

# Telekommunikationssysteme

WS 1999 / 2000



**Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien**  
**Institut für Informatik**  
**Ludwig-Maximilians-Universität, München**



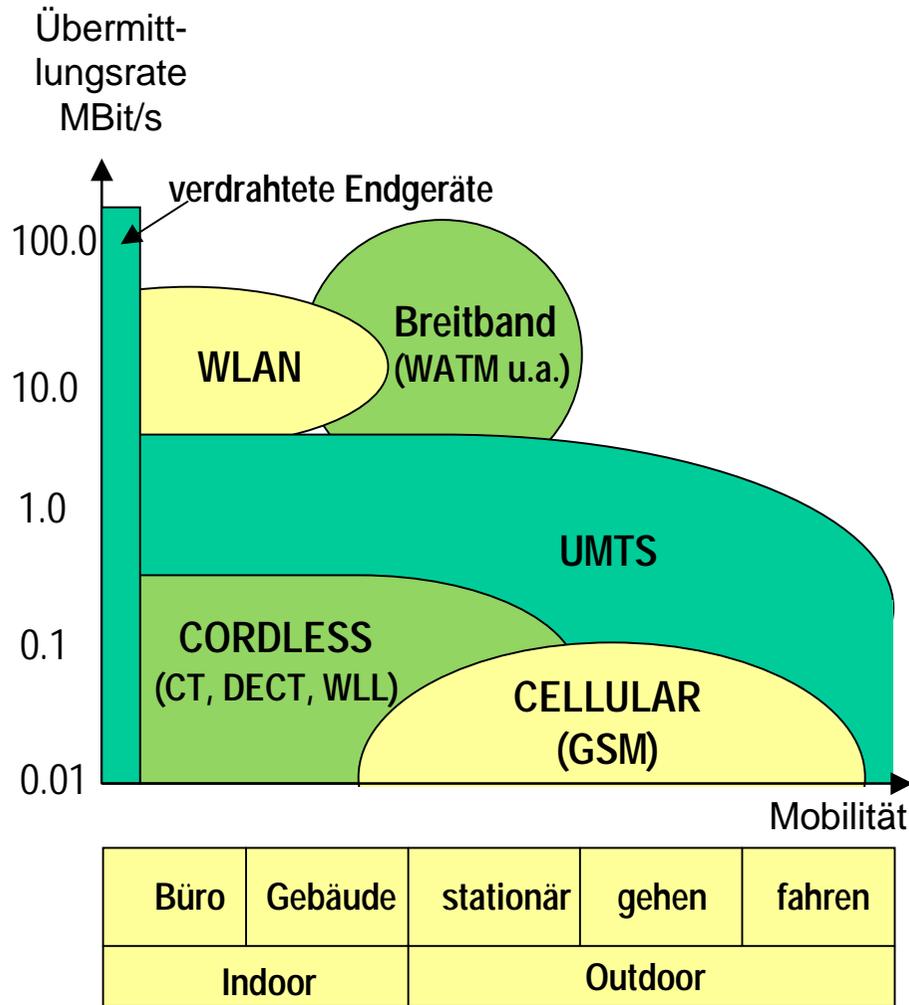
**Prof. Dr. Otto Spaniol**  
**Lehrstuhl für Informatik 4**  
**RWTH Aachen**



**Mitarbeiter:** • Markus Garschhammer  
(in München) • Annette Kosteletzky

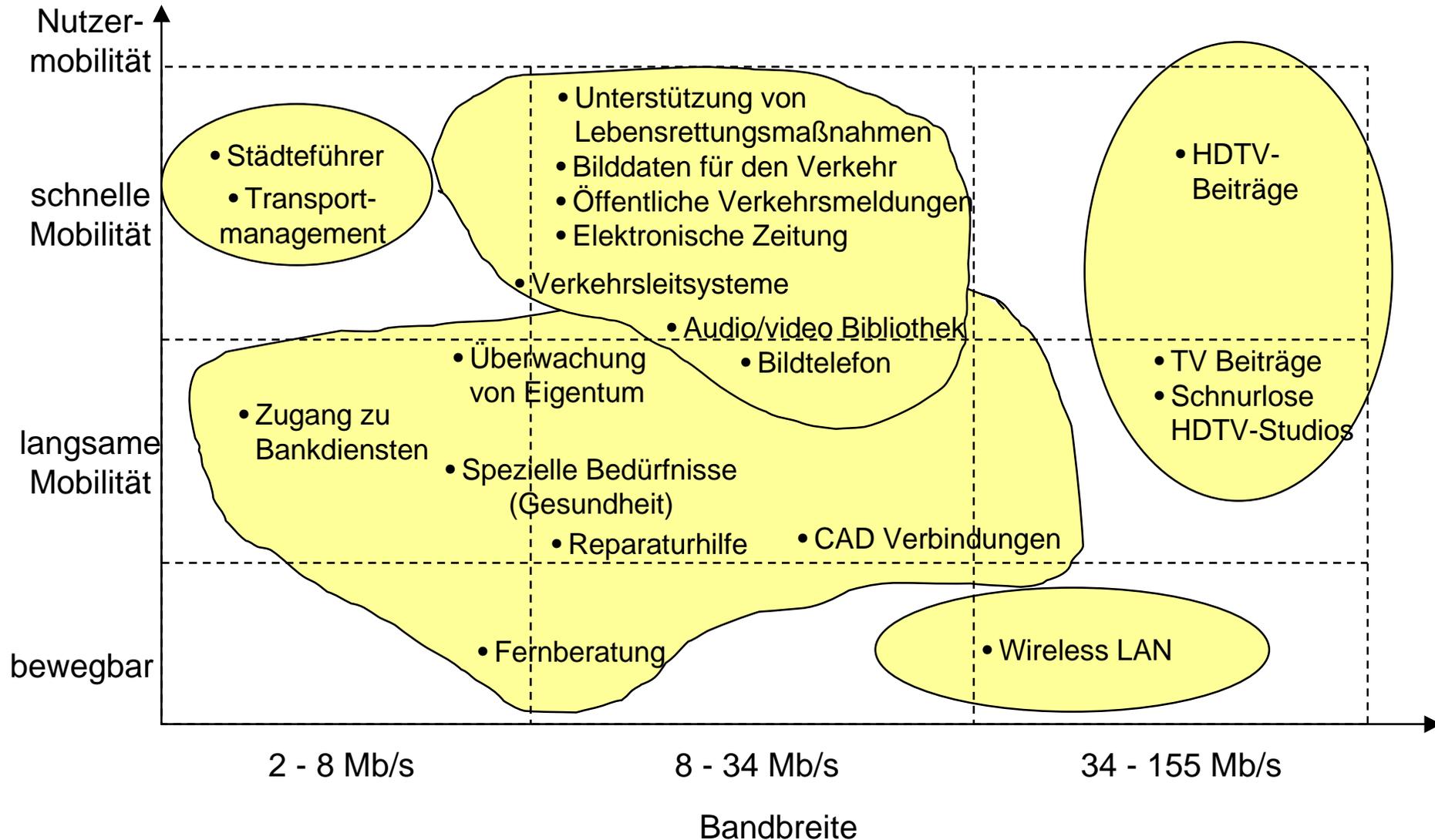
**Mitarbeiter:** • Frank Imhoff  
(in Aachen) • Axel Küpper  
• Jens Meggers

# Mobilfunknetze Teil 1



[Sigmund, G.]: Technik der Netze, Hüthig Verlag

- **CT** - Cordless Telephony (analoger Vorgänger von DECT)
- **DECT** - Digital Enhanced Cordless Telecommunications (Standard für schnurlose Telefone im lokalen Bereich)
- **GSM** - Global System for Mobile Communication (zellulärer Mobilfunkstandard, 2. Mobilfunkgeneration)
- **UMTS** - Universal Mobile Telecommunications System (universelles (Mobilfunk-)System, welches viele unterschiedliche Zugangssysteme vereint)
- **WATM** - Wireless Asynchronous Transfer Mode (Fortführung des ATM-Standards auf der Luftschnittstelle)
- **WLAN** - Wireless Local Area Network (Standard zur drahtlosen Vernetzung (tragbarer) Computer)
- **WLL** - Wireless Local Loop (Technik zur Überbrückung der letzten Meile zwischen Festnetz und Nutzer)
- darüber hinaus: Satellitensysteme, Bündelfunk, spezielle Datenfunksysteme, ...



