

### 31 Informationsübertragung durch EM-Wellen

#### Vertiefung und Kompetenzüberprüfung

Martin Apolin (Stand Mai 2012)

#### Geschichte des Funks, Funk allgemein

**A1** Man sagt, eine Welle ist die Ausbreitung einer Störung. Was ist damit gemeint? Gib Beispiele zur Entstehung von Wellen an. Was wird bei der Entstehung einer elektromagnetischen Welle gestört?

**A2** Beschreibe in Worten die 3. und 4. Maxwell'sche Gleichung. Verwende dazu Abb. 1.

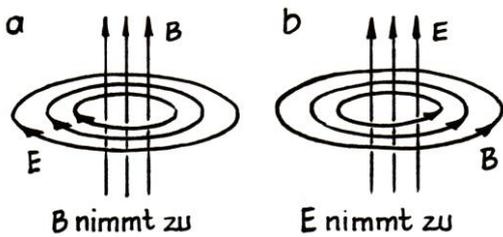


Abb. 1 zu A2 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 28.7, S. 15)

**A3** In Abb. 2 siehst du das Prinzip des Versuchs von HEINRICH HERTZ, dem 1886 im Experiment die Übertragung elektromagnetischer Wellen von einem Sender zu einem Empfänger gelang. Beschreibe in einfachen Worten die Funktionsweise des Versuchs.

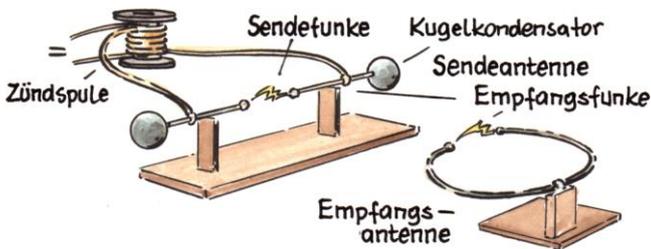


Abb. 2: Prinzip des Versuchs von Heinrich Hertz (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 31.2, S. 33).

**A4** Eine der Erkenntnisse der Speziellen Relativitätstheorie (siehe Kap. 38, BB8) ist, dass sich Information nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann. Stell dir einmal vor, du hast eine ganz lange Stange, die du auf den Mond richtest. Dann beginnst du durch Hin- und Herbewegen der Stange eine Nachricht zu morsen. Müsste die Information in diesem Fall nicht eigentlich ohne Verzögerung, also instantan, am Mond ankommen?



Abb. 3: Kann man mit einem „Stangentelefon“ Information mit Überlichtgeschwindigkeit übertragen? (Grafik: Janosch Slama)

**A5** Erkläre mit Hilfe von Abb. 4, wie ein Schwingkreis funktioniert. Verwende für deine Erklärung die Begriffe Selbstinduktion, Ladung, Energie, gedämpfte und ungedämpfte Schwingung sowie Rückkopplung. Ziehe dabei auch eine Analogie zu einem schwingenden Pendel.

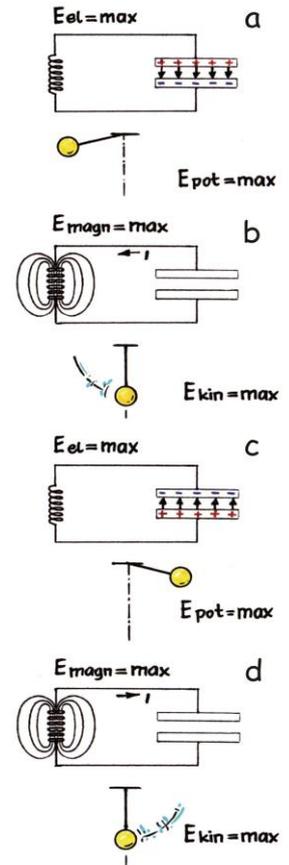


Abb. 4 zu A22 (Grafik: Janosch Slama)

**A6** Der Abstimmungskreis in einem Radioapparat hat eine Induktivität von 200 pH (pH = Picohenry; siehe Kap. 31.6, BB7). Welchen Bereich in Farad (F) muss der Drehkondensator aufweisen, um den FM-Bereich (FM = Frequenzmodulation; siehe Kap. 36.2, BB7) zu erfassen? Verwende für deine Berechnung Tab. 1.

	Frequenzbereich	Bandbreite	Beispiele für Einsatz
AM	300 kHz–30 MHz	9 kHz	Amateurfunk, Flugfunk, Sprechradio (Kurz- und Mittelwelle)
FM	88 MHz–108 MHz	180 kHz	„normales“ Muskradio
		400 kHz	Muskradio mit Radio Data System (RDS)

Tab. 1 zu A6: Frequenz-Richtwerte für AM und FM

**A7** Wie lang muss eine Sendeantenne sein, damit man damit der Musiksender Ö3 mit 99,9 MHz übertragen kann? Verwende dazu die Gleichung  $c = \lambda \cdot f$ .  $c$  ist die Lichtge-

schwindigkeit (rund  $3 \cdot 10^8$  m/s) und  $f$  die Frequenz des Senders.

**A8** Die Elektronen in einer Antenne schwingen in der Mitte am stärksten und am Rand gar nicht. Deshalb ist in der Mitte die Stromstärke am höchsten (Abb. 5).

**a** Überlege mit Hausverstand, warum das nicht anders sein kann.

**b** Man nennt Antennen auch „ $\lambda/2$ -Dipol“. Begründe diese Bezeichnung.

**c** Welche Analogie aus der Mechanik gibt es, bei der eine ähnliche Schwingung auftritt wie in Abb. 5?

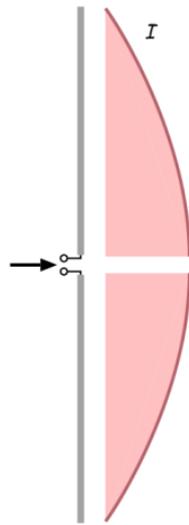


Abb. 5 (Quelle: Wikipedia)

**A9** Warum ist das Resonanzverhalten einer Antenne nicht scharf ausgeprägt? Mit anderen Worten: Warum darf eine Antenne bei einem Radio ein bisschen länger oder kürzer sein, als sie eigentlich sein sollte? Verwende für deine Erklärung Abb. 6.

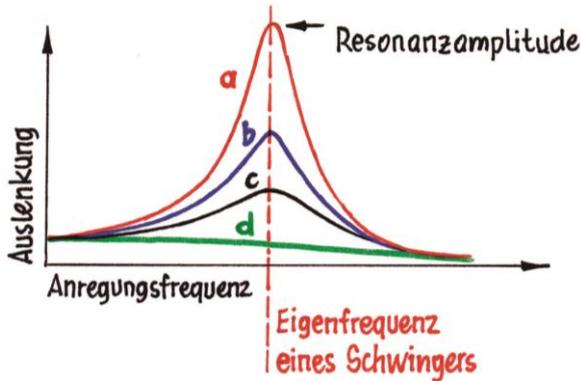


Abb. 6: Zusammenhang zwischen Anregungsfrequenz und Amplitude der Schwingung bei verschiedenen starken Dämpfungen: a = schwache Dämpfung, d = starke Dämpfung (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 18.36, S. 36, BB6).



