




Physik für Infotronik (20)

Gerald Kupris

16.12.2015

Vorlesungen Physik WS2015/16

25.11.2015	Vorlesung 13	Das elektrische Feld
25.11.2015	Vorlesung 14	Ladungsverteilung und elektrisches Potenzial
02.12.2015	Vorlesung 15	Die Kapazität
02.12.2015	Vorlesung 16	Das Magnetfeld
09.12.2015	Vorlesung 17	Quellen des Magnetfelds
09.12.2015	Vorlesung 18	Die magnetische Induktion
16.12.2015	Vorlesung 19	Magnetische Induktion und Transformatoren
 16.12.2015	Vorlesung 20	Elektromagnetische Wellen
23.12.2015	vorlesungsfrei	
13.01.2016	Vorlesung 21	Aufbau von Festkörpern
13.01.2016	Vorlesung 22	Leiter und Halbleiter
20.01.2016	Vorlesung 23	Wiederholung und Prüfungsvorbereitung
20.01.2016	Vorlesung 24	Wiederholung und Prüfungsvorbereitung

Die Maxwellschen Gleichungen

Die vier Maxwellschen Gleichungen beschreiben die Erzeugung von elektrischen und magnetischen Feldern durch Ladungen und Ströme, sowie die Wechselwirkung zwischen diesen beiden Feldern, die bei zeitabhängigen Feldern als Zeitentwicklung in Erscheinung tritt.

Sie sind die Grundlage der Elektrodynamik und der theoretischen Elektrotechnik und wurden in den Jahren 1861 bis 1864 von James Clerk Maxwell entwickelt. Im Wesentlichen fasste Maxwell die bis zu diesem Zeitpunkt entdeckten Gesetzmäßigkeiten:

- das Ampèresche Gesetz,
- das Induktionsgesetz von Faraday und
- das Gaußsche Gesetz

in einer vereinheitlichten Theorie zusammen und ergänzte sie um

- den Maxwellschen Verschiebungsstrom,

um Konsistenz mit der Kontinuitätsgleichung zu erhalten.

Die Maxwellschen Gleichungen sind ein Beispiel für eine vereinheitlichte Theorie, die verschiedene Phänomene, hier magnetische und elektrische, in einer geschlossenen Form erklärt.

Die Maxwell'schen Gleichungen

Welche Effekte sind grundsätzlich in der Elektrodynamik zu beobachten und worauf sind sie zurückzuführen?

	Kernstruktur der E-Dynamik	verursacht...	entdeckt	von
1.	ruhende Ladung	ein elektrisches Feld	1785	Coulomb
2.	gleichförmige bewegte Ladung	ein magnetisches Feld	1820	Oersted
3.	beschleunigte Ladung	ein Strahlungsfeld	1888	Hertz
4.	zeitliche Magnetfeldänderung	Induktion / Ind.-Spannung	1831	Faraday
5.	Fehlen magn. Monopole	geschlossene Magnetfeldlinien	1820	Ampère

1873 gelang es Maxwell die Zusammenhänge 1., 2. und 4. und 5. in seine 4 Gleichungen zu fassen, die 3. Zeile entspricht der Maxwell-Hertz-Wellengleichung.

James Clerk Maxwell

James Clerk Maxwell (* 13. Juni 1831 in Edinburgh; † 5. November 1879 in Cambridge) war ein schottischer Physiker.

Er entwickelte einen Satz von Gleichungen (die Maxwellschen Gleichungen), welche die Grundlagen der Elektrizitätslehre und des Magnetismus bilden.

Zudem entdeckte er die Geschwindigkeitsverteilung von Gasmolekülen (Maxwell-Verteilung). Er veröffentlichte im Jahre 1861 die erste Farbfotografie als Nachweis für die Theorie der additiven Farbmischung.



Integralform der Maxwell-Gleichungen

Die Maxwell-Gleichungen wurden zuerst in der Form von Integralgleichungen gefunden. Hierzu sei M ein regulärer Bereich und S eine reguläre Fläche im dreidimensionalen Raum.

$$\iint_{\partial M} D dO = Q$$

Die in M enthaltene Ladung Q stimmt mit dem elektrischen Fluss durch die Oberfläche überein.

$$\iint_{\partial M} B dO = 0$$

Der magnetische Fluss durch die Oberfläche stimmt mit der magnetischen Ladung in M überein. Es gibt keine magnetische Monopole.

$$\oint_{\partial S} E \cdot dx + \frac{\partial}{\partial t} \iint_S B dO = 0$$

Die elektrische Zirkulation entlang des Randes ist gleich der negativen zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses durch die Fläche.

$$\oint_{\partial S} H \cdot dx - \frac{\partial}{\partial t} \iint_S D dO = I$$

Die magnetische Zirkulation entlang des Randes ist die Summe aus Strom und der zeitlichen Änderung des elektrischen Flusses durch die Fläche S.

Erste Maxwellsche Gleichung: Gaußsches Gesetz

$$\iint_{\partial M} D dO = Q$$

Die in M enthaltene Ladung Q stimmt mit dem elektrischen Fluss durch die Oberfläche überein.

Das Gaußsche Gesetz beschreibt in der Elektrostatik den elektrischen Fluss durch eine geschlossene Fläche. Wie das Ampèresche Gesetz, das Analogon für den Magnetismus, ist auch das Gaußsche Gesetz eine der vier maxwellschen Gleichungen (die erste) und somit fundamental für die klassische Elektrodynamik.

$$\Phi = \oint_A \mathbf{E} d\mathbf{A} = \frac{1}{\epsilon_0} Q$$

mit dem Fluss Φ , dem Vektorfeld \mathbf{E} und der eingeschlossen Ladung Q . ϵ_0 ist die Dielektrizitätskonstante des Vakuums.

Zweite Maxwellsche Gleichung: Das Ampèresche Gesetz

$$\iint_{\partial M} B dO = 0$$

Der magnetische Fluss durch die Oberfläche stimmt mit der magnetischen Ladung in M überein
Es gibt keine magnetische Monopole.

Das Durchflutungsgesetz (Durchflutungssatz, Ampèresches Gesetz) ist ein Gesetz aus der Elektrodynamik und eine der maxwellschen Gleichungen. Es wurde von André Marie Ampère entdeckt und bildet für den Magnetismus die Analogie zum Induktionsgesetz.

Einfache Formulierung:

Ein elektrischer Strom ruft ein ihm proportionales Magnetfeld hervor, dessen Richtung mit der des Stromes eine Rechtsschraube bildet.

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

Wiederholung: Magnetfeld eines geraden Leiters

Abb. a): Zur Bestimmung der Richtung des von einem langen, geraden, stromdurchflossenen Leiter erzeugten Magnetfelds wenden wir die rechte-Hand-Regel an. Die Magnetfeldlinien bilden Kreise um den Draht in Richtung der Finger der rechten Hand, wenn der Daumen in Stromrichtung zeigt.

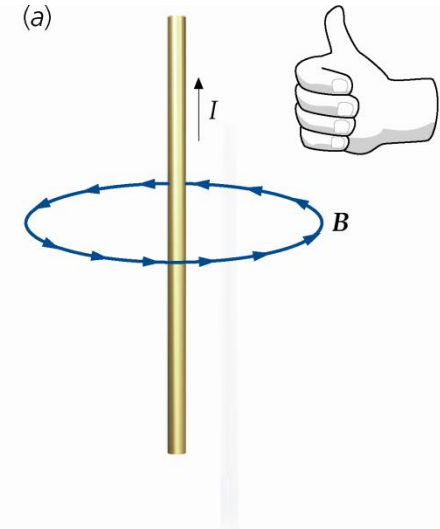


Abb. b): Feldlinien des von einem langen Draht hervorgerufenen Magnetfeldes, sichtbar gemacht durch Eisenfeilspäne.



$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I}{r_s}$$

I - Strom durch den Leiter

r_s - Radius senkrecht zum Leiter

Dritte Maxwellsche Gleichung: Induktionsspannung

$$\oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{x} + \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{O} = 0$$

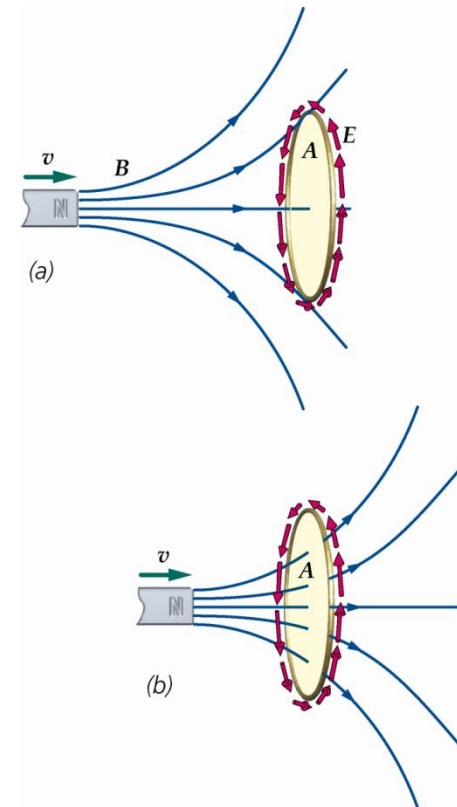
Die elektrische Zirkulation entlang des Randes ist gleich der negativen zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses durch die Fläche.

