

16

Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Dipol-Fernbereich

Ph12 Lernbereich 3: Elektromagnetische Wellen

Die Schülerinnen und Schüler **erklären auf der Grundlage einer graphischen Darstellung der Maxwellgleichungen in kausal korrekter Struktur das Zustandekommen der elektromagnetischen Schwingung in einem Dipol und die Ausbreitung der elektromagnetischen Welle in seinem Fernbereich. Sie reflektieren die Bedeutung von grundlegenden Naturgesetzen in der Physik.**

Voraussetzung: Elektromagnetische Wellen (Kapitel 11 im Buch)

Maxwellgleichungen

In den letzten Jahren haben Sie gelernt, dass die Newtonschen Gesetze von fundamentaler Bedeutung für die Mechanik sind, da sie grundlegende Prinzipien der Mechanik beschreiben. Auch bei der Betrachtung von elektrischen und magnetischen Feldern gibt es ähnlich grundlegende Prinzipien, die in den sogenannten Maxwell-Gleichungen zusammengefasst werden. Diese vier Gleichungen sind allerdings auf einem deutlich höheren mathematischen Niveau als die Newtonschen Gesetze. Wir wollen daher in erster Linie mithilfe graphischer Darstellungen die Kernaussagen der Gleichungen veranschaulichen.

1. Maxwellgleichung (Gaußsches Gesetz für elektrische Felder)

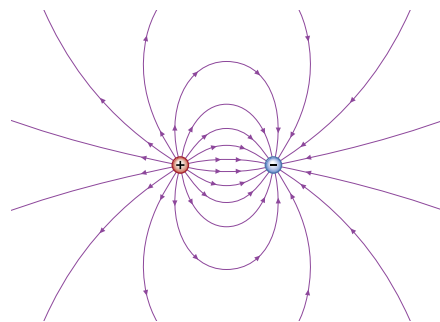
Die erste Maxwellgleichung hat die folgende Form:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Die erste Maxwellgleichung erklärt, dass elektrische Ladungen elektrische Felder erzeugen. Man bezeichnet die elektrischen Ladungen daher als Quellen des elektrischen Feldes. Positive Ladungen stellen den Startpunkt der Feldlinien dar, negative Ladungen den Endpunkt.

Exkurs – Mathematische Beschreibung:

$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}$ ist die Divergenz des elektrischen Feldes. Das ist ein Maß für die Quellen bzw. Senken des Feldes. Die Quellen eines elektrischen Feldes sind Ladungen – diese finden sich auf der rechten Seite in Form der Ladungsdichte ρ wieder, die noch durch die Naturkonstante ϵ_0 geteilt wird.



B1 | Feldlinienbild einer Dipolladung.

2. Maxwellgleichung (Gaußsches Gesetz für magnetische Felder)

Die zweite Maxwellgleichung hat die folgende Form:

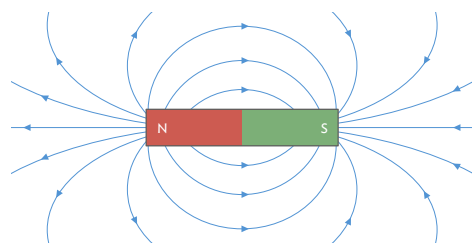
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Die Gleichung ist im Grunde das Gegenstück zur ersten Maxwellgleichung. Sie besagt, dass magnetische Felder quellenfrei sind, das bedeutet: Die Feldlinien des magnetischen Feldes haben keinen Anfang und kein Ende – sie bilden geschlossene Schleifen. Daraus folgt direkt, dass es keine magnetischen Monopole gibt – sonst wäre dieser Monopol eine Quelle der Feldlinien.

Exkurs – Mathematische Beschreibung:

$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}$ ist die Divergenz des magnetischen Feldes. Das ist ein Maß für die Quellen bzw. Senken des Feldes. