

Physik

GYMNASIUM

ABITUR-WISSEN PHYSIK

**MEHR
ERFAHREN**

Elektrodynamik

ABITUR-WISSEN

94331

Physik

GYMNASIUM

ABITUR-WISSEN PHYSIK

Christ
Ele

Aufbau der Materie

ABITUR-WISSEN

94332

Christian Gleixner

Aufbau der Materie

STARK

GYMNASIUM

ABITUR-WISSEN **PHYSIK**

**MEHR
ERFAHREN**



Christian Gleixner

Aufbau der Materie

STARK

Inhalt

Vorwort

Teilchen und Welle	1
1 Die physikalische Welt am Ende des 19. Jahrhunderts	2
2 Licht im Teilchenmodell – Photonen	6
2.1 Licht auf dem Prüfstand	6
2.2 Licht und Elektronen	10
2.3 Photonen besitzen einen Impuls	14
2.4 Exkurs: Photonen und Gravitation	16
2.5 Exkurs: Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt	18
Fakten und Formeln	21
Concept Map	21
3 Materie im Wellenmodell	22
3.1 Eine gewagte Vermutung	22
3.2 Die experimentelle Bestätigung	23
3.3 Die technische Anwendung: Elektronenmikroskope	28
3.4 Exkurs: Elektronenwellen im Rastertunnelmikroskop	32
Fakten und Formeln	33
Concept Map	33
Atommodelle und Quantenobjekte	35
4 Atomkern und Atomhülle	36
4.1 Die Größe der Atome	36
4.2 Elektronen, Atomhülle, Atomkern	38
4.3 Protonen und Neutronen	43
4.4 Das Bohr'sche Atommodell	44
4.5 Exkurs: Das Periodensystem der Elemente (PSE)	48
4.6 Exkurs: J. J. Thomson und E. Rutherford	49
4.7 Exkurs: Neutronen in Forschung und Technik	52
Fakten und Formeln	54
Concept Map	54

Fortsetzung siehe nächste Seite

5	Verhalten von Quantenobjekten	55
5.1	Versuche mit einzelnen Photonen und Elektronen	55
5.2	Beschreibung von Quantenobjekten	57
5.3	Die Unbestimmtheitsrelation	61
5.4	Das Komplementaritätsprinzip	64
5.5	Exkurs: Verschränkte Zustände und Bell-Ungleichung	65
5.6	Exkurs: Quantenkryptografie	69
5.7	Exkurs: Matrizenmechanik	70
	Fakten und Formeln	72
	Concept Map	72
6	Quantenphysikalische Modellsysteme	73
6.1	Schrödinger-Gleichung, Potenzialtopf, Tunneleffekt	73
6.2	Quantenmodell des Wasserstoffatoms	78
6.3	Das Energiespektrum des Wasserstoffatoms	82
6.4	Exkurs: Stark- und Zeeman-Effekt	84
	Fakten und Formeln	86
	Concept Map	87
7	Linienpektren und Energiezustände	88
7.1	Emissions- und Absorptionsspektren	88
7.2	Spinquantenzahl und Pauli-Prinzip	92
7.3	Farbstoffe und Potenzialtopf	94
7.4	Laser und Anwendungen	96
7.5	Exkurs: Laserkühlung und Frequenzkamm	97
	Fakten und Formeln	100
	Concept Map	100
8	Röntgenstrahlen	101
8.1	Entdeckung durch Zufall	101
8.2	Röntgenstrahlinterferenz	102
8.3	Erzeugung von Röntgenstrahlen	103
8.4	Computertomografie	105
8.5	Exkurs: Synchrotronstrahlung	106
	Fakten und Formeln	109
	Concept Map	109

Elementarteilchen und Atomkern	111
9 Das Standardmodell der Elementarteilchen	112
9.1 Die ersten Elementarteilchen	112
9.2 Streuexperimente	114
9.3 Die Elementarteilchenfamilien	117
9.4 Exkurs: Feynman-Diagramme	119
Fakten und Formeln	121
Concept Map	121
10 Quantenobjekt Atomkern	122
10.1 Charakteristische Gammaspektren	122
10.2 Der Atomkern als Quantentopf	123
10.3 Exkurs: Kernspintomografie	125
Fakten und Formeln	127
Concept Map	127
Radioaktivität	129
11 Radioaktive Strahlung	130
11.1 Entdeckung der Radioaktivität	130
11.2 Arten radioaktiver Strahlung	132
11.3 Nachweisgeräte für Radioaktivität	134
11.4 Isotope, Halbwertszeit und Altersbestimmung	137
11.5 Exkurs: Die Entdeckung von Polonium und Radium	142
Fakten und Formeln	144
Concept Map	145
12 Kernspaltung und Kernfusion	146
12.1 Atomkerne lassen sich spalten	146
12.2 Technische Anwendung: Kernkraftwerke	150
12.3 Atomkerne verschmelzen	153
12.4 Exkurs: Das Leben der Sterne	155
Fakten und Formeln	158
Concept Map	158

Fortsetzung siehe nächste Seite

13 Strahlenschutz	159
13.1 Unbedarfter Umgang	159
13.2 Energie als Maß	160
13.3 Strahlenbelastung in Umwelt, Medizin und Technik	163
13.4 Dosimetrie	167
13.5 Biologische Wirkungen und Schutzmaßnahmen	168
Fakten und Formeln	170
Concept Map	171
 Stichwortverzeichnis	 173
Abbildungsnachweis	179

Autor: Dr. Christian Gleixner

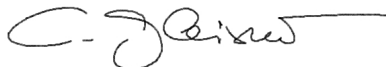
Vorwort

Liebe Schülerin, lieber Schüler,

die **Quantenphysik** bildet einen inhaltlichen Schwerpunkt im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe. Der vorliegende Band „Aufbau der Materie“ aus der Reihe „Abitur-Wissen Physik“ gibt Ihnen einen umfassenden Einblick in den prüfungsrelevanten Stoff aus diesem Themengebiet. Das Buch ist als **Ergänzung** und **Vertiefung** zu Ihren Lehrbüchern in der Schule gedacht; es eignet sich zur Nachbereitung der im Unterricht vermittelten Lerninhalte, darüber hinaus aber auch hervorragend zur Vorbereitung von Seminar-, Fach- oder Projektarbeiten.

In den vier Hauptkapiteln des Buches werden die großen Themenbereiche **Teilchen und Welle, Atommodelle und Quantenobjekte, Elementarteilchen** und **Radioaktivität** behandelt. Meist finden Sie zuerst die grundlegenden historischen Experimente dargestellt, deren Ergebnisse zu den heutigen Vorstellungen hinführen. Jedes Mal werden die **Grundbegriffe** kurz und knapp erläutert und mit zahlreichen Beispielen aus Alltag, Natur, Forschung und Technik illustriert. In den sich anschließenden **Exkursen** werden historische Zusammenhänge, technische Anwendungen, Naturphänomene usw. im Überblick dargestellt. Sie dienen v. a. der Vertiefung, sollen aber auch Ihre Neugier wecken. Damit Sie über all das den Überblick nicht verlieren, sind jeweils am Ende der Teilkapitel unter dem Titel **„Fakten und Formeln“** die wichtigsten Inhalte zusammengefasst. Um Ihnen zudem die Orientierung zu erleichtern, finden Sie dort auch sogenannte **„Concept Maps“**, in denen die Zusammenhänge zwischen den einzelnen physikalischen Begriffen veranschaulicht werden. Sie geben Ihnen einen Anhaltspunkt, wie Sie Ihr Wissen strukturieren und vernetzen können.

Ich wünsche Ihnen viel Freude bei der Lektüre des Buches und viel Erfolg bei Ihren Prüfungen.



Dr. Christian Gleixner

8 Röntgenstrahlen

8.1 Entdeckung durch Zufall

Am 8. November 1895 entdeckte *Wilhelm Conrad Röntgen* (1845–1923, Abb. 97a) in seinem Labor an der Universität Würzburg eine neue Art von Strahlen (Abb. 97b). Die neue Strahlenart wurde von ihm zunächst X-Strahlen genannt, eine Bezeichnung, die heute noch im angelsächsischen Bereich so verwendet wird. Ihr hauptsächlich Kennzeichen war, dass sie selbst dicke Gegenstände zu durchdringen vermochte, wobei sie je nach Art des Materials verschieden stark geschwächt wurde. Die Möglichkeit, damit z. B. die Knochen im Menschen sichtbar zu machen, war nicht nur für die damaligen Ärzte faszinierend (Abb. 98 und 99).

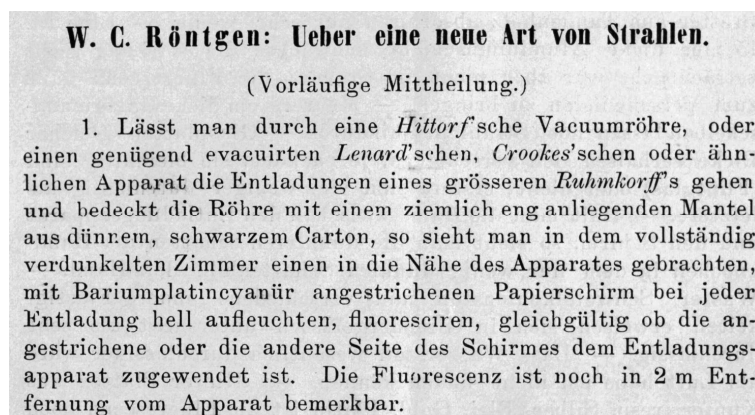


Abb. 97 b



Abb. 98



THE NEW ROENTGEN PHOTOGRAPHY, "LOOK PLEASANT, PLEASE"
Abb. 99



Abb. 97 a

Abb. 97: Entdeckung der Röntgenstrahlen

a: Wilhelm Conrad **Röntgen** erhielt 1901 den allerersten Nobelpreis für Physik „in recognition of the extraordinary services he has rendered by the discovery of the remarkable rays subsequently named after him“.

b: Beginn seines 1895 veröffentlichten **Fachartikels** über die neue Strahlungsart

Abb. 98: Erste Röntgenaufnahme der Welt: die Hand von Frau Röntgen

Abb. 99: Zeitgenössische Karikatur zur Röntgenstrahlung mit dem Titel „Immer schön lächeln“

Schon zwei Jahre nach ihrer Entdeckung wurden Röntgenstrahlen in der medizinischen Diagnostik angewendet, nachdem man schon 1896 herausgefunden hatte, dass man durch Injizieren von bestimmten Stoffen (Kontrastmittel) die Sichtbarkeit von Gewebeteilen verbessern konnte. *Marie Curie* (siehe Kap. 11) entwarf während des Ersten Weltkrieges einen Röntgenwagen, der dann nach ihren Vorgaben gebaut wurde. Damit wurden mobile Untersuchungen von verwundeten Soldaten an der Front möglich. Sie bildete anschließend Röntgenassistentinnen aus, die die Röntgenaufnahmen erstellten. Auch sie selbst war dabei an vorderster Stelle tätig.