Experimente von Faraday, Henry und anderen zeigten, dass jede Änderung des magnetischen Flusses durch die von einem elektrischen Leiter (einem Draht) umschlossene Fläche eine Spannung in dem Leiter induziert, deren Stärke proportional zur Änderungsrate des Flusses ist.

$$U_{ind} = - \frac{d\Phi_{mag}}{dt}$$

$$U_{ind} = - \frac{d}{dt} \cdot \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

Diese Beziehung heißt **Faradaysches Gesetz**.



Berechnung des elektrischen Feldes aus dem Potenzial

$$d\Phi = -E \cdot ds = -|E| \cos \Theta |ds| = -E_t |ds|$$

$$E_t = -\frac{d\Phi}{|ds|}$$

$$E_x = -\frac{d\Phi(x)}{dx}$$

$$E = -\nabla\Phi$$

Ein Vektor, der in Richtung der Zunahme der größten Änderung einer skalaren Funktion zeigt und dessen Betrag gleich der Ortsableitung der Funktion in dieser Richtung ist, heißt Gradient der Funktion.

Damit ist das elektrische Feld E gleich dem Negativen des Gradienten des Potenzials Φ . Somit stimmt die Richtung des elektrischen Felds mit der Richtung des stärksten Abfalls des Potenzials mit der Entfernung überein.

Vierte Maxwell'sche Gleichung: Verschiebungsstrom

$$\oint_{\partial S} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{x} - \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \mathbf{D} d\mathbf{O} = I$$

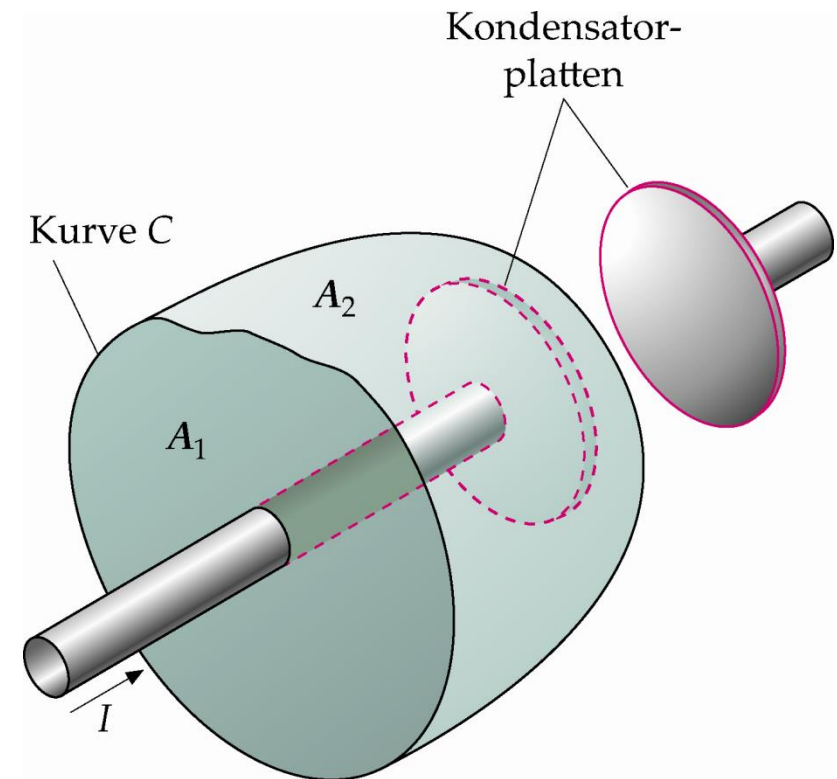
Die magnetische Zirkulation entlang des Randes ist die Summe aus Strom und der zeitlichen Änderung des elektrischen Flusses durch die Fläche S.

Der Verschiebungsstrom (engl. displacement current) ist eine Bezeichnung aus der Elektrodynamik und stellt die Tatsache dar, dass die zeitliche Änderung eines elektrischen Feldes bzw. der elektrischen Flussdichte ein integraler Teil des totalen elektrischen Stromes ist.

$$I_V = \epsilon_0 \frac{d\Phi_{el}}{dt}$$

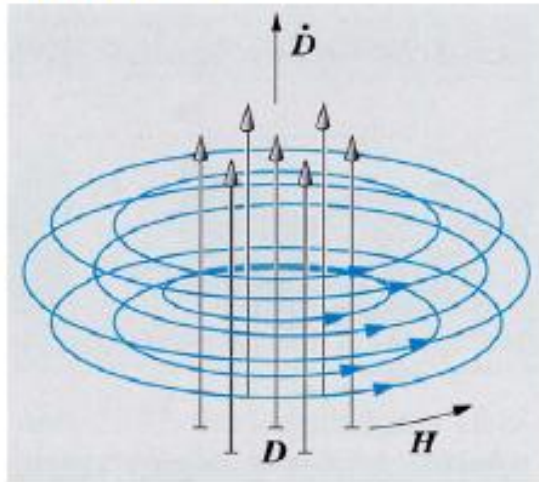
Φ_{el} ist der elektrische Fluss durch die von der Kurve C eingeschlossene Fläche. Damit erhalten wir die allgemeine Form des Ampereschen Gesetzes:

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{t} = \mu_0 (I + I_V) = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_{el}}{dt}$$



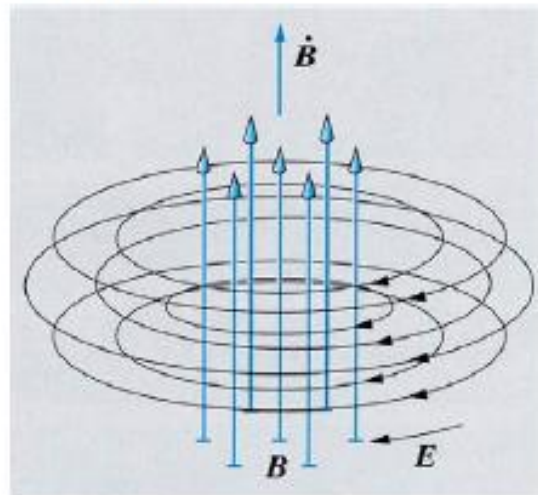
Ein sich änderndes Elektromagnetisches Feld

Schritt 1



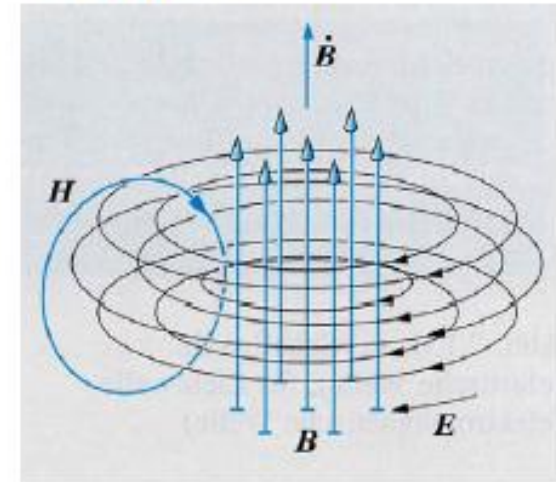
sich änderndes **E** -Feld
erzeugt **B** -Feld

