

Beim Begriff des „Feldes“ werden Nichttechniker zunächst an Flächen auf der Erde denken, die in einer bestimmten Weise genutzt werden: Felder in der Landwirtschaft, oder Fußballfelder, oder ... Allerdings ist der Feldbegriff auch in Physik und Technik häufig anzutreffen. Magnetfelder (Abgekürzt „H-Feld“) sind durch Erfahrungen mit Magneten und deren Kraftwirkung allgemein bekannt. Deutlich weniger gilt dies für die elektrischen Felder (abgekürzt „E-Feld“). Und obwohl täglich genutzt, ist bei technischen Laien die Kombination aus elektrischem und magnetischem Feld, das elektromagnetische Feld, sogar weitgehend unbekannt.

Oft wird der Feldbegriff auch dort verwendet, wenn man für bestimmte Wirkungen oder Erscheinungen keine „normale“ Erklärung hat. Die Schwerkraft zum Beispiel ist in der klassischen Vorstellung nach Newton eine offensichtliche Wirkung zwischen Massen, aber die Beschaffenheit eines Schwerkraftfeldes ist bisher nicht völlig geklärt. Zudem besteht seit Einstein und seiner Relativitätstheorie eine völlig andere Interpretation der Schwerkraft, deren Inhalte aber hier viel zu weit führen würden und die der Verfasser dieser Zeilen auch nicht verstanden hat ;-).

Auch wenn Wünschelrutengänger sich auf die Suche nach Wasseradern machen, glauben sie, mittels einer wie immer gestalteten Vorrichtung, deren „Kraftfelder“ erspüren zu können. Dass dies nicht funktioniert, wurde bereits mehrfach in ausgiebigen Versuchsreihen nachgewiesen. Dennoch ist der Glaube daran ungebrochen...

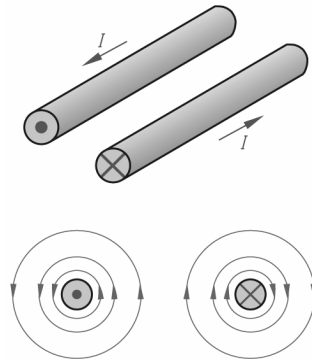
Zurück zu den bekannten physikalischen Feldern. Das bereits erwähnte magnetische Feld kann nicht nur mit Permanentmagneten, also magnetischen Stoffen, erzeugt werden, sondern ist ganz eng mit dem elektrischen Strom verknüpft: Das Magnetfeld ist ja bekannter Weise eine der Wirkungen des elektrischen Stroms. Daraus folgt: Wo Strom fließt, ist auch immer ein Magnetfeld. Wäre das nicht so, gäbe es keine Elektromagneten, keinen Elektromotor, keinen Lautsprecher und auch kein Mikrofon. Dass von einem Magnetfeld eine Kraft ausgeht, ist, wie schon erwähnt, aus der Alltagserfahrung bekannt. Allerdings kann man diese „Kraftbereiche“ – wie den elektrischen Strom selbst – nicht direkt sehen. Auch das Magnetfeld ist nur an seinen **Wirkungen** zu erkennen. Damit könnte man ein Feld vereinfacht so definieren:

Ein Feld ist der Raumbereich, in dem auf Objekte bestimmte Wirkungen (z.B. Kräfte) ausgeübt werden.

Daraus wird auch der Unterschied zu den oben erwähnten zweidimensionalen „Flächenfeldern“ deutlich. Die hier betrachteten Felder sind dreidimensional, d.h. Sie füllen immer einen **Raumbereich** aus.

Zurück zum Aspekt der Kraftwirkung in obiger Definition: Richtet sich ein beweglicher Magnet - z.B. eine Kompassnadel - aus, muss sie offenbar einem anderen äußeren Magnetfeld ausgesetzt sein. Da man das Magnetfeld nicht sehen kann, benutzt man dafür eine symbolhafte Darstellung. Man zeichnet **Feldlinien**, die die Richtung der Kraftwirkung angeben und – je nach Art des Feldes – eventuell auch einen Anfangs- und Endpunkt haben. Die Intensität der Kraftwirkung auf Objekte ist dabei ein Maß für die „Stärke“ des Feldes (Feldstärke) und wird durch die Liniendichte dargestellt.

Das Magnetfeld um einen geraden stromdurchflossenen Leiter kann man sich, wie im folgenden Bild zu sehen, als konzentrisch vorstellen. (Die Vorsilbe „kon“ bedeutet übrigens „gemeinsam“, was hier also besagt, dass die Kreise ein gemeinsames Zentrum haben. Wer mal klugscheißen will, merkt sich das ;-))

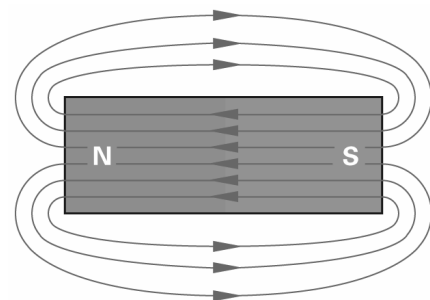


Darstellung der magnetischen Feldlinien um einen stromdurchflossenen Leiter.

Der Punkt bedeutet einen Stromfluss aus der Zeichenebene heraus, das Kreuz einen Stromfluss hinein.

Die Feldlinien verlaufen also in Kreisbahnen mit unterschiedlichem Radius um den Leiter und **sind stets in sich geschlossen**. Daher spricht man auch von einem **Wirbelfeld**. Dies rührt daher, dass es keinen einzelnen magnetischen Nordpol oder Südpol gibt, der seine Feldlinien in verschiedene Richtungen verteilt. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass Magnetpole immer paarweise auftreten. Dies lässt sich leicht durch einen einfachen Versuch nachweisen: Zersägt man einen Magneten, hat man ihn nicht in Nord- und Südpol getrennt, sondern zwei Magnete erzeugt, wahrscheinlich sogar noch ein paar hundert mehr, da die Sägespäne ja auch alle kleinen Magneten sind ;-). Die Feldstärke, also die Intensität der Wirkungen, nimmt mit steigendem Abstand ab. Will man dies zeichnerisch darstellen, dann sind die Kreise nahe am Leiter dichter und mit wachsender Entfernung in größerem Abstand zueinander.

