

Handy *Technik*

Wie funktioniert Mobilkommunikation?



Multimedia Beiträge und weiterführende Informationen findest du in der interaktiven Ausgabe unter:
www.swisscom.com/handytechnik



Videos/Animationen



Bildstrecken



Weiterführende Dokumente



Links

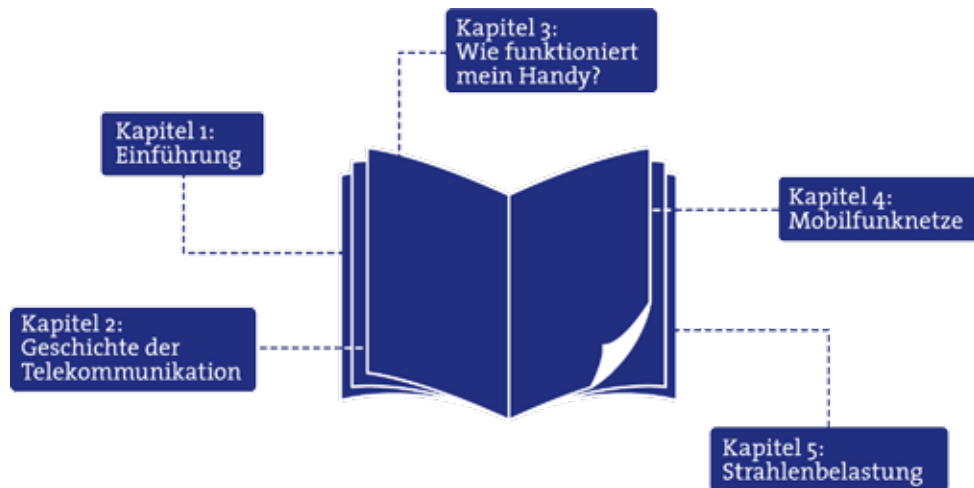


Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	3
Erfindung des Handys (Mobiltelefons)	4
Mobiltelefonie in der Schweiz	4
Was lernst Du in diesem Arbeitsheft?	4
Testfragen	5
2 Telekommunikation: Telefon und Telegraf	6
Telekommunikation	6
Telekommunikation mit dem Schnurtelefon	6
Telekommunikation mit dem Telefon	7
Informationsübermittlung mit dem Morsetelegraphen	7
Vertiefung 1: Darstellung von Zahlen in einem elektrischen Stromkreis	9
Testfragen	9
Anregungen und Experimente	9
3 Mobiltelefon und Digitalelektronik	10
Wie funktioniert mein Handy?	10
Lautsprecher und Mikrofon	10
Vertiefung 2: Elektrischer Strom, Stromkreis und elektrische Spannung	12
Vertiefung 3: Elektronische Bauteile	12
Vertiefung 4: Verstärkung elektrischer Signale	13
Digitalisierung: Analog-Digital- und Digital-Analog-Wandler	13
Vertiefung 5: Analoge und digitale integrierte Schaltungen, Mikroprozessor	14
Der digitale Signalprozessor	15
Vertiefung 6: Elektromagnetische Schwingungen und Wellen	15
Transceiver: Drahtlose Informationsübertragung	16
Identifikation eines Handys (SIM-Karte)	16
Testfragen	17
Anregungen und Experimente	17
4 Mobilfunknetze	18
Das Handy, ein Zellen-Telefon (engl. Cell Phone)	18
Frequenzband und Frequenzmultiplex	20
Frequenzbänder der Mobiltelefonie (GSM)	20
Datenkompression	20
Vertiefung 7: Übertragungsprotokolle (GSM, HSCSD, GPRS, EDGE, UMTS)	21
GSM-Mobilfunknetz	22
Aufbau eines Gesprächs im GSM-Mobilfunknetz	23
Testfragen	25
Anregungen und Experimente	25
5 Strahlenbelastung: Macht das Handy krank?	26
Wirkung der elektromagnetischen Strahlung auf den Menschen	26
Vertiefung 8: Elektromagnetisches Spektrum: ionisierende und nicht ionisierende Strahlung	27
Strahlendes Handy	28
Die spezifische Absorptionsrate (SAR-Wert)	28
Vertiefung 9: Regeln des BAG zum sinnvollen Umgang mit dem Handy	29
Testfragen	30
Anregungen und Experimente	30
Bildnachweis	31
Impressum	31

1 Einführung

In diesem Heft erfährst du etwas zu folgenden Themen:



Erfindung des Handys (Mobiltelefons)

Im Jahr 1973 entwickelte der amerikanische Ingenieur, Dr. Martin Cooper das weltweit erste Mobiltelefon: «Dyna-Tac 8000X». Mit einem Gewicht von 1.2 kg war es knapp 23 cm lang und 13 cm breit (Fig. 1). Die Sprechzeit betrug 35 Minuten, bei einer Akkuladezeit von 10 Stunden. Es verfügte gerade über drei Funktionen: wählen, sprechen und hören. Dyna-Tac war aber das erste tragbare Voll-duplex-Radiotelefon. «Voll-duplex» bedeutet, dass sprechen und hören zugleich möglich sind. Zum Vergleich wiegt das 2010 eingeführte iPhone 4, ein sogenanntes «Smartphone», gerade noch 141 Gramm, hat eine Sprechzeit von mehr als 6 Stunden und verfügt über viele Zusatzfunktionen, an deren Möglichkeit 1973 kein Mensch gedacht hätte: Digitalkamera, Zugang zum Internet GPS, Camcorder, MP-3-Player usw.

Nach der Entwicklung von Dyna-Tac dauerte es allerdings noch 10 Jahre, bis der kommerzielle Betrieb eines (analogen) Mobiltelefonnetzes in den USA aufgenommen wurde (1983).

Mobiltelefonie in der Schweiz

1958 wurde in der Schweiz von den damaligen PTT-Betrieben (PTT: Post, Telefon, Telegraf, Vorläufer der

heutigen Swisscom) ein Netz für drahtlose Automobil-Telefonie aufgebaut. Obschon das Funkrufnetz nur eine Einwegverbindung zuließ, nutzten es 1960 bereits rund 1000 Kunden.

Die eigentliche Mobiltelefonie beginnt in der Schweiz 1978 mit einem von den PTT erstellten und in Betrieb genommenen analogen Teilnetz Natel A. Später folgten die verbesserten analogen Netze Natel B und Natel C. Sie waren die Mobilfunknetze der 1. Generation. Der bis heute wichtigste, revolutionäre Schritt erfolgte 1993 mit der Einführung des ersten digitalen Netzes, dem weltweit eingesetzten GSM-Standard (Global System for Mobile Communications). Das war die zweite Generation (Natel D).

Diese Technik wurde seither stetig weiter ausgebaut, so dass mit den heutigen Handys der 3. Generation, den «Smartphones», und dem 2004 eingeführten UMTS-Standard (Universal Mobile Telecommunications System) auch Kommunikationsformen mit hoher Datenübertragungsrate wie Bildtelefonie oder Zugang zum Internet möglich sind.

Was lernst du in diesem Arbeitsheft?

Trotz seiner geringen Grösse ist das heutige Mobiltelefon (Handy) eines der komplexesten technischen Geräte, das je von Menschenhand geschaffen worden ist.

Damit du verstehst, wie ein Mobiltelefon (Handy)



- 1 Martin Cooper mit dem Dyna-Tac 8000X
- 2 Steve Jobs (Apple) mit iPhone 4 G (2010)
- 3 Mobira Senator, Firma Nokia

und das für den Betrieb erforderliche landesweite Netz von mehreren tausend Antennen (Basisstationen) funktionieren, musst du einiges aus der Physik und vor allem aus der heutigen Ingenieurskunst begriffen haben:

- a) Wie können Nachrichten (Sprache und Musik, aber auch bewegte Bilder) als elektrische Signale drahtlos übertragen werden?
- b) Wie funktioniert ein Festnetztelefon (nicht Handy) mit seinen beiden Hauptbestandteilen, dem Mikrofon und dem Kopfhörer?
- c) Warum werden die Sprachsignale in einem Digital-Handy in einen «Zahlenstrom» verwandelt und erst dann übertragen?
- d) Warum sind für den Betrieb eines Handys sehr leistungsfähige Miniatur-Computer, sogenannte Signalprozessoren, erforderlich?

Die heutige Mobilfunktechnik beruht auf der Physik der elektromagnetischen Welle. Mit elektromagnetischen Wellen können Sprache und Musik (Radio) aber auch bewegte Bilder (Fernsehen) drahtlos übermittelt werden. Diese Technik ist nichts Neues. Sie wurde um 1880 entdeckt und wird seit fast 100 Jahren für Radio- und seit ca. 80 Jahren für Fernsehübertragungen genutzt, vgl. Punkte a) und b).

Neu ist, dass die Sprache, Musik und die bewegten Bilder beim Mobilfunk nicht mehr wie beim Radio analog, sondern mithilfe von Miniaturcomputern digital übertragen wird, vgl. Punkte c) und d).

Analogübertragung bedeutet, dass das beim Sprechen in der Luft erzeugte Tonsignal im Mikrofon in ein elektrisches «Abbild» umgewandelt und dann direkt übertragen wird.

Digitalübertragung bedeutet, dass das beim Sprechen in der Luft erzeugte Tonsignal vom Mikrofon eines Handys aufgenommen wird und dann in Zahlen (ca. 10'000 Zahlen pro Sekunde) umgewandelt wird. Während eines Mobiltelefongesprächs werden diese Zahlen (und nicht das Tonsignal) mit elektromagnetischen Wellen drahtlos übertragen. Beim Zielhandy angekommen, wird dieser Zahlenstrom vor dem Lautsprecher zuerst wieder in ein analoges elektrisches und dann wieder in ein für den Menschen verständliches akustisches Tonsignal umgewandelt.

Der bei einem Telefongespräch entstehende, riesige Datenstrom wird mithilfe von sehr leistungsfähigen

Miniaturcomputern in der Grösse eines Fingernagels (Signalprozessoren) «verwaltet», bearbeitet und praktisch ohne zeitliche Verzögerung über das Mobilfunknetz zum Partnerhandy weitergeleitet.

Die Digitaltechnik, die diese Entwicklung möglich gemacht hat, begann 1947 mit der Erfindung des Transistors, dem wichtigsten Bauelement der heutigen Elektronik. 1958 folgte die erste sogenannte integrierte Schaltung, die mehrere Bauelemente auf einem Plättchen vereinigte. Im Jahr 1970 wurde die erste programmgesteuerte integrierte Schaltung, der Mikroprozessor und etwas später der Signalprozessor, entwickelt. Im Mobiltelefonverkehr verbessert die Digitaltechnik die Übertragungsqualität der Gespräche und erhöht die Zahl der zugleich stattfindenden Telefongespräche erheblich.

Wenn du dich mit der digitalen Mobilfunktechnologie beschäftigst, lernst du nebenbei etwas über den Beruf des Elektro- und Elektronikingenieurs. Tausende von Ingenieuren und Ingenieurinnen haben mit ihrem kreativen Geist die digitale Mobilfunktechnik geschaffen und zu einem weltweit bedeutenden Wirtschaftszweig mit jährlichen Umsätzen von mehreren hundert Milliarden Franken gemacht.

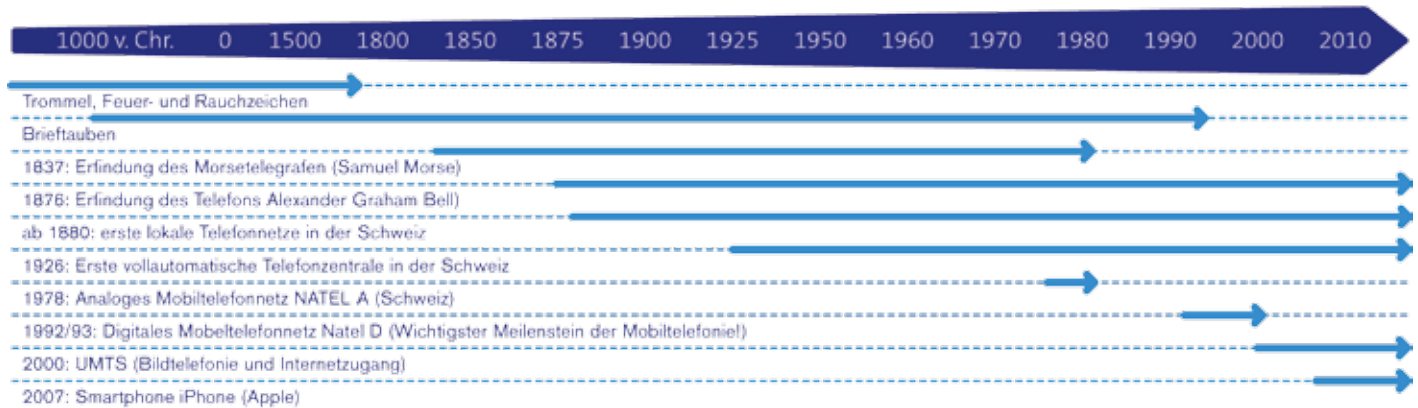
Ein Leben ohne Mobiltelefon können wir uns heute ebenso wenig mehr vorstellen wie ein Leben ohne Internet und ohne Computer, den Schlüsseltechnologien unserer Zeit.

Testfragen

1. Was bedeutet der Begriff «voll-duplex»?
2. Was unterscheidet ein Smartphone von einem Handy?
3. Welche vier Grundfragen muss man zum Verständnis der Funktion des Mobiltelefons beantworten können?
4. Was bedeuten die Wörter «analog» und «digital» im Zusammenhang mit dem Handy?
5. Warum spielen Computer für die Funktion eines Handys eine entscheidende Rolle?

2 Telekommunikation: Telefon und Telegraf

In diesem Kapitel erfährst du etwas über die Geschichte der Mobiltelefonie:



Telekommunikation

Das Wort Telekommunikation setzt sich aus der altgriechischen Vorsilbe «tele» für fern, weit und dem lateinischen Verb «communicare» für mitteilen zusammen. Heute verstehen wir darunter einen technischen Vorgang, nämlich das Aussenden, Übermitteln und Empfangen von Nachrichten in der Form von Zeichen, Sprache, Bildern oder Tönen. Früher wurden Trommeln, Rauchzeichen und bis ins 20. Jahrhundert Brieftauben zur Informationsübermittlung verwendet. In der Alten Eidgenossenschaft dienten sogenannte Chutzenfeuer (Hochwachten) als Alarmsystem in Kriegszeiten. Zwischen Genf und Schaffhausen sind 159 solche Standorte bekannt. Der Brauch der 1. August-Feuer am Nationalfeiertag erinnert an diese frühe Art der Telekommunikation (Fig. 5). Die zu übermittelnde Botschaft wird vom (sichtbaren) Licht «getragen», das von einem

Feuer ausgeht, sich mit Lichtgeschwindigkeit (300'000 Kilometer pro Sekunde) ausbreitet und vom Auge eines Beobachters in grösserer Entfernung beobachtet werden kann. Wie die für die Telekommunikationstechnik des 20. und 21. Jahrhunderts entscheidend wichtigen Radio- und Mikrowellen gehört auch das sichtbare Licht zu den elektromagnetischen Wellen.

Menschen verständigen sich gegenseitig in erster Linie mit ihren Sprachorganen und dem Gehör. Wenn ich spreche, erzeugt mein Kehlkopf kleine Schwankungen des Luftdrucks im Takt der Sprache, sogenannte Schallwellen. Das gesprochene Wort der Lehrerin in Fig. 4 bewegt sich als Schallwelle mit einer Geschwindigkeit von rund 340 Metern pro Sekunde in der Luft, gelangt zu den Ohren ihrer Schülerinnen und Schüler, wo es gehört wird. Im Grunde ist die akustische Verständigung auch schon eine Form der Telekommunikation, da sie dank der Schallwellen über grössere Entfernungen möglich ist.

