

Kapitel 9 – Long Term Evolution (LTE)

(z.T. basierend auf Vorlesungsfolien von A. Mitschele-Thiel und J. Mückenheim)

Vorlesung Mobilkommunikation Wintersemester 2016/17
Prof. Dr. Oliver Waldhorst (HS Karlsruhe), Markus Jung

INSTITUT FÜR TELEMATIK





Mobiles TCP



Mobile Ad Hoc Netze



Mobile IP



WLAN, Bluetooth



GSM, UMTS, **LTE**



Mobilitätsmanagement

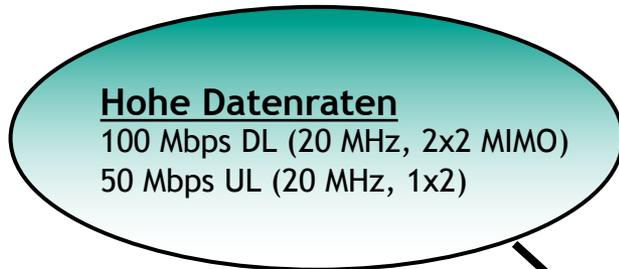


Medienzugriff

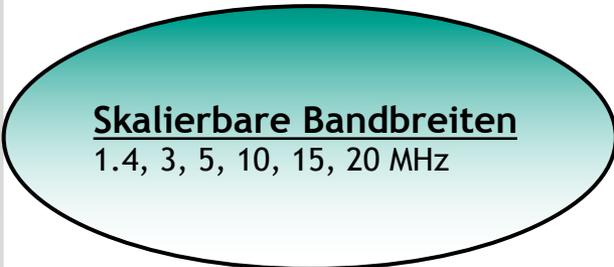


Drahtlose Übertragung

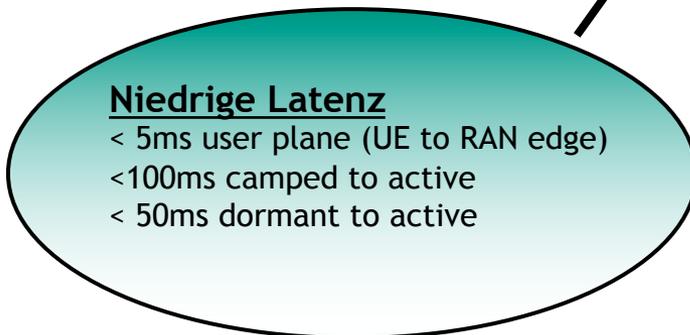
LTE: Anforderungen und Ziele



* Annahme:
 2x2 im DL für
 LTE, aber 1x2
 für HSPA
 Rel'6



LTE
 Long-Term Evolution



LTE: Weiterentwicklung von UMTS



- Neues Funkzugangnetz: **Evolved-UTRAN (E-UTRAN)**
 - Mediennutzung basiert auf **Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)**
 - Flexible Bandbreite der Trägerfrequenzen (1,4 - 20 MHz)
 - Kein Anschluss an die Leitungsvermittelnde Domäne (CSD) wie bei UTRAN

- Neues Kernnetz: **Evolved Packet Core (EPC)**
 - IP-basiertes Kernnetz, auf das über verschiedene Zugangnetze zugegriffen werden kann (LTE, 3G, 2G, WLAN, WiMAX, HRPD)
 - Alle Dienste (auch Sprache!) paketbasiert
 - Sprachdienste nutzen IMS (IP Multimedia Subsystem)

LTE Eigenschaften

- **OFDM** auf der Luftschnittstelle
 - Geringere Empfängerkomplexität
 - Robust gegen „Frequency selective fading“ und Inter-symbol Interference (ISI)
 - Zugriff auf Zeit- und Frequenzdomäne erlaubt zusätzliche Flexibilität beim Scheduling
 - Skalierbares OFDM erlaubt Erweiterung auf verschiedene Übertragungsbandbreiten

- Integration von **Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO)** Techniken
 - Unterstützung von 1,2 oder 4 Antennen im DL und MU-MIMO im UL

- Vereinfachte Netzarchitektur (**System Architecture Evolution, SAE**)
 - Reduktion der logischen Knoten → Flache Architektur
 - Klare Trennung von Benutzer- und Kontrolldomäne

LTE: Vorteile für den Betreiber

- Höhere Spektraleffizienz (mehr Bit / Herz)
- Geringere Betriebskosten
- Neue Verdienstmöglichkeiten durch mehr Bandbreite und geringere Latenz (ermöglicht anspruchsvolle Angebote)
- Ermöglicht Weiterverwendung bisheriger Spektren und Verwendung neuer Frequenzbänder
- Schrittweiser Ausbau bisheriger 3G Netze möglich
- Globale Abdeckung und globales Roaming in Aussicht



LTE: Netzausbau (Stand: Juli 2013)

T-Mobile

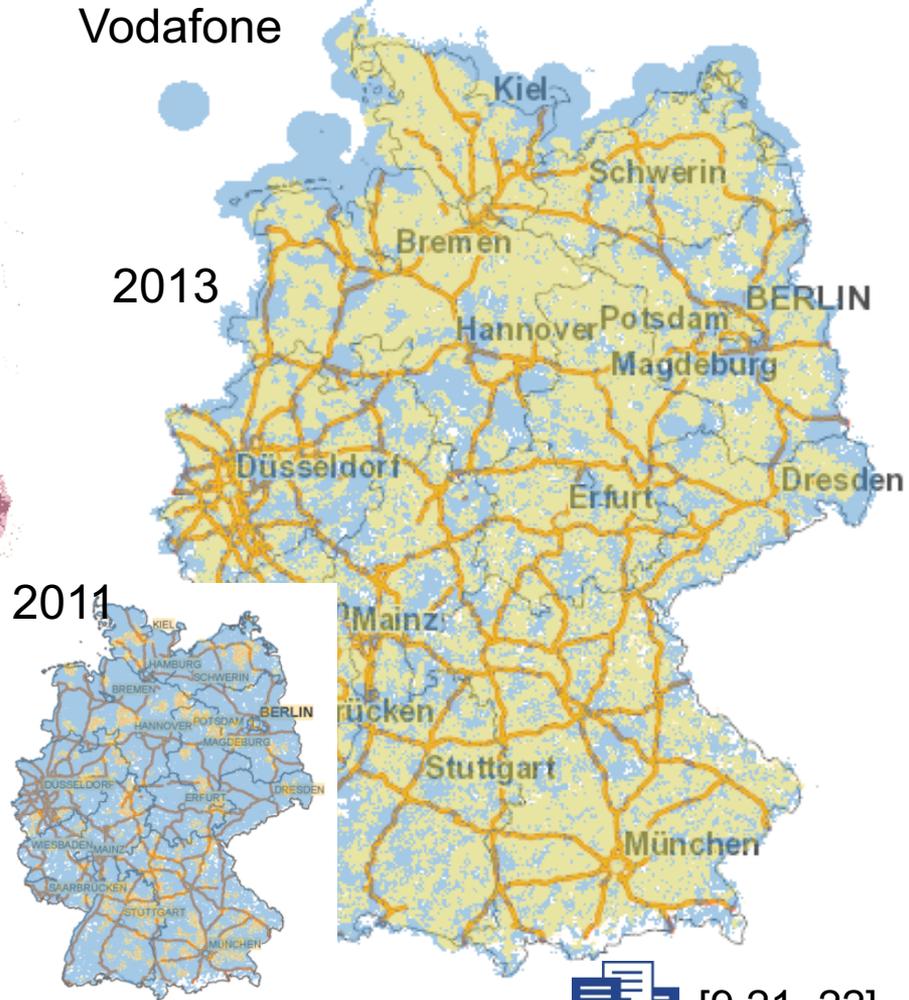
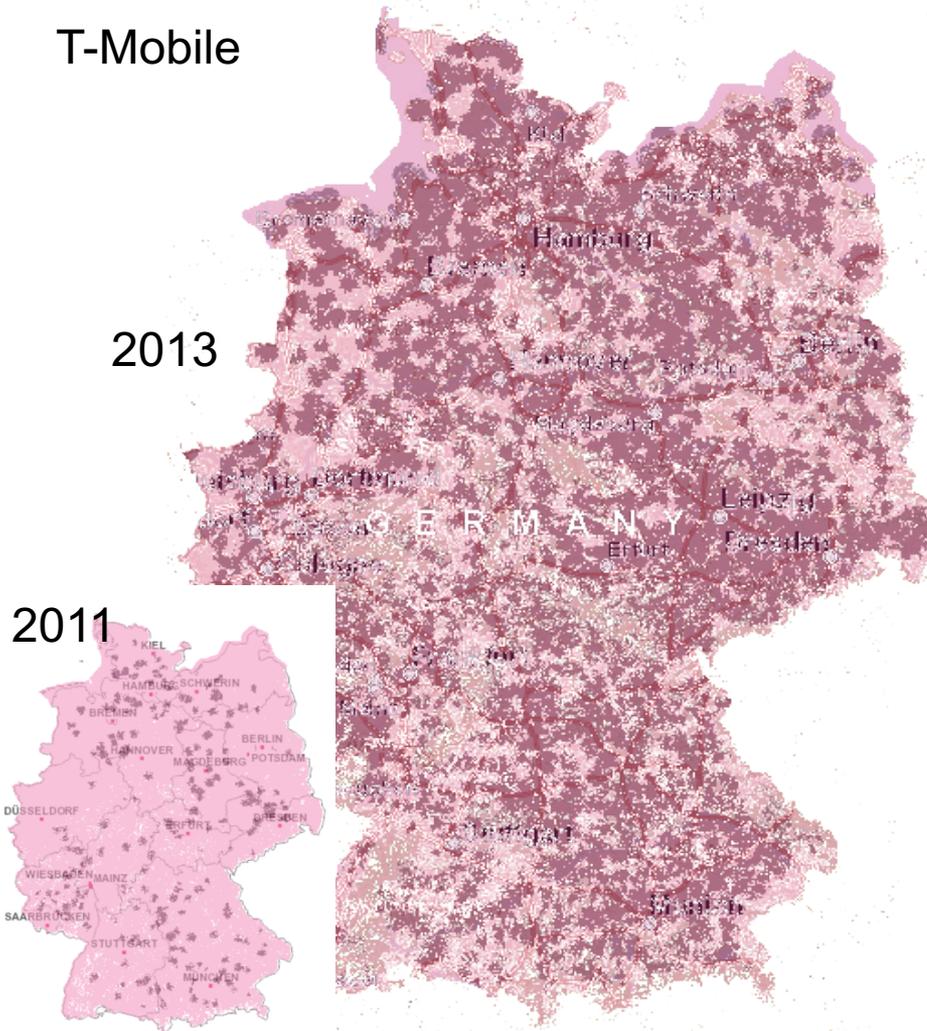
Vodafone

