

## Ergänzungen und Kommentar für Lehrkräfte

### Einführung

Für das Verständnis des Telekommunikationssystems „Handy“ reichen physikalische Kenntnisse über elektromagnetische Wellen und Schallwellen nicht aus. Im Zentrum dieser Thematik steht das technische Prinzip der Digitalisierung, das seit Ende der Achtzigerjahre des vergangenen Jahrhunderts die Entwicklung der Elektrotechnik und der Elektronik bestimmt. Auch wenn die Schülerinnen und Schüler die physikalischen Hintergründe nicht umfassend verstehen, so können sie doch ein „Gefühl“ für diese neuen Technologien entwickeln. Vor allem dann, wenn ihnen die Gelegenheit zur praktisch-handwerklichen Auseinandersetzung geboten wird. Die Beschäftigung mit elektronischen Schaltungen ist auch im Hinblick auf eine spätere Berufswahl sehr zu empfehlen (Werkunterricht).

Das vorliegende Lehrmittel richtet sich an Schülerinnen und Schüler der Oberstufe (7.-9. Klasse). Es besteht aus folgenden drei Teilen:

- Das Arbeitsheft für Schülerinnen und Schüler (mit Vertiefungen, Testfragen sowie Anregungen und Experimenten)
- Die interaktive Version des Arbeitsheftes (mit Videos, Bildstrecken, Links und weiterführenden Dokumenten)
- Den Lehrpersonenkommentar für Lehrkräfte (mit Unterrichtsideen, Lösungsvorschlägen sowie Empfehlungen von Lehrmittelmaterialien)

Das Lehrmittel versucht, die physikalischen und elektrotechnisch/elektronischen Grundlagen so einfach wie möglich und umfassend zu erklären. Weitergehende Informationen für Lehrkräfte zu physikalische Grundlagen können einschlägigen Lehrbüchern für die Stufen Sek. 1 und 2 entnommen werden. Über die elektronischen und elektrotechnischen Grundlagen existieren vor allem Lehrmittel für den Bereich der gewerblich-industriellen Berufsbildung.

Zu sämtlichen Bereichen finden sich erschöpfende Informationen im Internet. Die Suche sollte sich mit gut gewählten Suchbegriffen wie Handy, Mobiltelefon, „cell phone“ auf deutsch- wie auch auf englischsprachige Websites beziehen.

Eine gute Einführung in die gesamte Mobiltelefonie (aus dem Jahr 2001) findet sich unter <http://www.swisseduc.ch/informatik/netzwerke/mobiltechnologie/>. Dieses Material umfasst u.a. 38 Folien für einen einführenden Lehrer- oder Schülervortrag und eine Lernaufgabe zu Multiplex-Verfahren. Mithilfe von Analogien wird eine nicht-technische Einführung zu grundlegenden Ideen der Mobiltechnologie gegeben.

Zu diesem Lehrmittel steht Ihnen bei Fragen zur Theorie oder den Experimenten exklusiv ein fachlicher Support zur Verfügung: [handytechnik@lernetz.ch](mailto:handytechnik@lernetz.ch)

## 1. Musterlösungen zu Kapitel 1

1. „Voll-duplex“ bedeutet, dass z.B. beim Telefonieren sprechen und hören zugleich möglich sind
2. Ein Smartphone ist ein Mobiltelefon mit zusätzlichen Funktionen wie Organizer, GPS, Internetzugang usw. Es umfasst Erweiterungsmöglichkeiten dank einer Vielzahl von Applikationen (Apps), die gratis oder gebührenpflichtig vom Internet bezogen werden können.
3. Wie können Nachrichten als elektrische Signale mit Radio- und Mikrowellen drahtlos übertragen werden?  
Wie funktionieren Mikrofon und Lautsprecher?  
Warum und wie werden die Sprachsignale im Handy digitalisiert?  
Warum sind für den Betrieb eines Handys Computer, konkret Signal- und Mikroprozessoren erforderlich?
4. Die Begriffe beziehen sich auf elektrische Signale, deren elektrische Spannung (in Volt) sich in Abhängigkeit der Zeit verändern. Analoge Signale verändern sich in der Zeit und bezüglich ihres Spannungswerts kontinuierlich, d.h. stufenlos. Sie sind zeit- und wertkontinuierlich. Ein Digitalsignal (von lat. Digitus, Finger) entsteht durch Abtasten, d.h. Messen eines Analogsignals in bestimmten Zeitschritten z.B. von 0.1 Millisekunden. Dabei wird die Spannung nur in bestimmten Stufen von z.B. 1 Millivolt (mV) gemessen. Ein Wert von 3.4 mV wird dabei auf 3 mV ab-, 7.8 mV auf 8 mV aufgerundet.
5. Sie sind zur Verarbeitung der Datenströme, die bei der Digitalisierung des Sprachsignals im CODEC und zur Steuerung weiterer Handy-Funktionen erforderlich sind.

## **2.1. Hinweise zum Kapitel 2 „Telekommunikation: Telefon und Telegraf“**

Im Zentrum dieses Kapitels steht der Begriff der Telekommunikation, also dem Austausch von Informationen über kürzere oder grössere Distanzen hinweg. Es werden spielerische sowie technisch ältere Kommunikationsmethoden besprochen: Schnurtelefon, Analog- und Digitaltelefon und insbesondere der Morsetelegraf.

Er ist in bestimmter Hinsicht technisch enger mit dem Mobiltelefon (Handy) verwandt als das klassische Analog-Telefon:

Im Handy wird das elektrische Sprachsignal des Mikrofons im Analog-Digital-Wandler direkt in einen „Strom von Zahlen“ im Binärkode verwandelt und (in komprimierter Form) drahtlos gesendet.