Im Gegensatz dazu treten bei einem Permanentmagneten die Feldlinien aus einem Magnetpol heraus und in den anderen wieder ein. Auch hier kann man aber eine „Verdünnung“, also nachlassende Kraftwirkung, mit steigendem Abstand beobachten. Am Austrittspunkt der Feldlinien sind diese am dichtesten und daher die Kraftwirkung dort am höchsten. Wenn man sich das nebenstehende Bild genau ansieht, dann könnte einem auffallen, dass aus dem Nordpol N genauso viele Feldlinien heraustreten, wie am Südpol eintreten. Auch das ist ein Hinweis darauf, dass die magnetischen Feldlinien offenbar in sich geschlossen sind und nicht von Punkt zu Punkt reichen wie beim elektrischen Feld – was später hier noch zu sehen ist.



So genanntes „Wirbelfeld“ geschlossener Feldlinien um einen Dauermagneten

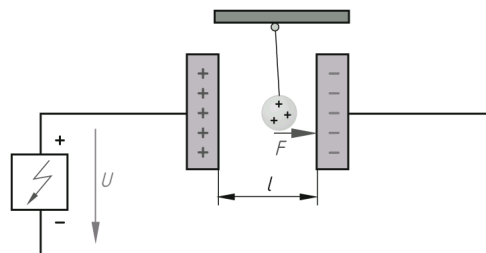
Einige grundsätzliche Eigenschaften von Feldern lassen sich also schon aus der Alltagserfahrung ableiten:

1. Um ein Feld zu erzeugen, muss **Energie** aufgewendet werden. Besteht irgendwo ein Feld dauerhaft, so ist in diesem also **Energie gespeichert, die von einem verursachenden System bereit gestellt wurde**. Ein Feld repräsentiert also auch einen **Raubereich mit darin gespeicherter Energie**.
2. Jedes Feld hat demnach eine **Ursache**.
3. Felder üben **Wirkungen**, z.B. Kraftwirkungen auf „passende“ Objekte in ihrem Bereich aus.
4. Die **Wirkungen** des Feldes nehmen mit dem **Abstand zur Ursache** ab.

Der Bruder, oder vielleicht auch die Schwester des magnetischen Feldes ist das **elektrische Feld** (E-Feld). Im Gegensatz zum Magnetfeld entsteht ein E-Feld bereits dort, wo Ladungen getrennt wurden und eine elektrische Spannung aber noch kein Stromfluss vorhanden ist. Eigentlich ist das verkürzt gesagt, denn umgekehrt ist die einfach messbare Größe „Spannung“ nur die Folge eines E-Feldes, das z.B. zwischen **unterschiedlich geladenen Körpern** entsteht. Grob gesagt, wächst die Stärke des E-Feldes mit der Anzahl der **unterschiedlichen** und damit **voneinander getrennten** positiven und negativen Ladungen, die ja immer das Bedürfnis haben, sich auszugleichen. Ist die Stärke des E-Feldes groß genug, fließt Strom sogar als plötzliche Entladung durch die Luft. Das beste und eindrucksvollste Beispiel hierfür ist der Gewitterblitz.

Das E-Feld bildet, sofern es zwischen zwei unterschiedlichen Ladungen besteht, im Gegensatz zum Magnetfeld, keine in sich geschlossenen Feldlinien. Die Feldlinien beginnen per Definition bei der **positiven Ladung** und enden an **negativen Ladungen**. Sie stellen also Linien dar, die Orte unterschiedlicher Ladung miteinander verbinden. Diese können weit im Raum verteilt sein, auch unendlich weit weg, weshalb man in diesem Fall von einem so genannten **Streufeld** spricht.

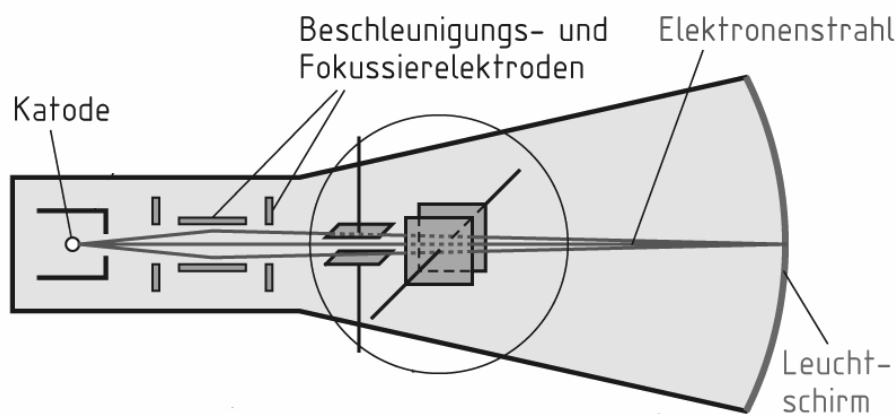
Während Magnetfelder auf **magnetisierbare Stoffe** (oder auf bewegte Ladungen in stromdurchflossenen Leitern – siehe später) Kräfte ausüben, wirkt das E-Feld also auf **geladene Körper**, wie im Versuch bereits zu sehen war.



Kraft auf einen geladenen Körper im E-Feld. Die zufällig geladene Kugel wird vom „Gegenpol“ angezogen

Dies bedeutet: Trägt ein Körper Ladungen, so ziehen sich **ungleichnamige Ladungen an und gleichnamige stoßen sich ab** – ähnlich den Nord- und Südpolen beim Magnetfeld.