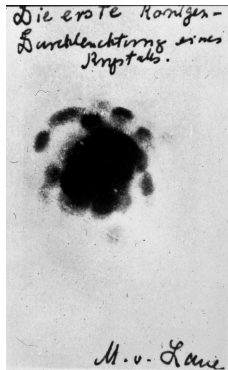


Abb. 100 a

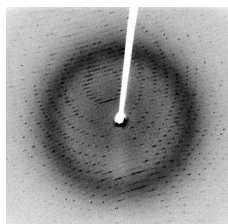


Abb. 100 b

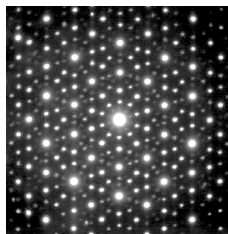


Abb. 100 c

Abb. 100: Röntgenstrahlinterferenz

a: Die erste Aufnahme von Röntgeninterferenz an einem Kristall

b: Moderne Röntgenaufnahme eines Kristalls zur Strukturanalyse

c: Röntgenaufnahme eines Quasikristalls mit lokaler Zehnersymmetrie

8.2 Röntgenstrahlinterferenz

Röntgen selbst hatte schon in seiner ersten Veröffentlichung aufgrund seiner Versuchsergebnisse vermutet, dass Röntgenstrahlung so etwas wie Licht und damit eine elektromagnetische Welle sei. Es dauerte allerdings noch bis ins Jahr 1912, bis dies nachgewiesen war. Das Problem lag in der Kürze der (vermuteten) Wellenlängen von ca. 10^{-10} m. *Max von Laue* (1879–1960) hatte schließlich die Idee, Kristalle als Gitterstruktur zu benutzen. Damit gelang ihm zusammen mit *Walter Friedrich* (1883–1968) und *Paul Knipping* (1883–1935) der Nachweis, dass es bei Röntgenstrahlen zu **Interferenzerscheinungen** kommen kann (Physiknobelpreis 1914, Abb. 100a). Heute wird diese Methode benutzt, um die Struktur von kristallinen Materialien zu untersuchen. Aus der Anordnung der einzelnen Flecken in dem Interferenzmuster kann man Rückschlüsse auf die vorhandenen Symmetrien ziehen und daraus den Kristall einer der 32 möglichen Kristallklassen zuordnen (Abb. 100b). Kürzlich konnte man so nachweisen, dass es außer den bekannten Kristallformen noch sogenannte **Quasikristalle** gibt. Bei ihnen tritt z. B. lokal eine zehnfache Symmetrie auf, die in den bekannten Kristallklassen nicht möglich ist (Abb. 100c). *Dan Shechtman* (*1941) erhielt dafür im Jahr 2011 den Nobelpreis für Chemie.

Eine einfache Erklärung für das Zustandekommen der Röntgenstrahlinterferenz gaben *William Henry Bragg* (1862–1942) und dessen Sohn *William Lawrence Bragg* (1890–1971), die zusammen als Erste Kristallstrukturen mithilfe der Röntgenbeugung aufklärten und dafür 1915 gemeinsam den Physiknobelpreis erhielten. Die Situation stellte sich ihnen ähnlich wie bei der optischen Interferenz an einer dünnen Schicht dar (Abb. 101): Zwei Röntgenstrahlen treffen unter dem Winkel ϑ (**Glanzwinkel**) zur Kristalloberfläche auf zwei verschiedene Ebenen des Kristalls auf und werden dort reflektiert. Dabei legen sie unterschiedlich lange Wege zurück, die vom Winkel ϑ abhängen.

Bragg-Gleichung

Man erhält bei der Röntgenbeugung an einem Kristall Interferenzmaxima, wenn folgende Gleichung erfüllt ist:

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \vartheta$$

$n = 1, 2, 3, \dots$; λ : Wellenlänge der Röntgenstrahlung

d : Abstand der Kristallebenen; ϑ : Glanzwinkel

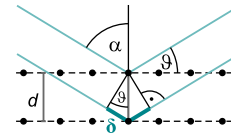


Abb. 101: Erklärung der Röntgeninterferenz nach Bragg

8.3 Erzeugung von Röntgenstrahlen

Das Grundprinzip zur Erzeugung von Röntgenstrahlen ist einfach. Man beschleunigt Elektronen mit mehreren Tausend Volt und lässt sie auf einen Metallklotz (**Anode**) – häufig Kupfer, Molybdän oder Eisen – aufprallen. Die Beschleunigungsspannung bestimmt die maximale Energie der erzeugten Photonen, es gilt:

$$e \cdot U = h \cdot f_{\max} \Rightarrow f_{\max} = \frac{e \cdot U}{h} \quad \text{bzw.} \quad \lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}$$

Abb. 102 a zeigt den Prinzipaufbau einer Röntgenröhre mit rotierender Anode; durch die Rotation wird verhindert, dass am Auftreffort des Elektronenstrahls zu hohe Temperaturen entstehen. Im Spektrum der Röntgenstrahlung lassen sich zwei Anteile identifizieren (Abb. 102 b).

Spektrum einer Röntgenröhre

- Das **Bremsspektrum** entsteht dadurch, dass die Elektronen beim Auftreffen auf die Anode abgebremst werden – beschleunigte Ladungen strahlen elektromagnetische Wellen bzw. Photonen ab. Im Bremsspektrum gibt es daher eine höchste Photonenenergie („kurzwellige Grenze“), die mit der maximalen Elektronenenergie übereinstimmt.
- Das **charakteristische Spektrum** ist mit den Linienspektren im optischen Bereich vergleichbar. Es entsteht durch Anregungen der Atome des Anodenmaterials.

Das charakteristische Spektrum entsteht dadurch, dass aus den beiden untersten besetzten Energieniveaus (Hauptquantenzahlen $n=1$, $n=2$) ein Elektron entfernt wird. Vom Bohr'schen Atommodell her stammen die Bezeichnungen **K-Schale** und **L-Schale** für diese beiden Energiestufen. Aus einem darüberliegenden besetzten Quantenzustand rückt ein Elektron nach. Dabei wird ein Photon ausgesendet; die Spektrallinien werden der Reihe nach mit K_{α} , K_{β} , ..., L_{α} , L_{β} , ... bezeichnet (Abb. 102 c).

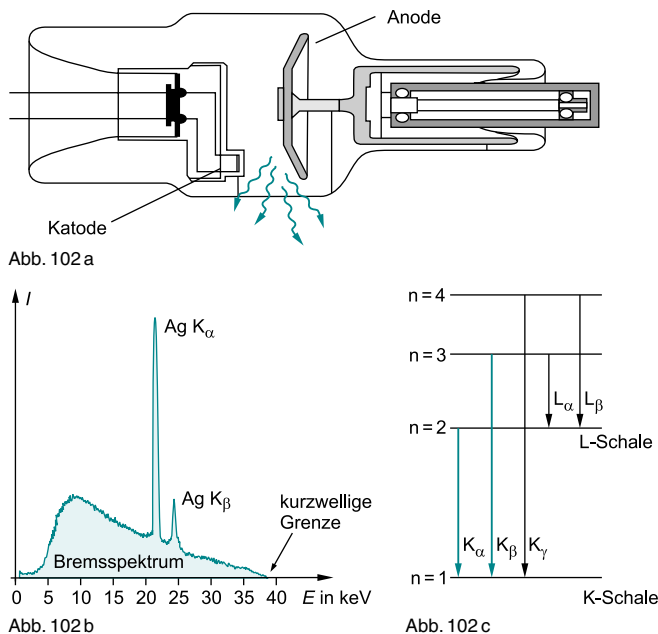


Abb. 102: Röntgenröhre

a: Aufbau

b: Spektrum einer Silberanode. Nach rechts ist die Energie der Röntgenquanten angetragen, nach oben die Intensität.

c: Charakteristisches Röntgenspektrum im Term-schemata

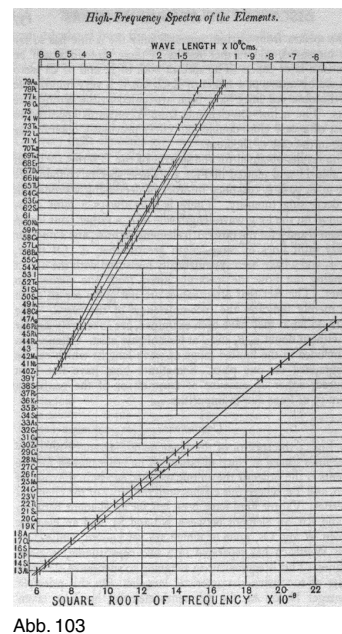
Abb. 103: Moseley-Gesetz.
Originalgrafik von 1914

Abb. 103

Direkt nachdem man über die Bragg'sche Gleichung eine Methode zur Verfügung hatte, die Wellenlängen von Röntgenstrahlen zu messen, fand *Henry Gwyn Moseley* (1887–1915) heraus, dass diese eng mit der Kernladungszahl Z der Atome des Anodenmaterials zusammenhing. Er stellte fest, dass die Wurzel aus der Strahlungsfrequenz direkt proportional zu $(Z-1)$ bei den K_α -Linien bzw. zu $(Z-7,4)$ bei den L_α -Linien war (Abb. 103).

Gesetz von Moseley

Ein Atom der Kernladungszahl Z besitzt ein charakteristisches Röntgenspektrum, dessen Spektrallinien daraus resultieren, dass ein Hüll-elektron von einem Zustand mit der Hauptquantenzahl m in einen Zustand mit der Hauptquantenzahl n übergeht. Speziell gilt für den Übergang

- von $m=2$ nach $n=1$ (K_α -Linie): $\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) \cdot R \cdot (Z-1)^2$
- von $m=3$ nach $n=2$ (L_α -Linie): $\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) \cdot R \cdot (Z-7,4)^2$

$R = 1,0973732 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ ist die Rydberg-Konstante.