Abb. 7: „Ghosting“: störende Doppelbilder beim Fernsehen (Bild: GraYoshi2x; Quelle: Wikipedia).

**A10** Unter bestimmten Umständen kann es beim Fernsehen zu „Geisterbildern“ kommen (siehe Abb. 7), also zu störenden Doppelbildern. Diesen Effekt nennt man auch „Ghosting“. Im Zeitalter von Kabel- und Satellitenfernsehen ist dieser Effekt nicht mehr zu beobachten. Wie könnte er zu Stande kommen?

**A11** Im Jahr 1901 funkte Marconi über eine Strecke von 3400 km von Europa nach Kanada. Wie ist es möglich, über so eine weite Strecke zu funken? Müsste auf Grund der Erdkrümmung das Signal nicht einfach ins Weltall entweichen? Hilfe dir mit Abbildung 8!

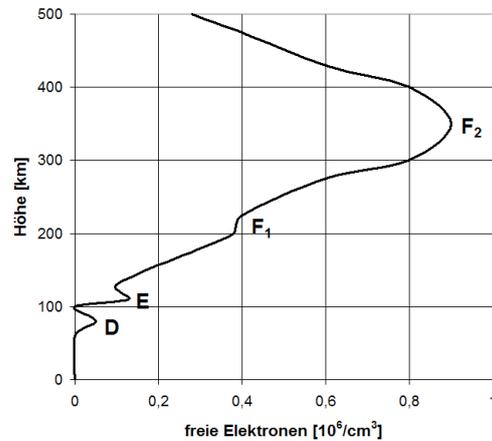


Abb. 8: Die Anzahl der freien Elektronen in der Atmosphäre (Grafik: Sebastian Janke; Quelle: Wikipedia)

**A12** Überlege, wie es zu den freien Elektronen in der Ionosphäre kommen könnte! Hilf dir mit Abb. 9! Was könnte der Grund dafür sein, dass die Ladungsverteilung über verschiedenen Gegenden so unterschiedlich ist?

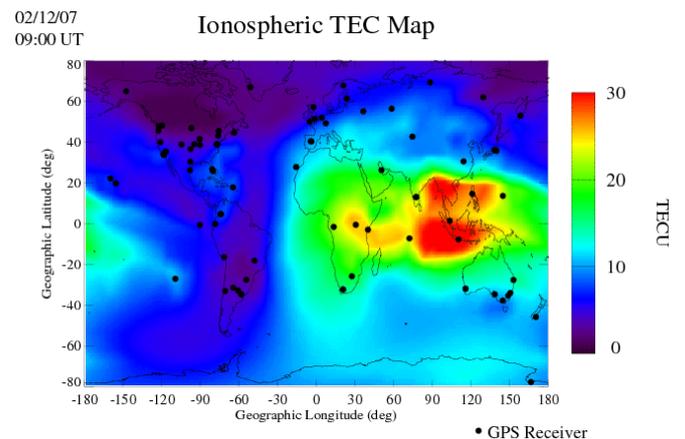


Abb. 9: Ladungsdichte der Ionosphäre, gemessen durch GPS-Bodenstationen. 1 TEC (Total electron content) entspricht  $10^{16}$  Elektronen/m<sup>2</sup> (Grafik: NASA, Jet Propulsion Laboratory).

**A13** In Abb. 10 siehst du eine schematische Darstellung der Sendeanlage bei der Transatlantikübertragung durch MARCONI. Beschrifte die Teile Zündspule, Antenne, Funkenstrecke, Erdung und Spannungsquelle. Was fällt bei der Antenne auf? Zeichne die Stromstärke in der Antenne ein (siehe Abb. 5).

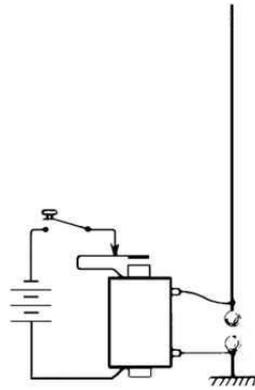


Abb. 10 (Quelle: www.leifiphysik.de)

**A16** Wie viele Sender mit RDS (siehe BB7, S. 97) kann man rein theoretisch im Sendebereich von FM unterbringen? Verwende dazu Tab. 2!

	Frequenzbereich	Bandbreite	Beispiele für Einsatz
AM	300 kHz–30 MHz	9 kHz	Amateurfunk, Flugfunk, Sprechradio (Kurz- und Mittelwelle)
FM	88 MHz–108 MHz	180 kHz	„normales“ Musikradio
		400 kHz	Musikradio mit Radio Data System (RDS)

Tab. 2 (siehe auch Tab. 31.1, S. 35)

**Formen der Modulation**

**A14** Warum kann man Informationen nicht einfach so übertragen, also ohne Trägerwelle? Warum kann man Sprache oder Musik nicht einfach in EM-Wellen mit genau dieser Frequenz umwandeln und diese dann senden? Kurz: Wieso ist Modulation notwendig? Sammle Argumente dafür!

**A15** Nimm an, du willst Sprache oder Musik nicht durch eine Trägerwelle übertragen, sondern diese Schwingungen in EM-Wellen umwandeln und mit genau dieser Frequenz direkt senden. Du würdest also Niederfrequenz senden (siehe auch A14). Wie lange müssten dann die Sende- und Empfangsantennen sein? Hilf dir mit Abb. 11 und A7.

**A17 a** Erkläre, warum jeder FM-Sender eine bestimmte Bandbreite haben muss. Hilf dir mit Abb. 12!

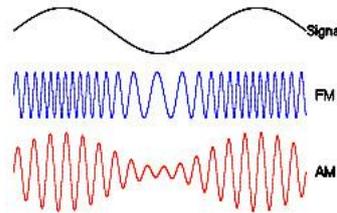


Abb. 12 zu A17 (Grafik: Berserkerus; Quelle: Wikipedia)

**A17 b** Was ist in Abb. 13 dargestellt?

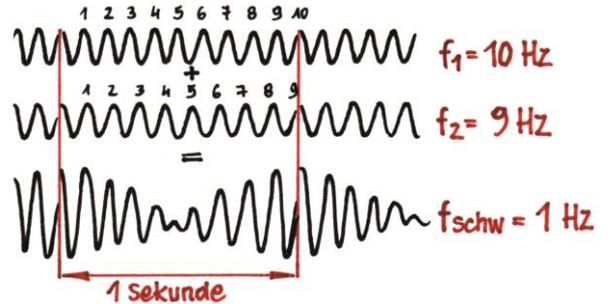


Abb. 13 zu A17 b (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 18.48, S. 40, BB6).

**A17 c** Erkläre, warum jeder AM-Sender eine bestimmte Bandbreite haben muss. Verwende dazu die Abbildungen 12 und 13!

**A18** Stell dir vor, dein Radio empfängt einen Sender mit genau 100 MHz. Nimm an, er könnte alle anderen Frequenzen ausschließen, auch die, die sehr dicht an 100 MHz liegen. Würde sich das gut oder schlecht auf den Empfang des Senders auswirken? Und warum?

