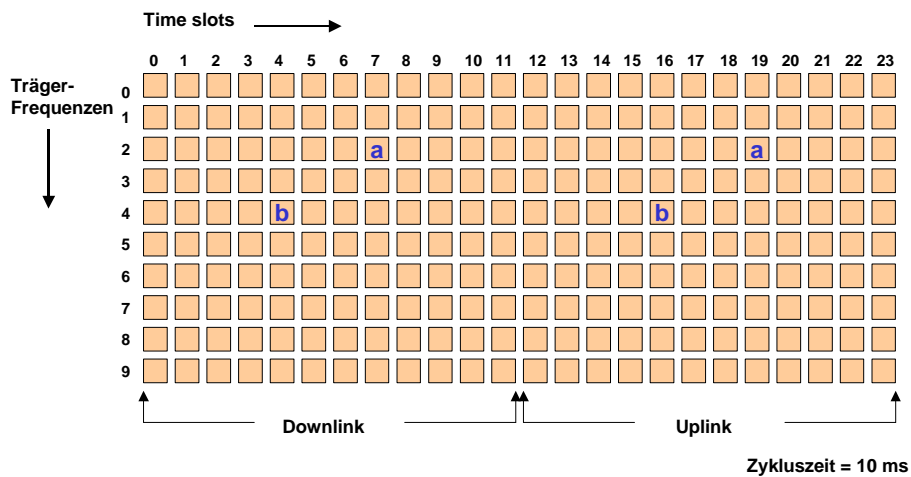
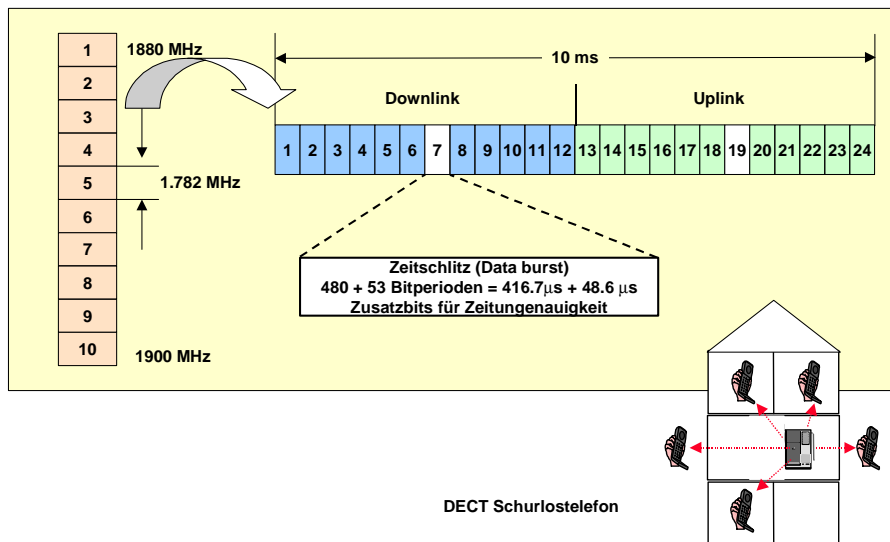
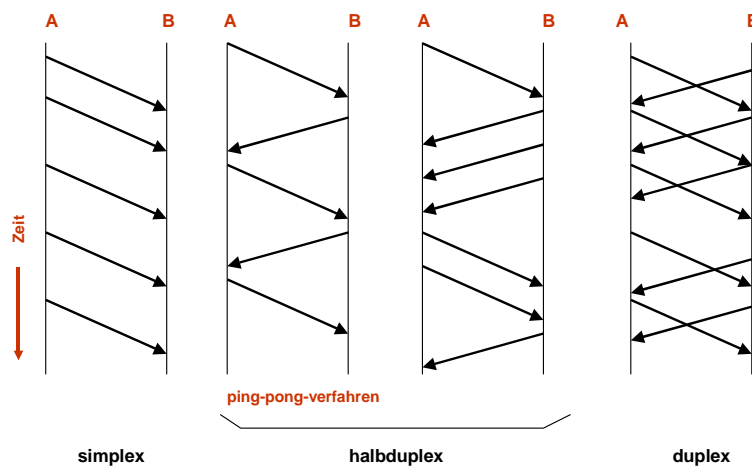
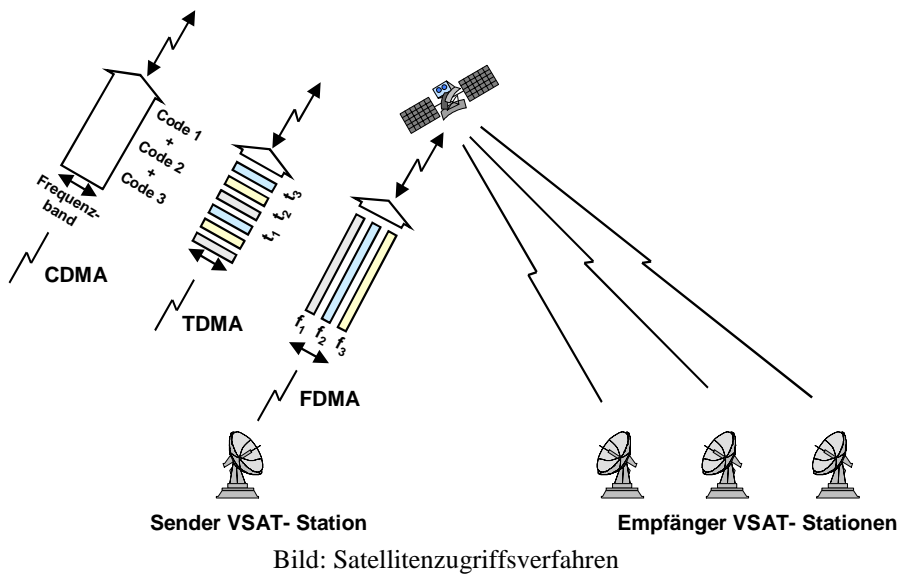