2013

2013

2011

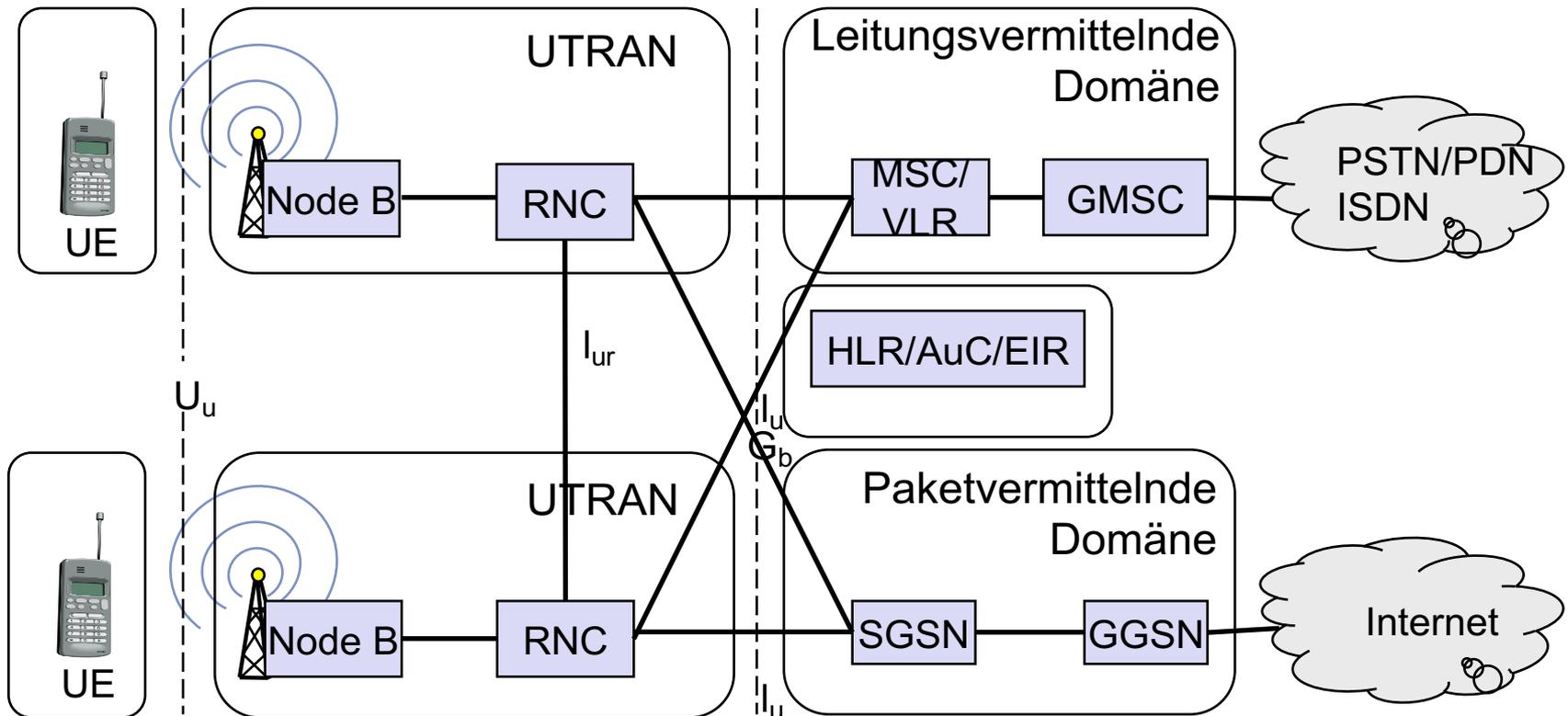
2011



 [9.21, 22]



