

Internet Protokolle II

Thomas Fuhrmann



Self-Organizing Systems Group
Computer Science Department
Technical University Munich

Overview over the Term

This lecture continues „Internet Protocols I“ from the winter term.

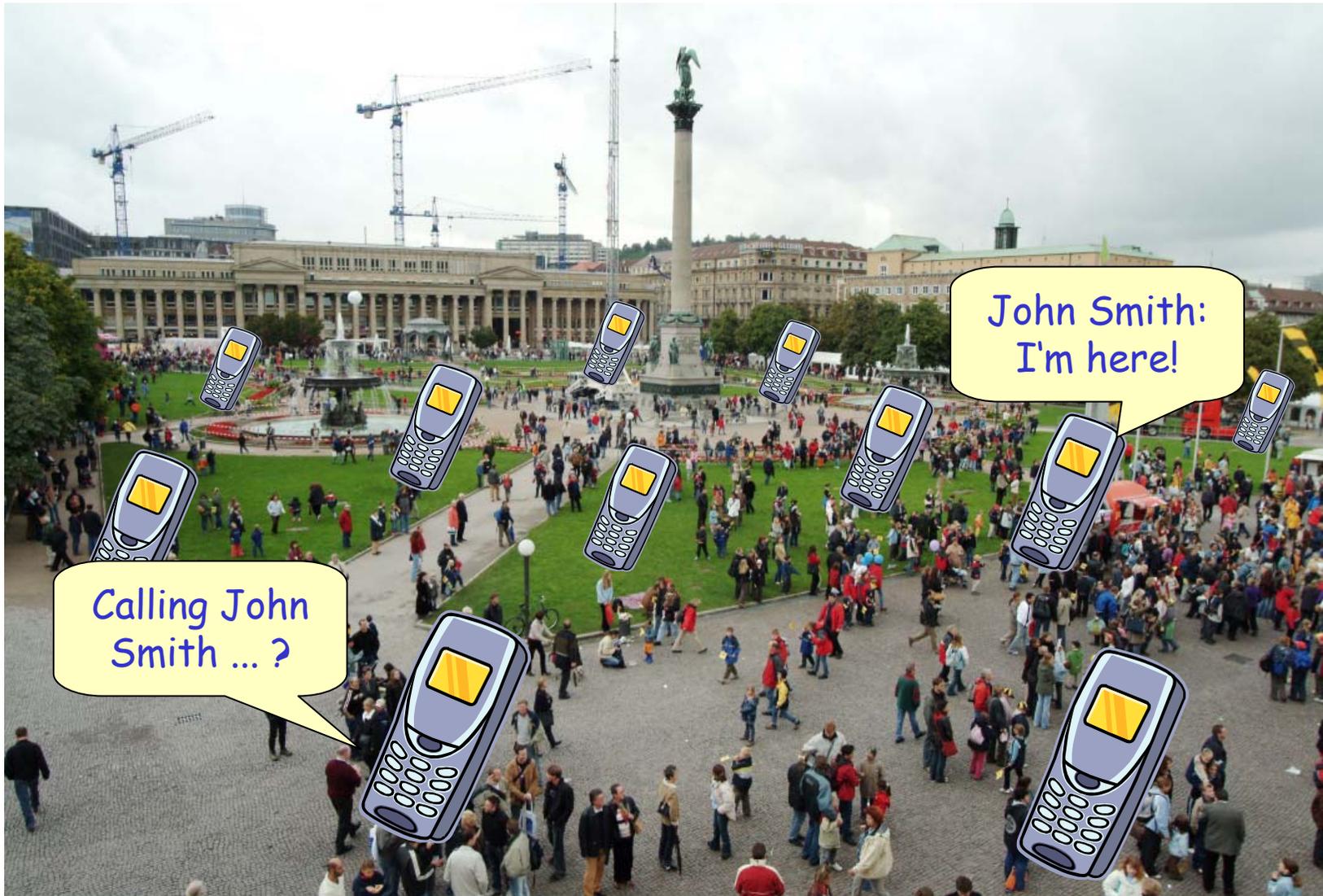
It focuses on two main areas:

1. Mobile and ad hoc networking. Ad hoc routing protocols, mesh networks, and an introduction to sensor networks (“The Internet of things”).
2. Peer-to-peer applications, overlay networks, and decentralized services.

Both areas have a lot in common:

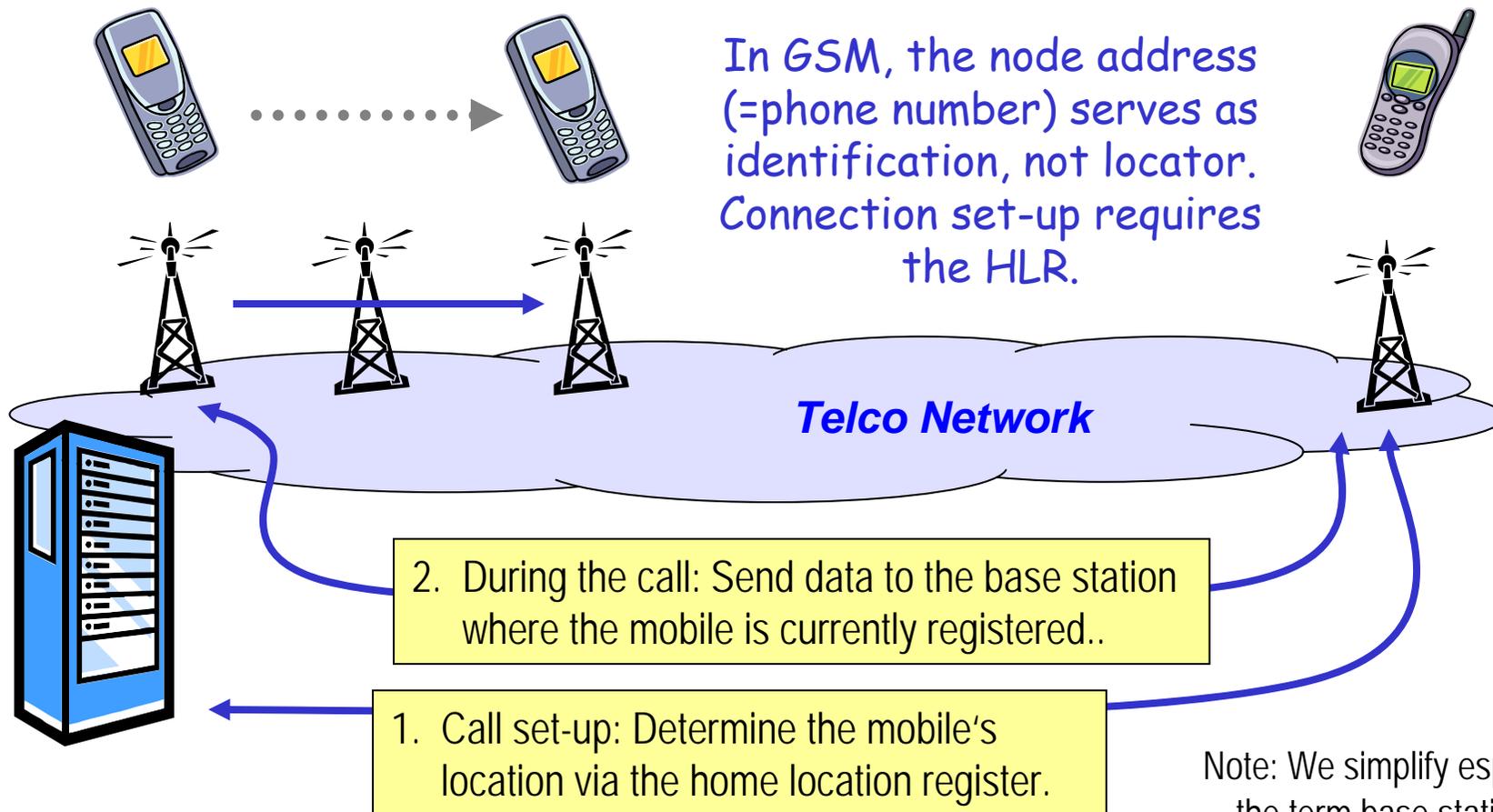
Nodes have to organize themselves, because no one will take care of the individual nodes.

Ad Hoc Networks



Compare it to GSM ...