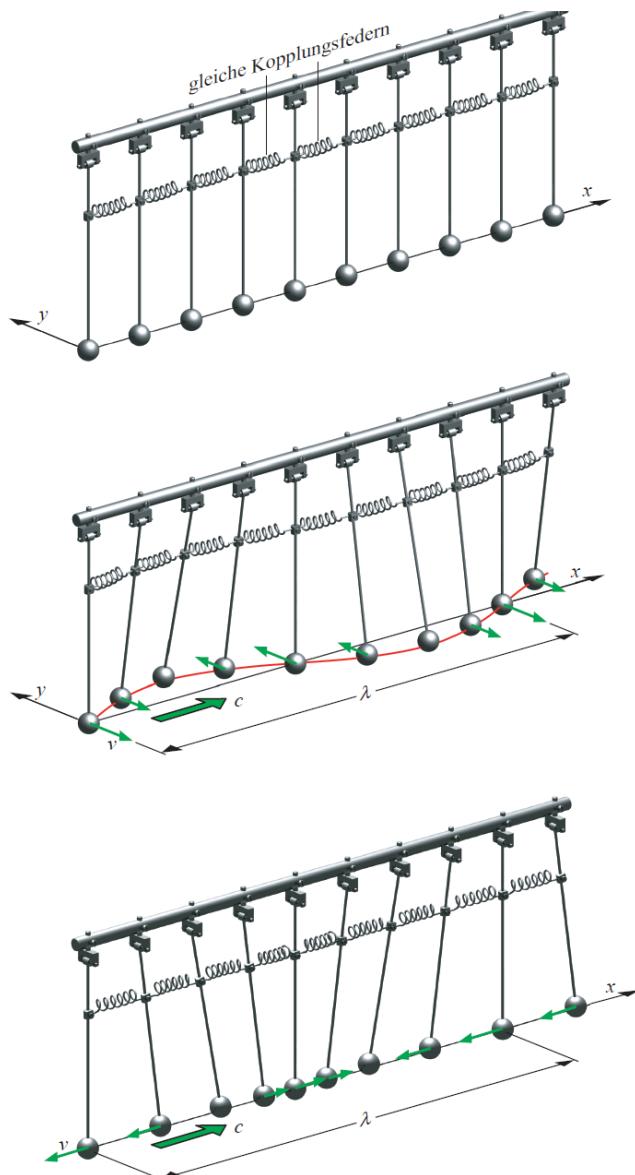
Auch im Morsetelegraf werden die Buchstaben eines Satzes mit Hilfe des Morse-codes verwandelt und drahtgebunden oder drahtlos gesendet.

Den Schülerinnen und Schülern sollte klar werden, dass schon die scheinbar einfache Kommunikation mit einem Schnurtelefon physikalisch nicht einfach ist. Der physikalische Begriff der Schallwellen, die sich in Luft oder auch auf einem festen Körper, etwa einer Schnur, ausbreiten können, kommt ins Spiel.

Zum Verständnis des Wellenbegriffs empfehlen sich spielerische Aufführungen mit Reihen von Schülerinnen und Schülern, welche unter Anleitung der Lehrkraft Transversal- oder Longitudinalwellen darstellen.

Brauchbares Material findet sich zudem in vielen Physiksammlungen, etwa lange Federn, elastische Gummiseile, Wellenwannen oder sogar Wellenmaschinen, auf welchen Wellen anschaulich gemacht werden können.

Didaktisch wichtig ist es, dabei mit der gut verständlichen 1-dimensional longitudinalen und transversalen Wellenbewegung auf einem gespannten Seil (vergleiche Schnurtelefon) zu beginnen und dann kurz mit der 2-dimensionalen Wasserwelle weiterzufahren, welche etwa von einem ins Wasser geworfenen Stein ausgeht.



**Figur1:**

Wellenmaschine: in Ruhe (oben),

Transversalwelle (Mitte),

Longitudinalwelle (unten)

Dann folgen die beiden wichtigen Abstraktionsschritte zur Schallwelle und zur elektromagnetischen Welle hin:

In der Schallwelle (z.B. eines Lautsprechers) breitet sich eine kleine Störung des Luftdrucks (oder der Luftpumpe) mit der Schallgeschwindigkeit von ca. 340 m/s aus. Die elektromagnetische Welle (z.B. die 800-Megahertz-Radiowelle eines Handys) breitet sich hingegen mit der Lichtgeschwindigkeit von ca. 300'000 km/s (im Vakuum oder in Luft) aus.

Die Entstehung einer Schallwelle kann anhand einer Stimmgabel (Kapitel 3, Figur 13) oder eines Lautsprechers (Kapitel 3, Figur 16) anschaulich demonstriert werden, die Entstehung einer elektromagnetischen Welle anhand eines sehr schnell „pendelnden“ Elektrons auf einem Metallstab (Antenne, siehe Kapitel 3, Vertiefung 6).

In der interaktiven Version auf [www.swisscom.com/handytechnik](http://www.swisscom.com/handytechnik) finden Sie im Kapitel 2 unter „Weiterführende Dokumente“ didaktische Dokumente zu:

- Erzeugen elektromagnetischer Schwingungen und Wellen im Schwingkreis
- Vertiefung zum Thema „Elektromagnetische Wellen (Leitprogramm)
- Internet: Analog und Digital - Zwei Welten zwischen 0 und 1
- Mit einem geeigneten, einfachen 8-Bit ADC/DAC experimentieren

## 2.2. Musterlösungen zu Kapitel 2

1. Aussenden, Übermitteln und Empfangen von Nachrichten in der Form von Zeichen, Sprache, Bildern oder Tönen.
2. Ein Schnurtelefon besteht aus zwei Büchsen, zwischen denen eine Schnur straff gespannt ist. Spricht eine Person in die eine Büchse, so hört sie ihr Partner in der anderen Büchse. Die Schallübertragung erfolgt durch mechanische Schwingungen der Büchse und mechanische Wellen (Seilwellen) auf/in der Schnur.
3. Ein Wandtelefon aus dem Jahr 1950 besteht aus dem „Mikrotel“, dem elektromagnetischen Hörer mit eingebautem Mikrofon (Kohlekörnermikrofon) und dem Telefongehäuse mit einer Glocke, in welches eine Wähl scheibe mit den Ziffern 0 bis 9 eingebaut ist. Im Inneren des Gehäuses befinden sich elektrische Bauteile, die das Aussenden und Empfangen der elektrischen Tonsignale auf einer (verdrillten) Zweidrahtleitung ermöglichen.
4. Demgegenüber ist ein moderner ISDN-Telefonapparat ein digitales Gerät: Das elektrische Sprachsignal des Mikrofons wird in einer elektronischen Schaltung mit 64 kBit/Sekunde digitalisiert und dann übermittelt. Umgekehrt wird das empfangene digitale Sprachsignal zuerst in ein analoges elektrisches und im elektromagnetischen Hörer (Lautsprecher) anschliessend in ein Tonsignal zurückverwandelt. Die Bedeutung der ISDN-Technik hat in der Schweiz seit 2008 abgenommen, weil mit VDSL über analoge Leitungen schnellere Internetverbindungen möglich sind als über das digitale ISDN, das nur das langsamere ADSL zulässt.
5. In einem Morsetelegraf werden die „Punkte“ und „Striche“ des Morsealphabets durch Drücken der Morsetaste (Sender) in elektrisch kürzer oder länger dauernde Ströme umgesetzt. Diese Ströme werden in einer Zweidrahtleitung zu einem Elektromagneten beim Empfänger weitergeleitet, welcher einen Schreibstift betätigt, der die „Punkte“ und „Striche“ auf einen Papierstreifen schreibt.
6. Das klassische Telefon überträgt das kontinuierliche elektrische Sprachsignal direkt, also stufenlos, analog. Bei der Telekommunikation mit dem Morsetelegraf wird ein Text, der aus Buchstaben, Ziffern und weiteren Zeichen besteht, mithilfe des Morse codes digital umgesetzt und elektrisch übertragen.
7. Ein Bit ist die kleinste Einheit der Information, die wir uns mithilfe der beiden Zustände „ein“ und „aus“ eines Schalters vorstellen können. Fasst man 8 Bit (8 Schalter) zu einer Einheit zusammen, so sprechen wir von einem Byte. Mit einem Bit können wir zwei ( $2^1$ ) verschiedene Schaltzustände („ein“ und „aus“) unterscheiden und diesen die Zahlen 0 und 1 zuordnen, mit 8 Bit (einem Byte) sind es 256 ( $2^8$ ) Schaltzustände mit den zugehörigen (Dezimal-)Zahlen 0 bis 255.
8. 19: 5 Schalter, ein-aus-aus-ein-ein  
77'839: 17 Schalter, ein-aus-aus-ein-ein-aus-aus-aus-aus-aus-aus-ein-ein-ein-ein  
Diese Schalterstellungen entsprechen ihren Binärdarstellungen (Aufgabe 9): 0 aus, 1 ein