## Luftschnittstelle

- Mehrwegeausbreitung an Bergen, Gebäuden, Vegetation und Fahrzeugen verursacht Laufzeitverzögerungen von bis zu einigen  $10\mu\text{s}$  und damit einem Mehrfachen der Bitlänge (z.B.  $3,69\mu\text{s}$  bei GSM)
- Überlagerung verschiedener Signalkomponenten beim Empfänger (Fading) führt zu Signalschwankungen mit Einbrüchen von bis zu 40dB (z.B. Autoradio an roter Ampel: ein geringfügiges Vorfahren kann den Empfang signifikant verbessern oder verschlechtern)
- Ressourcen auf der Luftschnittstelle extrem knapp durch Dienste mit zunehmend mehr Bandbreite und wachsenden Benutzerzahlen

## Mobilitätsmanagement

- umfasst Mechanismen für die Lokalisierung von Empfängern bei eingehenden Anrufen (Location Update, Paging) und für die Aufrechterhaltung von Verbindungen mobiler Nutzer (Handover)
- Signalisierungskosten für Location Update und Paging sowohl auf der Luftschnittstelle als auch im Festnetz extrem hoch
- Mechanismen für einen vom Benutzer unbemerkten (nahtlosen) Handover sehr kompliziert

## Konvergenz Mobilfunk - Festnetz

- Erreichbarkeit unter ein und derselben Nummer
- Nutzung eines netzübergreifenden Dienstprofils, welches sich adaptiv an die Charakteristika des zugrundeliegenden Netzes und Terminals anpasst

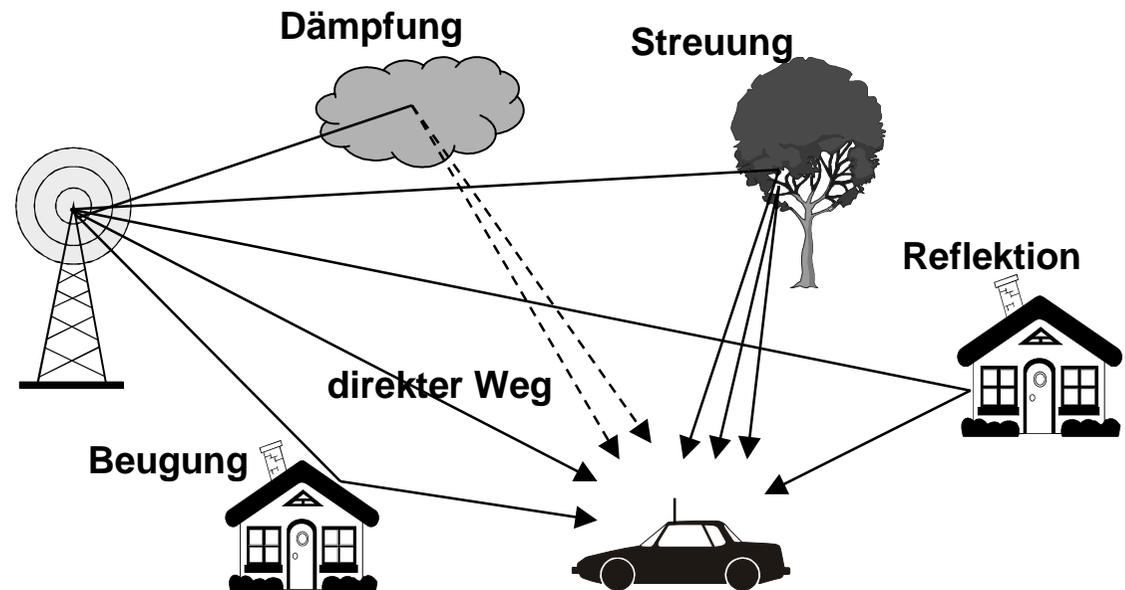


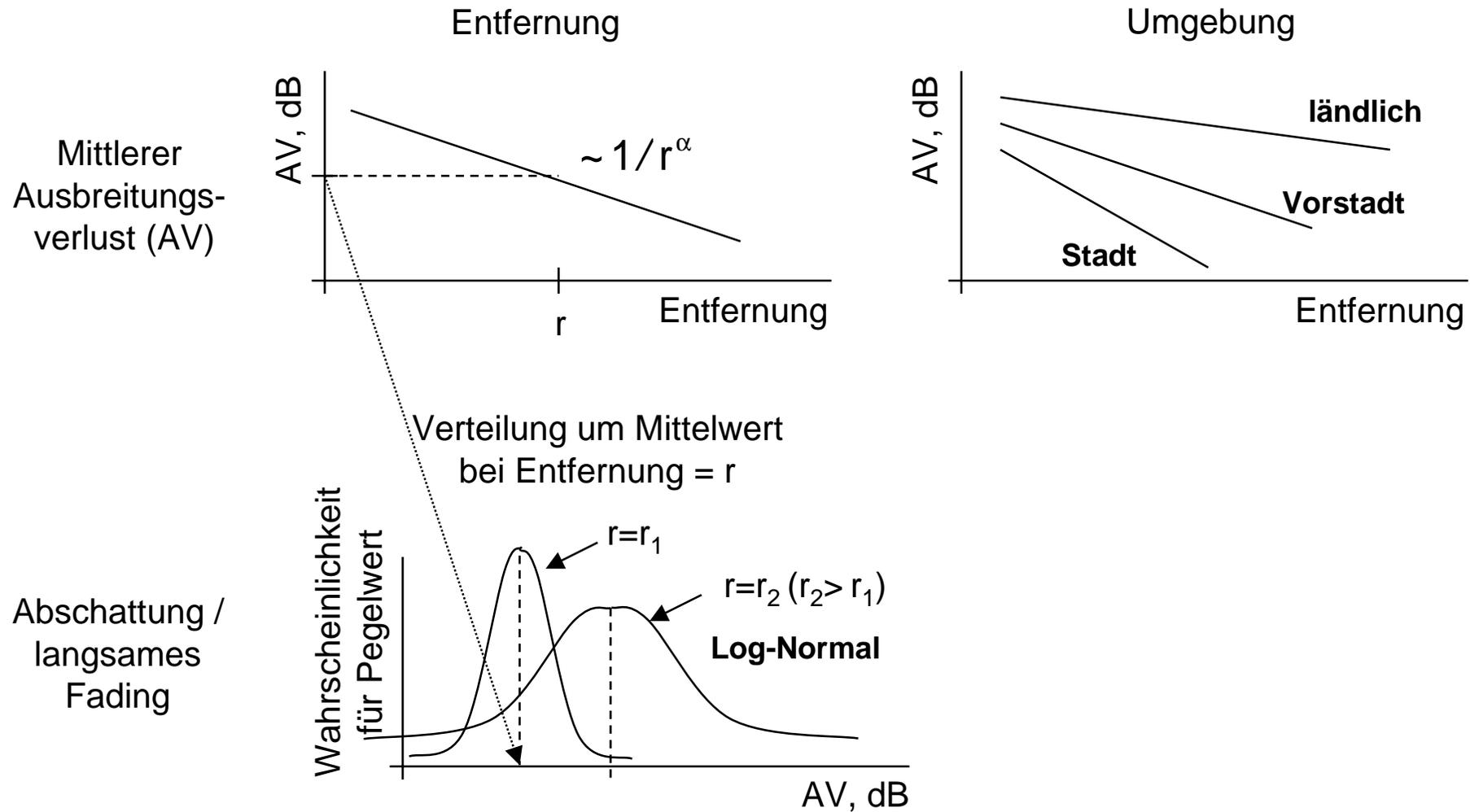
## Faktoren, welche die Ausbreitung beeinflussen:

- Frequenz
- Abstand zur Erde
- Antenne: Richtung, Polarisierung und Höhe
- Atmosphäre und Ionosphäre
- natürliche Umgebung: Gebirge, Wasser, Vegetation, Regen, Schnee
- künstliche Umgebung: Gebäude etc.