Schritt 2



sich änderndes **B** -Feld
erzeugt **E** -Feld

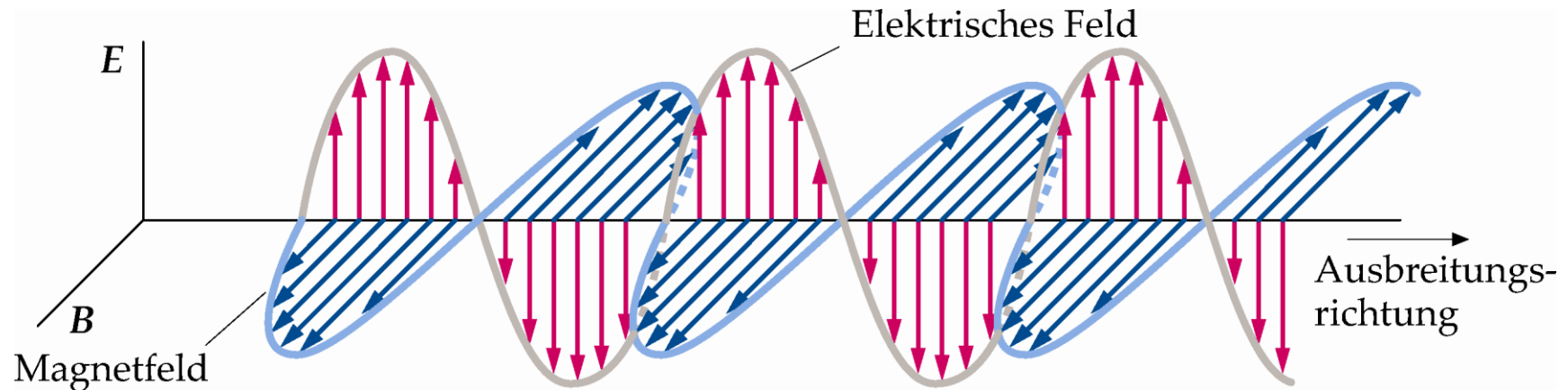
Schritt 3



sich änderndes **B** -Feld
erzeugt sich
änderndes **E** -Feld, das
wiederum sich
änderndes **B** -Feld
erzeugt,...

ABER: irgendwann irgendwo müssen zeitlich
variierende Ladungen oder Ströme **E** - und **B** -Feld
erzeugt haben

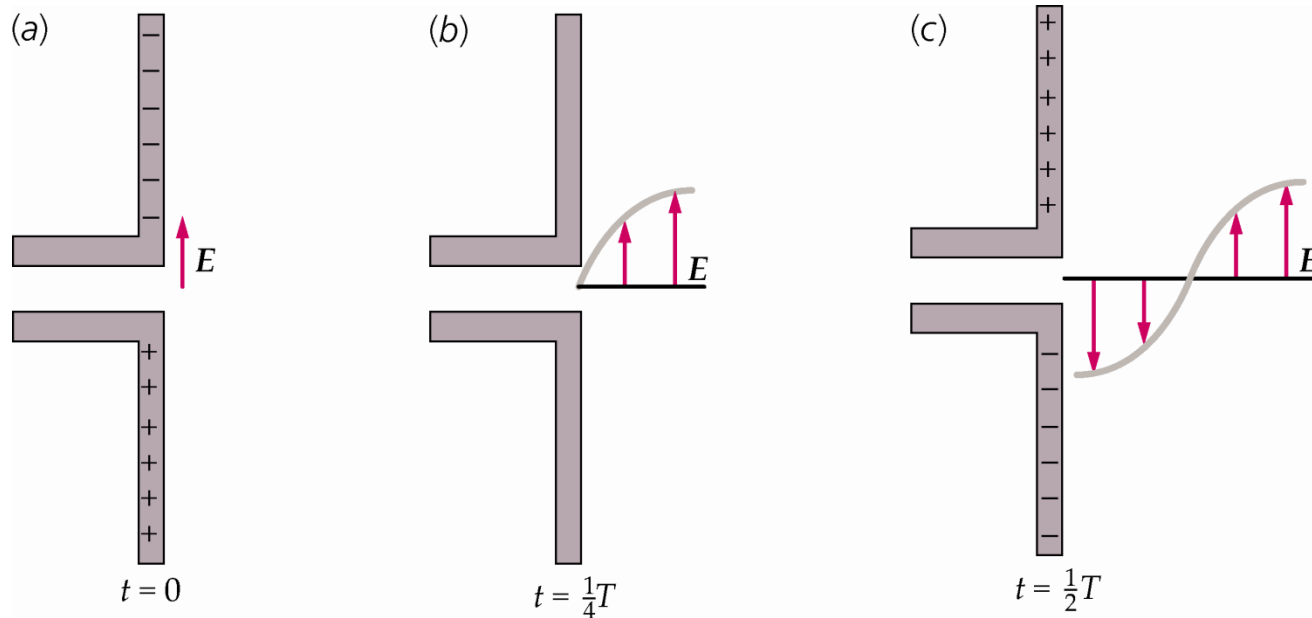
Elektromagnetische Wellen



Elektrischer und magnetischer Feldvektor einer elektromagnetischen Welle. Die Felder sind in Phase, sie stehen senkrecht aufeinander und auf der Ausbreitungsrichtung der Welle.

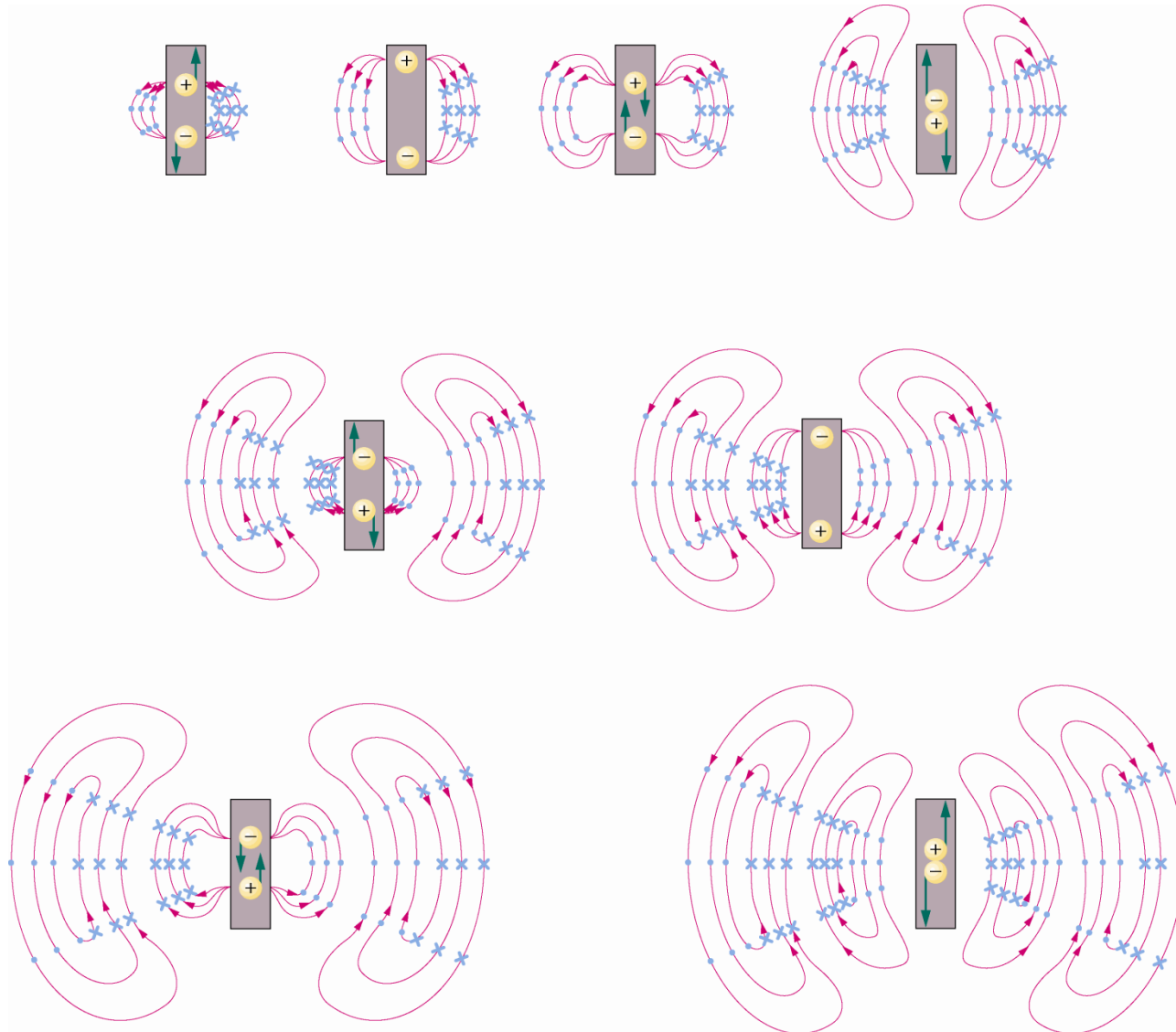
Die Ausbreitungsrichtung einer elektromagnetischen Welle ist stets gleich der Richtung des Vektorprodukts $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$.