Die Formeln für die K_α - und L_α -Linien zeigen eine gewisse Ähnlichkeit mit der Formel für die Linien des Wasserstoffspektrums. Eine anschauliche Interpretation dafür ist die folgende:

- Bei der K_{α} -Linie „spürt“ das Hüllelektron, das aus dem Zustand $m=2$ (L-Schale) in den Zustand $n=1$ (K-Schale) übergeht, die Kernladung durch das zweite Elektron abgeschirmt, das sich auf dieser Schale befindet (\rightarrow effektive Kernladungszahl $Z-1$).
- Analog „spürt“ bei der L_{α} -Linie das Hüllelektron, das aus dem Zustand $m=3$ (M-Schale) in den Zustand $n=2$ (L-Schale) übergeht, die Kernladung durch diejenigen Elektronen abgeschirmt, die sich auf den inneren Schalen befinden (7 auf der L-Schale, 2 auf der K-Schale \rightarrow effektive Kernladungszahl $Z-7,4$).

8.4 Computertomografie

Für die medizinische Diagnostik waren Röntgenstrahlen ein riesiger Fortschritt. Erstmals war es möglich, in das Innere des menschlichen Körpers zu blicken, ohne ihn öffnen zu müssen. Auch in der Technik finden Röntgengeräte vielfältige Anwendungsbereiche: Schweißnähte werden auf Haarrisse kontrolliert, am Flughafen werden Taschenkontrollen durchgeführt, Flaschen können auf Füllstand und Materialfehler überprüft werden. Die konventionelle Röntgenaufnahme ist dabei vergleichbar mit einem Schattenwurf, eine undurchsichtige Schicht verdeckt alles davor- und dahinterliegende.

Mit der **Computertomografie** (griech. tome: Schnitt) wurde eine Aufnahmetechnik entwickelt, die diesen Nachteil nicht hat. Allerdings ist die Strahlenbelastung bei tomografischen Aufnahmen deutlich höher als bei konventionellen Röntgenbildern. Die Tomografie funktioniert nach folgendem Prinzip: Man legt in Gedanken Querschnitte durch den Körper. In jeder Schnittebene wird der Körper aus allen Richtungen

Abb. 104: Computertomografie (CT)

a: CT-Bild eines Fußes

b: Prinzipaufbau

c: Teilansicht eines modernen CT



Abb. 104 a

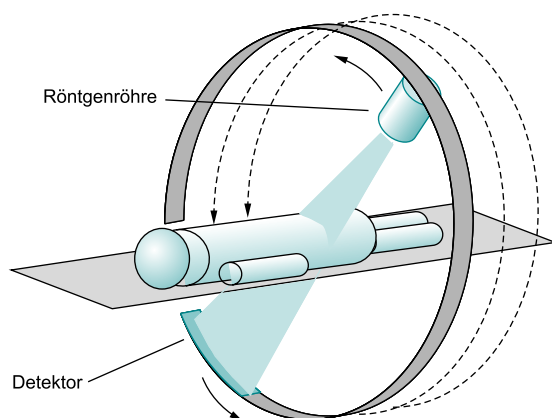


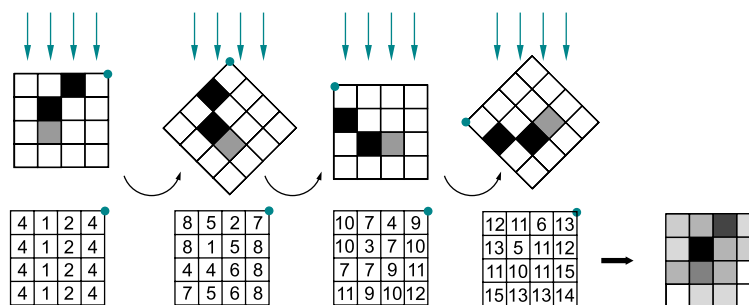
Abb. 104 b



Abb. 104 c

durchstrahlt und auf der jeweils gegenüberliegenden Seite die Intensität der durchgelassenen Röntgenstrahlen registriert (Abb. 104b). Ein angeschlossener Computer errechnet aus den Messdaten das Bild, wie es in Abb. 105 schematisch dargestellt ist.

Abb. 105: Rechenprinzip beim Computertomografen in schematischer Darstellung. Das Quadrat wird gegen den Uhrzeigersinn in 45°-Schritten gedreht. Der Punkt in der Quadratecke gibt die momentane Orientierung des Quadrats an.



In einem Quadrat mit 16 Zellen sind drei absorbierende Objekte verteilt, schwarze Objekte verringern die Intensität um zwei Einheiten, graue Objekte um eine Einheit. Der Detektor registriert die Intensität in einzelnen Segmenten. Im linken Quadrat entspricht eine Spalte einem Detektorsegment; in jede Zelle dieser Spalte wird nach der Messung der erhaltene Intensitätswert (hier maximal 4) eingetragen. Anschließend rotiert die Anordnung weiter (hier um 45°) und das Verfahren wird analog wiederholt. Die neuen Messwerte werden zu den schon vorhandenen addiert. Am Schluss werden die Zahlenwerte in Graustufen übersetzt – je geringer der Zahlenwert, umso dunkler wird die Zelle eingefärbt. Man erkennt leicht, dass das Bild umso genauer wird, je mehr Durchstrahlungsrichtungen zum Tragen kommen.

8.5 Exkurs: Synchrotronstrahlung

Beschleunigte Ladungen strahlen quer zur Beschleunigungsrichtung elektromagnetische Wellen ab. Diesen Effekt, den 1947 der Techniker *Floyd Haber* bei Justierarbeiten an einem Synchrotron beobachtete, macht man sich u. a. am **Deutschen Elektronensynchrotron DESY** in Hamburg zunutze. Dort werden Elektronen zunächst auf Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und mithilfe von **Wiggeln** und **Undulatoren** dazu gebracht, eine intensive, stark gebündelte Strahlung im Röntgenbereich auszusenden (Abb. 106). Das Grundprinzip ist bei beiden gleich: Ein Elektronenpaket wird durch eine Abfolge von Magneten gezwungen, sich in Schlangenlinien zu bewegen (engl. *to wiggle*: wackeln, *to undulate*: sich schlängeln). An jeder Kurve sendet das Paket tangential Strahlung aus (Abb. 107).

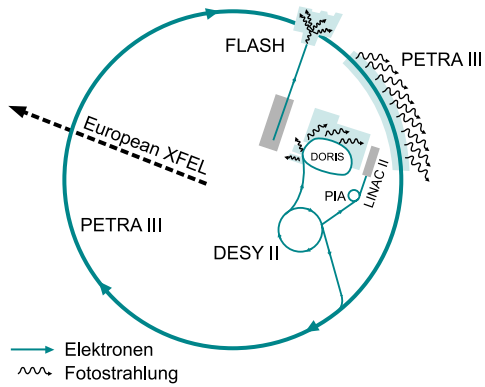


Abb. 106 a

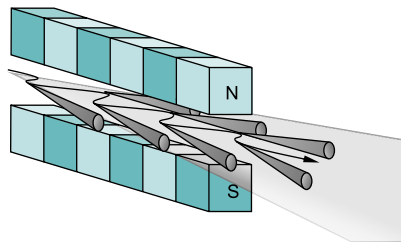


Abb. 108 a

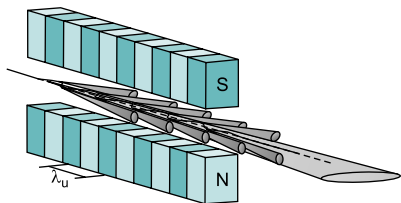


Abb. 108 b

Bei Wiggler werden stärkere und längere Magnete verwendet als bei Undulatoren. Das führt dazu, dass die Ablenkung der Elektronen größer ist und man eine Strahlung erhält, die einen breiten Frequenzbereich abdeckt. Undulatoren arbeiten mit schwächeren und kürzeren Magnetfeldern. Die resultierende Strahlung enthält nur wenige Frequenzen (die sogenannten Harmonischen einer bestimmten Grundfrequenz, Abb. 108). Eine weitere Verbesserung dieses Prinzips stellt der **Freie-Elektronen-Laser** (FEL) dar, dessen weltweit erstes Exemplar am Hamburger DESY unter dem Namen FLASH seit 2005 den Forschern zur Verfügung steht. Hier werden die Elektronen – ähnlich wie

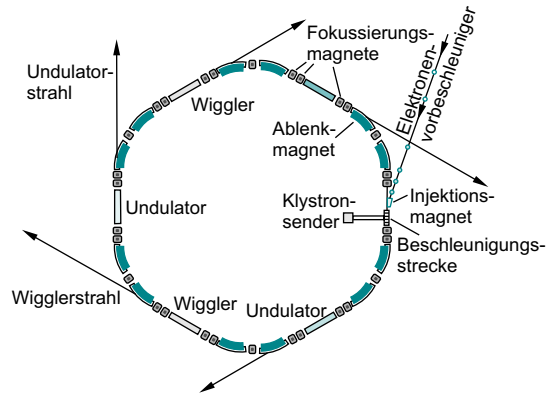


Abb. 106 b

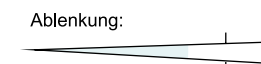
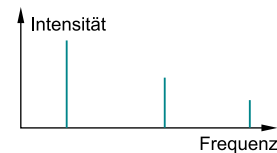
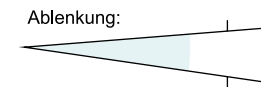
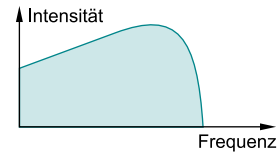


Abb. 106: DESY

a: Die **Gesamtanlage** besteht aus einem System von Vorbeschleunigern, Speicherringen und Strahlungsplätzen. Der European XFEL ist ein Röntgenlicht-Freie-Elektronen-Laser, der voraussichtlich ab 2015 für die internationale Forschung verfügbar ist.

b: Im **Doppel-Ring-Speicher DORIS III** sind mehrere Wiggler und Undulatoren eingebaut.

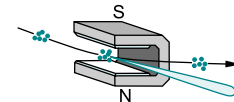


Abb. 107: Synchrotronstrahlung wird bei Ablenkung durch einen Magneten tangential ausgesendet.