## Ausbreitungsmechanismus:

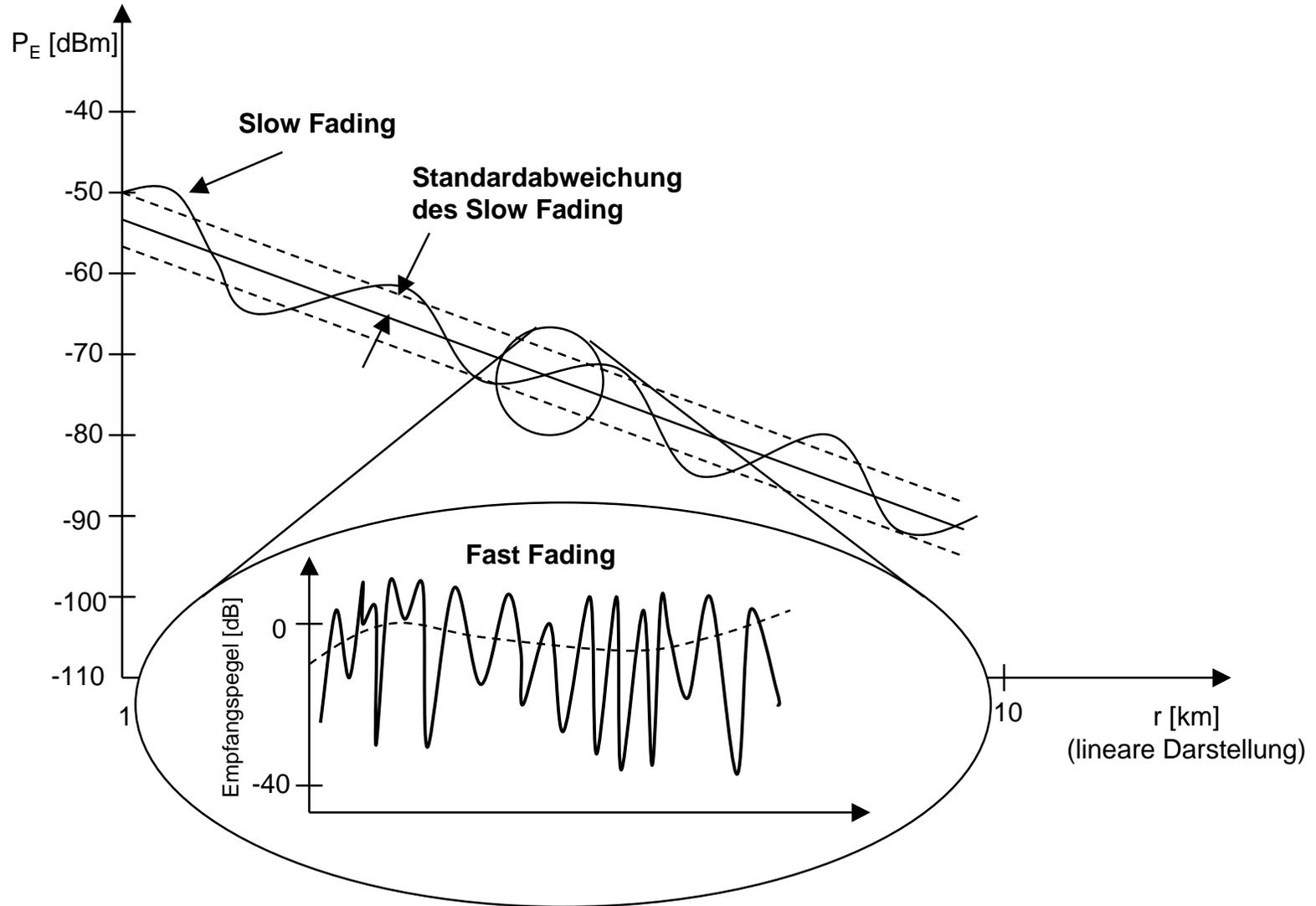
- Dämpfung: Spreizung, Absorption (Regen, Vegetation)
- Beugung / Ablenkung: scharfe und runde Kanten
- Brechung: Brechungsindex wird mit zunehmender Höhe kleiner
- Reflektion: hart, sanft ...
- Streuung: hart, sanft ...





\*) vereinfachte Darstellung

[Rha, P.S.]: Mobile Radio Propagation,  
[http://online.sfsu.edu/~psrha/ENGR890\\_Lec4\\_Prop-I/sld001.htm](http://online.sfsu.edu/~psrha/ENGR890_Lec4_Prop-I/sld001.htm)



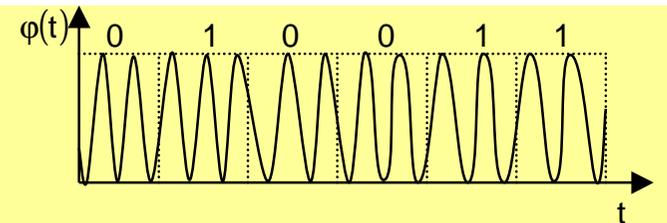
[David, K.; Benkner, T.]: Digitale Mobilfunksysteme, Teubner



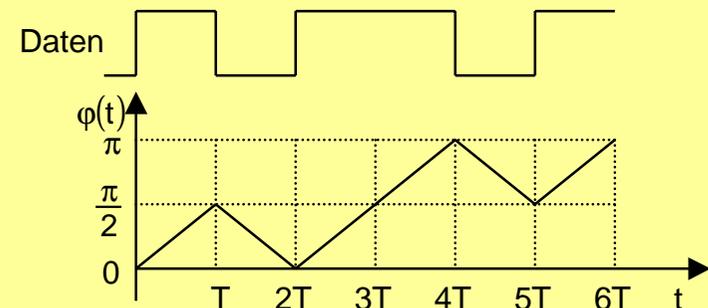
- in GSM eingesetzt, um Bandbreiteneffizienz (Übertragungsrate / dafür nötige Bandbreite) zu steigern und gleichzeitig Nachbarkanalstörungen zu vermeiden
- ermöglicht einfache Verstärkung mit hohem Wirkungsgrad, so dass lange Betriebsdauer von Mobilstationen mit eingebautem Akku möglich wird

### Funktionsweise:

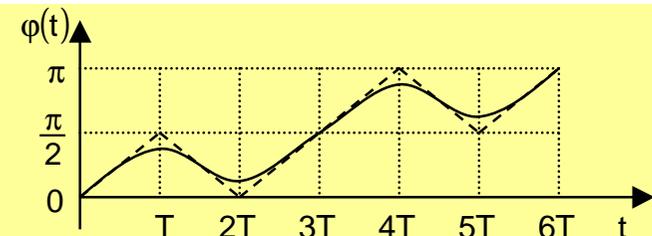
- kontinuierliche Phasenverteilung (d.h. Phase zwischen den Abtastzeitpunkten wird durch Umtastung der Frequenz kontinuierlich laufengelassen)



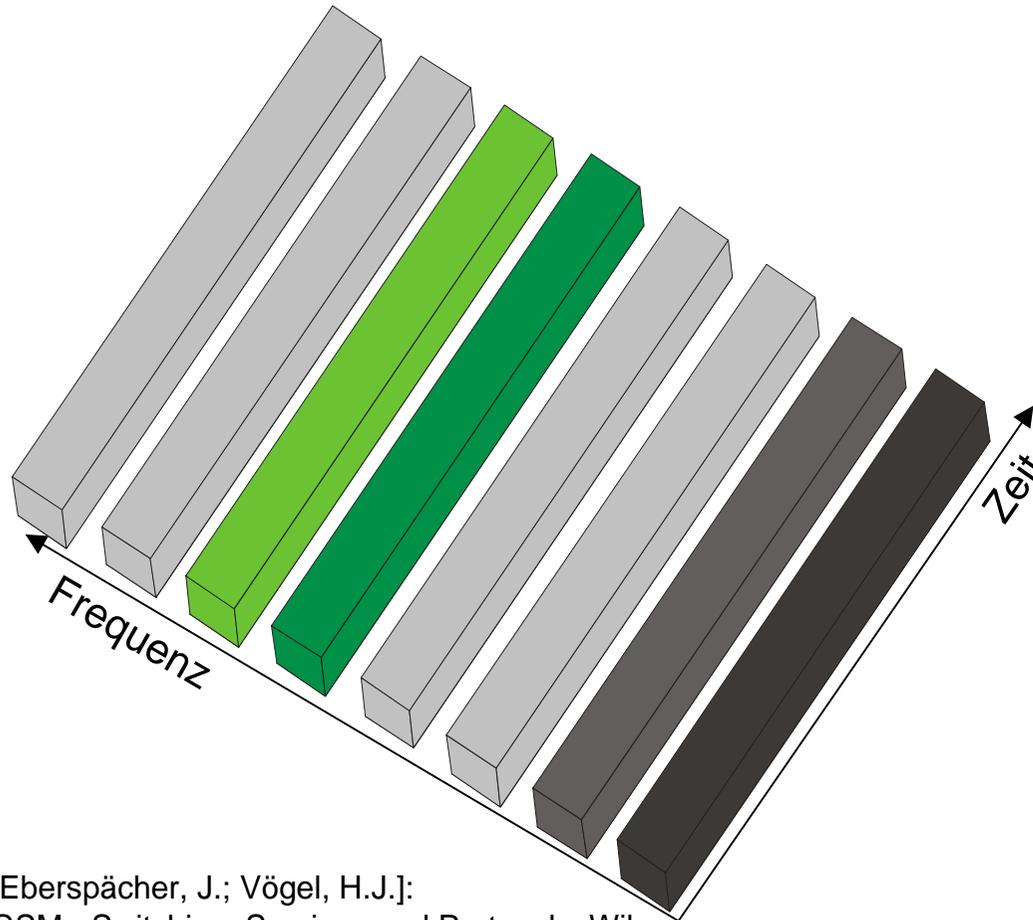
- in Kombination mit Phasendifferenzcodierung (d.h. nicht die Bitfolge, sondern die Differenz aufeinanderfolgender Bits wird übertragen)