Elektromagnetische Wellen



Elektrische Dipolantenne, die elektromagnetische Wellen (Radiowellen) aussendet. Die Stäbe sind mit einem (nicht eingezeichneten) Wechselspannungsgenerator verbunden. Die Oszillation der der Ladungen führt zu Oszillationen des elektrischen Felds, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausgehend von der Antenne im Raum ausbreiten. Der Strom durch die stäbe bewirkt außerdem ein oszillierendes, senkrecht zur Tafalebene orientiertes Magnetfeld (nicht eingezeichnet).

Elektromagnetische Wellen

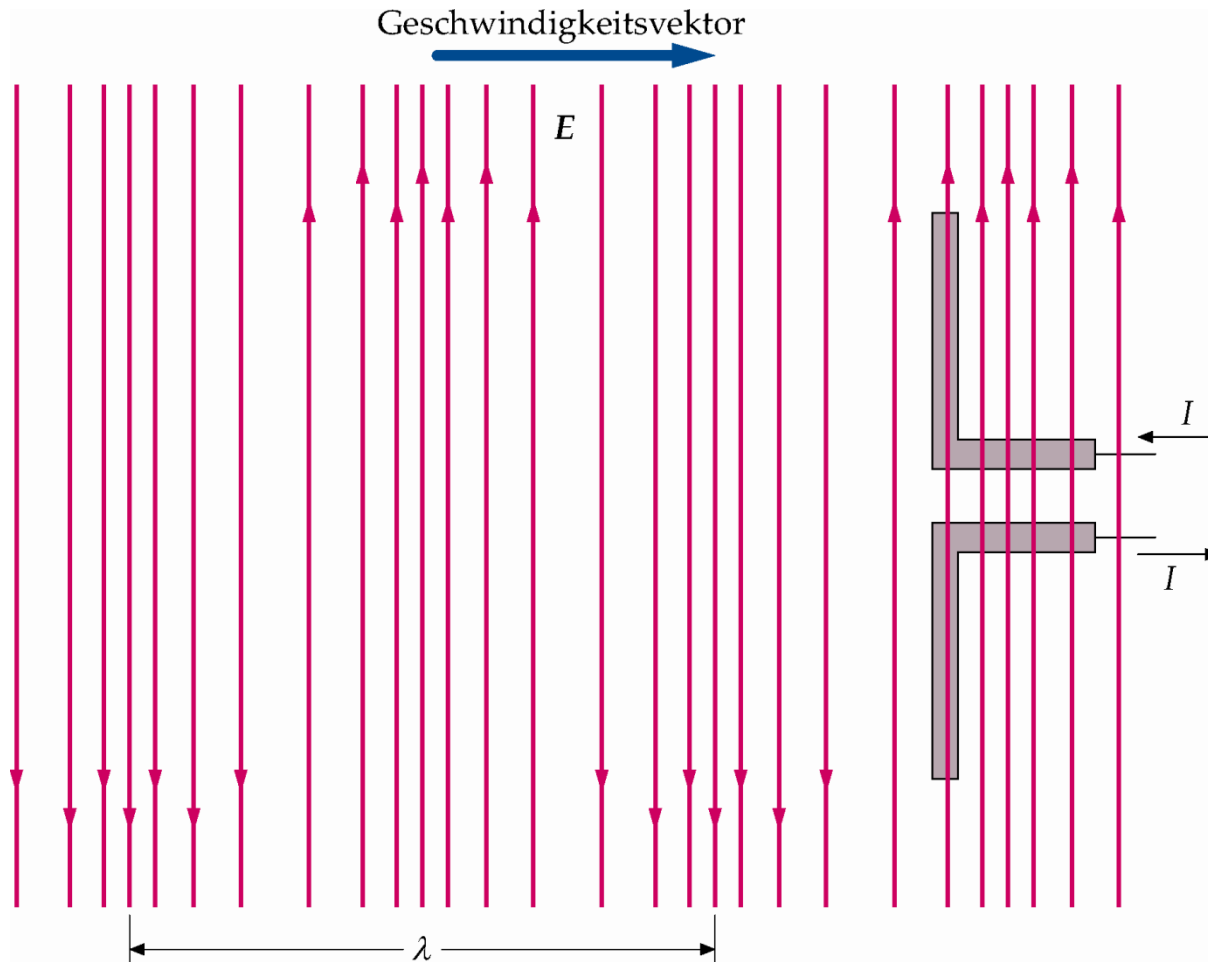


Linien des elektrischen (rot) und des magnetischen Felds (blau), die von einem oszillierenden elektrischen Dipol erzeugt werden.

Die Magnetfeldlinien bilden geschlossene Kreise, auf deren Achse sich die Längsachse des Dipols befindet.

Das Kreuzprodukt $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ zeigt in allen Punkten vom Dipol weg.

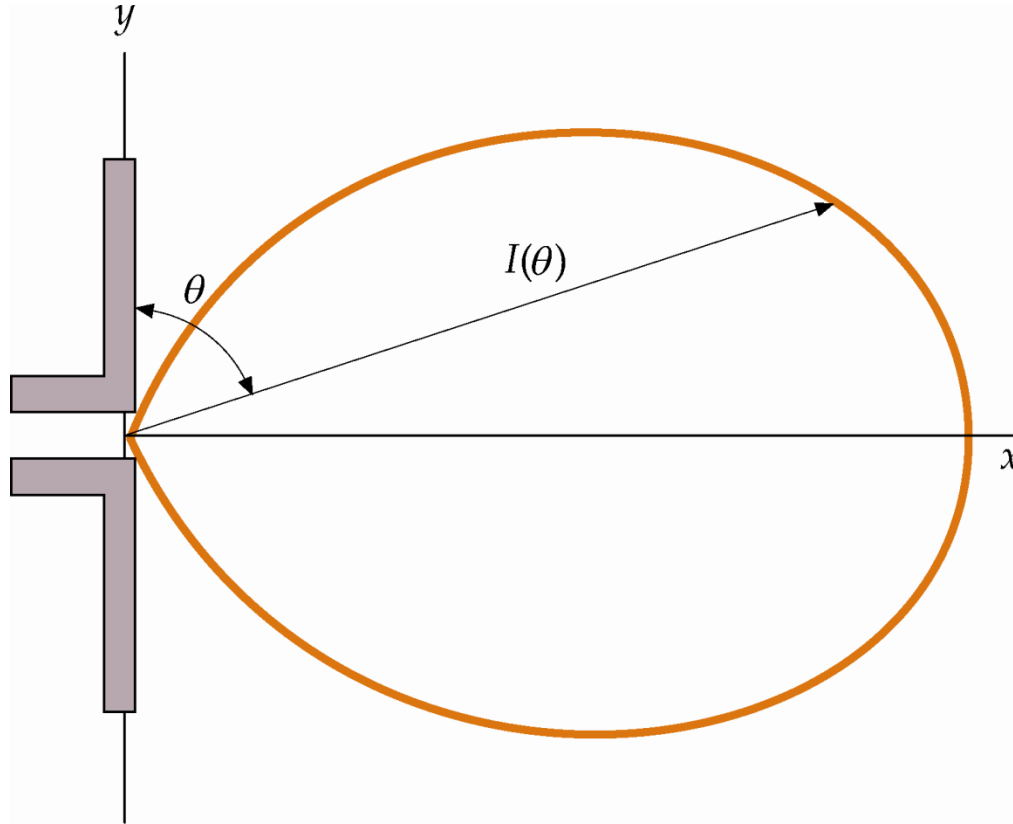
Funktionsprinzip Dipolantenne



Das alternierende elektrische Feld der ankommenden Welle erzeugt in der Antenne einen Wechselstrom.

