

Physik

GYMNASIUM

# ABITUR-WISSEN PHYSIK

MEHR  
ERFAHREN

# ABITUR-WISSEN PHYSIK

Physik  
GYMNASIUM

Christia  
Ele

Aufbau der Materie

ABITUR-WISSEN

94331

Christian Gleixner  
Aufbau der Materie

STARK

# ABITUR-WISSEN PHYSIK

MEHR  
ERFAHREN

Christian Gleixner

## Aufbau der Materie

**STARK**

# Inhalt

## Vorwort

<b>Teilchen und Welle</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Die physikalische Welt am Ende des 19. Jahrhunderts</b> .....	<b>2</b>
<b>2 Licht im Teilchenmodell – Photonen</b> .....	<b>6</b>
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
<b>3 Materie im Wellenmodell</b> .....	<b>22</b>
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
<b>Atommodelle und Quantenobjekte</b> .....	<b>35</b>
<b>4 Atomkern und Atomhülle</b> .....	<b>36</b>
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*

<b>5 Verhalten von Quantenobjekten .....</b>	<b>55</b>
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
<b>6 Quantenphysikalische Modellsysteme .....</b>	<b>73</b>
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
<b>7 Linienspektren und Energiezustände .....</b>	<b>88</b>
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
<b>8 Röntgenstrahlen .....</b>	<b>101</b>
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

<b>Elementarteilchen und Atomkern .....</b>	<b>111</b>
<b>9 Das Standardmodell der Elementarteilchen .....</b>	<b>112</b>
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
<b>10 Quantenobjekt Atomkern .....</b>	<b>122</b>
10.1 Charakteristische Gammaspektren .....	122
10.2 Der Atomkern als Quantentopf .....	123
10.3 Exkurs: Kernspintomografie .....	125
Fakten und Formeln .....	127
Concept Map .....	127
<b>Radioaktivität .....</b>	<b>129</b>
<b>11 Radioaktive Strahlung .....</b>	<b>130</b>
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
<b>12 Kernspaltung und Kernfusion .....</b>	<b>146</b>
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*

<b>13 Strahlenschutz .....</b>	<b>159</b>
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

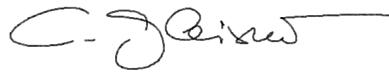
# Vorwort

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 hauptsächliches 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).

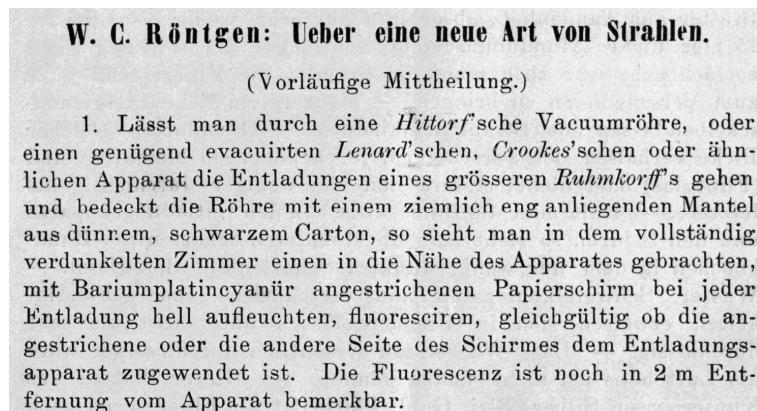


Abb. 97 b



Abb. 98



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

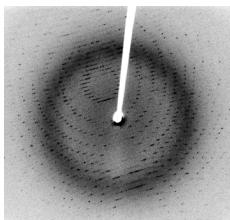


Abb. 100 b

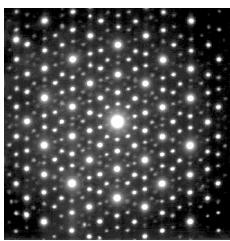


Abb. 100 c

#### 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  $\vartheta$  (**Glanzwinkel**) zur Kristalloberfläche auf zwei verschiedene Ebenen des Kristalls auf und werden dort reflektiert. Dabei legen sie unterschiedlich lange Wege zurück, die vom Winkel  $\vartheta$  abhängen.