9.  $19 = 1 \cdot \underbrace{2^4}_{16} + 0 \cdot \underbrace{2^3}_{8} + 0 \cdot \underbrace{2^2}_{4} + 1 \cdot \underbrace{2^1}_{2} + 1 \cdot \underbrace{2^0}_{1}$ ,

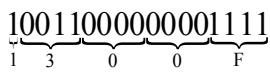
Als Binär- oder Dualzahl: 10011

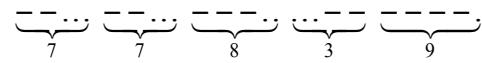
Als Hexadezimal : 13

Im Morsecode: 

$$77'839 = 1 \cdot \underbrace{2^{16}}_{65'536} + 0 \cdot \underbrace{2^{15}}_{32'768} + 0 \cdot \underbrace{2^{14}}_{16'384} + 1 \cdot \underbrace{2^{13}}_{8'192} + 1 \cdot \underbrace{2^{12}}_{4'096} + 0 \cdot \underbrace{2^{11}}_{2'048} + 0 \cdot \underbrace{2^{10}}_{1'024} + 0 \cdot \underbrace{2^9}_{512} + \\ 0 \cdot \underbrace{2^8}_{256} + 0 \cdot \underbrace{2^7}_{128} + 0 \cdot \underbrace{2^6}_{64} + 0 \cdot \underbrace{2^5}_{32} + 0 \cdot \underbrace{2^4}_{16} + 1 \cdot \underbrace{2^3}_{8} + 1 \cdot \underbrace{2^2}_{4} + 1 \cdot \underbrace{2^1}_{2} + 1 \cdot \underbrace{2^0}_{1}$$

Als Binär- oder Dualzahl: 10011000000001111

Als Hexadezimalzahl:  = 1300F

Im Morsecode : 

## 3.1 Hinweise zum Kapitel 3 „Mobiltelefon und Digitalelektronik“

Im Zentrum von Kapitel 3 steht die Technik der Digitalisierung analoger elektrischer Signale, wie sie etwa vom Mikrofon eines Handys erzeugt werden. Damit wird durch Abtasten ein kontinuierliches Sprachsignal in eine dichte zeitliche Abfolge von Zahlen in elektronischer Darstellung verwandelt (Figuren 21 und 22 im Arbeitsheft).

Damit Schülerinnen und Schüler die Funktion des Mobiltelefons sowie die für den Betrieb erforderliche Infrastruktur (landesweites Netz mit heute ca. 15'000 Antennen) verstehen können, müssen sie auch die physikalischen Grundlagen der Radio- und Mikrowellen (Erzeugen, Senden, Empfangen), der Elektroakustik (Lautsprecher, Mikrofon) und der Elektronik (Analog- und Digitaltechnik) im Ansatz verstanden haben.

Die einführenden Erläuterungen von Kapitel 2 werden in Kapitel 3 ausgebaut: Schallwellen sowie das Funktionsprinzip des elektrodynamischen Mikrofons und Lautsprechers, der einfache elektrische Stromkreis sowie die Hauptbauteile Widerstand, Kondensator und Transistor werden kurz besprochen.

Für Schülerinnen und Schüler des 7. bis 9. Schuljahrs ist die Funktionsweise dieser drei Komponenten, aus denen jeder analoge und digitale elektrische Schaltkreis besteht, schwer verständlich. Dasselbe gilt für die zugrunde liegenden physikalischen Größen bzw. Begriffe des elektrischen und des magnetischen Feldes (E- und B-Feld) sowie der elektrischen Spannung (in Volt). Diese Definitionen gehören auf die Sekundarstufe 2 und in den Anfängerunterricht an den Universitäten.

Die heute hoch entwickelte moderne Technik eröffnet Schülerinnen und Schülern aber einen anderen, praktischen Weg zum intuitiven Verständnis von Elektrizität, Elektronik und Telekommunikationstechnik:

Ein einfaches Beispiel befindet sich in dem in Vertiefung 2 (S. 12) präsentierten elektrischen Stromkreis, bestehend aus Batterie, Schalter und Glühlämpchen. Ohne die Definitionen der physikalischen Größen elektrische Stromstärke (in Ampere) und elektrische Spannung (in Volt) zu kennen, ist intuitiv klar, dass die Stromstärke zunimmt und das Lämpchen heller leuchtet, wenn die Spannung der „antreibenden“ Batterie erhöht und z.B. mithilfe einer zweiten Batterie verdoppelt wird. Der Wendel des Lämpchens kann dann u.U. durchbrennen.

Didaktisch ungünstig ist bei diesem Experiment, dass der elektrische Strom im Stromkreis der Lämpchen bei einer Verdoppelung der elektrischen Spannung wegen der Temperaturabhängigkeit der Lämpchenwiderstand nicht verdoppelt wird, wie es z.B. bei Kohleschicht- oder Metallfilmwiderständen (die leider nicht leuchten!) der Fall wäre.

