

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:
(in München)

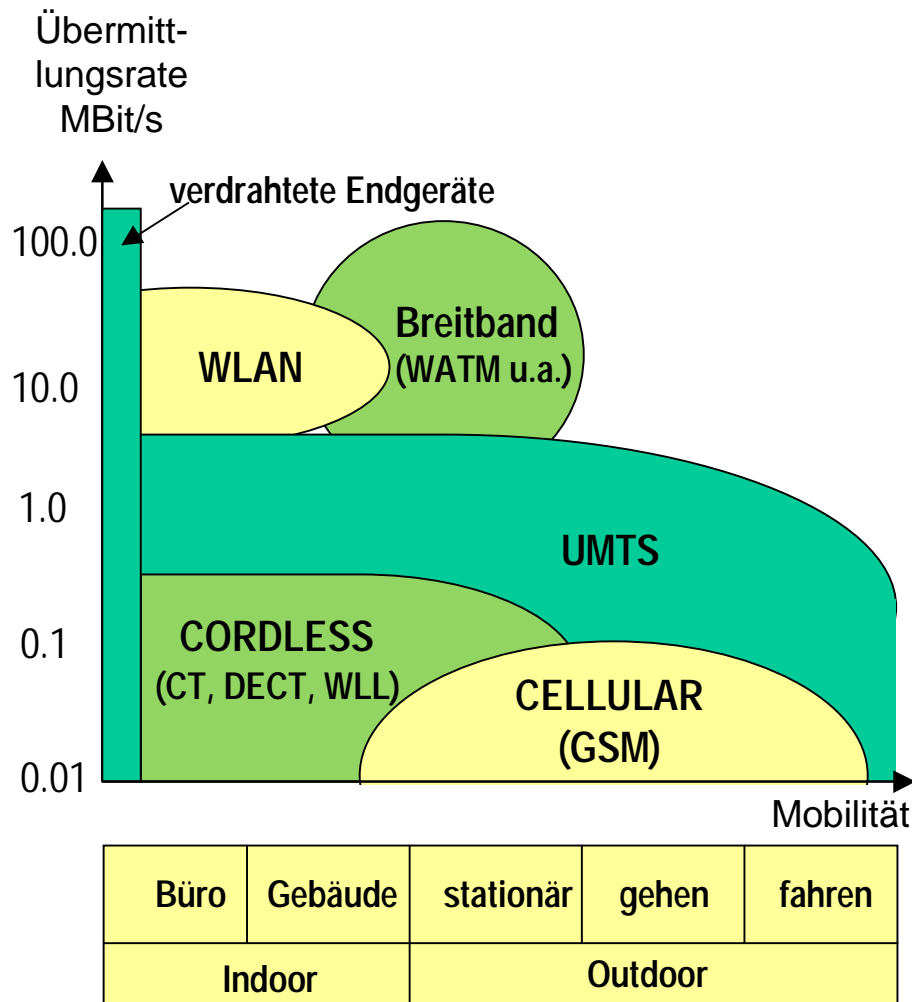
- Markus Garschhammer
- Annette Kosteletzky

Mitarbeiter:
(in Aachen)

- Frank Imhoff
- Axel Küpper
- Jens Meggers

Mobilfunknetze

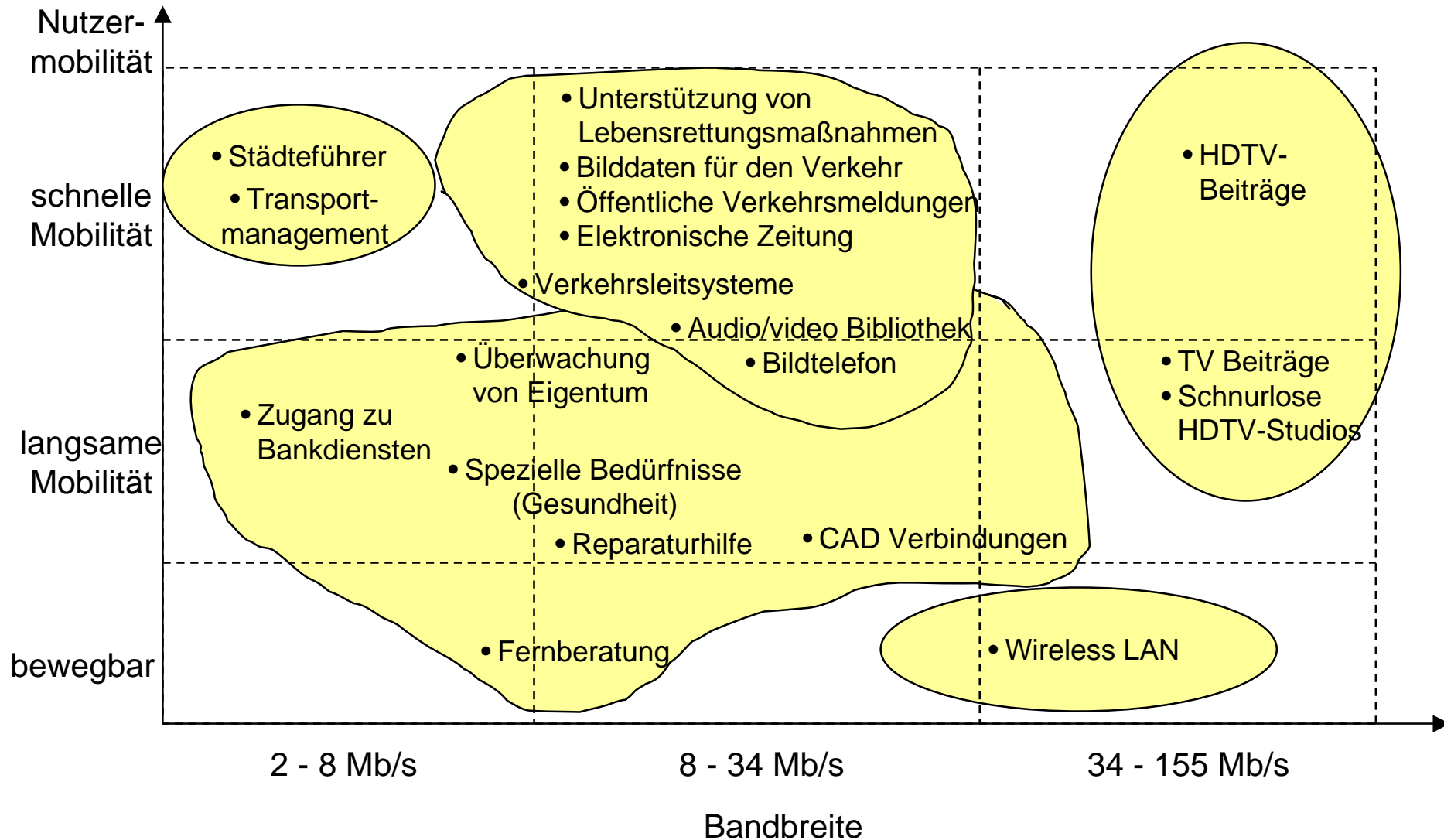
Teil 1



[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 (zellularer 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, ...

Anwendungen nach Mobilität und Bandbreite



Luftschnittstelle

- Mehrwegeausbreitung an Bergen, Gebäuden, Vegetation und Fahrzeugen verursacht Laufzeitverzögerungen von bis zu einigen 10µs und damit einem Mehrfachen der Bitlänge (z.B. 3,69 µs 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