Elektronen zum Beispiel, die ja die Träger der Elementarladung sind, werden daher von E-Feldern in ihrer Bewegung beeinflusst, weil die Felder eine Kraft auf die Ladung der Elektronen ausüben. Dieser Effekt wurde seit Jahrzehnten zum Beispiel in der Elektronenröhre ausgenutzt, zu der auch die Bildröhre gehört. Das Prinzip ist immer das gleiche: Ein Elektronenstrahl im Vakuum wird von der sogenannten Kathode (Elektronenquelle) zum Bildschirm gelenkt. Auf seinem Weg zum Schirm wird der Strahl in seiner Richtung durch elektrische Felder abgelenkt, weil das E-Feld, wie erwähnt, eine Kraft auf die (geladenen) Elektronen ausübt. Steuert man den Strahl entsprechend, kann man damit ein Bild darstellen. Die Bildröhre wurde inzwischen weitgehend von Flachbildschirmen, die nach einem ganz anderen Prinzip arbeiten, verdrängt.



Eine weitere Anwendung ist zum Beispiel die Rauchgasreinigung. Da Rauchpartikel ionisiert, also geladene Teilchen sind, lassen sie sich in Elektrofiltern mit Hilfe starker E-Felder aus dem Abgasstrom herausfiltern.

Die Kombination aus beiden Feldern ist das **elektromagnetische Feld**. Es hat die komplizierteste Theorie und entsteht z.B. dann, wenn Wechselströme im Spiel sind oder ganz grundsätzlich **Ladungen beschleunigt** werden, d.h. ihre bisherige Bewegung ändern, so zum Beispiel eben bei Wechselstrom. Aber auch Licht ist nichts anderes als eine elektromagnetische Welle, die allerdings „zufällig“ für unser Auge sichtbar ist.

Erstmals vermutet und beschrieben wurden elektromagnetische Wellen von **James Clerk Maxwell**, der von 1861-64 eine umfangreiche Theorie dazu entwarf, die bis heute Gültigkeit hat. Seine Verdienste sind nicht hoch genug einzuschätzen und stehen Einstein, wie dieser selbst sagte, kaum nach.



James Clerk Maxwell (Wikipedia)

Technische Wechselströme beginnen zum Beispiel im Energieversorgungsnetz bei einer Frequenz von 50Hz und enden bei Radaranwendungen im GHz-Bereich.

Die Einheit Hz = Hertz gibt die **Anzahl der Schwingungen pro Sekunde** an.

Sie ist zu Ehren des Physikers und Funkpioniers **Heinrich Hertz** benannt, dem 1886 erstmals ein experimenteller Nachweis der von Maxwell vorhergesagten Wellen gelang und wie Maxwell zu den bedeutendsten Physikern des 19. Jahrhunderts zählt.

Die bekannteste technische Anwendung des elektromagnetischen Feldes ist die Funktechnik mit all ihren Aspekten vom 'Handy' bis zum Rundfunk/Fernsehen. In einem elektromagnetischen Feld wechseln sich das elektrische und das magnetische Feld ständig ab. Außerdem findet ein 'Ablösen' des Feldes vom Leiter in den Freiraum statt, wofür bei Funkanlagen die **Antenne** zuständig ist. Ein elektromagnetisches Feld, das sich in den Freiraum ausbreitet, wird auch als **elektromagnetische Welle** bezeichnet, die **Energie durch den Raum** transportiert. Damit ist auch der grundsätzliche Unterschied zwischen einem statischen (ortsfesten, nicht veränderlichen) Feld und einer Welle klar: In einem statischen Feld ist Energie **gespeichert**.

Eine Welle **transportiert** Energie.

Die Grafik auf der folgenden Seite zeigt das weite Spektrum (Bereich) der elektromagnetischen Wellen.

Ergänzend dazu ist der Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Frequenz dargestellt.

Hierzu ein anschauliches Beispiel:

Wirft man einen Stein ins Wasser, gibt dieser einen Teil seiner Bewegungsenergie an das Wasser ab. Die bewegten Wassermoleküle „reißen“ ihre Nachbarn mit und daraus entsteht eine Welle, die Energie transportiert. Sie hat dabei, wie man leicht beobachten kann, Minima und Maxima, Wellenberg und Wellental. Der Abstand zwischen zwei Bergen oder Tälern ist dabei die Wellenlänge. Wie schnell dabei Berge und Täler aufeinander pro Zeiteinheit folgen, wird durch die Frequenz definiert.

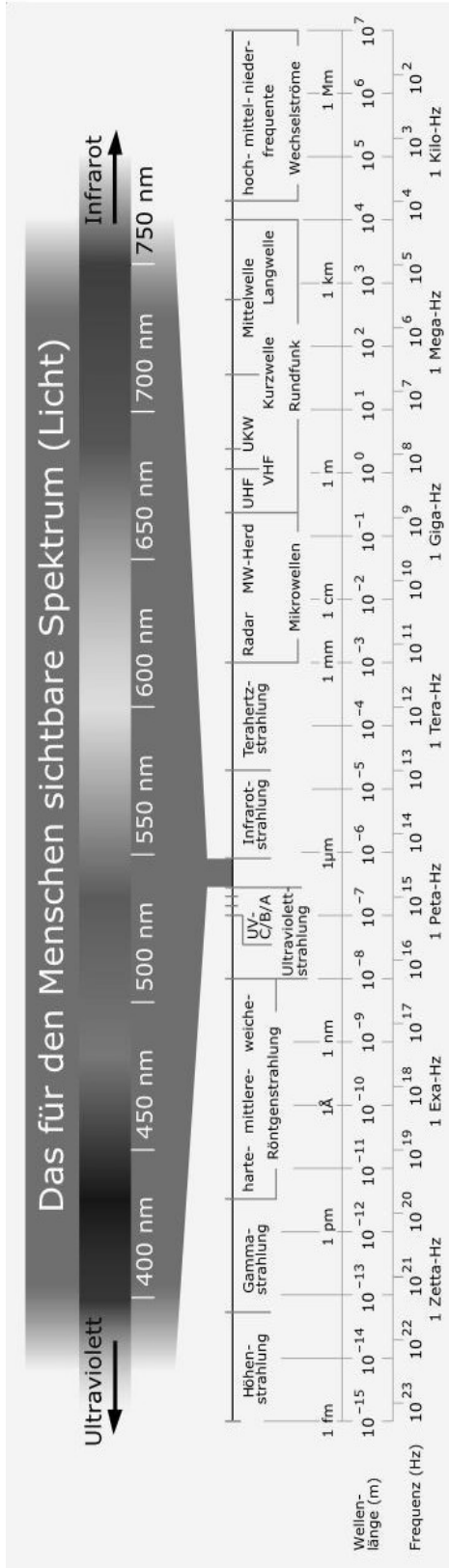


Heinrich Hertz (Wikipedia)