Auch im Hinblick auf eine mögliche spätere Berufswahl ist es für Schülerinnen und Schüler des 7. bis 9. Schuljahrs besonders instruktiv, wenn ihnen z.B. im Werkunterricht die Gelegenheit geboten wird, eine analoge elektrische Schaltung, etwa einen Verstärker mit der bekannten integrierten Schaltung TDA2030 A, selber aufzubauen. Dabei werden einerseits praktische Kompetenzen wie der mechanisch korrekte Aufbau einer gedruckten Schaltung und sauberes Löten geschult. Andererseits erkennen Schülerinnen und Schüler schon früh, dass es dank integrierter Schaltungen möglich ist, funktionstüchtige elektronische Schaltungen kostengünstig aufzubauen, ohne deren Funktion im Detail zu kennen. Im Grund arbeitet jeder Elektroniker auch nach diesem Prinzip!

In der interaktiven Version des Arbeitsheftes wird auf die Software Overtone von Aegid Plüss hingewiesen, welche akustische Experimente nur mit der Soundkarte des PC's erlaubt.

Solche Experimente sind natürlich auch möglich, wenn die Schule über ein Oszilloskop und einen Tongenerator (Funktionsgenerator) verfügt. Diese beiden Geräte bilden die Grundlage eines Elektroniklabors und sind auch bei kleinem Budget erschwinglich.

Sehr zu empfehlen ist auch der Bau des im Text erwähnten Hochfrequenzprüfgeräts, dem HF-Sniffer. Der HF-Sniffer erlaubt eine vertiefte Behandlung mit den elektromagnetischen Wellen (=> Radiowellen, Licht).

In der interaktiven Version auf [www.swisscom.com/handytechnik](http://www.swisscom.com/handytechnik) finden Sie im Kapitel 3 unter „Weiterführende Dokumente“ didaktische Dokumente zu:

- Elektrische Stromstärke und Spannung
- Experimentieren mit einfachen Stromkreisen
- Mikrofon-Lauschverstärker bauen (anspruchsvoll):
- Experimentieren mit der analogen integrierten Schaltung IC TDA2030 A (14 Watt Audio HiFi Verstärker, anspruchsvoll)
- Signalprozessor auf einem USB-Stick
- Vertrieb von Oszilloskopen
- Vertrieb von Tongeneratoren (Funktionsgeneratoren)

## 3.2 Musterlösungen zu Kapitel 3

1. Mikrofon/Lautsprecher, Analog-Digital-/Digital-Analog-Wandler, Digitaler Signalprozessor, Transceiver (Sender/Empfänger), SIM Karte.
2. **Lautsprecher:** Der zeitlich veränderliche elektrische Strom eines Sprach-/Tonsignals fliesst durch eine frei bewegliche Spule, an der eine Membran befestigt ist. In diese Spule ragt ein fester Stabmagnet hinein. Die magnetische Kraft (Lorentzkraft) zwischen Spule und Stabmagnet bewegt die Membran im Takt dieses Tonsignals hin und her. Die Bewegung der Membran erzeugt durch Verdichten und Verdünnen der umgebenden Luft eine Schallwelle, die wir hören können.  
**Mikrofon:** An einer frei beweglichen Spule, die um einen festen Stabmagneten angeordnet ist, wird eine Membran befestigt. Durch den Schalldruck wird die Membran und damit die Spule im Takt des Sprach-/Tonsignals hin- und herbewegt. In der bewegten Spule wird vom Stabmagnet ein elektrisches Tonsignal „induziert“ (Induktionsgesetz von Faraday).
3. Ein Audiosignal ist ein elektrisches Signal, d.h. eine elektrische Spannung (in Volt), die sich im Takt der mechanischen, akustischen Schwingung verändert. Ein Audiosignal entsteht z.B. in einem Mikrofon und muss elektrisch verstärkt werden (Mikrofonverstärker).
4. Ein elektrisches Audiosignal wird digitalisiert, indem die elektrische Spannung in bestimmten Zeitschritten von z.B. 0.1 Millisekunden gemessen (abgetastet) wird. Dabei wird die Spannung nur in bestimmten Stufen von z.B. 1 Millivolt (mV) gemessen. Ein Wert von 3.4 mV wird dabei auf 3 mV ab-, 7.8 mV auf 8 mV aufgerundet.
5.  $44'100 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 60 \cdot 74 \text{ Bytes} = 783'216'000 \text{ Bytes} \approx 764'859 \text{ KB} \approx 747 \text{ MB}$   
(Hier wird mit  $1 \text{ MB}=1024 \text{ KB}=2^{10} \text{ KB}=2^{20} \text{ Byte}=1'048'576 \text{ Byte}$  gerechnet. Gelegentlich benutzen Hersteller aber auch die Umrechnung  $1 \text{ MB}=1'000'000 \text{ Byte}$ )
6. Zur augenblicklichen Verarbeitung und Aufbereitung des sehr umfangreichen Datenstroms, der nach der Digitalisierung des Sprachsignals entsteht, sind schnelle Digitale Signalprozessoren (DSP's) erforderlich. Zur Steuerung der Handy- und Smartphone-Funktionen werden weitere Mikroprozessoren (Kleincomputer) verwendet.
7. Der Codec (Coder und Decoder) ist ein Verfahren, das Signale digital kodiert und dekodiert. Dabei werden die analogen Signale meist nicht verlustfrei digitalisiert. Der Dynamik-/Lautstärkeumfang wird reduziert, und die Daten werden komprimiert.
8. Durch Datenkompression wird die Datenmenge, die übertragen werden soll, durch mathematische Verfahren verringert, ohne dass die Sprachqualität merklich leidet. Man unterscheidet zwischen verlustfreier und verlustbehafteter Datenkompression. Das im Handy und im MP-3-Player verwendete Datenkompressionsverfahren ist verlustbehaftet.
9. Eine akustische Welle entsteht durch Verdichten und Verdünnen der Luft, etwa durch eine im Takt der Musik schwingende Membran eines Lautsprechers. Eine akustische Welle breitet sich mit einer Geschwindigkeit von ca. 340 Metern pro Sekunde aus und ist an das Trägermedium Luft gebunden. Ohne Trägermedium gibt es keine Schallwellen.
10. Eine elektromagnetische Welle wird durch eine beschleunigt bewegte, elektrische Ladung, z.B. ein Elektron, das auf einem Antennenstab schwingt, erzeugt. Die Welle löst sich von der

Antenne und breitet sich im Vakuum mit einer Geschwindigkeit von 300'000 Kilometern pro Sekunde (Lichtgeschwindigkeit) aus. Im Gegensatz zur Schallwelle benötigt eine elektromagnetische Welle kein materielles Trägermedium.