Telekommunikation mit dem Schnurtelefon

Die beiden Kinder (Fig. 6) sprechen über ein Schnurtelefon miteinander. Das Wort Telefon (früher: Telephon) setzt sich aus den altgriechischen Wörtern «tele» für fern, weit und «phôn» für Laut, bzw. Ton zusammen.

Die Telekommunikation mit einem Schnurtelefon erfolgt mit zwei Büchsen, zwischen denen eine Schnur gespannt ist.

- 4 Akustische Kommunikation: Schulunterricht (Schall)
- 5 Optische Kommunikation: Augustfeuer (Licht)





6



8



7

6 Schnurtelefon

7 Wandstation PTT (1950)

8 ISDN-Digital-Telefon
Tritel Biel (um 1990)

Die beiden Kinder können sich mit einem solchen Schnurtelefon viel besser hören als wenn sie direkt miteinander sprechen. Warum?

Spricht der Junge in die Büchse hinein, so beginnt die Luft in dieser Büchse, die Büchse selbst und die an ihr befestigte Schnur im Takt des Schalls zu schwingen.

Dieses Signal wird in der Schnur als mechanische Welle zur anderen Büchse übertragen. Diese sowie die Luft darin beginnen ebenfalls zu schwingen. Diese Schwingungen können schliesslich vom Mädchen gehört werden.

Im Vergleich zur direkten Schallübertragung in der Luft wird die Schallenergie des sprechenden Jungen im Schnurtelefon besser konzentriert und zum grössten Teil durch die Schnur selbst übertragen, so dass die Zuhörerin den Sprecher viel lauter hören kann.

Das akustische Signal, welches der Junge durch Sprechen erzeugt, wird im Schnurtelefon durch mechanische Wellen in der Schnur zum Mädchen übertragen. Die rechte Büchse ist das Mikrofon, die linke Büchse der Lautsprecher und die Schnur die Leitung dieser einfachen Sprachübertragungsanlage.

Telekommunikation mit dem Telefon

Im elektro-akustischen Telefon, wie es in jedem Haushalt steht, treten anstelle der beiden Büchsen ein Mikrofon und ein Lautsprecher und tritt anstelle der Schnur ein zweiadriges Elektrokabel mit eingebauten Verstärkern für die Übertragung des elektrischen Tonsignals.

Fig. 7 zeigt ein Wandtelefon aus dem Jahr 1950. Neben dem Hörer mit eingebautem Mikrofon und Kopfhörer besteht dieser Apparat aus einem «Haken», in welchen der Hörer zum Unterbrechen des Gesprächs eingehängt werden kann, einer Signalglocke (oben) und der typischen Wählscheibe mit den Ziffern 1 bis 9 und 0. Die Wählscheibe war zu ihrer Zeit eine revolutionäre Neuerung, die es erlaubte, über eine automatische Telefonzentrale eine Partnerstation direkt und ohne Vermittlung über eine Telefonistin (dem legendären «Fräulein vom Amt») direkt anzuwählen.

Fig. 8 zeigt eine moderne Telefon-Tischstation mit der in der Schweiz im Jahr 1988 eingeführten digitalen Vermittlungstechnik ISDN (Integrated Services Digital Network). Trotz der modernen Technik hat sich die direkte Bedienung dieses Apparats gegenüber demjenigen von 1950 kaum geändert. Anstelle der Wählscheibe tritt ein Tastaturblock mit 10 zusätzlichen Tasten, zudem mehrere Nummernspeicher und eine Anzeige (Display) für Telefonnummern.

Sowohl hinter der klassischen analogen Telefonie aus dem Jahr 1950 und der modernen digitalen ISDN-Telefonie steht eine ausgeklügelte hoch raffinierte Technik, auf die wir hier nicht weiter eingehen können.

Informationsübermittlung mit dem Morsetelegraphen

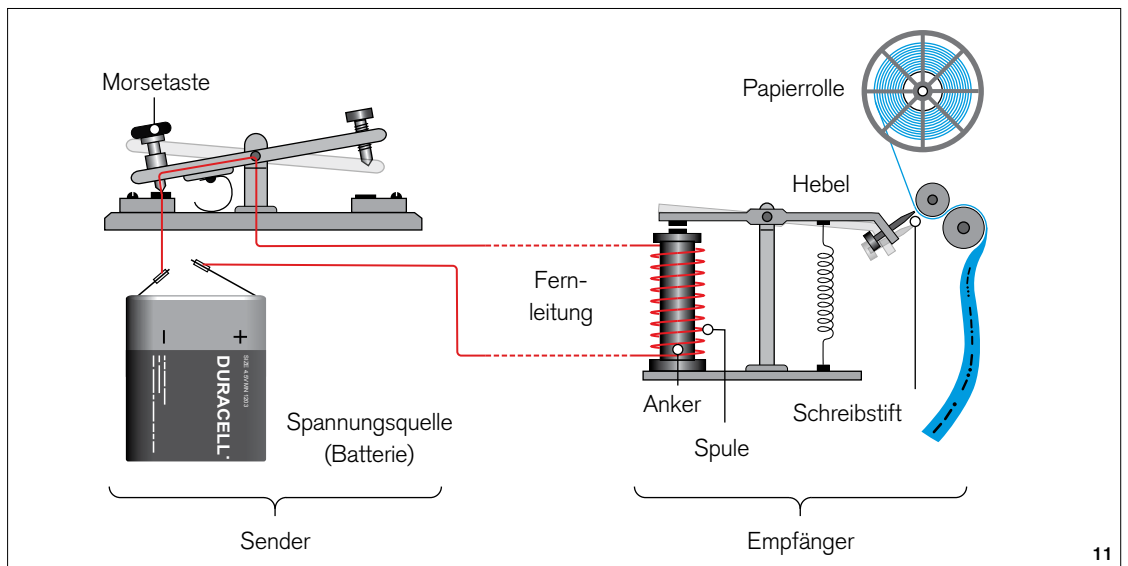
Die Morsetelegrafie, eine sehr alte Telekommunikationstechnik, ist für uns – im Zusammenhang mit dem

A	.-	S	...
B	-...	T	-
C	-. -.	U	..-
D	-..	V	...-
E	.	W	.- -
F	..-.	X	-..-
G	- -.	Y	-.- -
H	Z	- -.-
I	..	1	.- - - -
J	.- - -	2	.. - - -
K	-.-	3	... - -
L	.- ..	4 -
M	- -	5
N	-.	6	-
O	- - -	7	- - ...
P	.- -.	8	- - - ..
Q	- -.-	9	- - - - .
R	.-.	0	- - - - -

9



10



11

9 Morsealphabet

10 Morsecode mit Lichtzeichen in der Seefahrt

11 Morsetelegraf

Handy – deshalb interessant, weil beim Morsen die Daten nicht analog wie beim klassischen Telefon, sondern genau wie beim GSM-Handy digital, d.h. mit einem bestimmten Code, übertragen werden. In Bezug auf das Übertragungsprinzip, das so genannte Protokoll, ist deshalb der Morsetelegraf und nicht das analoge Telefon eigentlich der direkte Vorläufer des digitalen Mobiltelefons.

Das Morsealphabet (Morsecode) ist ein Hilfsmittel zur Übermittlung von Buchstaben, Zahlen und Zeichen. Dabei werden zwei Grundzeichen Punkt (•, kurz) und Strich (–, lang) zur Darstellung von Zahlen und Buchstaben verwendet (Fig. 9). Der Morsecode kann in Lichtsignale umgesetzt und zur drahtlosen Verständigung, etwa in der Seefahrt, verwendet werden (Fig. 10).

Eine wichtige Erfindung des 19. Jahrhunderts war der Morsetelegraf (Fig. 11). Mit einer Morsetaste werden die Morsezeichen durch Ein- und Ausschalten eines elektrischen Stroms in elektrische Stromimpulse umgesetzt und über eine Fernleitung zum Empfänger

übertragen. Dort betätigen diese Stromsignale mithilfe eines Magnetmechanismus (Elektromagnet) einen Schreibstift, der die Punkte und Striche des empfangenen Morsecodes auf einem Papierstreifen festhält.

Später wurde die Fernleitung durch einen Radiosender und -empfänger ersetzt, so dass die Morsezeichen nun per Funk mit elektromagnetischen Wellen drahtlos übertragen werden konnten.

Eine verbesserte Version des Telegrafenapparats, der Fernschreiber (Telex, «Ticker»), wurde noch bis in die 80er-Jahre des vergangenen Jahrhunderts eingesetzt.

Genauso wie mit der Morsetaste die geschriebene Sprache in den Morsecode umgesetzt wird, verwandelt das Mikrofon und ein angeschlossener elektronischer Baustein (der Analog-Digital-Wandler, ADC) eines Mobiltelefons die gesprochene Sprache mithilfe eines Zahlencodes in einen Zahlenstrom um.

Anstelle von Punkt und Strich verwendet man in der modernen Elektronik einen Code mit den Ziffern

0 und 1 (Binärcode). Während es aber ein sehr guter Funker auf höchstens 200 bis 300 Morsezeichen pro Minute bringt, erzeugt der Analog-Digital-Wandler eines Handys in der gleichen Zeit die unglaubliche Zahl von 600'000 Zeichen (Bytes, siehe Vertiefung 1)!

Mit dem Morsetelegraphen wie mit dem Handy werden also Informationen (Buchstaben oder ein akustisches Sprachsignal) nicht direkt, sondern mithilfe eines Codes (Morse- oder Binärcode) via Radio- oder Mikrowellen drahtlos übertragen.

legrafen.

7. Was verstehst Du unter einem Bit, was unter einem Byte?
8. Wie viele Schalter braucht es, um die beiden Dezimalzahlen 19 bzw. 77'839 elektrisch darzustellen? Welche Stellungen (ein/aus) haben diese Schalter?
9. Wie werden die Dezimalzahlen 19 bzw. 77'839 mit dem Morsecode, als Binärcode und als Hexadezimalzahl dargestellt?

Testfragen

1. Was bedeutet Telekommunikation?
2. Wie funktioniert ein Schnurtelefon?
3. Aus welchen Hauptbestandteilen besteht ein analoges Telefon (1950)? Welche Funktion haben sie?
4. Wie unterscheidet sich ein digitaler ISDN-Apparat (1990) von einem analogen Apparat aus dem Jahr 1950?
5. Wie funktioniert ein Morsetelegraph?
6. Erläutere die Begriffe «analog» und «digital» anhand des klassischen Telefons und des Morsetelegraphen.

Anregungen und Experimente

- Schnurtelefon bauen.
- Morsetelegraph erklären und bauen (Stromkreis, Morsetaste, elektromagnetischer Schreibmechanismus).
- Internet: Binärzahlen mit Lämpchen anzeigen.

Für ausführliche Anleitungen vergleiche die interaktive Version unter www.swisscom.com/handytechnik

Vertiefung 1 Darstellung von Zahlen in einem elektrischen Stromkreis

Eine digitale integrierte Schaltung (IC) arbeitet nur mit zwei elektrischen Zuständen, z.B. 0 Volt und 4.5 Volt (Batterie), was den Stellungen «ein» und «aus» eines Schalters entspricht (Binärcode; bi bedeutet zwei). Beide Zustände zusammen («ein»/«aus») sind ein Bit. Mit diesen zwei elektrischen Zuständen können Zahlen elektronisch dargestellt werden. Mit einem Bit (Schalter) können zwei Zustände (Zahlen), mit zwei Bits vier Zustände, mit drei Bits acht Zustände usw. dargestellt werden. Acht Bits zusammen ergeben 1 Byte.

Vertiefung:

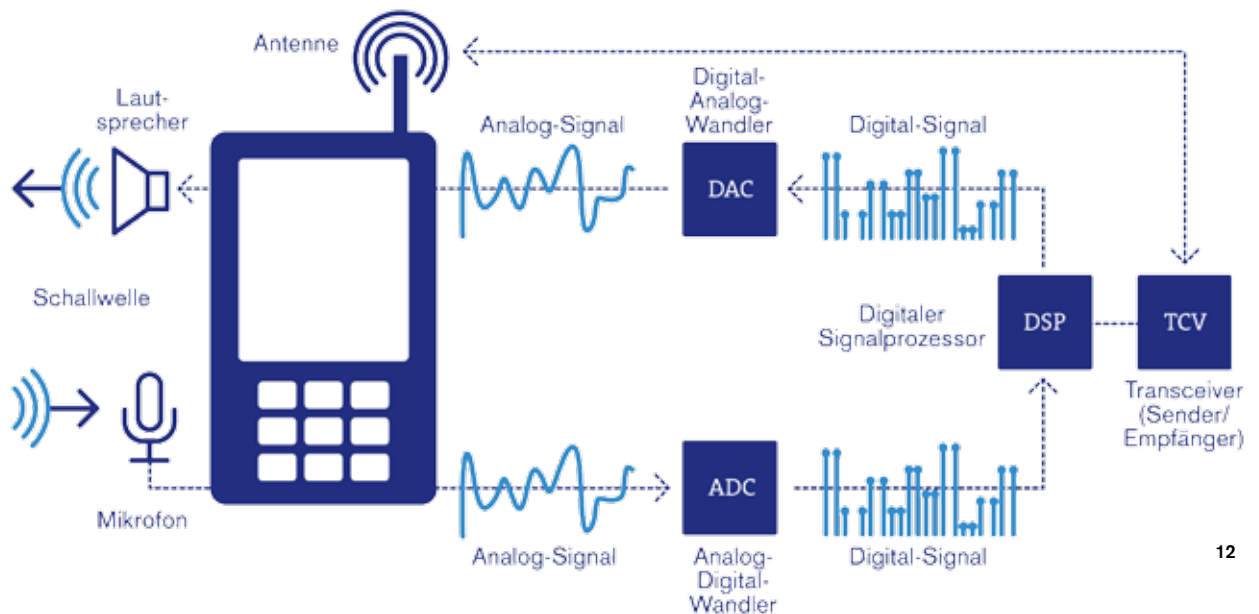
Mit 4 Schaltern sind 16 verschiedene Schalterzustände ein/aus möglich, wie die nächste Tabelle zeigt. Diese Schalterzustände können den Dezimalzahlen 0 bis 15 (1. Kolonne) zugeordnet werden. Statt Dezimalzahlen werden häufig die einfacheren Dual- oder Binärzahlen verwendet, welche nur aus den Ziffern 0 und 1 bestehen (6. Kolonne). 0 entspricht dabei der Schalterstellung «aus», 1 der Stellung «ein». Neben den Dualzahlen wird häufig auch das hexadezimale Zahlensystem verwendet, das mit den sechzehn Ziffern 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F arbeitet (7. Kolonne).

Dezimalzahl	Schalter/Bit Nr. 1	Schalter/Bit Nr. 2	Schalter/Bit Nr. 3	Schalter/Bit Nr. 4	Binärzahl	Hexadezimalzahl
0	aus	aus	aus	aus	0000	0
1	aus	aus	aus	ein	0001	1
2	aus	aus	ein	aus	0010	2
3	aus	aus	ein	ein	0011	3
4	aus	ein	aus	aus	0100	4
5	aus	ein	aus	ein	0101	5
6	aus	ein	ein	aus	0110	6
7	aus	ein	ein	ein	0111	7
8	ein	aus	aus	aus	1000	8
9	ein	aus	aus	ein	1001	9
10	ein	aus	ein	aus	1010	A
11	ein	aus	ein	ein	1011	B
12	ein	ein	aus	aus	1100	C
13	ein	ein	aus	ein	1101	D
14	ein	ein	ein	aus	1110	E
15	ein	ein	ein	ein	1111	F

Mit 8 Bit oder einem Byte können die Zahlen von 0 bis 255, also $256 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 2^8$ Werte dargestellt werden, mit 16 Bit oder 2 Byte die Zahlen 0 bis 65'535 also $65'536 = 2^{16}$ Werte.

3 Mobiltelefon und Digitalelektronik

In diesem Kapitel erfährst du, wie dein Handy funktioniert:



12

12 Prozesse der Tonübertragung am Handy

Wie funktioniert mein Handy?