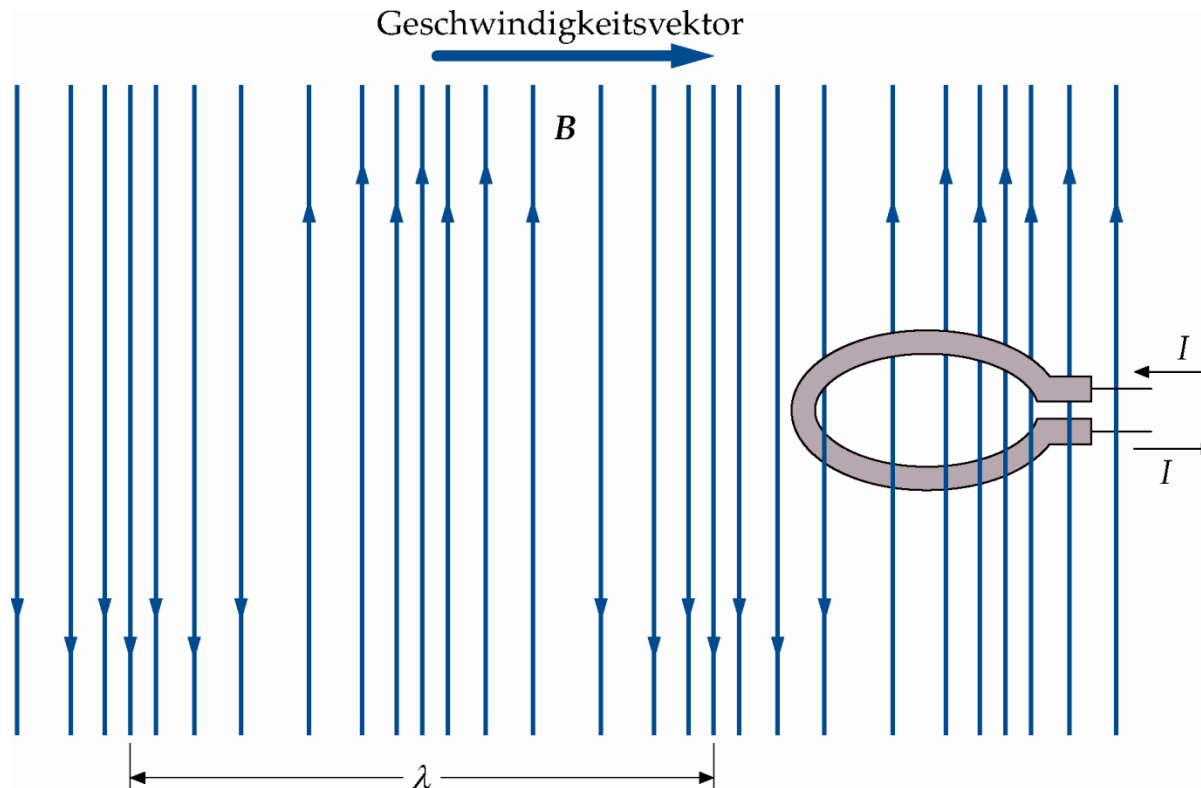
Die nicht eingezeichneten Magnetfeldlinien stehen senkrecht auf der Tafelebene.

Antennencharakteristik der Dipolantenne



Intensität der elektromagnetischen Strahlung einer Dipolantenne in Abhängigkeit von Θ :
 $I(\Theta)$ ist proportional zur Länge des Pfeils und wird maximal bei $\Theta=90^\circ$ (senkrecht zur Antenne), minimal hingegen bei $\Theta=0^\circ$ oder $\Theta=180^\circ$ (in Richtung der Antenne).


Funktionsprinzip Ringantenne




Das zeitlich veränderliche Magnetfeld der Strahlung erzeugt einen alternierenden magnetischen Fluss durch den Ring, wodurch in diesem ein Wechselstrom induziert wird.


Die nicht eingezeichneten elektrischen Feldlinien stehen senkrecht auf der Tafelebene.

Elektromagnetische Wellengleichung

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$


$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$


$$\text{rot}(\text{rot}(\vec{E})) = -\text{rot}\left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right)$$

$$\text{rot}\left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$


$$\text{rot}(\text{rot}(\vec{E})) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Die Wellenlänge

Als Wellenlänge, Symbol λ (griechisch: Lambda), wird der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase einer Welle bezeichnet. Dabei haben zwei Punkte die gleiche Phase, wenn sie sich in gleicher Weise begegnen, d. h. wenn sie im zeitlichen Ablauf die gleiche Auslenkung (Amplitude) und die gleiche Bewegungsrichtung haben.

Es gilt:

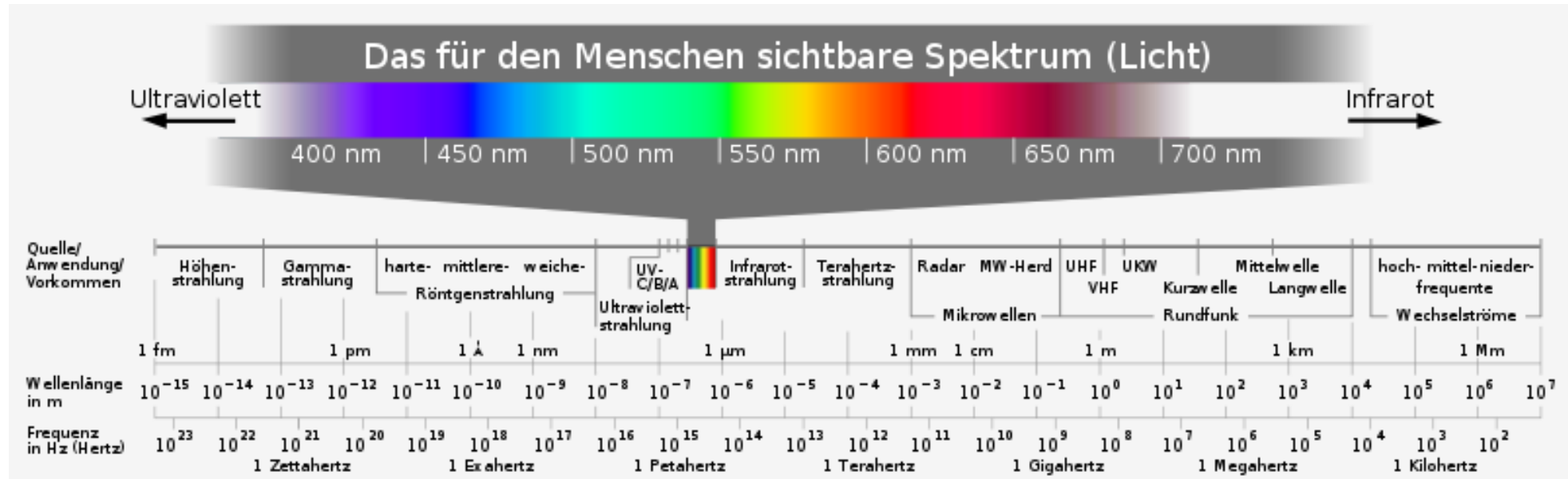
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad f = c/\lambda$$

wobei c die Ausbreitungsgeschwindigkeit (etwa $3 \cdot 10^8$ m/s im Vakuum) oder die Phasengeschwindigkeit und f die Frequenz der Welle ist.

Für die Wellenlänge in einem Medium gilt:

$$\lambda' = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} = \frac{c}{f} \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

Elektromagnetisches Spektrum



Als Elektromagnetisches Spektrum oder elektromagnetisches Wellenspektrum bezeichnet man die Gesamtheit aller elektromagnetischen Wellen, wenn an ihre Unterteilung in Bereiche wie etwa Licht, Radiowellen usw. gedacht ist.

Die Frequenzen liegen dabei meist um Größenordnungen auseinander.

Rundfunk-Frequenzen

Verfahren	Frequenzen	Wellenlängen
Langwellen:	30 kHz bis 300 kHz	1000 m bis 10.000 m
Langwellenrundfunk:	148,50 kHz bis 283,50 kHz	1058 m bis 2020 m
Amateurfunk:	135,70 kHz bis 137,80 kHz	2198 m Band
Mittelwellen:	300 kHz bis 3000 kHz	100 m bis 1000 m
Mittelwellenrundfunk:	526,5 kHz bis 1606,5 kHz	187 m bis 570 m
Kurzwellen:	3 MHz bis 30 MHz	10 m bis 100 m
Kurzwellenrundfunk:	3,2 MHz bis 26,1 MHz	11m bis 90m
CB-Funk:	26,565 MHz bis 27,405 MHz	11,1 m Band
Ultrakurzwellen:	30 MHz bis 300 MHz	10 m bis 1 m
UKW-Rundfunk:	87,5 MHz bis 108 MHz	2,78 m bis 3,43 m
Behördenfunk:	76,155 MHz bis 85,955 MHz	3,49 m bis
Amateurfunk:	144 MHz bis 148 MHz	2 m Band
Betriebsfunk:	146 MHz bis 174 MHz	1,72 m bis 2,05 m
Betriebsfunk:	440,00 MHz bis 470,00 MHz	0,64 m bis 0,68 m

Mobilfunk-Frequenzen

Verfahren		Frequenzen	Wellenlängen
DECT:		1880 - 1900 MHz	0,159 m
GSM Europa:	Uplink:	880 - 915 MHz	0,335 m
	Downlink:	921 - 960 MHz	0,319 m
GSM Europa:	Uplink:	1710 - 1785 MHz	0,171 m
	Downlink:	1805 - 1880 MHz	0,163 m
UMTS Europa:	Uplink:	1920 - 1980 MHz	0,154 m
	Downlink:	2110 - 2170 MHz	0,140 m
LTE Europa:	Uplink:	790 - 814 MHz	0,375 m
	Downlink:	838 - 862 MHz	0,353 m
LTE Europa:		2500 - 2690 MHz	0,115 m

ISM-Frequenzen

Als ISM-Bänder (Industrial, Scientific, and Medical Band) werden Frequenzbereiche bezeichnet, die durch Hochfrequenz-Geräte in Industrie, Wissenschaft, Medizin, in häuslichen und ähnlichen Bereichen genutzt werden können.