### Bragg-Gleichung

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

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

$n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $\lambda$ : Wellenlänge der Röntgenstrahlung  
 $d$ : Abstand der Kristallebenen;  $\vartheta$ : Glanzwinkel

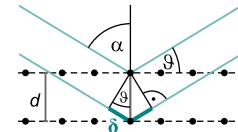


Abb. 101: Erklärung der Röntgeninterferenz nach Bragg

## 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 Bremspektrum 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 Energieniveaus. Aus einem darüberliegenden besetzten Quantenzustand rückt ein Elektron nach. Dabei wird ein Photon ausgesendet; die Spektrallinien werden der Reihe nach mit  $K_{\alpha}, K_{\beta}, \dots, L_{\alpha}, L_{\beta}, \dots$  bezeichnet (Abb. 102 c).

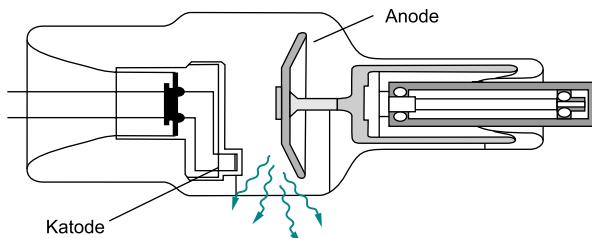


Abb. 102a

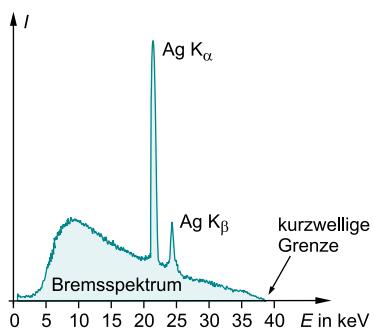


Abb. 102b

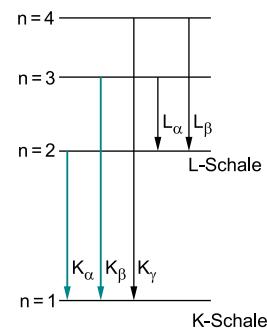


Abb. 102c

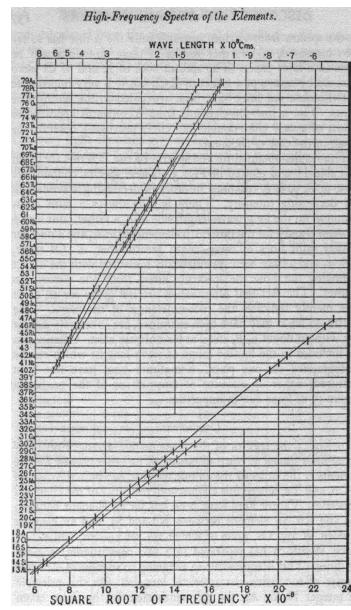


Abb. 103

Abb. 102: Röntgenröhre

a: Aufbau

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

c: Charakteristisches Röntgenspektrum im Term-schema

Abb. 103: Moseley-Gesetz.  
Originalgrafik von 1914

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  $K_\alpha$ -Linien bzw. zu  $(Z-7,4)$  bei den  $L_\alpha$ -Linien war (Abb. 103).

### Gesetz von Moseley

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

- von  $m=2$  nach  $n=1$  ( $K_\alpha$ -Linie):  $\frac{1}{\lambda} = \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) \cdot R \cdot (Z-1)^2$

- von  $m=3$  nach  $n=2$  ( $L_\alpha$ -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  $K_\alpha$ -und  $L_\alpha$ -Linien zeigen eine gewisse Ähnlichkeit mit der Formel für die Linien des Wasserstoffspektrums. Eine anschauliche Interpretation dafür ist die folgende:

- Bei der  $K_{\alpha}$ -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  $L_{\alpha}$ -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