Im Inneren eines Handys (Fig. 12) wird das akustische Sprachsignal, das beim Sprechen am Mikrofon entsteht, zuerst in ein elektrisches Signal verwandelt. Weil dieses Signal in Abhängigkeit der Zeit kontinuierlich ist, sprechen wir von einem analog elektrischen Audiosignal.

Anschliessend werden die Werte dieses analogen elektrischen Signals mit einem speziellen elektronischen Stromkreis, dem Analog-Digital-Wandler (ADC), in gleichen zeitlichen Abständen von z.B. 0,1 Millisekunden gemessen («abgetastet»), so dass ein Zahlenstrom von z.B. 10'000 Zahlen pro Sekunde entsteht. Einen solchen Zahlenstrom bezeichnen wir als digitales Audiosignal.

Dieser Zahlenstrom (Datenstrom) wird im Digitalen Signalprozessor (DSP) mathematisch bearbeitet, dann im Sendeteil des Transceiver (= Transmitter + Receiver, TCV, d.h. kombinierter Sender und Empfänger) drahtlos mit elektromagnetischen Wellen zur nächst gelegenen Antenne, von dort drahtgebunden oder über Richtfunk zur Vermittlungsstelle weitergeleitet. Von dort geht's via Kabelverbindung oder Richtfunk zur nächstgelegenen Basisstation des Empfänger-Handys und weiter drahtlos zum Empfänger-Handy. Hier wird die elektromagnetische Welle vom Empfängerteil des Transceivers (TCV)

übernommen, der Zahlenstrom entschlüsselt, mathematisch bearbeitet und im Digital-Analog-Wandler (DAC) in ein analoges elektrisches und im Lautsprecher in ein akustisches Signal zurückverwandelt (Fig. 12, unten).

Die im Handy eingebaute SIM-Karte erlaubt es einem Netzbetreiber, z.B. Swisscom, ein Handy zu erkennen und dem Besitzer oder der Besitzerin die Gesprächskosten zu verrechnen.

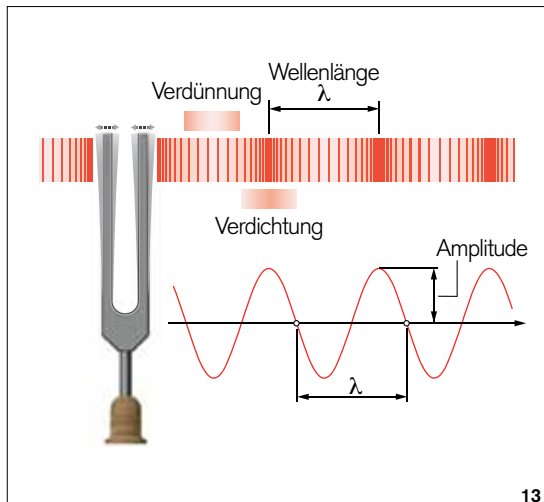
Lautsprecher und Mikrofon

Wie eine Stimmgabel, so erzeugt auch ein Lautsprecher einen Ton oder einen Klang. Im Gegensatz zur Stimmgabel wird der Ton des Lautsprechers aber durch einen veränderlichen elektrischen Strom hervorgerufen, der sich im gleichen Takt wie der wiedergegebene Ton bzw. wie die Musik verändert.

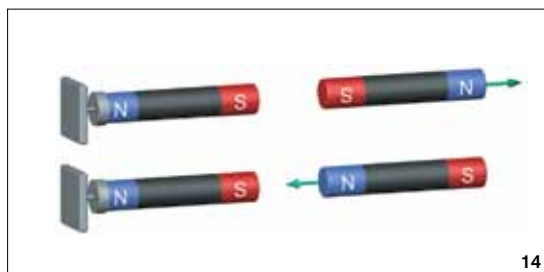
Ein (dynamischer) Lautsprecher funktioniert auf der Grundlage magnetischer Kräfte.

In Fig. 14 sehen wir zwei Paare von Stabmagneten (Dauer- oder Permanentmagnete), die sich abstossen (oben) oder anziehen (unten).

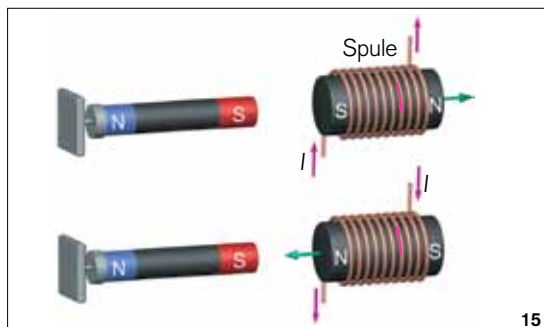
Ersetzen wir einen dieser Stabmagnete durch einen Elektromagneten, d.h. durch eine Drahtspule (Fig. 15), so ziehen sich Stabmagnet und Spule an, wenn der elektrische Strom in der einen und stossen sich ab,



13



14



15

13 Schwingende Stimmgabel erzeugt eine Schallwelle in der umgebenden Luft

14 Kräfte zwischen Permanentmagneten

15 Kräfte zwischen Permanent- und Elektromagneten

16 Funktionsprinzip eines Lautsprechers

17 Funktionsprinzip eines Tauchspulenmikrofons

wenn er in der anderen Richtung durch die Spule fließt.

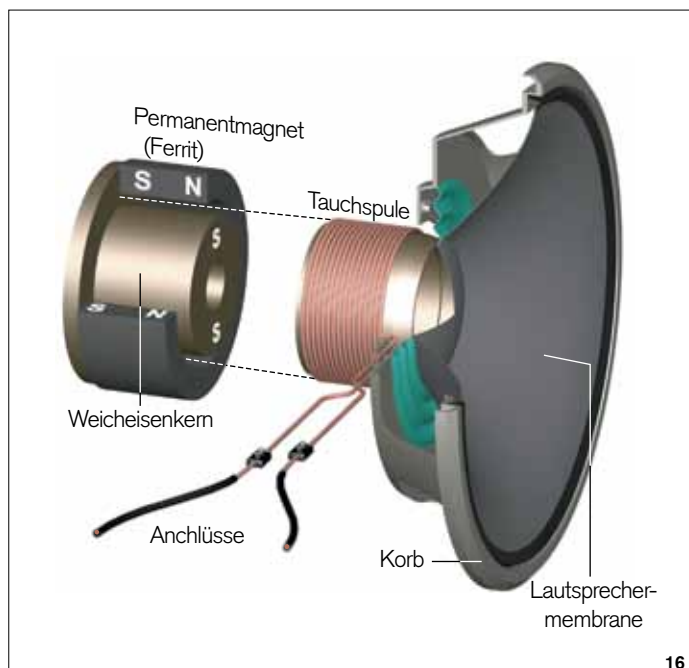
Schicken wir nun einen elektrischen Strom aus einem Musikverstärker z.B. im Takt einer Stimmgabel (440 Hz, Fig. 13) durch diese Spule, so wird sie im gleichen Takt hin- und herbewegt.

Verbinden wir diese Spule, die in einen Permanentmagneten taucht (Tauchspule), mit einer kegelförmigen Membran aus Karton oder einem Kunststoff, so entsteht ein Lautsprecher: Die im Takt des elektrischen Stroms hin- und herbewegte Lautsprechermembran erzeugt Verdichtungen und Verdünnungen der Luft, d.h. eine Schallwelle, die wir mit unserem Ohr wahrnehmen können (Fig. 16).

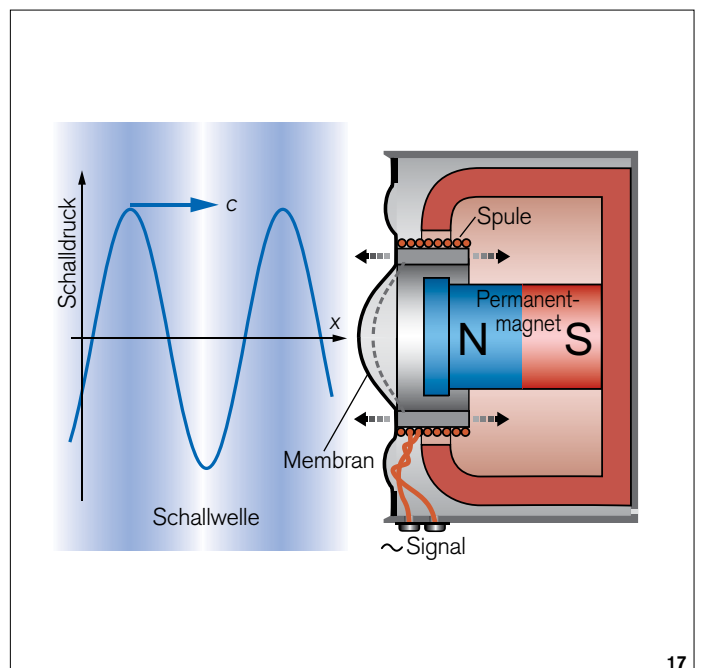
Treffen umgekehrt Schallwellen auf eine Membran eines Mikrofons (Fig. 12 und 17), so beginnt diese mit der Frequenz, d.h. im Takt der Schallwelle sehr schnell hin- und herzubewegen; sie schwingt. Ist diese bewegte Membran mit einer Spule verbunden, die in einen Permanentmagneten eintaucht, so entsteht ein elektrisches Signal, genauer eine zeitlich veränderliche elektrische Spannung.

Das ist das Funktionsprinzip des weit verbreiteten elektrodynamischen Mikrofons. Der physikalische Hintergrund ist ein um 1830 vom genialen englischen Physiker Michael Faraday entdecktes Naturgesetz, das berühmte Induktionsgesetz.

Wie eine Batterie (Vertiefung 2) ist also auch ein Mikrofon eine elektrische Spannungsquelle; allerdings ist die Mikrofonspannung viel kleiner als diejenige einer Batterie und natürlich nicht konstant. Die Mikrofonspannung verändert ihren Wert im Takt der eintreffenden Schallwellen. Weil das Mikrofonssignal, d.h. die elektrische Spannung am Mikrofon, klein ist, muss sie immer verstärkt werden. Dazu dienen elektronische Verstärkerschaltungen mit Transistoren (Vertiefung 3 und 4).



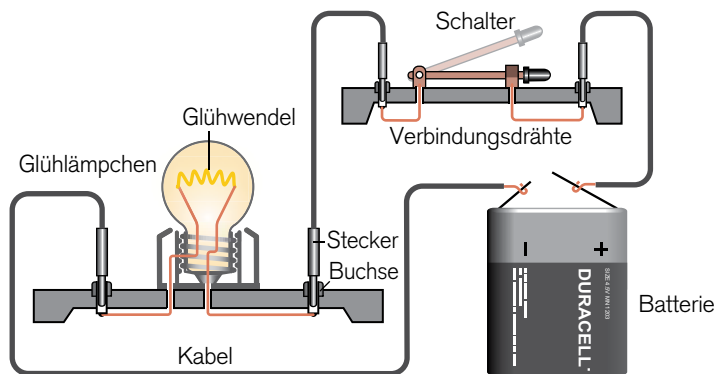
16



17



Vertiefung 2 Elektrischer Strom, Stromkreis und elektrische Spannung



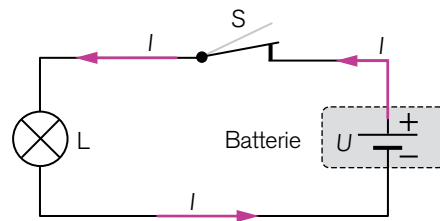
18

Bewegen sich Elektronen im elektrischen Leiter (isolierter Kupferdraht) eines Stromkreises (Fig. 18), so fliesst ein elektrischer Strom. Die Stromstärke ist ein Mass dafür, wie viele Elektronen sich in einer gewissen Zeit durch den Leiter bewegen. Da Elektronen neben einer sehr kleinen Masse auch eine (negative) elektrische Ladung aufweisen, gibt ein elektrischer Strom auch an, wie viel elektrische Ladung in einer gewissen Zeit durch den Leiter fliesst.

Figur 18 zeigt einen einfachen elektrischen Stromkreis mit Batterie, Glühlampe und Schalter.

Figur 19 zeigt das zugehörige Schaltbild (Schema). Wird der Schalter S geschlossen, so fliesst ein elektrischer Strom von der Batterie durch die Glühlampe (Birne). Dabei bewegen sich Elektronen vom negativen Pol (–) zum positiven Pol (+) der Batterie.

Eine Batterie bezeichnen wir auch als Spannungsquelle. Die elektrische Spannung ist ein Mass für die «Stärke» einer Batterie. Die in Fig. 18 abgebildete Flachbatterie hat eine elektrische Spannung von ca. 4,5 Volt. Je grösser die elektrische Spannung, desto grösser die elektrische Stromstärke.



19

18 Elektrischer Stromkreis
mit Glühlampe

19 Schaltschema (Batterie,
Schalter und Glühlampe)

20 Widerstand, Kondensator
und Transistor

Vertiefung 3 Elektronische Bauteile



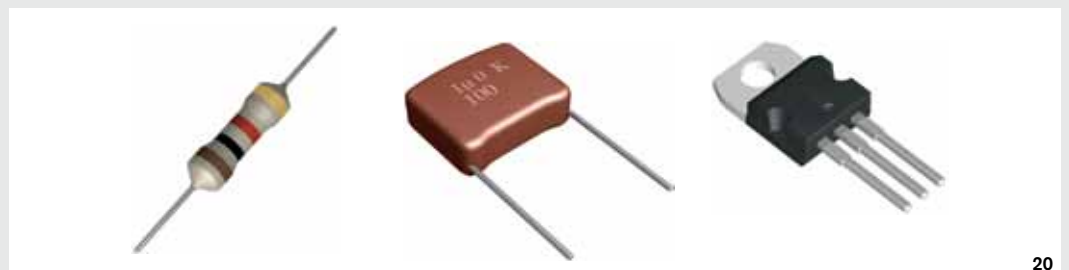
Die drei wichtigsten elektronischen Bauelemente sind der Widerstand R, der Kondensator C und der Transistor T. Alle elektronischen Schaltkreise, die analogen sowie die digitalen, sind aus diesen drei Bauelementen aufgebaut. Ein Beispiel ist die in Figur 23 (Vertiefung 4) gezeigte einfache Verstärkerschaltung.

Ein **Widerstand** bestimmt die elektrische Stromstärke in einem Stromkreis, d.h. er bestimmt, wie viele Elektronen in einem Leiter (Kupferdraht) fließen. Je grösser der Widerstand, desto kleiner die Stromstärke.

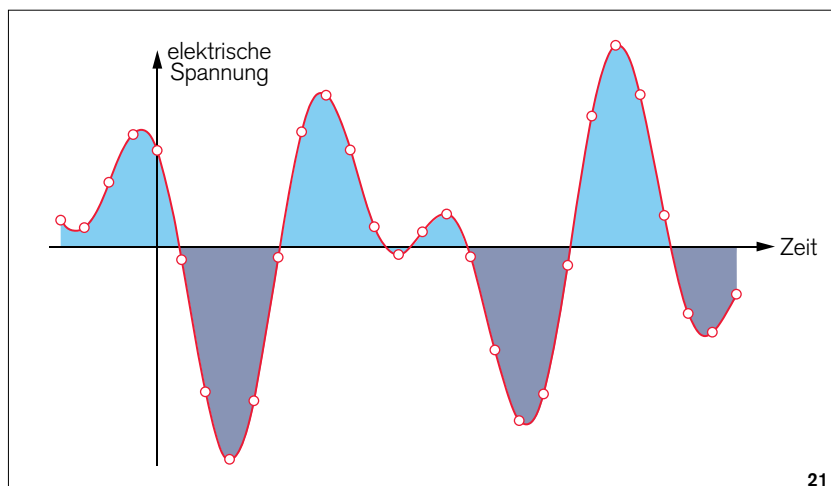
Ein **Kondensator** besteht im einfachsten Fall aus zwei parallel angeordneten Metallplatten. Die Kapazität eines Kondensators ist ein Mass für das «Fas-

sungsvermögen» eines Kondensators für elektrische Ladung. Je grösser die Plattenfläche, desto grösser die Kapazität eines Kondensators. Wird ein Kondensator mit einer Batterie über einen Widerstand aufgeladen, so erfolgt dieser Ladevorgang bei grosser Kapazität langsamer als bei kleiner Kapazität.