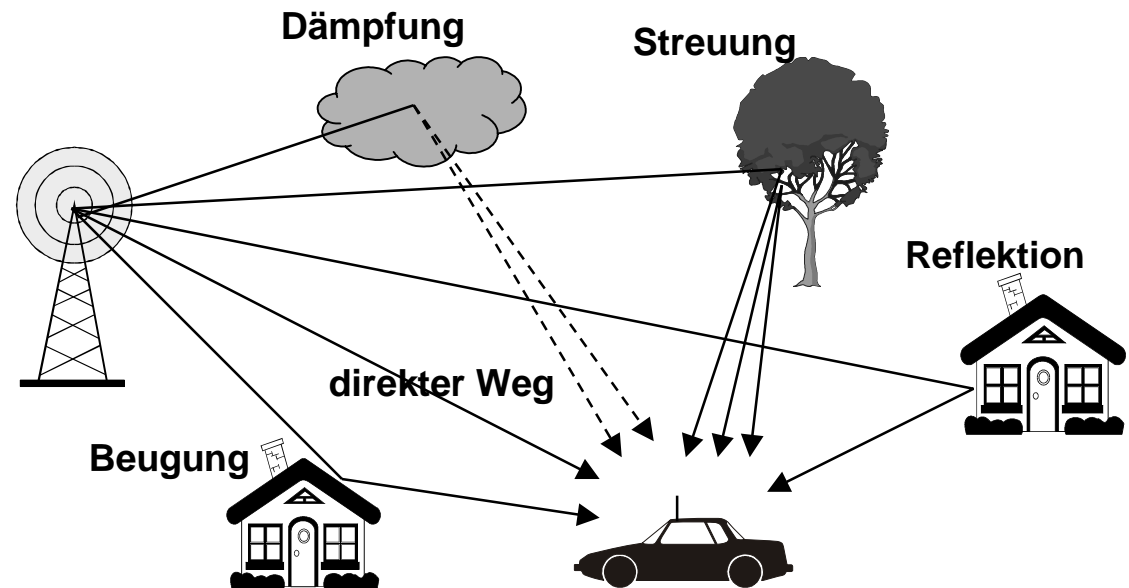
Ursache	Wirkung	Bedeutung
Mehrwegausbreitung	Fast Fading	Stark schwankender Empfangspegel über die Entfernung
	Delay Spread (Zeitdispersion)	Empfangssignal setzt sich aus vielen unterschiedlich verzögerten Komponenten zusammen
Bewegung	Doppelverschiebung (Frequenzdispersion)	Änderung der Entfernung zwischen Sender und Empfänger führt zu einer Änderung der Phasenlage des Empfangssignals
Signal-dämpfung	Pfadverlust	Veränderung der Ausbreitungsbedingungen von Wellen bei Nebel oder Regen in Abhängigkeit der Frequenz
Abschattung	Slow Fading	langsame Schwankungen des Mittelwertes des Pegelverlaufs

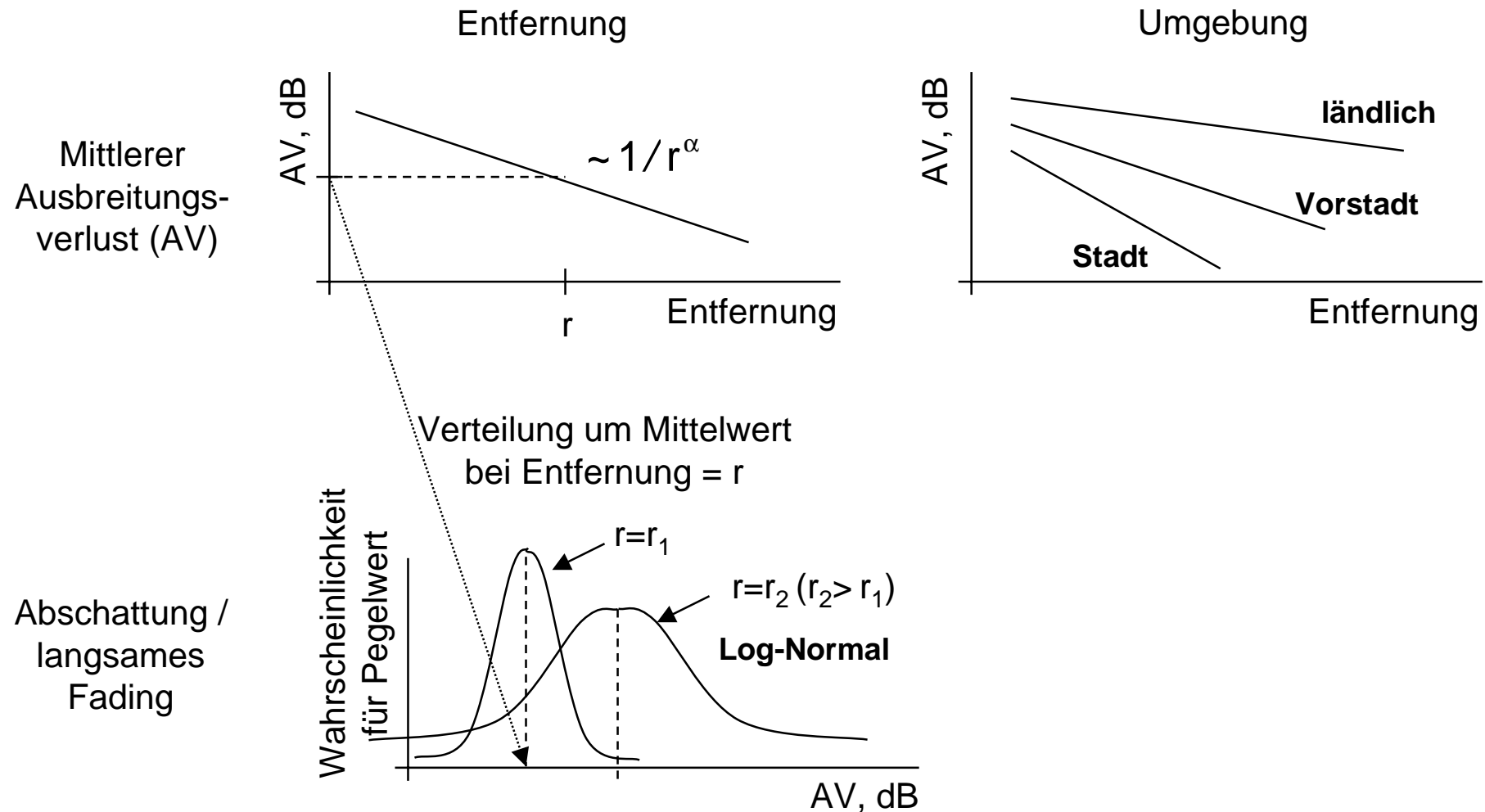
Faktoren, welche die Ausbreitung beeinflussen:

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

Ausbreitungsmechanismus:

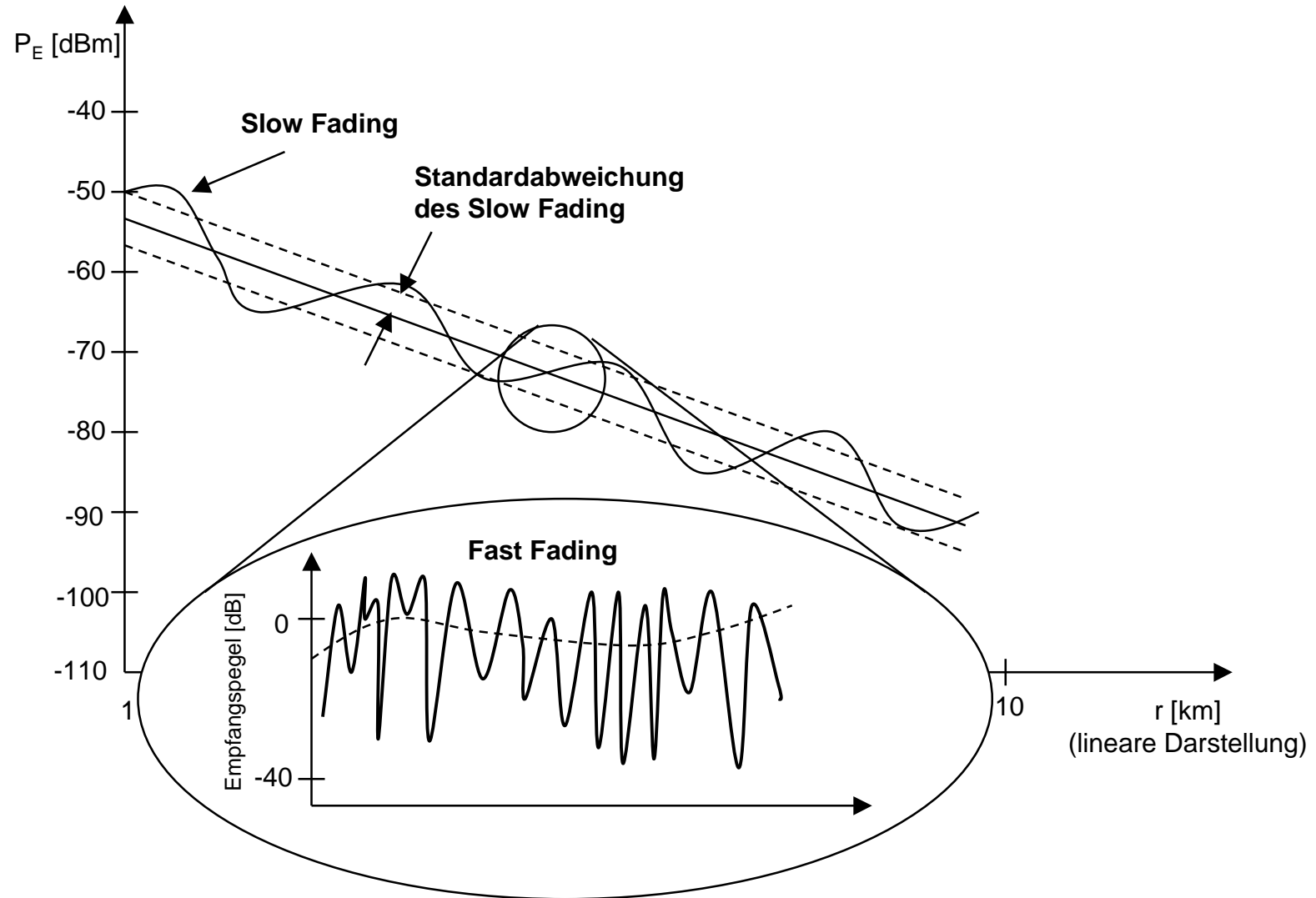
- Dämpfung: Spreizung, Absorption (Regen, Vegetation)
- Beugung / Ablenkung: scharfe und runde Kanten
- Brechung: Brechungsindex wird mit zunehmender Höhe kleiner
- Reflektion: hart, sanft ...
- Streuung: hart, sanft ...