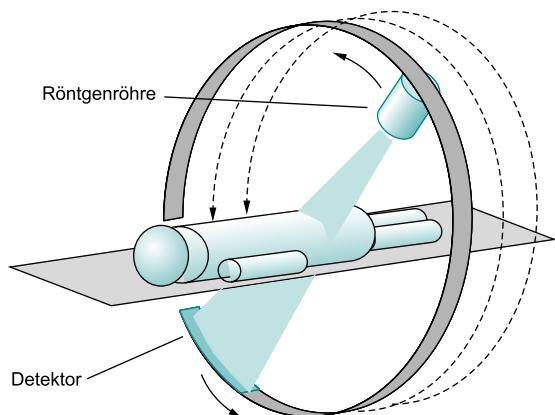


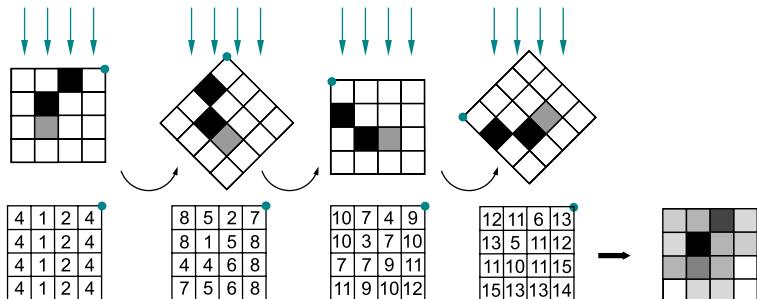
Abb. 104 b



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 Quadratcke 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).

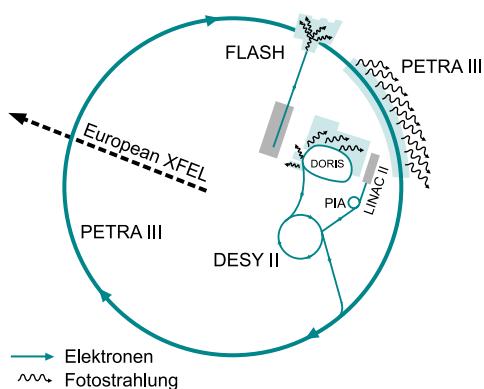


Abb. 106 a

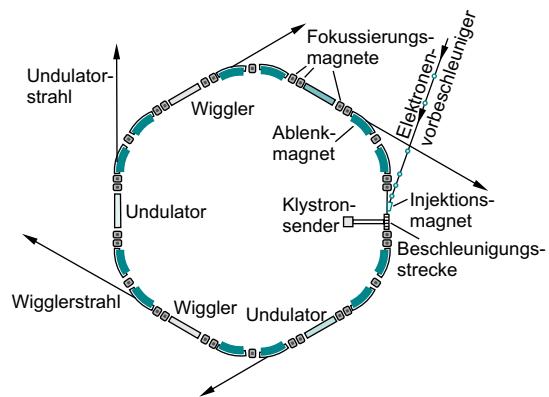


Abb. 106 b

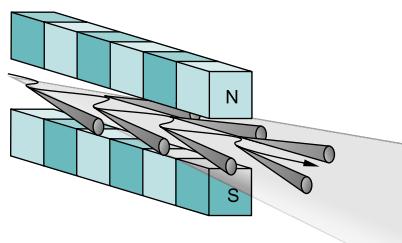


Abb. 108 a

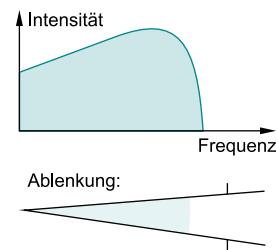
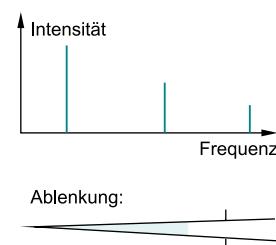
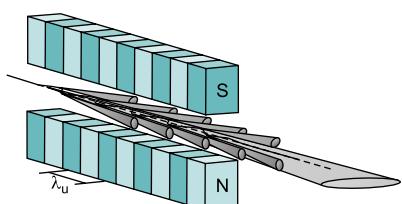