Ein **Transistor** ist ein Schaltelement, das die elektrische Stromstärke oder die elektrische Spannung z.B. eines Mikrofons mithilfe einer zusätzlichen Batterie verstärken kann. Der 1947 erfundene Transistor ist das wichtigste Bauteil der gesamten Elektronik. Es gibt verschiedene Transistorarten und tausende verschiedener Transistortypen.



20



21

Digitalisierung: Analog-Digital- und Digital-Analog-Wandler

Im Jahr 1993 wurde in der Schweiz das Natel D eingeführt, das zum ersten Mal die neuartige Technik der Digitalisierung von Tonsignalen einsetzte.

Fig. 21 zeigt ein Beispiel eines Tonsignals, das während eines Gesprächs am Mikrofon eines Handys entsteht. In der Analogtechnik würde dieses Signal direkt weiterverarbeitet, einem Radiosignal aufgeprägt (moduliert) und über die Antenne ausgesendet.

Nicht so in der Digitaltechnik: Bei der Digitalisierung wird ein analoges elektrisches Signal (Fig. 21) vom Analog-Digital-Wandler (ADC, Fig. 12) des Handys in bestimmten zeitlichen Abständen (Intervallen), z.B. alle 0,1 Millisekunden «abgetastet» (Figur 22).

D.h., dass der entsprechende elektrische Spannungswert (in Volt) gemessen und zusammen mit der zugehörigen Zeit gespeichert wird. Der Ingenieur sagt: Das Signal wird mit einer Rate von 10'000 «Samples» oder 10 «Kilosamples» pro Sekunde «gescannt».

ms	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3
V	0.33	0.23	0.76	1.36	1.15	-0.11	-1.73	-2.53

Die obenstehende Tabelle zeigt 8 solche Wertepaare der Digitalisierung des elektrischen Tonsignals in Fig. 23. Pro Sekunde entstehen so 10'000 Zahlenwerte (!), die vom Signalprozessor verarbeitet werden müssen. Sind zur Speicherung eines Messwerts zwei Bytes (siehe Vertiefung 1) erforderlich, so muss im Signalprozessor ein Datenstrom von 20 Kilobytes pro Sekunde verarbeitet werden.

Beim Telefonieren mit dem Handy werden Schallfrequenzen von 300 Hertz bis 3'400 Hertz übertragen, welche mit 8'000 Samples pro Sekunde «gescannt» werden. Somit werden bei einem Handygespräch **800 · 2 · bits pro Sekunde = 128 kbps** verarbeitet! Empfängt das Mobiltelefon umgekehrt ein Gespräch, so liefert der Empfängerteil des Transceivers dem Digitalen Signalprozessor (DSP) einen digitalen Datenstrom, der im Digital-Analog-Wandler (DAC) in ein analoges elektrisches Signal und im Lautsprecher in ein Schallsignal (Sprachsignal) zurückverwandelt wird (Fig. 12).

21 Elektrisches Tonsignal an einem Mikrofon

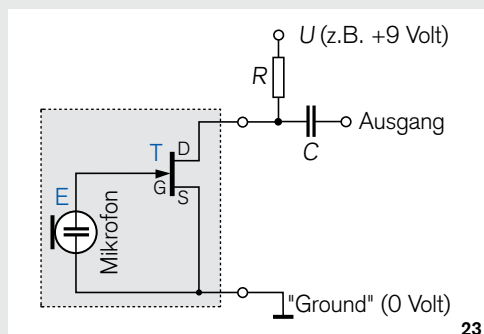
22 Digitalisierung eines elektrischen Tonsignals

23 Einfacher elektronischer Verstärker

Vertiefung 4 Verstärkung elektrischer Signale

Die elektrischen Signale eines Mikrofons sind schwach (im Milli- oder Mikrovoltbereich) und müssen auch wegen Verlusten in Leitungen in jedem Fall verstärkt werden. Ohne Verstärkerschaltungen sind Telefonie und die heutige Elektronik undenkbar.

Fig. 23 zeigt als Beispiel das Schaltbild eines sehr einfachen Verstärkers für ein «Elektret-Mikrofon» (E).



23



Vertiefung 5

Analoge und digitale integrierte Schaltungen, Mikroprozessor

Nach der Erfindung des Transistors leitet der bei «Texas Instruments» tätige Ingenieur Jack Kilby im Jahr 1958 mit der Konstruktion der ersten integrierten Schaltung (IC, «Chip») die moderne Mikroelektronik ein (Fig. 24). Im Jahr 2000 erhielt Kilby für diesen revolutionären technischen Entwicklungsschritt den Nobelpreis für Physik.

Eine integrierte Schaltung enthält auf einem sehr kleinen Silicium-Plättchen mehrere elektronische Bauelemente (Widerstände, Kondensatoren, Transistoren), die miteinander zu einer funktionsfähigen elektronischen Schaltung, etwa einem Verstärker, verbunden sind.

Während die ersten integrierten Schaltungen noch wenige Bauelemente enthielten (10–20), bestehen heutige ICs aus mehreren hundert Millionen bis zu einigen Milliarden Komponenten (Fig. 25).

In der Praxis unterscheiden wir zwischen analogen und digitalen integrierten Schaltungen.

Eine analoge integrierte Schaltung verarbeitet

kontinuierliche elektrische Signale, z.B. die Tonsignale eines Mikrofons in einem Musikverstärker.

Fig. 26 zeigt als Beispiel die integrierte Schaltung TDA 2030, die mit wenigen zusätzlichen Bauteilen zu einem vollwertigen Musikverstärker zusammengebaut werden kann.

Eine digitale integrierte Schaltung (Digital-IC) verarbeitet demgegenüber Zahlen in elektronischer Darstellung (siehe Vertiefung 1).

Eine der wichtigsten digitalen integrierten Schaltungen ist der Mikroprozessor. Im Gegensatz zu anderen digitalen und analogen integrierten Schaltungen wird die Funktion eines Mikroprozessors erst durch ein Programm bestimmt, das vom Anwender des Mikroprozessors erst noch entwickelt werden muss, bevor er diese Schaltung einsetzen kann. Ein Mikroprozessor ist ein Computer, der es erlaubt, Zahlen in elektronischer Darstellung miteinander logisch oder arithmetisch zu verknüpfen, d.h. sie z.B. zu addieren oder zu multiplizieren.

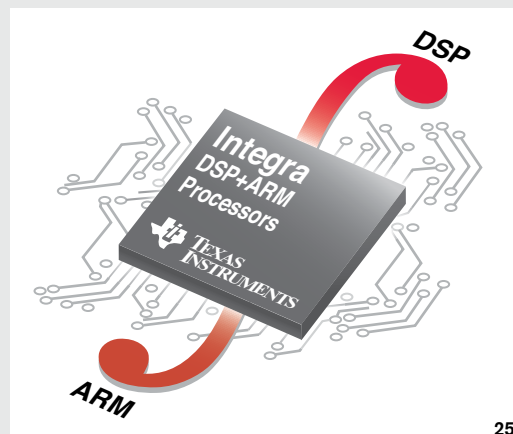
24 Erster IC (1958, 8 Bauteile), Jack Kilby

25 Moderner Digitaler Signalprozessor DSP TMS320C6A816x (TI, Oktober 2010)

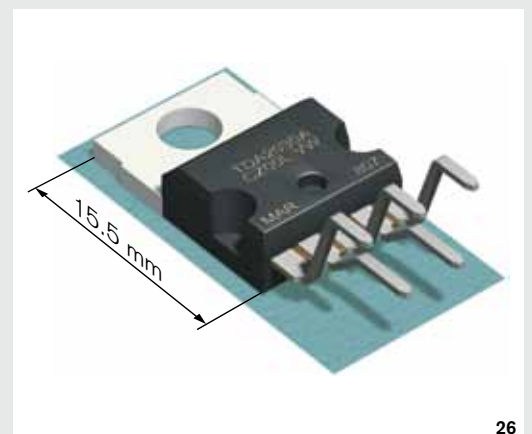
26 Der analoge IC TDA2030 A, ein 14 Watt Audio HiFi Verstärker



24



25



26

Der digitale Signalprozessor

Während eines Handygesprächs entsteht am Ausgang des Analog-Digital-Wandlers (ADC, Fig. 12) ein Datenstrom von typischerweise 20 Kilobytes pro Sekunde. Zur Verarbeitung so grosser Datenmengen ist ein spezialisierter Computer, ein Digitaler Signalprozessor (DSP, Fig. 12 und 25) erforderlich.

Umgekehrt muss dieser Signalprozessor auch den vom Empfängerteil des Transceivers (TCV, Fig. 12) eintreffende Datenstrom direkt verarbeiten und an den Digital-Analog-Wandler (DAC, Fig. 12) weiterleiten können. Dazu ist ein spezielles fest eingebautes Computerprogramm erforderlich, das man als CODEC (engl. Coder-Decoder) bezeichnet.

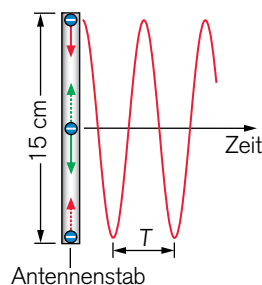
Daneben laufen auf dem digitalen Signalprozessor eines Handys auch Programme ab, welche Rechenverfahren zur Kompression von Daten enthalten, wie sie auch in MP3-Playern anzutreffen sind. Sie erlauben es, die während eines Gesprächs entstehenden grossen Datenströme ohne merkbare Einbusse der Sprachquali-

tät stark zu verkleinern.

Der in Handys eingesetzte digitale Signalprozessor (DSP) ist die zentrale Leitstelle und damit Herz und Hirn dieser Geräte zugleich. Der DSP ist eine besonders leistungsfähige Form des Mikroprozessors. Er kann pro Sekunde mehrere hundert Millionen Additionen oder Multiplikationen ausführen.

Wir merken uns: Jedes heutige Mobiltelefon verfügt über mehrere sehr leistungsfähige Computer (Mikro- und Signalprozessoren), welche zur Verarbeitung der digitalen Sprachsignale beim Telefonieren und zur Steuerung eingesetzt werden. Beim heute weit verbreiteten «Smartphone» kommen weitere prozessorgesteuerte Funktionen wie Digitalfotografie, Internetzugang, GPS usw. hinzu.

Ohne diese schnellen Prozessoren wäre die digitale Mobiltelefonie nicht möglich. Noch vor dreissig Jahren hätte die in einem heutigen Handy untergebrachte Elektronik ein ganzes Stockwerk eines grösseren Gebäudes in Anspruch genommen.



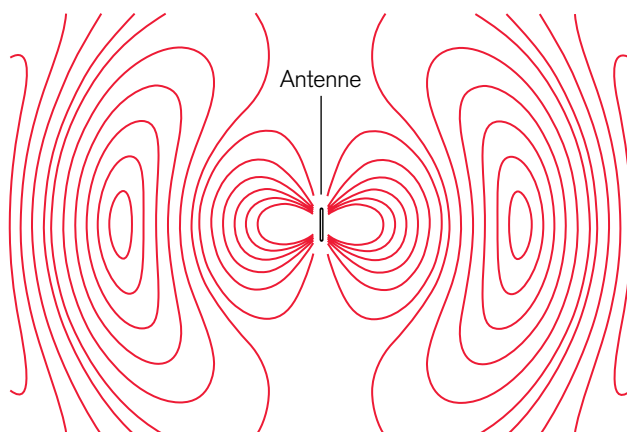
Schwingungsdauer T eines Elektrons:

$$T = 0,000'000'001 \text{ s} = 1 \text{ ns} \quad (1 \text{ Nanosekunde})$$

Frequenz f dieser Schwingung:

$$f = 1'000'000'000 \text{ Hz} = 1 \text{ GHz} \quad (1 \text{ Milliarde Schwingungen pro Sekunde})$$

27



28

Vertiefung 6 Elektromagnetische Schwingungen und Wellen

Wir untersuchen ein Elektron, das sich in einem elektrisch leitenden Stab (Antenne) sehr schnell hin- und herbewegt, z.B. auf einem Stab der Länge 15 cm pro Sekunde 1 Milliarde Mal.

Nach den Gesetzen der Elektrodynamik, den vier Maxwell'schen Gleichungen, entsteht dabei abwechselungsweise ein Magnetfeld und ein elektrisches Feld:

Das magnetische Feld entsteht, wenn sich das Elektron mit maximaler Geschwindigkeit durch die Mitte des Stabs bewegt, das elektrische Feld, wenn das Elektron während seiner Pendelbewegung unten und oben im Stab für kurze Zeit in Ruhe ist.

Im Verlauf dieser Pendelbewegung des Elektrons geschieht nun etwas Unvorstellbares:

Das elektrische und das magnetische Feld lösen sich von der Antenne und breiten sich im Raum als elektromagnetische Welle mit Lichtgeschwindigkeit $c = 300'000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ aus (Fig. 28).

Wie schwingende Elektronen elektromagnetische Wellen (Radiowellen) erzeugen, kann mit den Maxwell'schen Gleichungen beschrieben werden.

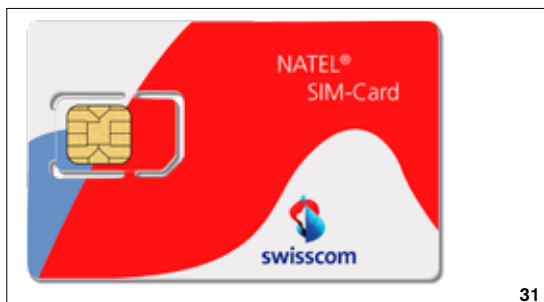
Warum schwingende Elektronen elektromagnetische Wellen erzeugen, wissen wir aber nicht!

27 Entstehung elektromagnetischer Wellen

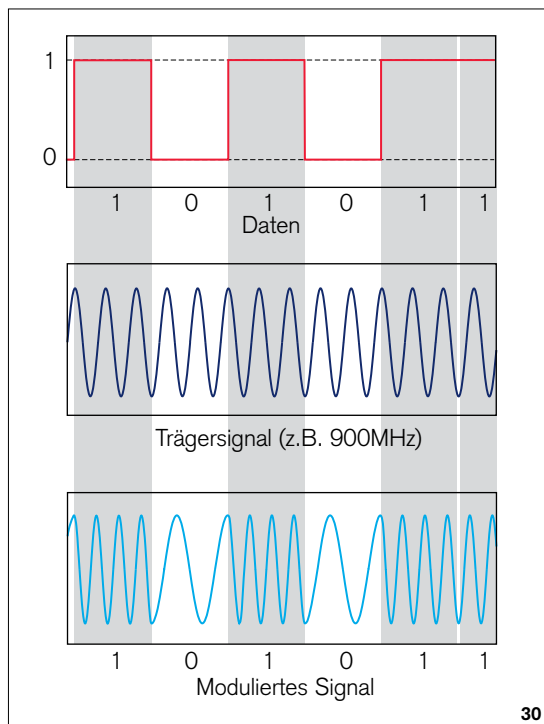
28 Elektromagnetische Wellen im Raum



29



31



30

29 Transceiver einer Base
Transceiver Station
(Mobiltelefon-Basisstation)

30 Frequenzumtastung (FSK)

31 SIM-Karte mit Chip zum
Herauslösen

Transceiver: Drahtlose Informations- übertragung

Jedes Mobiltelefon enthält einen kombinierten Radio-sender und -empfänger, den Transceiver (TCV, Fig. 12), der elektromagnetische Wellen mit Frequenzen um 900 MHz, 1800 MHz, 850 MHz oder 1900 MHz (vier Frequenzbänder) zur Basisstation übermitteln bzw. von dort empfangen kann. Das entspricht Wellenlängen von 33,3 cm, 16,7 cm, 35,3 cm und 15,8 cm. Diese elektromagnetischen Wellen gehören zu den Mikrowellen.