Abb. 108: Wiggler und Undulatoren

a: Wiggler erzeugen Strahlung mit einem breiten Frequenzspektrum.

b: Undulatoren bewirken eine Strahlung, die nur wenige Frequenzen enthält.

in einem „normalen“ Laser – durch das elektromagnetische Feld von Licht dazu gebracht, ihre Strahlung bevorzugt in eine Richtung abzugeben. Im optischen und infraroten Bereich verwendet man dazu Spiegel. Im Röntgenbereich nutzt man aus, dass die Elektronen eines Pulks mit Licht, das andere Elektronen des Pulks aussenden, wechselwirken. Dadurch bilden sich in dem Pulk in regelmäßigen Abständen Mini-gruppen von Elektronen (Microbunching), deren Abstrahlung noch intensiver und stärker gebündelt ist.

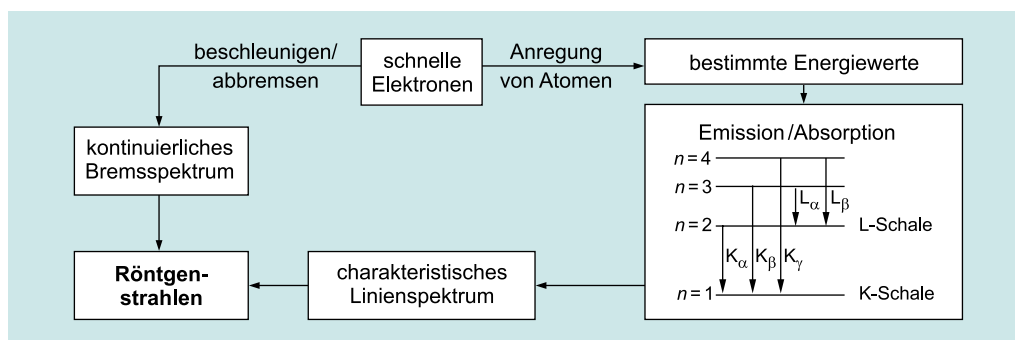
Die geringste damit erzeugte Wellenlänge wurde im Juni 2010 mit 4,45 nm erzielt, die Elektronenenergie betrug dabei 1,2 GeV. Der an das DESY-Gelände angeschlossene European XFEL wird ab 2015 noch höhere Elektronenenergien mit bis zu 20 GeV hervorbringen; die damit verbundenen Wellenlängen der Röntgenblitze liegen im Bereich von Zehntel Nanometern, sodass atomare Strukturen aufgelöst werden können.

Fakten und Formeln: Röntgenstrahlen

- Es gibt zwei **Prozesse**, bei denen Röntgenstrahlung entsteht:
 - Schnelle Elektronen ($E_{\text{kin}} = e \cdot U$) werden abgebremst. Es entsteht das **Bremsspektrum** mit einer kontinuierlichen Wellenlängen- bzw. Energieverteilung. Dabei gibt es eine kleinste Wellenlänge λ_{min} , die durch die maximale Elektronenenergie bestimmt ist.
$$\lambda_{\text{min}} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}$$
 - Elektronen werden aus einem unteren Energieniveau eines Atoms entfernt. Der freie Platz wird von einem Elektron aus einer höheren Energiestufe besetzt, wobei ein Photon abgestrahlt wird. Dies führt zu einem für das betreffende Element **charakteristischen Linienspektrum**.
- Das **Spektrum einer Röntgenröhre** setzt sich aus Anteilen von beiden Prozessen zusammen.
- An Kristallgittern tritt Röntgenstrahlinterferenz auf, die sich mithilfe der **Bragg-Gleichung** beschreiben lässt (d : Abstand der Kristallebenen; ϑ : Glanzwinkel; λ : Wellenlänge der Röntgenstrahlung).
$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \vartheta$$

 $n = 1, 2, 3, \dots$
- Der Übergang eines höher gelegenen Elektrons auf das Energieniveau mit Hauptquantenzahl $n = 1$ (K-Schale) führt zu den K-Linien, der Übergang zu $n = 2$ (L-Schale) zu den L-Linien. Es gilt dabei das **Gesetz von Moseley**, das die Wellenlänge λ eines Röntgenphotons mit der Kernladungszahl Z des Atoms verknüpft. Speziell erhält man
 - für die K_{α} -Linie des Röntgenspektrums (Übergang $m = 2 \rightarrow n = 1$):
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{3}{4} R \cdot (Z - 1)^2$$
 - für die L_{α} -Linie des Röntgenspektrums (Übergang $m = 3 \rightarrow n = 2$):
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{5}{36} R \cdot (Z - 7,4)^2$$ $R = 1,0973732 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ ist die Rydberg-Konstante.

Concept Map: Röntgenstrahlen



GYMNASIUM

ABITUR-WISSEN

PHYSIK

**MEHR
ERFAHREN**

Christian Gleixner

Elektrodynamik

STARK

Inhalt

Vorwort

Felder	1
1 Der Begriff „Feld“	2
1.1 Historisches	2
1.2 Grundlagen	2
2 Gravitationsfelder	4
2.1 Von Kepler über Newton zum Gravitationsfeld	4
2.2 Naturphänomen: Ebbe und Flut	7
2.3 Energie, Potenzial und Arbeit im Gravitationsfeld	8
2.4 Exkurs: Das Potsdamer Geoid	13
2.5 Exkurs: Fly-by-Manöver in der Raumfahrt	14
2.6 Exkurs: Gravity Probe B	15
Fakten und Formeln	16
Concept Map	16
3 Elektrisches Feld und Spezielle Relativitätstheorie	18
3.1 Ladungen, Kräfte, Felder	18
3.2 Energie, Arbeit, Potenzial	21
3.3 Elektronenkanonen und Einsteins Spezielle Relativitätstheorie	22
3.4 Millikan und die Entdeckung der Elementarladung	27
3.5 Umweltschutz mit elektrischen Feldern	28
3.6 Naturphänomen: Gewitter	29
3.7 Kopieren mit elektrischen Feldern	30
3.8 Bildschirmtechnik und Sensoren	31
3.9 Kondensatoren als Ladungs- und Energiespeicher	33
3.10 Elektrik im Körper – Ruhe- und Aktionspotenziale	35
3.11 Rasterkraftmikroskop	37
3.12 Exkurs: Das Experiment von Kaufmann und Bucherer	38
3.13 Exkurs: Michael Faraday (1791–1867)	39
Fakten und Formeln	40
Concept Map	42

Fortsetzung siehe nächste Seite

4	Magnetfelder	43
4.1	Historisches	43
4.2	Magnetfelder beschreiben	43
4.3	Naturphänomene: Van-Allen-Gürtel und Polarlichter	45
4.4	Teilchenkarusselle: Zyklotron und Massenspektrometer	46
4.5	Magnetfeldmessungen mit dem Hall-Effekt	50
4.6	Dem Magnetismus auf der Spur	51
4.7	Exkurs: Magnetfeld der Erde	54
4.8	Exkurs: Hermann von Helmholtz (1821–1894)	56
	Fakten und Formeln	57
	Concept Map	57
5	Elektromagnetische Induktion	59
5.1	Faradays Entdeckung	59
5.2	Generatoren und Transformatoren	60
5.3	Wirbelströme und die Regel von Lenz	64
5.4	Mathematische Beschreibung der Induktion	65
5.5	Selbstinduktion und Induktivität	67
5.6	Exkurs: Die Maxwell'schen Gleichungen	69
	Fakten und Formeln	71
	Concept Map	71
	Schwingungen	73
6	Der Begriff „Schwingung“	74
6.1	Historisches	74
6.2	Grundbegriffe	74
6.3	Exkurs: Heinrich Hertz (1857–1894)	77
6.4	Exkurs: Fouriersynthese und Fourieranalyse	79
7	Mechanische Schwingungen	82
7.1	Federpendel – Kraftgesetz und Resonanz	82
7.2	Harmonische Schwingung und Kreisbewegung	86
7.3	Schwingungen und Energie	88
7.4	Fadenpendel – Schwingungen und Kraftgesetz	88
7.5	Exkurs: Das physikalische Pendel	90
7.6	Exkurs: Lissajous-Figuren	92
	Fakten und Formeln	94
	Concept Map	95

8	Spule und Kondensator im Wechselstromkreis	96
8.1	Effektivwerte	96
8.2	Wechselspannung an der Spule	97
8.3	Wechselspannung am Kondensator	99
8.4	Exkurs: Hoch- und Tiefpass	100
	Fakten und Formeln	102
	Concept Map	103
9	Elektromagnetische Schwingkreise	104
9.1	Spule und Kondensator – zwei Gegenspieler im Verein	104
9.2	Erzwungene Schwingungen und Resonanz	106
9.3	Ungedämpfte Schwingungen durch Rückkopplung	109
9.4	Exkurs: Komplexe Zahlen	110
9.5	Exkurs: Alexander Graham Bell und das Telefon	111
	Fakten und Formeln	112
	Concept Map	113
	Wellen	115
10	Grundlagen der Wellenlehre	116
10.1	Grundbegriffe	116
10.2	Grundphänomene	118
10.3	Exkurs: Christiaan Huygens (1629–1695)	121
	Fakten und Formeln	123
	Concept Map	124
11	Mechanische Wellen	125
11.1	Schallwellen	125
11.2	Musik mit stehenden Wellen	128
11.3	Der Doppler-Effekt	129
11.4	Exkurs: Ernst Mach (1838–1916) und der Überschall	133
11.5	Exkurs: Kaventsmann und Tsunami	134
	Fakten und Formeln	136
	Concept Map	137
12	Elektromagnetische Wellen	138
12.1	Dipolschwingungen machen Wellen	138
12.2	Polarisation und Satellitenfernsehen	140
12.3	Stehende Wellen im Mikrowellenherd	141

Fortsetzung siehe nächste Seite

12.4	Doppler-Effekt und Interferenz beim Radar	142
12.5	Informationsübertragung – analog und digital	143
12.6	Exkurs: Pioniere der Funktechnik	146
	Fakten und Formeln	147
	Concept Map	147
13	Welleneigenschaften des Lichts	148
13.1	Historisches	148
13.2	Farbe durch Beugung und Interferenz	150
13.3	Interferometrie, Holografie und Spektroskopie	154
13.4	Exkurs: Joseph von Fraunhofer (1787–1826)	160
13.5	Exkurs: Fresnels Erfindungen.....	163
13.6	Exkurs: CD, DVD und Blue-ray.....	164
	Fakten und Formeln	165
	Concept Map	166
	Stichwortverzeichnis	167
	Abbildungsnachweis	171

Autor: Dr. Christian Gleixner

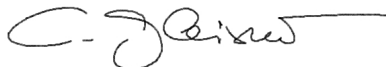
Vorwort

Liebe Schülerin, lieber Schüler,

die **Elektrodynamik** bildet einen inhaltlichen Schwerpunkt im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe. Der vorliegende Band aus der Reihe „Abitur-Wissen Physik“ gibt Ihnen einen umfassenden Einblick in den prüfungsrelevanten Stoff aus diesem Themengebiet. Das Buch ist als **Ergänzung** und **Vertiefung** zu Ihren Lehrbüchern in der Schule gedacht; auch können Sie daran Ihr schon erworbenes Wissen erproben.