Abb. 108 b

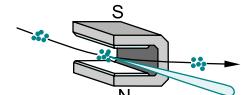


Bei Wiggln werden stärkere und längere Magnete verwendet als bei Undulatoren. Das führt dazu, dass die Ablenkung der Elektronen größer ist und man eine Strahlung erhält, die einen breiten Frequenzbereich abdeckt. Undulatoren arbeiten mit schwächeren und kürzeren Magnetfeldern. Die resultierende Strahlung 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: DESY**

**a:** Die **Gesamtanlage** besteht aus einem System von Vorbeschleunigern, Speicherringen und Strahlungssplätzen. 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 Spektrum.

**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 Minigruppen 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  $\lambda_{\text{min}}$ , die durch die maximale Elektronenenergie bestimmt ist.
    - Elektronen werden aus einem unteren Energieniveau eines Atoms entfernt. Der freie Platz wird von einem Elektron aus einer höheren Energietufe 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;  $\vartheta$ : Glanzwinkel;  $\lambda$ : Wellenlänge der Röntgenstrahlung).
  - 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  $\lambda$  eines Röntgenphotons mit der Kernladungszahl  $Z$  des Atoms verknüpft. Speziell erhält man
    - für die  $K_{\alpha}$ -Linie des Röntgenspektrums (Übergang  $m = 2 \rightarrow n = 1$ ):
    - für die  $L_{\alpha}$ -Linie des Röntgenspektrums (Übergang  $m = 3 \rightarrow n = 2$ ):
$$R = 1,0973732 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$
 ist die Rydberg-Konstante.
 
$$\lambda_{\text{min}} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}$$

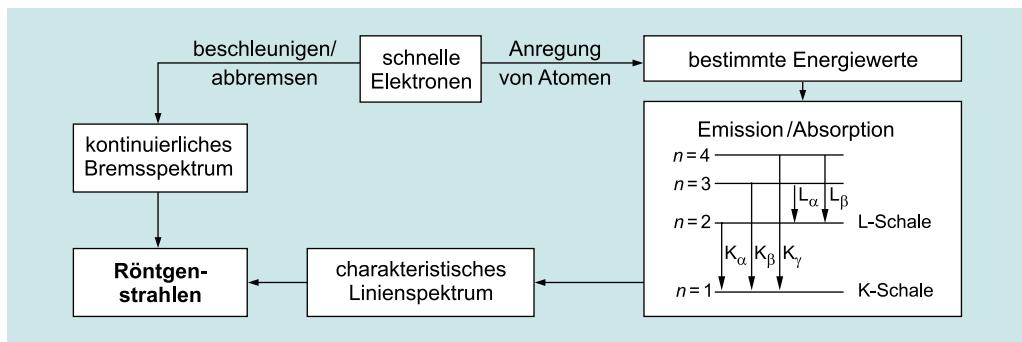
$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \vartheta$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{3}{4} R \cdot (Z - 1)^2$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{5}{36} R \cdot (Z - 7,4)^2$$

## Concept Map: Röntgenstrahlen





# ABITUR-WISSEN PHYSIK

MEHR  
ERFAHREN

Christian Gleixner  
**Elektrodynamik**

**STARK**

# Inhalt

## Vorwort

<b>Felder</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Der Begriff „Feld“</b> .....	<b>2</b>
1.1 Historisches .....	2
1.2 Grundlagen .....	2
<b>2 Gravitationsfelder</b> .....	<b>4</b>
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
<b>3 Elektrisches Feld und Spezielle Relativitätstheorie</b> .....	<b>18</b>
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*

<b>4 Magnetfelder .....</b>	<b>43</b>
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
<b>5 Elektromagnetische Induktion .....</b>	<b>59</b>
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
<b>Schwingungen .....</b>	<b>73</b>
<b>6 Der Begriff „Schwingung“ .....</b>	<b>74</b>
6.1 Historisches .....	74
6.2 Grundbegriffe .....	74
6.3 Exkurs: Heinrich Hertz (1857–1894) .....	77
6.4 Exkurs: Fouriersynthese und Fourieranalyse .....	79
<b>7 Mechanische Schwingungen .....</b>	<b>82</b>
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