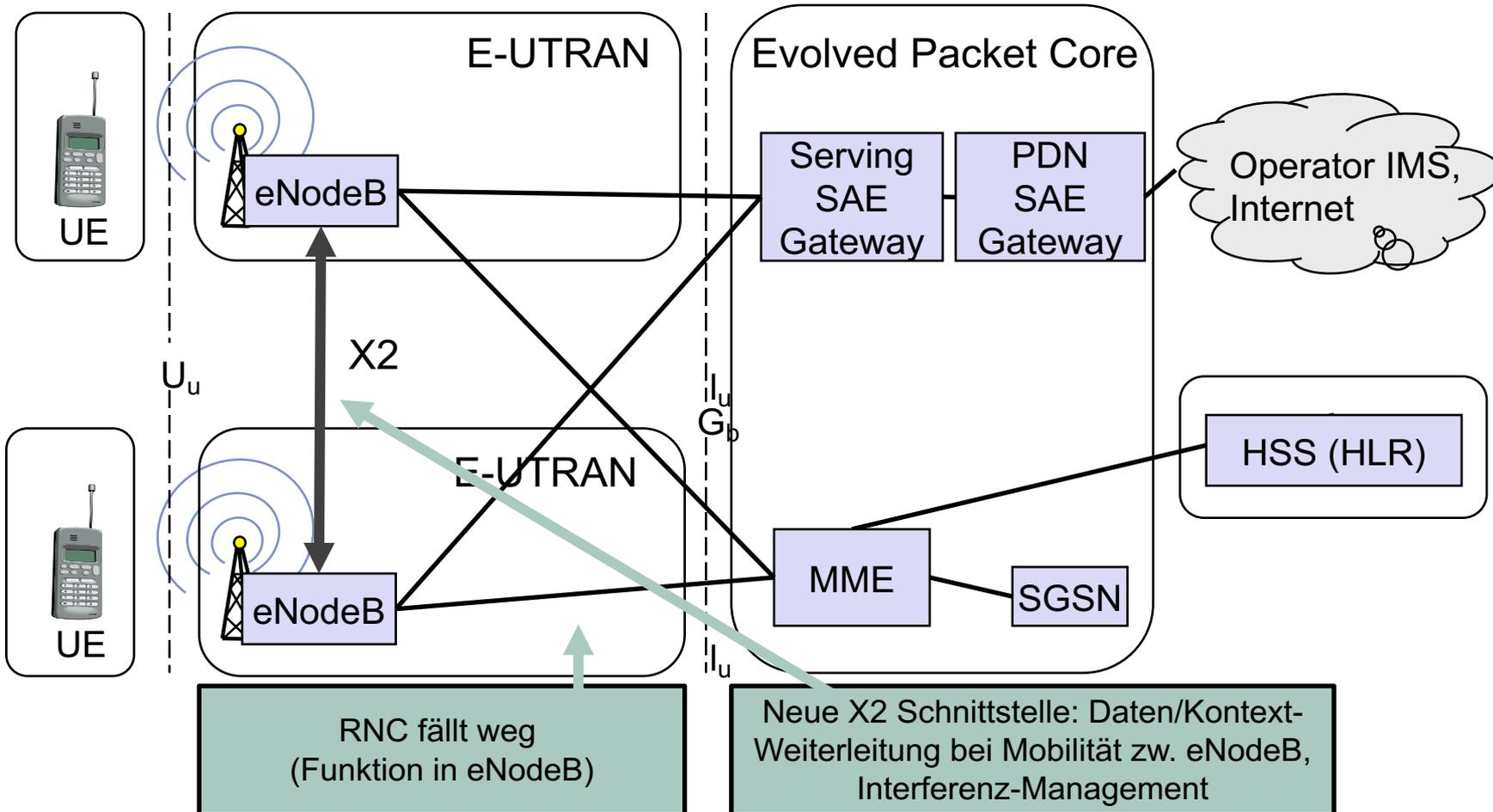
Zur Erinnerung: UMTS Architektur





LTE Architektur

MME: Mobility Management Entity
HSS: Home Subscriber Server

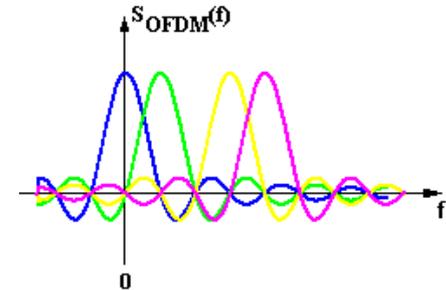




LTE: Überblick Funkssystem

■ Downlink:

- **OFDM**: Verfahren robust gegen Auswirkungen von Mehrwegeausbreitung
- Ermöglicht einfache, günstige Empfänger



■ Uplink:

- **Single-carrier FDMA (SC-FDMA)** (ähnlich zu OFDM)
 - erlaubt sehr energie-effiziente Übertragungen (wichtig für Mobilgeräte)
- Energie-effiziente Übertragung erlaubt günstige Mobilgeräte und vergrößert die Fläche, die abgedeckt werden kann

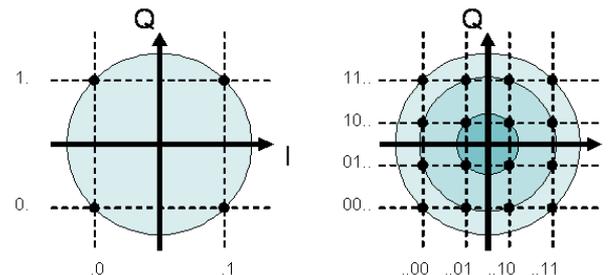
■ Einsatz von MIMO-Antennentechnologie



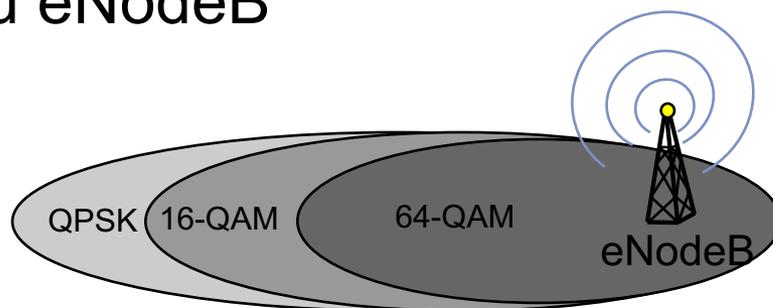
LTE: Physical Layer

- Daten werden codiert und mit einem der Verfahren moduliert (Details siehe Grundlagen-Kapitel)

- QPSK
- 16-QAM
- 64-QAM



- Verfahren abhängig von Verbindungsqualität und Entfernung zu eNodeB



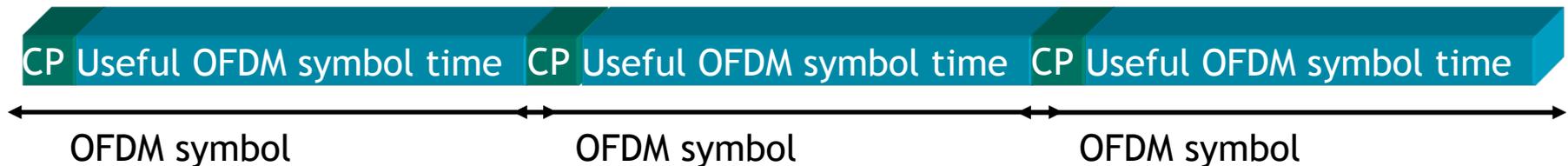
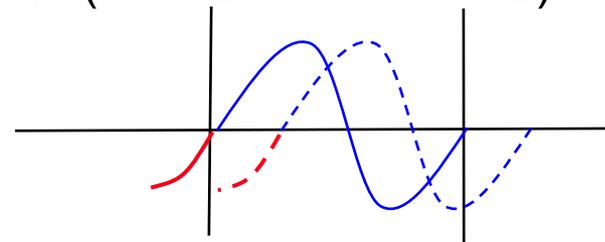


OFDM in LTE

- Inter-Symbol-Interferenz (zw. OFDM Symbolen) wird fast vollständig durch Schutzzeiten (T_G) eliminiert



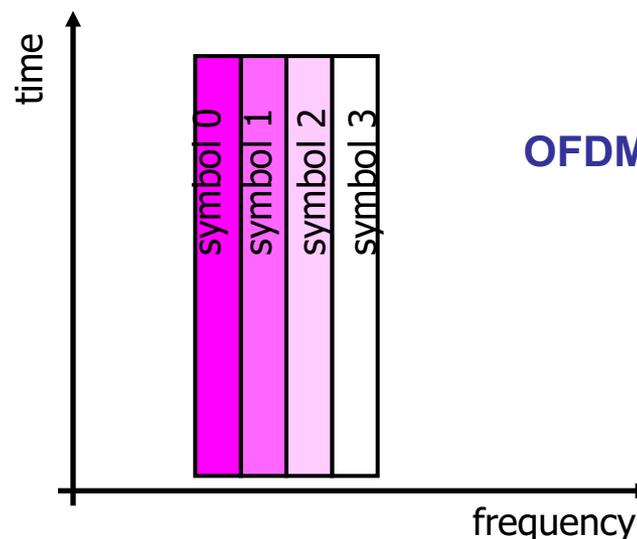
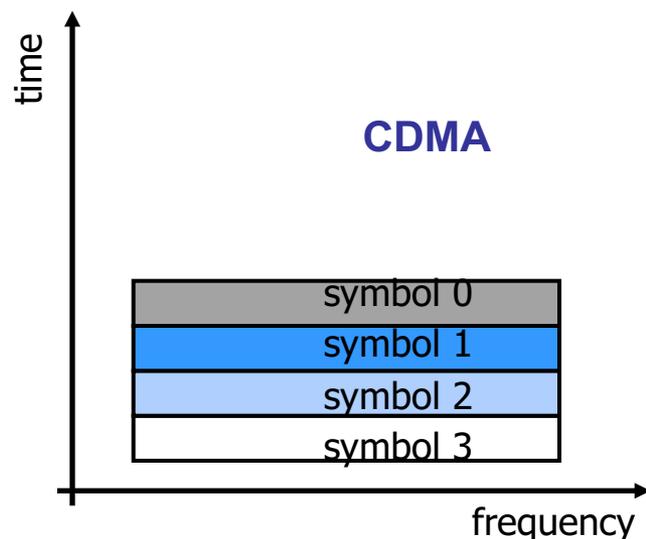
- Innerhalb eines OFDM Symbols sind Datensymbole nur orthogonal, wenn es eine ganzzahlige Anzahl Sinuszyklen im Empfangsfenster gibt
 - Auffüllen der Schutzzeiten mit einem „Cyclic Prefix“ (CP) sichert Orthogonalität auch bei Mehrwegausbreitung → Eliminierung von Interferenzen in der gleichen Zelle (Intra-Zell-Interferenz)





Vergleich OFDM vs. CDMA (1)

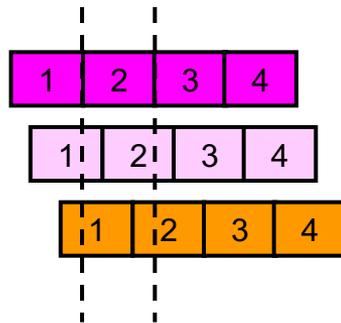
- OFDM: Zu modulierendes Symbol wird über **relativ lange Symbolzeit und schmale Bandbreite** übertragen
 - LTE: 66.6 μ sec Symbolzeit und 15 kHz Bandbreite
 - Für höhere Datenraten können mehr Symbole über mehr Unterträger gesendet werden → Erhöht Bandbreitenbelegung
- CDMA: Zu modulierendes Symbol wird über **relativ kurze Symbolzeit und große Bandbreite** übertragen
 - UMTS HSPA: 4.17 μ sec Symbolzeit und 3.84 Mhz Bandbreite
 - Um mehr Bandbreite zu erhalten → Mehr CDMA-Codes verwenden