In den drei Hauptkapiteln des Buches werden die großen Themenbereiche **Felder, Schwingungen** und **Wellen** behandelt. In jedem Gebiet finden Sie zunächst die Anwendungen und Beispiele aus dem Bereich der **Mechanik**; auf diese folgen – häufig mit Hinweis auf die mechanische Variante – die Entsprechungen im Bereich der **elektromagnetischen Wechselwirkungen**. Jedes Mal werden die **Grundbegriffe** kurz und knapp erläutert und mit zahlreichen Beispielen aus Alltag, Natur, Forschung und Technik illustriert. In den sich anschließenden **Exkursen** werden historische Zusammenhänge, technische Anwendungen, Naturphänomene usw. im Überblick dargestellt. Sie dienen v. a. der Vertiefung, sollen aber auch Ihre Neugier wecken. Damit Sie über all das den Überblick nicht verlieren, sind jeweils am Ende der Teilkapitel unter dem Titel „**Fakten und Formeln**“ die wichtigsten Inhalte zusammengefasst. Um Ihnen außerdem die Orientierung zu erleichtern, finden Sie dort auch sogenannte „**Concept maps**“, in denen die Zusammenhänge zwischen den einzelnen physikalischen Begriffen veranschaulicht werden. Sie geben Ihnen einen Anhaltspunkt, wie Sie Ihr Wissen strukturieren und vernetzen können.

Ich wünsche Ihnen viel Freude bei der Lektüre des Buches und viel Erfolg bei Ihren Prüfungen.



Dr. Christian Gleixner

12 Elektromagnetische Wellen

12.1 Dipolschwingungen machen Wellen

Elektromagnetische Wellen bilden die Grundlage der **modernen Kommunikationstechnik** – ob Radio, Fernsehen, Mobilfunk (Handy) oder Satelliten. Stets sind elektromagnetische Wellen das Transportmittel für **Informationen**. Im Gegensatz zu Schallwellen, die sich nur in einem körperlichen Medium ausbreiten können, benötigen elektromagnetische Wellen keine Trägermaterie – sie breiten sich im elektromagnetischen Feld mit **Lichtgeschwindigkeit** aus. Die einfachste Methode, sie zu erzeugen, besteht darin, einen Metallstab (**Hertz'scher Dipol, Dipolantenne**) zu elektromagnetischen Schwingungen anzuregen (Abb. 175).

Die einzelnen Phasen der Schwingung kann man in analoger Weise wie beim herkömmlichen Schwingkreis darstellen (Abb. 177, vgl. Abschnitt 9.1, S. 105). Dabei stellt man fest, dass Ladungs- und Stromstärkeverteilung längs des Dipols **stehende Wellen** bilden. Stabantennen müssen daher eine Länge besitzen, die an die jeweilige Wellenlänge bzw. Frequenz angepasst ist. Man würde also zum idealen Senden bzw. Empfangen einen Stab mit der Länge $\frac{\lambda}{2}$ benötigen. Stellt man den Stab jedoch auf eine ideal leitende Fläche, so benötigt man nur noch die halbe Länge, also $\frac{\lambda}{4}$, da diese Fläche für elektromagnetische Wellen wie ein Spiegel wirkt. In guter Näherung erfüllen die Erdoberfläche bzw. geerdete Metallflächen diese Bedingung, sodass sehr häufig $\frac{\lambda}{4}$ -**Antennen** benutzt werden. So funken beispielsweise die Handfunkgeräte von Polizei und Feuerwehr in Deutschland im 2-m-Band, d. h., die Wellenlänge beträgt hier zwei Meter; die Stabantenne eines Handfunkgeräts müsste also etwa einen halben Meter lang sein (Abb. 176).

Abb. 175: Man kann bei einem **Schwingkreis** (①) die Anzahl der Spulenwindungen immer weiter verringern, bis die „Spule“ nur noch aus der Verbindungsleitung zwischen den Kondensatorplatten besteht (②). Dann verkleinert man die Kondensatorplatten, bis sie nur noch so groß sind wie die Drahtenden (③). Schließlich biegt man die übrig bleibende Drahtschleife auf (④) – man erhält ein gerades Stück Draht. Es stellt, wie z. B. die **Antenne** des im Bild gezeigten Radios, nach wie vor einen Schwingkreis dar.

Abb. 176: Die Länge der Antenne dieses Handfunkgeräts beträgt gut 40 cm. Es handelt sich damit um eine $\frac{\lambda}{4}$ -**Stabantenne** für das von der Feuerwehr verwendete 2-m-Band.

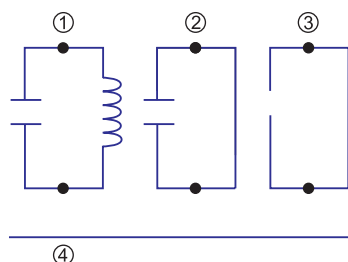


Abb. 175



Abb. 176

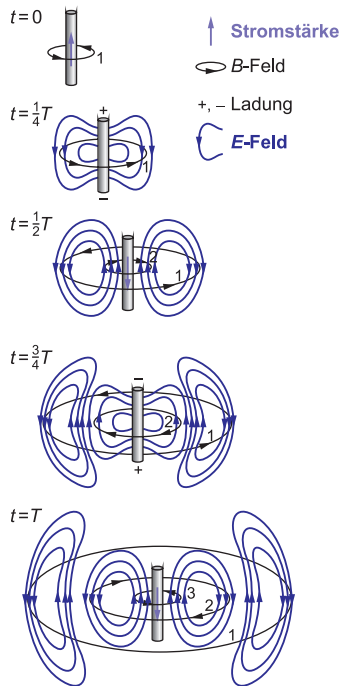


Abb. 177 a

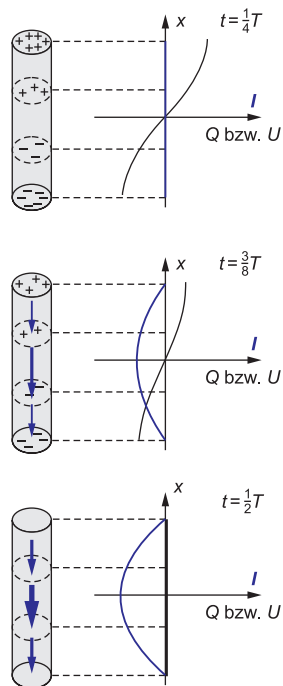


Abb. 177 b

Abb. 177: Dipolfeld

a: Bei einer Stabantenne, die zu elektromagnetischen Schwingungen angeregt wird, entstehen elektrische Felder mit geschlossenen Feldlinien – man nennt sie **Wirbelfelder**. Die einzelnen Momentaufnahmen zeigen die Situation jeweils nach einer viertel Periodendauer, wenn die Stromstärken oder die Ladungen an allen Stellen des Dipols jeweils ihre Maximalwerte erreicht haben. Zwischen E-Feld und B-Feld besteht eine Phasenverschiebung von $\frac{\pi}{2}$.

b: Die **Ladungsverteilung** entlang des Dipols entspricht der Spannung gegenüber der Erde und bildet eine stehende Welle mit **Bäuchen** an den Dipolenden. Die örtliche **Stromstärkeverteilung** bildet ebenfalls eine stehende Welle mit **Knoten** an den Dipolenden.

Frequenz	3 →	30 →	300 →	3 →	30 →	300 →	3 →	30 →	300 →	3 →	30 →	300 → 3 000
	Hz			kHz			MHz			GHz		
ITU ¹	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
engl. Abk. ²	ELF	SLF	ULF	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF	THF
deut. Abk. ³		NF		SLW	LW	MW	KW	UKW	M i	k r o w e l l e n		
Wellenlänge	100	10	1	100	10	1	100	10	1	100	10	1
	· 1 000 km			km			m			mm		

¹: ITU: International Telecommunication Union
²: T: Tremendous; E: Extreme; S: Super; V: Very; H: High; M: Medium; L: Low; F: Frequency; z. B. LF – Low Frequency
³: NF: Niederfrequenz; S: Sehr; U: Ultra; L: Lang; M: Mittel; K: Kurz; W: Welle; z. B. KW – Kurzwelle

Abb. 178

Die Wellenlängen bzw. Frequenzen des elektromagnetischen Spektrums decken mit über 25 Zehnerpotenzen einen riesigen Größenbereich ab. Das für die Kommunikationstechnik wichtige Teilspektrum ist in Abb. 178 in feineren Unterteilungen dargestellt, die über internationale Vereinbarungen sowie nationale Gesetze und Verordnungen bestimmten Nutzerkreisen zugeordnet sind.

Abb. 178: Einteilung und Bezeichnungen der **Funkfrequenzbereiche**. Rundfunksender arbeiten im Bereich LW bis UKW, terrestrische Fernsehsender im Bereich VHF und UHF, Satellitenfernsehen im Bereich von Band 10. Mobiltelefonie findet im oberen UHF-Bereich statt.

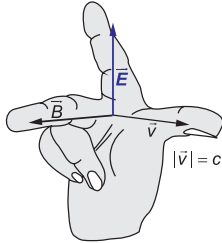


Abb. 179: Elektromagnetische Wellen sind **Transversalwellen**. Dabei stehen Ausbreitungsrichtung, elektrischer Feldvektor \vec{E} und magnetischer Feldvektor \vec{B} paarweise aufeinander senkrecht und bilden (in dieser Reihenfolge) ein Rechtssystem.