11. Modulation bedeutet, dass die zu übertragende Ton- oder Bildinformation (Radio / Fernsehen) der elektromagnetischen Trägerwelle mit elektronischen Methoden „aufgeprägt“ wird. In der älteren analogen Technik wurden die Amplituden- und die Frequenzmodulation (AM/FM) eingesetzt. Dabei wird die Amplitude bzw. die Frequenz der Trägerwelle im Takt der zu übertragenden Information verändert.
12. Die Übermittlung digitaler Daten mit elektromagnetischen Wellen ist besonders einfach, da nur die Zahlenwerte null und eins übertragen werden müssen. Dies geschieht durch die Methode der Frequenzumtastung (Frequency Shift Keying, FSK), indem für eine Null ein elektromagnetisches Signal von z.B. 890.0 MHz, für eine Eins ein Signal der Frequenz 890.1 MHz gesendet wird.
13. Auf der „Subscriber Identity Module“ oder „Subscriber Identification Module“ (SIM) sind der IMEI- und der IMSI-Code zur Identifikation des Geräts und des Benutzers gespeichert. Er dient dem Netzbetreiber, z.B. der Swisscom, der Identifikation des Handys während des Gesprächs und der Verrechnung der Gesprächsgebühren.

## 4.1 Hinweise zum Kapitel 4 „Mobilfunknetze“

### 4.1.1 Überblick

Das Hauptthema dieses Kapitels ist der Multiplex, die Methoden zur Mehrfachnutzung des Mediums Mikrowellen für die Telekommunikation.

Man unterscheidet zwischen:

- **Raummultiplex** durch Unterteilung des Raums in Funkzellen,
- **Frequenzmultiplex** durch Verwendung verschiedener Sendefrequenzen für verschiedene Handygespräche und
- **Zeitmultiplex** durch scheinbar gleichzeitige Übertragung von bis zu 8 Gesprächen in sog. „Time-Slices“ (Zeitschnitten).

Im Arbeitsheft wird nur auf den Raum- und den Frequenzmultiplex eingegangen. Im vorliegenden Lehrpersonenkommentar wird dieser Stoff etwas vertieft (Abschnitt 4.2). Zusätzlich wird die Methode des Zeitmultiplex' anschaulich erklärt. Nicht eingegangen wird auf den im UMTS-Protokoll verwendeten Code-Multiplex.

In diesem Bereich gibt es nur wenige neue experimentelle Möglichkeiten. Wie in Kapitel 3 können wiederum der HF-Sniffer sowie das Programm „Overtone“ eingesetzt werden.

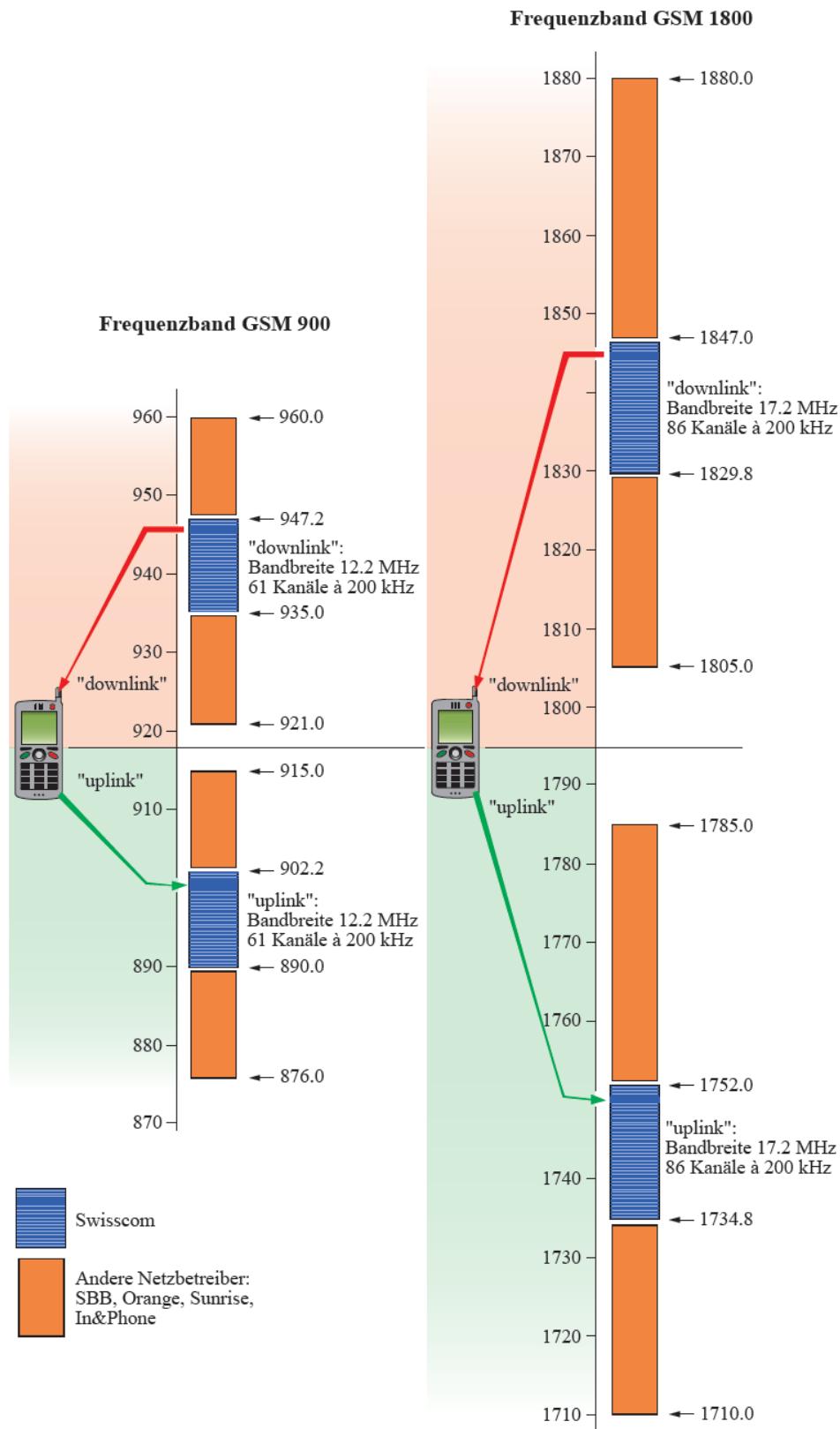
Für Schülerinnen und Schüler umfassen grundlegende Kenntnisse aus Kapitel 4 neben dem Begriff Multiplex:

- Übertragungsprotokolle (bes. GSM/UMTS)
- Grundsätzlicher Aufbau eines Mobilfunknetzes
- Aufbau eines Gesprächs in einem GSM-Mobilfunknetz
- Funkzelle, Handover, Roaming
- evtl. Datenkompression

In der interaktiven Version auf [www.swisscom.com/handytechnik](http://www.swisscom.com/handytechnik) finden Sie im Kapitel 4 unter „Weiterführende Dokumente“ didaktische Dokumente zu:

- Lernaufgabe zu „Multiplex“

## 4.1.2 Fachtechnische Vertiefung: Frequenz- und Zeit-Multiplex



Figur 3: Frequenzaufteilung im GSM-900 und im GSM-1800-Band in der Schweiz (2009)

Ein Handy arbeitet im Vollduplex-Verfahren, d.h. dass es während eines Gesprächs zugleich Radiowellen senden und empfangen kann. Dies ist nur möglich, wenn die Sende- und die Empfangsfrequenzen verschieden sind. Während eines Gesprächs mit einem Handy, das mit dem GSM-Übertragungsstandard (siehe unten) arbeitet, sind die Sendefrequenzen für den „Uplink“ zur Basisstation (Handy-Antenne) und für den Downlink“ von der Basisstation um 45 MHz (GSM 900) bzw. um 90 MHz (GSM-1800) versetzt.

Figur 3 zeigt die Situation für ein GSM-Dualband-Handy in der Schweiz. Es arbeitet in zwei Frequenzbereichen, nämlich im GSM-900- und im GSM-1800-Frequenzband. Das GSM-900-Band umfasst Frequenzen von 876 MHz bis 960 MHz, das GSM-1800-Band von 1710 MHz bis 1880 MHz, die Gesamtbandbreiten betragen also 84 MHz (GM-900) bzw. 170 MHz (GSM-1800).

Die beiden Bänder werden halbiert, die untere Hälfte (876 MHz bis 915 MHz, bzw. 1710 MHz bis 1785 MHz) ist für den „Uplink“ vom Handy zur Basisstation, die obere Hälfte (921 MHz bis 960 MHz bzw. 1805 MHz bis 1880 MHz) für den „Downlink“ von der Basisstation zum Handy reserviert. Die Bandbreiten betragen also je 39 MHz (GSM-900) bzw. 75 MHz (GSM-1800) für den „Uplink“ und den „Downlink“.

Diese Bänder werden in „Kanäle“ mit einer Bandbreite von 200 kHz (=0.2 MHz) aufgeteilt, in welchen Gespräche stattfinden können; also je  $39/0.2=195$  Kanäle (GSM-900) bzw.  $75/0.2=385$  Kanäle (GSM-1800) für den „Uplink“ und den „Downlink“. Im UKW-Radio entspricht ein solcher Kanal einem UKW-Sender.

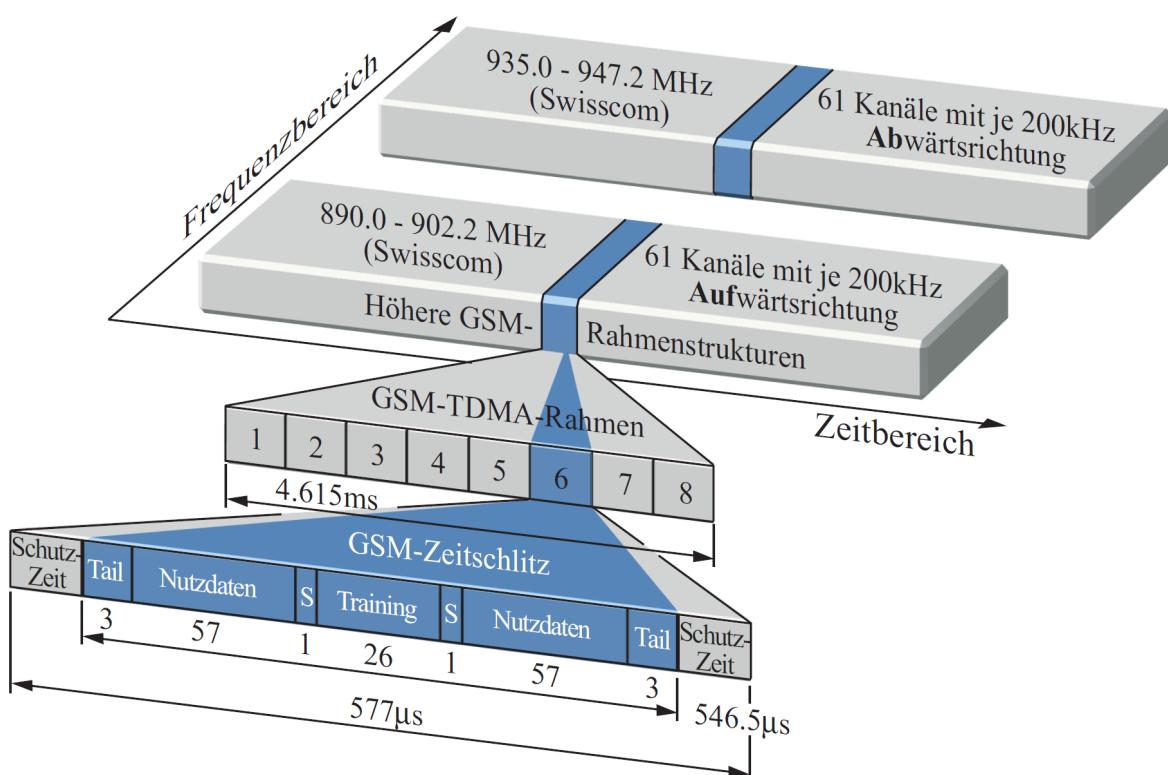
Ein Dualband-Handy sendet und empfängt auf diesen beiden Bändern(900/1800 MHz), beim Triband-Handy kommt ein Band bei 1900 MHz, beim Quadband-Handy ein Band bei 850 MHz hinzu. Diese beiden zusätzlichen Bänder sind in den USA gebräuchlich.