3. Hand over: When the mobile moves, the base station forwards the data to the new location.



Self-organization is great:

- No single point of failure → extremely robust
- Nodes may fail, but the system shouldn't
- No infrastructure, no servers → low cost
- No configuration, no maintenance → low cost
- Symmetric nodes,
i.e. no separation into server nodes and client nodes
- Nodes provide – in principle – their own resources
→ easy organic growth

But self-organization is also difficult:

- Emergent behavior
- Often only probabilistic guarantees

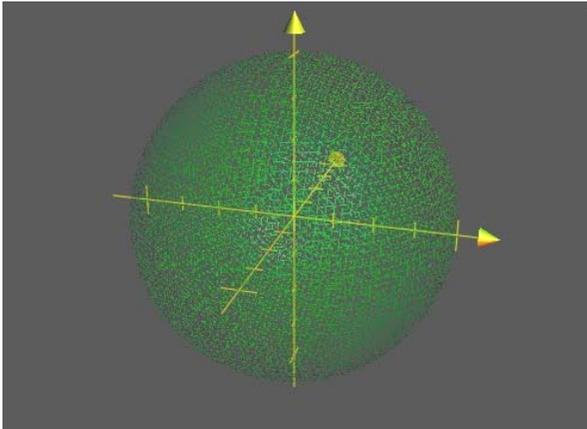
Overview over the Lecture

- Not only self-organization, but also
 - Wireless communication
 - Energy efficiency for sensor networks
 - Integration into the legacy Internet
 - Applications and trends, both in research and industry
- We will deal with
 - Network protocols
 - System architectures
 - Mathematical analysis
- The lecture shall prepare you for
 - Practical lab work
 - Master thesis work

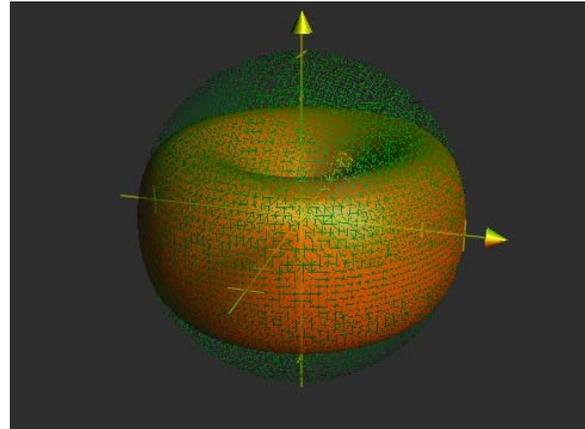
Antennen und Signalausbreitung

A thick, blue, brushstroke-style underline that starts wide on the left and tapers to the right, positioned below the title.

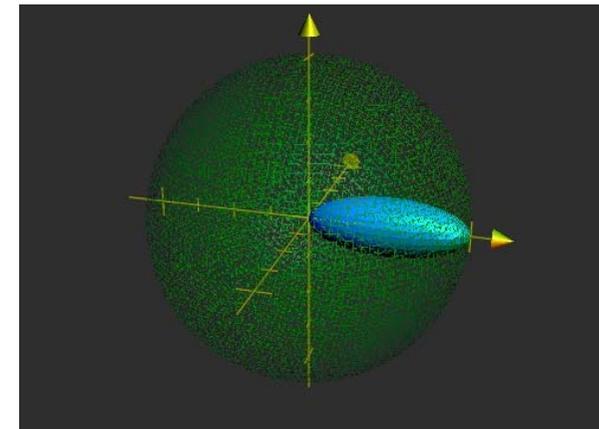
Richtcharakteristik von Antennen (1)



- Isotroper Punktstrahler strahlt die Leistung in alle Richtungen gleichmäßig ab
- Nur theoretisches Modell: Reale Antennen haben eine Richtwirkung in Vertikal- und/oder Horizontalebene



- Dipol-Antenne
- Effizienz der Abstrahlung bzw. Aufnahme ist abhängig von Form und Länge der Antenne und Wellenlänge des Sende- bzw. Empfangssignals
- Je nach Umgebung: Viertelwellen- oder Halbwellenstrahler

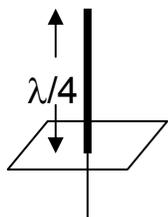


- Sektoren-Antenne
- Häufig eingesetzte Antennenarten für direkte Mikrowellenverbindungen und Basisstationen für Mobilfunknetze (z.B. Ausleuchtung von Tälern und Straßenschluchten)

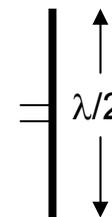
Veranschaulichung im sogenannten Richtdiagramm, z.B. durch Messung der Abstrahlleistung rund um die Antenne ermittelt

Images: <http://wiki.uni-konstanz.de/wiki/bin/view/Wireless/SendeLeistung>

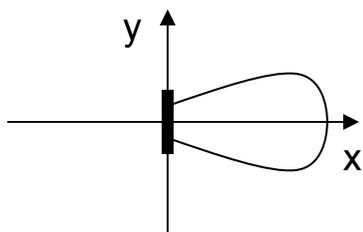
Richtcharakteristik von Antennen (2)



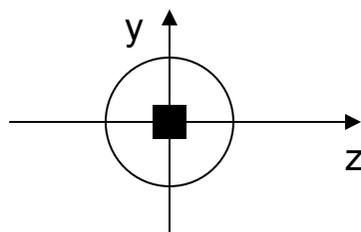
Viertelwellenstrahler
(auf gut leitendem Grund
wie z.B. Fahrzeugdach)



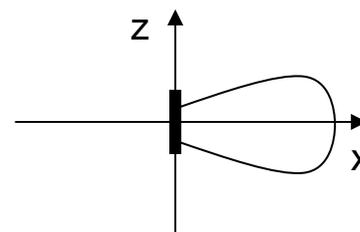
Halbwellenstrahler



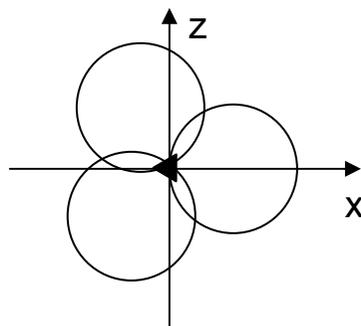
Seitenansicht (xy-Ebene)



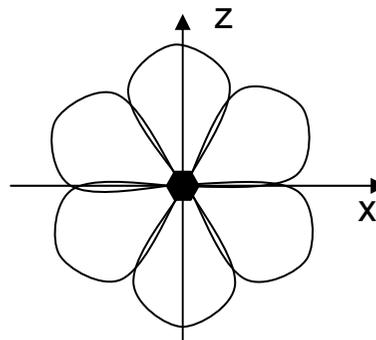
Seitenansicht (yz-Ebene)



von oben (xz-Ebene)



von oben, 3 Sektoren

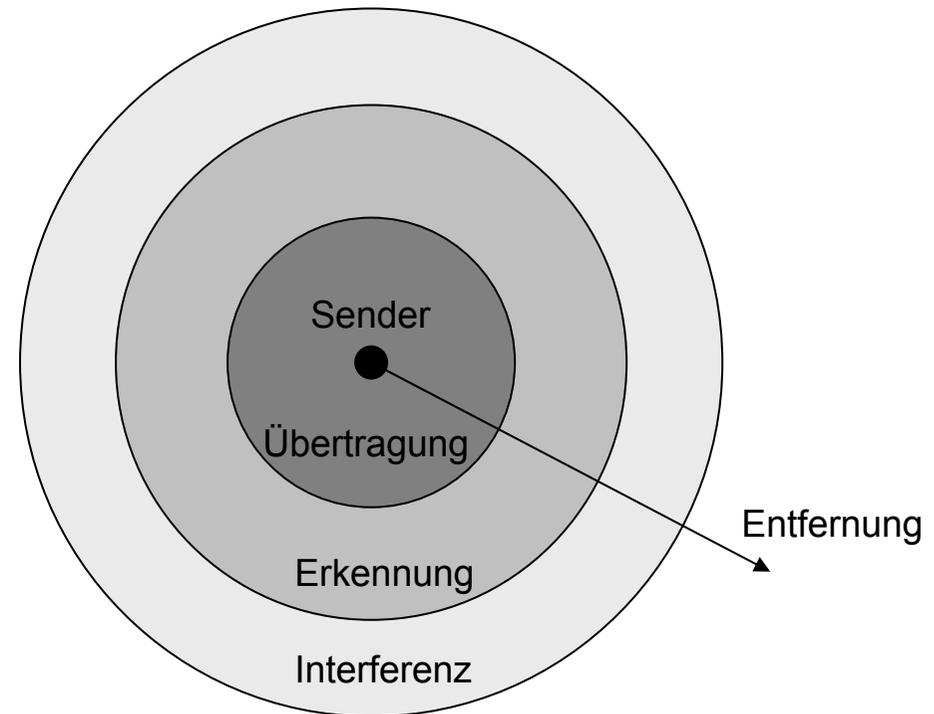


von oben, 6 Sektoren

gerichtete
Antennen
bzw.
Sektoren-
antennen

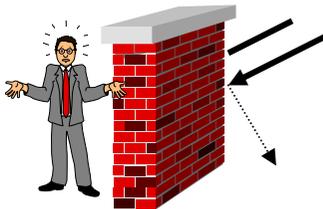
Bereiche der Signalausbreitung

- Übertragungsbereich
 - Kommunikation möglich
 - niedrige Fehlerrate
- Erkennungsbereich
 - Signalerkennung möglich
 - keine Kommunikation möglich
- Interferenzbereich
 - Signal kann nicht detektiert werden
 - Signal trägt zum Hintergrundrauschen bei

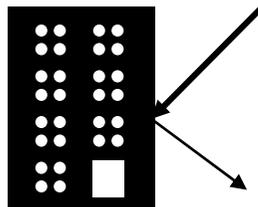


Signalausbreitung

- Ausbreitung im freien Raum grundsätzlich geradlinig (wie Licht)
- Empfangsleistung nimmt mit $r^{-\alpha}$ ab
 - r = Entfernung zwischen Sender und Empfänger
 - α = Koeffizient zur Modellierung der Dämpfung, typisch zwischen 2 und 4
- Empfangsleistung wird außerdem u.a. beeinflusst durch
 - Freiraumdämpfung (frequenzabhängig)
 - Abschattung durch Hindernisse
 - Reflektion an großen Flächen
 - Streuung (scattering) an kleinen Hindernissen
 - Beugung (diffraction) an scharfen Kanten