Abb. 180: Treffen elektromagnetische Wellen auf ein Gitter aus Metallstäben, deren Abstand kleiner ist als die Wellenlänge, so bleiben nur Wellen übrig, deren elektrischer Feldvektor senkrecht (\vec{E}_\perp) zu den Stäben steht. Die elektrische Feldkomponente parallel zu den Gitterstäben (\vec{E}_\parallel) regt die Elektronen in den Gitterstäben zum Schwingen an. Daher wird diese Komponente stark geschwächt. Die durchgelassene Komponente besitzt den Betrag $E_\perp = E_{\text{ges}} \cdot \sin \varphi$ (φ : Winkel zwischen \vec{E}_{ges} und den Gitterstäben)

12.2 Polarisation und Satellitenfernsehen

Bei den elektromagnetischen Wellen handelt es sich um **Transversalwellen**, da sie sich polarisieren lassen. Dabei stehen die Richtungen des elektrischen und des magnetischen Feldes an jeder Stelle aufeinander senkrecht (Abb. 179). Durch ein Gitter aus Metallstäben gelangen nur diejenigen Wellen vollständig hindurch, deren elektrischer Feldvektor senkrecht zu den Gitterstäben verläuft. Die Gitterstäbe sind somit parallel zum zugehörigen B-Feld-Vektor orientiert (Abb. 180).

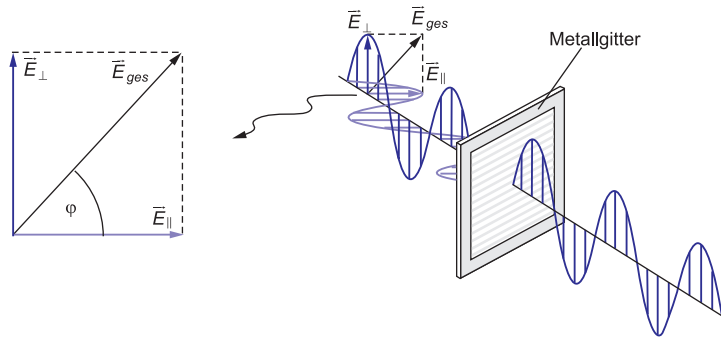


Abb. 180

Beim **Satellitenfunk** nutzt man die Polarisation aus, um im gleichen Frequenzbereich mehr Übertragungskanäle unterzubringen. Verwendet man bei nahe beieinanderliegenden Frequenzen abwechselnd vertikale und horizontale Polarisation, so kann der Frequenzabstand zwischen zwei Kanälen geringer gewählt werden als bei gleicher Polarisation. Anstelle von linearer Polarisation werden auch zirkulare Polarisationen verwendet (siehe Abschnitt 10.1, S. 117). Fernsehsatelliten sind **geostationär** im Weltraum positioniert, d.h., die Verbindungslinie zwischen Erdmittelpunkt und Satellit durchstößt die Erdoberfläche immer an der gleichen Stelle des Äquators (Abb. 181). Dies ist dann gewährleistet, wenn die Umlaufdauer des Satelliten gleich der Periodendauer der Erdrotation, also ein Tag, ist, wodurch gemäß dem Gravitationsgesetz auch sein Bahnradius festgelegt ist:

$$\left. \begin{aligned} F_{\text{Grav}} &= G \cdot \frac{m_E \cdot m_{\text{Sat}}}{r_{\text{Sat}}^2} \\ F_{\text{Grav}} &= F_Z \\ F_Z &= m_{\text{Sat}} \cdot \omega^2 \cdot r_S \\ \omega &= \frac{2\pi}{T} \end{aligned} \right\} \Rightarrow r_{\text{Sat}}^3 = \frac{G \cdot m_E}{\omega^2} = \frac{G \cdot m_E \cdot T^2}{4\pi^2}$$

$$r_{\text{Sat}} = \sqrt[3]{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5,98 \cdot 10^{24} \cdot 86\,400^2}{4\pi^2}} \frac{\text{m}^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^2}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$

$$\approx 42,3 \cdot 10^3 \text{ km}$$

Ein geostationärer Satellit kreist also knapp 36 000 km hoch über der Erdoberfläche. Zur Angabe seiner Position reicht der Längengrad, über dem sich der Satellit befindet (vgl. Abb. 182).

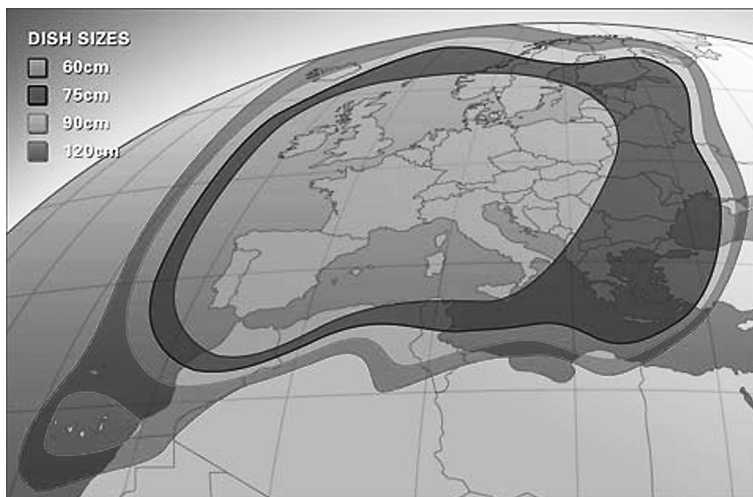


Abb. 182

12.3 Stehende Wellen im Mikrowellenherd

Die Technik für Mikrowellenherde stammt – man möchte fast sagen, wieder einmal – aus dem militärischen Bereich. Bei der Entwicklung von kurzwelligen **Radargeräten** im Jahr 1945 entdeckte *Percy Spencer* (1894–1970, Abb. 183) durch Zufall, dass diese elektromagnetischen Wellen Lebensmittel erhitzen. Vom ersten kommerziellen Gerät bis zum alltäglichen Einsatz in den Haushalten einer Durchschnittsfamilie dauerte es etwa 30 Jahre – 1975 wurden in den USA erstmals eine Million Mikrowellenherde verkauft.

Ihre Funktion beruht darauf, dass die elektrische Ladung in Wassermolekülen ungleich verteilt ist: Im Bereich des Sauerstoffatoms befindet sich mehr negative Ladung, im Bereich der Wasserstoffatome mehr positive Ladung (Abb. 184). Wassermoleküle bilden daher elektrische Dipole, die elektrischen Kräfte zwischen ihnen heißen **van-der-Waals-Kräfte** – nach *Johannes Diderik van der Waals* (1837–1923, Physiknobelpreis 1910). Die van-der-Waals-Kräfte sind z. B. dafür verantwortlich, dass Wasser bei Zimmertemperatur flüssig ist und bei 4 °C seine größte Dichte besitzt. In elektromagnetischen Wechselfeldern werden die Wassermoleküle zu **Rotationen** angeregt und bewirken somit eine Erwärmung.

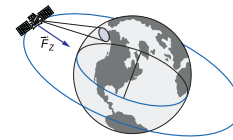


Abb. 181: Die Ebene der Umlaufbahn von **geostationären Satelliten** fällt mit der **Äquatorebene** der Erde zusammen. Ihre Umlaufdauer beträgt knapp 24 Stunden, sodass sie immer über dem gleichen Punkt der Erdoberfläche stehen.

Abb. 182: Sendebereich des Satelliten Astra 1L. Deutschland liegt zwischen den Graden 6° und 15° östlicher Länge. Neben dem Satelliten Astra 1L (19,2° Ost) finden sich in diesem Bereich z. B. die Satelliten Eutelsat W3A (7° Ost) und Meteosat 8 (9,5° Ost). Die Zahlenwerte geben an, welche Größe der Satellitenschüssel notwendig ist, um einen guten Empfang zu haben. In größerer Entfernung vom Zentralbereich ist die Intensität des Signals geringer, dies gleicht man durch eine größere Fläche der Satellitenschüssel aus. Der Frequenzbereich dieses Satelliten ist 10,95–18,80 GHz.



Abb. 183: Der Amerikaner Percy LeBaron **Spencer** entdeckte zufällig bei Experimenten mit einem Magnetron, mit dem er Radarstrahlung erzeugte, dass ein Schokoriegel in seiner Manteltasche schmolz. Zwei Jahre später hatte er den ersten kommerziellen Mikrowellenofen konstruiert.

Abb. 184: Wassermoleküle sind **polar**, die elektrische Ladung ist in ihnen nicht gleichmäßig verteilt. Daher werden sie in elektromagnetischen Wechselfeldern zum Rotieren angeregt. Durch Stöße untereinander wird die Rotationsenergie in thermische Energie umgewandelt.

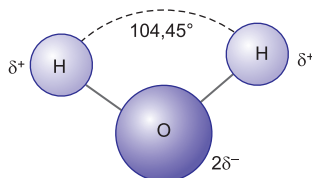


Abb. 184



Abb. 185

Abb. 185: Die stehenden Wellen, die sich im Garraum eines Mikrowellenherdes ausbilden, führen zu einer ungleichmäßigen räumlichen Verteilung der Strahlungsintensität, es entstehen sogenannte **Hotspots**. Sie lassen sich mithilfe einer Wärmebildkamera sichtbar machen: Das Foto zeigt das Wärmebild einer Glasplatte, die mit einem Wasserfilm versehen und dann im Garraum einige Zeit geheizt worden war. Die heißeren Bereiche sind heller abgebildet als die kühleren. Um trotz der Hotspots eine möglichst gleichmäßige Erwärmung der Speisen zu gewährleisten, befindet sich im Garraum eines Mikrowellenherdes ein Drehteller.

Im Mikrowellenofen bleiben Gefäße aus Porzellan zunächst kühl, bis sie sich durch Wärmeleitung nach und nach ebenfalls erwärmen. Zum Schmelzen von Eis muss man zunächst etwas Wasser hinzufügen. Im Auftaumodus arbeitet ein Mikrowellenofen intervallweise: Zunächst wird das flüssige Wasser durch die Mikrowellenstrahlung erhitzt. Anschließend wird die Strahlung abgeschaltet, damit sich die thermische Energie durch Wärmeleitung auf das feste Eis übertragen und es zum Schmelzen bringen kann. Mikrowellenherde arbeiten typischerweise mit einer Frequenz von 2,45 GHz, die Wellenlänge ist also 12,2 cm. Dies liegt in der Größenordnung der Dimensionen des Garraumes. Daher bilden sich dort **stehende Wellen** (Abb. 185).