Vergleich OFDM vs. CDMA (2)

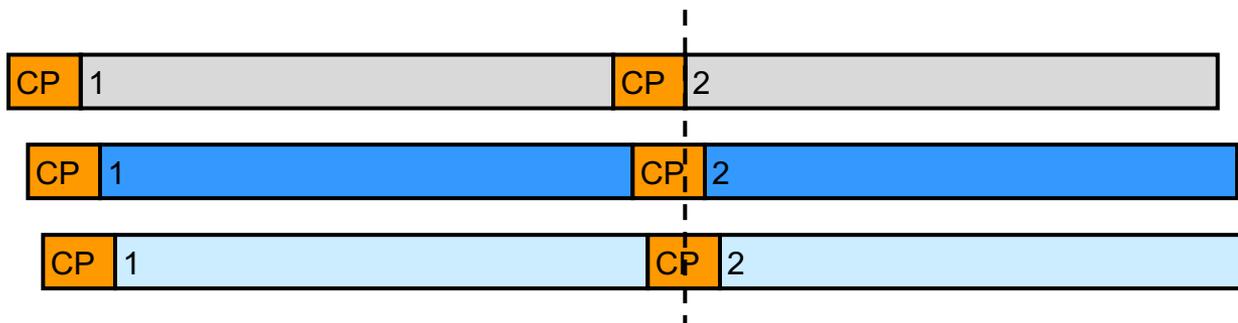
- Kurze Symbolzeiten in CDMA führen zu ISI bei Mehrwegausbreitung



CDMA Symbole

Mehrweg-Reflexionen eines Symbols überlappen nachfolgende Symbole → ISI

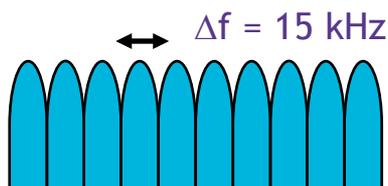
- Lange Symbolzeiten in OFDM (zusammen mit CP) unterdrücken ISI bei Mehrwegausbreitung



Kleine bis keine Überlappung in Symbolen

OFDM: Symbolzeit bei LTE wählen

- Zwei konträre Faktoren beeinflussen die OFDM Symbolzeit
 - CP Länge sollte länger als Worst-Case-Mehrwegverzögerung sein, und OFDM Symbolzeit sollte deutlich größer als CP Länge sein, **um signifikanten Aufwand durch CP einzusparen**
 - OFDM Symbolzeit sollte deutlich kürzer als die kleinste zu erwartende Kohärenzzeit auf dem Kanal sein, **um Kanalvariabilität innerhalb der Symbolzeit zu vermeiden**
- LTE entworfen um mit Latenzvariationen bis zu $\sim 5\mu\text{s}$ und Geschwindigkeiten bis zu 350 km/h umzugehen (1.2ms Kohärenzzeit @ 2.6GHz). Daher wurde folgendes entschieden:
 - CP Länge = $4.7\ \mu\text{s}$
 - OFDM symbolzeit = $66.6\ \mu\text{s}$ (= 1/20 der Worst-Case-Kohärenzzeit)

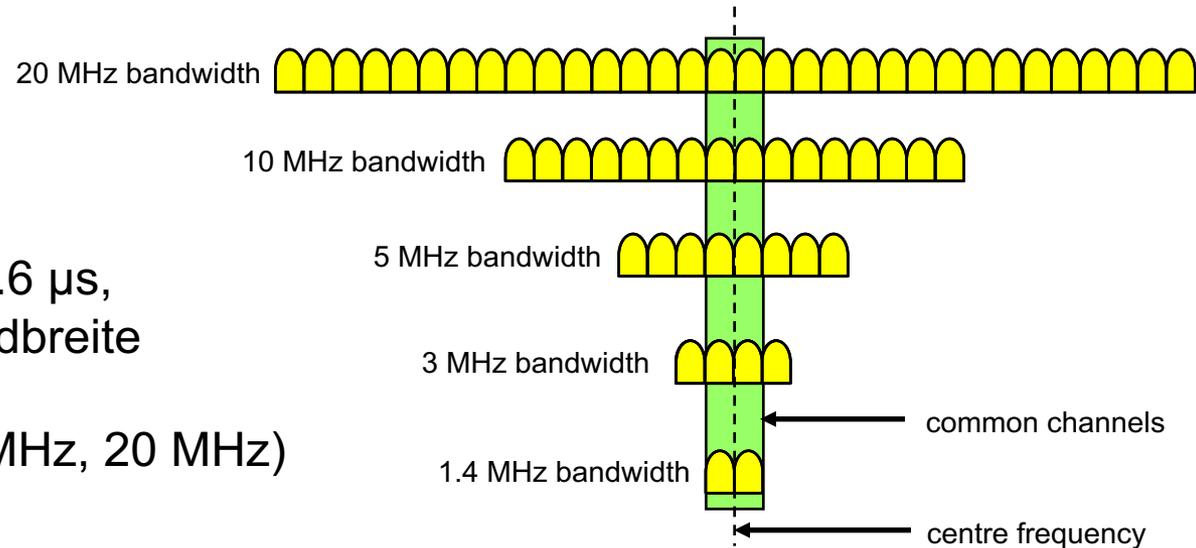




Skalierbares OFDM für versch. Bandbreiten

■ Skalierbares OFDM

- Unterträger-Breite bleibt fix (15 KHz)
- Symbolzeit fix bei $66.6 \mu\text{s}$, unabhängig von Bandbreite (1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz)
- Anzahl Unterträger variable um in unterschiedlichen Bandbreiten zu operieren
- Einfluss von Latenzvarianz, Doppler-Effekt durch Mobilität, Zeitgenauigkeit etc. bleiben gleich bei Bandbreitenwechsel → Robustes Design

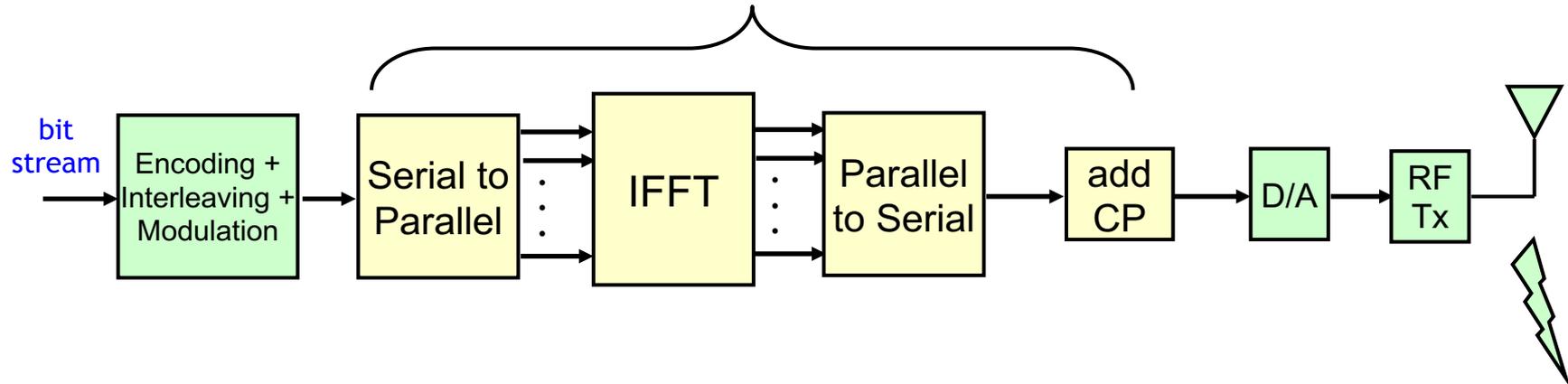




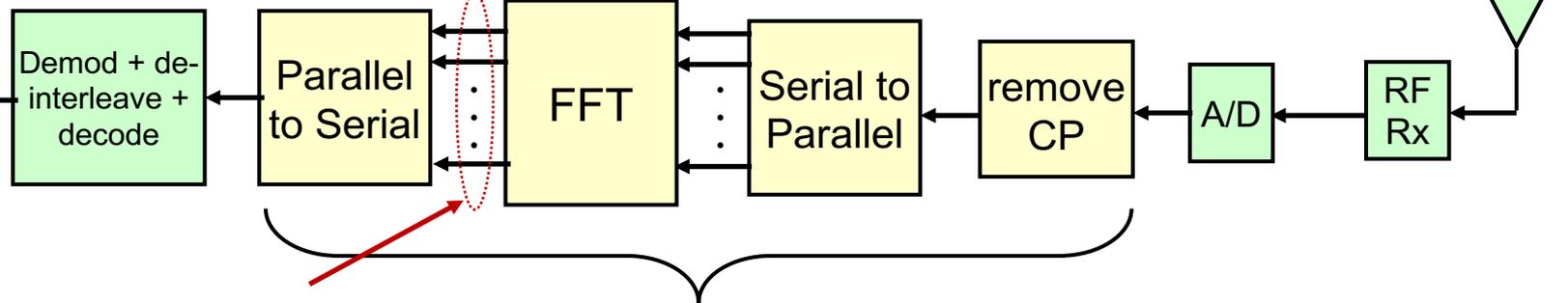
OFDM Transceiver

- Modulation der Symbole auf Träger kann sehr effizient im Basisband durch den FFT Algorithmus durchgeführt werden

OFDM Transmitter



Estimated bit stream



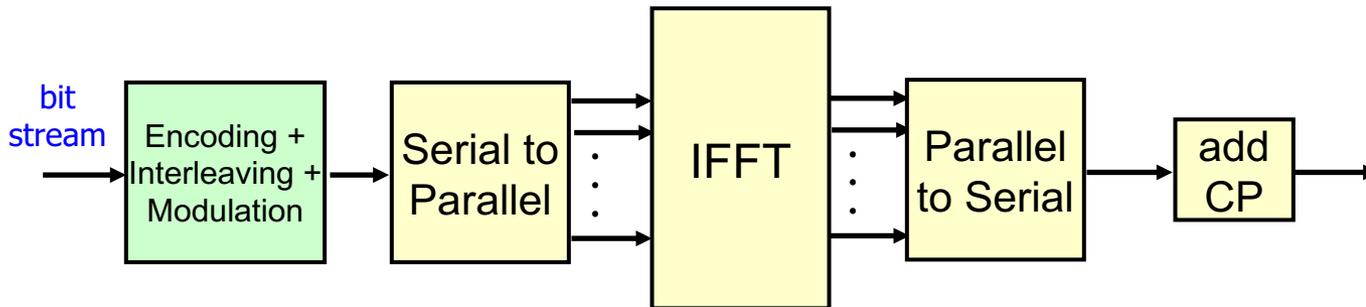
Channel estimation & compensation

OFDM Receiver



LTE Downlink

- LTE Downlink verwendet skalierbares OFDMA
 - Feste Unterträger-Größe von 15 kHz für Unicast
 - Symbolzeit fest bei $T = 1/15 \text{ kHz} = 66.67 \mu\text{s}$
 - Versch. UEs werden versch. Mengen von Unterträgern zugewiesen, um Orthogonalität zu gewährleisten (außer bei MU-MIMO)



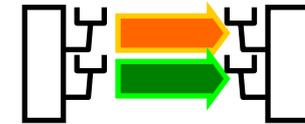
20 MHz: 2048 pt IFFT
10 MHz: 1024 pt IFFT
5 MHz: 512 pt IFFT



Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) in LTE

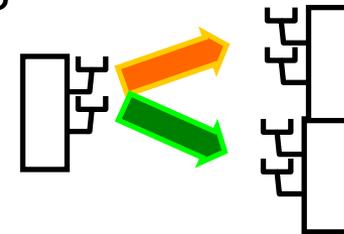
■ SU-MIMO (Single-User MIMO)

- Mehrere Datenströme zum gleichen Benutzer (max. 2 Codeworte)
- Signifikante Durchsatzerhöhung für UEs in Umgebungen mit hoher S/N-Rate



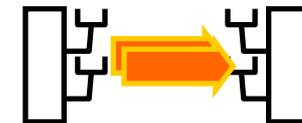
■ MU-MIMO (Multi-User MIMO) oder „Beamforming“

- Versch. Datenströme zu versch. Benutzern über gleiche Zeit-Frequenz-Ressource
- Erhöht Durchsatz auch in Umgebungen mit niedriger S/N-Rate (Zellrand)
- Funktioniert auch mit einzelner Antenne



■ Übertragungsdiversität (TxDiv)

- Erhöht Verlässlichkeit auf einzeltem Datenstrom
- „Fallback“, wenn Kanaleigenschaften nichts anderes zulassen
- Nützlich, um Robustheit auf Kontrollkanälen zu erhöhen

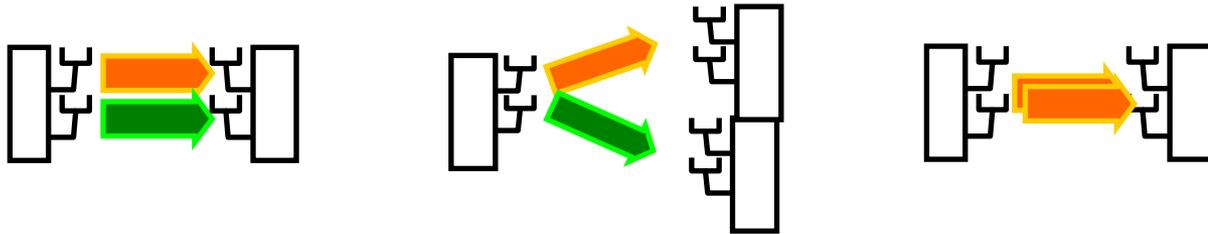




MIMO in DL und UL

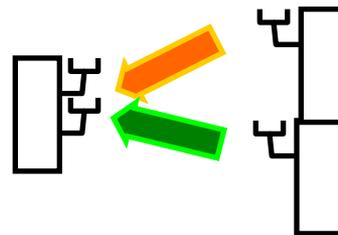
■ Downlink

- Unterstützt SU-MIMO, MU-MIMO, TxDiv



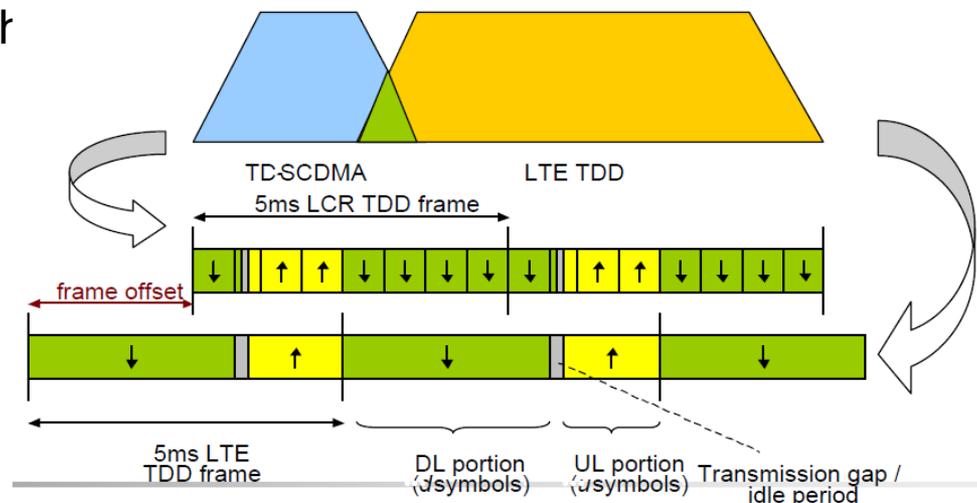
■ Uplink

- Erstes Release von LTE unterstützt nur MU-MIMO mit einzelner Antenne auf UE → Um mehrere Leistungsverstärker auf UE zu umgehen



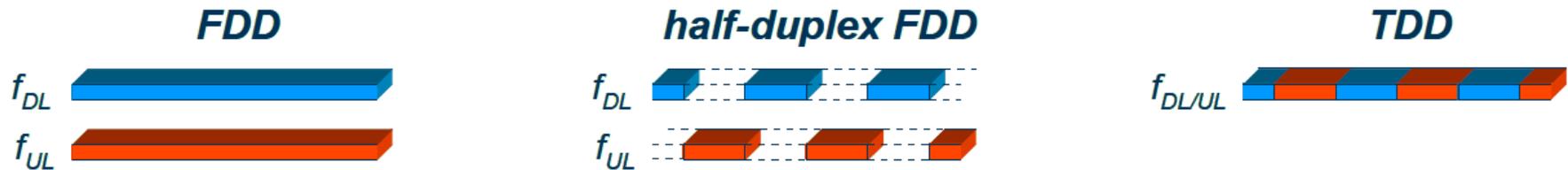
LTE Duplex-Modi

- LTE unterstützt sowohl FDD als auch TDD um flexiblen Einsatz in unterschiedlichen Spektren auf der ganzen Welt zu ermöglichen
- Anders als bei UMTS TDD gibt es große Gemeinsamkeiten bei LTE FDD & LTE TDD
 - Slot-Länge (0.5ms) und Unter-rahmen-Länge (1ms) ist gleich mit gleichen Zahlenwerten für Symbolzeiten, CP Länge, FFT Größen etc.
 - UL/DL Umschaltzeitpunkte entworfen, um Koexistenz mit UMTS-TDD zu ermöglichen (TD-CDMA, TD-SDMA)



LTE Halbduplex FDD

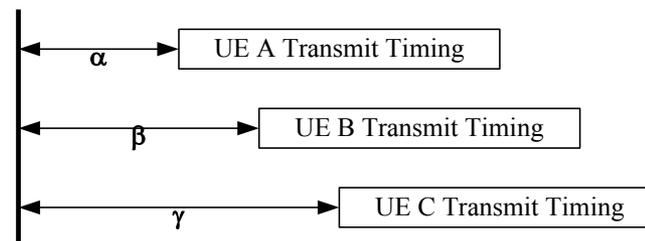
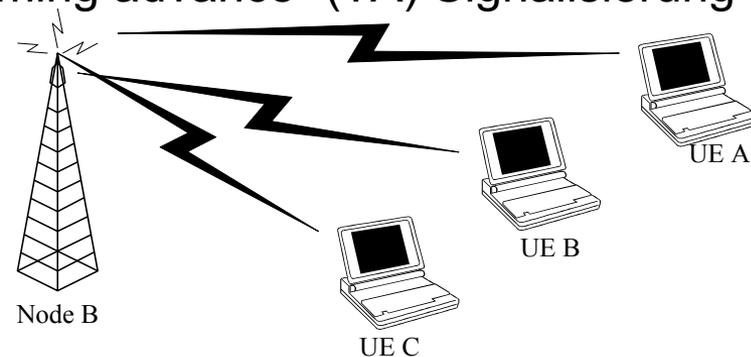
- Zusätzlich zu FDD und TDD unterstützt LTE auch Halbduplex FDD (HD-FDD)
- HD-FDD ähnelt FDD, nur UE kann nicht senden und empfangen gleichzeitig



- Anmerkung: eNodeB kann immer noch beides gleichzeitig zu unterschiedlichen UEs, HD-FDD wird von eNodeB Scheduler eingeleitet
- Gründe für HD-FDD
 - Billigere Endgeräte
 - Höhere Ähnlichkeit zwischen TDD und HD-FDD
 - Machen FDD Spektren haben nur kleine Räume für Duplex

LTE Uplink (1)

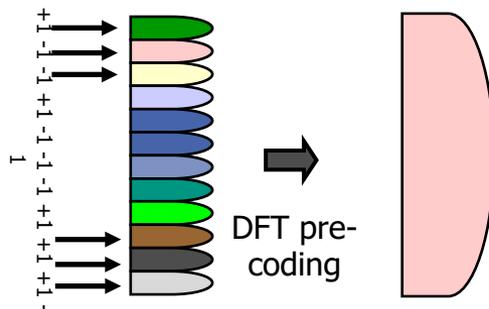
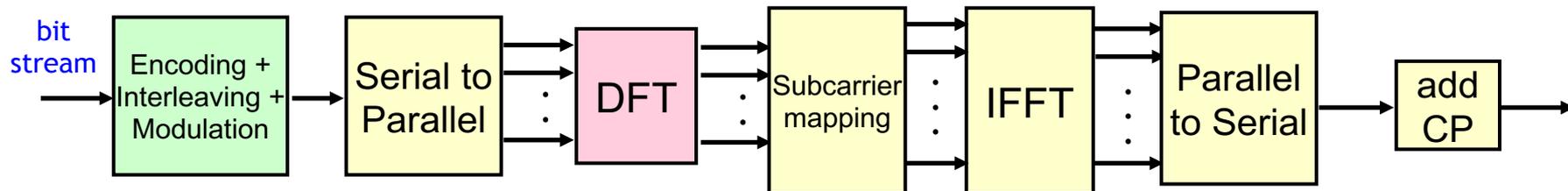
- Single Carrier Frequency Domain Multiple Access (SC-FDMA) statt OFDMA im Uplink
 - Ermöglicht effiziente Leistungsverstärker in UEs
- SC-FDMA ist immer noch **orthogonales** Verfahren
 - UEs sind orthogonal in der Frequenz
 - Synchron in Zeitdomäne durch „timing advance“ (TA) Signalisierung
 - Müssen aber nur in einem Bruchteil einer CP Länge synchron sein
 - 0.52 μ s TA Auflösung





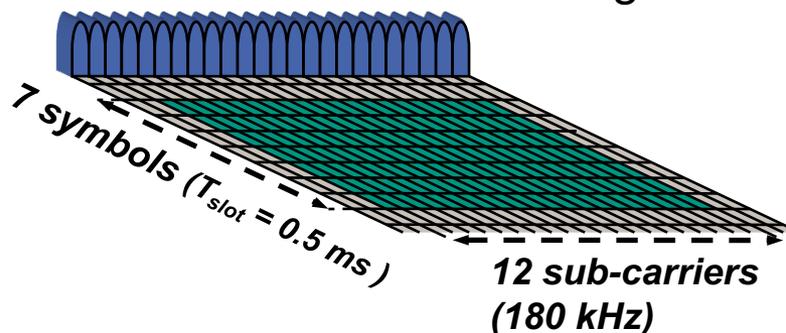
LTE Uplink (2)

- SC-FDMA implementiert durch OFDMA front-end und DFT-Pre-coder
 - „DFT Pre-coded OFDMA“ oder „DFT-spread OFDMA (DFT-SOOFDMA)“
 - Vorteil: Zahlenwerte (Symbolzeiten, FFT Größen,...) können für UL und DL verwendet werden
 - Kann immer noch variable Bandbreiten in Einheit von 12 Unterträgern verwenden



LTE Scheduling (1)

- Grundeinheit für Medienzugriff: **Resource Block (RB)**
 - 12 Unterträger in einer Frequenz (= 180 kHz)
 - 1 Zeitslot (= 0.5ms, = 7 OFDM Symbole)
 - Mehrere RBs können einem Benutzer zugewiesen werden



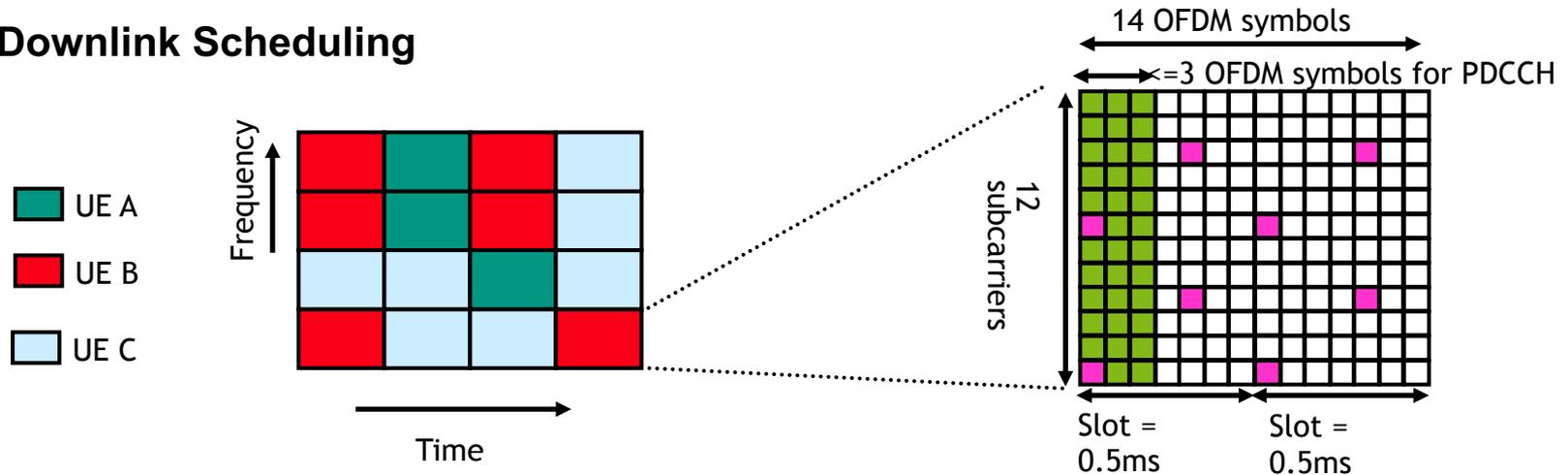
- Gesamtanzahl von verfügbaren RBs hängt von Bandbreite ab

Bandwidth (MHz)	1.4	3.0	5.0	10.0	15.0	20.0
Number of available resource blocks	6	15	25	50	75	100

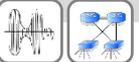
LTE Scheduling (2)

- LTE verwendet geregelten, geteilten Kanal für UL (UL-SCH) und DL (DL-SCH)
- Normalerweise keine autonome Übertragung, alle Übertragungen sind explizit zugewiesen

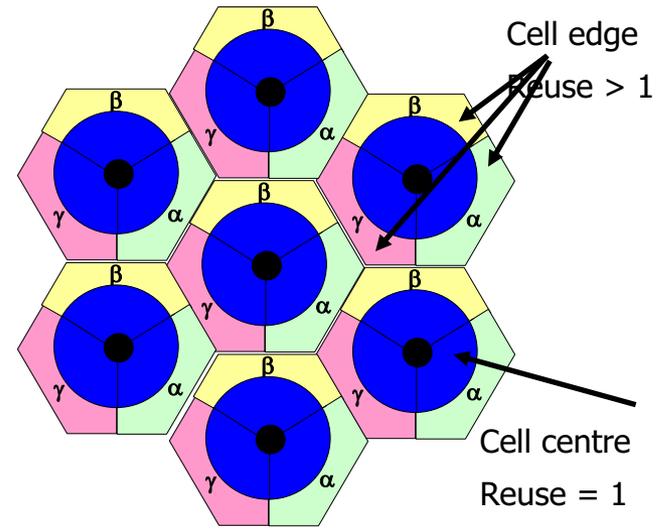
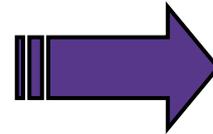
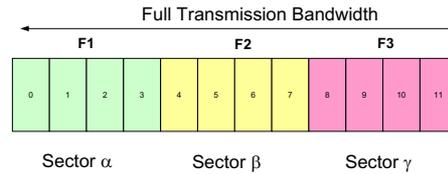
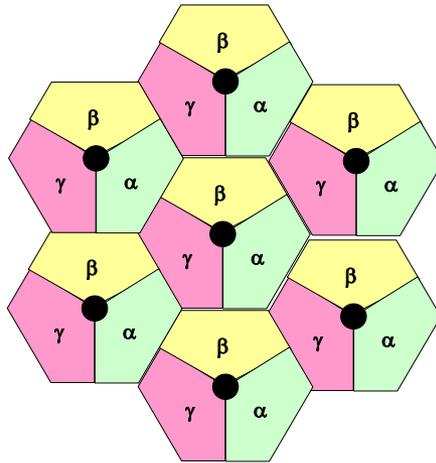
Downlink Scheduling



- LTE erlaubt „halb-persistente“ (periodische) Belegung von Ressourcen, z.B. für VoIP



Interferenz-Koordination und Frequenz-Wiederverwendung



- Scheduler kann beschränken, in welchen Sektoren welche Ressource Blocks verwendet werden können
 - Frequenz-Wiederverwendung > 1
- Reduzierte Inter-Zell-Interferenz führt zu verbesserter S/N-Rate, besonders am Zellrand
- Reduktion von verfügbarer Übertragungsbandbreite führt aber zu schlechter Spektraleffizienz

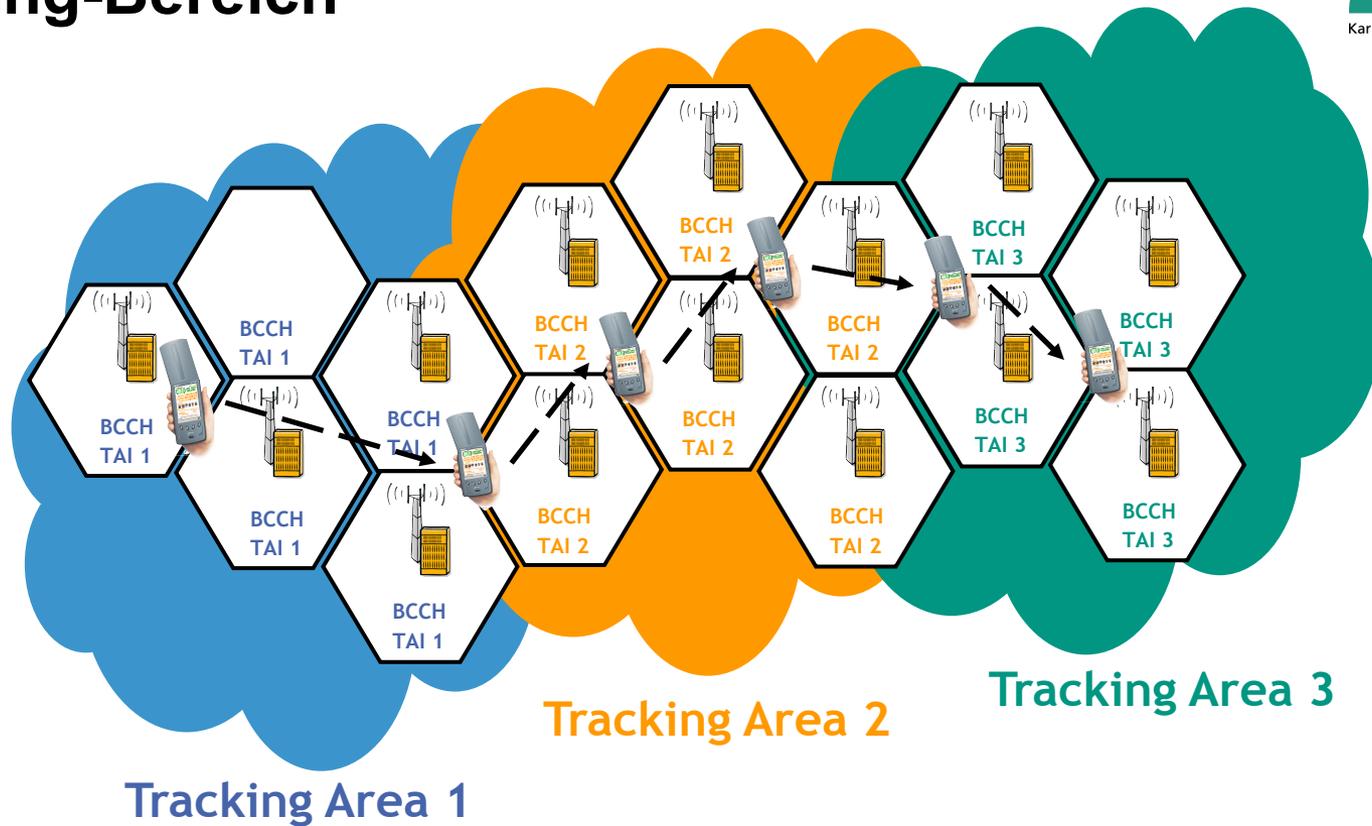
- Benutzer am Zellrand mit Frequenz-Wiederverwendung > 1
 - eNodeB überträgt mit mehr Leistung
 - Verbesserte S/N-Rate
- Benutzer im Zellkern können volles Frequenzband nutzen
 - eNodeB überträgt mit weniger Leistung
 - Weniger Interferenzen mit anderen Zellen
- **Flexible Frequenz-Wiederverwendung erreicht durch intelligentes Scheduling und Leistungsanpassung**



LTE Handover

- LTE verwendet UE-unterstützten, Netz-kontrollierten Handover
 - UE berichtet Messungen, Netz entscheidet ob und wohin Handover
 - UE detektiert Nachbarzellen → Kein Warten von Nachbarschaftslisten notwendig
 - Erlaubt „Plug-and-Play“, spart BCH Ressourcen
 - Für Suchen und Messungen muss nur Trägerfrequenz bekannt sein
- X2 Schnittstelle für Handover-Vorbereitung und Weiterleitung von Benutzer-Daten genutzt
 - Ziel-eNodeB bereitet Handover durch Senden der Informationen an UE vor, transparent durch Quell-eNodeB
 - Konfiguration durch System Broadcast bekannt
 - Beschleunigt Handover, UE muss BCH in Ziel-Zelle nicht lesen
 - Pufferung von Daten von Quell-eNodeB zu Ziel-eNodeB bis Pfadumschaltung → Kein Datenverlust
 - UE nutzt Wettbewerbs-freien zufälligen Zugriff um Handover zu beschleunigen
 - OFDM-Träger für RACH werden vorher von eNodeB zugewiesen

Tracking-Bereich



- Tracking Area Identifier (TAI), gesendet über Broadcast Kanal BCCH
- Tracking-Bereich kann von mehreren MMEs geteilt werden
- Einzelne UE kann mehreren Tracking-Bereichen zugewiesen werden



LTE: Gerätekategorien

- Verschiedene Klassen von Endgeräten klassifizierbar
 - Komplexe Techniken oft teuer oder technisch nicht möglich
 - Beispiel MIMO in Handys

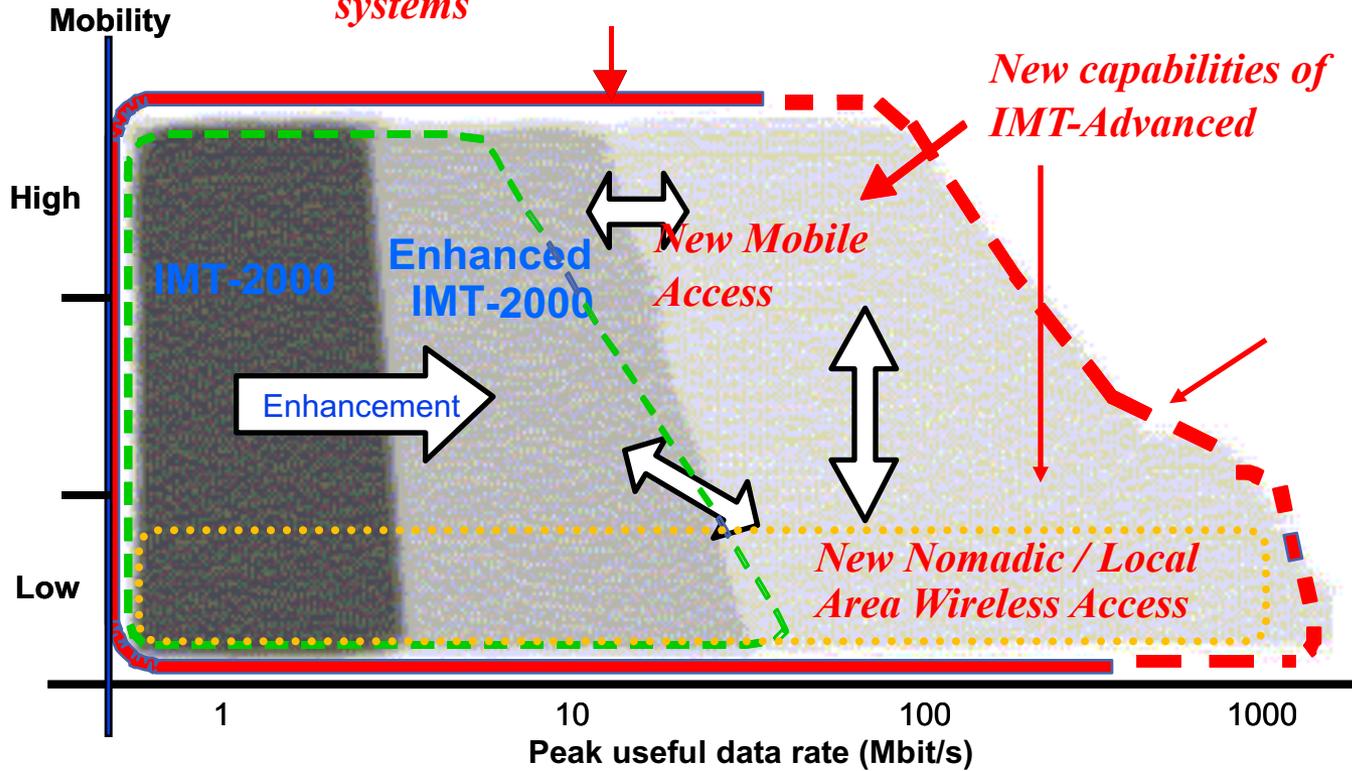
Category		1	2	3	4	5
Peak rate Mbps	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Capability for physical functionalities						
RF bandwidth		20MHz				
Modulation	DL	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	UL	QPSK, 16QAM				QPSK, 16QAM, 64QAM
Multi-antenna						
2 Rx diversity		Assumed in performance requirements.				
2x2 MIMO		Not supported	Mandatory			
4x4 MIMO		Not supported				Mandatory

Quelle: <http://www.3gpp.org/article/lte>

Evolution von IMT-2000 zu IMT-Advanced



IMT-Advanced will encompass the capabilities of previous systems



Interconnection



Nomadic / Local Area Access Systems



Digital Broadcast Systems

Systemanforderungen

■ Datenrate

- 1 Gpbs Datenrate wird mit 4x4 MIMO erreicht
- Übertragungsbandbreite breiter als ~70 MHz

■ Spektraleffizienz

- DL: Rel. 8 LTE erfüllt IMT-Advanced Anforderungen
- UL: Muss von Rel. 8 verdoppelt werden, um Anforderungen zu erfüllen

		Rel. 8 LTE	LTE-Advanced	IMT-Advanced
Peak data rate	DL	300 Mbps	1 Gbps	1 Gbps ^(*)
	UL	75 Mbps	500 Mbps	
Peak spectrum efficiency [bps/Hz]	DL	15	30	15
	UL	3.75	15	6.75

*"100 Mbps for high mobility and 1 Gbps for low mobility" → Kernfeature, beschrieben in Circular Letter (CL)

Wie erreicht man die Anforderungen?

- Unterstützung höherer Bandbreiten
 - Träger-Aggregation für höhere Bandbreiten
 - Unterstützung von Spektral-Aggregation
- Verbesserte MIMO Techniken
 - Erweiterung: 8-fach Übertragung im Downlink
 - Einführung von Single-User-MIMO (4-fach im Uplink)
- Koordinierte Mehrpunkt-Übertragung und Empfang
 - Senden im Downlink
 - Empfangen im Uplink
- Relaying
 - Typ 1 Relays erzeugen separate Zelle und erscheinen als Rel. 8 LTE eNodeB für Rel. 8 LTE UEs
 - Abdeckung, kosteneffiziente Ausbringung
- Weitere Latenzminderung
 - AS/NAS Parallelverarbeitung für Reduzierung der Verzögerung in der Kontrolldomäne

■ Ziele von LTE

- Hohe Datenraten
- Erhöhte spektrale Effizienz und skalierbare Bandbreiten
- Niedrige Latzen
- Vereinfachte Netzarchitektur

■ Merkmale

- OFDM / SC-FDM an der Luftschnittstelle
 - Keine Intra-Zellen- und Inter-Symbol-Interferenzen
- Scheduling-Einheit ist Resource Block
- Hohe Wiederverwendung von Frequenzen
 - Wiederverwendung = 1 im Zellinneren
- Einfache Konfiguration des Mobilitätsmanagements

- 9.1 Was sind die Ziele von LTE?
- 9.2 Wie wird OFDM in LTE verwendet?
- 9.3 Wozu dient das Cyclic Prefix?
- 9.4 Vergleichen Sie OFDM und CDMA!
- 9.5 Wie wird Intra-Zell-Interferenz in OFDM vermieden?
- 9.6 Beschreiben sie die Struktur eines Resource Blocks!
- 9.7 Wodurch wird das Mobilitätsmanagement in LTE vereinfacht?
- 9.8 Wie können Frequenzen in LTE wiederverwendet werden?

Referenzen und weiterführende Literatur

- [9.1] H. Kaaranen, A. Ahtiainen, et. al., UMTS Networks – Architecture, Mobility and Services, Wiley Verlag, 2001
- [9.2] B. Walke, Mobilfunknetze und ihre Protokolle, 3. Auflage, Teubner Verlag, 2001
 - Viele Details; teilweise als Grundlage zur Folienerstellung herangezogen
- [9.3] J. Eberspächer, et. al., GSM Global System for Mobile Communication, 3. Auflage, Teubner Verlag, 2001
 - Gute und verständliche Darstellung von GSM
- [9.4] Pierre Lescuyer, UMTS – Grundlagen, Architektur und Standard, dpunkt.verlag, 2002
 - Recht detaillierte Darstellung von UMTS
- [9.5] M. Sauer; Mobile Kommunikationssysteme; Vieweg 2004
 - Gut lesbarer Überblick über GSM, GPRS und UMTS
- [9.6] J. Schiller; Mobilkommunikation; Addison-Wesley, 2003
 - Recht kompakte Darstellung von GSM – gut für den Überblick – gut lesbar
- [9.7] www.gsmworld.com
- [9.8] www.nobbi.com

Referenzen und weiterführende Literatur (2)

- [9.9] www.rschlichte.de
- [9.10] <http://www.extraintainment.com>
- [9.11] <http://www.logicacmg.com/pdf/telecom/Mmsguide.pdf>
- [9.12] <http://www.3gpp.org>
- [9.13] <http://umtslink.at/cgi/bin/reframer.cgi?../UMTS/zellatmung.htm>
- [9.14] <http://de.wikipedia.org>
- [9.15] <http://www.bitcom.org>
- [9.16] <http://www.elektronik-kompendium.de>
- [9.17] H. Holma, A. Toskala (Eds.), HSDPA/HSUPA For UMTS – High Speed Radio Access for Mobile Communications, Wiley Verlag, 2006
- [9.18] H. Holma, A. Toskala (Eds.), WCDMA For UMTS – HSPA Evolution and LTE, Wiley Verlag, 4. Auflage 2007
- [9.19] D. Astély et al., LTE the Evolution of Mobile Broadband, IEEE Communications Magazine, April 2009
- [9.20] <http://www.dailywireless.org/2009/08/21/4-billion-gsm-users-sept-2009/>
- [9.21] <http://www.t-mobile.de>
- [9.22] <http://www.vodafone.de>