

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

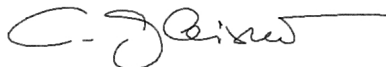
Vorwort

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.

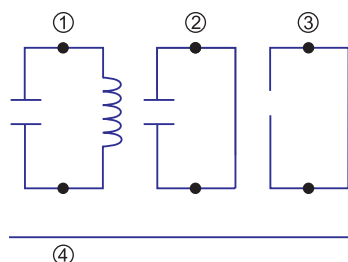


Abb. 175



Abb. 176

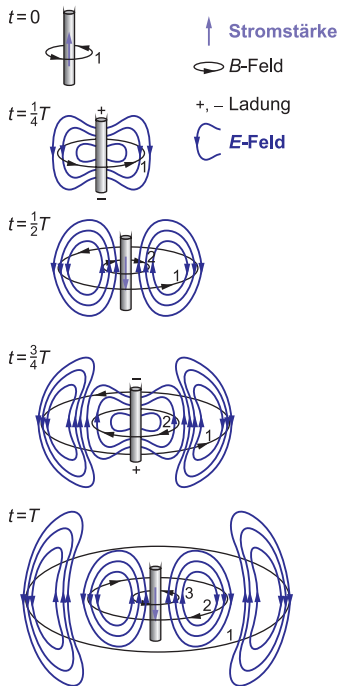


Abb. 177 a

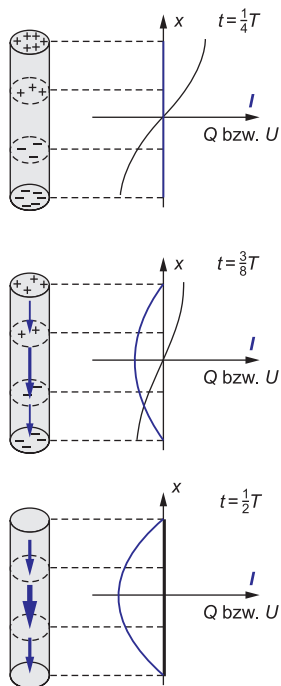


Abb. 177 b

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.

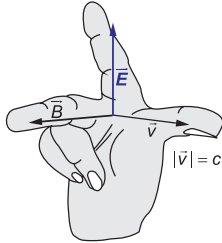


Abb. 179: Elektromagnetische Wellen sind **Transversalwellen**. Dabei stehen Ausbreitungsrichtung, elektrischer Feldvektor \vec{E} und magnetischer Feldvektor \vec{B} paarweise aufeinander senkrecht und bilden (in dieser Reihenfolge) ein Rechtssystem.

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).

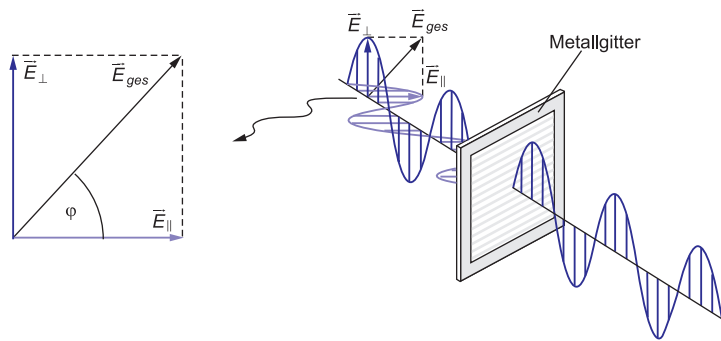


Abb. 180

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 zirkuläre Polarisierungen 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).