Bild: Frequenz-Zeit-Bereich bei DECT

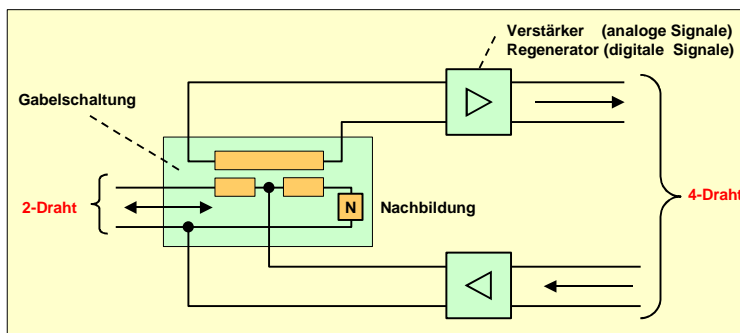
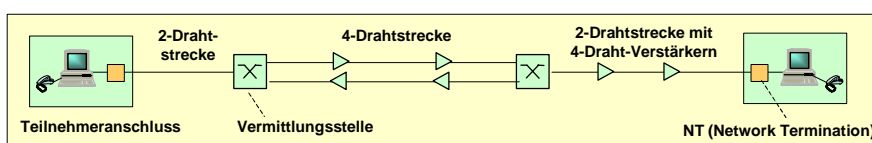