Abschattung



Reflektion



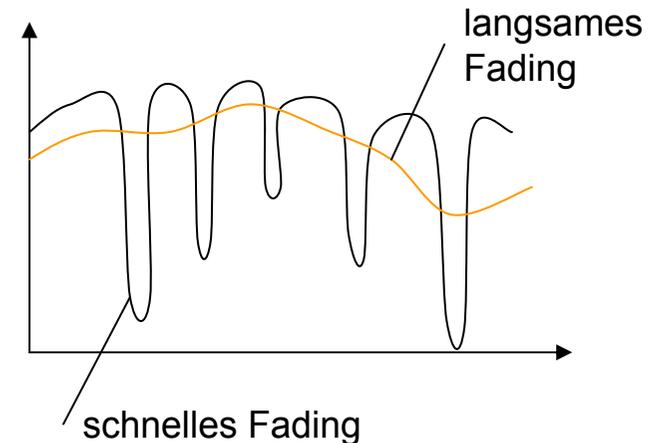
Streuung



Beugung

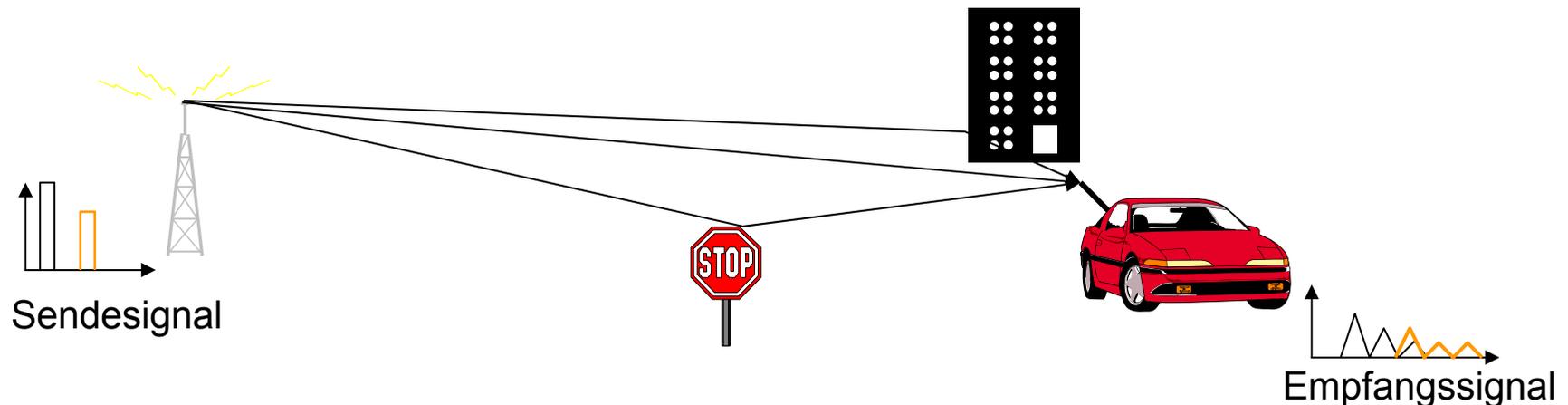
Auswirkungen der Mobilität

- Übertragungskanal ändert sich mit dem Ort der Mobilstation und der Zeit
 - Übertragungswege ändern sich
 - unterschiedliche Verzögerungsbreite der Einzelsignale
 - unterschiedliche Phasenlage der Signalanteile
- Somit kurzzeitige Einbrüche in der Empfangsleistung (schnelles Fading) durch gegenseitige Auslöschung der überlagerten Signale
- Zusätzlich ändern sich
 - Entfernung von der Basisstation
 - Hindernisse in weiterer Entfernung
- Somit langsame Veränderungen in der (durchschnittlichen) Empfangsleistung (langsames Fading)



Mehrwegeausbreitung

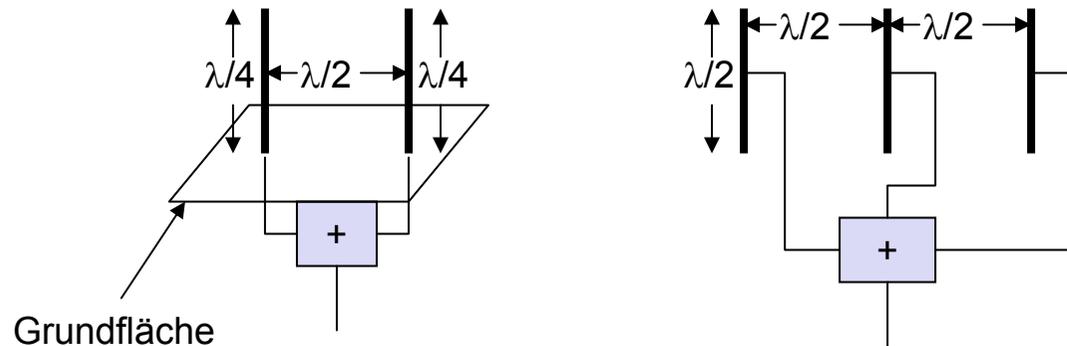
- Signal kommt aufgrund von Reflektion, Streuung und Beugung auf mehreren (unterschiedlich langen) Wegen beim Empfänger an



- Signal wird zeitlich gestreut (time dispersion)
 - ➔ Interferenz mit Nachbarsymbolen (Intersymbolinterferenz, ISI)
- Direkte und phasenverschobene Signalanteile werden empfangen
 - ➔ je nach Phasenlage abgeschwächtes Signal

Antennen-Diversität

- Gruppierung von 2 oder mehr Antennen
 - Antennenfelder mit mehreren Elementen
- Antennendiversität
 - Umschaltung/Auswahl
 - Empfänger wählt die Antenne mit dem besten Empfang
 - Kombination
 - Kombination der Antennen für einen besseren Empfang
 - Phasenanpassung um Auslöschung zu vermeiden



Modulationsverfahren

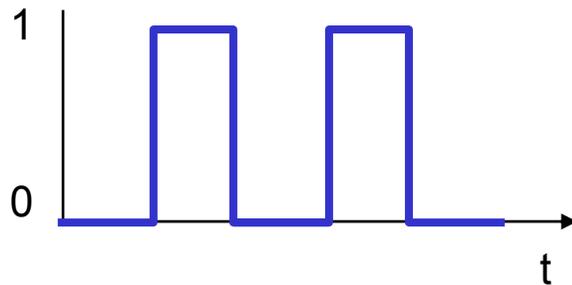


Fourier-Darstellung periodischer Signale

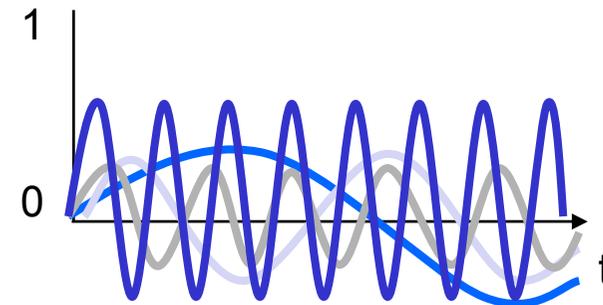
$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

mit

- c: Gleichstromanteil des Signals
- a_n : Amplitude der n-ten Sinusfunktion
- b_n : Amplitude der n-ten Kosinusfunktion



periodisches Signal



Komposition basierend auf Harmonischen

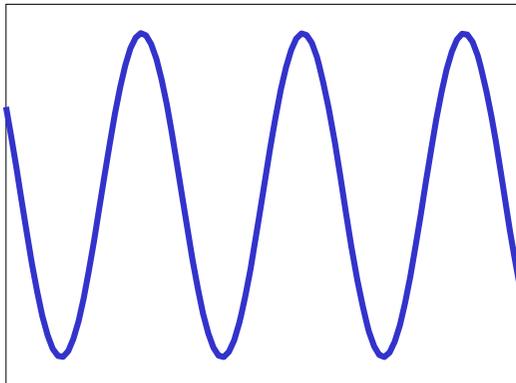
Beispiel: Rechteckfunktion als Fourierreihe

Fourierreihe einer idealen periodischen Rechteckfunktion:

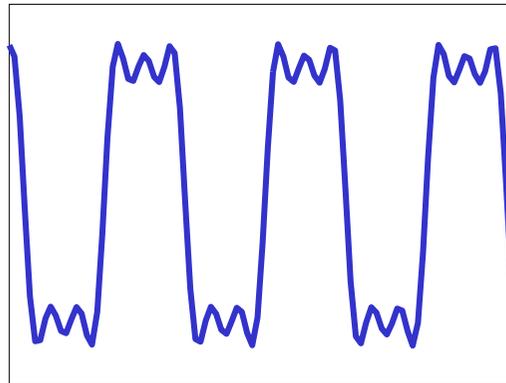
$$g(\omega \cdot t) = \frac{4}{\pi} \left(\sin \omega \cdot t + \frac{1}{3} \sin 3\omega \cdot t + \frac{1}{5} \sin 5\omega \cdot t + \dots \right)$$

mit Kreisfrequenz $\omega = 2\pi \cdot f \cdot t$

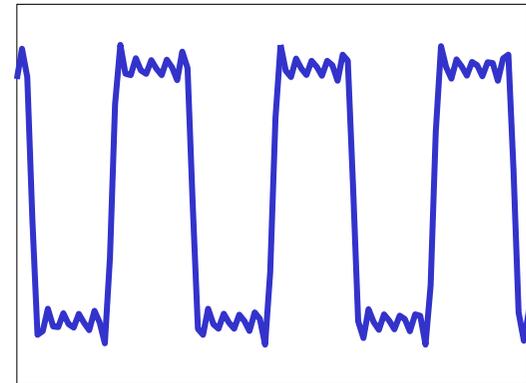
1 Harmonische



3 Harmonische

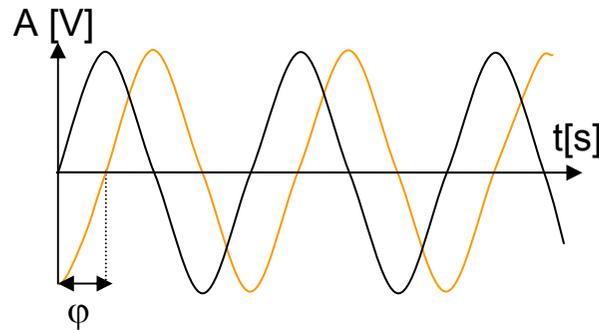


5 Harmonische

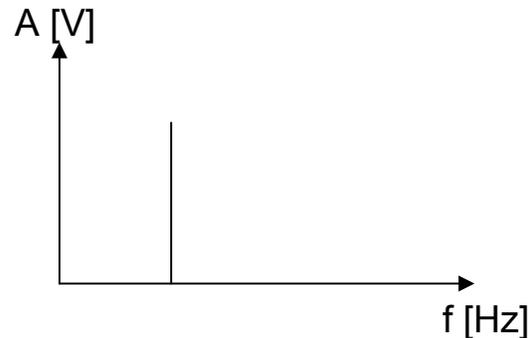


Also: Ideale Rechteckfunktion benötigt **unendlich** viele Harmonische und damit theoretisch eine **unendlich** hohe Bandbreite.