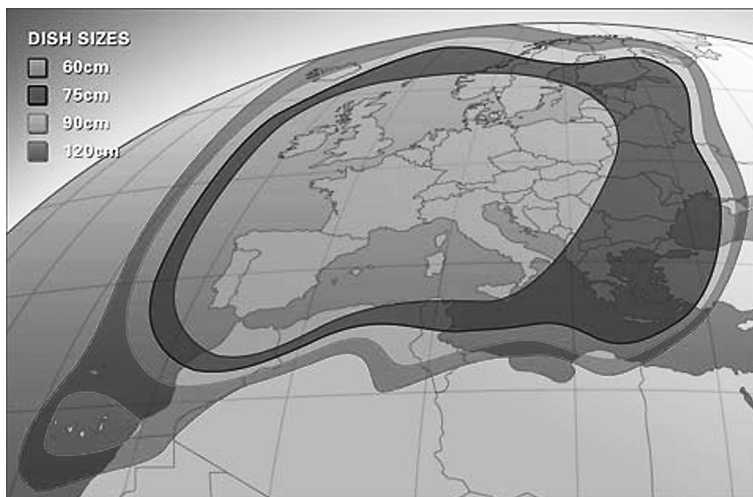


Abb. 182

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.

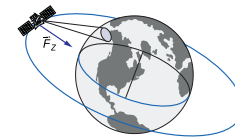


Abb. 181: Die Ebene der Umlaufbahn von **geostationären Satelliten** fällt mit der **Äquatorebene** der Erde zusammen. Ihre Umlaufdauer beträgt knapp 24 Stunden, sodass sie immer über dem gleichen Punkt der Erdoberfläche stehen.

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.

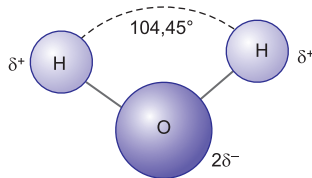


Abb. 184



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).

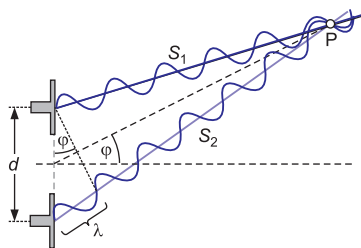


Abb. 187 a

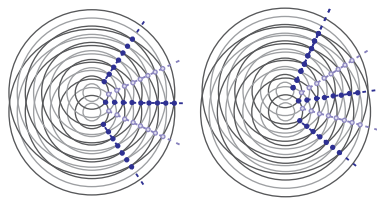


Abb. 187 b



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.

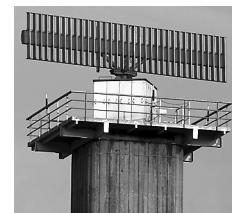


Abb. 187: Phased-Array-Antennen

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.