**A19** In Abb. 14 sind drei digitale Modulationsverfahren dargestellt: FM, AM und PM (Phasenmodulation). Ordne diese

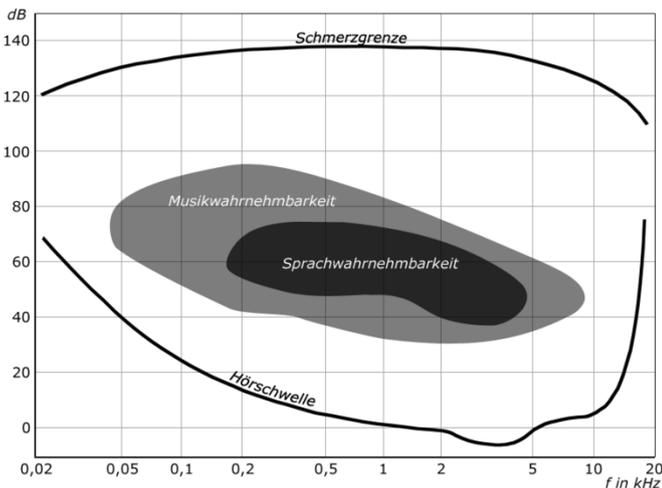


Abb. 11: Hörfläche des normalhörenden Menschen in Abhängigkeit von Schalldruckpegel und Frequenz (Quelle: Wikipedia).

richtig zu. Welche Unterschiede bestehen zwischen der analogen und digitalen Amplituden- und Frequenzmodulation? Vergleiche mit Abb. 12!

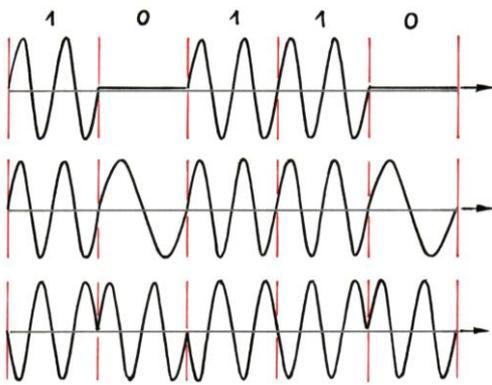


Abb. 14: Drei Formen der digitalen Modulation (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 31.12, S. 37).

**Analog und digital**

**A20** Wandle die Dezimalzahlen bis 16 in Binärzahlen um und vervollständige Tabelle 3. Bedenke, dass Binärzahlen nur aus 0 und 1 bestehen. Suche daher immer die nächstgrößere Zahl, die nur aus 0 und 1 besteht. Welche Regelmäßigkeit kannst du dabei erkennen? Warum ist das so?

dezimal	binär	dezimal	binär
0	0	9	
1	1	10	
2	10	11	
3		12	
4		13	
5		14	
6		15	
7		16	
8			

Tab. 3 zu A20

**A21 a** In Tabelle 4 siehst du eine achtstellige Binärzahl (ein Byte). In der Spalte darüber siehst du die dezimale Wertigkeit, die jede dieser Stellen besitzt (siehe A20). Die Binärzahl 100 ist dezimal z. B. 4. Man kann das auch so anschreiben:  $100_2 = 4_{10}$ . Das bedeutet, dass die 3. Stelle von hinten den dezimalen Wert 4 besitzt. Wandle die Binärzahl in eine Dezimalzahl um!

dez. Wertigkeit	128	64	32	16	8	4	2	1
Binärzahl	1	1	1	1	1	1	1	1

Tab. 4: Eine 8-stellige Binärzahl (2. Zeile) und die dezimale Wertigkeit der einzelnen Stellen.

**A21 b** Wandle nun auch die drei Binärzahlen in Tabelle 5 in Dezimalzahlen um. Vervollständige zuerst die erste Zeile und gehe dann vor wie bei A21 a. Kannst du vorhersagen,

welche der Dezimalzahlen gerade und ungerade sein werden?

dez. Wertigkeit								
Binärzahl	1	0	1	0	1	0	1	0
	1	1	0	1	1	0	1	1
	1	1	1	0	1	1	1	0

Tab. 5 zu A21 b

**A21 c** Welche schnelle und elegante Methode gibt es, die Binärzahl in Tab. 4 in eine Dezimalzahl umzuwandeln, ohne dabei alle Zahlen zu addieren? Überlege dazu, wie die nächstgrößere Binärzahl aussieht.

**A22** In Word kann man Farben benutzerdefiniert einstellen (Abb. 15). Dabei kann man den Farben Rot, Grün und Blau Werte von 0 bis 255 zuweisen. Wie viele Farben lasse sich damit in Summe darstellen? Wie groß ist die „Farbtiefe“ in bit? Diese gibt an, wie viele bits man benötigt, um einen farbigen Pixel abzuspeichern.

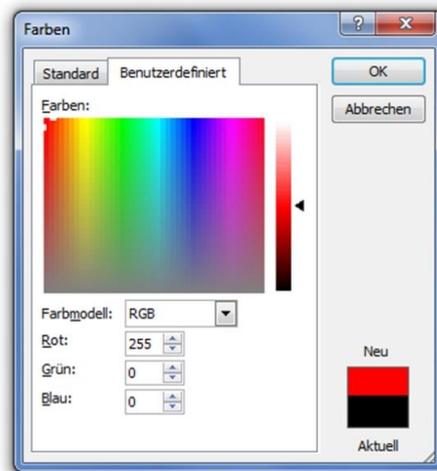


Abb. 15 zu A21 (Grafik: Martin Apolin)

**A23 a** Beim Beamen in den SciFi-Filmen wird der Mensch zuerst exakt gescannt und dann aufgelöst. Diese Informationen werden mit einem Transporterstrahl zum Zielort geschickt (engl. „beam“ bedeutet Strahl), wo der Mensch wieder zusammengesetzt wird. Berechne die Datenmenge, die notwendig ist, um einen Menschen zu beamen. Nimm dazu an, dass man ein Kilobyte (1 kB) an Daten benötigt, um die Eigenschaften eines Atoms genau zu beschreiben. Ein Mensch besteht aus etwa  $10^{28}$  Atomen.

**A23 b** Die maximale drahtlose Datenübertragungsrate liegt momentan bei 800 Megabit pro Sekunde (Stand 2012). Runden wir auf 1000 Megabit oder 1 Gigabit/s auf. Wie viele

Byte pro Sekunde sind das? Nimm an, dass in ferner Zukunft die Datenübertragungsrate um den Faktor  $10^9$  gesteigert werden kann, also eine Milliarde mal schneller ist als jetzt. Das ist eigentlich schon ziemlich optimistisch. Wie lange würde es dann trotzdem dauern, um die Datenmenge eines zu beamenden Menschen an den Zielort zu übertragen? Hilf dir mit dem Ergebnis von A23 a.

