

## Musterlösung zur Aufgabe A4.1

**a)** Richtig sind die Antworten 1 bis 3, die auch für die wichtigsten Verbesserungen durch LTE stehen. Ein niedriger Energieverbrauch an den Basisstationen ist ausdrücklich falsch, denn es geht um einen möglichst niedrigen Energieverbrauch bei den Endgeräten, wofür sogar ein erhöhter Energieverbrauch an den Basisstationen in Kauf genommen wird.

**b)** Richtig sind die Antworten 2 und 4. Der entscheidende Grund für die Duplex-Lücke ist es, einen Sicherheitsbuffer zwischen Uplink und Downlink zu schaffen.

Aber auch Antwort 4 ist richtig. Funkmikrofone wurden und werden auch momentan noch mit Frequenzen im Bereich um 800 MHz betrieben, also solchen Frequenzen, die jetzt für LTE gebraucht werden. Wenn LTE endgültig flächendeckend ausgebaut ist, so kommt es zu Beeinträchtigungen von leistungsschwächeren Funkmikrofonen. Darüber hinaus ist für die Jahre nach 2015 der Einsatz von Veranstaltungstechnik auf den LTE-Frequenzen verboten. Unter anderem deshalb gibt es diese Duplex-Lücke, aber das ist nicht der eigentliche Grund, sondern ein nützlicher Nebeneffekt.

**c)** Richtig sind die drei ersten Antworten. OFDMA kommt im Downlink von LTE zum Einsatz, SC-FDMA im Uplink. Mehrantennensysteme (englisch: *Multiple Input Multiple Output*, MIMO) kommen im Mobilfunk häufiger zum Einsatz, nicht nur bei LTE.

Tatsächlich wird bei LTE aber auch CDMA eingesetzt, allerdings nur für Kontrollkanäle.

**d)** Richtig sind die Antworten 1, 2 und 4. Der höherfrequente 2600 MHz-Bereich ist insbesondere aufgrund von Auflagen der Bundesregierung und wegen der geringeren Reichweite für Großstädte interessant, wohingegen der nur aus gepaarten Frequenzen bestehende 800 MHz-Bereich vorwiegend für ländliche Gebiete genutzt werden wird.

## Musterlösung zur Aufgabe A4.2

- a) Wie aus der Grafik auf der Angabenseite hervorgeht, genügt nur bei TDD ein einziges Frequenzband ⇒ Lösungsvorschlag 2. Die beiden anderen Duplexverfahren benötigen jeweils zwei Frequenzbänder. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einem „gepaarten Spektrum“.
- b) In diesem Fall ist *Frequency Division Duplex* (FDD) günstiger ⇒ Lösungsvorschlag 1:
- Zwar benötigt man bei TDD nur ein einziges Frequenzband, das aber bei gleicher Belastung jeweils nur zur Hälfte für Uplink und Downlink genutzt werden kann. Sender und Empfänger müssen sich also bei der Übertragung abwechseln.
  - Das Hauptproblem ist die erforderliche, nicht immer gegebene Synchronität der Netze. Um auch bei nicht 100-prozentiger Synchronität eine weitgehend ungestörte Übertragung zu gewährleisten, sind bei TDD zwischen der Uplink- und der Downlink-Nutzung Schutzzeiten (*Guard Periods*) erforderlich. Die relative Degradation des TDD-Prinzips gegenüber FDD ist bei gleicher UL- und DL-Belastung quantitativ durch den prozentuellen Anteil der gelben Blöcke gegeben.
- c) Zutreffend sind die Lösungsvorschläge 2 und 3:
- Ein TDD-Endgerät muss nicht gleichzeitig Senden und Empfangen und ist deshalb kostengünstiger als ein FDD-Endgerät. Auch die Batterielaufzeiten sind länger.
  - Die TDD-Technik ermöglicht verschiedene Modi, die festlegen, wieviel Zeit für Downlink und Uplink verwendet werden sollen.
  - Oft sind die Uplink-Anforderungen sehr viel geringer als die des Downlinks. Bei FDD gibt es in diesem Fall viele ungenutzte blaue Blöcke.
  - Unter dieser Voraussetzung wird die prozentuelle Degradation durch die gelben *Guard Periods* geringer. Im Grenzfall „keine Uplink-Aktivität“ könnte man die gleiche Anzahl an DL-Blöcken übertragen wie bei FDD, jedoch schon bei halber Frequenzbandbreite.
- d) Hier treffen die Lösungsvorschläge 1 bis 3 zu:
- Halb-Duplex benötigt ebenso wie FDD zwei Frequenzbänder ⇒ ein gepaartes Spektrum. Nicht erforderlich sind somit *Guard Periods*.
  - Sender und Empfänger wechseln sich gegenseitig ab. Also müssen auch die Endgeräte entweder nur Senden oder nur Empfangen, und sind somit kostengünstiger zu realisieren.
  - Durch eine zweite Verbindung zu einem anderen Endgerät mit vertauschtem Downlink/Uplink-Raster könnte das zur Verfügung stehende gepaarte Band voll genutzt werden.

## Musterlösung zur Zusatzaufgabe Z4.2

a) Richtig sind die Antworten 1 und 3. Folgende Skizzen sollen folgende MIMO–Methoden erklären:

- Skizze A: Multi–User MIMO,
- Skizze B: Antennendiversität,
- Skizze C: Single–User MIMO,
- Skizze D: Beamforming.

b) Richtig sind die Antworten 2, 3 und 5. Diversität kann immer dann ausgenutzt werden, wenn die Übertragungsbedingungen

- an unterschiedlichen Orten  $\Rightarrow$  Raumdiversität,
- zu unterschiedlichen Zeiten  $\Rightarrow$  Zeitdiversität,
- für unterschiedliche Frequenzen  $\Rightarrow$  Frequenzdiversität

nutzbare Unterschiede aufweisen: Die beiden anderen hier verwendeten Begriffe sind frei erfunden.

c) Richtig sind die Antworten 1, 4 und 5. Wie im Theorieteil ausführlich beschrieben, erzielt man durch MIMO–Technik einen Diversitätsgewinn. Aus diesem ergeben sich dann indirekt auch ein besseres SNR sowie verbesserte Übertragungsqualität durch robustere Systeme. Interferenzen, egal ob zwischen Zellen oder Symbolen, können durch MIMO dagegen nicht vermindert werden.

d) Bei der letzten Teilaufgabe richtig sind die Antworten 1, 2 und 6:

- Durch Single–User MIMO werden höhere Datenraten für den einzelnen Nutzer erreicht.
- Durch Multi–User MIMO können mehr gleichzeitige Nutzer versorgt werden.
- Beamforming erhöht die Reichweite der Basisstationen.

Der Energieverbrauch wird durch MIMO–Technologie in keinem Fall niedriger, er steigt sogar sowohl an den Basisstationen als auch am Endgerät an. Je mehr Antennen versorgt werden müssen, um so höher ist der Stromverbrauch. Aus diesem Grund gibt es momentan für Mobiltelefone noch das Limit von maximal zwei Antennen – die Batterielaufzeit wäre sonst zu kurz. An den Basisstationen fällt der höhere Stromverbrauch natürlich weniger ins Gewicht als bei der Vielzahl von Endgeräten.

Es kann durchaus sein, dass es durch MIMO und entsprechendes Controlling auch zu Verbesserungen hinsichtlich der Vorschläge 3, 4 und 5 kommt. Diese Verbesserungen sind dann allerdings indirekt.

## Musterlösung zur Aufgabe A4.3

- a)** Beide Anordnungen zeigen *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA), erkennbar an den DFT- und IDFT-Blöcken. Der Vorteil gegenüber *Orthogonal Frequency Division Multiple-Access* (OFDMA) ist das günstigere *Peak-to-Average Power-Ratio* (PAPR). Ein großes PAPR führt dazu, dass man die Verstärker unterhalb der Sättigungsgrenze und damit bei schlechterem Wirkungsgrad betreiben muss, um zu starke Signalverzerrungen zu verhindern. Ein niedrigeres PAPR bedeutet gleichzeitig eine längere Batterielaufzeit, ein für Smartphones äußerst wichtiges Kriterium. Deshalb wird SC-FDMA im LTE-Uplink eingesetzt  $\Rightarrow$  Lösungsvorschlag 2. Für den Downlink ist der hier genannte Aspekt weniger bedeutend.
- b)** Während bei OFDMA die zu übertragenden Datensymbole direkt die verschiedenen Unterträger erzeugen, wird ein Block von Datensymbolen mittels DFT zuerst in den Frequenzbereich transformiert. Um mehrere Nutzer übertragen zu können, muss  $N > K$  gelten. Ein Eingangsblock eines Nutzers besteht somit aus  $K$  Bit. Damit ist offensichtlich, dass Anordnung A für den Sender gilt. Anordnung B beschreibt dagegen den Empfänger des LTE-Uplinks und nicht den Sender  $\Rightarrow$  Lösungsvorschläge 1 und 2.
- c)** Beide Aussagen sind zutreffend, um einen kontinuierlichen Bitstrom am Sender verarbeiten zu können bzw. auch beim Empfänger einen kontinuierlichen Bitstrom zu gewährleisten.
- d)** Die DFT erzeugt aus  $K$  Eingangswerten ebenfalls  $K$  Spektralwerte. Durch das *Subcarrier-Mapping* ändert sich dadurch nichts. Durch weitere Nutzer werden ebenfalls jeweils  $K$  (Bit) der insgesamt  $N$  (Bit) belegt. Damit können  $J = N/K = 1024/12 = 85.333 \Rightarrow J = \underline{85}$  Nutzer versorgt werden.
- e)** Die Grafik entspricht der derzeitigen 3pp-Spezifikation, die *Localized Mapping* vorsieht  $\Rightarrow$  Lösungsvorschlag 3. Hierbei werden die  $K$  Modulationssymbole benachbarten Unterträgern zugeordnet.
- f)** Die Realisierung von DFT bzw. IDFT als (inverse) *Fast Fourier Transform* ist nur möglich, wenn die Stützstellenzahl eine Zweierpotenz ist, also zum Beispiel für  $N = 1024$ , nicht aber für  $K = 12 \Rightarrow$  Lösungsvorschläge 2 und 3.

## Musterlösung zur Zusatzaufgabe Z4.3

a) Richtig sind die Lösungsvorschläge 3 und 4. LTE nutzt

- *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) im Downlink,
- *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-TDMA) im Uplink.

Das Vielzugriffsverfahren *Code Division Multiple Access* wird beim 3G-Mobilfunksystem **UMTS** eingesetzt. Bei **DSL** verwendet man *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*. Dieses ist aber in diesem Zusammenhang eher als Modulationsverfahren zu verstehen, nicht als Vielfachzugriffsverfahren.

b) Richtig sind die Antworten 2 und 4: Es können mehrere Teilnehmer einen Frequenzblock belegen und TDMA ist zusätzlich möglich. Der Vorschlag 1 entspricht CDMA, der Vorschlag 3 trifft für OFDM zu.

c) Entsprechend der Musterlösung zur Aufgabe (b) ist der zweite Vorschlag zutreffend  $\Rightarrow$  Schaubild B.

d) Da bei OFDMA die Ressourcenzuteilung sich nicht nur auf den Zeitbereich beschränkt, sondern hier auch der Frequenzbereich optimal einbezogen wird, ist OFDMA flexibler als OFDM. Richtig sind die Lösungsvorschläge 1 und 2 im Gegensatz zum Vorschlag 3. Natürlich werden die Teilnehmer mit den besten Randbedingungen bei der Ressourcenverteilung bevorzugt.

Angewendet wird also das eher unsolidarische Prinzip „Wem es schon gut geht, dem wird gegeben“. Dieses findet man häufig auch in der Politik vor. Unbestritten ist allerdings, dass auf diese Weise der Gesamtdurchsatz der Zelle maximiert wird, was die Optimierungsgrundlage für die Netzbetreiber ist. Würde man die gesamte Leistung einem Teilnehmer mit extrem schlechten Bedingungen zur Verfügung stellen, so ginge der Gesamtdurchsatz gegen 0.

## Musterlösung zur Aufgabe A4.4

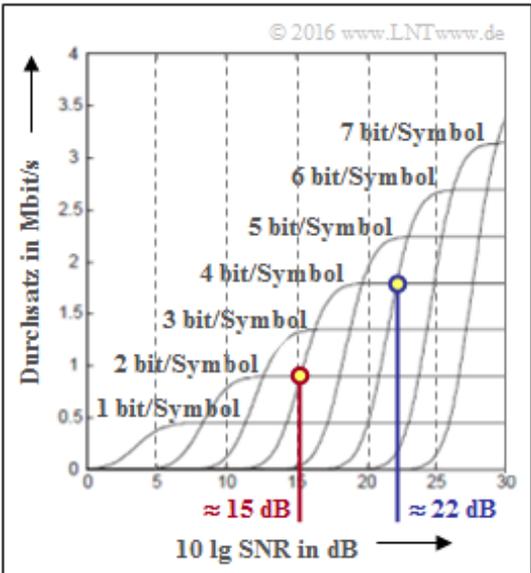
**a)** Im sendernahen Gebiet **A** herrschen üblicherweise die besten Empfangsbedingungen vor. Hier kann das Modulationsverfahren 64-QAM verwendet werden, das bei idealen Bedingungen den höchsten Durchsatz ermöglicht, aber bei sinkendem SNR auch am meisten degradiert.

Für das senderferne Gebiet **C** ist dagegen die 64-QAM nicht geeignet. Hier verwendet man besser das niederststufigste Modulationsverfahren 4-QAM. Richtig ist nur der Lösungsvorschlag 2.

**b)** Zu vergleichen sind hier die beiden mit „2 bit/Symbol“ und „4 bit/Symbol“ beschrifteten Kurven. Der Schnittpunkt liegt bei  $10 \cdot \lg \text{SNR}_1 \approx 15 \text{ dB}$ . Daraus folgt direkt: Die 16-QAM führt nur dann zu einem größeren Durchsatz als die 4-QAM, wenn  $10 \cdot \lg \text{SNR} > 16 \text{ dB}$  ist.

**c)** Das Ergebnis  $10 \cdot \lg \text{SNR}_2 \approx 22 \text{ dB}$  ergibt sich aus dem Schnittpunkt der beiden Kurven „4 bit/Symbol“ und „6 bit/Symbol“.

**d)** Aus der Darstellung ist zu erkennen, dass mit 4-QAM (2 bit/Symbol) der Durchsatz (nahezu) 0 ist. Die QPSK ist bei diesem Vergleich identisch mit der 4-QAM und somit ebenfalls ungeeignet.



Besser wäre *Binary Phase Shift Keying* (BPSK), was der untersten Kurve „1 bit/Symbol“ entspricht  
⇒ Lösungsvorschlag 1.

## Musterlösung zur Aufgabe Z4.4

a) Die Zuordnung zu Downlink bzw. Uplink erkennt man am zweiten Buchstaben. Es bedeuten

- PDCCH: *Physical Downlink Control Channel*,
- PDSCH: *Physical Downlink Shared Channel*,
- PUCCH: *Physical Uplink Control Channel*,
- PUSCH: *Physical Uplink Shared Channel*.

Richtig sind demnach die Lösungsvorschläge 3 und 4.

b) Ein „C“  $\Rightarrow$  *Control* als dritter Buchstabe weist auf einen Kontrollkanal hin. Nutzdaten werden stets in den *Shared Channels*  $\Rightarrow$  „S“ übertragen  $\Rightarrow$  Lösungsvorschläge 2 und 4.

c) Alle Aussagen sind zutreffend:

- Ein Block im LTE–Downlink belegt im Frequenzbereich 180 kHz (zwölf Unterträger zu je 15 kHz) und hat die Dauer 1 ms.
- Die Belegung mit PDCCH und PDSCH zeigt, dass der Downlink betrachtet wird.
- Die Referenzsymbole werden benötigt, um die Kanalqualität zu schätzen und den *Channel Quality Indicator (CQI)* zu berechnen.
- Diese Referenzsymbole sind auf unterschiedliche Frequenzen bzw. Symbole (verschiedene Zeiten) verteilt, um die Kanalqualität möglichst umfassend schätzen zu können.

d) Aussage 1 stimmt, da hier nur zwei der 14 Spalten vom Kontrollkanal PDCCH belegt werden. Verallgemeinern kann man dieses Ergebnis nicht. Vielmehr ist die Aufteilung zwischen PDCCH und PDSCH–Symbolen abhängig von den Anforderungen des Nutzers und damit dynamisch.

- Bei vielen Nutzern mit niedriger Datenrate würde der PDCCH drei oder vier Symbole umfassen, weil hier eine intensivere Abstimmung nötig ist als bei wenigen gleichzeitigen Nutzern mit jeweils hoher Datenrate.
- Dem Endgerät wird die Information „Wie viele PDCCH–Symbole“ über den *Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)* mitgeteilt.

e) Alle Aussagen treffen zu:

- Die Datenrate eines jeden Nutzers hängt direkt von der Anzahl der ihm zugewiesenen Blöcke der Breite 180 kHz ab.
- Die LTI–Gesamtfrequenzbreite liegt zwischen 1.4 MHz und 20 MHz. In das Frequenzband von 1.4 MHz werden sechs Blöcke à 180 kHz untergebracht. Der Overhead beträgt somit  $(1.4 - 6 \cdot 0.18)/1.4 \approx 22.8\%$ . Bei 20 MHz: 100 Blöcke, Overhead  $(20 - 100 \cdot 0.18)/20 = 10\%$ .
- Je mehr Blöcke insgesamt zur Verfügung stehen, desto mehr kann jedem einzelnen Nutzer zugewiesen werden, wenn sein Kanal gut ist und wenn nicht gleichzeitig viele andere Nutzer ebenfalls Ansprüche stellen.

## Musterlösung zur Aufgabe A4.5

a) Richtig sind die Antworten 3 und 4. LTE-B und LTE2 sind dagegen reine Phantasienamen.

*Ultra Mobile Broadband* (UMB) stellt einen Konkurrenzentwurf zu LTE dar, wird aber dritten Generation zugerechnet. Es wurde vom **3GPP2** (*Third Generation Partnership Project 2*) spezifiziert, während LTE auf **3GPP** (*Third Generation Partnership Project*) zurückgeht. Das 3GPP2 wurde nahezu zeitgleich mit dem fast namensgleichen 3GPP im Dezember 1998 gegründet, offenbar aufgrund von unüberbrückbaren ideologischen Differenzen. Der Erfolg von UMB erscheint aber – zumindest in Europa – mehr als fraglich, denn schon der Vorgänger **cdma2000**, für den auch die Bezeichnung **W-CDMA** gebräuchlich ist, spielt so gut wie keine Rolle.

*Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) ist ein Synonym für Funkssysteme nach dem IEEE-Standard 802.16. Diese sollen in einer mobilen Variante LTE ebenfalls Konkurrenz machen. Laut Auskunft der Entwickler gibt es derzeit (2011) schon fast 600 auf WiMAX basierende Funknetze in 150 Ländern.

b) Richtig sind die Antworten 1 und 4. Die *Relay Nodes* sind quasi zusätzliche Basisstationen an den Zellenrändern und sorgen im Endeffekt für eine verbesserte Servicequalität, da damit Unterbrechungen beim Wechsel zwischen Zellen seltener werden. Gleichzeitig erhöhen sie die Reichweite.

c) Richtig sind die Antworten 2, 3 und 5. Der größte begrenzende Faktor für die tatsächlich erreichbare Datenrate ist, dass sich die Nutzer von Mobilfunksystemen die zur Verfügung stehende Bandbreite generell teilen müssen. Man spricht von einem „Shared Medium“. Sprachverbindungen bremsen das Netz aus. In kleinen Zellen ohne Sprachnutzer erreicht man allerdings fast die angegebene Rate.

Aber auch Abschirmungen durch Wände oder andere Hindernisse führen zu einer geringeren Datenrate. Die Hardware steht hingegen schon heute ausreichend zur Verfügung, um die theoretisch möglichen Übertragungsraten auch wirklich zu erreichen. Ältere Geräte werden die volle Geschwindigkeit allerdings nicht leisten können.

d) Richtig ist nur die Antworten 1. WiMAX ist in zwei verschiedenen Standards spezifiziert, einem mobilen, der eine hohe Reichweite bei weiterhin vergleichsweise hohen Datenraten bietet, sowie einem stationären, der beispielweise in einem typisch urbanen Szenario eine sechsmal höhere Reichweite als WLAN besitzt und diesem Standard somit Konkurrenz machen will. Die erreichbaren Datenraten von WiMAX und LTE sind ähnlich.

Die Antwort 3 ist ausdrücklich falsch: Die Bundesregierung unterstützt LTE, nicht WiMAX.