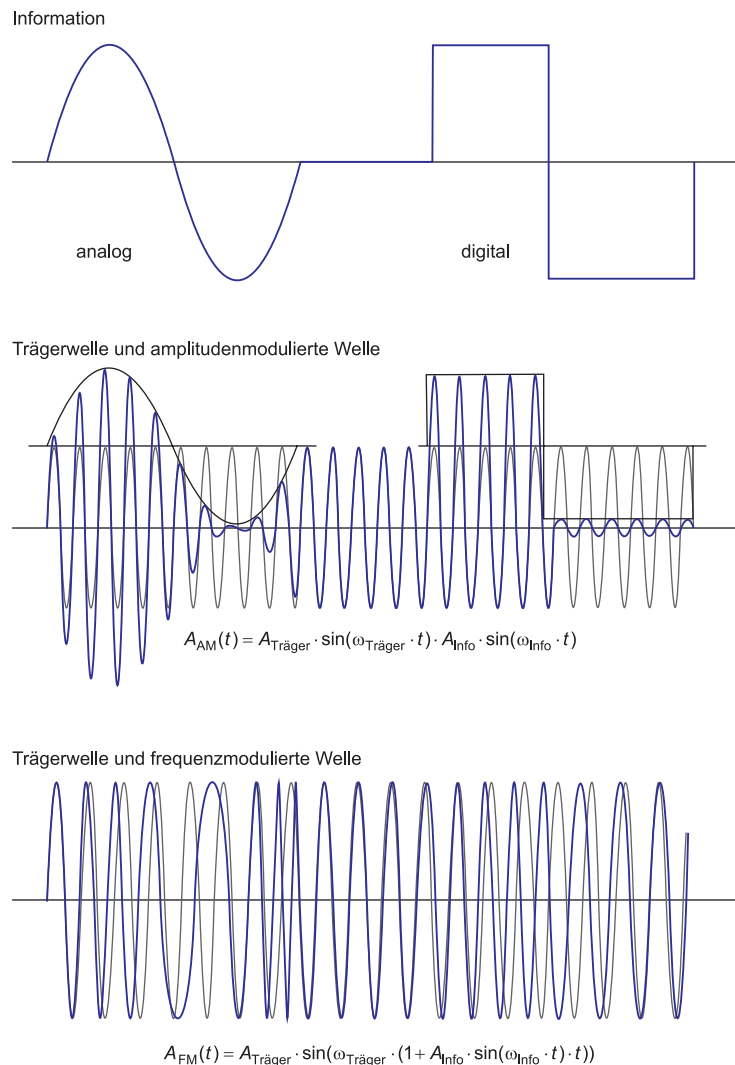


Abb. 188

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 Programm-kennung, 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.

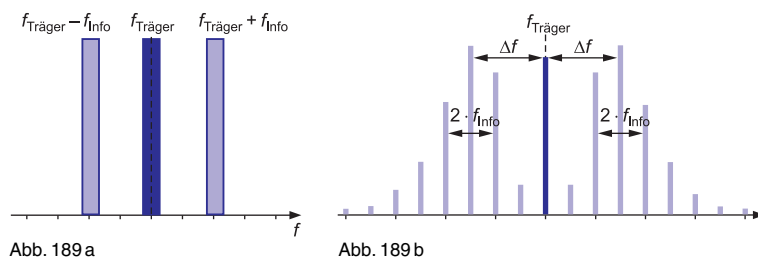


Abb. 189: Frequenzband und Bandbreite

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

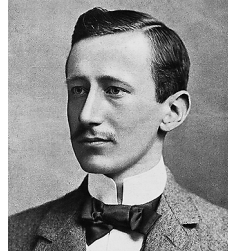


Abb. 190 b



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:

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

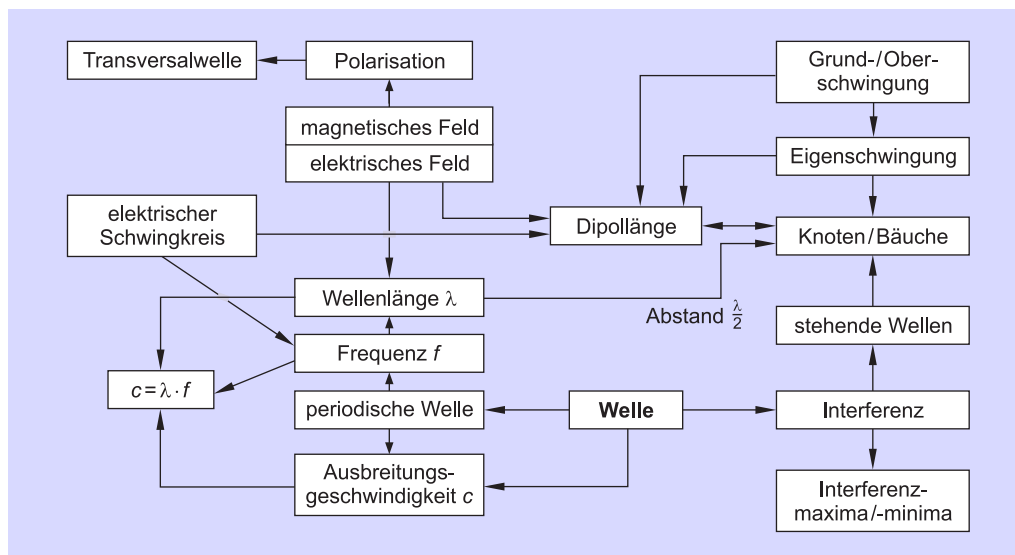
$$\ell_{\text{Dipol}} = \frac{\lambda}{2}$$

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

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

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

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