Frequenz: Anzahl der Schwingungen (bei periodisch wiederholten Vorgängen) pro Zeiteinheit (Sekunde)

Wellenlänge: Räumlicher Abstand der Intensitätsmaxima gleicher Wirkrichtung (positiv/negativ definiert, „Berg“ oder „Tal“) eines Energietransportes durch den Raum, also einer sich ausbreitenden Welle.

Berechnen lässt sich die Wellenlänge allgemein aus dem Quotienten der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Frequenz (siehe nächste Seite).



Ausbreitungsgeschwindigkeit v der Welle (je nach Medium unterschiedlich)

Wellenlänge (λ) = $\frac{\text{Anzahl der Schwingungen/Sekunde}}{(\text{= Frequenz } f)}$

Für elektromagnetische Wellen gilt:

$v = \text{Lichtgeschwindigkeit } (c) = 300.000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

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

Elektromagnetische Felder und Wellen werden oft für Kommunikationszwecke verwendet. Auch Licht ist übrigens nichts anderes als eine elektromagnetische Welle, allerdings mit sehr hoher Frequenz.

Was ist nun, nochmals vertieft, der eigentliche Unterschied zwischen statischen (sich nicht ändernden) rein magnetischen (H) oder elektrischen (E) Feldern und einer elektromagnetischen Welle?

- Statische E- und H-Felder existieren nur, **so lange auch die Ursache (Strom, Ladungsunterschiede) besteht**. In ihnen ist **Energie gespeichert**. Sie sind also an das „verursachende System“ gebunden. Verschwindet diese Ursache, bricht das Feld zusammen und die darin gespeicherte Energie kehrt in das verursachende System zurück.
- Die elektromagnetische Welle aber hat, im Gegensatz zum magnetischen oder elektrischen Feld, eine bereits erwähnte Eigenschaft: Es kann, einmal erzeugt und in den Freiraum abgestrahlt, auch **ohne die Quelle weiter existieren**, d.h. sich **weiter ausbreiten**. **Damit wird Energie an den Freiraum abgegeben und transportiert**, was in der Praxis bei gewollten Aussendungen über eine **Antenne** erfolgt.



Diese Fähigkeit, sich – einmal von der Quelle gelöst – fortwährend weiter auszubreiten erklärt auch, warum heute noch Licht von Sternen sichtbar ist, die oftmals gar nicht mehr existieren. Ebenso sind – mit natürlich abnehmender Intensität – alle von der Erde ausgesendeten Funksignale, sofern sie die Erdatmosphäre verlassen haben, auf einer endlosen Reise durch das Weltall. Die ersten deutschen Radiosendungen aus dem Jahr 1923 sind also nun (Stand 2024) 101 Lichtjahre (LJ) von der Erde entfernt und haben damit die erdnächsten Sterne Alpha Centauri (4,3LJ) und Sirius (8,5LJ) schon längst passiert.

Abschließend soll noch erwähnt werden, dass H-Felder, E-Felder und elektromagnetische Felder allesamt auch „natürlich“, also nicht-technisch erzeugt, auftreten. Das Magnetfeld der Erde, die starken E-Felder bei Gewitterlagen oder das weite Spektrum natürlicher elektromagnetischer Felder aus irdischen Blitzentladungen oder dem Weltraum sind hier die bekanntesten Beispiele. Im nächsten Kapitel wird nun noch der Versuch unternommen, die fundamentalen Gesetze der elektrischen sowie magnetischen Felder (Maxwellsche Gleichungen) und Wellen anschaulich darzustellen. Hierbei kann es, ausgehend vom bisher dargestellten, zu neuen und vielleicht sogar verblüffenden Erkenntnissen kommen

Die Maxwellschen Feld- oder Wellengleichungen fassen die wichtigsten Gesetze der magnetischen und elektrischen Felder zusammen. Sie gelten für alle Situationen, in denen eines der Felder auftritt.

Die vier Maxwellschen Feldgleichungen sind bekannt als:

1. Das Gaußsche Gesetz
2. Das Gaußsche Magnetismus-Gesetz
3. Das Gesetz von Faraday (Induktionsgesetz)
4. Das Gesetz von Ampère (Erweitertes Durchflutungsgesetz)

Es ist durchaus angebracht, hier von „Gesetzen“ zu sprechen, da die Felder sich genau so wie in ihnen beschrieben, verhalten. Abweichungen davon sind „verboten“ und repräsentieren physikalisch unmögliche Zustände.

Die ersten beiden Gesetze beziehen sich auf Fälle, in denen Ströme und Spannungen und damit auch die mit ihnen verbundenen Felder **zeitlich und räumlich konstant** sind. Das Faradaysche und das Gesetz von Ampere beziehen sich dagegen auf Situationen, in denen sich die Felder **räumlich und zeitlich ändern**. Sie sind für die Erklärung der Elektromagnetischen Wellen von entscheidender Bedeutung. Der Literatur nach können die ersten beiden Gesetze von den letzten beiden abgeleitet werden. Dies bedeutet, dass Gesetz 3 und 4 übergeordnet sind und alle denkbaren Situationen, so auch die Fälle 1 und 2, umfassen. Die folgenden Schreibweisen der Gleichungen zeigen übrigens nur eine von mehreren möglichen Formen der Darstellung.