<b>8 Spule und Kondensator im Wechselstromkreis .....</b>	<b>96</b>
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
<b>9 Elektromagnetische Schwingkreise .....</b>	<b>104</b>
9.1 Spule und Kondensator – zwei Gegenspieler im Verein .....	104
9.2 Erzwungene Schwingungen und Resonanz .....	106
9.3 Ungeräumpte 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
<b>Wellen .....</b>	<b>115</b>
<b>10 Grundlagen der Wellenlehre .....</b>	<b>116</b>
10.1 Grundbegriffe .....	116
10.2 Grundphänomene .....	118
10.3 Exkurs: Christiaan Huygens (1629–1695) .....	121
Fakten und Formeln .....	123
Concept Map .....	124
<b>11 Mechanische Wellen .....</b>	<b>125</b>
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
<b>12 Elektromagnetische Wellen .....</b>	<b>138</b>
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
<b>13</b>	<b>Welleneigenschaften des Lichts .....</b>	<b>148</b>
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 Handfunkfunkgeräts beträgt gut 40 cm. Es handelt sich damit um eine  **$\frac{\lambda}{4}$ -Stab-antenne** für das von der Feuerwehr verwendete 2-m-Band.

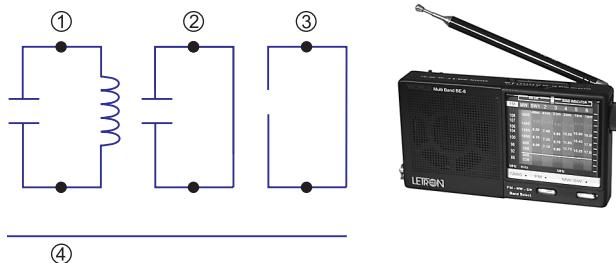


Abb. 175



Abb. 176

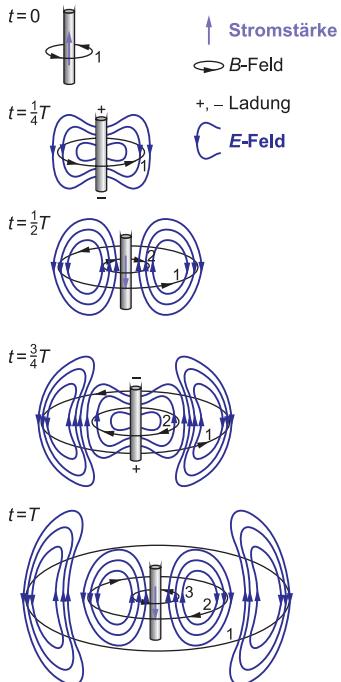


Abb. 177a

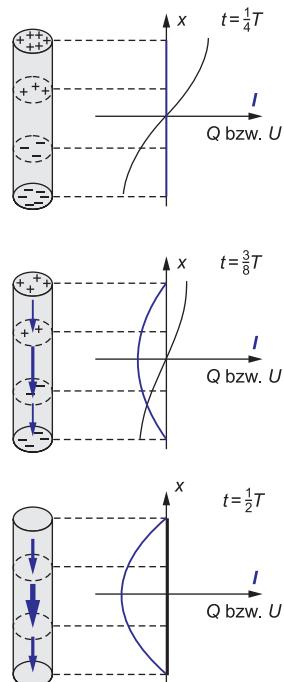


Abb. 177b

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 <sup>1</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
engl. Abk. <sup>2</sup>	ELF	SLF	ULF	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF	THF
deut. Abk. <sup>3</sup>		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		

<sup>1</sup>: ITU: International Telecommunication Union

<sup>2</sup>: T: Tremendous; E: Extreme; S: Super; V: Very; H: High; M: Medium; L: Low; F: Frequency; z. B. LF – Low Frequency

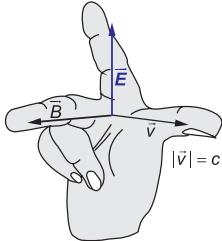
<sup>3</sup>: NF: Niederfrequenz; S: Sehr; U: Ultra; L: Lang; M: Mittel; K: Kurz; W: Welle; z. B. KW – Kurzwelle

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 Bezeichnungsweisen 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.