Frequenzbereich	Wellenlängen	Anwendung / Kommentar
13,553 MHz bis 13,567 MHz	22,1 m	Funketiketten
26,957 MHz bis 27,283 MHz	11,1 m	Modellbau-Fernsteuerungen
40,66 MHz bis 40,70 MHz	7,37 m	Modellbau-Fernsteuerungen
433,05 MHz bis 434,79 MHz	69,1 cm	Funk-Thermometer, Schalter
868 MHz bis 870 MHz	34,5 cm	Funk-Sensoren, zusätzliche Regelungen (DC, LBT)
902 MHz bis 928 MHz	32,8 cm	nur in Amerika
2,400 GHz bis 2,500 GHz	12,2 cm	WLAN, Bluetooth, ZigBee
5,725 GHz bis 5,875 GHz	5,27 cm	WLAN
24 GHz bis 24,25 GHz	1,24 cm	Radar-Bewegungsmelder

Short Range Devices

Short Range Devices (SRD, dt. Kurzstreckenfunk, Nahbereichsfunk) bzw. Low Power Device (LPD , Geräte mit geringer Sendeleistung) sind kurzreichweitige Jedermann-Funkanwendungen für die Sprach- oder Datenübertragung.

Die benutzten Funkgeräte müssen dabei zweifelsfrei die einschlägigen nationalen gesetzlichen Bestimmungen einhalten, die ihrererseits wiederum teilweise Bezug auf internationale Standards nehmen. Die Einhaltung dieser Bestimmungen dokumentiert der Inverkehrbringer durch Anbringen des CE-Kennzeichens. Auf Verlangen muss er in der Lage sein, eine Konformitätserklärung dafür vorzuweisen.

Die Konformitätserklärung ist eine schriftliche Bestätigung am Ende einer Konformitätsbewertung, mit der der Verantwortliche (z. B. Hersteller, Händler) für ein Produkt, die Erbringung einer Dienstleistung oder eine Organisation (z. B. Prüflabor, Betreiber eines Qualitätsmanagementsystems) verbindlich erklärt und bestätigt, dass das Objekt (Produkt, Dienstleistung, Stelle, QMS) die auf der Erklärung spezifizierten Eigenschaften aufweist. Die Spezifizierung der Eigenschaften erfolgt in der Regel durch die Angabe von Normen, die das Objekt einhält.

Angabe der Sendeleistung

Prinzipiell erfolgt die Angabe der Sendeleistung P in Watt (W) bzw. kW oder mW.

Manchmal (insbesondere im Bereich WLAN und Bluetooth) sieht man jedoch auch die Angabe der Sendeleistung in dBm.

dBm (Dezibel Milliwatt) ist die Einheit des Leistungspegels L_P , der das Verhältnis der Sendeleistung im Vergleich zur Bezugsleistung von 1 mW (Milliwatt) beschreibt.

$$L_P(\text{dBm}) = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1 \text{ mW}} \right) \qquad P(\text{mW}) = 10^{\left(\frac{L_P(\text{dBm})}{10} \right)} \cdot 1 \text{ mW}$$

$$0 \text{ dBm} = 1 \text{ mW}$$

$$10 \text{ dBm} = 10 \text{ mW}$$

$$20 \text{ dBm} = 100 \text{ mW}$$

$$30 \text{ dBm} = 1 \text{ W}$$

Angabe der Empfangsempfindlichkeit

Prinzipiell erfolgt die Angabe der Empfangsempfindlichkeit in Watt (W) bzw. mW.

Manchmal (insbesonderen im Bereich WLAN und Bluetooth) sieht man jedoch auch die Angabe der Empfangsempfindlichkeit in dBm bzw -dBm.

dBm (Dezibel Milliwatt) ist die Einheit des Leistungspegels L_P , der das Verhältnis der Leistung im Vergleich zur Bezugsleistung von 1mW (Milliwatt) beschreibt.

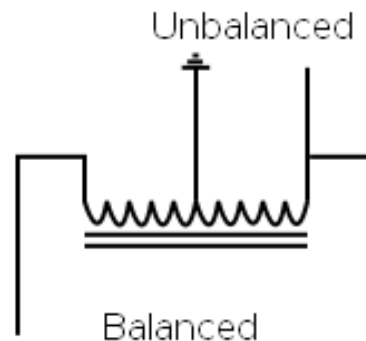
- 0 dBm = 1 mW
- 10 dBm = 0,1 mW
- 20 dBm = 0,01 mW
- 30 dBm = 1 μ W
- 40 dBm = 0,1 μ W
- 50 dBm = 0,01 μ W
- 60 dBm = 1 nW
- 70 dBm = 0,1 nW
- 80 dBm = 0,01 nW
- 90 dBm = 1 pW = 10^{-12} W

Symmetrisches und Asymmetrisches Signal

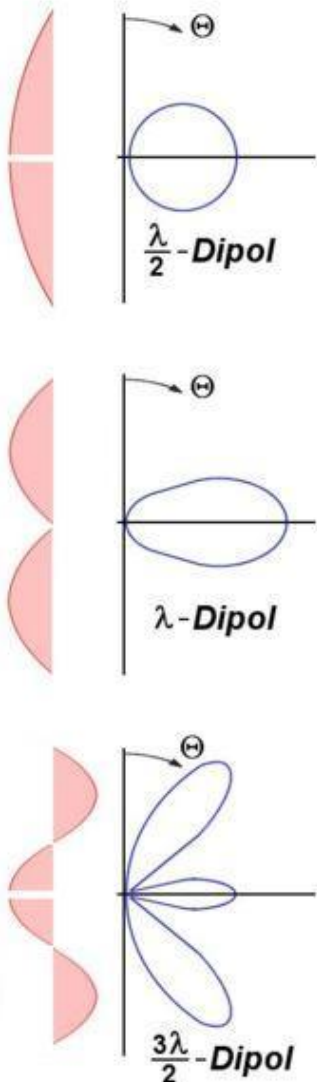
Ein **symmetrisches** (balanced) Signal bedeutet, dass zwei gegen Massepotential gleichgroße gegenphasige Wechselspannungen vorliegen, beispielsweise bei Zweidraht-Leitungen und symmetrischen Antennen.

Das **asymmetrische** (unbalanced) Signal (eine Leitung auf Masse) wird meist mit einem Koaxialkabel übertragen.

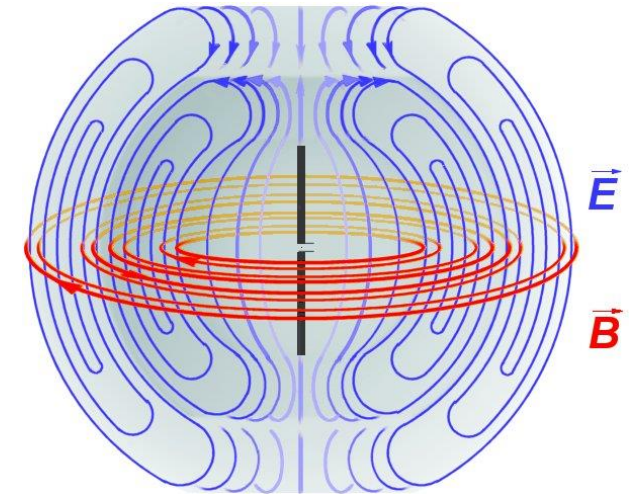
Ein **Balun** (von engl. balanced-unbalanced) ist in der Elektrotechnik und Hochfrequenztechnik ein Bauteil zur Wandlung zwischen einem symmetrischen Signal und einem asymmetrischen Signal. Vor allem in der Hochfrequenztechnik wird auch die Bezeichnung Symmetrierglied verwendet.