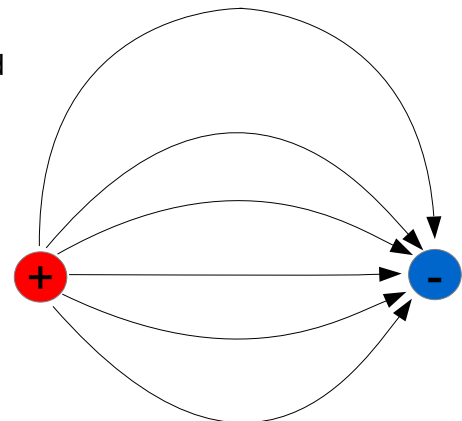
1. Das Gaußsche Gesetz

Die erste Maxwellsche Gleichung besagt, dass elektrische Ladungen der Ausgangspunkt und Ursache elektrischer Feldlinien sind. Sie beginnen stets bei positiven und enden bei negativen Ladungen, unabhängig davon, wie die Ladungen im Raum verteilt sind. Positive Ladungen werden als „Feldlinienquelle“ und negative als „Feldliniensenke“ definiert. Die Feldlinien weisen von der positiven zur negativen Ladung, können aber auch bis in das Unendliche reichen – wenn dort der passende Gegenpol ist. Daher spricht man auch von einem **Quellenfeld**.

Rechts sieht man ein beispielhaftes und nicht vollständiges Bild der elektrischen Feldlinien zwischen unterschiedlichen Ladungen

Man könnte sich die positive „Feldlinienquelle“ auch anschaulich als Ort vorstellen, aus dem z.B. Wasser herustritt und den Ort der negativen Ladung als den „Abfluss“.

Dabei kann es natürlich beliebig viele Zu- und Abflüsse geben, die überall verteilt sind.



Damit man das mal gesehen hat - die Gleichung sieht so aus:

$$\nabla * E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Was bedeuten nun die Formelzeichen? Was sagt die Gleichung in Worten aus?

$\nabla * E$ Ladungen sind Ursachen elektrischer Felder. Der Abstand der Feldlinien voneinander wächst mit dem Abstand von der verursachenden Ladung ...

ρ ... in Abhängigkeit der Dichte ρ elektrischer Ladungen pro Fläche...

ϵ_0 ... und der Elektrischen Feldkonstante ϵ_0 des freien Raumes

Der Ausdruck $\nabla * E$ wird in diesem Fall als so genannte „Divergenz“ bezeichnet, also ein Maß für das Hinausreichen, Auseinanderstreben in den Raum. Elektrische Feldlinien „verlassen“ dabei ihre Ladungen (ihre Quelle, Ursprung) und kehren nicht – im Gegensatz zu Magnetfeldlinien – zur Ursache zurück. Es macht dabei Sinn, dass das E-Feld umso stärker ausgeprägt ist, je mehr Ladungen pro Fläche vorhanden sind. Ist diese Divergenz positiv, kann man dies als Quelle ansehen, vor der die Feldlinien wegstreben. Bei negativer Divergenz handelt es sich dann um eine Senke, auf die die Feldlinien zulaufen.

Unter der Elektrischen Feldkonstante ϵ_0 oder auch „Permittivität“ des freien Raumes kann man sich vorstellen, dass dies der „Widerstand“ oder die „Durchlässigkeit“ des freien Raumes ist, den er der Ausbreitung der Feldlinien entgegen setzt. Dass dies den Aufbau des Feldes beeinflussen muss, ist naheliegend.

Es handelt sich dabei um eine **Naturkonstante** mit dem Wert $8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm.

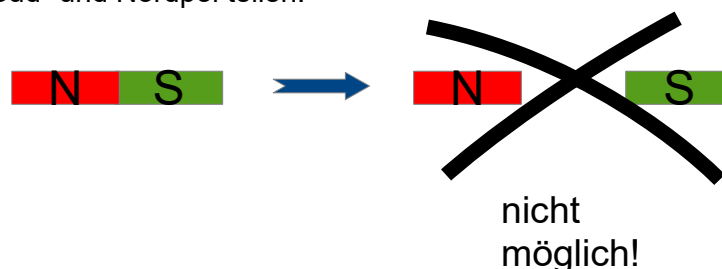
Man ahnt hier schon eventuell, dass sich dieser „Widerstand“ je nach Material ändert, was in der Tat der Fall ist und mit der „relativen Permittivität“ ϵ_r dann auch berücksichtigt wird.

Als gesamte Größe für ϵ ergibt sich damit für beliebige Materialien: $\epsilon = \epsilon_r * \epsilon_0$

ϵ_r ist dabei nur ein dimensionsloser Faktor, mit dem je nach Material multipliziert wird.

2. Das Gaußsche Magnetismus-Gesetz

Die zweite Gleichung besagt, wie schon erwähnt, dass es keine magnetischen Monopole gibt. Magnete lassen sich nicht in Süd- und Nordpol teilen!



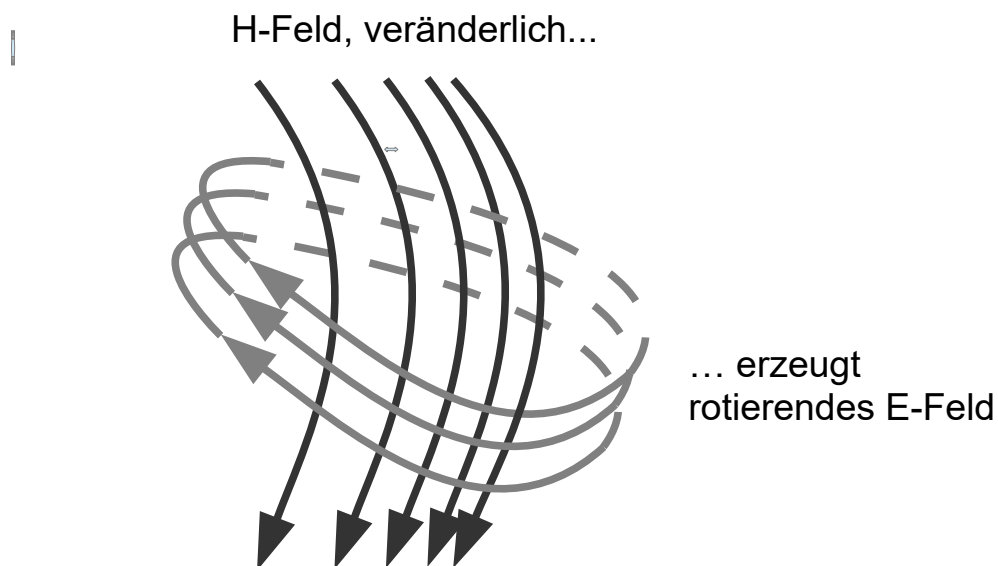
Die Gleichung sieht so aus: $\nabla * B = 0$