- in Kombination mit Glättungsfunktion (Gaußscher Tiefpaß) (zur Verringerung von Nachbarkanalstörungen)







[Eberspächer, J.; Vögel, H.J.]:  
GSM - Switching, Services and Protocols, Wiley

### Funktionsweise:

- Frequenzband wird in Segmente unterteilt
- ein Nutzer pro Segment
- Bandbreite ist durch Frequenzspektrum und Modulationsart bestimmt

### Vorteile:

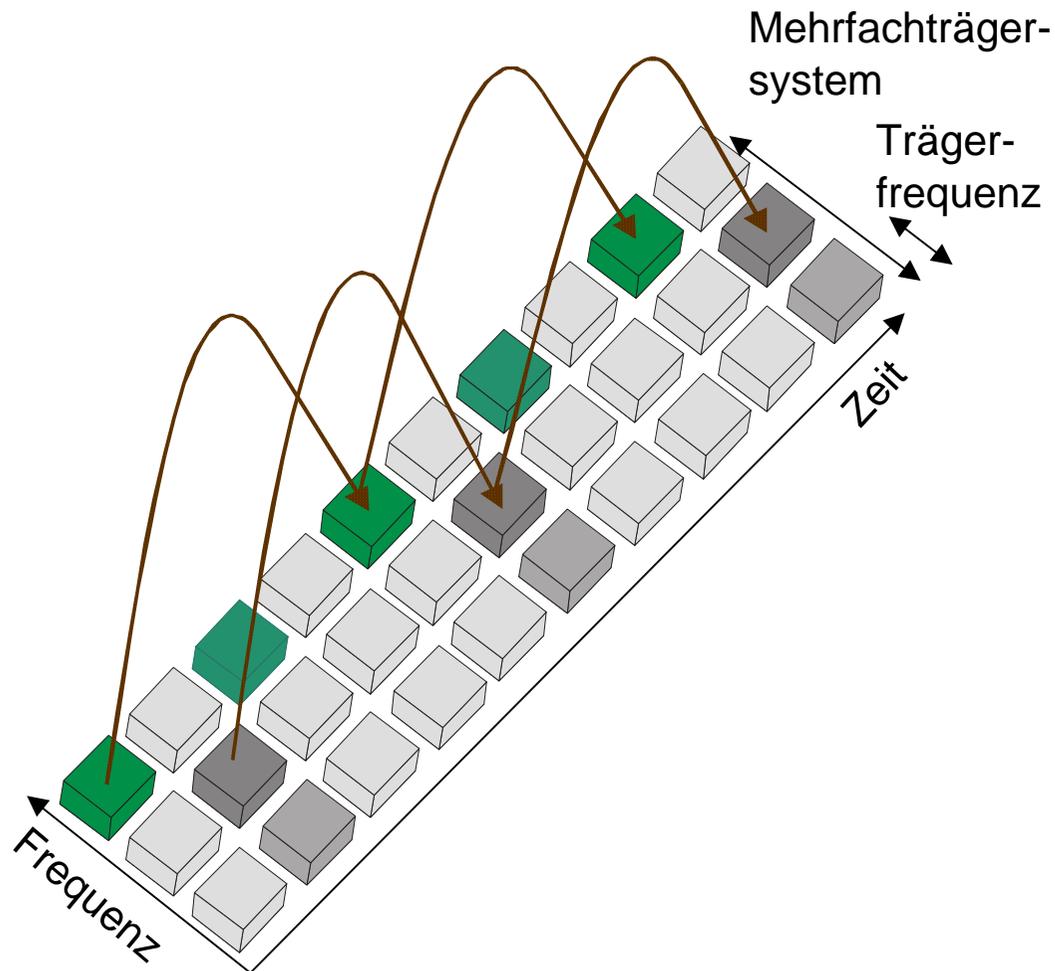
- leicht implementierbar
- keine Intersymbol-Interferenz

### Nachteile:

- niedrige Bitraten
- teure lineare Verstärker (wegen Problem der Intermodulation)
- „nahtloser Handover“ schwer zu erreichen

### Nutzung:

- C-Netz (Deutschland)
- CT



### Funktionsweise:

- Nutzern wird zyklisch, für die Dauer eines Zeitschlitzes, eine Frequenz zur exklusiven Nutzung zugewiesen
- oft Unterteilung des Frequenzbandes in Teilbänder durch Nutzung von FDMA
- store and burst system: in jedem Zeitschlitz sendet die mobile Station einen Datenburst
- Zahl der TDMA Kanäle auf einer Trägerfrequenz hängt von der Länge der Zeitschlitz ab.
- Zeitschlitz in einer Periode werden zu TDMA Rahmen zusammengefasst

[Eberspächer, J.; Vögel, H.J.]:  
GSM - Switching, Services and Protocols, Wiley



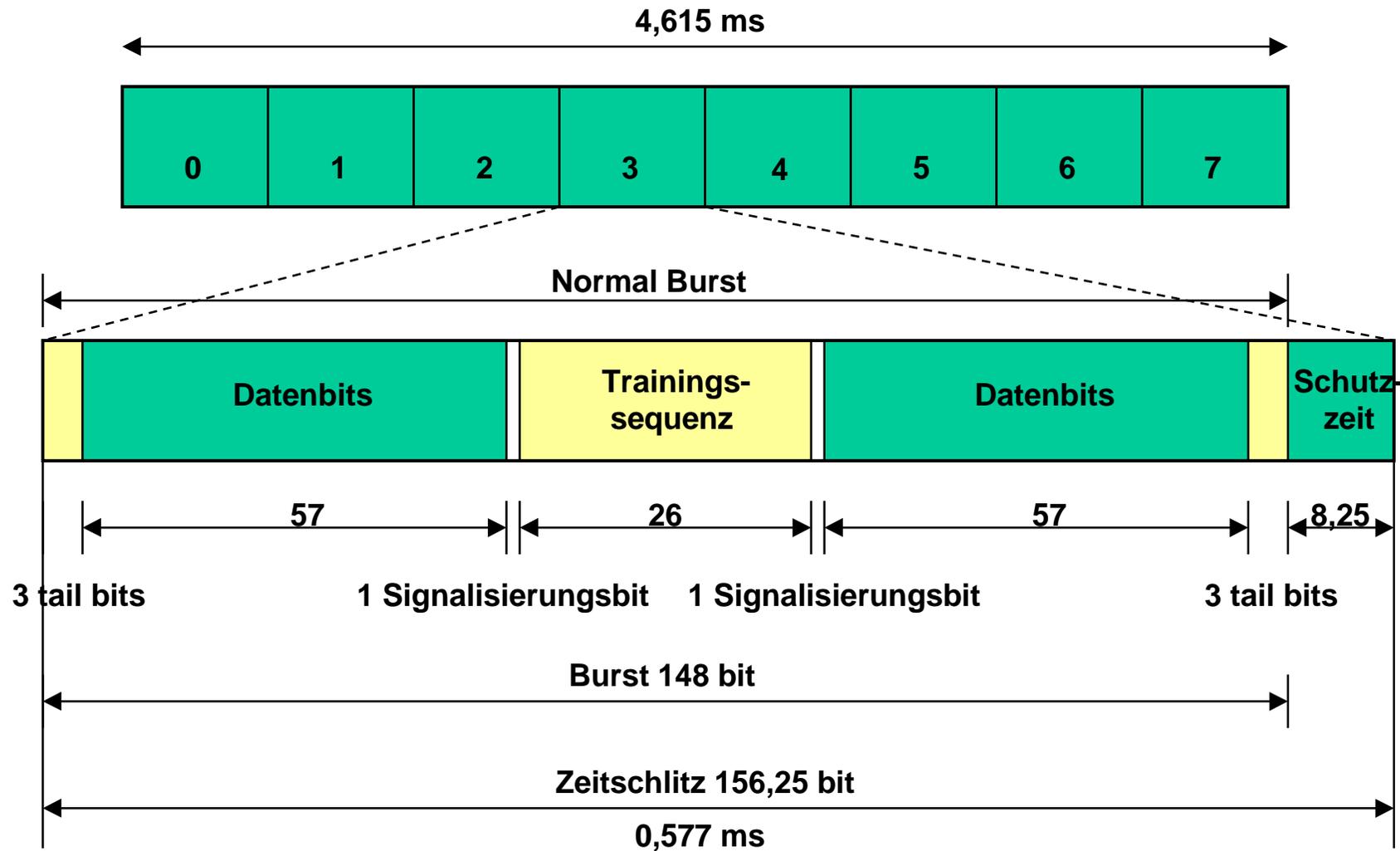
**aber:** beträchtliche Minderung der Effizienz, da keine Datenübertragung zu dieser Zeit