In der Schweiz werden die Kanäle der beiden Bänder unter den Netzbetreibern Swisscom, Orange, Sunrise, SBB und In&Phone aufgeteilt, Swisscom hat davon 147 Kanäle für den „Upload“ und 147 Kanäle für den „Download“ zur Verfügung (Figur 54). Wir sprechen von **Frequenzmultiplex** (FDMA)

Auf dem Swisscom-Netz sind also im Prinzip nur 147 gleichzeitig stattfindende Mobiltelefongespräche möglich. Gäbe es in der Schweiz nur eine einzige Handy-Basisstation so könnten also (ohne weitere Vorehrungen) nur 147 Personen über Handy mit ihren Partner/innen telefonieren. Um diese Anzahl zu erhöhen, greift man zum Trick des **räumlichen Multiplexes**: Man überzieht das ganze Land mit einem dichten Netz von Basisstationen (Mobilfunkantennen) mit sehr stark beschränkter Reichweite. In der Schweiz kommen auf  $41'000 \text{ km}^2$  Landesfläche ca. 11'000 Basisstationen. In jeder Funkzelle sind zwar zugleich (simultan) nur 147 Gespräche möglich. Bereits in der übernächsten Zelle können aber die gleichen Sende- und Empfangsfrequenzen von anderen Handys wieder störungsfrei verwendet werden.

Neben dem Frequenzmultiplex (FDMA), also der Methode der Unterteilung des Frequenzbereichs in (Gesprächs-)Kanäle wird bei der Übertragung von Handy-Gesprächen auch die Methode des **Zeitmultiplex** (TDMA) eingesetzt. Sie erlaubt es, auf demselben Kanal bis zu acht Gespräche zu übertragen: Die Zeit wird dabei in so genannte Rahmen (engl. Frames) von 4.615 Millisekunden unterteilt. Während der Dauer eines Frames kommen alle acht Handy Teilnehmer/innen einmal dran und können in einem so genannten Zeitschlitz (engl. Time Slot) während 4.615 Millisekunden:  $8 \cdot 0.577 = 4.616$  Millisekunden (577 Mikrosekunden) Gesprächsteile in Form von digitalen Daten, einen so genannten Burst übertragen.

Dann wird automatisch zum nächsten Handy-Gespräch umgeschaltet. Das erste Gespräch kommt erst im nächsten Frame nach 4.615 Millisekunden wieder an die Reihe. Da diese Dauer so kurz ist, merkt die telefonierende Person nichts vom dauernden Umschalten von einem Handy-Gespräch zum anderen.



**Figur 57:** Frequenz- und Zeitmultiplex bei der Übertragung von Handy-Gesprächen (GSM-Rahmenstruktur)

Neben dem Frequenz- und dem Zeitmultiplex gibt es auch den so genannten Code-Multiplex (Code Division Multiple Access, CDMA), der beim UMTS-Protokoll eingesetzt wird. Auf diese Methode wird hier nicht eingegangen.

## 4.2 Musterlösungen zu Kapitel 4

1. Weil der Sender eines Handys nur eine kleine Reichweite hat und daher auf ein Netz von Funkzellen (Basisstationen mit Antennen) angewiesen ist.
2. Eine Funkzelle ist ein einzelnes Element in einem Funkzellennetz, mit welchem eine Stadt oder ein ganzes Land in kleine Bereiche von z.B. 1 km<sup>2</sup> eingeteilt wird. Zu jeder Funkzelle gehört eine Sende/Empfangsstation (Basisstation) mit der charakteristischen „Handyantenne“.
3. Weil die Leistung des (Radio-) Senders einer Basisstation so klein ist, dass er nur in der eigenen und den unmittelbar benachbarten Zellen wirkt. In den unmittelbar benachbarten Zellen dürfen deshalb nicht dieselben Sendefrequenzen verwendet werden, da es sonst zu Störungen käme. In der übernächsten Zelle ist das Signal der ursprünglichen Zelle aber bereits so schwach, dass meist wiederum dieselben Sendefrequenzen benutzt werden dürfen.
4. Weil pro Basisstation zugleich nur eine bestimmte Anzahl von Gesprächen (maximal 81) möglich sind, können in einem dichten städtischen Zellennetz entsprechend mehr gleichzeitige Telefongespräche stattfinden als in einem ländlichen Gebiet mit nur wenigen Basisstationen.
5. Ein dichtes Netz von Basisstationen hat den Vorteil, dass gleichzeitig mehr Telefongespräche möglich sind und dass die Sendeleistung der einzelnen Sendeantenne wegen der kleineren Zellengröße reduziert werden kann. Nachteilig ist, dass Antennen im Landschaftsbild als störend empfunden werden. Zu beachten sind auch die hohen Investitionskosten für jede Basisstation.
6. Unter einem „Handoff“ versteht man das Übergabeverfahren, das erforderlich ist, wenn die Telefonverbindung eines Handys, z.B. in einem fahrenden Auto, beim Zellenwechsel von einer Mobilfunkzelle an eine andere übergeben werden muss. Unter „Roaming“ versteht man ein analoges Verfahren beim Übergang von einem Netzprovider zum anderen, z.B. von Swisscom zu Orange.
7. Ein Frequenzband ist ein Frequenzbereich z.B. von 876 MHz bis 960 MHz (GSM 900). In einem solchen Frequenzband können mehrere Sprach- oder Bildinformationssignale zugleich übertragen werden. Man spricht von Frequenzmultiplex. Dabei ist für jedes einzelne Informationssignal eine gewisse „Bandbreite“ erforderlich, für Handygespräche 0.2 MHz. Deshalb sind im GSM-900-Band (960-876)/0.2=420 gleichzeitig stattfindende Handygespräche möglich.
8. Ein Datenübertragungsprotokoll ist eine meist international festgelegte Methode zum Übertragen von digitalen Daten zwischen zwei Geräten. Das Protokoll legt fest, wie diese Daten übertragen werden, wie Übertragungsfehler geprüft werden, wie (digitale) Daten komprimiert werden usw.
9. Die beiden wichtigsten Datenübertragungsprotokolle des Mobilfunks sind GSM (Global System for Mobile Communications) und UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). GSM stammt aus dem Jahr 1992 und sah eine Datenübertragungsrate von 9.6 kbit/s vor, UMTS aus dem Jahr 2001 eine Maximalrate von 2'000 kbit/s. UMTS erlaubt neu Bildtelefonie und den Internetzugang.

10. Ein Mobilfunksystem besteht aus drei „Subsystemen“, dem Funk-Subsystem mit mehreren Antennen, dem Vermittlungs-Subsystem, das die Handys registriert und den Handover zwischen den Funkzellen steuert, sowie dem Betriebs- und Wartungssubsystem, das administrative Aufgaben wie Gebührenberechnungen erledigt.