Mobiltelefone arbeiten mit Frequenzen von 900 MHz und 1800 MHz (Europa) bzw. 850 MHz und 1900 MHz (USA). Die Wellenlängen betragen hier 16,6 bzw. 33,3 cm. Auch diese Wellen erwärmen wasserhaltige Materialien, also auch menschliches Gewebe. Daher hat man Grenzwerte für die Strahlungsleistung von Handys festgelegt, um vor Schädigungen durch Überhitzung zu schützen. Der **SAR-Wert** (spezifische **Absorptionsrate**) gibt dabei die absorbierte Leistung je Gewebemasse an, wobei über jeweils 10 Gramm Gewebe gemittelt wird. Die Messung erfolgt an einem Phantomkopf, der mit einer speziellen Flüssigkeit gefüllt ist. Diese ist in ihren physikalischen Eigenschaften denen von menschlichem Gewebe sehr ähnlich. Nach dem momentanen Stand der Diskussion hat man sich in Europa auf die Obergrenze von 2 W/kg für den SAR-Wert geeinigt. Damit ein Mobiltelefon mit dem Umweltschutzsiegel „Blauer Engel“ gekennzeichnet werden dürfte, müsste sein maximaler SAR-Wert weniger als 0,6 W/kg betragen.

12.4 Doppler-Effekt und Interferenz beim Radar

Unter Straßenverkehrsteilnehmern ist das Verfahren genauso bekannt wie bei den Piloten der Bundeswehr: **Radarmessungen** registrieren die Geschwindigkeit vorbeifahrender Autos und die Flughöhe von Düsenjets. „Radar“ ist die Abkürzung für „**R**adio **D**etection **A**nd **R**anging“; dahinter verbergen sich verschiedene Verfahren, bei denen mithilfe von Funkwellen Messungen stattfinden.

Beim **Verkehrsradar** kommt der **relativistische Doppler-Effekt** zum Tragen – aus der Frequenzverschiebung zwischen ausgesandtem und reflektiertem Signal lässt sich die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs berechnen (Abb. 186). Beim **Wetterradar** misst man u. a. die Intensität des reflektierten Signals. Je nach verwendeter Wellenlänge werden die Radarwellen stärker von Regentropfen oder von Hagelkörnern in den Wolken reflektiert. Daraus erhält man z. B. Informationen über die Intensität von Niederschlägen in einzelnen Gebieten.

Ein weiteres Einsatzgebiet von Radargeräten ist die **Flugsicherung**. Bei Phased-Array-Antennen senden mehrere Einzelantennen ein Radarsignal mit gleicher Frequenz und ansteuerbarer Phasenlage aus. Durch **Interferenz** ergeben sich bestimmte Richtungen, in denen die Intensität der Radarwelle sehr groß ist (Interferenzmaxima). In großer Entfernung von der Antenne gilt dabei: $k \cdot \lambda = d \cdot \sin \varphi$. Durch Änderung der Phasenlage zwischen den einzelnen Antennen kann man diese Richtungen ändern, ohne die Antenne mechanisch bewegen zu müssen (Abb. 187).

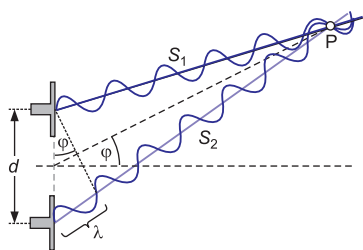


Abb. 187 a

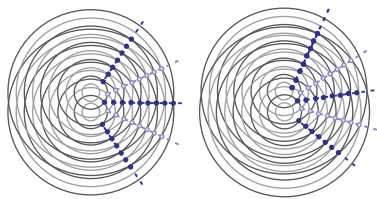


Abb. 187 b



Abb. 186: Verkehrsradar
Die Frequenz f_E , die ein mit der Geschwindigkeit v fahrendes Auto reflektiert, ergibt sich aus der Senderfrequenz f_S bei elektromagnetischen Wellen stets zu

$$f_E = f_S \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$$

(relativistischer Doppler-Effekt). Bei Tempo 108 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ ($= 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) ändert sich die Frequenz um 0,00001 %; d. h. bei einer typischen Radarfrequenz von 25 GHz ändert sich die Frequenz um 2,5 kHz.

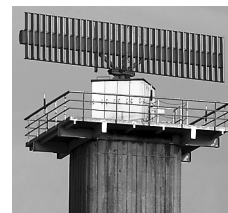


Abb. 187: Phased-Array-Antennen

a: Bei zwei gleichphasig strahlenden Antennen tritt im Punkt P ein **Interferenzmaximum** auf, wenn der Unterschied der Wege von den beiden Antennen zu P gerade eine Wellenlänge λ (oder ein Vielfaches davon) beträgt.

b: Eine **Phasenverschiebung** führt zu einer Richtungsänderung der Maximalumlinien: Links senden beide Antennen gleichphasig, rechts eilt die untere Antenne in ihrer Phase etwas voraus. Dadurch schwenken die Interferenzmaxima etwas nach oben.

12.5 Informationsübertragung – analog und digital

Um Informationen zu übertragen, verwendet man die Technik der **Modulation**. Hierbei wird bei einem Hochfrequenzsignal die Amplitude, die Frequenz oder die Phase verändert. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Information nun **analog** oder **digital** übertragen wird. Abb. 188 zeigt, wie im analogen Bereich ein sinusförmiger Ton bzw. im digitalen Bereich ein Rechtecksignal durch **Amplitudenmodulation (AM)** oder **Frequenzmodulation (FM)** der Trägerwelle übertragen wird. Die Amplitudenmodulation wird im Mittelwellenbereich verwendet, die Frequenzmodulation im UKW-Bereich. Daher werden im angelsächsischen Sprachgebrauch die entsprechenden Frequenzbereiche mit AM bzw. FM bezeichnet. Als Sendefrequenz wird die Frequenz der Trägerwelle angegeben.

Abb. 188: Bei der **Amplitudenmodulation** (Mitte) wird die Amplitude des Trägersignals entsprechend der Amplitude des Informationssignals (oben) verändert. Sie ergibt sich mathematisch, indem die Funktionen für das Träger- und das Informationssignal miteinander **multipliziert** werden. Bei der **Frequenzmodulation** (unten) wird die Frequenz des Trägersignals entsprechend angepasst. Sie wird mathematisch durch eine **Verkettung** der beiden Ausgangsfunktionen erreicht.

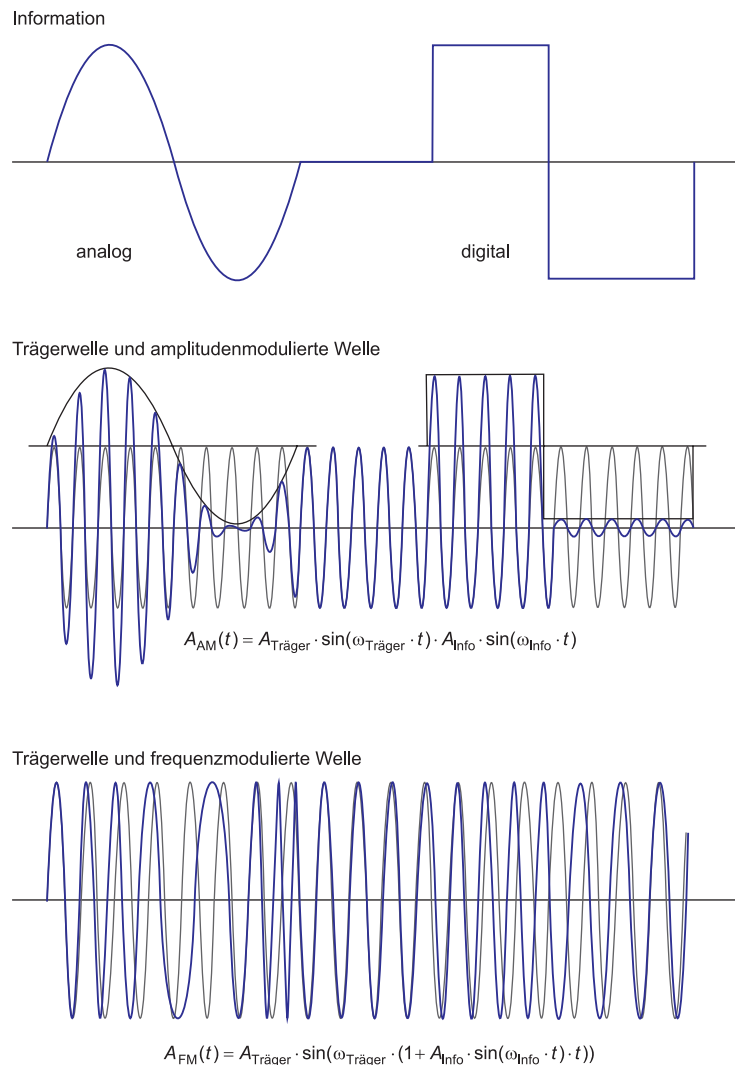


Abb. 188

Dabei muss man berücksichtigen, dass die modulierten Wellen sich aus der additiven Überlagerung von sinusförmigen Wellen ergeben. Bei der Übertragung eines Tons mit der Frequenz f_{Info} ergibt sich die modulierte Welle aus der Überlagerung zweier Wellen mit den Frequenzen $f_{Info} - f_{Träger}$ und $f_{Info} + f_{Träger}$ (Abb. 189). Daher benötigt man nicht nur eine einzelne Frequenz, sondern ein **Frequenzband**. Bei der Amplitudenmodulation muss dieses Frequenzband eine Breite von $2 \cdot f_{Info, max}$ haben. Weil das menschliche Hörvermögen einen

Bereich von 16 Hz bis 16 kHz überdeckt, benötigt man folglich eine **Bandbreite** von 32 kHz, um sie auf Mittelwelle (AM) übertragen zu können. Tatsächlich beträgt die Bandbreite bei Mittelwellenkanälen nur 9 kHz, sodass Töne bis maximal 4,5 kHz übertragen werden können. Daher hören sich Mittelwellensender stets etwas dumpf an.