**A23 c** Umgekehrt: Um welchen Faktor müsste die momentane Datenübertragungsrate (siehe A23 b) gesteigert werden, damit man einen Menschen innerhalb von 10 Sekunden beamen kann?

**A23 d** Nehmen wir an, du willst einen Menschen in 10 Sekunden beamen. Du verwendest dabei eine digitale Amplitudenmodulation (Abb. 16). Wie groß muss die Frequenz der Trägerwelle sein, damit du das schaffen kannst? Verwende das Ergebnis aus A23 a. Welche EM-Wellen haben eine solche Frequenz? Verwende dazu Abb. 17!

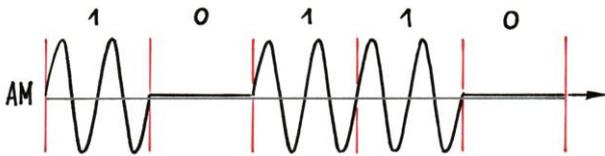


Abb. 16 zu A23 d

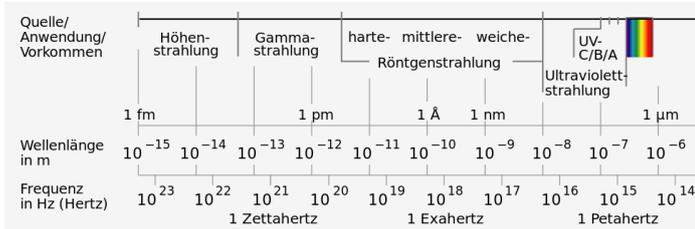


Abb. 17: Ausschnitt aus dem Spektrum der EM-Wellen (Grafik: Horst Frank / Phrood / Anony; Quelle: Wikipedia).

**Das Handy**

**A24 a** Stimmt es, dass Handys Mikrowellenstrahlung aussenden? Von Mikrowellen spricht man, wenn die elektromagnetischen Wellen eine Länge von 1 mm bis 30 cm haben. Berechne mit Hilfe der Gleichung  $c = f \cdot \lambda$  und Tab. 6 die Wellenlänge von Handystrahlung. Die Lichtgeschwindigkeit  $c$  beträgt etwa  $3 \cdot 10^8$  m.

Generation	Bezeichnung	max. Datenübertragungsrate	Frequenzbereiche
1G ab 1981	AMPS	-	0,88–0,96 GHz
2G ab 1991	GSM, GPRS und Edge	$2,2 \cdot 10^5$ bit/s (220 kbit/s)	1,7–1,88 GHz
3G ab 2001	UMTS, HSDPA, HSPA+	$1,44 \cdot 10^7$ bit/s (14,4 Mbit/s)	1,9–2,200 GHz
4G ab 2009	LTE, LTE-A	$10^9$ bit/s (1 Gbit/s)	Bänder um 0,8 GHz, 1,8 GHz, 2 GHz und 2,6 GHz

Tab. 6 (siehe Tab. 31.2, S. 38)

**A24 b** Manchmal hört man, dass man mit Handys Eier zum Kochen bringen kann. Stimmt das? Argumentiere mit dem Ergebnis aus A24 a und mit Hilfe von Tabelle 6.

**A25** Erzeugt ein Mobilfunknetz mit vielen Sendern oder eines mit wenigen Sendern stärkere EM-Wellen?



Abb. 18: Sendemasten mit Basisstationen für Handys auf einem Hausdach (Foto: Martin Apolin).

**A26** In Abb. 19 siehst du den Zusammenhang zwischen der an einem iPhone angezeigten Signalstärke (den „Balken“) und die Umrechnung in Dezibel. Für das Energieverhältnis  $L$  gilt

$$L = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} \text{ dB}$$

wobei  $P_1$  und  $P_2$  die Leistungen sind.

Um wie viel Mal empfängt das Handy bei 5 Balken besser als bei einem?

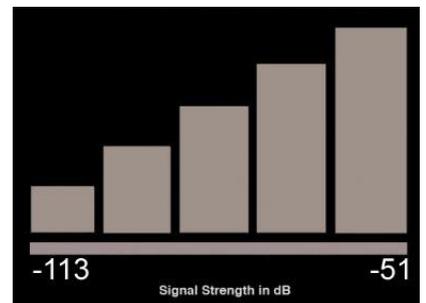


Abb. 19 (Grafik: Foto: anandtech.com)

**A27** Das Auto ist ein Faraday'scher Käfig. Man sagt, dass im Inneren eines solchen Käfigs kein elektrisches Feld herrscht. Können EM-Wellen in einen solchen Käfig ein- oder ausdringen? Überlege dir einfache Argumente mit Hausverstand.

## Der Elektrosmog

**A28** Welche Geräte, die du aus dem Alltag kennst, arbeiten zur Informationsübertragung mit EM-Wellen?

**A29** Schätzen den SAR-Wert (siehe BB7, S. 40) eines veralteten GSM- und eines modernen UMTS-Handys in W/kg ab. Verwende dazu Tab. 6! Nimm an, dass die EM-Wellen halbkugelförmig in den Kopf eindringen und nimm die Dichte des Kopfes mit  $1 \text{ g/cm}^3$  an. Nimm vereinfacht an, dass die gesamte Strahlung vom Kopf absorbiert wird. Vergleiche das Ergebnis mit dem obersten Grenzwert von  $2 \text{ W/kg}$ , der von der WHO empfohlen wird.

**A30** In Mitteleuropa beträgt die Stärke des Erdmagnetfeldes etwa  $50 \mu\text{T}$ . Vergleiche dieses mit der magnetischen Feldstärke unter einer  $380 \text{ kV}$ -Leitung (Abb. 20).

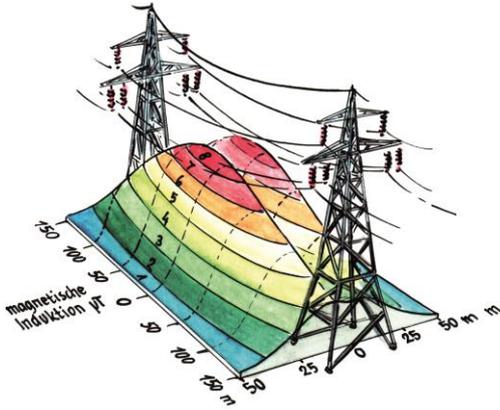


Abb. 20: Abb. Das Magnetfeld unter einer  $380 \text{ kV}$ -Leitung (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 31.19, S. 39).

**A31** Um die Strahlung von Handys zu verringern, bietet eine Firma einen so genannten „Energy Badge“ an, ein münzen-großes Ding, das man auf das Handy klebt. Sie schreibt dazu: „... Dabei setzen wir konkret auf die Synthese dreier Kernaspekte. Während RayGuard® den Quarz, welcher seit jeher gegen Auswirkungen verschiedenster Strahlung eingesetzt wird, einarbeitet, steuert PENERGETIC® ihre physikalisch-energetische Programmiermethode bei, um so die Gesamtwirkung zu potenzieren. Die Synthese kanalisiert sich im hauseigenen Avantgarde Energetic® Design, welches der Symbolik und Farbgebung eine bedeutende Rolle zuspricht ... call it magic.“  
Kommentiere dieses Zitat!