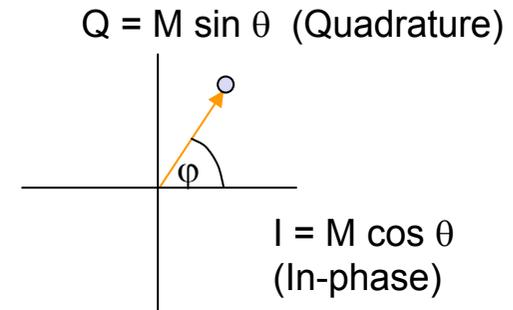
Darstellung von Signalen



**Amplitudenspektrum/
Zeitbereich**
(Amplitude über Zeit)



**Frequenzspektrum/
Frequenzbereich**
(Amplitude oder Phase
über Frequenz)



Phasenzustandsdiagramm
(Amplitude M und
Phasenwinkel θ werden in
Polarkoordinaten aufgetragen)

- Überführung von Darstellung im Zeitbereich in Darstellung im Frequenzbereich (und vice versa) mittels Fourier-Transformation
- Digitalsignale besitzen Rechteckflanken
 - Im Frequenzspektrum unendliche Bandbreite
 - Zur Übertragung Modulation auf analoge Trägersignale (z.B. Variation der Amplitude einer Sinusschwingung)

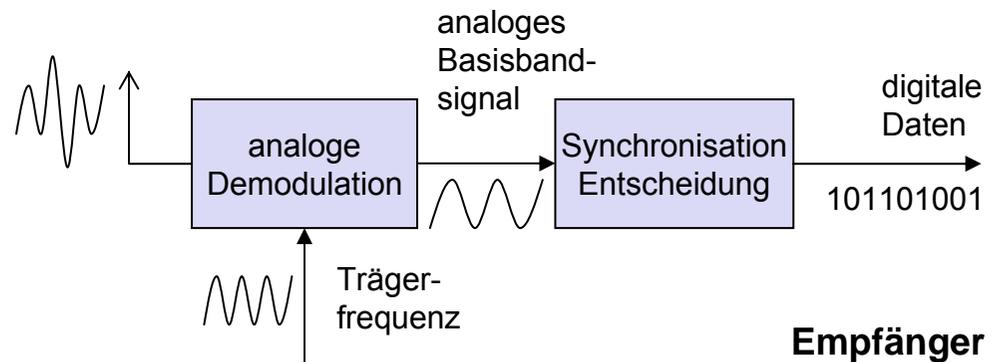
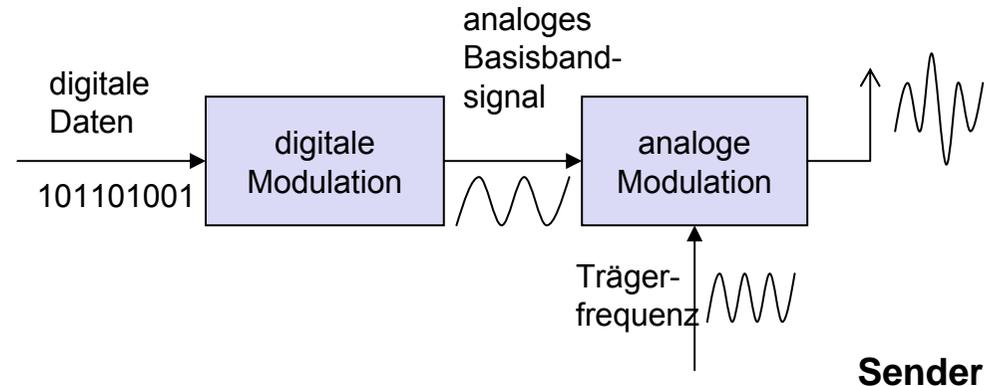
Modulation und Demodulation

- Digitale Modulation
 - Digitale Daten werden in eine analoges (Basisband-) Signal umgesetzt
 - Beispiele: ASK, FSK, PSK
 - Unterschiede in Effizienz und Robustheit

- Analoge Modulation
 - Verschieben des Basisbandsignals auf die Trägerfrequenz

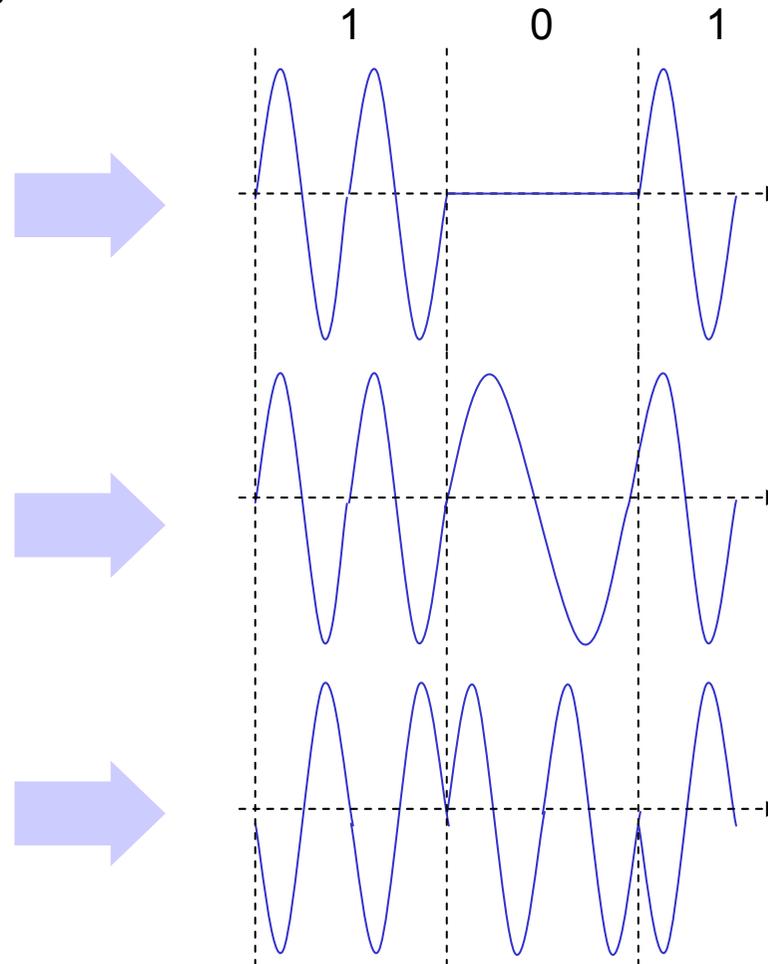
- Motivation
 - Kleinere Antennen (z.B. $\lambda/4$)
 - Frequenzmultiplex
 - Mediencharakteristika

- Varianten
 - Amplitudenmodulation (AM)
 - Frequenzmodulation (FM)
 - Phasenmodulation (PM)