Die Dipol-Antenne



Eine Dipolantenne ist eine gestreckte Antenne, die aus einem (ggf. gefalteten) geraden Metallstab oder Draht besteht, der auch geteilt sein kann. Sie wandelt hochfrequenten Wechselstrom und elektromagnetische Wellen ineinander um, kann also sowohl zum Senden als auch zum Empfangen eingesetzt werden.



Das Prinzip der Dipolantenne geht auf den Physiker Heinrich Hertz zurück, der als erster elektromagnetische Wellen experimentell nachweisen konnte. Sein Dipol (Hertzscher Dipol), der wesentlich kleiner als $\lambda/8$ war, hat nur noch theoretische Bedeutung. Die Verlängerung auf etwa $\lambda/2$ führt zu einer Resonanz, die die Anpassung der Antenne an die Speiseleitung erleichtert und den Wirkungsgrad erhöht.

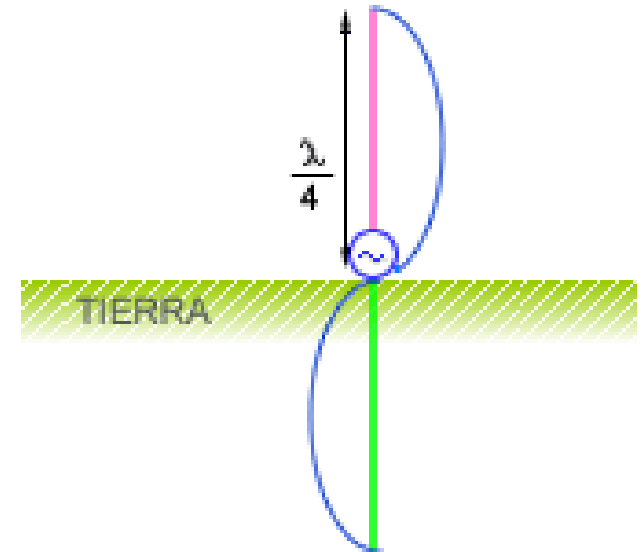
Die Stabantenne

Eine **Marconi-Antenne** ist eine senkrecht montierte Stabantenne der Länge $\lambda/4$.

Befindet sich der Fußpunkt nahe der Erdoberfläche, bilden das untere Stabende und die Erde die Einspeisungspunkte. Die Erde dient als "Gegengewicht" und ist am Außenleiter des speisenden Koaxialkabels angeschlossen.

Soll eine Marconi-Antenne in größerem Abstand zur Erde betrieben werden, stellt man ihr Gegengewicht, die Groundplane, durch eine geerdete Platte oder durch kreuz- bzw. sternförmig angeordnete Stäbe her.

Bei Kfz-Antennen bildet die metallische Karosserie das leitende Gegengewicht. Stabantennen vieler Radios sind vom Prinzip her ebenfalls $\lambda/4$ -Strahler, wobei oft das Gerätechassis als Gegengewicht fungiert. $\lambda/4$ -Strahler können wie auch andere Dipolantennen mechanisch verkürzt werden, indem man nahe dem Fußpunkt eine Induktivität einfügt.



Die Rahmenantenne

Eine Rahmenantenne ist eine meist auf einem Rahmen mit möglichst großem Querschnitt (bis ca. 30 cm) montierte Luftspule, welche als Empfangsantenne für Längst-, Lang- und Mittelwellen verwendet wird. Sie gehört zu den magnetischen Antennen, erzeugt oder empfängt also primär den magnetischen Teil des elektromagnetischen Feldes.

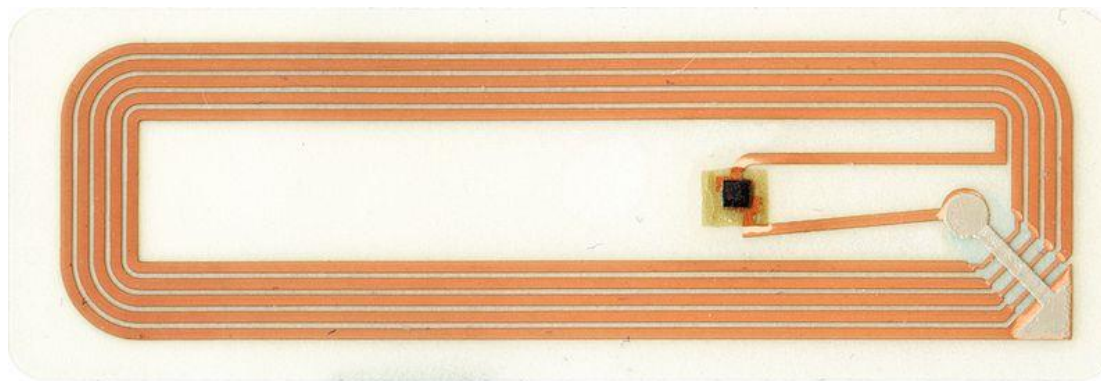


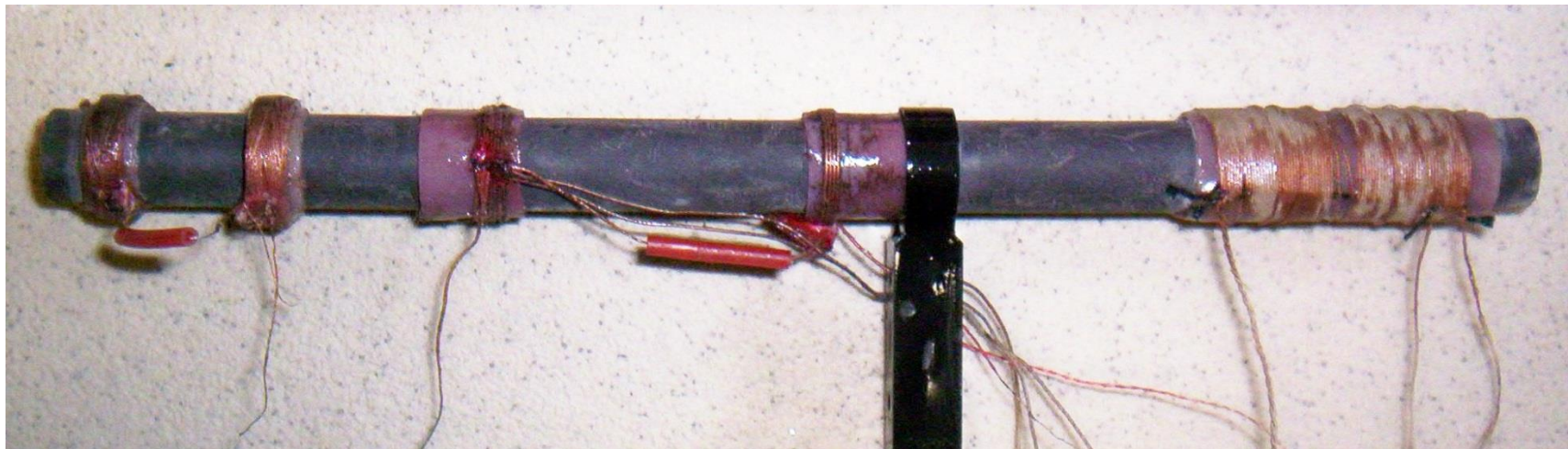
Abbildung: 13,56 MHz RFID Transponder



Die Ferritstabantenne

Als Ferritstabantenne oder Ferritantenne bezeichnet man eine induktive Antenne (magnetische Antenne) bei der eine Spule aus isoliertem Schalt draht oder Hochfrequenzlitze auf einem Ferritstab aufgebracht ist. Die Anordnung eignet sich für den Empfang von Längst-, Lang-, Mittelwellen oder gegebenenfalls auch Kurzwellen und für Sonderanwendungen in der Telekommunikation gelegentlich auch bei UKW-Signalen.

Abbildung: Ferritstabantenne mit Spulensatz für Lang-, Mittel- und Kurzwelle.



Antennengewinn

Der Antennengewinn ist ein Maß für die Richtwirkung und den Wirkungsgrad einer Antenne. Er ist das Verhältnis der in Hauptrichtung abgegebenen Strahlstärke bezogen auf die in alle Richtungen gleiche (isotrope) Strahlstärke eines angenommenen verlustlosen Kugelstrahlers gleicher Speiseleistung, der definitionsgemäß einen Antennengewinn von 0 dBi hat.

Hochempfindliche und hochleistungsfähige Antennen sind immer stark richtungsempfindlich, in anderen als der Hauptrichtung wird die Abstrahlung bzw. der Empfang stark unterdrückt. Mit ihnen kann man weiter entfernte Sender bzw. Empfänger erreichen. Typische Richtantennen sind die Parabolantenne, umgangssprachlich auch als „Satellitenschüssel“ bezeichnet, und die Yagi-Uda-Antenne wie sie beispielsweise für terrestrisches Fernsehen verwendet wird.