Ein Transceiver ist aus elektronischen Bauteilen wie Kondensatoren, Spulen, Widerständen und Transistoren aufgebaut. Mit diesen Komponenten können elektronische Schaltungen konstruiert werden. Diese Schaltungen können elektromagnetische Schwingungen auf einer Antenne erzeugen (senden) sowie elektromagnetische Wellen auf der gleichen Antenne empfangen.

Wegen der Digitalisierung der akustischen Signale müssen die Daten mit einer «Trägerwelle» (900 MHz, 1800 MHz, 850 MHz oder 1900 MHz) so ausgesendet werden, dass zwischen den Zuständen «null» (0) und «eins» (1) unterschieden werden kann; diesen Vorgang nennt man Modulation (Fig. 30).

Identifikation eines Handys (SIM-Karte)

Ein Mobiltelefon muss von allen Basisstationen, mit denen es in Kontakt treten kann, eindeutig identifiziert werden können. Nur so ist es möglich, dass die Betreibergesellschaft, z.B. Swisscom, die Benutzerin oder den Benutzer erkennt und ihr oder ihm die Gesprächskosten in Rechnung stellen kann. Dazu dienen der IMEI- und der IMSI-Code. Diese Codes sind auf der SIM-Karte (Subscriber Identity Module) gespeichert (Fig. 31).

Der IMEI-Code (International Mobile Equipment Identification) kann benutzt werden, um gestohlene Handys aus dem GSM-Netz auszuschliessen, also zu sperren. Dieser Code identifiziert nur das Gerät, nicht den Benutzer oder die Benutzerin.

Die IMSI (International Mobile Subscriber Identity = internationale Mobilabonnenten-Identifikation) identifiziert die Benutzerin oder den Benutzer in GSM- und UMTS-Netzen und enthält Angaben zum Land, dem Netzbetreiber und zum Benutzer. Die SIM-Karte wird vom Mobilfunkanbieter beim Kauf ins Gerät eingefügt.

Neben den Identifikationsdaten, wird via SIM-Karte auch ein PIN-Code erzeugt, der beim Einschalten des Mobiltelefons eingegeben werden muss und vor der Benutzung durch Unbefugte schützt. Zudem werden auf der SIM-Karte auch die letzten verwendeten Telefonnummern und SMS Mitteilungen gespeichert. Neben der persönlichen gibt es auch die unpersönliche Prepaid-SIM-Karte, für die kein Abonnement beim Netzbetreiber erforderlich ist. Allerdings muss sich der Käufer oder die Käuferin beim Kauf ausweisen.

Testfragen



1. Aus welchen wesentlichen Funktionsblöcken besteht ein Mobiltelefon (Handy)?
 2. Wie funktionieren elektrodynamische Lautsprecher und Mikrofone?
 3. Was ist ein analoges Audiosignal? Wie entsteht es?
 4. Was verstehst Du unter der Digitalisierung eines analogen Audiosignals?
 5. Musiksignale für Compact-Disks werden mit 44'100 Samples pro Sekunde gescannt (abgetastet). Pro Sample wird ein Speicherplatz von 2 Bytes (16 Bits) beansprucht. Die Musik ist im Stereoverfahren aufgenommen, d.h. dass zwei unabhängige Musiksignale, eines für den linken und eines für den rechten Kanal (Lautsprecher), verarbeitet werden müssen. Wie gross muss die Speicherkapazität einer Musik-CD mindestens sein, um 74 Minuten Musik speichern zu können?
 6. Warum sind zum Betrieb eines Handys sehr leistungsfähige Computer erforderlich?
 7. Was verstehst Du unter einem CODEC?
 8. Was verstehst Du unter Datenkompression? Warum ist sie erforderlich?
 9. Was verstehst Du unter akustischen Wellen (Schallwellen)? Wie werden sie erzeugt?
 10. Was verstehst Du unter elektromagnetischen Wellen (Radiowellen)? Wie werden sie erzeugt?
 11. Was verstehst Du unter der Modulation einer elektromagnetischen Welle?
 12. Wozu dient die SIM-Karte in einem Handy?
-

Anregungen und Experimente

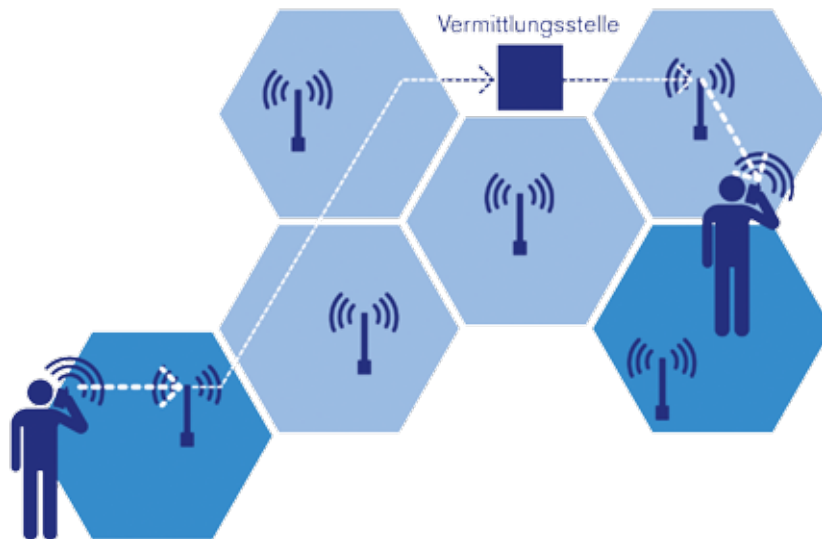


- Mit Soundkarte, Mikrofon und Lautsprecher des PC's und der Software «Overtone» von Ae. Plüss experimentieren.
- Eigenbau des hochempfindlichen Detektors «HF-Sniffer» für elektromagnetische Wellen im UKW und Mikrowellen(Handy)-Frequenzbereich (100–2'500MHz, anspruchsvoll).
- Erstellen einer Bedienungsanleitung des eigenen Handys.

Für ausführliche Anleitungen vergleiche die interaktive Version unter www.swisscom.com/handytechnik

4 Mobilfunknetze

In diesem Kapitel erfährst du, wie ein Mobilfunknetz funktioniert:



Das Handy, ein Zellen-Telefon (engl. Cell Phone)

Die geniale Idee hinter einem Mobiltelefonsystem besteht in der Unterteilung einer Stadt oder eines ganzen Landes in kleine Funkzellen mit Sende- und Empfangsantennen (sogenannten Basisstationen). Dabei ist die Leistung des Senders einer solchen Basisstation so klein, dass er eine Reichweite von nur einigen Kilometern oder weniger hat.

Dieser Reichweitenbereich des Senders bildet die sogenannte Zelle (engl. cell, daher das englische Wort Cell Phone für Handy). Ausserhalb dieser Zelle ist der Sender der zugehörigen Basisstation nicht mehr wirksam; er kann nicht mehr empfangen werden und stört auch nicht, wenn dieselbe Sendefrequenz von einer anderen Basisstation erneut verwendet wird.

So ist es möglich, die (wenigen!) zur Verfügung stehenden Sendefrequenzen mehrfach zu nutzen: Trotz der wenigen zur Verfügung stehenden Frequenzen (je 570 Kanäle für den Uplink und Downlink) finden in der Schweiz gleichzeitig Hunderttausende von Handygesprächen statt.

Will man in einem Land mit diesem Verfahren flächendeckend telefonieren können, so braucht es ein dichtes Netz von Basisstationen mit den zugehörigen Sende- und Empfangsantennen. Die Anzahl der vorhandenen Basisstationen (in der Schweiz rund 11'000)

bestimmt, wie viele Handygespräche zugleich geführt werden können.

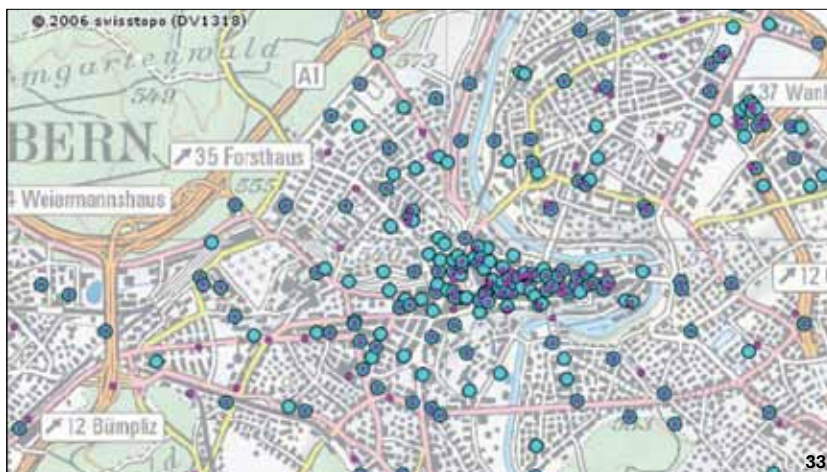
Nehmen wir vereinfachend an, dass das Gebiet bienenwabenartig in sechseckige Zellen unterteilt wird (Fig. 32). Wegen gegenseitiger Beeinflussung (Störung) dürfen benachbarte Basisstationen nicht mit denselben Frequenzen arbeiten.

Die 570 theoretisch möglichen Duplexverbindungen müssen daher auf 7 Basisstationen verteilt werden. Deshalb sind pro Basisstation nur $570:7 \approx 81$ Duplexverbindungen, also gleichzeitig stattfindende Handygespräche, möglich. Die Basisstationen auf den übernächsten Zellen (Fig. 32, Zellen Nr. 1) dürfen wieder dieselben Frequenzen benutzen, weil sie von der Basisstation der ursprünglichen Zelle (Fig. 32, Nr. 1 im Zentrum) nicht mehr gestört werden. Dies ist möglich, weil die elektromagnetische Leistung der Basisstationen so gering ist, dass sie die übernächsten Basisstationen nicht mehr erreichen. Auch die Handys selber haben nur eine kleine Sendeleistung. Ihre Reichweite beträgt höchstens ein paar Kilometer. Liegt die Basisstation (Empfänger) ausserhalb dieses Bereichs, kann keine Verbindung mehr aufgebaut werden.

Diese Überlegungen entsprechen einer stark vereinfachten Modellvorstellung. In Wirklichkeit ist das Funkzellennetz nicht gleichmässig in Form von gleichseitigen Sechsecken über das ganze Land verteilt. Man unterscheidet Picozellen für den stark besiedelten Raum



32



33

32 Zellaufbau von Basisstationen (Handy-Antennen)

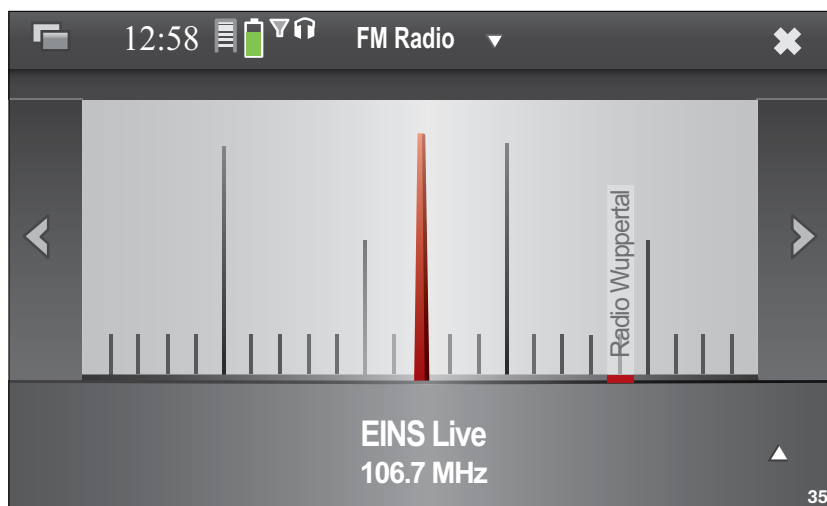
33 Standort von Mobilfunk-Basisstationen in Bern und Umgebung

(Durchmesser bis 100 m), Mikrozellen (100 m bis 2 km) und Makrozellen (2 km bis 50 km) für den ländlichen Raum. Fig. 33 zeigt die Zellenstruktur in der Umgebung von Bern. Je dichter das Funkzellennetz ist, desto kleiner ist die Sendeleistung der einzelnen Basisstation. Jede GSM-Basisstation sendet auf einer bestimmten Frequenz dauernd ein Signal aus, das ein Handy beim Einschalten erkennt. Hierauf sendet es seine Kenndaten an die Basisstation. Danach signalisiert das Handy der Basisstation periodisch alle paar Minuten bis Stunden seine Bereitschaft zum Datenaustausch. Deshalb ist dem elektronischen Netzwerk schon bekannt, in welcher Funkzelle sich ein Teilnehmer befindet, wenn für ihn ein Anruf eintrifft.

Bewegt sich eine Handybenutzerin etwa im Auto und wechselt die Funkzelle, so wird dieser Zellenwechsel (sog. Handover) der Basisstation mitgeteilt. So wird der unterbrechungsfreie Gesprächsverkehr auch während eines Zellenwechsels sichergestellt. Ein Handy kann auch bei mehreren Basisstationen angemeldet sein. Dank sogenannter Roaming-Abkommen (engl. roaming für schlendernd) zwischen den Mobilfunkgesellschaften kann ein Mobiltelefon auch ausserhalb des eigenen Netzes, z.B. im Ausland, genutzt werden.



34



35

34 UKW (FM)- und Mittelwellen (AM)-Radio (älteres Modell)

35 Skala eines UKW-Empfängers (moderneres Modell)

Frequenzband und Frequenzmultiplex

Das Handy arbeitet ähnlich wie ein UKW-Radio. Mit dem wesentlichen Unterschied, dass das Handy neben einem Radioempfänger auch über einen Radiosender verfügt.

UKW bedeutet Ultrakurzwelle und bezeichnet den Frequenzbereich elektromagnetischer Wellen für die Verbreitung von Stereo-Radioprogrammen in analoger Technik. Dieser reicht von 87,5 bis 108,0 MHz.

Fig. 34 zeigt einen älteren UKW- und Mittelwellenempfänger mit den Drehknöpfen für die Lautstärke (Volume, links) und die Frequenzwahl (Tune, rechts) sowie dem Drehschalter OFF/FM/AM fürs Einschalten sowie die Wahl zwischen den Mittelwellen- und Ultrakurzwellen.

Fig. 35 zeigt die Skala eines moderneren UKW-Radios, das immer noch mit analoger Signalübertragung arbeitet, aber bereits gewisse «Features» der Digitaltechnik aufweist, etwa eine digitale Uhr und neben einer analogen Frequenzskala und -anzeige (roter Zeiger)

auch eine digitale Frequenzanzeige.

Wir haben uns daran gewöhnt, aber eigentlich ist es ein technisches Wunder, dass wir mit einem Radioempfänger mehrere Programme (Sender) empfangen können!

Dies ist möglich, weil mit Radiowellen auf verschiedenen Frequenzen unterschiedliche Programme (Radiosender) übertragen werden können. Wir sprechen von Frequenzmultiplex. Das lateinische Wort Multiplex bedeutet vielfach oder vielfältig.

In einem bestimmten Frequenzbereich (Frequenzband) können nicht beliebig viele Sender untergebracht werden. So haben etwa in dem in Fig. 35 dargestellten Ausschnitt aus dem UKW-Band zwischen 106 MHz und 107 MHz gerade 10 Sender Platz, wobei der einzelne Sender eine «Bandbreite» von 0.1 MHz = 100 kHz hat. Auf jedem Skalenstrich «sitzt» also genau ein Sender, z.B. «Radio Wuppertal» bei 107.4 MHz. Verkleinert man die Bandbreite, z.B. auf 50 kHz, wie etwa in Italien, so wird die Übertragungsqualität schlechter.