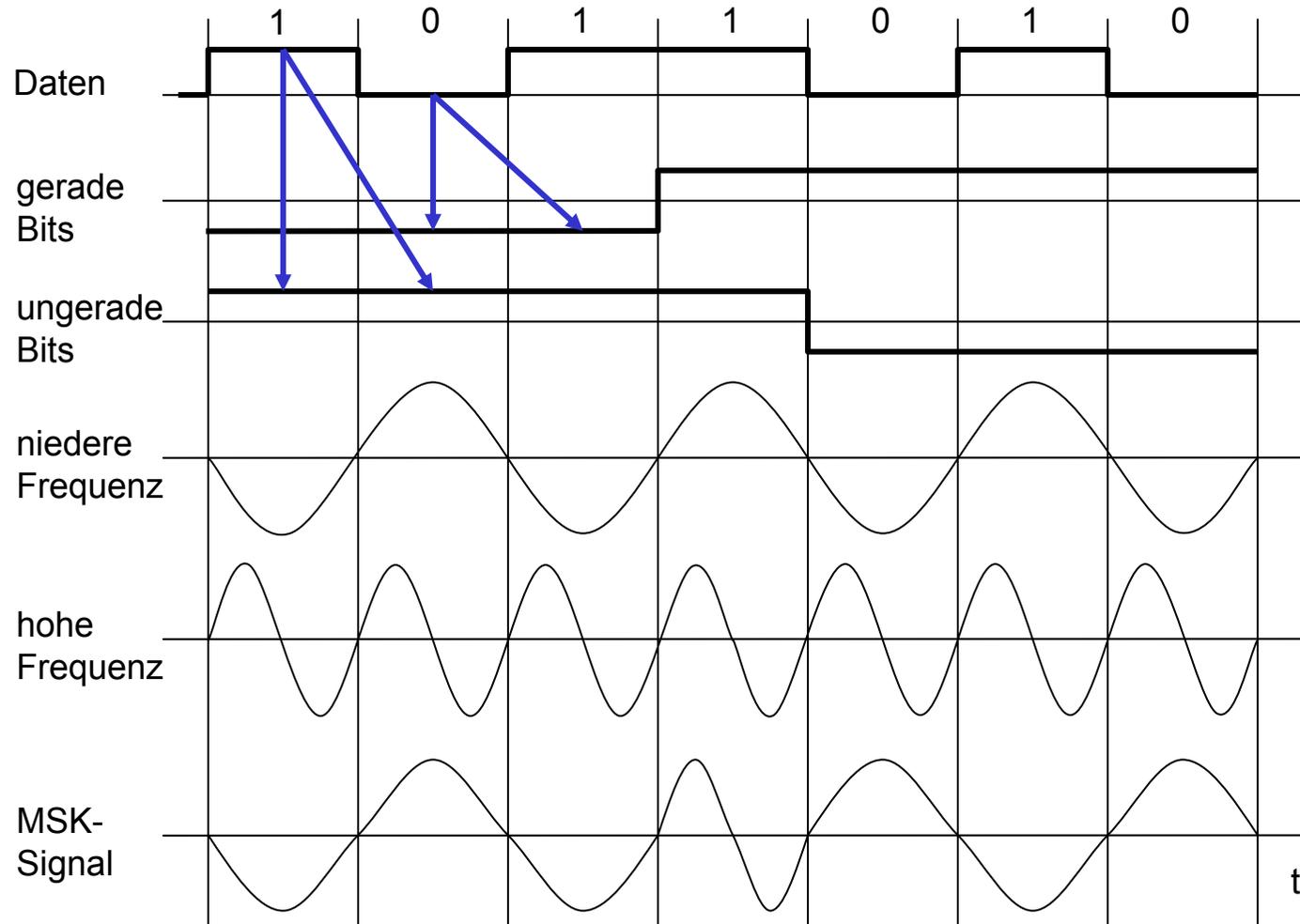


Digitale Modulationstechniken

- Modulation bei digitalen Signalen auch als Umtastung (Shift Keying) bezeichnet.
- Amplitudenmodulation (ASK)
 - technisch einfach
 - benötigt wenig Bandbreite
 - störanfällig
- Frequenzmodulation (FSK)
 - größere Bandbreite
 - für Telefonübertragung
- Phasenmodulation (PSK)
 - komplexe Demodulation mit Trägerrückgewinnung
 - relativ störungssicher



Minimum Shift Keying (1)



Bit	
gerade	0 1 0 1
ungerade	0 0 1 1
Signalwert	h n n h - - + +

h: hohe bzw.
n: niedere Frequenz
+: positive bzw.
-: negative Ausrichtung

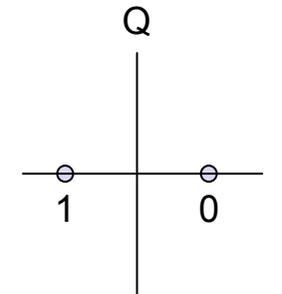
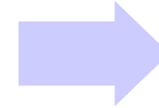
Keine Phasensprünge!

Minimum Shift Keying (2)

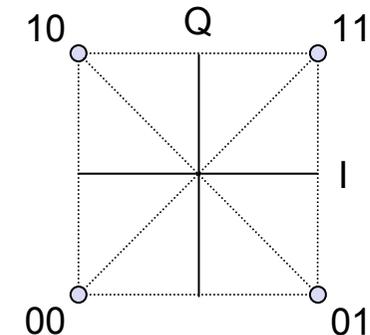
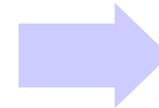
- Bei FSK-Verfahren Bandbreite vom Abstand der Trägerfrequenzen abhängig
- Durch Vorverarbeitung und spezielle Demodulation kann der Abstand bis auf den halben Wert der Bitrate verringert werden
 - ➔ **MSK-Verfahren (Minimum Shift Keying)**
- Bits werden auf zwei Kanäle aufgeteilt, die Bitdauer wird dabei verdoppelt
- Anhand der Bitwerte der beiden Kanäle werden die beiden Trägerfrequenzen mit ihrer Ausrichtung zugeordnet
- Höhere Trägerfrequenz führt während eines Bits eine halbe Schwingung mehr aus
- Weitere Bandbreiteneffizienz durch Gauß-Tiefpassfilter vor Modulator
 - ➔ **GMSK (Gaussian MSK)**, z.B. bei GSM, DECT eingesetzt

Fortgeschrittene PSK-Verfahren

- BPSK (Binary Phase Shift Keying)
 - Bitwert 0: Sinusförmiges Signal
 - Bitwert 1: negatives Sinussignal
 - einfachstes Phasentastungsverfahren
 - spektral ineffizient
 - robust, in Satellitensystemen benutzt



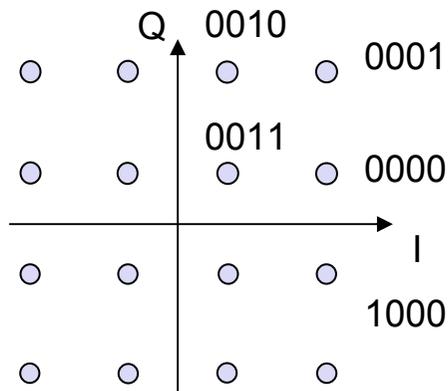
- QPSK (Quaternary Phase Shift Keying)
 - 2 Bits werden in ein Symbol kodiert
 - Symbol entspricht phasenverschobenem Sinussignal
 - weniger Bandbreite als bei BPSK benötigt
 - komplexer



Quadraturamplitudenmodulation

Quadraturamplitudenmodulation ist ein kombiniertes Amplituden- und Phasenmodulationsverfahren:

- Aufteilung von Bits oder Bitgruppen auf zwei Kanäle
- getrennte Amplitudenmodulation dieser Kanäle auf zwei um 90° phasenverschobene Träger, die dann addiert werden
- Möglichkeit, n Bits in ein Symbol zu kodieren
- 2^n diskrete Stufen, $n=2$ entspricht QPSK
- Bitfehlerrate steigt mit n , aber weniger Bitfehler als bei vergleichbaren PSK-Verfahren



Beispiel: 16-QAM (4 Bits entsprechen einem Symbol) Die Symbole 0011 und 0001 haben gleiche Phase und unterschiedliche Amplitude. 0000 und 1000 haben unterschiedliche Phase und gleiche Amplitude.

Multiplexverfahren



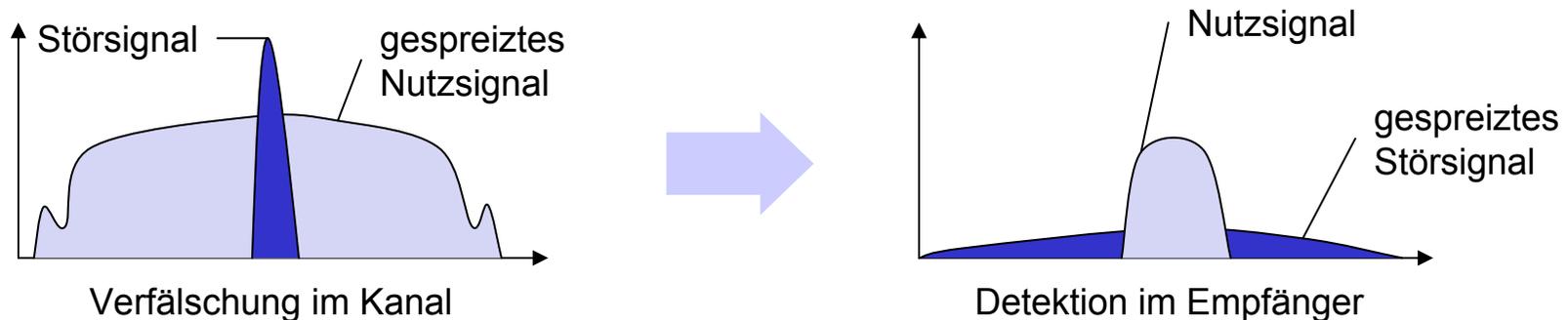
- Ziel ist Mehrfachnutzung des gemeinsamen Mediums.
- Aber: Hinreichend große Schutzabstände nötig.
- Multiplexen ist in 4 Dimensionen möglich
 - Space Division Multiple Access (SDMA)
 - Im Raum (r_i)
 - Einteilung des Raums in Sektoren, gerichtete Antennen, vgl. Zellenstruktur
 - Time Division Multiple Access (TDMA)
 - Im Zeitbereich (t)
 - Zeitlich gesteuertes Zugriffsrecht eines Übertragungskanals
- Frequency Division Multiple Access (FDMA)
 - Im Frequenzbereich (f)
 - Zuordnung eines Übertragungskanals zu einer Frequenz
 - Permanent (z.B. Rundfunk), in Verbindung mit TDMA (z.B. GSM), schnelles Springen (FHSS, Frequency Hopping Spread Spectrum)
- Code Division Multiple Access (CDMA)
 - In einem Coderaum (c)
 - Alle Stationen operieren auf der gleichen Frequenz
 - XOR-Verknüpfung mit „Code“ (Pseudozufallszahl)