*) vereinfachte Darstellung

[Rha, P.S.]: Mobile Radio Propagation,
http://online.sfsu.edu/~psrha/ENGR890_Lec4_Prop-I/sld001.htm



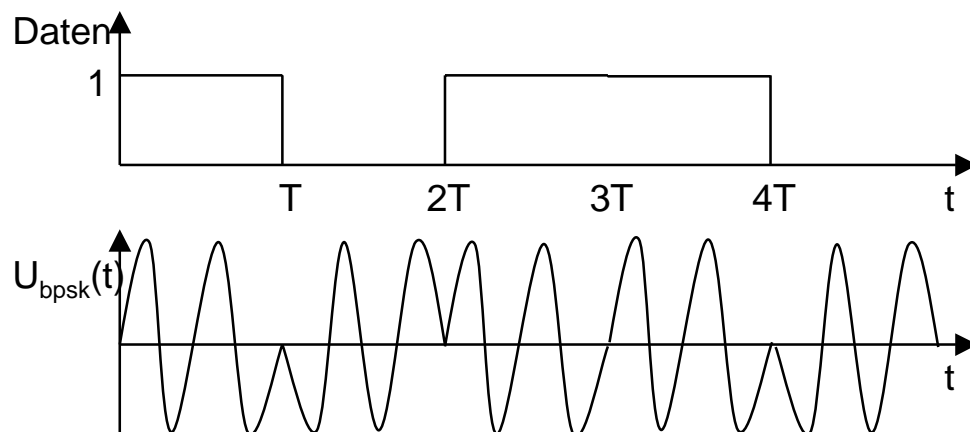
[David, K.; Benkner, T.]: Digitale Mobilfunksysteme, Teubner

Favorisiertes Prinzip:

- Phasenumtastung (engl. PSK, Phase Shift Keying) (Umtasten = bei digitaler Modulation wird zwischen zwei diskreten Wellenformen umgeschaltet)
- Anwendung: Richtfunk, Satellitenfunk, digitale Mobilfunksysteme
- Vorteil: selbst bei hohen Übertragungsraten relativ störsicher
- bei Phasenumtastung wird zwischen M verschiedenen Phasen umgetastet, wobei M eine Zweierpotenz ist

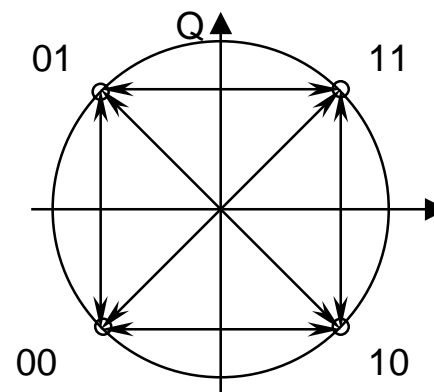
einfachste Variante (binäre PSK mit M=2)

- das modulierte Digitalsignal tastet die Trägerphase entweder auf 0° oder auf 180°



In UMTS: (M=4)

- Kombination aus Quadraturphasenumtastung und Quadraturamplitudenmodulation



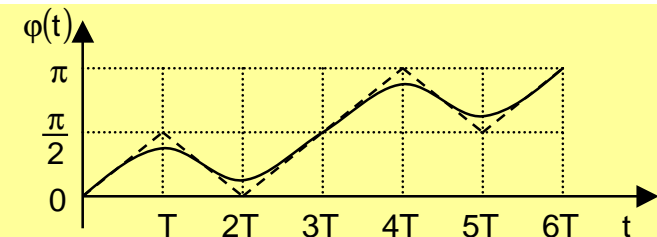
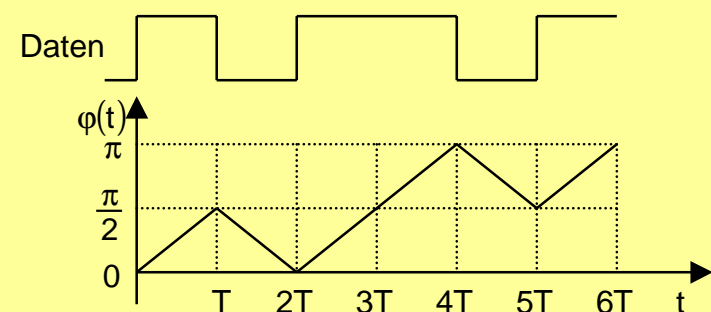
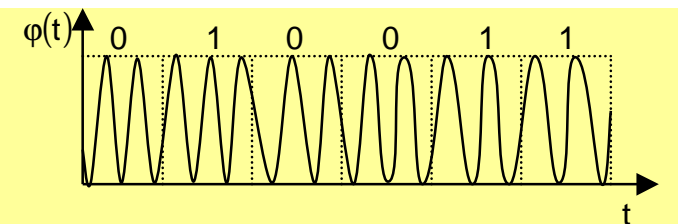
I = Signalkomponente
(in Phase mit Träger-
signal)

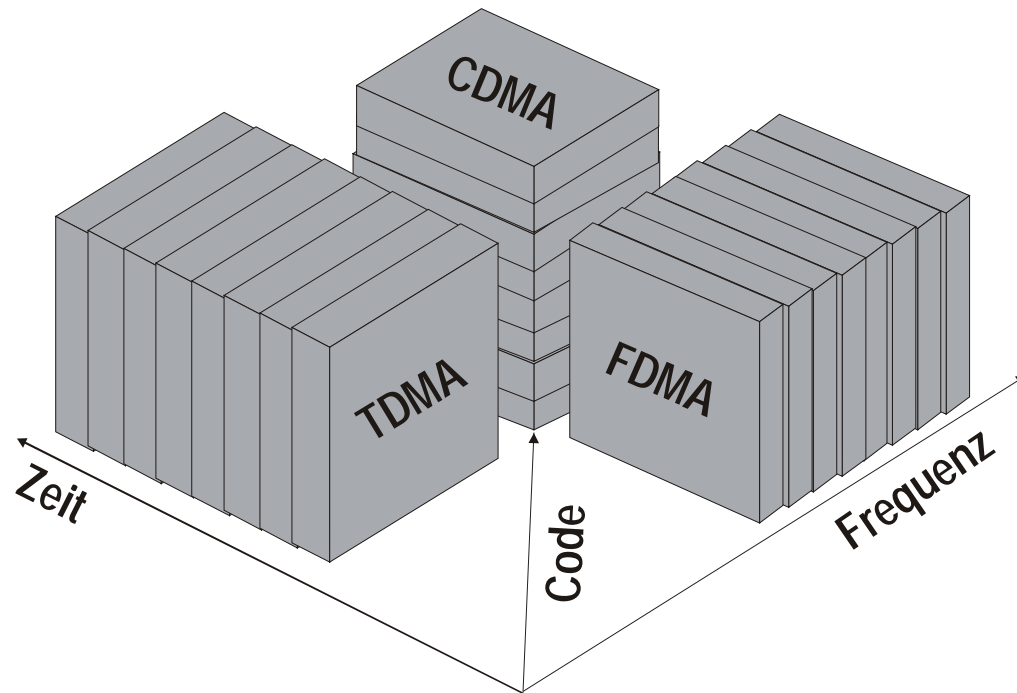
Q = Quadraturkompo-
nente (senkrecht zur
Trägerphase)