**Hilfe zu A1:** Bei einer Flüssigkeitswelle wird z. B. die ruhende Wasseroberfläche gestört. Beim Donner wird die ruhende Luft durch die plötzliche Ausdehnung der Luft im Blitzkanal gestört. Bei einer elektromagnetischen Wellen wird das elektromagnetische Feld durch die Beschleunigung einer Ladung gestört.

**Hilfe zu A2:** 3. Gleichung (Abb. 1a): Wenn sich ein Magnetfeld ändert, ist es von ringförmig geschlossenen elektrischen Feldlinien umgeben. Das ist eine andere Formulierung des Induktionsgesetzes (Kap. 28.1). Während bei einem elektrostatischen Feld die Feldlinien Anfang und Ende haben, sind sie im elektrodynamischen Feld geschlossen. 4. Gleichung (Abb. 1 b): Wenn sich ein elektrisches Feld ändert, ist es von ringförmigen geschlossenen Feldlinien umgeben. Nicht nur Ströme, sondern auch veränderliche elektrische Felder erzeugen also magnetische Wirbelfelder.

**Hilfe zu A3:** Mit einer Art Zündspule wird ein Funke erzeugt. Dieser löst in den Antennen Ladungsschwingungen aus – EM-Wellen entstehen. Wenn die Empfangsstation in Resonanz gerät, dann springt zwischen den Metallkugeln ebenfalls ein Funke über.

**Hilfe zu A4:** Wenn du dein Ende der Stange bewegst, komprimiert sich das Material etwas, und diese Kompressionswelle kann mit maximal Lichtgeschwindigkeit durch die Stange laufen, erst dann kann sich das Ende am Mond bewegen. Du erzeugst also eine Longitudinalwelle. Gäbe es eine völlig unkomprimierbare Substanz, so würden sich beide Enden gleichzeitig bewegen, und du könntest Information zum Mond – und überall hin - unendlich schnell übertragen. Die Relativitätstheorie verbietet also interessanter Weise indirekt, dass es unkomprimierbare Stoffe gibt und somit „Stangentelefone“, die schneller als herkömmliche Handys sind, denn diese übertragen mit Lichtgeschwindigkeit!

**Hilfe zu A5:** Zunächst muss der Kondensator durch eine Spannungsquelle aufgeladen werden (Abb. a). Dann wird er entladen. Durch den Stromfluss baut sich in der Spule ein Magnetfeld auf (b). Wenn der Kondensator entladen ist, bricht das Magnetfeld zusammen. Dadurch kommt es in der Spule zur Selbstinduktion (siehe Kap. 27.2), die den Stromfluss noch etwas aufrechterhält, wodurch sich der Kondensator gegengleich auflädt (c). Dann läuft alles wieder retour (d + a) und fängt von neuem an.

Aber nicht nur die Ladungen schwingen, sondern auch die Energien. Einmal befinden sich diese im elektrischen Feld (a

und c), einmal im magnetischen (b und d). Ähnlich ist es bei einem schwingenden Pendel. Dabei wandeln sich potenzielle und kinetische Energie ineinander um. Wenn du ein Pendel nur einmal anstupst, dann wird es bald auspendeln, weil immer eine gewisse Menge an Energie in Form von Wärme verloren geht. Dadurch entsteht eine gedämpfte Schwingung. Wenn du aber im richtigen Zeitpunkt Energie zuführst, indem du am höchsten Punkt antauchst, kannst du eine ungedämpfte Schwingung erzeugen. Beim Schwingkreis ist es vom Prinzip her genauso. Hier übernimmt das „Antauchen“ jedoch eine elektronische Schaltung. Weil die Energiezufuhr vom Schwingkreis selbst ausgelöst wird, spricht man von einer Rückkopplung.

**Hilfe zu A6:** Der Bereich von FM-Radio liegt von 88 bis 108 MHz. Aus  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  folgt  $C = \frac{1}{4\pi^2Lf^2}$ . Wenn man nun beide Frequenzen einsetzt, erhält man  $C = \frac{1}{4\pi^2Lf^2} = \frac{1}{4 \cdot 9,87 \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot (88 \cdot 10^6)^2} F = 1,6 \cdot 10^{-8} F$  bzw.

$C = \frac{1}{4\pi^2Lf^2} = \frac{1}{4 \cdot 9,87 \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot (108 \cdot 10^6)^2} F = 1,09 \cdot 10^{-8} F$ . Diesen Bereich muss daher der Drehkondensator abdecken.

**Hilfe zu A7:** Es gilt  $\lambda = c/f$  und daher  $\lambda/2 = c/(2f)$ . Die Sendeanenne für Ö3 muss daher  $3 \cdot 10^8 / (199,8 \cdot 10^6) \text{ m} \approx 1,5 \text{ m}$  lang sein.

**Hilfe zu A8 a:** Am Rand können die Elektronen nicht schwingen, weil sie sonst aus der Antenne austreten würden.

**Hilfe zu A8 b:** Weil sich die Enden der Antenne wie die Platten des Kondensators wechselweise unterschiedlich laden, sagt man zu ihr auch Dipol! Die Stromstärke in der Mitte der Antenne hat einen Schwingungsbauch (maximale Amplitude) und ist am Rand null (Amplitude null). Das ist die Grundschwingung einer stehenden Welle. Die Länge dieser Grundschwingung entspricht der halben Wellenlänge ( $\lambda/2$ ) der fortschreitenden elektromagnetischen Welle, und daher kommt die Bezeichnung „ $\lambda/2$ -Dipol“.

**Hilfe zu A8 c:** Die Grundschwingung einer Seite entspricht ebenfalls einer stehenden Welle mit der halben Wellenlänge. Allerdings ist diese Schwingung transversal. Auch die Grundschwingungen in einer beidseitig geschossenen Röhre entsprechen einer stehenden Welle mit der halben Wellenlänge. Diese Schwingung ist, wie beim  $\lambda/2$ -Dipol longitudinal.

**Hilfe zu A9:** Die Empfangsantenne beginnt selbst zu strahlen, so wie auch ein Resonanzkörper bei einem Musikinstrument Schall abstrahlt. Dadurch ist aber die Schwingung sehr stark gedämpft. Bei einer stark gedämpften Schwingung ist wiederum das Resonanzverhalten nicht sehr scharf ausgeprägt (siehe Abb. 6 c + d). Mit anderen Worten: Der Unterschied zwischen der idealen und nicht-idealen Anregungsfrequenz macht nicht so einen großen Unterschied.

**Hilfe zu A10:** Die elektromagnetischen Wellen können über ein Hindernis (Hochhaus, Kran, Wolken,...) zur Antenne reflektiert werden. Durch die Reflexion werden sie abgeschwächt und treffen mit zeitlicher Verzögerung ein. Daher erzeugen sie ein zweites, etwas schwächeres Bild. Dieser Effekt tritt daher nur beim Antennenfernsehen auf (terrestrisches Fernsehen), nicht aber beim Kabelfernsehen und auch nicht beim Empfang von Satellitensignalen, weil in diesem Fall die Welle ungestört den Empfänger erreichen kann.

**Hilfe zu A11:** Die Übertragung konnte nur deshalb gelingen, weil die elektromagnetische Welle an der Ionosphäre totalreflektiert wurde (siehe Kap. 29.2), wie das in Abb. 21 schematisch dargestellt ist. Die Bodenwelle könnte auf Grund der Erdkrümmung das Ziel nicht erreichen. Das Signal wurde in der Ionosphäre in etwa 100 Kilometern Höhe über der Erdoberfläche an durch Sonnenstrahlung ionisierten Gaspartikeln reflektiert. Wahrscheinlich waren sogar zwei solche Reflexionen beteiligt. Ironischer Weise war dieser Umstand Marconi gar nicht bewusst, denn die Ionosphäre wurde erst 1924 entdeckt.

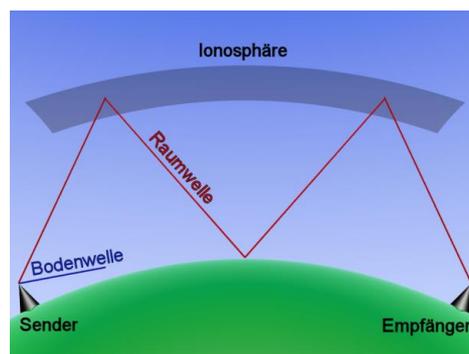


Abb. 21 (Grafik: Sebastian Janke; Quelle: Wikipedia)

**Hilfe zu A12:** Die Ionosphäre entsteht durch Absorption ionisierender solarer Strahlung, vor allem durch energiereiche elektromagnetische Wellen (Ultraviolett- und Röntgenstrahlung). Einen gewissen Betrag leisten aber auch Teilchenstrahlung (hauptsächlich Elektronen und Protonen) und die kosmische Hintergrundstrahlung. Durch die solare Strahlung

werden Valenzelektronen von den Atomen gelöst. In Abb. 9 kann man sehr gut erkennen, dass auf einer Seite der Erde (der Tagseite) durch die Sonneneinstrahlung die Ionosphäre sehr stark ausgeprägt ist (bis zu 30 TEC). Die unteren Schichten der Ionosphäre sind daher auch nur unter Tags vorhanden und verschwinden nach dem Untergehen der Sonne wieder. Nur die oberste Schichte (250 bis 400 km) ist auch in der Nacht vorhanden. In Abb. 9 kann man erkennen, dass diese nur etwa 10 TEC ausmacht, also etwa 1/3 des Wertes unter Tags.

**Hilfe zu A13:** Bei der Antenne in Abb. 22 fällt auf, dass der untere Teil fehlt (siehe z. B. Abb. 5). Daher spricht man von einem  $\lambda/4$ -Dipol. Auf der mehr oder weniger gut leitenden Erde werden Ladungen induziert. Diese stellen quasi den virtuellen unteren Teil der Antenne dar.

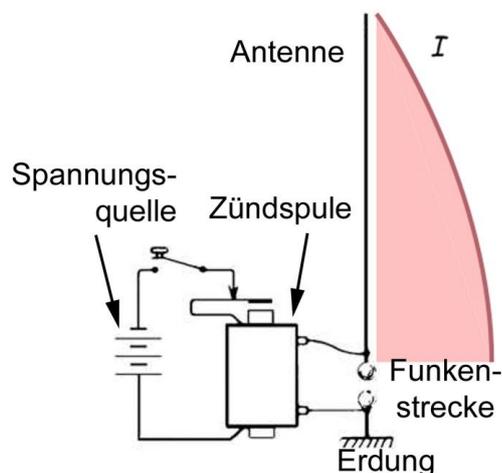


Abb. 22 (verändert nach www.leifiphysik.de)

**Hilfe zu A14:** 1) Wenn man Sprache oder Musik direkt aus-senden wollte, gäbe es landesweit nur ein einziges „Pro-gramm“, weil dieses den kompletten Niederfrequenzbereich beanspruchen würde. Jedes andere Programm würde den gleichen Frequenzbereich belegen und stören. Es wäre so, also würden viele Menschen gleichzeitig sprechen und nebenbei spielen gleichzeitig einige Bands.

2) Es gilt  $\lambda = c/f$ . Je kleiner die Frequenz, desto größer ist die Wellenlänge und desto länger muss die Antenne sein. Würde man also in Niederfrequenz senden, wären riesige Antennen erforderlich (siehe A15).

3) Der Empfängerschwingkreis kommt nur dann in Reso-nanz, wenn er genau auf die Sendefrequenz eingestellt ist. Würde man Sprache oder Musik direkt senden, könnte man den Empfängerkreis nicht gut oder gar nicht auf die Frequenz abstimmen.

4) Stereoübertragung wäre nicht möglich, weil dazu die Sig-nale beim Empfänger wieder getrennt werden müssen.

5) Die Vielfachausnutzung einer Lichtwellenleiter- oder Funkverbindung für einige Hundert gleichzeitig geführte Te-lefongespräche oder mehrere Fernsehprogramme wäre oh-ne raffinierte Modulationsverfahren undenkbar.

**Hilfe zu A15:** Der Mittelbereich bei der Wahrnehmung von Musik oder Sprache liegt um 0,5 bis 1 kHz. Nehmen wir exemplarisch eine Frequenz von 1 kHz, die per EM-Wellen übertragen werden soll. Wie groß müssten die Antennen dann sein? Es gilt  $\lambda = c/f$  und daher  $\lambda/2 = c/(2f)$ . Die Anten-nen müssten dann  $3 \cdot 10^8 / (2 \cdot 10^3) \text{ m} \approx 1,5 \cdot 10^5 \text{ m} = 1500 \text{ km}$  lang sein. Selbst für den oberen Frequenzbereich von 10 kHz müssten die Antennen immer noch 150 km lang sein. Ab-surd! Außerdem würden sie dann nur für den Empfang einer Frequenz optimal ausgelegt sein.

**Hilfe zu A16:** Ein RDS-Sender hat eine Bandbreite von 400 kHz, also von  $4 \cdot 10^5 \text{ Hz}$ . Der Frequenzbereich von FM liegt zwischen 88 und 108 MHz, ist also 20 MHz ( $2 \cdot 10^7 \text{ Hz}$ ) „breit“. (Anm.: Diese „Breite“ darf aber nicht mit einer Bandbreite verwechselt werden.) Man kann daher im FM-Bereich rein theoretisch  $2 \cdot 10^7 \text{ Hz} / (4 \cdot 10^5) \text{ Hz} = 50$  Sender un-terbringen.

**Hilfe zu A17 a:** Bei der Frequenzmodulation liegt die Infor-mation in der Änderung der Frequenz. Würde sich die Fre-quenz der Trägerwelle nicht ändern, dann könnte man auch keine Information übertragen, also nur Stille. Kurz: Ohne Bandbreite koa Musi.

**Hilfe zu A17 b:** Was passiert, wenn man zwei Schwingungen mit leicht unterschiedlicher Frequenz überlagert? Dann ent-steht eine sogenannte Schwebung. Die Amplitude der Ge-samtschwingung schwillt dabei ständig an und wieder ab. Wenn man zum Beispiel zwei Töne mit leicht unterschiedli-cher Frequenz überlagert, würdest du diese nicht getrennt wahrnehmen, sondern als einen Ton, der ständig leiser und lauter wird.

**Hilfe zu A17 c:** Warum gibt es bei AM eine Bandbreite? Da-bei ändert sich die Trägerfrequenz ja nicht! Denke an eine Schwebung. Dabei überlagern sich zwei Schwingungen mit ähnlicher Frequenz (Abb. 13 unten). Eine Amplitudenmodu-lation sieht ähnlich aus (Abb. 12 unten). Damit sich die Amplitude ändern kann, muss sie zumindest aus zwei über-lagerten Frequenzen bestehen. Im Realfall überlagern sich

aber viele Frequenzen, und diese ergeben zusammen die Bandbreite.

**Hilfe zu A18:** Das ist eine Kontrollfrage zu A17. Egal ob AM oder FM, um Information zu übertragen bedarf es einer Bandbreite. Wenn das Radio aber ausschließlich 100 MHz empfangen kann, kann es die modulierte Welle nicht empfangen, sondern nur die unmodulierte Trägerwelle und bleibt stumm.

**Hilfe zu A19:** In Abb. 23 siehst du die Zuordnung zu den Modulationsformen. Was ist der Unterschied zwischen der digitalen und analogen AM? Bei der analogen AM können beliebige Amplituden vorkommen, bei der digitalen AM gibt es aber nur „an“ und „aus“. Es gibt also nur eine einzige Amplitude. Bei der analogen FM verändert sich die Frequenz kontinuierlich, bei der digitalen FM gibt es aber zwei verschiedene Frequenzen.

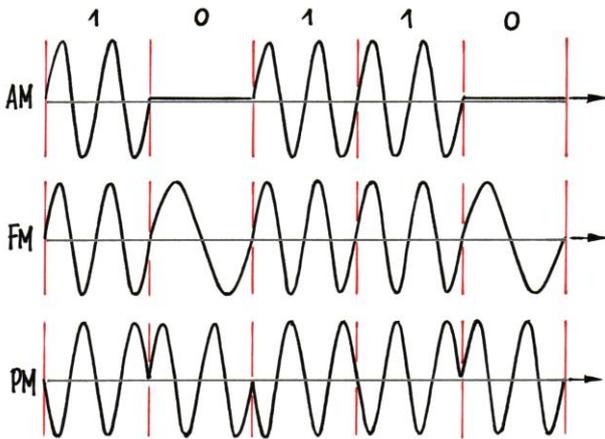


Abb. 23: Drei Formen der digitalen Modulation (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 31.12, S. 37).

**Hilfe zu A20:** In Tab. 7 siehst du die Dezimalzahlen von 0 bis 16 und die dazugehörigen Binärzahlen. Welches Muster fällt auf? Immer wenn sich die Dezimalzahl verdoppelt (1, 2, 4, ...) kommt bei der Binärzahl hinten ein Nuller dazu. Warum ist das so? Überlege zuerst mit Dezimalzahlen. Wenn du hinten einen Nuller anhängst, verzehnfacht sich der Wert jedes Mal (dez. 1, 10, 100,...), weil es 10 verschiedene dezimale Ziffern gibt. Weil Binärzahlen aber nur den Wert 0 und 1 haben, verdoppelt sich der Wert der Zahl, wenn du einen Nuller anhängst.

dezimal	binär	dezimal	binär
0	0	9	1001
1	1	10	1010
2	10	11	1011
3	11	12	1100

4	100	13	1101
5	101	14	1110
6	110	15	1111
7	111	16	10000
8	1000		

Tab. 7 zu A20

**Hilfe zu A21 a:** Um diese Zahl umzuwandeln, musst du nur die dezimalen Wertigkeiten über den Stellen addieren. Nachdem in diesem Fall lauter Einser vorkommen, ist die zugehörige Dezimalzahl  $128+64+32+16+8+4+2+1 = 255$ . Man kann also schreiben:  $11111111_2 = 255_{10}$ .

**Hilfe zu A21 b:**  $10101010_2 = 170_{10}$ ;  $11011011_2 = 219_{10}$ ;  $11101110_2 = 238_{10}$ . Die letzte binäre Stelle hat die Wertigkeit 1. Nur wenn diese „gesetzt“ ist, kann daher die dazu gehörige Dezimalzahl ungerade sein, in unserem Fall also die mittlere.

**Hilfe zu A21 c:** Die nächstgrößere Zahl zu  $11111111_2$  ist  $100000000_2$ . Nachdem sich die Wertigkeit der Stellen immer verdoppelt, hat die erste Stelle einer 9-stelligen Binärzahl den dezimalen Wert 256. Weil die Zahl sonst lauter Nuller hat, gilt also  $100000000_2 = 256_{10}$ .  $11111111_2$  muss daher eins kleiner sein, also  $255_{10}$ .

**Hilfe zu A22:** Jede Farbe kann 256 Werte aufweisen (0 bis 255). Daher kann man durch Mischung in Summe  $256^3 \approx 16,7$  Millionen Farben darstellen. Wie viele bit braucht man, um eine Zahl von 0 bis 255 darzustellen? Man benötigt dazu 8 bit, weil die Binärzahl  $11111111$  dezimal 255 ergibt. Um daher einen Pixel zu speichern, der etwa 16,7 Millionen Farben haben kann, benötigt man eine Farbtiefe von  $3 \cdot 8$  bit = 24 bit.

**Hilfe zu A23 a:** Ein kB entspricht  $10^3$  B. Man müsste daher vor dem Beamen  $10^{31}$  B an Information auslesen.

**Hilfe zu A23 b:** 1 Byte besteht aus 8 bit. Wenn die Datenübertragungsrate also 1 Gigabit pro Sekunde beträgt, dann werden  $0,125$  Gigabyte/s (=  $0,125 \cdot 10^9$  Byte/s  $\approx 1,3 \cdot 10^8$  Bytes/s) übertragen. Wenn die Übertragungsrate in ferner Zukunft um den Faktor  $10^9$  gesteigert wird, dann wären das  $1,3 \cdot 10^{17}$  Bytes/s. Weil jedoch  $10^{31}$  Bytes übertragen werden müssen (siehe A23 a), braucht man dazu  $10^{31}$  Bytes/( $1,3 \cdot 10^{17}$  Bytes/s) =  $7,7 \cdot 10^{13}$  s. Ein Jahr hat  $3,15 \cdot 10^7$  s. Es würde daher  $2,44 \cdot 10^6$  Jahre oder rund 2,4 Millionen Jahre dauern, um die Daten zu übermitteln. Recht unpraktikabel!