Codemultiplex (CDMA)

- Alle Stationen operieren zur gleichen Zeit auf derselben Frequenz
 - Signal wird auf der Senderseite mit einer für den Sender eindeutigen Pseudozufallszahl verknüpft (XOR)
 - Empfänger kann mittels bekannter Sender-Pseudozufallsfolge und Korrelationsfunktion das Originalsignal restaurieren
- Nachteil
 - Höhere Komplexität wg. Signalregenerierung
 - Alle Signale müssen beim Empfänger gleich stark sein
- Vorteile
 - Keine Frequenzplanung
 - Sehr großer Coderaum (z.B. 2^{32}) im Vergleich zum Frequenzraum
 - Störungen (weißes Rauschen) nicht kodiert
 - Vorwärtskorrektur und Verschlüsselung leicht integrierbar
- Realisierung z.B. mittels Spreizspektrumtechnik

- Problem: frequenzabhängiges Fading löscht schmalbandige Signale für gewissen Zeitbereich aus
- Lösung: Signal mittels Codefolge auf breiteren Frequenzbereich spreizen
- Damit Schutz gegen schmalbandige Auslöschungen und Störungen

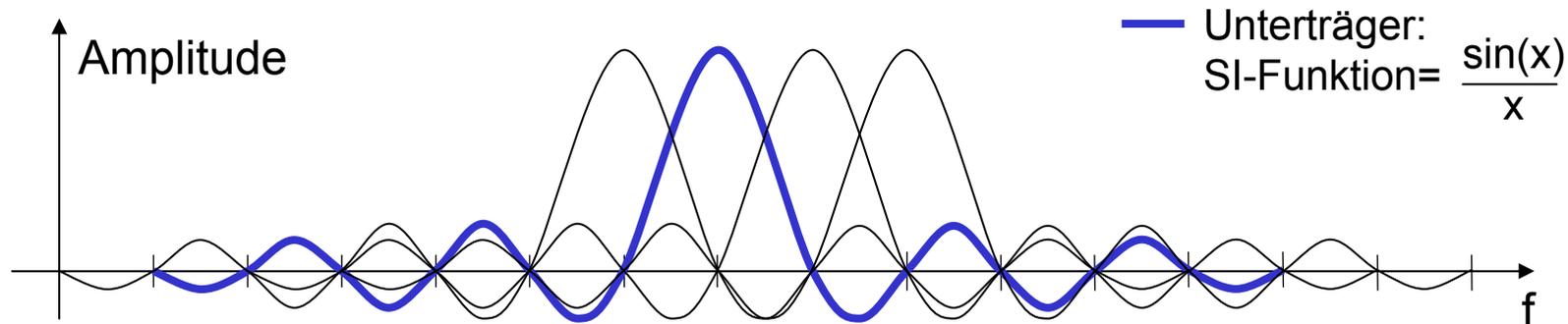
Beseitigung eines Schmalbandstörers



- Nebeneffekte:
 - Koexistenz mehrerer Nutzsignale ohne dynamische Koordination
 - Abhörsicherheit
- Alternativen: Direct Sequence, Frequency Hopping

Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)

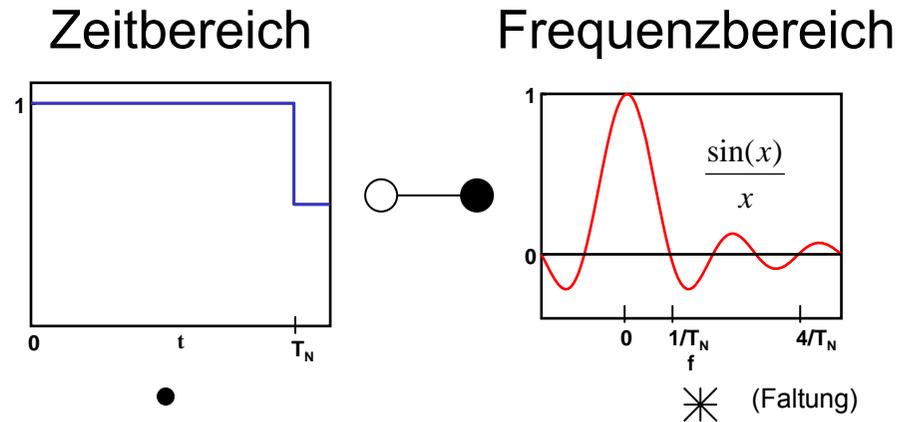
- Daten parallel auf mehreren parallelen (orthogonalen) Unterträgern mit geringerer Rate übertragen
- Maximum einer Trägerfrequenz liegt im Frequenzbereich genau auf den Nullstellen aller anderen Trägerfrequenzen
 - Überlagerung der Frequenzen im selben Frequenzbereich



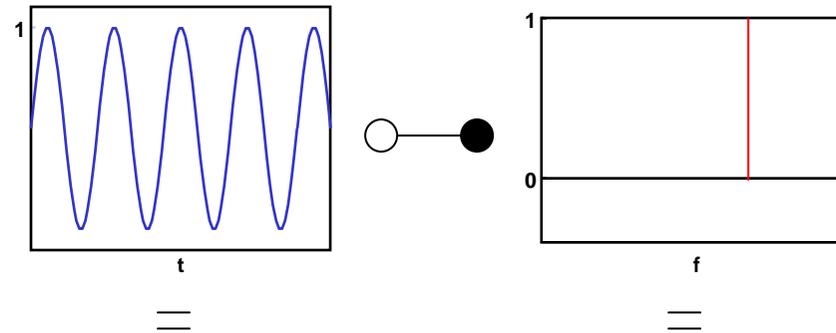
- Eigenschaften
 - Geringere Datenrate auf den Unterträgern somit geringere Intersymbolinterferenz (ISI)
 - Störungen einer Frequenz führen nur zu Störungen auf einem Unterträger
 - Kein Schutzabstand zwischen benachbarten Frequenzbändern notwendig!
 - Orthogonalität erlaubt Trennung des Signals auf Empfängerseite
 - Genaue Synchronisation von Sender und Empfänger notwendig
- Vorteile
 - Keine Entzerrer (Equalizer) notwendig
 - Keine (steilflankigen) Filter notwendig
 - Bessere spektrale Effizienz (im Vergleich zu Codemultiplex)
- Anwendung
 - 802.11a, HIPERLAN/2, DAB, DVB, ADSL

Exkursion Fouriertransformation / Faltung

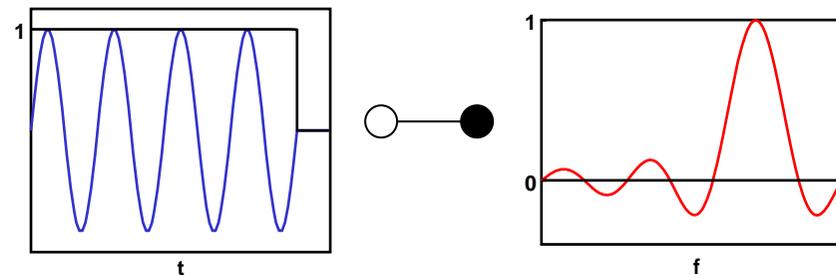
Rechteck im Zeitbereich ergibt SI-Funktion im Frequenzbereich