- 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)





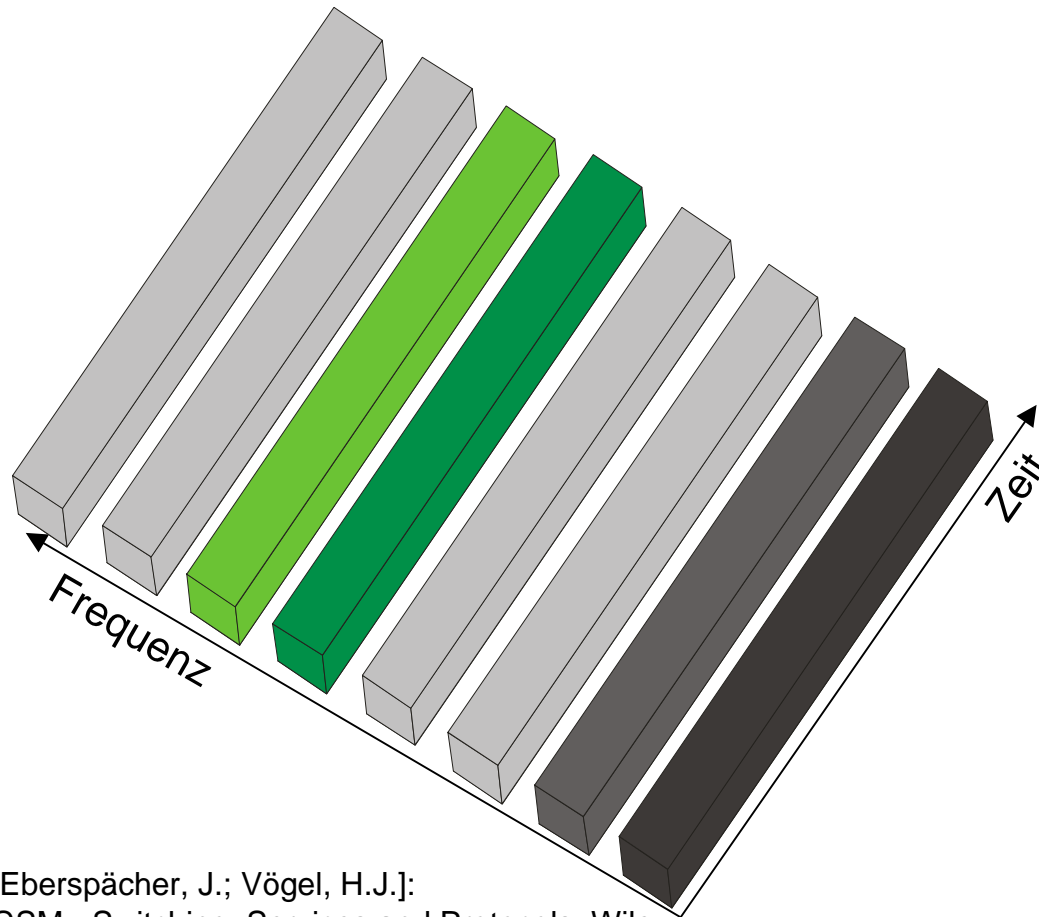
[Eberspächer, J.; Vögel, H.J.]:
GSM - Switching, Services and Protocols, Wiley

Problem:

- Übertragungskanal wird von mehreren Teilnehmern gleichzeitig benutzt
 - mobile Stationen konkurrieren bei der Nutzung von Frequenzen
- Kollision an der Luftschnittstelle

Lösung:

- Mehrfach-Zugriffsverfahren zur Unterteilung der Frequenzbereiche in Sprachkanäle



[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:

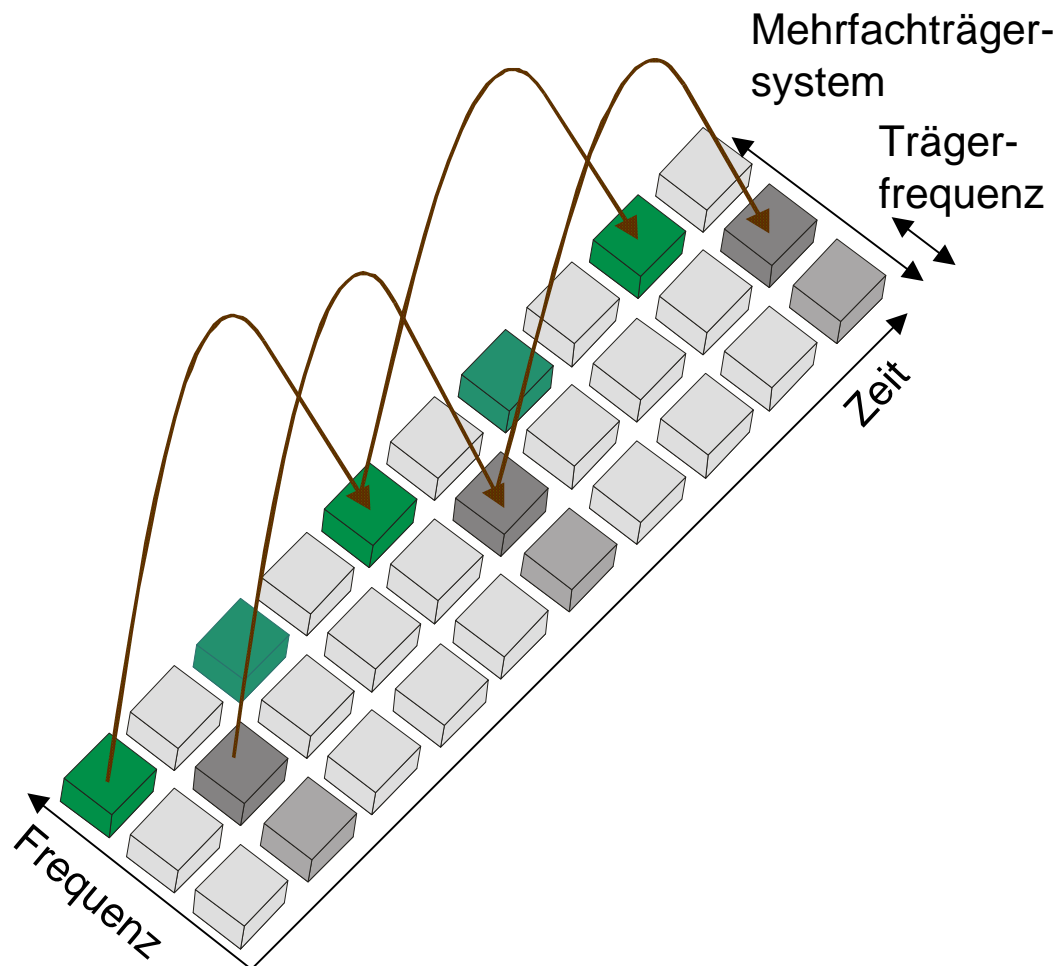
- leicht implementierbar
- keine Intersymbol-Interferenz

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

Zur Kollisionsvermeidung zwischen Teilnehmersignalen eines TDMA-Systems
Synchronisation mit der Basisstation

Problem: Mobilstationen nahe der Basisstation können früher zu senden beginnen als weiter entfernte

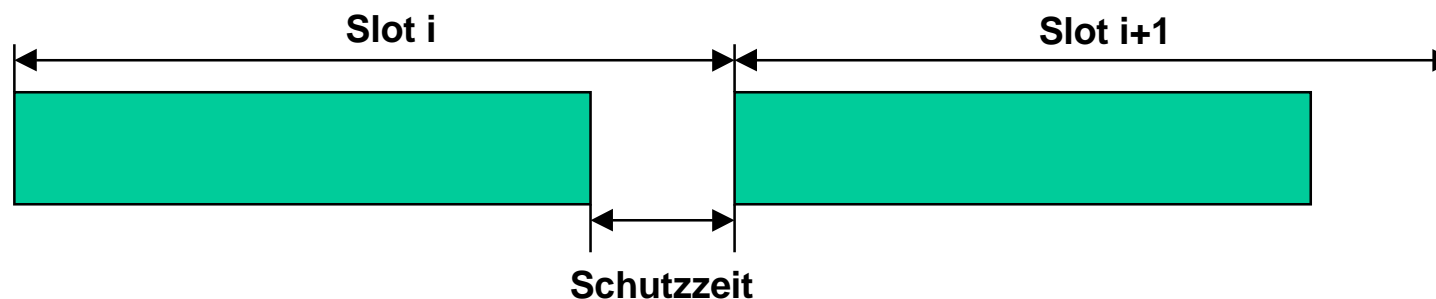
Grund: endliche Signalausbreitungsgeschwindigkeit