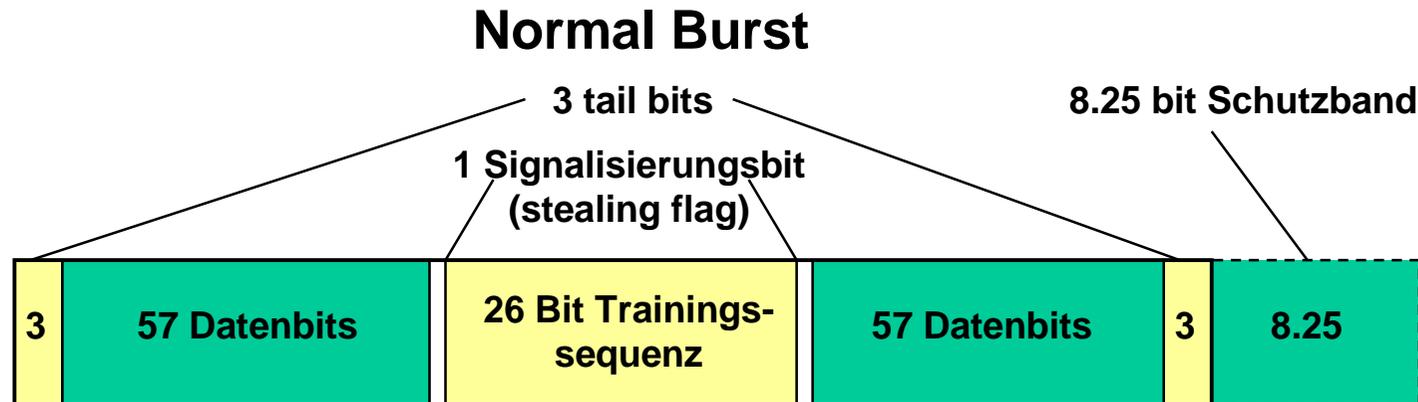
**Beispiel:** Slotlänge in GSM:  $577\mu\text{s}$  => Schutzzeit von  $234\mu\text{s}$  führen zu 40% Verlust der Übertragungskapazität

**Lösung:** Timing Advance: Basisstation misst Signallaufzeit bis zur Mobilstation und veranlasst, dass diese früher zu senden beginnt  
=> Reduzierung der Schutzzeit auf  $30\mu\text{s}$

### Tail Bits und Trainingssequenzen:

- bitgenaue Synchronisation des Übertragungsblocks (Burst) für Timing Advance
- Schätzung der Kanalimpulsantwort (zum Einstellen der Parameter des Equalizers zur Kanalentzerrung)

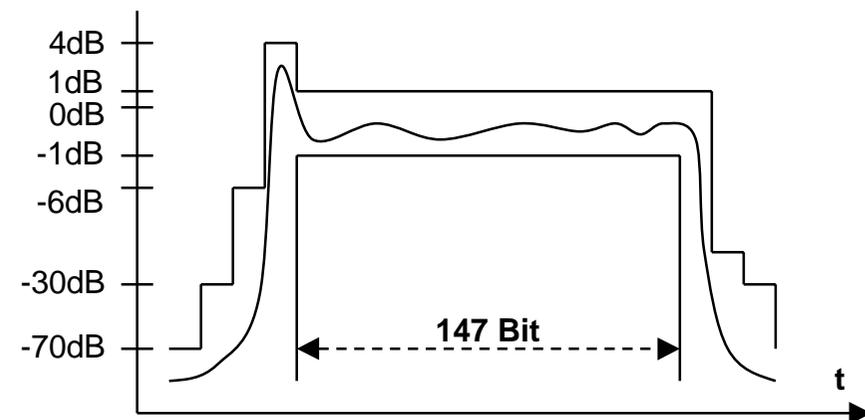




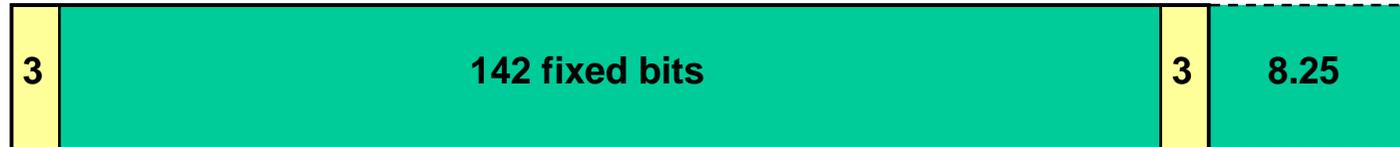
- Normal Burst dient der Nachrichtenübertragung in Verkehrs- und Steuerkanälen
- Zeitmaske erforderlich, damit zeitlich angrenzende Kanäle nicht zu stark gestört werden  
=> Regelung der Sendeleistung von bis zu 70dB innerhalb von 20µs

### Signalisierungsbits:

- kennzeichnen, ob der Burst Nutzerdaten oder Signalisierungsdaten enthält
- wenn schnelle Signalisierung benötigt wird (z.B. während des Handovers) wird der Zeitschlitz vom normalen Datenkanal „geklaut“

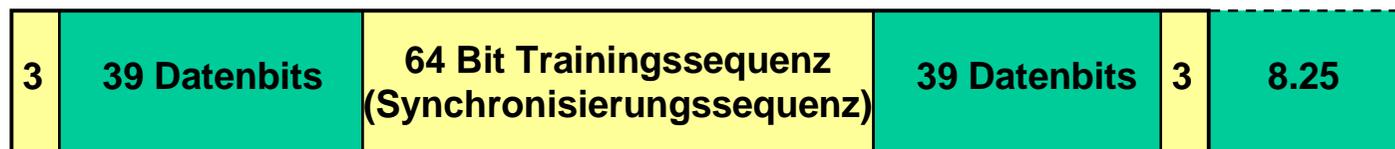


### Frequency Correction Burst



- alle 148 Bits gleich null  
reine Sinusschwingung bei der GMSK-Modulation  
Frequenzkorrektur bei der Mobilstation, damit mögliche Störungen benachbarter Frequenzen vermieden werden

### Synchronization Burst



- Zeitsynchronisation durch besonders lange Trainingssequenz
- außerdem Übertragung der TDMA-Rahmennummer und einer Identifikationsnummer der Basisstation

### Dummy Burst



- wird gesendet, falls keine Daten zu übertragen sind
- stellt sicher, daß in jedem Zeitschlitz ein Burst gesendet wird
- ermöglicht der Mobilstation, die Signalstärke zu messen (quality monitoring)



### Vorteile:

- höhere Bitraten
- nicht so genaue Leistungskontrolle nötig, wegen Reduzierung interferenzverursachender Frequenzen
- keine Schutzbänder
- von der mobilen Station gesteuertes Handover möglich
- variable Bitrate möglich
- reduzierte Kosten, da die einzelnen Geräte für mehrere Kanäle genutzt werden können

### Nachteile:

- Schutzzeiten sind nötig
- es wurden Interferenzen mit Hörgeräten festgestellt
- hohe Datenraten erfordern Entzerrung