Im Handy-Bereich sind die Wellenlängen 10 bis 20-mal kürzer, die Frequenzen rund 10-mal grösser als im UKW-Bereich; zudem ist die Sendeleistung einer Basisstation viel kleiner als diejenige eines UKW-Senders. Kommt hinzu, dass beim Rundfunk alle Hörer das gleiche Programm einer Radiostation empfangen, beim Mobilfunk jedoch führt ein jeder sein eigenes Gespräch als Sender und Empfänger.

Aus diesen Gründen ist für die Mobiltelefonie ein viel dichteres Sendernetz erforderlich als für den UKW-Radioempfang. In der Schweiz (41'000 km²) gibt es heute ca. 11'000 Basisstationen (Mobilfunkantennen).

Frequenzbänder der Mobiltelefonie (GSM)

Jedes Mobiltelefon verfügt über einen Transceiver (Radiosender- und -empfänger), der Radiowellen mit Frequenzen um 900 MHz, 1800 MHz, 850 MHz oder 1900 MHz (vier Frequenzbänder) senden und empfangen kann.

Je nachdem, wie viele dieser Frequenzbereiche (Bänder) ein Handy empfangen kann, spricht man von einem Dualband-, einem Triband- oder einem Quadbandhandy. Ein Tri- oder Quadband-Handy ist erforderlich, wenn man in Europa und in den USA telefonieren will, weil die 850MHz/1900-MHz GSM Bänder, welche in den USA verwendet werden, nicht mit dem internationalen 900MHz/1800-MHz Standard kompatibel sind.

Datenkompression

Die im Abschnitt «Lautsprecher und Mikrophon» berechnete Datenübertragungsrate von 128 kbit pro Sekunde (kbps) wird mit dem ursprünglichen GSM-Standard mit maximal 9.6 kbit pro Sekunde bei Weitem nicht erreicht.

Diese Übertragungsart ist dazu rund 13-mal zu langsam. Trotzdem konnte schon mit dem GSM-Standard über Funk volligital telefoniert werden. Wie ist dies möglich?

Wie wir schon gesehen haben, heisst die Antwort Datenkompression! Eine Anwendung finden wir auch beim MP3-Player. Datenkompression bedeutet, dass der zur Signalübertragung erforderliche Datenstrom fast ohne Qualitätseinbusse sehr stark verkleinert werden kann.

Dazu werden anspruchsvolle mathematische Rechenverfahren eingesetzt, welche während eines Telefongesprächs in Zeitschritten von 20 Millisekunden das neu eintreffende elektrische Signal mithilfe der vorhergehenden Signale vorausberechnen. Dieses Verfahren erlaubt es, dieses Signal dann mit einer viel kleineren Datenrate zu übertragen. Auf Einzelheiten können wir hier nicht eingehen.



Vertiefung 7 Übertragungsprotokolle (GSM, HSCSD, GPRS, EDGE, UMTS)

Ein Datenübertragungsprotokoll ist eine Art Abmachung (meist international), die festlegt, wie die (digitalen) Daten zwischen zwei Geräten übertragen werden, wie Übertragungsfehler geprüft werden, wie (digitale) Daten komprimiert werden usw.

Der Begriff «Protokoll» stammt ursprünglich aus der Diplomatie, in welcher das Protokoll die zwischenstaatlichen Abläufe mit einer ganzen Reihe von Regeln, die möglichst genau eingehalten werden müssen, festlegt. So gelten für den Ablauf eines Staatsbesuches, aber auch für die Kleiderordnung, die Tischordnung usw. verbindliche Regeln.

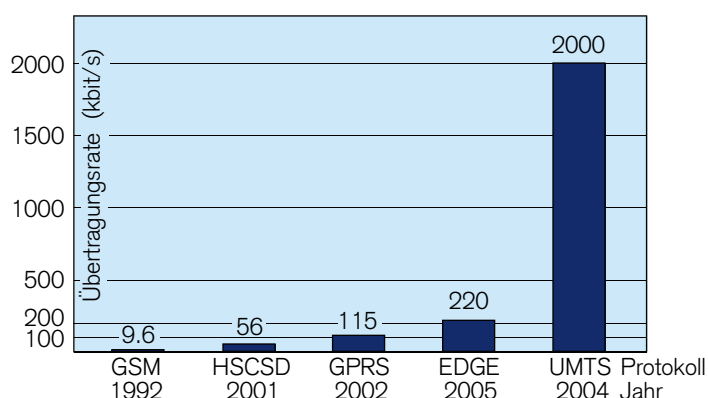
Das wichtigste Protokoll der Mobiltelefonie ist bis heute das 1992 (Schweiz 1993) eingeführte «Global System for Mobile Communications» GSM, ein Standard für volligitale Mobilfunknetze, der hauptsächlich für Telefonie, aber auch für Datenübertragung sowie Kurzmitteilungen (Short Messages) genutzt wird. GSM war ein revolutionärer Schritt! Erst mit GSM wurde die Mobiltelefonie im heutigen Sinn möglich. GSM ist der erste Standard der sogenannten zweiten Generation.

Die Protokolle der ersten Generation bezogen sich auf analoge Funktelefoniesysteme (A-Netz, B-Netz und C-Netz). GSM ist der weltweit am meisten verbreitete Mobilfunk-Standard. Rechnet man alle Mobilfunkstandards zusammen, so sind weltweit ca. 4 Milliarden Handys in Betrieb (Ende 2009).

GSM ist ein mobiles Telefonsystem, das Teilnehmenden eine weltweite Mobilität erlaubt und an den digitalen Festnetz-Telefoniestandard ISDN (Integrated Service Digital Network) sowie an die herkömmlichen analogen Telefonnetze angepasst ist.

Seit 1992 wurden mehrere Erweiterungen des GSM-Standards wie HSCSD (High Speed Circuit Switched Data), GPRS (General Packet Radio Service) und EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) zur schnelleren Datenübertragung eingeführt.

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) ist ein Mobilfunkstandard der dritten Generation mit einer deutlich höheren Datenübertragungsrate, der neben der Audio- neu auch die Videotelefonie sowie den Internetzugang erlaubt (Fig. 36).



36 Datenübertragungsraten verschiedener Protokolle für Mobiltelefonie

GSM-Mobilfunknetz

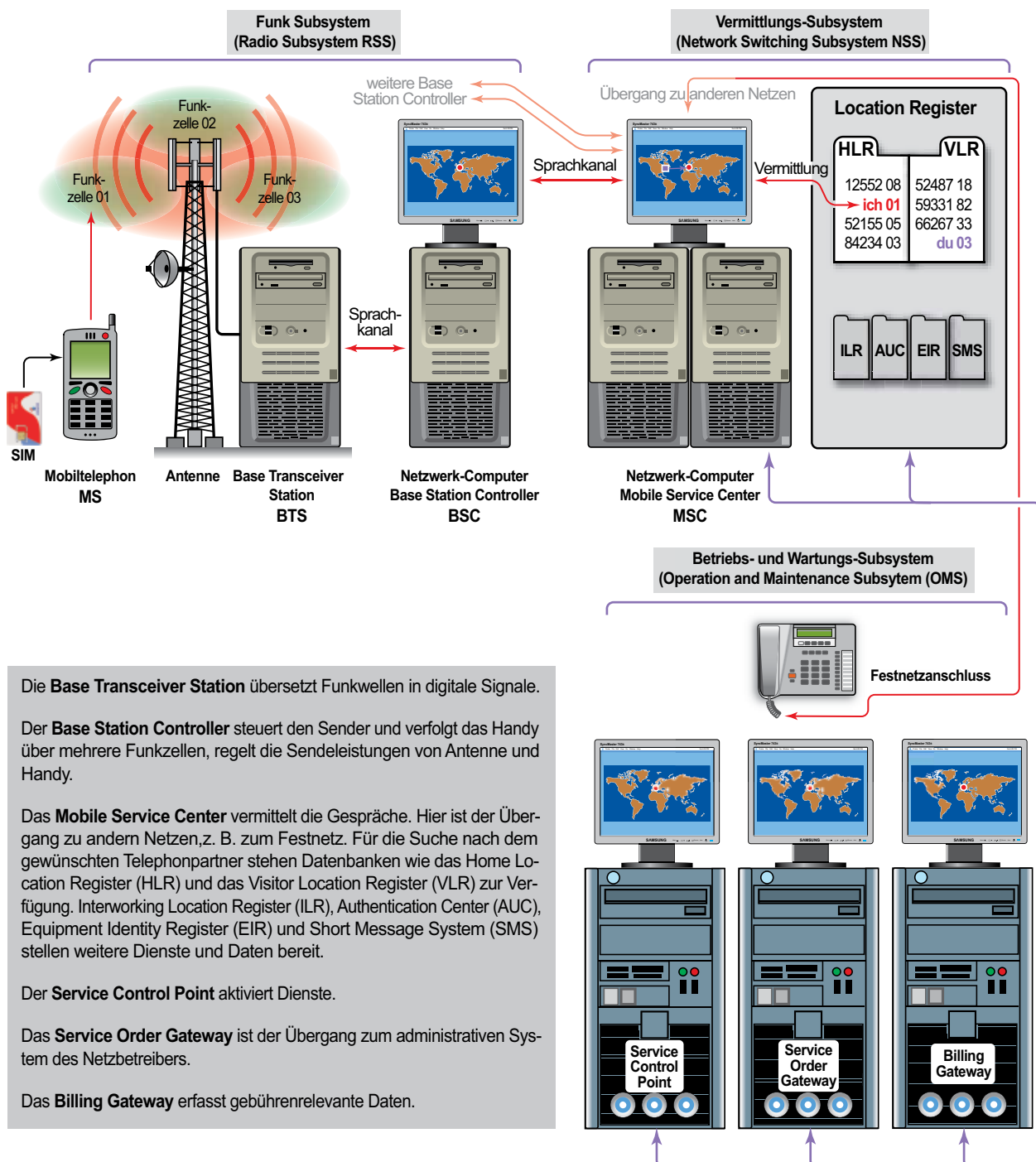
Ein GSM-Mobilfunknetz ist hierarchisch, d.h. von unten nach oben aufgebaut und wird in drei untergeordnete Systeme (Subsysteme) unterteilt (Fig. 37).

- Funk-Subsystem (Radio Subsystem RSS), bestehend aus mehreren Antennen (Base Transceiver Station BTS), der zugehörigen Radiofrequenz- und

Steuerelektronik sowie einem Netzwerkcomputer (BSC, Base Station Controller).

- Vermittlungs-Subsystem (Network Switching Subsystem NSS)
- Betriebs- und Wartungssystem (Operation and Maintenance Subsystem OMS)

Ein Mobiltelefon (MS: Mobile Station) nimmt über Funk mit der nächstgelegenen Basisstation (BTS) Kontakt



auf (Fig. 38, zwei Antennenstäbe oben). Die Basisstation BTS wandelt die empfangenen (analogen) Funksignale in digitale Signale um.

Ein Funk-Subsystem RSS besteht aus mehreren Basisstationen, welche über Kabel oder eine drahtlose Richtstrahlverbindung (Fig. 38, runde Antenne unten rechts) mit einer Kontrollstation (BSC: Base Station Controller) verbunden sind.

Die Kontrollstation verfolgt das Handy über mehrere Funkzellen, steuert bei Bedarf den Zellenwechsel (Handover). Sie bestimmt die Sendeleistung und den Sendebetrieb (z.B. Multiplex, Burst, Frequency-Hopping usw.) der ihr unterstellten Antennen.

Die Kontrollstationen sind ihrerseits wiederum über Kabel oder Richtfunk mit einem Vermittlungsrechner (MSC: Mobile Service Center) im Vermittlungs-Subsystem (NSS) verbunden.

Der Netzwerk-Computer MSC vermittelt Gespräche mit einem anderen Handy auf dem Mobilnetz oder dem Festnetz des Netzbetreibers, aber auch den Übergang zu anderen in- oder ausländischen Netzen.

Für die Identifikation des anrufenden Handys bzw. des gesuchten Partnergeräts stehen verschiedene elektronische Datenbanken zur Verfügung. Die wichtigsten sind das VLR-, das HLR- und das AuC-Register (Fig. 37).

- Das VLR (Visitor Location Register) ist ein Aufenthaltsregister, in dem Informationen über alle Mobilfunk-Teilnehmer abgelegt sind, die sich gerade im Einzugsbereich des MSC befinden.
- Das HLR (Home Location Register) ist ein Verzeichnis der Kundendaten aller mobilen und stationären Telefone des betreffenden Netzanbieters (z.B. Swisscom) mit Mobilfunknummern, International Mobile Subscriber Identity (IMSI) usw.
- Das AuC (Authentication Center) ist die Authentisierungszentrale, eine Datenbank, mit welcher der Benutzer mithilfe von Daten und einem geheimen Schlüssel auf der SIM-Karte des Handys identifiziert (authentifiziert) wird. Ist die Authentifizierung erfolgreich abgeschlossen, so kann das HLR die SIM-Karte und die vom Handy-Benutzer angeforderten Mobilfunkdienste verwalten. Es wird auch ein geheimer Schlüssel für die Kommunikation zwischen Handy und GSM-Netz erzeugt. Dies ist nötig, um eine betrügerische SIM-Klonierung zu verhindern, welche die SIM-Karte des Handys, mit dem gerade telefoniert wird, für eine andere ausgibt.

Das Betriebs- und Wartungs-Subsystem (OMS: Operation and Maintenance Subsystem) berechnet die Verbindungsgebühren, überwacht die beiden anderen Subsysteme, optimiert den Datenverkehr auf dem GSM-Netz und ist für die Lokalisierung und Behebung von Fehlern zuständig.

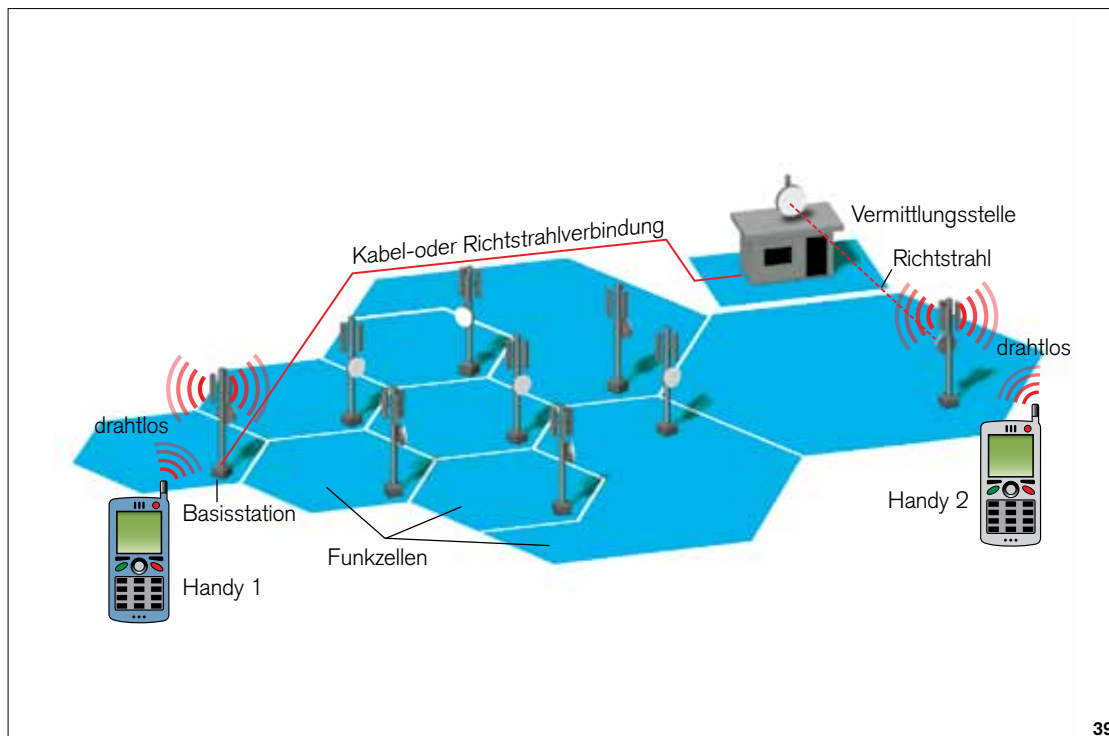
Aufbau eines Gesprächs im GSM-Mobilfunknetz

Wir nehmen an, Du schaltest Dein Handy ein. Nach einiger Zeit versucht Dich eine Freundin anzurufen. Was läuft dann in Deinem Handy, was im GSM-Netz ab?