## 12.2 Polarisation und Satellitenfernsehen



**Abb. 179:** Elektromagnetische Wellen sind **Transversalwellen**. 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:** 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  $E_\perp = E_{\text{ges}} \cdot \sin \varphi$  ( $\varphi$ : Winkel zwischen  $\vec{E}_{\text{ges}}$  und den Gitterstäben)

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).

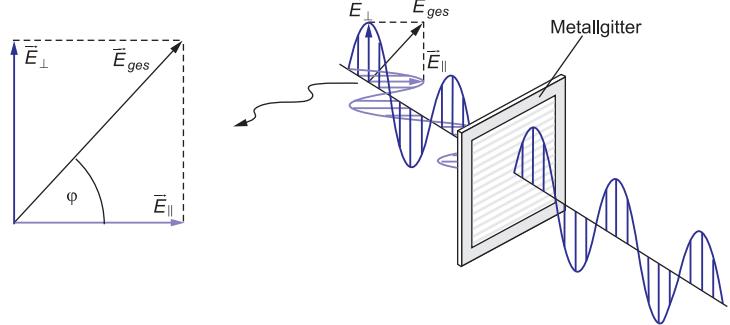


Abb. 180

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 Verbindungsstrecke 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:

$$\left. \begin{aligned} F_{\text{Grav}} &= G \cdot \frac{m_E \cdot m_{\text{Sat}}}{r_{\text{Sat}}^2} \\ F_{\text{Grav}} &= F_Z \\ F_Z &= m_{\text{Sat}} \cdot \omega^2 \cdot r_S \\ \omega &= \frac{2\pi}{T} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} r_{\text{Sat}}^3 &= \frac{G \cdot m_E}{\omega^2} = \frac{G \cdot m_E \cdot T^2}{4\pi^2} \\ r_{\text{Sat}} &= \sqrt[3]{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5,98 \cdot 10^{24} \cdot 86\,400^2}{4\pi^2}} \frac{\text{m}^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^2}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} \\ &\approx 42,3 \cdot 10^3 \text{ km} \end{aligned}$$

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).

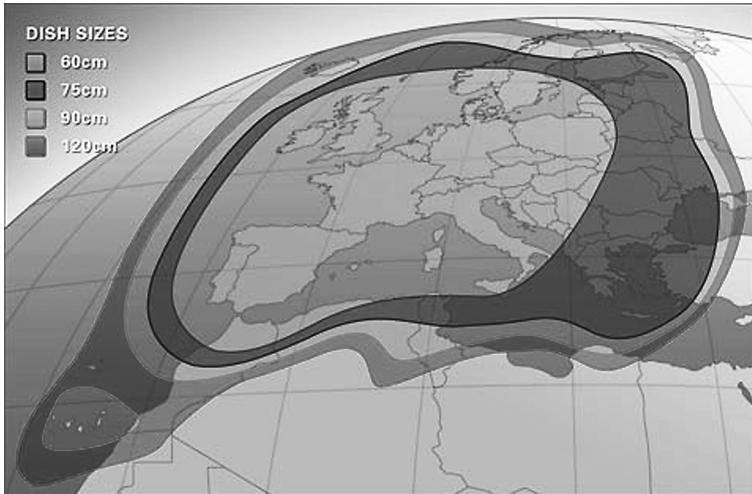


Abb. 182

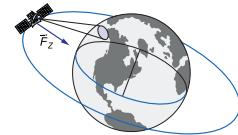


Abb. 181: Die Ebene der Umlaufbahn von **geostationären Satelliten** fällt mit der **Äquatorebene** der Erde zusammen. Ihre Umlaufdauer beträgt knapp 24 Stunden, sodass sie immer über dem gleichen Punkt der Erdoberfläche stehen.