### Prinzip:

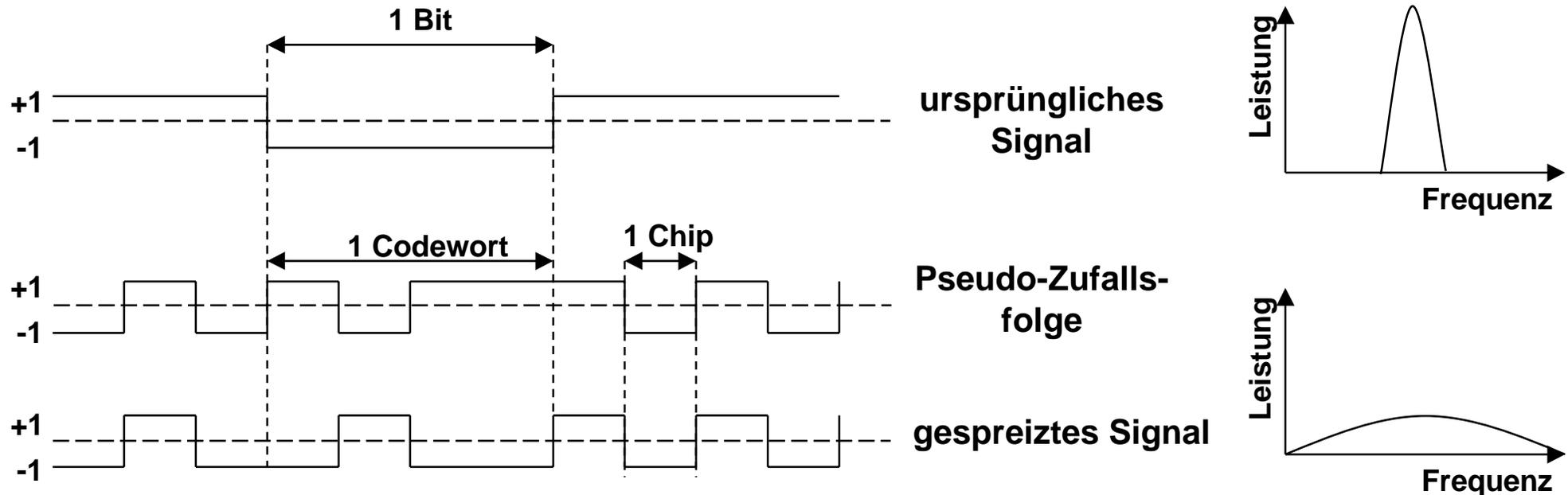
- Verwendung einer Bandbreite, welche viel größer ist als die des modulierten Signals
- Spreizen des Signals über die komplette Bandbreite unter Verwendung einer Pseudo-Zufallsfolge

### Vorteile:

- unterschiedliche Pseudo-Zufallsfolgen vorausgesetzt können mehrere Signale ohne dynamische Koordination innerhalb der Bandbreite „gleichzeitig“ übertragen werden
- geringe Anfälligkeit gegenüber Effekten der Mehrwegausbreitung: aufgrund der hohen Sendebandbreite wird immer nur ein kleiner Teil des belegten Spektrums von frequenzselektivem Rayleigh-Fading beeinflusst, so dass die typischen Signaleinbrüche schwächer sind als bei Schmalbandsystemen
- geringe spektrale Leistungsdichte
- geringe Beeinflussung durch Störsignale unterschiedlicher Ursachen (Antijamming) einschließlich Gleichkanalinterferenz (Antiinterference)
- Existenz von Übertragungen (und damit auch deren Entschlüsselung) schwer erkennbar (von besonderer Relevanz für militärische Systeme)

### Verfahren:

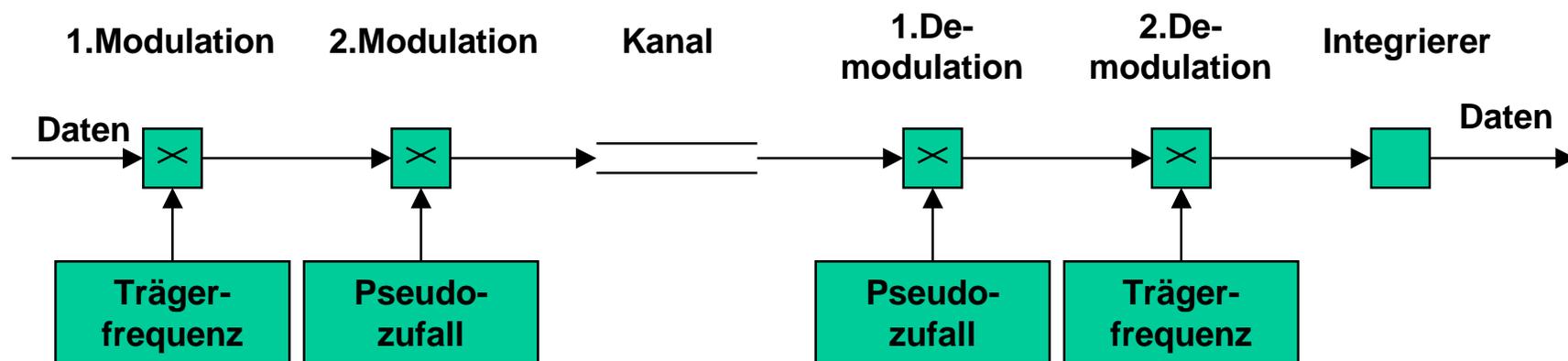
- Direct Sequence
- Frequency Hopping



- Aufteilung des Signals in redundante Informationseinheiten (Chips)
- sowohl Sender als auch Empfänger müssen Chipfolge (Spreizcode) kennen
- mindestens 10 Chips pro Bit
- Spreizung der Chips über eine große Bandbreite
- dadurch geringere Übertragungsleistung notwendig als bei Schmalbandübertragung
- für andere Nutzer der Luftschnittstelle erscheint Übertragung als Hintergrundrauschen
- Wiederherstellung des ursprünglichen, u.U. gestörten, Signals aufgrund der Redundanz möglich

### Funktionsweise:

- zweifache Modulation:
  - a. Modulation der Daten auf die Trägerfrequenz
  - b. Modulation des modulierten Trägers auf ein gespreiztes breitbandiges Signal
- bei Empfänger umgekehrtes Vorgehen mit identischen Pseudo-Zufallsfolgen
- Integration über die Bitperiode



### Funktionsweise:

- jeder Station werde ein eindeutiger 8-Bit Code als Chip-Sequenz zugeordnet \*)
- zum Übertragen einer 1 sendet sie ihre Chip-Sequenz, zum Übertragen einer 0 sendet sie deren Komplement
- bipolare Notation mit 0 als -1 and 1 als +1
- alle Chip-Sequenzen sind paarweise orthogonal,  
d.h. seien S und T orthogonale Chipsequenzen ( $S \neq T$ ), dann gilt:

$$S \bullet T \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0, \quad S \bullet \bar{T} = 0, \quad S \bullet S = 1$$

- wenn zwei oder mehrere Stationen gleichzeitig senden, addieren sich ihre Signale linear

### Chip-Sequenzen von vier Stationen:

A: (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)  
 B: (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)  
 C: (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)  
 D: (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)

### Beispielübertragungen: (es wird jeweils genau ein Bit übertragen)

- 1 -	C	$E_1 = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)$
- 1 1 -	B + $\bar{C}$	$E_2 = (-2 0 0 0 +2 +2 0 -2)$
1 0 - -	A + $\bar{B}$	$E_3 = (0 0 -2 +2 0 -2 0 +2)$
1 0 1 -	A + $\bar{B}$ + C	$E_4 = (-1 +1 -3 +3 -1 -1 -1 +1)$
1 1 1 1	A + B + $\bar{C}$ + D	$E_5 = (-4 0 -2 0 +2 0 +2 -2)$
1 1 0 1	A + B + $\bar{C}$ + D	$E_6 = (-2 -2 0 -2 0 -2 +4 0)$

\*) vereinfachtes Beispiel, sonst mindestens 10 Bit

$E_i$  = übertragene Chipsequenz für Fall i

### Auf Empfängerseite:

- um den Bitstream einer bestimmten Station „herauszufiltern“, muß der Empfänger die Chip-Sequenz dieser Station kennen
- um die Bits der Station mit Chip-Sequenz C aus der empfangenen Sequenz E zu erhalten, berechnet er  $E \bullet C$ .
- zum Beispiel:

$$E = A + \bar{B} + C \quad E \bullet C = (A + \bar{B} + C) \bullet C = A \bullet C + \bar{B} \bullet C + C \bullet C = \underbrace{0 + 0}_{\substack{\uparrow \\ \text{Wegen der Orthogonalität}}} + 1 = 1$$