Beispiel: Entfernung Mobilstation \longleftrightarrow Basisstation 35 km

=> Dauer des Synchronisationssignals: Basisstation \rightarrow mobiles Endgerät:

$$\frac{35 \cdot 10^3 \text{ m}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 117 \mu\text{s} \quad \text{mit Rückweg: } 234 \mu\text{s}$$

Lösung: zur Vermeidung von Störungen zwischen benachbarten Zeitschlitzten Einfügen einer Schutzzeit zwischen den Slots



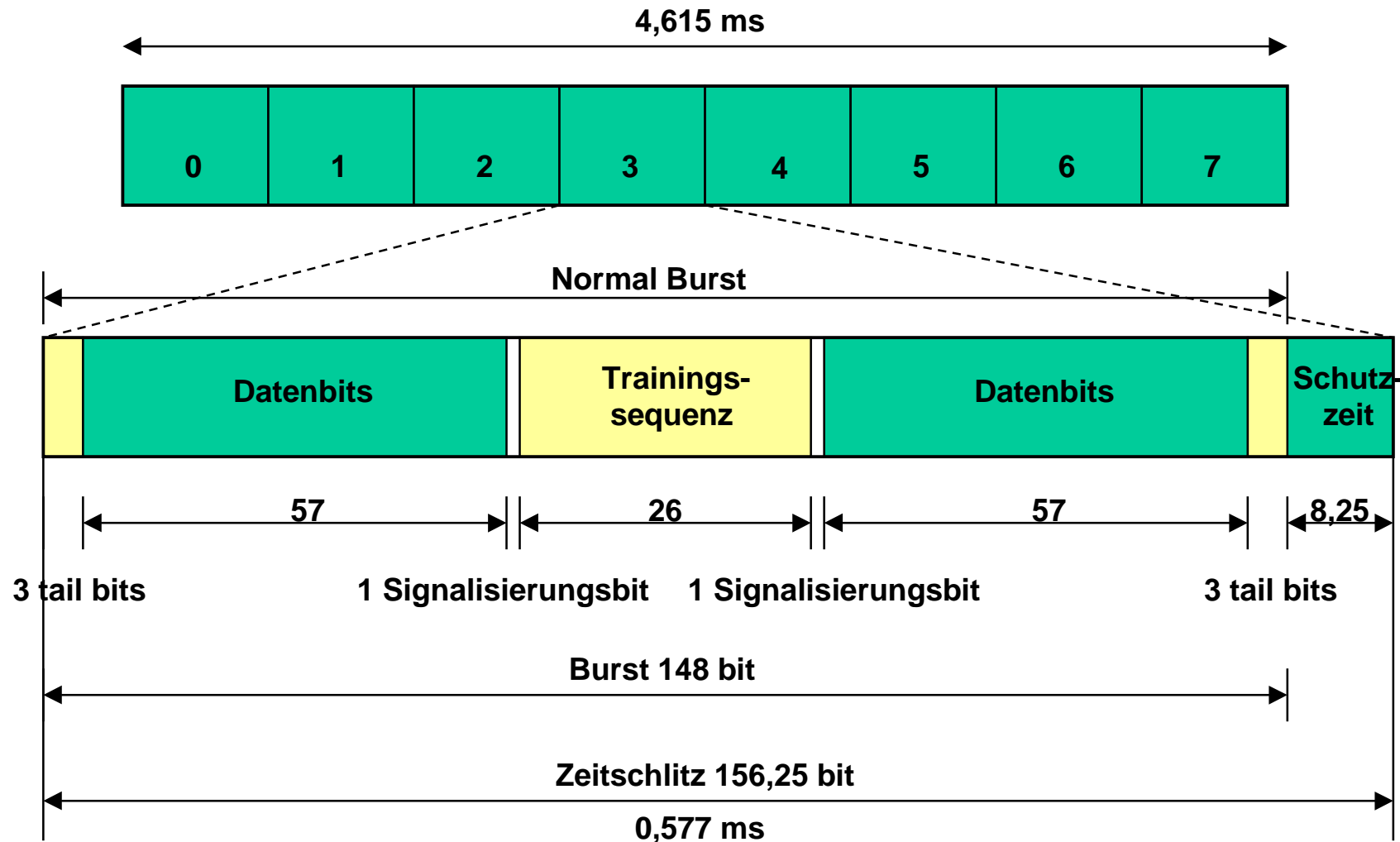
aber: beträchtliche Minderung der Effizienz, da keine Datenübertragung zu dieser Zeit

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

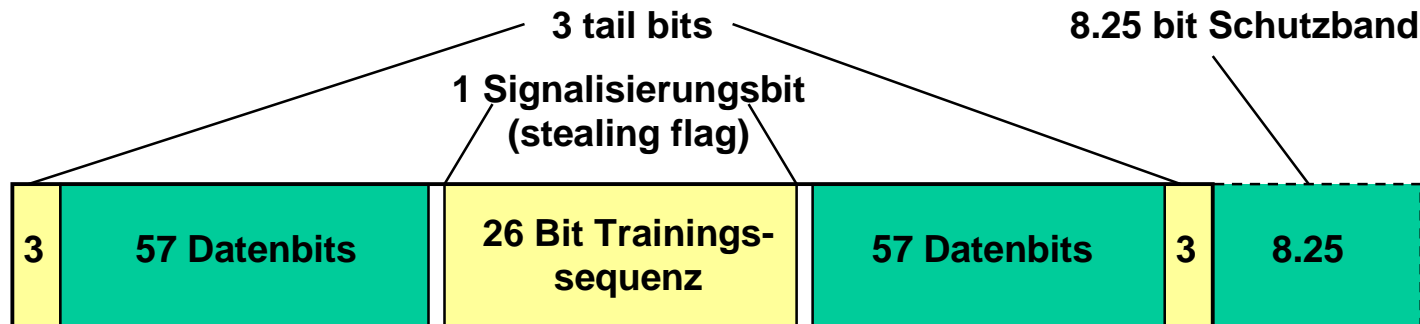
Lösung: Timing Advance: Basisstation misst Signallaufzeit bis zur Mobilstation und veranlasst, dass diese früher zu senden beginnt
 \Rightarrow Reduzierung der Schutzzeit auf $30\mu\text{s}$

Tail Bits und Trainingssequenzen:

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



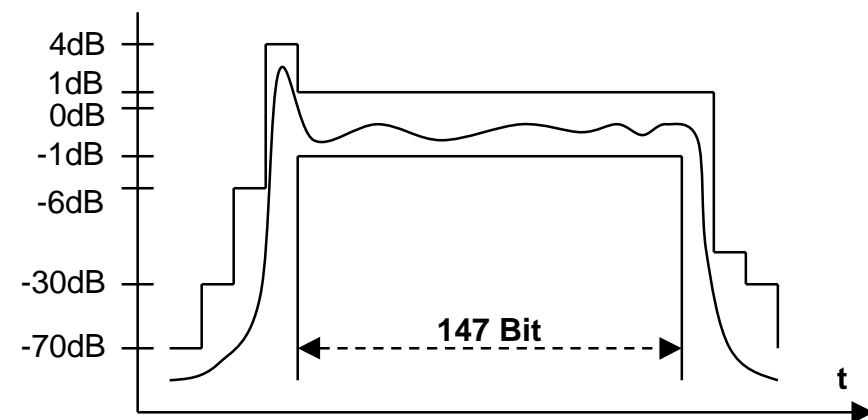
Normal Burst



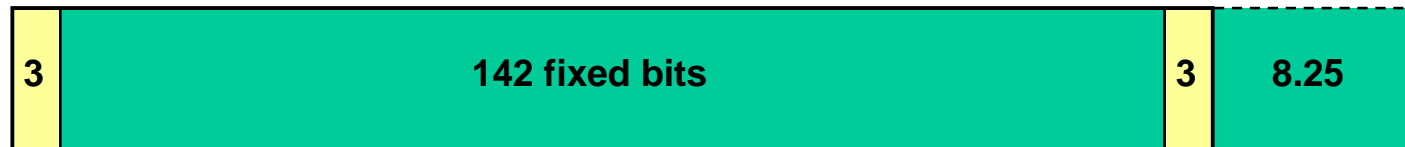
- Normal Burst dient der Nachrichtenübertragung in Verkehrs- und Steuerkanälen
- Zeitmaske erforderlich, damit zeitlich angrenzende Kanäle nicht zu stark gestört werden
=> Regelung der Sendeleistung von bis zu 70dB innerhalb von 20µs