**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.

### 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 kurzweligen **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. 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.

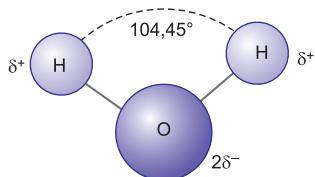


Abb. 184



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 heißen 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 „**Radio Detection And Ranging**“; dahinter verbergen sich verschiedene Verfahren, bei denen mit Hilfe 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 Radarignal 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).

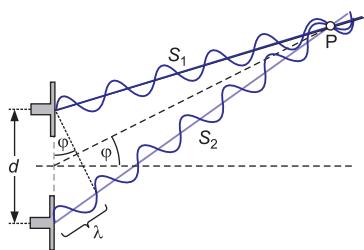


Abb. 187a

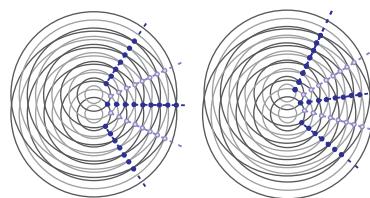


Abb. 187b



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  $\lambda$  (oder ein Vielfaches davon) beträgt.

b: Eine **Phasenverschiebung** führt zu einer Richtungsänderung der Maximallinien: 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 **Amplitudenumodulation** (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.