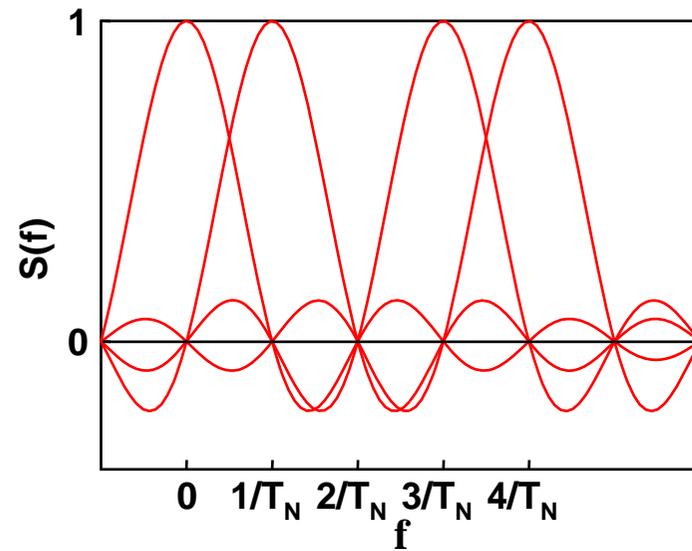
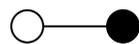
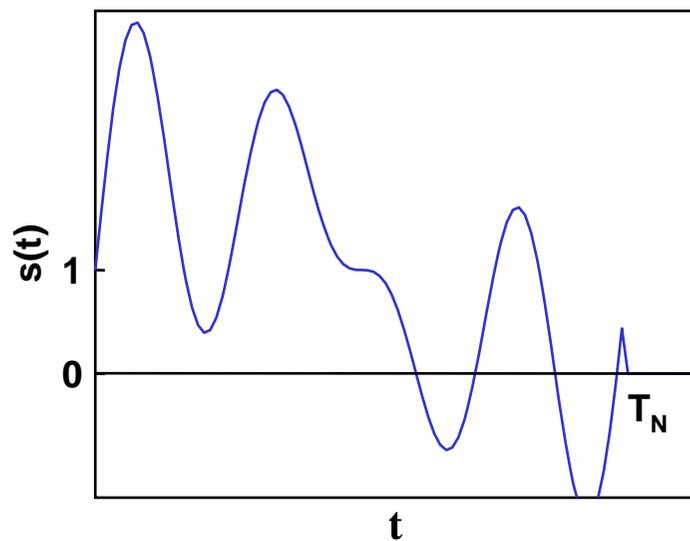
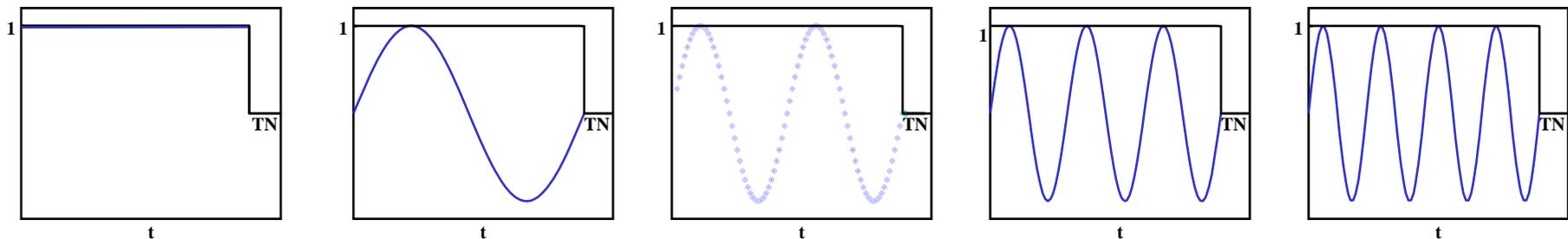
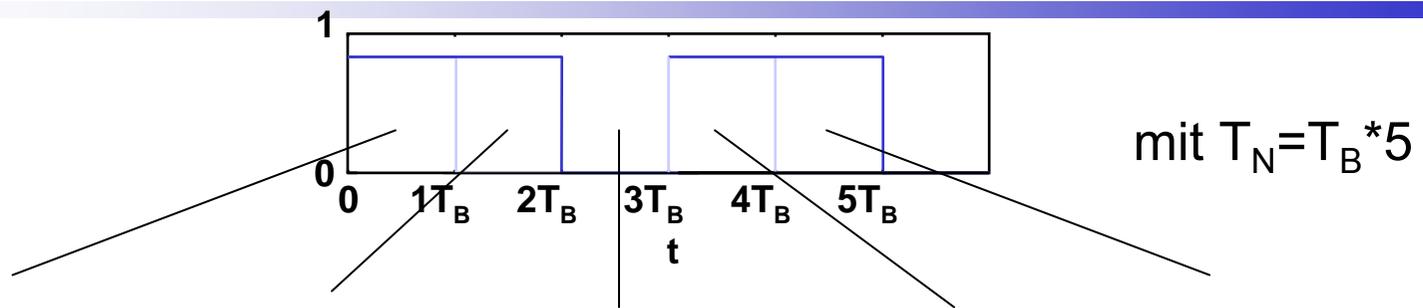
Unbegrenzte Sinus-Funktion entspricht einer Deltafunktion im Frequenzbereich



Begrenzte Sinus-Funktion ergibt verschobene SI-Funktion



OFDM – Beispiel



Anforderungen an Funknetze



Charakteristika drahtloser LANs

- Vorteile
 - räumlich flexibel innerhalb eines Empfangsbereichs
 - Ad-hoc-Netzwerke ohne vorherige Planung machbar
 - keine Verkabelungsprobleme (z.B. historische Gebäude, Feuerschutz, Ästhetik)
 - Kosten: Ein Zugangspunkt, beliebige Anzahl von Nutzern
 - Evtl. weniger anfällig gegenüber Katastrophen wie Erdbeben, Feuer, etc (→Ad-Hoc Netze)
- Nachteile
 - Niedrigere Übertragungsraten (11 Mbit/s bei 802.11b versus 100MBit FastEthernet)
 - Dienstgüte bei drahtlosen Systemen geringer: Übertragungsfehler, Verzögerung und Verzögerungsschwankung (Jitter) größer
 - Regulatorische Restriktionen
 - Weniger Sicherheit, Abhören auf der Luftschnittstelle leicht möglich

Entwurfsziele für drahtlose LANs

- weltweite Funktion
- möglichst geringe Leistungsaufnahme wegen Batteriebetrieb
- Betrieb ohne Sondergenehmigungen bzw. Lizenzen möglich
- robuste Übertragungstechnik
- Vereinfachung der (spontanen) Zusammenarbeit bei Treffen
- einfache Handhabung und Verwaltung (Plug & Play)
- Schutz bereits getätigter Investitionen im Festnetzbereich
- Interoperabilität zwischen LANs und WLANs
- Sicherheit hinsichtlich Abhören vertraulicher Daten
- Sicherheit hinsichtlich der Emissionen
(z.B. keine Interferenzen mit Herzschrittmachern)
- Transparenz hinsichtlich Anwendungen und Protokollen höherer Schichten

Vergleich Infrarot-/Funktechniken

- Infrarot
 - Einsatz von IR-Dioden, diffuses Licht, Reflektion von Wänden
- Vorteile
 - sehr billig und einfach
 - keine Lizenzen nötig
 - einfache Abschirmung
- Nachteile
 - Störung durch Sonnenlicht, Leuchtstoffröhren, etc.
 - wird leicht abgeschattet
 - niedrige Bandbreite
- Einsatz
 - als IrDA (Infrared Data Association) -Schnittstelle in fast jedem Mobilrechner verfügbar
- Funktechnik
 - heute meist Nutzung des lizenzfreien 2,4GHz Bandes
- Vorteile
 - Erfahrungen aus dem WAN und Telefonbereich können übertragen werden
 - Abdeckung einer größeren Fläche mit Durchdringung von Wänden
- Nachteile
 - enger Frequenzbereich frei
 - schwierigere Abschirmung, Interferenzen mit Elektrogeräten
- Einsatz
 - vielfältige, separate Produkte

Medienzugriffsverfahren



Motivation

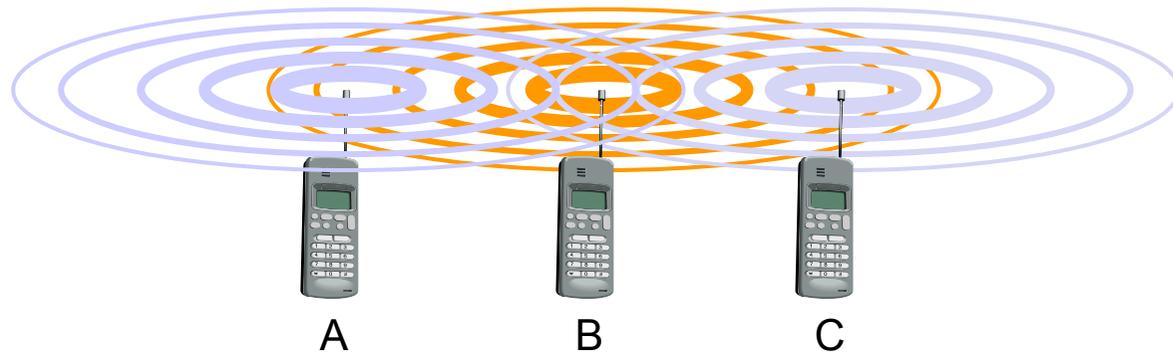
- Medienzugriffsverfahren sind nötig, um geregelten Zugriff auf ein für mehrere Geräte gemeinsam genutztes Medium zu ermöglichen
- Medienzugriffsverfahren vom Festnetz können meistens nicht im drahtlosen Bereich angewendet werden

Beispiel CSMA/CD (Ethernet IEEE 802.3)

- **C**arrier **S**ense **M**ultiple **A**ccess with **C**ollision **D**etection
- Senden, sobald das Medium frei ist und hören, ob eine Kollision stattfand
- Signalstärke nimmt quadratisch mit der Entfernung ab
- Somit Senden und Empfangen in der Praxis nicht gleichzeitig möglich
- CS und CD würden beim Sender eingesetzt, aber Kollision geschieht beim Empfänger
- Kollision ist dadurch u.U. nicht mehr beim Sender hörbar, d.h. CD versagt
- Auch CS kann falsche Ergebnisse liefern, z.B. wenn ein Endgerät „versteckt“ ist

Versteckte und „ausgelieferte“ Endgeräte

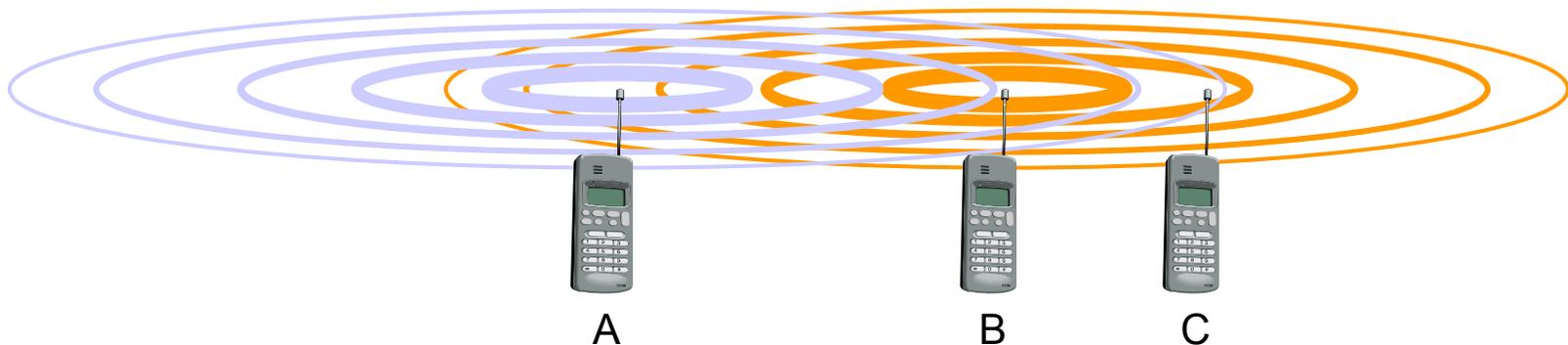
- Verstecktes Endgerät
 - A sendet zu B, C empfängt A nicht mehr
 - C will zu B senden, Medium ist für C frei (CS versagt)
 - Kollision bei B, A sieht dies nicht (CD versagt)
 - A ist „versteckt“ für C