- Nach dem Einschalten sucht das Mobiltelefon auf dem Kontrollkanal das sog. SID-Signal (System Identification Number), in der Schweiz eine Zahl

38 Basisstation BTS





39 Gespräch im GSM-Mobilfunknetz

- zwischen 23'040 und 23'167. Der SID-Code wird vom Netzbetreiber beim Kauf eines Handys auf die SIM-Karte übertragen. Der Kontrollkanal ist eine Spezialfrequenz, auf welcher Handy und Basisstation kommunizieren können. Empfängt das Handy keinen Kontrollkanal, so «weiss» es, dass es sich nicht im Sendebereich einer Handy-Antenne befindet, also «Out of Range» ist. Auf der Anzeige erscheint dann die Meldung «Kein Empfang».
- Empfängt das Handy einen SID-Code, so wird dieser mit dem auf der SIM-Karte gespeicherten SID-Code verglichen. Stimmen die beiden Zahlen überein, so «weiss» das Handy, dass die Zelle, mit welcher es in Verbindung steht, zum GSM-System seines Netzbetreibers (z.B. Swisscom) gehört.
 - Zusammen mit der SID-Anfrage sendet das Handy eine Aufforderung zur Registrierung im VLR (Visitor Location Register); das NSS (Network Switching Subsystem) speichert hierauf den Ort Deines Handys. Deshalb kennt das NSS die Netzzelle, in der Du Dich gerade befindest sowie die Netzzelle, von der aus Du von Deiner Freundin angerufen wirst.
 - Das NSS empfängt den Anruf Deiner Freundin und versucht, Dich zu finden. Dazu sucht das NSS in der VLR-Datenbank diejenige Netzzelle, in der Du Dich gerade befindest.
 - Das NSS wählt ein Frequenzpaar, auf dem Dein Handy empfangen und senden soll.
 - Das NSS teilt Deinem Handy auf dem Kontrollkanal diese beiden Frequenzen mit. Sobald Dein Handy und der Sender der Basisstation auf diese Frequenzen geschaltet haben, ist die Verbindung aufgebaut, und Du kannst Dich mit Deiner Freundin im Duplex-

Verfahren über Eure wichtigsten Neuigkeiten unterhalten.

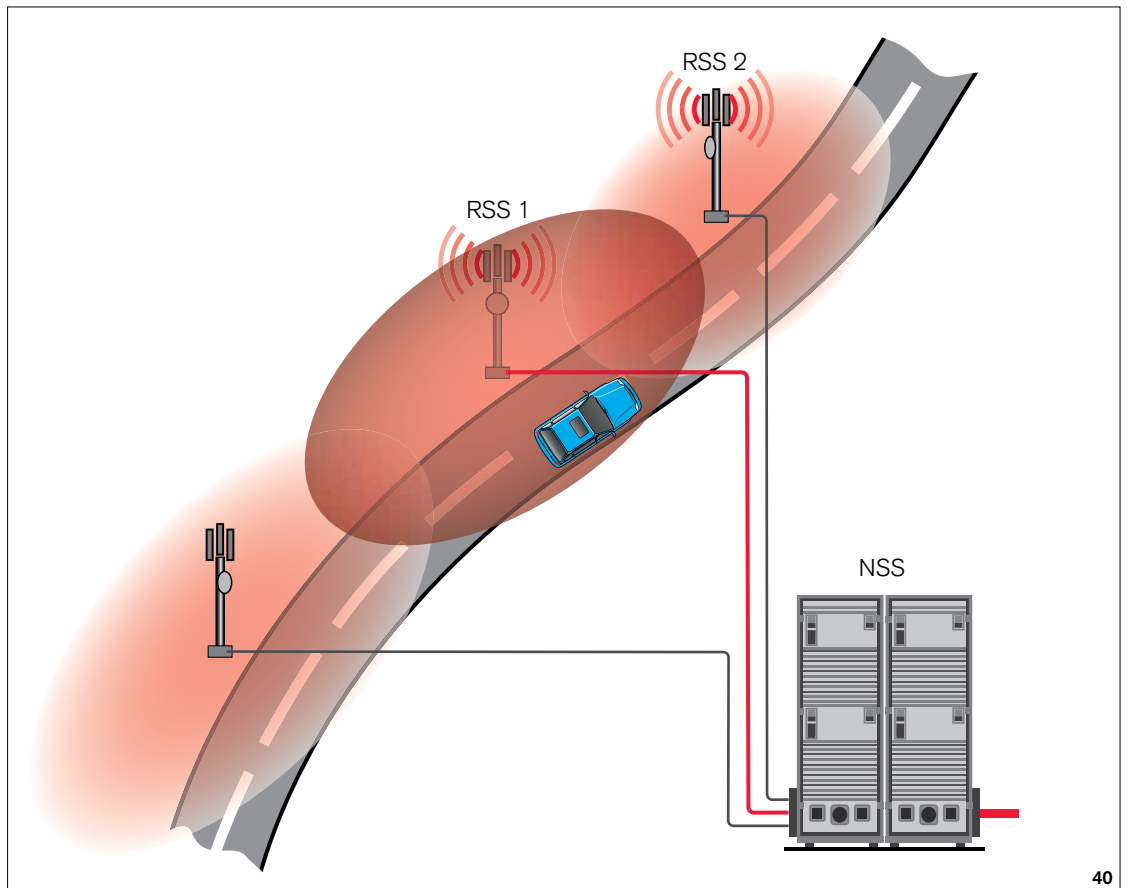
Bewegst Du Dich mit Deinem Handy gegen die Grenze der Zelle 1, in der Du Dich gerade befindest, so stellt die zugehörige Basisstation RSS 1 fest, dass die Signalstärke Deines Handys abnimmt. Zugleich stellt Basisstation RSS 2 der Zelle 2, auf die Du Dich hinbewegst, eine zunehmende Signalstärke Deines Handys fest.

Über das NSS koordinieren die beiden Basisstationen RSS 1 und RSS 2 die Übergabe der Kontrolle, und Deinem Handy wird von der Basisstation RSS 2 ein neues Frequenzpaar zugeteilt, auf dem Dein Handy ab sofort empfangen und senden muss. Dieser sogenannte «Handover» (Handwechsel) schaltet Dein Handy auf die neue Zelle RSS 2 um (Fig. 40).

Befindet sich die alte Zelle RSS 1 in der Schweiz, die neue Zelle RSS 2 mit der zugehörigen Basisstation aber im Ausland und gehört deshalb einem anderen «Service Provider», z.B. Telecom Italia statt Swisscom, so wird das Gespräch nicht unterbrochen, sondern an das GSM-System des neuen Providers übergeben. Diesen Vorgang bezeichnet man als «Roaming». Das Handy «merkt» diesen Roaming-Wechsel, weil die auf dem Kontrollkanal gesendete SID-Zahl von Telecom Italia nicht mehr mit der Swisscom-SID-Zahl Deines Handys übereinstimmt.

Das NSS der Telecom Italia-Zelle RSS 2 kontaktiert nun das MTSO der Swisscom-Zelle RSS 1, welche in ihrem Visitor Location Register die SID-Zahl Deines Handys sucht und dem NSS der Telecom Italia-Zelle RSS 2 bestätigt, dass Deine SID-Zahl gültig ist.

Hierauf wird die Kontrolle Deines Handys vom NSS der Telecom Italia-Zelle RSS 2 übernommen («tracked»),



40

40 Zellenwechsel während einer Autofahrt

solange Du Dich im Bereich dieser Zelle aufhältst. Dieser Prozess geschieht innerhalb weniger Sekunden, kann allerdings zu höheren Kosten beim fremden «Service Provider» führen.

Bei diesem internationalen «Roaming» zwischen Ländern mit unterschiedlichen Netztechnologien sind unter Umständen spezielle Handys erforderlich: Tri-/Quad-Band- bzw. Multimode-Handys.

Testfragen

1. Warum heisst ein Handy im englischen Sprachbereich «cell phone»?
2. Was verstehst Du unter einer Funkzelle?
3. Warum können die Sendefrequenzen im Mobilfunknetz mehrfach benutzt werden?
4. Warum können in einer Stadt mit einem dichten Netz von Funkzellen mehr Telefongespräche zugleich stattfinden als in einem ländlichen Gebiet mit nur wenigen Basisstationen?
5. Welche Vor- und Nachteile hat ein dichtes Netz von Funkzellen?
6. Was verstehst Du unter «Handover» bzw. «Roaming»?
7. Was ist ein Frequenzband? Was bedeutet Frequenzmultiplex?
8. Was verstehst Du unter einem Datenübertragungsprotokoll?
9. Wie heissen die beiden wichtigsten Mobilfunkprotokolle? Wie unterscheiden sie sich?
10. Wie ist ein Mobilfunknetz aufgebaut? Welche Funktion haben die drei grundlegenden Subsysteme?

?

Anregungen und Experimente

- Arbeitsauftrag: Funktion eines Mobilfunksystems. Analog- und Digitalteil des Handys sowie Subsysteme des Mobilfunknetzes erklären (z.B. Kurzreferat).
- Experimente mit einer Hochfrequenzdiode, z.B. BAT 45 und dem HF-Sniffer.
- Experimente mit dem HF-Sniffer und der Soundkarte eines PC's.

Für ausführliche Anleitungen vergleiche die interaktive Version unter www.swisscom.com/handytechnik

5 Strahlenbelastung: Macht das Handy krank?

In diesem Kapitel erfährst du mehr über die Strahlenbelastung durch Handys:



Wirkung der elektromagnetischen Strahlung auf den Menschen

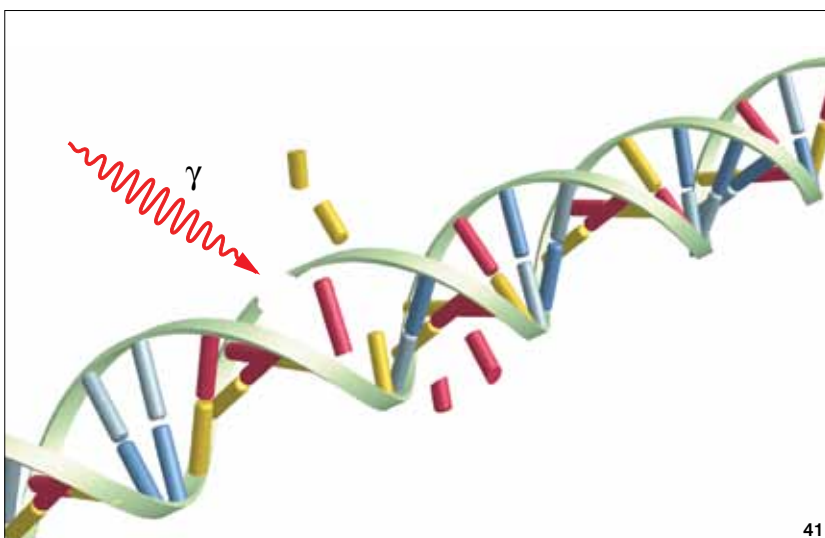
Für die Beurteilung von gesundheitlichen Schädigungen des Menschen durch elektromagnetische Strahlung bzw. Wellen muss sowohl die Intensität (Stärke) als auch die Energie dieser Strahlung berücksichtigt werden.

Wichtig ist besonders die Unterscheidung zwischen ionisierender Strahlung mit hoher Energie (z.B. ultravi-

olette Strahlung, Röntgen- oder Gammastrahlung) und nicht ionisierender Strahlung mit niedriger Energie (z.B. die Mikrowellenstrahlung eines Handys).

Ionisierende Strahlung, wie sie etwa nach der AKW-Katastrophe am 11. März 2011 im japanischen Fukushima wegen des Austritts grosser Mengen radioaktiver Substanzen wie Jod-131 oder Caesium-137 entstand, ist für den Menschen viel gefährlicher als nicht ionisierende Strahlung. Ionisierende Strahlung kann chemische Bindungen aufbrechen und Moleküle, z.B. diejenigen der menschlichen Erbsubstanz DNS, beschädigen (Fig. 41); nicht ionisierende Strahlung kann das nicht.

Ein interaktives Labor gibt einen Überblick einiger Strahlenbelastungen, denen der Mensch täglich ausgesetzt ist.



41

41 Röntgenstrahlung
beschädigt DNA

Vertiefung 8 Elektromagnetisches Spektrum: ionisierende und nicht ionisierende Strahlung



Die vom Handy und den Basisstationen ausgesandte Strahlung in den Frequenzbereichen von $f_1 = 900 \text{ MHz}$ und $f_2 = 1800 \text{ MHz}$ gehört zu den nicht ionisierenden elektromagnetischen Wellen. Die zugehörigen Wellenlängen betragen ca.

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{300'000'000}{900'000'000} \text{ m} = 0.33 \text{ m} \quad \text{bzw.} \quad \lambda_2 = \frac{c}{f_2} = \frac{300'000'000}{1'800'000'000} \text{ m} = 0.17 \text{ m}$$

Auch das sichtbare Licht ist eine elektromagnetische Welle. Sein Wellenlängenbereich liegt zwischen ca. $\lambda = 0.00007 \text{ cm}$ (700 Nanometer) und $\lambda = 0.00004 \text{ cm}$ (400 Nanometer).

Fig. 42 zeigt das ganze elektromagnetische Spektrum mit Frequenzen von 1 Hertz (Längstwellen) bis 10^{27} Hertz (Gamma- und kosmische Strahlung).

Die zugehörigen Wellenlängen liegen zwischen 300'000 Kilometern ($3 \cdot 10^8$ Meter, entspricht ca. der Entfernung Erde-Mond) und 3 Attometern ($3 \cdot 10^{-18}$ Meter, entspricht etwa dem tausendsten Teil der Grösse eines Atomkerns).

Das elektromagnetische Spektrum umfasst (mit abnehmender Wellenlänge und zunehmender Frequenz) die sog. Längstwellen, Langwellen, Mittelwellen, Kurzwellen, Ultrakurzwellen (UKW), die Mikrowellen, das infrarote, das sichtbare und das ultraviolette Licht sowie die Röntgenstrahlung der Medizin, die

Gammastrahlung radioaktiver Substanzen und die kosmische Strahlung aus dem Weltraum.

Für Radio, Funkübertragung, Radar und Fernsehen dienen Radiowellen (Langwellen bis UKW), heute vor allem Ultrakurz- und die Mikrowellen von 100 Megahertz (10^8 Hertz) bis knapp 100 Gigahertz (10^{11} Hertz). Wie wir gesehen haben, können mit elektromagnetischen Wellen Ton-, aber auch Bildsignale drahtlos übertragen werden.

Einstein konnte 1905 mit seiner Lichtquantenhypothese aufzeigen, dass wir uns Licht, d.h. elektromagnetische Strahlung, nicht nur als Welle, sondern zugleich auch als Teilchen vorstellen müssen. Lichtteilchen heissen Photonen.