- Raumduplex
- Frequenzduplex
- Wellenlängenduplex
- Zeitduplex
- Codeduplex

- Leitungen
- Mobilfunk
- Satellitenfunk

Bild: Duplex-Verfahren

Bild: Betriebsarten der Übertragung



Trennung der Übertragungsrichtungen durch einen Gabelschaltung

Bild: 2-Draht und 4-Draht-Übertragungsstrecken

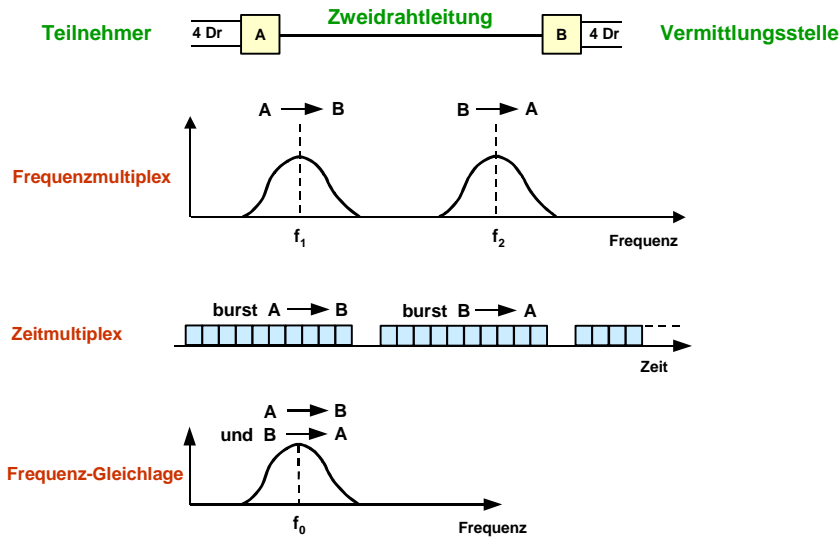


Bild: Vollduplexverkehr auf Zweidrahtleitungen

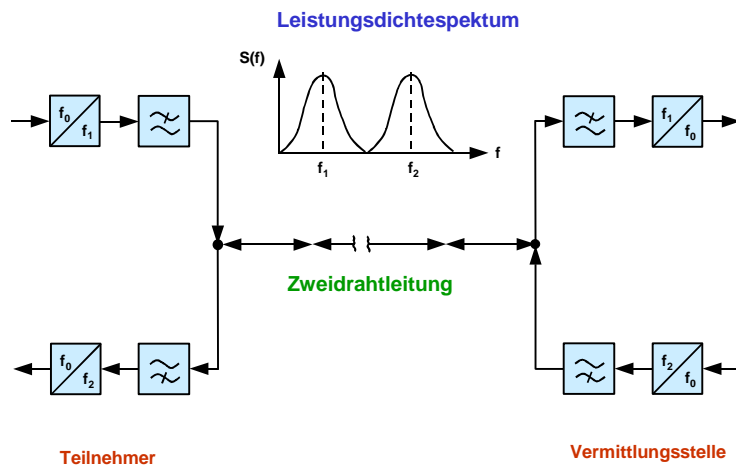


Bild: Zweidraht-Frequenzmultiplex

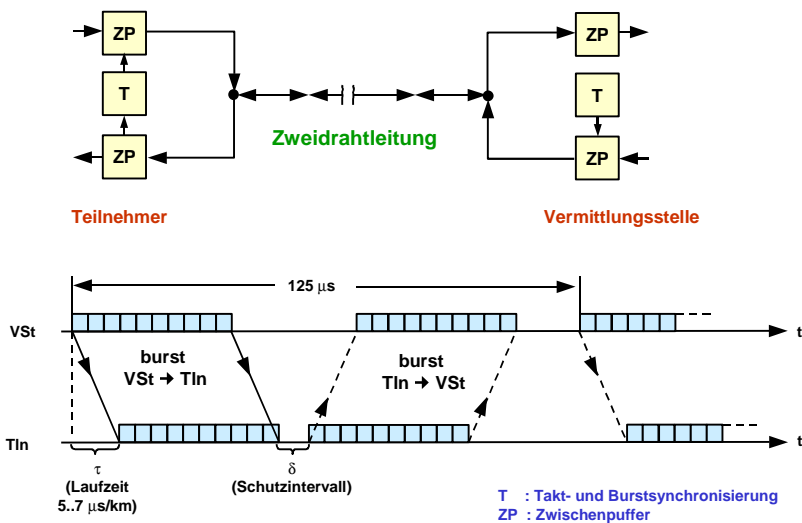


Bild: Zweidraht-Zeitmultiplex

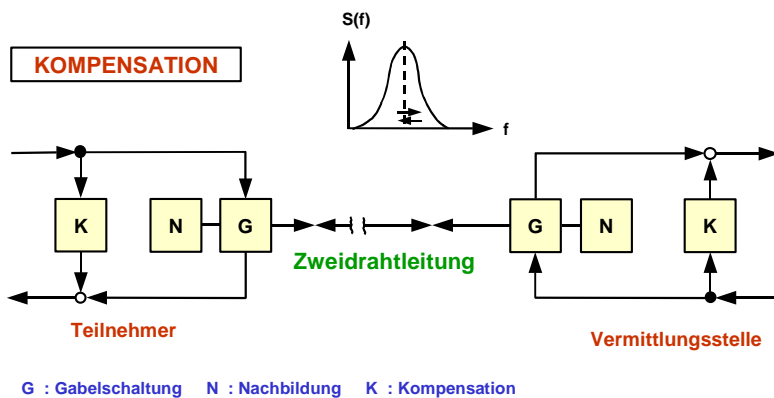


Bild: Bild: Zweidraht-Frequenz-Gleichlage

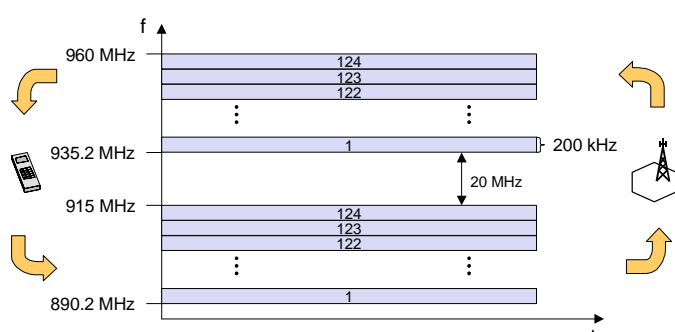


Bild: FDD/FDMA bei GSM

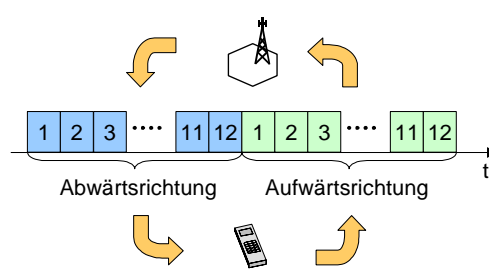


Bild: TDD/TDM bei DECT