- „Ausgeliefertes“ Endgerät
 - B sendet zu A, C will zu irgendeinem Gerät senden (nicht A oder B)
 - C muß warten, da CS ein „besetztes“ Medium signalisiert
 - da A aber außerhalb der Reichweite von C ist, ist dies unnötig
 - C ist B „ausgeliefert“

Nahe und ferne Endgeräte

- Endgeräte A und B senden, C soll empfangen
 - die Signalstärke nimmt quadratisch mit der Entfernung ab
 - daher „übertönt“ das Signal von Gerät B das von Gerät A
 - C kann A nicht hören



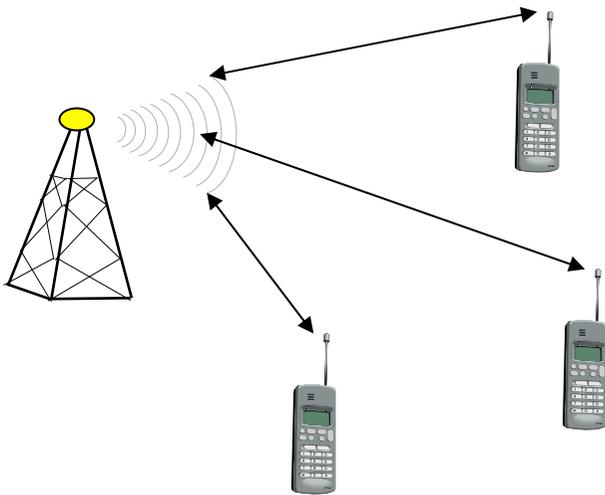
- Würde beispielsweise C Senderechte vergeben, so könnte B die Station A rein physikalisch überstimmen
- Auch ein großes Problem für CDMA-Netzwerke - exakte Leistungskontrolle notwendig!

Weitere Besonderheiten

- Halbduplex Betrieb
 - Realisierung von Transceiver, die gleichzeitig senden und empfangen ist sehr schwierig
 - Eigene Sendeleistung stört beim Empfang (Self-Interference)
- Zeitvarianter Kanal
 - Durch Mehrwegausbreitung (Reflektion, Beugung und Scattering) kann die Signalstärke am Empfänger zeitlich sehr stark variieren (Fading)
 - Dadurch Verwendung von
 - kleineren Paketen
 - FEC und
 - Übertragungswiederholung auf Schicht 2

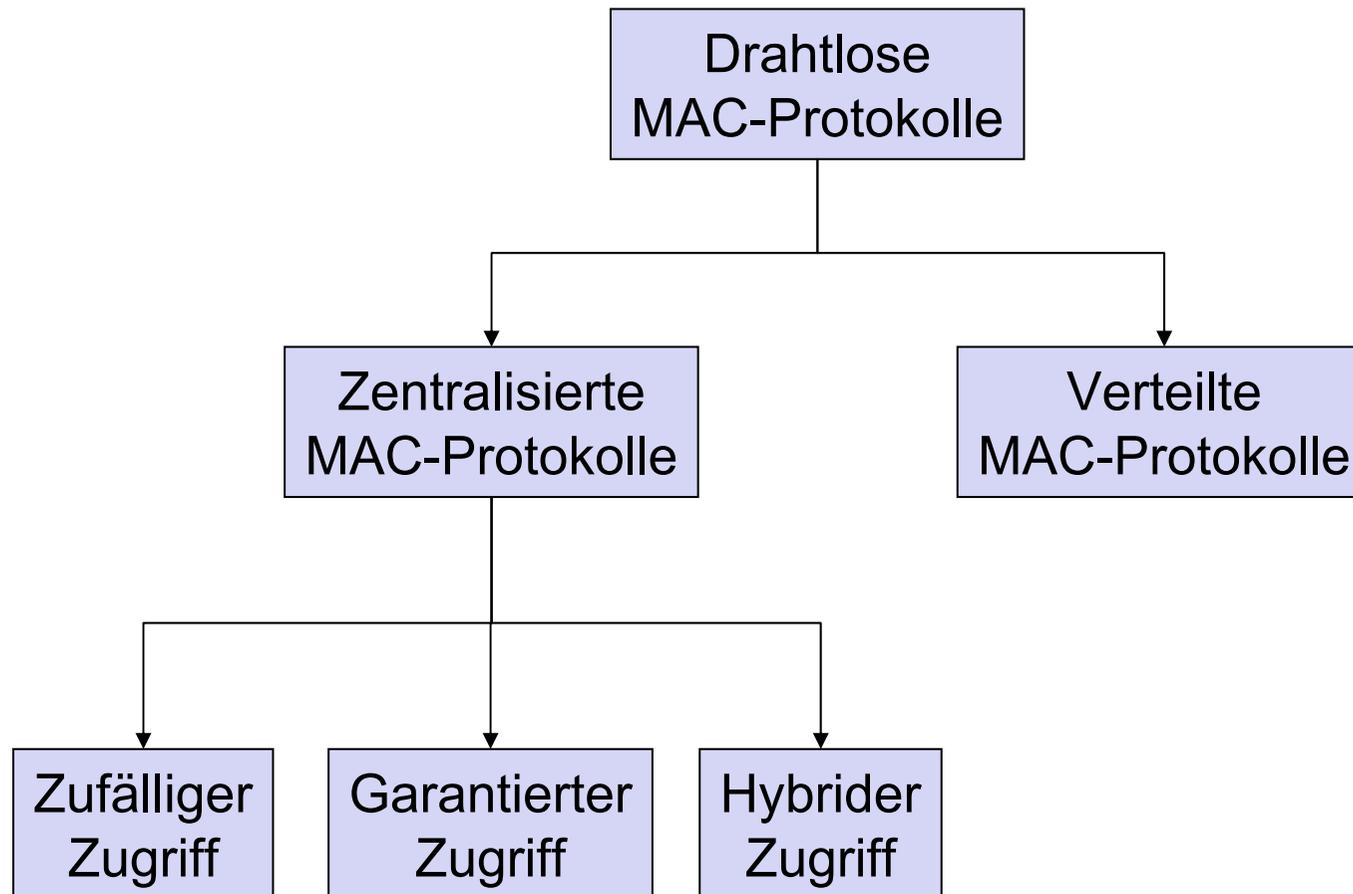
Klassifizierung MAC-Protokolle (1)

- Zentralisiert vs. verteilt arbeitende Protokolle
 - Arbeiten am effektivsten in entsprechender Netzarchitektur



- Synchron vs. Asynchron
 - Kanal kann in Zeitschlitzte eingeteilt werden
 - Vereinfacht Management von Bandbreite und QoS
 - Aber alle Geräte müssen zeitlich synchronisiert sein
 - Alternative: asynchrone, paketbasierte Protokolle

Klassifizierung MAC-Protokolle (2)



Zentralisierte MAC-Protokolle

- Meist basierend auf Multiplextechniken
 - SDMA (Space Division Multiple Access)
 - Einteilung des Raums in Sektoren, gerichtete Antennen
 - vgl. Zellenstruktur
 - FDMA (Frequency Division Multiple Access)
 - Zuordnung eines Übertragungskanals zu einer Frequenz
 - permanent (z.B. Rundfunk), langsames Springen (z.B. GSM), schnelles Springen (FHSS, Frequency Hopping Spread Spectrum)
 - TDMA (Time Division Multiple Access)
 - zeitlich gesteuertes Zugriffsrecht eines Übertragungskanals
 - CDMA (Code Division Multiple Access)
 - Alle Stationen operieren auf der gleichen Frequenz
 - XOR-Verknüpfung mit „Code“ (Pseudozufallszahl)
- ... in Verbindung mit
 - *Polling* (garantierter Zugriff) oder
 - zufälligem Zugriff zur *Reservierung* von Übertragungskapazität

- Funkbasierte Kommunikation ist wesentlich anspruchsvoller als drahtgebundene Kommunikation:
 - Broadcast-Medium, aber ggf. Richtwirkung der Antenne nutzbar, z.T. auch mittels Antennen-Arrays
 - Signalausbreitung gestört: Interferenz, Reflektion, Abschattung, ...
 - Schmalbandige Kanäle erfordern komplexe Modulationsverfahren
 - Gestörte Unterkanäle erfordern robuste Modulations- bzw. Multiplexverfahren
 - Mehrwegeausbreitung begrenzt Symbolgeschwindigkeit
- Medienzugriffsverfahren – genauso wie alle weiteren Verfahren im OSI-Stack müssen sich darauf einrichten!

Questions?



Thomas Fuhrmann

Department of Informatics
Self-Organizing Systems Group
c/o I8 Network Architectures and Services
Technical University Munich, Germany

fuhrmann@net.in.tum.de