Im UKW-Rundfunkbereich zwischen 87,5 MHz und 108 MHz hingegen verwendet man die Frequenzmodulation, die eine größere Bandbreite benötigt – sie beträgt für den menschlichen Hörbereich etwa 200 kHz, bei hochwertiger Stereoübertragung inklusive weiterer Datensignale sogar bis zu 400 kHz. (So können z. B. RDS-taugliche Radioempfänger, wie sie v. a. im Auto eingesetzt werden, zusätzlich übertragene Informationen des **Radio-Daten-Systems** wie Programmbezeichnung, Verkehrsfunk etc. verwerten.) Allgemein wird die Bandbreite durch die größte Frequenz, die in der Fourieranalyse des Signals (siehe Kapitel 6, S. 79) enthalten ist, bestimmt. Dadurch ergibt sich jeweils eine Einteilung der Frequenzbänder in einzelne Kanäle. Ein Sender, der z. B. im UKW-Bereich auf 95,3 MHz sendet, beansprucht für sich den Frequenzbereich von 95,1 bis 95,5 MHz.

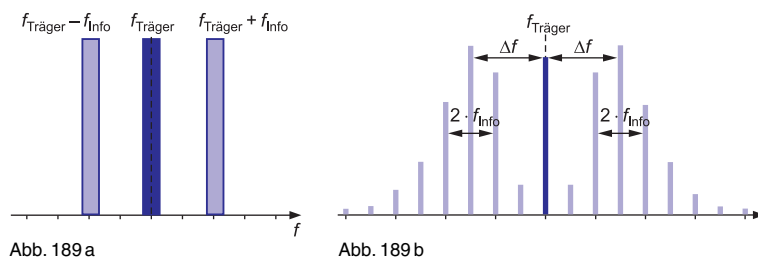


Abb. 189: Frequenzband und Bandbreite

a: Ein amplitudenmoduliertes Signal setzt sich aus zwei Signalen mit den Frequenzen $f_{\text{Träger}} - f_{\text{Info}}$ und $f_{\text{Träger}} + f_{\text{Info}}$ zusammen. Die beiden Signale heißen Seitenbänder, die Bandbreite ist daher $2 \cdot f_{\text{Info}}$.

b: Bei der Frequenzmodulation setzt sich die Bandbreite aus dem **Frequenzhub** Δf und der Frequenz f_{Info} zusammen. Δf hängt von der Amplitude des zu übertragenden Signals ab. Im UKW-Bereich beträgt Δf maximal 75 kHz.

Bei **Mobilfunknetzen** betragen die Bandbreiten im GSM-Standard 0,2 MHz, im UMTS-Standard 5 MHz. Bei GSM werden die Kanäle in acht Zeitschlitz von 4,615 ms unterteilt: Einem Teilnehmer, der mit seinem Handy telefoniert, wird ein bestimmter Zeitschlitz zugewiesen, sodass auf einem Kanal (d. h. in einem Frequenzbereich) acht Teilnehmer gleichzeitig sprechen können. Bei UMTS werden alle Daten zeitgleich übertragen. Damit man aber weiß, woher welche Daten kommen und an wen sie gelangen sollen, werden die Daten mit einer Codierung versehen. Das ist so, wie wenn in einem Raum alle gleichzeitig reden, aber immer nur jeweils zwei Personen die gleiche Sprache sprechen.

12.6 Exkurs: Pioniere der Funktechnik

Abb. 190: Wegbereiter der Funktechnik

a: Alexander Stepanowitsch **Popow** vollzog die Experimente von Heinrich Hertz nach. Er entwickelte die Apparaturen so weiter, dass er 1895 Morsesignale über einige Kilometer Entfernung drahtlos übertragen konnte.

b: Guglielmo **Marconi** griff bei seinen ersten Versuchen zur drahtlosen Übertragung von Signalen u. a. auf Arbeiten von Popow zurück und entwickelte das System für den praktischen Einsatz weiter. 1897 gründete er in Großbritannien die erste Funktelegraphengesellschaft unter dem Namen *Marconi's Wireless Telegraph Company Ltd.*

c: Karl Ferdinand **Braun** erfand die Braun'sche Röhre, die viele Jahrzehnte Hauptbestandteil von Fernsehapparaten und Oszilloskopen war. Er gehörte zu den Gründern der Gesellschaft *Telefunken* in Berlin im Jahr 1903.



Abb. 190 a

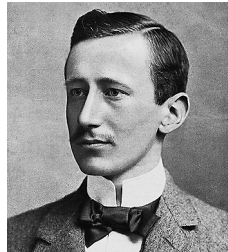


Abb. 190 b



Abb. 190 c

James Clerk Maxwell sagte die Existenz elektromagnetischer Wellen vorher, *Heinrich Hertz* konnte sie im Jahre 1886 erstmals experimentell nachweisen (vgl. Kapitel 5, S. 69, und 6, S. 77). Auf diese Experimente geht der Ausdruck „Funken“ zurück, benutzte er doch zur Erzeugung der Wellen noch eine Funkenstrecke. Zehn Jahre später gelang es dem Russen *Alexander Stepanowitsch Popow* (1859–1906) und dem Italiener *Guglielmo Marconi* (1874–1937) Apparate zu entwickeln, mit denen sie Funksignale über einige wenige Kilometer senden konnten (Abb. 190 a und b). Beide wurden für ihre Verdienste um die Funktechnik geehrt: Popow mit der **Goldmedaille des Pariser Elektrotechnischen Kongresses** im Jahre 1900, Marconi zusammen mit *Karl Ferdinand Braun* (1850–1918, Abb. 190 c; vgl. Abschnitt 3.3, S. 24) im Jahr 1909 mit dem **Nobelpreis für Physik**. Braun war seit 1895 Direktor des physikalischen Instituts der Universität Strassburg. Bei den Untersuchungen zu den physikalischen Eigenschaften der damaligen Funksysteme fand er eine entscheidende Weiterentwicklung: Er trennte Hochfrequenzerzeugung und Wellenabstrahlung voneinander und koppelte die Antenne induktiv an einen Schwingkreis.

Die nächsten Schritte auf dem Weg zur allgemeinen drahtlosen Kommunikation waren die Entwicklung von Elektronenröhren als elektrische Verstärker durch *Robert von Lieben* (1878–1913) und *Lee De Forest* (1873–1961) sowie die Erfindung der Rückkopplungsschaltung durch *Alexander Meißner* (1883–1958) im Jahr 1913. Letztere ermöglichte es endlich auf effektive Weise, ungedämpfte Schwingungen zu erzeugen. Nach dem ersten Weltkrieg begannen in Deutschland die ersten Rundfunkanstalten Unterhaltung zu senden: zunächst versuchsweise am 22. Dezember 1920 (Instrumentalkonzert), dann im regelmäßigen Rundfunkbetrieb ab 29. Oktober 1923. Die heute noch existierende **British Broadcasting Corporation (BBC)** war bereits ein Jahr zuvor am 18. Oktober 1922 gegründet worden.

Fakten und Formeln: Elektromagnetische Wellen

- Elektromagnetische Wellen sind **Transversalwellen**: Ausbreitungsrichtung, E -Feld-Vektor und B -Feld-Vektor stehen paarweise aufeinander senkrecht und bilden ein Rechtssystem.
- Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** im Vakuum ist gleich der Vakuumlichtgeschwindigkeit c .
- Elektromagnetische Wellen lassen sich mit einem **Hertz'schen Dipol** erzeugen. Auf dem Dipol bilden sich **stehende Ladungs-** bzw. **Stromstärkewellen** aus. Die ideale Dipollänge ℓ_{Dipol} beträgt daher eine halbe Wellenlänge, auf leitenden Flächen ein Viertel der Wellenlänge.
- Bei einer Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger von elektromagnetischen Wellen tritt der **relativistische Doppler-Effekt** auf: Die empfangene Frequenz f_E ist größer (Annäherung) bzw. kleiner (Entfernung) als die Senderfrequenz f_S .
- Senden zwei Antennen gleichphasig, so gilt für die Winkel φ , unter denen man **Interferenzmaxima** in Entfernungen findet, die groß gegen den Abstand d der Antennen sind:

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

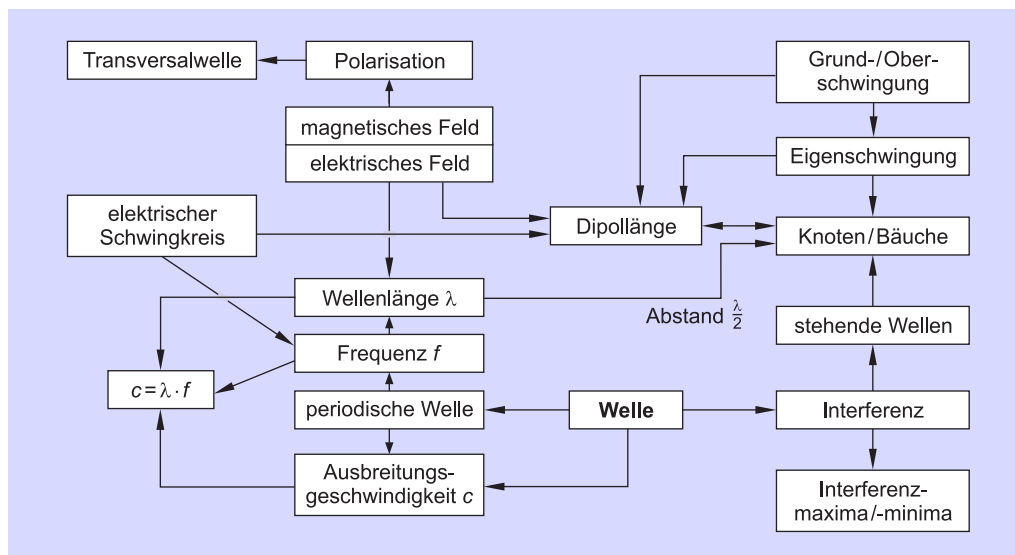
$$\ell_{\text{Dipol}} = \frac{\lambda}{2}$$

$$\ell_{\text{Dipol (leitend)}} = \frac{\lambda}{4}$$

$$f_E = f_S \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$$

$$k \cdot \lambda = d \cdot \sin \varphi \quad (k \in \mathbb{N}_0)$$

Concept Map: Elektromagnetische Wellen





© **STARK Verlag**

www.stark-verlag.de
info@stark-verlag.de

Der Datenbestand der STARK Verlag GmbH
ist urheberrechtlich international geschützt.
Kein Teil dieser Daten darf ohne Zustimmung
des Rechteinhabers in irgendeiner Form
verwertet werden.

STARK