## 5 Hinweise zum Kapitel 5 „Strahlenbelastung: Macht das Handy krank.“

Aus medizinischer Sicht ist die Unterscheidung zwischen **ionisierender Strahlung** mit hoher Energie und niedrig energetischer **nicht ionisierender Strahlung** besonders wichtig.

Aus physikalischer Sicht steht die Unterscheidung zwischen **Energie** und **Intensität** der elektromagnetischen Strahlung im Vordergrund.

Besonders schädlich ist elektromagnetische Strahlung für Mensch und Tier dann, wenn sie ionisierend ist, ihre Energie wie z.B. bei einer Röntgenbehandlung im Computertomographen (CT) hoch genug ist, um chemische Bindungen innerhalb der DNA zu „cracken“ (aufzubrechen), wobei die genetische Information zerstört werden kann.

Ganz anders verhält es sich mit der Mikrowellen-Strahlung, welcher der Mensch etwa bei einer Untersuchung im Kernspintomographen (Magnetresonanztomograph MR) oder beim Telefonieren mit dem Handy ausgesetzt ist: Ihre Wirkung ist nicht ionisierend und für den Menschen daher viel weniger schädlich.

Das Wort „unschädlich“ sollte man aber vermeiden, da auch nicht-ionisierende elektromagnetische Strahlung bei hohen Intensitäten naturgemäß (mehr oder weniger schwere) Verbrennungen bewirken können. Die Intensität dieser Strahlung wird mit dem SAR-Wert, der pro Kilogramm bestrahltem Körpervolumen absorbierten Strahlungsleistung, definiert.

Der SAR-Wert entspricht der Energiedosisleistung (in Gray bzw. in Sievert), welche zur Beurteilung der biologischen Wirkung (Schädlichkeit) von ionisierender Strahlung, z.B. einer radioaktiven Quelle, auf lebendes Material benutzt wird.

## 5.4 Musterlösungen zu Kapitel 5

1. Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung umfasst elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von mehreren hunderttausend Kilometern bis in den Attometerbereich (tausendster Teil des Durchmessers eines Atomkerns): Längst-, Lang-, Mittel-, Kurz- und Ultrakurzwellen (Radiowellen), Mikrowellen, Infrarot- (IR, Wärme-) Strahlung, sichtbares Licht, ultraviolette (UV), Röntgen-, Gamma- und Höhenstrahlung.
2. Ionisierende Strahlung (UV-, Röntgen-, Gamma-, Höhenstrahlung) kann Atome in chemischen Bindungen ionisieren, d.h. Elektronen „herausschlagen“ und chemische Bindungen zerstören.
3. Elektromagnetische Strahlung führt im menschlichen Körper in jedem Fall zur Erwärmung des Gewebes und der Organe. Ionisierende elektromagnetische Strahlung kann zusätzlich die Erbsubstanz DNA durch Zerstörung von chemischen Bindungen und der dort gespeicherten genetischen Information beschädigen.
4. Die Energie der elektromagnetischen Strahlung ist durch die Wellenlänge gegeben: Je kürzer die Wellenlänge, desto grösser die Energie der Strahlung. Eine Lichtquelle mit einer bestimmten Wellenlänge, z.B. ein roter Laserstrahl, kann dabei intensiver oder weniger intensiv sein.
5. Weil die Auswirkungen der Mikrowellenstrahlung eines Handys auf den menschlichen Körper sehr klein sind. Sie führen lediglich zu einer (minimalen) Erwärmung der Kopfregion. Es wird vermutet, dass das Risiko, an einem Hirntumor zu erkranken, bei jahrelangem intensivem Handygebrauch etwas ansteigen könnte. Die ionisierende Strahlung aus radioaktiven Quellen führt dagegen nachweislich zur u. U. tödlichen Strahlenkrankheit, wenn eine bestimmte Strahlendosis überschritten wurde (Arbeiter in Fukushima 2011/Tschernobyl 1986).
6. Die spezifische Absorptionsrate, der SAR-Wert, gemessen in Watt pro Kilogramm, gibt die Absorption von elektro-magnetischer Strahlung in biologischem, z.B. menschlichem Gewebe und in Organen an.

$$7. \text{ SAR} = \frac{c \cdot \Delta \vartheta}{\Delta t} \rightarrow \Delta \vartheta = \frac{\text{SAR} \cdot \Delta t}{c} = \frac{2 \cdot 3'600}{4'182} \text{ } ^\circ\text{C} = 1.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

8. Vom Telefonieren mit dem Handy beim Steuern eines Autos.
9. Sonne: gesamtes elektromagnetisches Spektrum, besonders schädigend sind sie ultravioletten und Röntgen-Strahlen

Weltall: Höhenstrahlung, hochenergetisch stark schädigend, aber sehr schwach

Spital: Röntgenstrahlung (CT), Krebstherapie (Elektronenbeschleuniger, radioaktive Quellen)

Mikrowellenherd: Mikrowellenstrahlung (nicht ionisierend. Problematisch ist die hohe Intensität, nicht deren Energie)

Natürliche radioaktive Quellen: Urangestein, Gase, z.B. Radon

Hochspannungsleitungen: Niederfrequente, elektromagnetische Strahlung (50 Hertz, 16,7 Hertz)

AKW: Im störungsfreien Normalbetrieb treten kaum radioaktive Substanzen aus. Im Störfall ist die Strahlenbelastung der Umgebung und die schädigende Wirkung auf Mensch und Tier nicht mehr klar vorhersagbar (Tschernobyl, Fukushima).

## Literaturliste

Gregor Häberle, Bernd Schiemann, Werner Philipp und Bernhard Grimm, *Elektronik Grundwissen: Berufliche Grundbildung für Elektroberufe*, Europa Lehrmittel, 2010.

Klaus Tkotz, *Elektrotechnik / Elektronik. Grundbildung*, Europa Lehrmittel, 2010.

Sexl, Roman et al., *Einführung in die Physik: Band 2 - Von Schwingungen über Elektromagnetismus bis zur Astrophysik*, Sauerländer, 2003.

Kammer, Hans, Mgelandze, Irma, *Physik für Mittelschulen*, HEP, 2010.

Paul A. Tipler, *Physik für Ingenieure*, Spektrum Akademischer Verlag, 2009.

Wablinger W. et al., *Physik für die Sekundarstufe 1*, Orell Füssli, 2003.

Thorsten Wernicke, *Nokia - Mobiltelefone im Detail: Ein Handy verbirgt kleine Wunder. Entdecke sie!*, Books on Demand, 2011.