Für die sechs Beispielübertragungen erhält man so:

$$E_1 \bullet C = (1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1) / 8 = 1$$

$$E_2 \bullet C = (2 + 0 + 0 + 0 + 2 + 2 + 0 + 2) / 8 = 1$$

$$E_3 \bullet C = (0 + 0 + 2 + 2 + 0 - 2 + 0 - 2) / 8 = 0$$

$$E_4 \bullet C = (1 + 1 + 3 + 3 + 1 - 1 + 1 - 1) / 8 = 1$$

$$E_5 \bullet C = (4 + 0 + 2 + 0 + 2 + 0 - 2 + 2) / 8 = 1$$

$$E_6 \bullet C = (2 - 2 + 0 - 2 + 0 - 2 - 4 + 0) / 8 = -1$$

d.h. Station überträgt 1

Station überträgt 1

Station überträgt nichts

Station überträgt 1

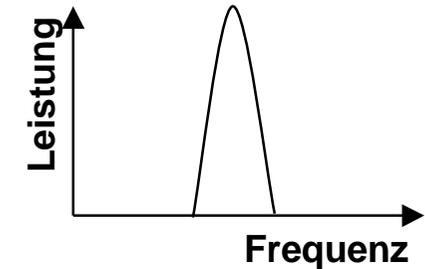
Station überträgt 1

Station überträgt 0

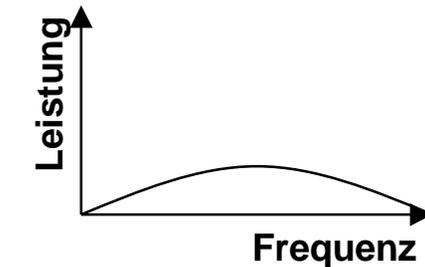
Wegen der Orthogonalität



Schmalband-  
signal



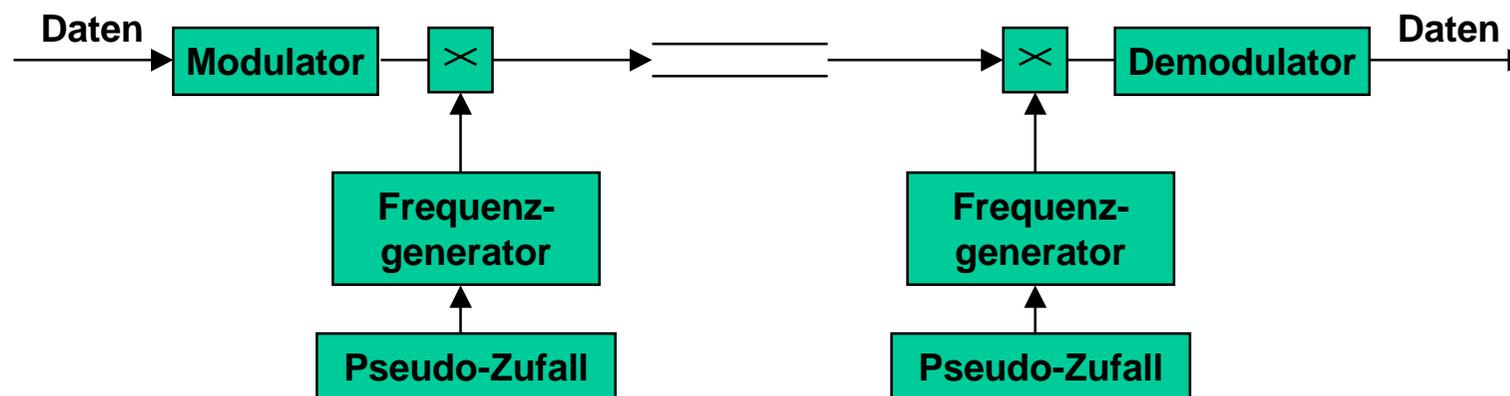
Frequency  
Hopping Signal



- Trägerfrequenz wird in bestimmten Zeitabständen gewechselt
- synchroner Wechsel der Frequenz gemäß einer Pseudozufallszahlenfolge zwischen Sender und Empfänger
- Kollisionen möglich, falls zwei oder mehr Sender zufällig die gleiche Frequenz benutzen  
Abhilfe: Verwendung orthogonaler Zufallscodes
- Nord Amerika: 75 „Hopping-Channels“ und Leistung < 1W.
- Verwendung in Kombination mit TDMA/FDMA (GSM) aber auch CDMA

### Funktionsweise:

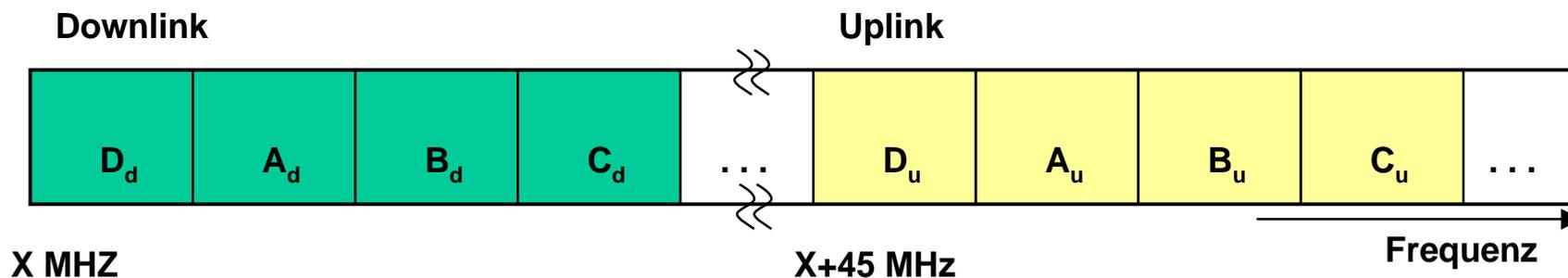
- Variieren der Trägerfrequenz in diskreten Stufen:
  - Folge der Stufen durch Pseudo-Zufallsfolge bestimmt
  - Empfänger muss identische Folge benutzen
- Zwei Kategorien hinsichtlich der Anzahl übertragener Bits pro Stufe:
  - max. ein Bit: Fast Frequency Hopping
  - mehrere Bits: Slow Frequency Hopping



- wurde bereits in den ersten mobilen Kommunikationssystemen mit voll-duplex Betrieb verwendet und ist Standard in analogen Systemen

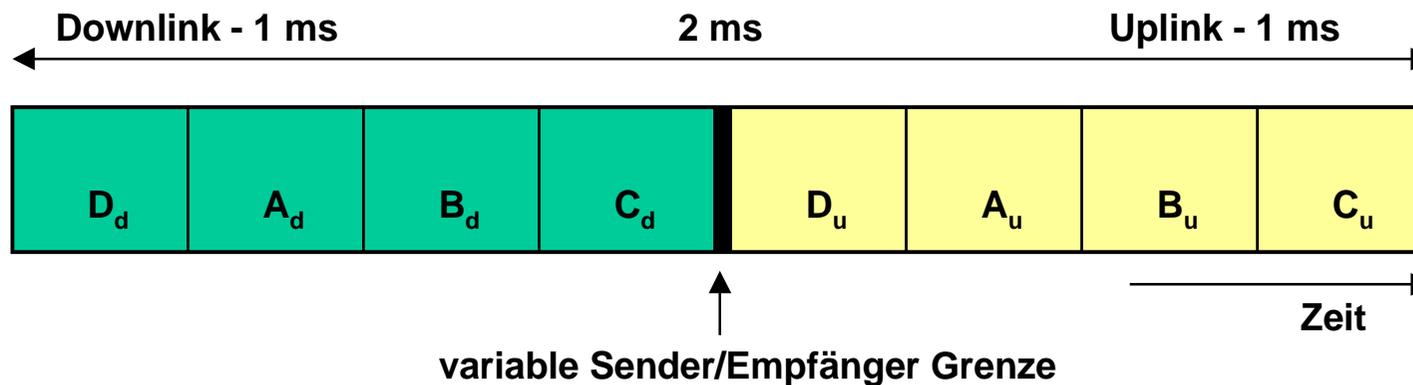
### Funktionsweise:

- für eine voll-duplex Kommunikation werden zwei Trägerfrequenzen benutzt, eine für das Senden und eine für das Empfangen (eine für den Uplink und eine für den Downlink)
- um eine ausreichende Trennung zwischen Sender und Empfänger zu erreichen:
  - muss ein Schutzband zwischen den Uplink- und Downlink-Frequenzen zugeteilt werden (zum Beispiel 45MHz GSM System)
  - müssen entweder zwei separate Antennen benutzt werden, oder ein „Duplexer“, welcher zwei Bandpassfilter enthält, die jeweils ungewünschte Signale unterdrücken



### Funktionsweise:

- nur eine einzige Trägerfrequenz
- zeitliche Trennung von Download- und Upload-Bereich



	FDD	TDD
<b>Flexibilität</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(-) zwei Träger pro Verbindung mit ausreichender Trennung</li> <li>(-) effiziente Symmetrie nur mit zwei gleichen Sender/Empfänger-Bandbreiten möglich</li> <li>(-) Asymmetrie erfordert ungleiche S/E-Trägerbandbreiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(+) ein Träger pro Verbindung</li> <li>(+) effiziente Symmetrie möglich mittels 50% Rahmenaufteilung</li> <li>(+) effiziente Asymmetrie bei fester Bandbreite und variabler Sender/Empfänger-Grenze</li> </ul>
<b>Komplexität</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(-) Duplexer benötigt</li> <li>(-) FDD Spektrum erfordert immer einen gespiegelten Frequenzbereich und ist daher sehr „verschwenderisch“</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(+) kein Duplexer benötigt</li> <li>(+) TDD begnügt sich mit schmalen Frequenzbereichen</li> </ul>
<b>Effizienz und Durchsatz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(+) hohe spektrale Effizienz mit QAM-Modulation</li> <li>(+) zwei Träger bieten eine hohen voll-duplex Durchsatz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(+) hohe spektrale Effizienz mit QAM-Modulation</li> <li>(+) Flexible Frequenzwiederverwendung bietet größere Systemkapazität</li> </ul>