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“

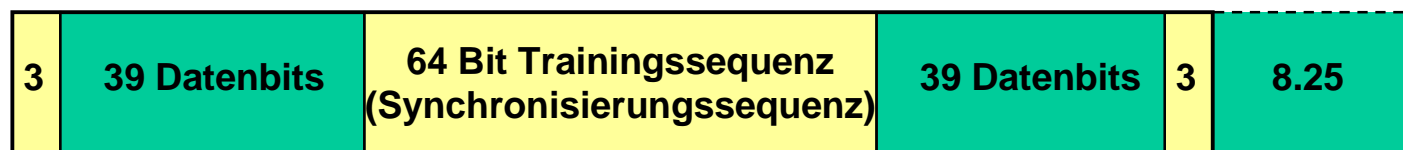


Frequency Correction Burst



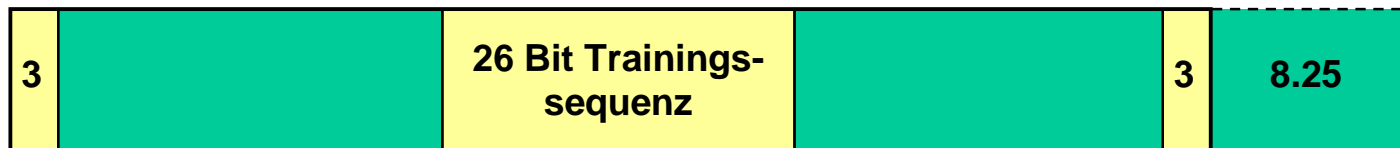
- alle 148 Bits gleich null
reine Sinusschwingung bei der GMSK-Modulation
Frequenzkorrektur bei der Mobilstation, damit mögliche Störungen benachbarter Frequenzen vermieden werden

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)

Access Burst

8	41 Bit Training- sequenz	36 Datenbits	3	68.25
---	-----------------------------	--------------	---	-------

- erstes von der Mobilstation gesendete Signal
- andere Zeitmaske als bei anderen Bursts

Burst muß bei der Basisstation in der richtigen Zeitbeziehung eintreffen, damit sich Bursts unterschiedlicher Mobilstationen nicht überlappen

besonders lange Schutzzeit: 68,25 Bit = 252 μ s = Zeit, in der der Burst eine Entfernung von 76 km zurücklegen kann

durch Zeitmaske reduziert sich maximal zulässige Signallaufzeit auf 233 μ s

maximaler Zellradius bei GSM: 35 km

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:

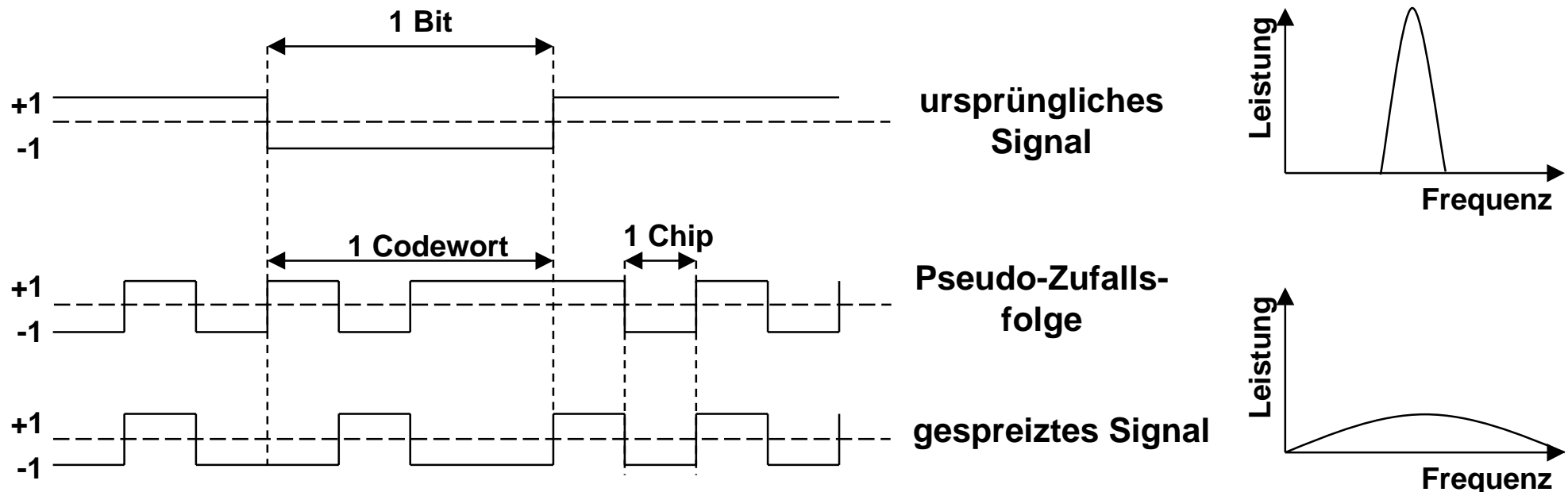
- Verwendung einer Bandbreite, welche viel größer ist als die des modulierten Signals
- Spreizen des Signals über die komplette Bandbreite unter Verwendung einer Pseudo-Zufallsfolge

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 frequenz-selektivem 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:

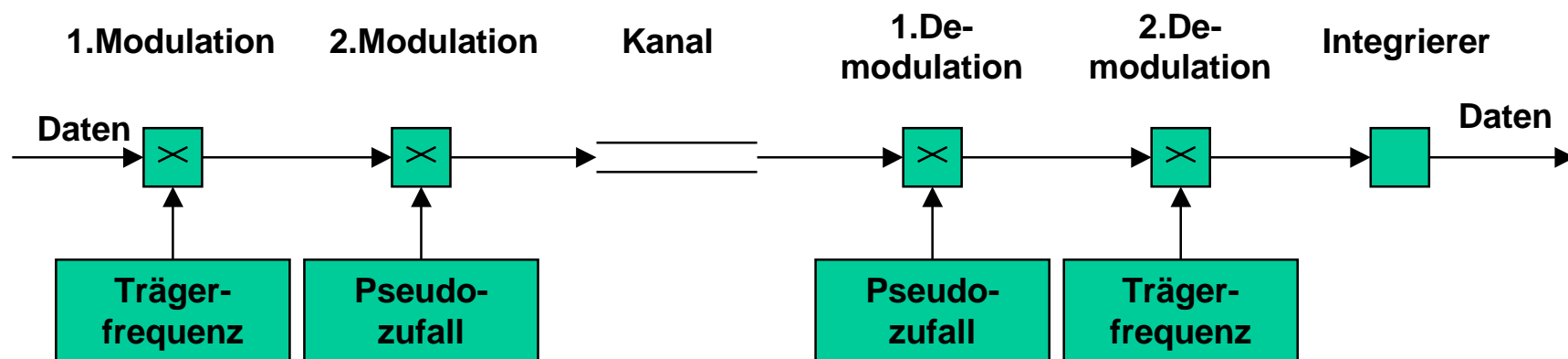
- Direct Sequence
- Frequency Hopping



- 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 + C	$E_2 = (-2 0 0 0 +2 +2 0 -2)$
1 0 - -	A + B	$E_3 = (0 0 -2 +2 0 -2 0 +2)$
1 0 1 -	A + B + C	$E_4 = (-1 +1 -3 +3 -1 -1 -1 +1)$
1 1 1 1	A + B + C + D	$E_5 = (-4 0 -2 0 +2 0 +2 -2)$
1 1 0 1	A + B + 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