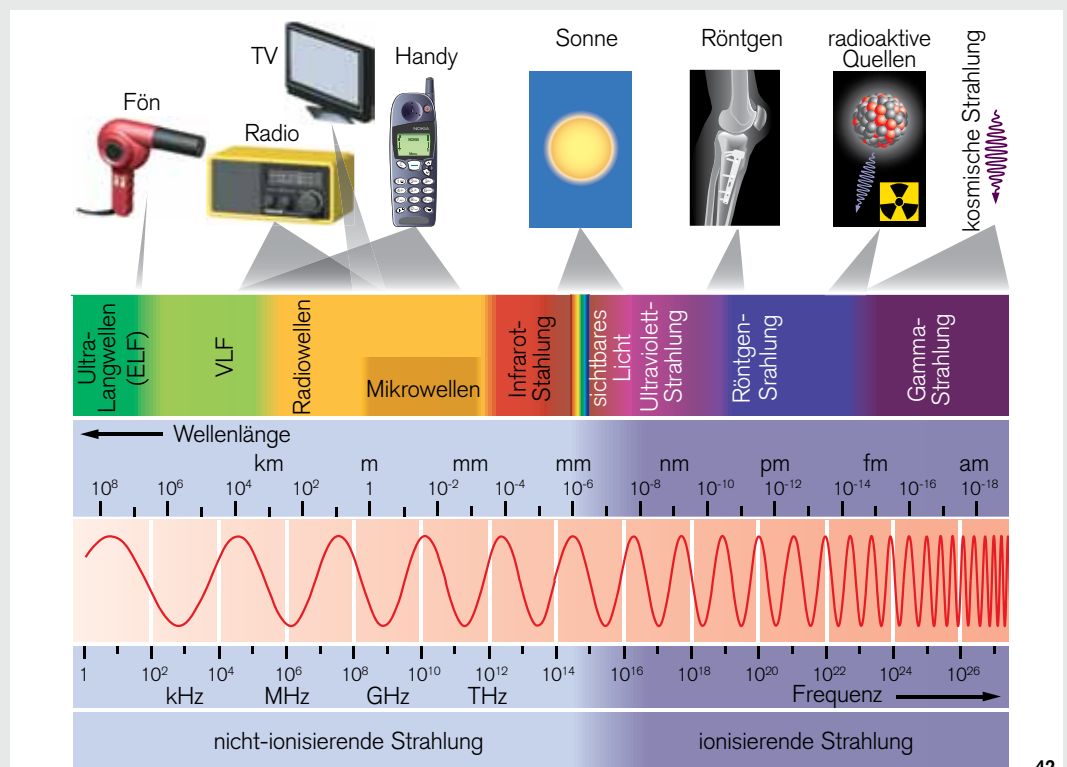
Die Energie E von Photonen nimmt mit zunehmender Frequenz f und abnehmender Wellenlänge λ zu. Nach Einstein gilt:

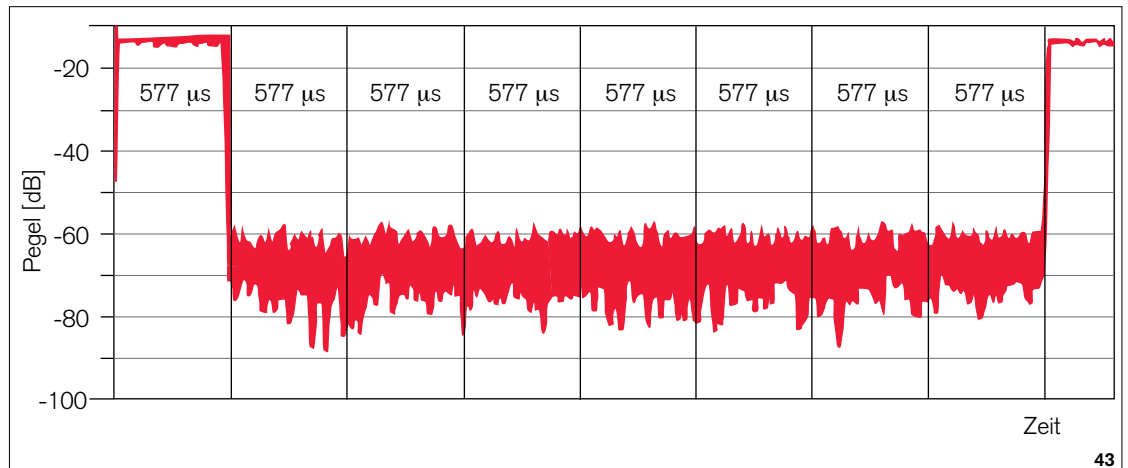
$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \quad \text{wobei } c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{und } h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

h ist eine Naturkonstante, das Planck'sche Wirkungsquantum.

Deshalb müssen wir zwischen Energie und Intensität (Stärke) einer elektromagnetischen Strahlungsquelle (Lichtquelle) unterscheiden:

Die Energie der elektromagnetischen Strahlung wird durch ihre Frequenz bzw. Wellenlänge bestimmt, die Intensität durch die Photonenrate, d.h. die Anzahl Photonen, die die Photonenquelle (z.B. ein Radiosender oder eine Lampe) aussendet.





Strahlendes Handy

Das Mobiltelefon (Handy) ist also nur eine unter vielen elektromagnetischen Strahlungsquellen, denen wir im Alltag dauernd oder zeitweise ausgesetzt sind. Da weltweit sehr viele Handys in Betrieb sind, ist es wichtig, die möglichen Risiken zu kennen, denen man sich beim drahtlosen Telefonieren aussetzt.

Wie wir wissen, kann mit einem Mobiltelefon (Handy) über ein Netz von Basisstationen ortsunabhängig kommuniziert werden. Die Information wird mit hochfrequenten elektromagnetischer Strahlung (Funk) vom Mobiltelefon zur Basisstation übertragen und umgekehrt.

Weil ein GSM- (nicht aber ein UMTS-) Handy im Zeitmultiplex-Verfahren (TDMA) arbeitet und deshalb alle 4.616 Millisekunden für 0.577 Millisekunden eingeschaltet und dann wieder ausgeschaltet wird, ist der Benutzer/die Benutzerin zusätzlich einer niederfrequenten elektromagnetischen Pulsung der Strahlung der Frequenz $f = \frac{1}{0.004616} \text{ Hz} \approx 217 \text{ Hz}$ ausgesetzt (Fig. 43).

Die spezifische Absorptionsrate (SAR-Wert)

Die physikalische Grösse, welche die Absorption («das In-sich-Aufnehmen») von elektromagnetischer Strahlung in biologischem, z.B. menschlichem Gewebe beschreibt, ist die sogenannte Spezifische Absorptionsrate, der SAR-Wert, gemessen in Watt pro Kilogramm. Die Absorption von elektromagnetischer Strahlung führt immer zu einer Erwärmung des Gewebes. Eine bekannte Anwendung ist der Mikrowellenofen, in welchem die Speisen durch Absorption einer Mikrowellenstrahlung von 2'455 MHz erwärmt werden.

Der Unterschied zwischen Handy und Mikrowellenofen liegt in der elektromagnetischen Leistung, die beim Mikrowellenofen rund 1000-mal grösser ist und bei di-

rekter Bestrahlung für den menschlichen Körper wegen der Erhitzung des Gewebes schädlich, evtl. tödlich wäre. Deshalb muss die Türe eines Mikrowellenofens gegen aussen sorgfältig abgeschirmt und gesichert werden.

Der SAR-Wert von Mobiltelefonen liegt zwischen 0,1 und 1,99 Watt pro Kilogramm. Mit der Leistung eines Handys mit einem SAR-Wert von 1 Watt pro Kilogramm kann 1 Kilogramm Wasser in einer Stunde um maximal ca. 0.9°C erwärmt werden.

Beim Telefonieren mit dem Handy wird der Kopf viel weniger stark aufgewärmt, weil ein grosser Teil der absorbierten Energie durch Wärmeleitung fortwährend an den ganzen Körper und die Umgebung abgeführt wird.

Für jedes Telefonmodell wird der SAR-Wert mit Hilfe eines Kopfmodells (Fig. 44) bestimmt und im Internet sowie in der Gebrauchsanweisung publiziert. Der SAR-Wert für Mobiltelefone wird in einem «worst-case» Szenario, also unter ungünstigsten Bedingungen, gemessen und gilt für die maximale Sendeleistung.

Ein Handy verfügt aber über eine Leistungsregelung. Deshalb ist der SAR-Wert während der Inbetriebnahme des Handys gewöhnlich kleiner als der in der Gebrauchsanleitung des Handys angegebene Wert.

Er ist von der Struktur des Mobilfunknetzes abhängig. So sendet das Mobiltelefon in gut ausgebauten Netzen mit einer hohen Dichte von Basisstationen in der Regel mit geringerer Sendeleistung als in schlechter ausgebauten Netzen.

Deshalb ist die Exposition beim Telefonieren in Gebieten mit hoher Dichte von Basisstationen im Normalfall geringer als in Gebieten mit einer niedrigen Dichte. Beim Aufenthalt in Fahrzeugen und Gebäuden (insbesondere solchen aus Stahlbeton) erhöht sich die benötigte Sendeleistung und führt zu einer stärkeren Strahlenbelastung der telefonierenden Person. Die Strahlung ist nur dann vorhanden, wenn das Telefon sendet, also nicht im Ruhezustand ist. Die Strahlung nimmt mit der Distanz zum Gerät rasch ab.



44 Kopfphantom für die Bestimmung des SAR-Wertes

Die (hoch- und niederfrequente) Strahlung ist vor allem in der Nähe der Strahlungsquelle, also bei der Antenne des Mobiltelefons, stark. Deshalb erzeugt ein Mobiltelefon, das beim Telefonieren ans Ohr gehalten wird, eine relativ grosse Strahlungsintensität am Kopf (im Ohrbereich).



Vertiefung 9 Regeln des BAG zum sinnvollen Umgang mit dem Handy

In einer breit angelegten, internationalen Studie (Interphone-Studie), die im Mai 2010 zu Hirntumoren und Handybenutzung erschienen ist, wurde kein erhöhtes Hirntumorrisiko bei einem regelmässigen Gebrauch des Handys oder beim Handygebrauch von über 10 Jahren beobachtet. Einzig für die intensivsten Nutzer, welche die längste kumulierte Gesprächsdauer ausgewiesen haben, gab es schwache Andeutungen für eine Erhöhung der Tumorfrequenz.

Die Autoren der Studie bemerken aber, dass die Resultate in Bezug auf intensivste Handynutzung keine verlässlichen Schlussfolgerungen erlauben. Dies aus folgenden Gründen: Weil Tumorkrankheiten dazu neigen, ihren Handygebrauch zu überschätzen und weil es keine gesicherte Dosis-Wirkungsbeziehung gibt.

Auf Grund dieser Unsicherheiten bei der Interpretation der Studie können keine definitiven Schlüsse über den Zusammenhang zwischen Handybenutzung und Hirntumoren gezogen werden. Wer vorsorglich seine Exposition vermindern will, dem empfiehlt das Bundesamt für Gesundheit (BAG), folgende Regeln einzuhalten:

- Telefonieren Sie NIE, während Sie ein Fahrzeug lenken, auch nicht mit einer Freisprecheinrichtung (Fig. 45)!
- Verwenden Sie eine Freisprecheinrichtung (Kopfhörer, drahtloses oder Kabel-Head-Set), um die Strahlung am Kopf zu reduzieren.
- Achten Sie beim Kauf des Mobiltelefons darauf, dass der SAR-Wert klein ist.
- Telefonieren Sie nur kurz, oder schreiben Sie stattdessen eine SMS. Dies gilt ganz speziell für Kinder

und Jugendliche.

- Telefonieren Sie wenn möglich nur bei guter Verbindungsqualität.
- Vorsicht bei Schutz- und Abschirmprodukten, welche die Strahlenbelastung reduzieren sollen. Sie können die Verbindungsqualität verschlechtern und so das Telefon zwingen, stärker zu strahlen.
- TrägerInnen von aktiven medizinischen Implantaten sollten einen Abstand von 30 cm zwischen dem Mobiltelefon und dem Implantat einhalten.



SOS
statt SMS?



Handy am Steuer ist lebensgefährlich. Ihre Polizei.
www.handyamsteuer.ch

45 Warnung der Stadtpolizei Zürich und Winterthur

Testfragen

1. Erläutere die Strahlungsarten im elektromagnetischen Spektrum.
 2. Was verstehst Du unter ionisierender Strahlung?
 3. Erkläre die Wirkung ionisierender und nicht ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper.
 4. Erläutere den Unterschied zwischen Energie und Intensität der elektromagnetischen Strahlung.
 5. Warum sind die Auswirkungen der elektromagnetischen Strahlung eines Handys auf den menschlichen Körper viel schwieriger zu untersuchen als diejenigen der Strahlung einer radioaktiven Quelle?
 6. Was verstehst Du unter dem SAR-Wert eines Handys?
 7. Um wie viele °C heizt ein Handy mit einem schlechten SAR-Wert von 2 W/kg ein Kilogramm Wasser in einem isolierenden Behälter in einer Stunde auf, wenn die gesamte Strahlung vom Wasser aufgenommen (absorbiert) wird? Wasser: $4182 \text{ W} \cdot \text{s} / (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$
 8. Von welcher Einsatzart des Handys geht die grösste Gefahr für die menschliche Gesundheit aus?
 9. Beschreibe die dargestellten Strahlenbelastungen in der Kapitelillustration auf Seite 26. Welche dieser Strahlungsarten sind für den Menschen besonders schädlich?
-



Anregungen und Experimente



- Vergleiche Aufbau und Strahlungsbelastung der beiden Mikrowellengeräte Handy und Mikrowellenherd. Gehe dazu auf die Webseite vom Bundesamts für Gesundheit.

Für ausführliche Anleitungen vergleiche die interaktive Version unter www.swisscom.com/handytechnik

Bildnachweis

S. 5, Fig. 1/2: Wikimedia Commons
S. 5, Fig. 3: WonderHowTo
S. 6, Fig. 4/5: Wikimedia Commons
S. 7, Fig. 6: Fotolia
S. 7, Fig. 7/8: Peter Raeber
S. 8, Fig. 9: Peter Raeber
S. 8, Fig. 10: Wikimedia Commons
S. 8, Fig. 11: Peter Raeber
S. 11 Fig. 13–S. 13, Fig. 23: Peter Raeber
S. 14, Fig. 24: Texas Instruments
S. 14, Fig. 25–S. 15, Fig. 28: Peter Raeber
S. 16, Fig. 29: Wikimedia Commons
S. 16, Fig. 31: LerNetz AG
S. 16, Fig. 30–S. 19, Fig. 32: Peter Raeber
S. 19, Fig. 33: Bundesamt für Kommunikation
S. 20, Fig. 34–S. 22, Fig. 37: Peter Raeber
S. 23, Fig. 38: Wikimedia Commons
S. 24, Fig. 39–S. 28, Fig. 43: Peter Raeber
S. 29, Fig. 44: European Commission, Research Directorate General
S. 29, Fig. 45: Stadtpolizei Zürich und Winterthur

Impressum

Herausgeberin

Swisscom AG, Bern, www.swisscom.com

Didaktisches Konzept und Umsetzung

LerNetz AG, Bern und Zürich

Projektleitung: Andreas Hieber / Tim Leu

Autor: Hans Kammer

Illustrationen

Peter Raeber (technische Illustrationen)

gut&schön (Kapiteleinstiegsbilder)

Lektorat und Korrektorat

Agathe Schudel (Sprachfest)

Monika Wyss (Testudo GmbH)

Interaktive Lernumgebung

Tim Leu, Konzeption (LerNetz AG)

Daniel Vuille, technische Umsetzung (LerNetz AG)

Übersetzung Französisch

Olivier Pauchard

Gestaltungskonzept und Layout

gut&schön, Zürich, www.gutundschoen.ch

Copyright

Alle Rechte vorbehalten

© 2012 Swisscom AG

Fachsupport für Experimente

handytechnik@lernetz.ch

Herausgeberin

Didaktisches Konzept und Umsetzung





swisscom

Swisscom AG
Corporate Responsibility
Alte Tiefenastrasse 6
3050 Bern