Was ist hier passiert? Da es keinen magnetischen Monopol, also keine „magnetischen Ladungen“ gibt, kann es auch keine „magnetische Ladungsdichte“ wie im elektrischen Fall als Feldursache geben. Magnetische Feldlinien streben daher nicht immer weiter, wie die Elektrischen Feldlinien, bis ins Unendliche auseinander (divergieren) und treten dann wieder irgendwo ein, sondern bilden, da die Magnetpole immer paarweise auftreten, in sich geschlossenen Linien und „kehren zur Ursache zurück“. Bei einem Magneten treten genauso viele Feldlinien aus dem Material aus, wie wieder eintreten – siehe dazu das Bild auf Seite 2. Daher ist die Divergenz Null. Man spricht daher auch von einem „Quellenfreien Feld“.

3. Das Gesetz von Faraday (Induktionsgesetz)

Die dritte Gleichung besagt, dass ein sich **zeitlich änderndes Magnetfeld** zu einem umlaufenden (rotierenden), die Magnetfeldlinien umfassenden, also in sich geschlossenen **E-Feld** führt. Dies ist nun fundamental anders als die bisherige Beschreibung in Gleichung 1, da dort von einem E-Feld ausgegangen wird, das von Ladungen verursacht wird und diese über Feldlinien verbindet. Die Konsequenz daraus ist schwerwiegend und bedeutet, dass E-Felder zwei Ursachen haben können:

1. Getrennte Ladungen
2. ein sich **zeitlich änderndes Magnetfeld**.



unvollständiges und symbolisches Bild der Verknüpfung zwischen H- und „rotierendem“ E-Feld mit in sich geschlossenen Feldlinien

Die Vorstellung, dass E-Felder also auch „körperlos“, nicht an Ladungen gebunden und nur durch die besagten sich ändernden Magnetfelder entstehen können, und plötzlich auch in sich geschlossen auftreten, wirkt magisch, ist aber ein fundamentales und erstaunliches Phänomen im Universum ;-). Allerdings: dass ein veränderliches Magnetfeld ein Elektrisches Feld erzeugt, ist ja eventuell bereits als **Induktion** bekannt – wenn nicht, dann siehe weiter hier im Text.

Die Gleichung dazu $\nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t}$

Der Ausdruck $\nabla \times E$ symbolisiert die **Rotation** des entstehenden Feldes. Man findet dies auch als „rot“ oder im Englischen als „curl“. Wer das von lockigen Haaren kennt, kann sich das schon mal sehr gut räumlich vorstellen ;-).

Bleibt man beim Vergleich mit Wasser, dann wäre diese Rotation eine **Ringströmung**, die in sich geschlossen verläuft, also weder Anfang noch Ende hat.

Der Quotient $\frac{\partial B}{\partial t}$ bedeutet eine „Änderung des Magnetfeldes pro Zeit“, was die Voraussetzung für die induktive Entstehung des E-Feldes ist.

Was folgt aus der Tatsache, dass magnetische Felder, die sich zeitlich ändern, ein (rotierendes) elektrisches Feld erzeugen? Die Konsequenz davon ist, dass elektrische Ladungen in diesem Feld (z.B. die beweglichen Elektronen in einem metallischen Leiter) eine **Kraft** erfahren, also bewegt werden, was einen Stromfluss bedeutet. Diesen Effekt nennt man, wie schon erwähnt, **Induktion**, worauf ja auch die Erzeugung elektrischer Energie in durch Drehbewegung angetriebenen Generatoren beruht.

4. Das Gesetz von Ampère

Die vierte und letzte der Maxwellschen Gleichungen besagt nicht nur, dass ein elektrischer Stromfluss ein Magnetfeld erzeugt. Sie erklärt auch, dass ein sich **zeitlich änderndes elektrisches Feld ein rotierendes Magnetfeld erzeugt**, welches das E-Feld umfasst, also um es herumgreift. Wem diese Formulierung nun irgendwie aus dem zuvor Gelesenen bekannt vorkommt, hat gut aufgepasst ;-). Tatsächlich ist das die genau umgekehrte Abhängigkeit der 3. Maxwellschen Gleichung, nur ist diesmal das Elektrische Feld Ausgangspunkt des Phänomens. Die Analogie lässt sich nun weiter fortführen, indem festgestellt werden kann, dass es zwei Möglichkeiten gibt, ein Magnetfeld zu erzeugen.

1. Durch einen elektrischer Stromfluss
2. Durch ein sich zeitlich änderndes Elektrisches Feld.

In der symbolischen Schreibweise der Gleichungen dargestellt:

$$\nabla \times B = \mu_0 j + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

Das sieht irgendwie schrecklich aus, bedeutet aber übersetzt nichts Anderes als:

- $\nabla \times B$ Ein magnetisches **rotierendes** Feld wird erzeugt, wenn ...
- $\mu_0 j$... **Ladungen bewegt werden** (Symbol j steht für die Stromdichte) unter Berücksichtigung der „Durchlässigkeit“ μ_0 für magnetische Feldlinien. Dieser Ausdruck repräsentiert also den „normalen alltäglichen“ Leiterstrom. μ_0 ist die „Permeabilität des freien Raumes“ und genau wie ε_0 eine Naturkonstante mit dem Wert $1,2566 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am.
- +
- Das Pluszeichen bedeutet, dass das Magnetfeld, wie schon beschreiben, **ebenso (+)** entsteht, wenn...
- $\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$... sich ein **elektrisches Feld zeitlich ändert**, wobei dabei wiederum die Permittivität, also die „Durchlässigkeit für elektrische Feldlinien“ ε_0 als auch die für die daraus entstehenden magnetischen Feldlinien μ_0 berücksichtigt werden muss. Hierbei handelt es sich um den vom Maxwell eingeführten und definierten „Verschiebungsstrom“, der kein „echter“ Leiterstrom ist, sondern das Magnetfeld nur aufgrund der Änderung des E-Feldes erzeugt.