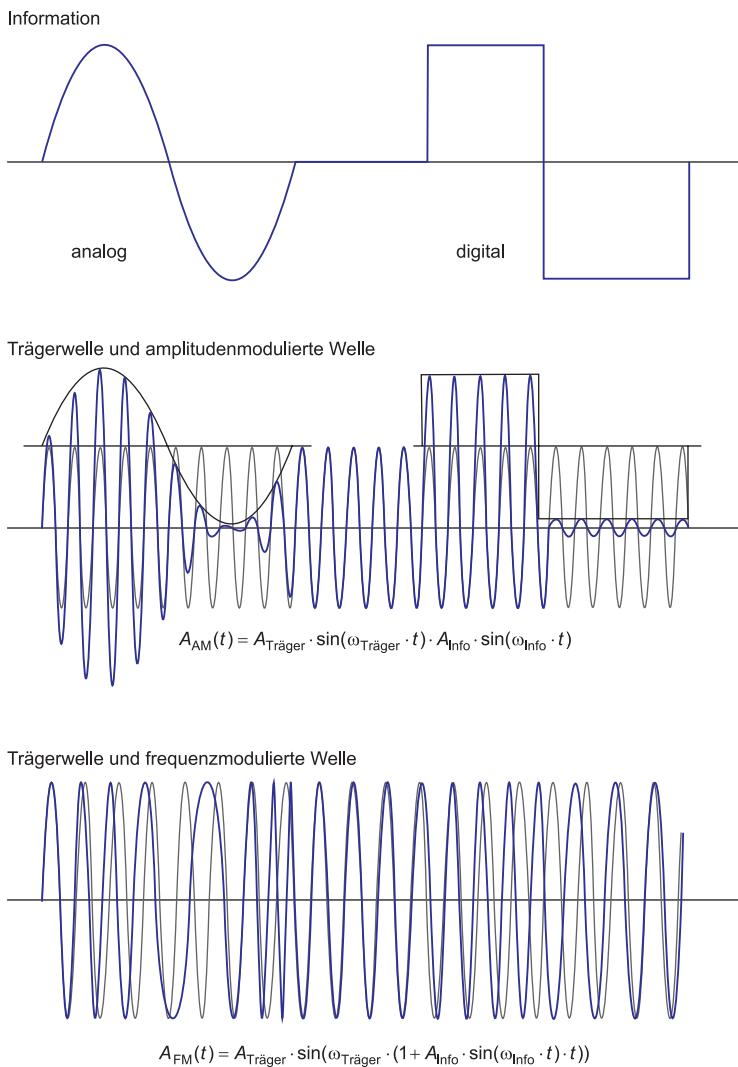


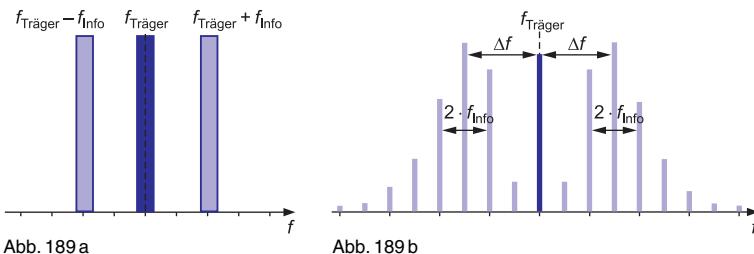
Abb. 188

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 Amplitudenumodulation 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 Programmkenntnis, 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**  $\Delta f$  und der Frequenz  $f_{\text{Info}}$  zusammen.  $\Delta f$  hängt von der Amplitude des zu übertragenden Signals ab. Im UKW-Bereich beträgt  $\Delta f$  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 Zeitschlüsse 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 Morsezeichen 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



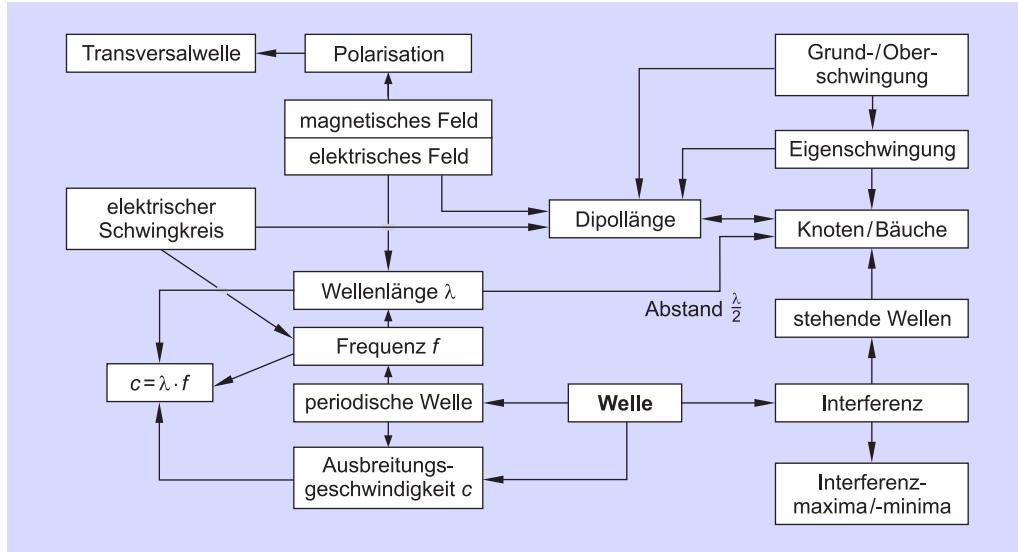
Abb. 190 c

*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 Hochfrequenzzeugung 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*.  $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
  - Elektromagnetische Wellen lassen sich mit einem **Hertz'schen Dipol** erzeugen. Auf dem Dipol bilden sich **stehende Ladungs- bzw. Stromstärkewellen** aus. Die ideale Dipollänge  $\ell_{\text{Dipol}}$  beträgt daher eine halbe Wellenlänge, auf leitenden Flächen ein Viertel der Wellenlänge.  $\ell_{\text{Dipol}} = \frac{\lambda}{2}$   
 $\ell_{\text{Dipol (leitend)}} = \frac{\lambda}{4}$
  - 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  $f_S$ .  $f_E = f_S \cdot \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$
  - Senden zwei Antennen gleichphasig, so gilt für die Winkel  $\varphi$ , unter denen man **Interferenzmaxima** in Entfernung findet, die groß gegen den Abstand *d* der Antennen sind:  $k \cdot \lambda = d \cdot \sin \varphi \ (k \in \mathbb{N}_0)$

## Concept Map: Elektromagnetische Wellen



© **STARK Verlag**

[www.stark-verlag.de](http://www.stark-verlag.de)

[info@stark-verlag.de](mailto: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**