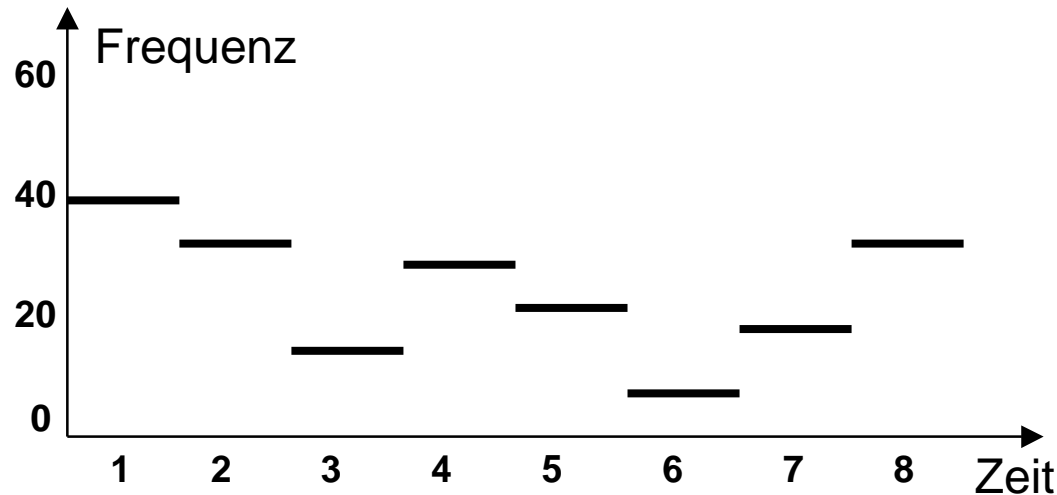
Station überträgt 1

Station überträgt nichts

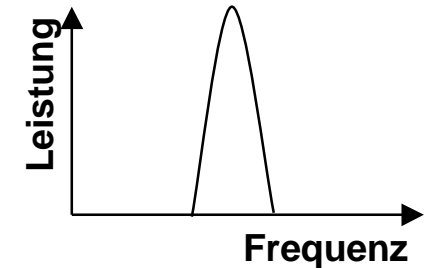
Station überträgt 1

Station überträgt 1

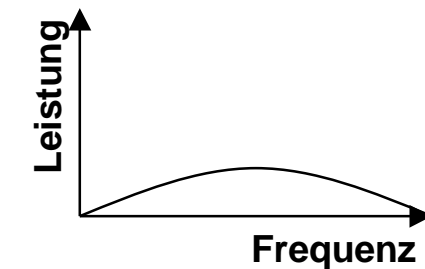
Station überträgt 0



Schmalband-
signal



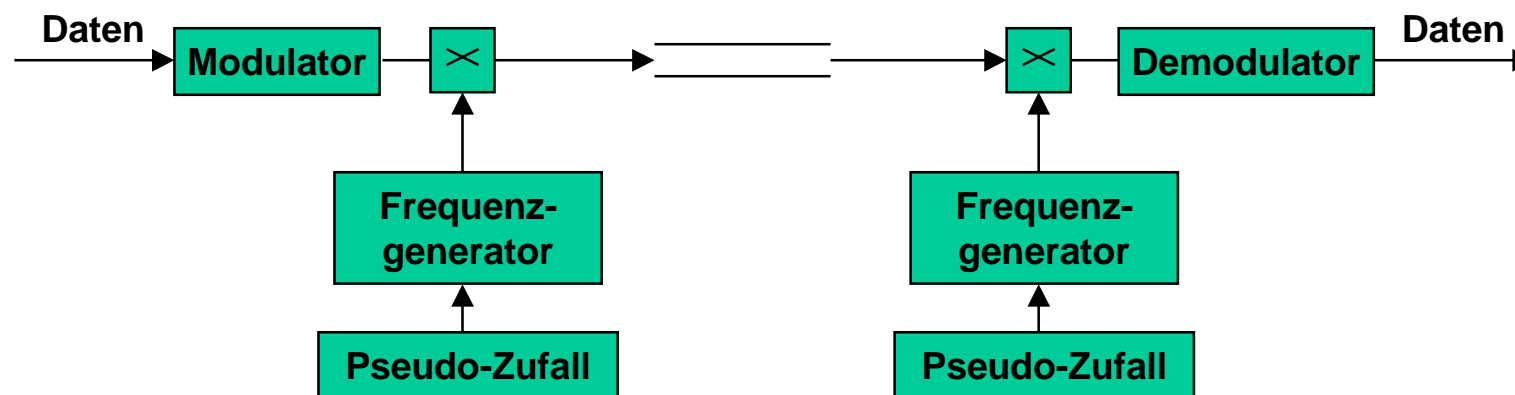
Frequency
Hopping Signal



- 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 $< 1\text{W}$.
- Verwendung in Kombination mit TDMA/FDMA (GSM) aber auch CDMA

Funktionsweise:

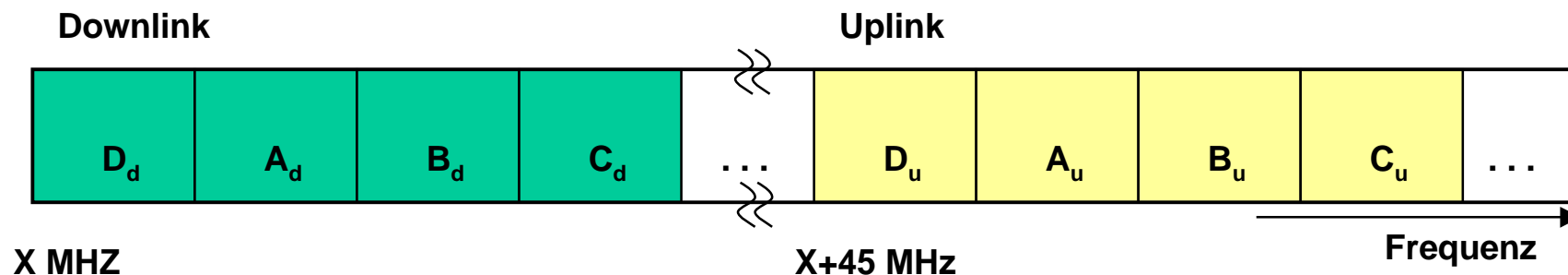
- Variieren der Trägerfrequenz in diskreten Stufen:
 - Folge der Stufen durch Pseudo-Zufallsfolge bestimmt
 - Empfänger muss identische Folge benutzen
- Zwei Kategorien hinsichtlich der Anzahl übertragener Bits pro Stufe:
 - max. ein Bit: Fast Frequency Hopping
 - mehrere Bits: Slow Frequency Hopping



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

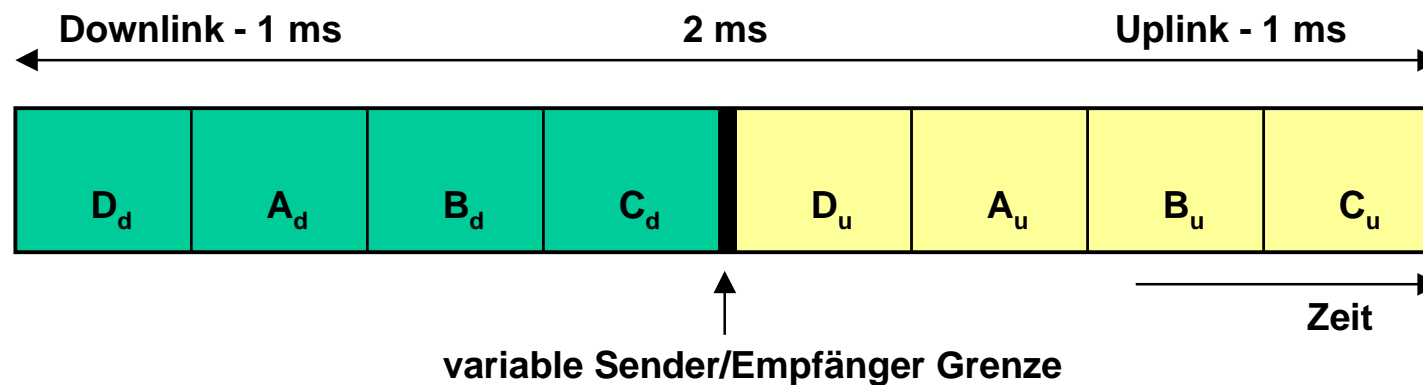
Funktionsweise:

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

GSM900 vs. GSM1800

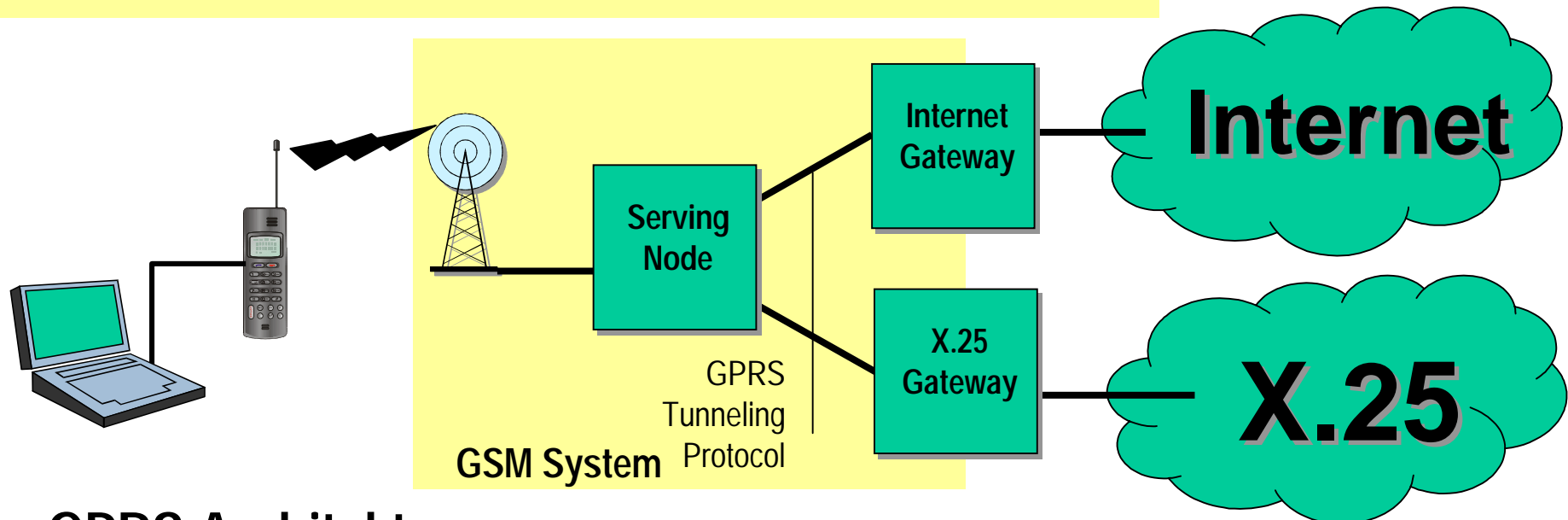
Kriterium	GSM900	GSM1800
Frequenz (Uplink)	890 MHz - 915 MHz	1710 MHz - 1785 MHz
Frequenz (Downlink)	935 MHz - 960 MHz	1805 MHz - 1880 MHz
Duplexabstand	45 MHz	95 MHz
Bandbreite Up- und Downlink	2 x 25 MHz	2 x 75 MHz
Bandbreite eines Frequenzkanals	200 kHz	200 kHz
Zugriffsverfahren	FDMA & TDMA	FDMA & 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 μ s	576,9 μ s
Bitanzahl je Datenburst	156,25	156,25
Bitdauer	3,692 μ s	3,692 μ 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:

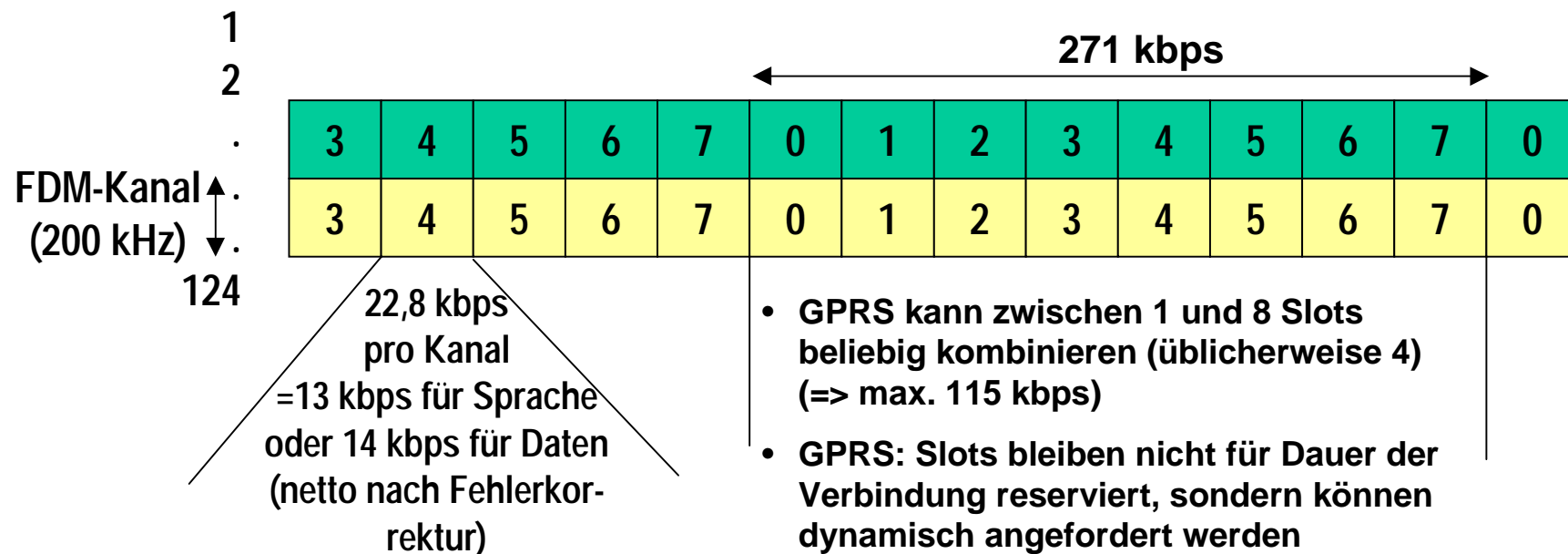
- Kanalbündelung
- paketorientierte Übertragung
- nahtlose Anbindung an Internet und X.25
- variable Übertragungsraten bis 115 kbps



GPRS Architektur

Realisierung auf der Funkschnittstelle:

- GSM: Kombination aus Frequenzmultiplex- und Zeitmultiplexverfahren (FDMA und TDMA)
- für Übertragung von GPRS-Datenpaketen wird eine Bündelung der Sprachkanäle durchgeführt

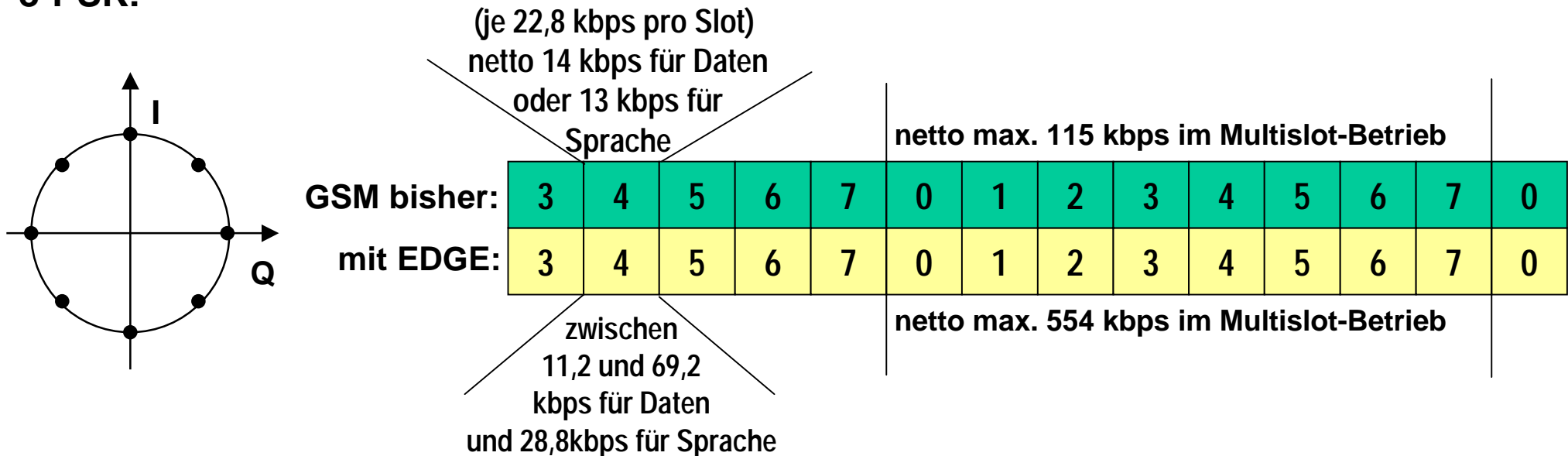


Mögliches Problem:

- Starke Nachfrage nach GPRS kann zu (weiteren) Engpässen auf der Luftschnittstelle führen (insb. bei GSM 900)

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