Ob nun der Leitersrom oder der Verschiebungsstrom überwiegt, hängt also von der jeweiligen Situation an. Ein einfaches Beispiel zur Veranschulichung der beiden Anteile wäre ein Plattenkondensator, der an eine (Wechsel-) Spannungsquelle angeschlossen wird. Durch die Anschlussleitungen fließt der Leiterstrom und „durch“ den Kondensator der Verschiebungsstrom. Ganz anschaulich kan man sich vorstellen, dass die Ladungskonzentration auf der einen Platte des Kondensators zu einer gegenpoligen Verschiebung der Ladungen auf der gegenüberliegenden Platte führt. da die Ladungen Kräfte aufeinander ausüben.

Noch ein allgemeiner Hinweis:

Auch bei den kompliziertesten Gleichungen/Formeln handelt es sich immer um die symbolische „Kurzschreibweise“ einer Erkenntnis/eines Zusammenhangs zwischen Größen.

Daher ist es hilfreich jeweils den Hintergrund zu verstehen und zu fragen:

Was sagt das eigentlich aus?

Und welche Konsequenz hat das?

Auf dieses Thema bezogen: Was bedeutet dies nun schließlich für die Elektromagnetischen Wellen? Die Abhängigkeiten der Gleichungen 3 und 4 bedeuten ja, nochmals im Klartext, dass

- ein sich änderndes Magnetfeld ein Elektrisches Feld und
- umgekehrt ein sich änderndes Elektrisches Feld ein Magnetfeld hervorruft.

Nun überlegen wir, wann das jeweils erzeugte Feld seinerseits konstant oder veränderlich ist. Dazu ein anschaulicher Vergleich: Wenn wir in einem Fahrzeug sitzen, das konstant beschleunigt wird, also zu gleichen Zeiten die Geschwindigkeit um einen gleichen Betrag erhöht, spüren wir eine **konstante** Kraft, die uns in die Sitze drückt. Ist die Beschleunigung abwechselnd stärker und schwächer, so **ändert** sich auch die auf den Körper wirkende Kraft.

Dies bedeutet nun übersetzt auf die jeweils nach den Gleichungen 3 und 4 entstehenden Felder: Ist die **Änderungsrate**, also die Stärke der Veränderung des verursachenden Feldes pro Zeit jeweils **konstant**, ist auch das **resultierende Feld konstant**, also:

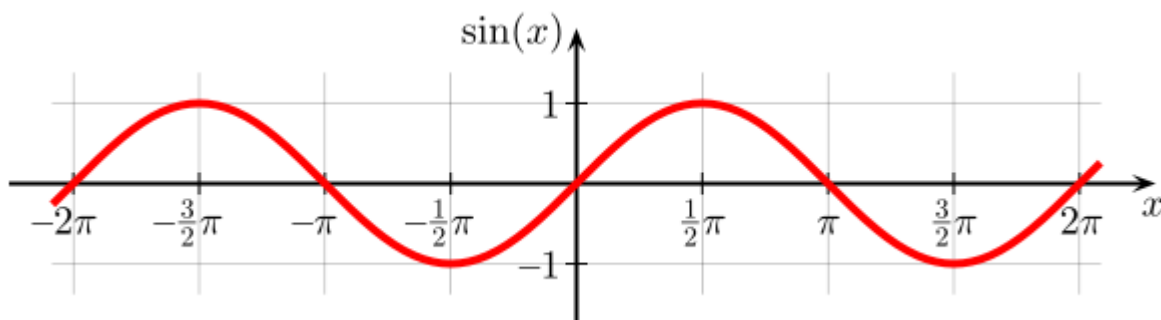
- Ein sich mit festem Betrag änderndes Magnetfeld erzeugt ein **konstantes** Elektrisches Feld und
- Ein sich mit festem Betrag änderndes Elektrisches Feld erzeugt ein **konstantes** Magnetfeld.

Weiter passiert nichts, der Vorgang ist damit abgeschlossen.

Was ist dann aber die Folge, wenn die Änderungsrate **nicht konstant** ist? Und unter welchen Bedingungen kann dies der Fall sein?

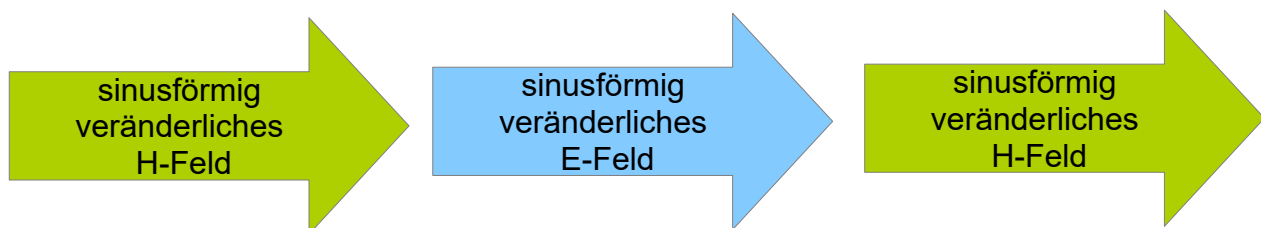
Wer jetzt schon an Wechselstrom denkt, ist auf dem richtigen Weg, denn Wechselstrom ist ja dadurch gekennzeichnet, dass er seinen Betrag zu jedem Zeitpunkt ändert.