Der Antennengewinn wird in der Regel in der Hilfsmaßeinheit Dezibel (dB) angegeben.

$$\text{Gewinn in dB} = \frac{g}{\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\text{Antenne}}}{P_{\text{Bezugsantenne}}} \right)$$

Beispiele für Antennengewinne

$\lambda/2$ -Dipol (Halbwellendipol): 2,2 dBi bzw. 0 dBd (Wellenwiderstand 73Ω)

Marconi-Antenne (Stabantenne): 0 dBd (Wellenwiderstand ca. 36Ω)

Faltdipol: ca. 3,7 dBi bzw. 1,5 dBd (Wellenwiderstand 240Ω)

BiQuad-Antenne: ca. 7,2...10,2 dBi bzw. 5...8 dBd (ohne Reflektor)

Patchantenne: Einzelnes Patch bis ca. 10 dBi bzw. 8 dBd.

Beverage-Langdrahtantenne ($L = 5 \dots 10 \cdot \lambda$): ca. 7-9,5 dBi bzw. 5-7 dBd

Wendelantenne: 10...18 dBd (abhängig von Zahl der Windungen)

Yagi-Antenne: ca. 3...13 dBd (abhängig von der Elementanzahl)

Logarithmisch-Periodische Dipol-Antenne: ca. 8...15 dBd
(abhängig von der Elementanzahl und Länge)

Parabolantenne: von 20 dBi bis weit über 70 dBi
(abhängig von Frequenz und Durchmesser)

Äquivalente isotrope Strahlungsleistung

Die Äquivalente isotrope Sendeleistung (engl. equivalent isotropically radiated power, EIRP oder e.i.r.p.) ist das Produkt der in eine Sendeantenne eingespeisten Leistung multipliziert mit deren Antennengewinn (relativ zu einem Isotropstrahler). Wenn keine Richtung angegeben wird, gilt der Wert für die Hauptstrahlrichtung der Sendeantenne, in der gleichzeitig ihr Antennengewinn am größten ist.

$$EIRP = P_s \cdot G_i$$

P_s : in die Antenne eingespeiste Leistung (in Watt)

G_i : Antennengewinn gegenüber einem Isotropstrahler (dimensionslos)

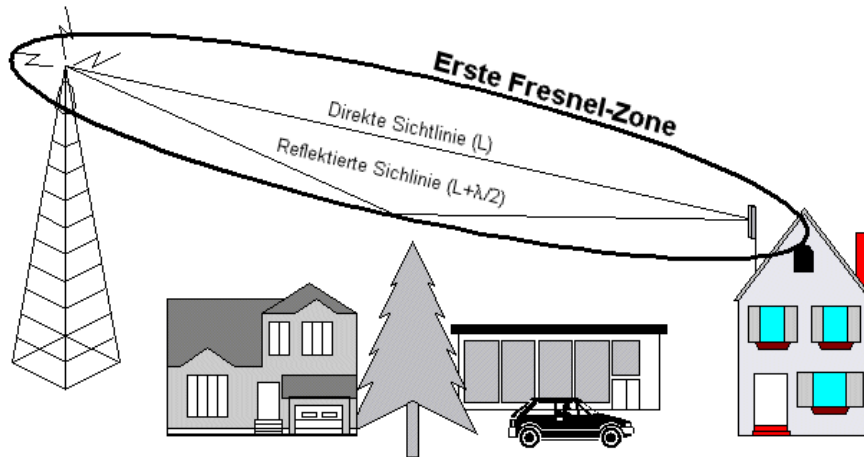
Als Bezugsantenne für den Antennengewinn wird hier der Isotropstrahler verwendet. Um die Bezugsantenne beim Antennengewinn kenntlich zu machen wird dieser meist in dBi angegeben, wobei das der Einheit dB angehängte "i" für die Bezugsantenne "Isotropstrahler" steht. Ein Isotropstrahler besitzt einen Antennengewinn von 1 (entsprechend 0 dBi).

Beispiel: maximale erlaubte Sendeleistung für WLAN in 5470-5725 MHz: 1000 mW EIRP

WLAN-Antenne mit extremer Richtwirkung



Fresnel-Zone



Die Fresnel-Zone ist ein gedachtes keulenförmiges Gebilde. Sie unterteilt sich in drei Teilbereiche, welche Erste, Zweite und Dritte Fresnel-Zone genannt werden.

In der Dritten Fresnel-Zone sollten nach Möglichkeit keine Hindernisse stehen, doch bedeutet ein Hindernis keine größeren Schwierigkeiten.

In der Zweiten Fresnel-Zone sind Hindernisse schon ein größeres Problem, bedeuten aber in der Regel eher wenig Probleme mit der Funkverbindung.

In der Ersten Fresnel-Zone sollten keinerlei Hindernisse stehen. Können sich in dieser Zone die Funkwellen nicht ungehindert ausbreiten, so kommt es durch Reflektionen der Wellen zu Auslöschungen.

Strahlungsdruck

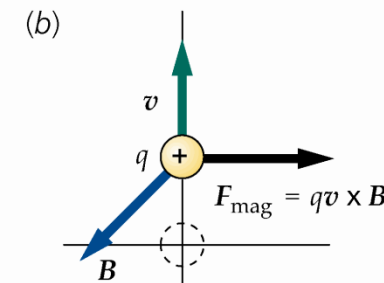
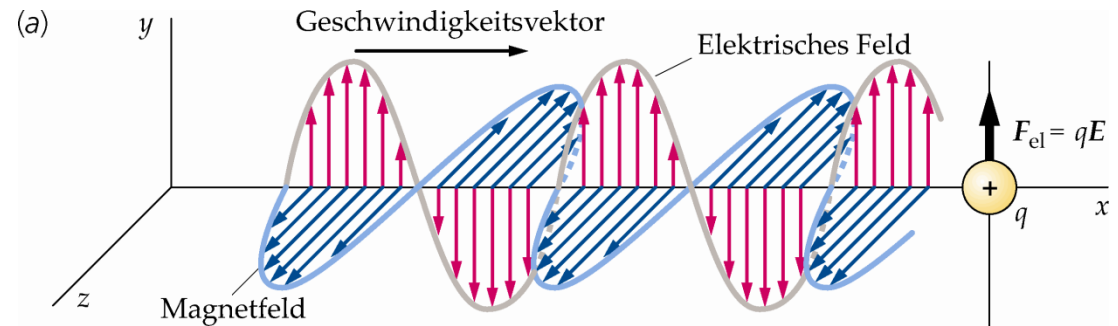
Eine elektromagnetische Welle trifft entlang der x-Achse auf eine zu Beginn ruhende Punktladung.

a) die elektrische Kraft $q \cdot \mathbf{E}$ beschleunigt die Ladung in +y Richtung.

b) Zeigt die Geschwindigkeit v der Ladung in +y Richtung, so beschleunigt die magnetische Kraft $q \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ die Ladung in die Ausbreitungsrichtung der Welle (+x Richtung).

Der von einer elektromagnetischen Welle übertragene Impuls \mathbf{p} ist gleich der von der Welle mitgeführten Energie \mathbf{E}_{cm} , geteilt durch c .

Daraus lässt sich der Strahlungsdruck \mathbf{P}_S berechnen.



$$p = \frac{E_{cm}}{c} \quad P_S = \frac{I_{cm}}{c}$$

Aufgaben

1. Stellen Sie sich vor, Sie schweben 20 m von Ihrem Raumschiff entfernt im Weltraum und sind mit einem 1,0 kW Laser ausgerüstet. Wie lange dauert es, bis Sie das Schiff erreicht haben, wenn Sie den Laserstrahl direkt von Ihrem Ziel weg richten? Ihre Masse (einschließlich Raumanzug und Laser) betrage 95 kg.
2. In einem Laser sind Spiegel eingebaut, die die Strahlung zu 99,99% reflektieren.
 - a) Der Laser hat eine Ausgangsleistung von 15 W. Wie groß ist die mittlere Strahlungsleistung, die auf einen dieser Spiegel fällt?
 - b) Welche Kraft wird dabei durch den Strahlungsdruck ausgeübt?

Literatur und Quellen

Paul A. Tipler, Gene Mosca: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, Spektrum Akademischer Verlag, August 2009

<http://de.wikipedia.org/>



Technische Hochschule Deggendorf – Edlmaistr. 6 und 8 – 94469 Deggendorf