**Hilfe zu 23 c:** Gehen wir wieder vom momentanen Wert von  $1,3 \cdot 10^8$  Bytes/s aus. Es müssen in Summe  $10^{31}$  Byte übertragen werden. Damit das in 10 Sekunden passieren kann, müssen also  $10^{30}$  Byte pro Sekunde übertragen werden. Das liegt über den Daumen um einen Faktor  $10^{22}$  über den momentanen Möglichkeiten. Mit anderen Worten: Wenn einmal die Datenübertragungsrate 10 Trilliarden mal schneller ist als heute, hätte man zumindest dieses Problem überwunden.

**Hilfe zu A23 d:** Du musst  $10^{31}$  B in 10 Sekunden übertragen, das sind  $8 \cdot 10^{31}$  bit, also  $8 \cdot 10^{31}$  1er und 0er. Ein bit entspricht zwei ganzen Schwingungen der Trägerwelle (siehe Abb. 16). Die Trägerwelle muss also eine Frequenz von  $2 \cdot 8 \cdot 10^{31} / 10 \text{ s} = 1,6 \cdot 10^{31}$  Hz haben. Selbst wenn ein bit nur einer Schwingung entspricht, sinkt die Frequenz nur um den Faktor 2. Es gibt keine Strahlung mit dieser Frequenz! Selbst die intensivste Höhenstrahlung hat nur etwa  $10^{23}$  Hz, liegt also immer noch um den Faktor  $10^8$  zu niedrig. Außerdem wäre eine solche Strahlung, könnte man sie erzeugen, extrem gesundheitsgefährdend.

**Hilfe zu A24 a:** EM-Wellen von Handys liegen zwischen 880 MHz ( $880 \cdot 10^6$  Hz) und 2,2 GHz ( $2,2 \cdot 10^9$  Hz). Daher sind die Wellenlängen im Bereich zwischen  $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 8,8 \cdot 10^8 = 0,34$  m und  $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 2,2 \cdot 10^9 = 0,14$  m. Die Wellenlängen der Trägerwellen von GSM-Handys (die aber wohl praktisch nicht mehr verwendet werden) liegen also knapp außerhalb des definierten Bereichs, alle anderen Trägerwellen sind nach der Definition tatsächlich Mikrowellen.

**Hilfe zu A24 b:** Das ist natürlich Blödsinn, weil dann würde man auch das Hirn beim Telefonieren kochen. Richtig ist, dass Handywellen im Mikrowellenbereich liegen (A24 a) und daher Gewebe erwärmen können. Moderne Handys haben aber Strahlungsleistungen von weniger als 0,25 W – damit kann man kein Ei kochen.

**Hilfe zu A25:** Zum klaren Empfang muss eine Mindestleistung beim Empfänger vorhanden sein. Bei einer Erhöhung der Zahl der Basisstationen muss nur ein wesentlich kleineres Gebiet versorgen werden. Diese können deshalb mit wesentlich geringerer Leistung senden. Ebenfalls kann dann das Handy, da es nur eine geringe Entfernung bis zur Basisstation senden muss, mit wesentlich geringerer Leistung senden. Mehr Sender bedeutet also insgesamt eine Reduzierung der Strahlungsbelastung.

**Hilfe zu A26:** Wenn  $P_2$  10-mal so groß ist wie  $P_1$ , dann gilt  $L = 10 \cdot \log \frac{10}{1} \text{ dB} = 10 \text{ dB}$ , Wenn  $P_2$  100-mal so groß ist wie  $P_1$ , dann gilt  $L = 10 \cdot \log \frac{100}{1} \text{ dB} = 20 \text{ dB}$ , Wenn  $P_2$  1000-mal so groß ist wie  $P_1$ , dann gilt  $L = 10 \cdot \log \frac{1000}{1} \text{ dB} = 30 \text{ dB}$ . Eine Steigerung um 10 dB bedeutet also immer eine Verzehnfachung der Leistung. Die Empfangsleistung bei 5 Balken ist 62 dB höher, das ist also mehr als eine Million mal besser. Genauer gerechnet:  $62 = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} \Leftrightarrow 6,2 = \log \frac{P_2}{P_1} \Leftrightarrow 10^{6,2} \approx 1,6 \cdot 10^6 = \frac{P_2}{P_1}$ .

**Hilfe zu A27:** Die Aussage, dass das Innere feldfrei ist, gilt nur für elektrostatische Felder, nicht aber für elektromagnetische Wechselfelder. EM-Wellen können in das Auto sowohl eindringen als auch aus diesem ausdringen. Wenn das nicht so wäre, könnte man in ein Auto weder hinein noch aus diesem hinaus sehen, weil auch Licht eine EM-Welle ist. Außerdem wäre es dann unmöglich, im Auto mit dem Handy zu telefonieren.

**Hilfe zu A28:** z. B. Radio, Handy, schnurlose Telefone, WLAN, Bluetooth, Infrarot-Fernbedienung, Fernsehen und Babyphones

**Hilfe zu A29:** Das Volumen einer Kugel wird mit  $V = \frac{4r^3\pi}{3}$  berechnet. Das Volumen einer Halbkugel ist daher  $V = \frac{2r^3\pi}{3}$ .

Wenn die EM-Wellen halbkugelförmig 8 cm tief in den Kopf eindringen und dort komplett absorbiert werden, macht das ein Absorptionsvolumen von  $V = \frac{2 \cdot 8^3 \pi}{3} \text{ cm}^3 = 1072 \text{ cm}^3$ . Bei einer Dichte von  $1 \text{ g/cm}^3$  ergibt das eine Masse von rund 1 kg. Der SAR-Wert eines GSM-Handys bei voller Sendeleistung liegt daher bei etwa 2 W/kg, der eines UMTS-Handys nur bei 0,25 W/kg. Selbst im „worst case“ kommt man bei einem GSM-Handy gerade in den Grenzbereich, UMTS-Handys liegen weit darunter.

**Hilfe zu A30:** Direkt unter der Leitung beträgt die magnetische Feldstärke  $8 \mu\text{T}$ , das sind also etwa 16 % der Stärke des Erdmagnetfeldes.

**Hilfe zu A31:** Hier wird ein auf Esoterikseiten typischer Kauderwelsch verwendet, der den Anstrich von Wissenschaftlichkeit unterstreichen soll. Formulierungen wie „gegen Auswirkungen verschiedenster Strahlung“, „physikalisch-energetische Programmiermethode“ oder „Gesamtwirkung potenzieren“ klingen gut, sind aber vollkommen aussagegelos.

So gibt es keine wissenschaftliche Belege, dass man mit Quarzen EM-Wellen abschwächen kann. Außerdem kann ein münzgroßer Badge Strahlung aus rein theoretischen Gründen nicht abschirmen. Das ginge zum Beispiel, wenn man das Handy komplett in Alufolie wickeln würde. Sollte der Badge tatsächlich funktionieren (was er nicht tut), dann würde natürlich die Empfangs- und Sendequalität leiden. Und wenn er perfekt arbeitet, dann könnte man gar nichts mehr empfangen und senden.