Sich wiederholenden Änderungsraten oder Schwingungsvorgänge in der Natur haben oft einen sinusförmigen Verlauf.



Wenn sich aber bei einer angenommenen sinusförmigen Änderung des Stromes in einem Leiter auch das Magnetfeld sinusförmig, also zu jedem Zeitpunkt ändert, so bedeutet dies zusammengefasst:

- Ein sich sinusförmig änderndes Magnetfeld verursacht ein sich sinusförmig änderndes Elektrisches Feld.
- Das sich sinusförmig ändernde Elektrische Feld verursacht aber seinerseits ein sich sinusförmig änderndes Magnetfeld.
- Ein sich sinusförmig änderndes Magnetfeld verursacht aber wiederum ein sich sinusförmig änderndes Elektrisches Feld.
- usw...



Das ist es also, was letztlich zur Elektromagnetischen Welle führt. Und so erklärt sich auch, dass eine Antenne, auf der Ladungen sinusförmig hin und herbewegt werden, Ausgangspunkt einer Elektromagnetischen Welle sein kann, die in den Raum hinaus wandert und sich dort bis ans Ende des Universums und das Ende aller Tage ausbreitet...

Nun wäre noch die Frage zu klären, mit welcher **Geschwindigkeit v** sich diese Welle ausbreitet. Auch damit hat sich Maxwell beschäftigt und er fand schließlich folgende Gleichung für die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Elektromagnetischen Wellen:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Rechnet man das aus, kommt man tatsächlich auf den Betrag der Lichtgeschwindigkeit c von 299.792.458 m/s also ungefähr $3 \times 10^8 \text{ m/s} = 300.000 \text{ km/s}$. Ausprobieren!

Was sagt die Gleichung, wiederum gefragt, aber sachlich aus?

Sie sagt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit es Lichts im freien Raum umgekehrt proportional zu ϵ und μ ist, also zur „Durchlässigkeit“ oder dem „Widerstand“ gegen die Ausbildung der elektrischen und magnetischen Feldlinien.

Wie bereits zuvor erwähnt, ergibt sich bei Feldern in anderen Stoffen als Luft bzw. Vakuum $\epsilon = \epsilon_r * \epsilon_0$ sowie $\mu = \mu_0 * \mu_r$. In der obigen Gleichung würde also zu ϵ_0 noch ϵ_r und zu μ_0 noch μ_r hinzu kommen. Der Ausdruck im Nenner wird dadurch größer, was bedeutet dass der Wert für v kleiner wird.

Fazit: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist also auch vom Material abhängig, in dem sich die Welle ausbreitet. So beträgt z.B. die Geschwindigkeit von elektrischen Signalen in Antennenkabeln (Koaxialkabel) ca. 75% der Lichtgeschwindigkeit c . In Lichtwellenleitern, dem wichtigsten Übertragungsmedium für Informationen heute zutage überhaupt, ist die Geschwindigkeit auf ca. 66% von c reduziert.

Schlussatz: Wer das nun alles langweilig findet, legt sich einfach mal in die Sonne und genießt die elektromagnetischen Wellen, die auf seinen Körper treffen oder denkt bei der nächsten Nachricht auf dem Smartphone kurz an Maxwell und Hertz ;-).

✂ Fragen und Aufgaben:

1. Nenne eine Erklärung/Definition für den technisch-physikalischen Begriff 'Feld'.
2. Elektrotechnisch sind drei Arten von Feldern von Bedeutung. Ordne **tabellarisch**:
 - die Art des Feldes (E-, H-, ...)
 - seine jeweilige Ursache
 - wie und worauf es wirkt und
 - eine technische Anwendung, bei der das Feld auftritt
3. Nenne zwei allgemeine Eigenschaften von Feldern in Bezug auf ihre Intensität im Raum und die Art ihrer räumliche Ausdehnung.
4. Erkläre was passiert, wenn ein Permanentmagnet in zwei Teile zerlegt wird.
5. Erkläre, warum bewegte Elektronen in einem E-Feld von ihrer Bahn abgelenkt werden. Nenne eine technische Anwendung für diesen Effekt.
6. Ordne die folgenden Frequenzen den Bereichen zu:
2,5 kHz, 2,5 MHz, 99MHz, 9,5GHz, 110THz, 11EHz
7. Berechne die Wellenlängen des in den freien Raum abgestrahlten Signals von SWR3 (92MHz) sowie die eines Mobiltelefons (Annahme: GSM 900MHz).
8. Nenne zwei berühmte Physiker, ohne deren Erkenntnisse es den heutigen Stand der Technik nicht geben würde.
9. Fasse den Kern der vier Maxwellschen Gleichungen in jeweils einem Satz zusammen.
10. Berechne den Betrag von c aus ϵ_0 und μ_0 .
11. Für die Kommunikation mit Australien wird einmal eine Satellitenstrecke (Funk) und einmal eine Glasfaserleitung (optisches Übertragungssystem) verwendet.
Die Funkstrecke beträgt dabei von der Erde zum Satellit und zurück 80.000km.
Die Leitungslänge des optischen Systems beträgt 30.000km. Verzögerungszeiten durch die Signalverarbeitung in den Sendern und sonstigen technischen Einrichtungen werden hier nicht betrachtet.
Berechne, mit welchen Verzögerungszeiten („Signallaufzeit“) jeweils beim Telefonieren zu rechnen ist.
12. Die Voyager-Sonden wurden 1977 ins Weltall zur Erforschung der äußeren Planeten des Sonnensystems geschickt. Sie sind inzwischen (Stand 2024) $21E9$ km von der Erde entfernt und immer noch per Funk erreichbar und sogar steuerbar/umprogrammierbar..
Berechne die Laufzeit der Signale bis zu den Sonden.
Link zu einer sehenswerten und interessanten Doku:
<https://www.youtube.com/watch?v=2ZEQpQQc-58>