# GSM900 vs. GSM1800

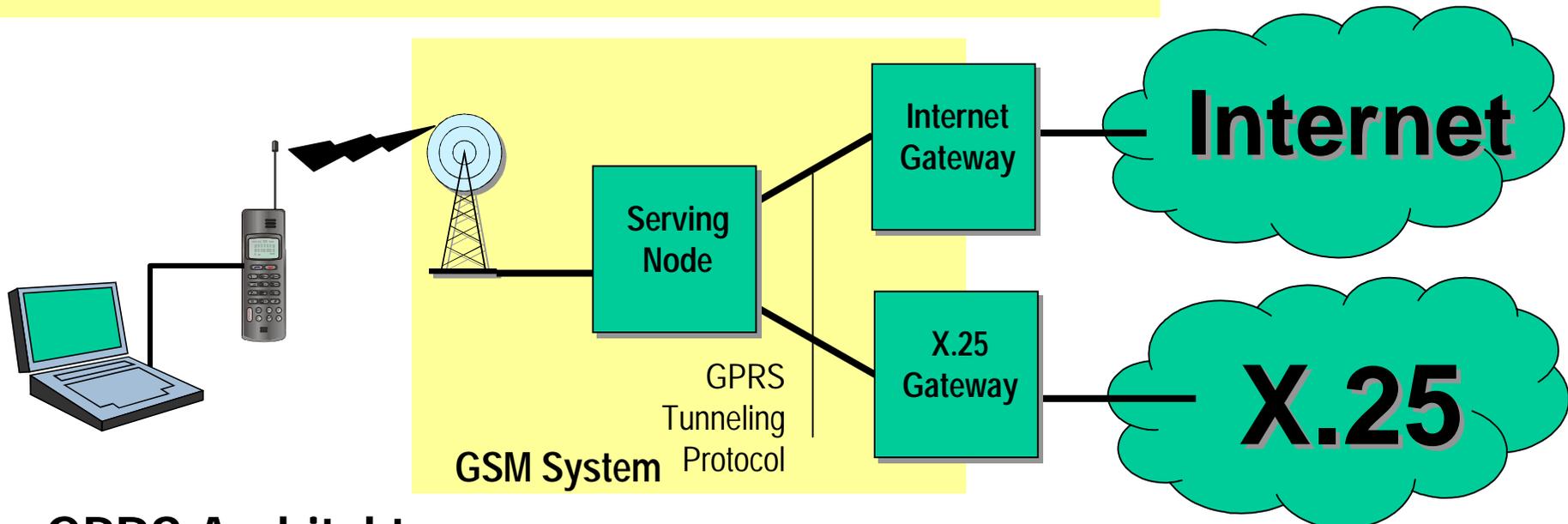
Kriterium	GSM900	GSM1800
Frequenz (Uplink)	890 MHz - 915 MHz	1710 MHz - 1785 MHz
Frequenz (Downlink)	935 MHz - 960 MHz	1805 MHz - 1880 MHz
Duplexabstand	45 MHz	95 MHz
Bandbreite Up- und Downlink	2 x 25 MHz	2 x 75 MHz
Bandbreite eines Frequenzkanals	200 kHz	200 kHz
Zugriffsverfahren	FDMA & TDMA	FDMA & TDMA
Trägerfrequenzen	124	372
Zeitschlitz je Trägerfrequenz	8	8
Verkehrskanäle (full rate)	992	2976
Dauer eines TDMA-Rahmens	4,616 ms	4,616 ms
Dauer eines Datenbursts	576,9 $\mu$ s	576,9 $\mu$ s
Bitanzahl je Datenburst	156,25	156,25
Bitdauer	3,692 $\mu$ s	3,692 $\mu$ s
Bitrate	270,833 kBit/s	270,833 kBit/s
Modulationsverfahren	GMSK	GMSK
Zellradius	2 - 35 km	0,2 - 8 km
MS Leistung max	20 Watt	1 Watt

**Problem:** Datenkommunikation in GSM bisher nur verbindungsorientiert

- sehr teuer (man zahlt für die Dauer der Verbindung und nicht für übertragene Pakete)
- sehr langsam (Datenrate von 9,6 kbps zu wenig für Internetapplikationen)

**Lösung:**

- Kanalbündelung
- paketorientierte Übertragung
- nahtlose Anbindung an Internet und X.25
- variable Übertragungsraten bis 115 kbps

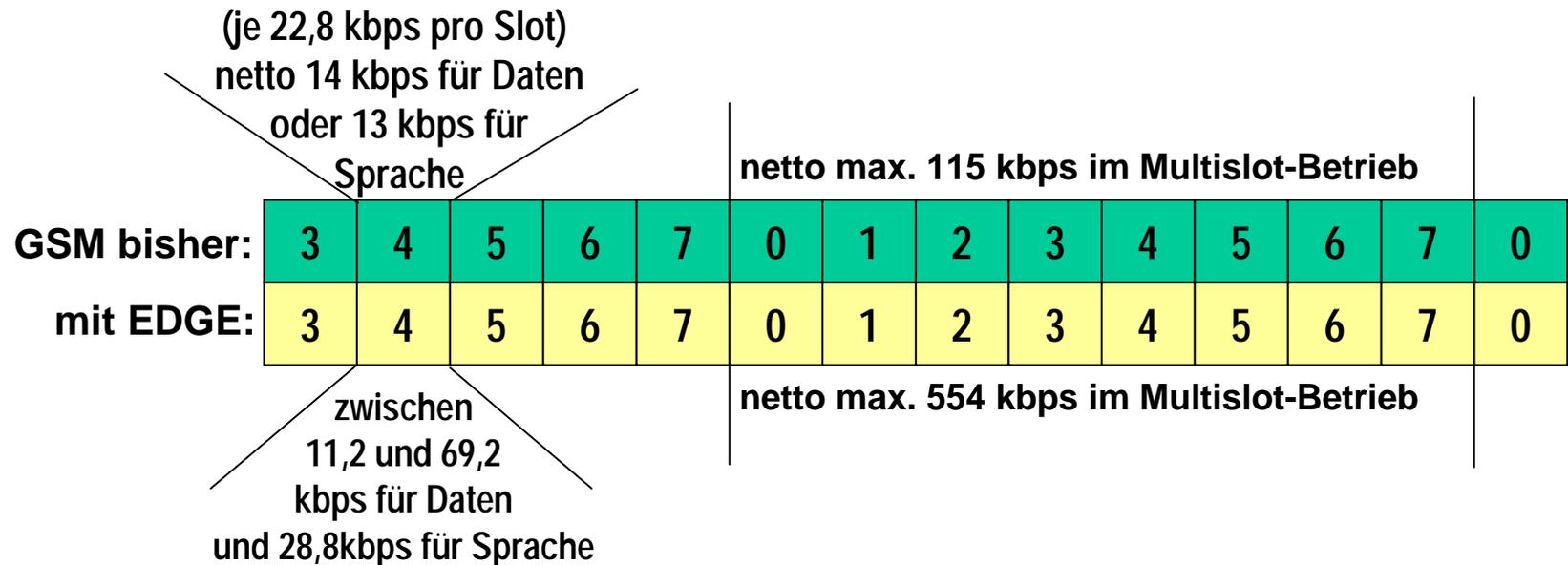
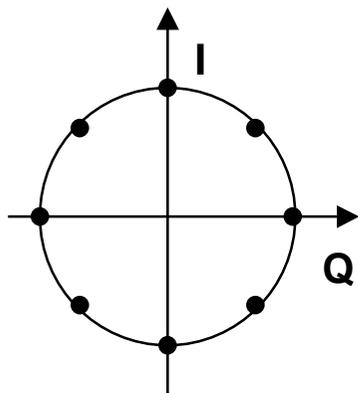


## GPRS Architektur



Vervierfachung der Übertragungskapazität in GSM-Bändern durch Verwendung der Modulationstechnik 8-PSK und unter Beibehaltung des Zugriffsverfahrens FDMA/TDMA

### 8-PSK: Rahmenstruktur:



- Wiederverwendung bestehender Frequenzbänder
- Ausstattung der Basisstationen mit neuen Empfängern erforderlich
- ansonsten: Beibehaltung der Netzinfrastruktur, ggfs. schrittweiser Ausbau
- keine neue Lizenzierung, keine neue Zell- und Frequenzplanung
- kombinierter Betrieb aus bisherigen und Edge-Empfängern (je nach Bedarf)
- allerdings: sehr anfällig gegen Interferenzen

# Aufteilung des Frequenzspektrums

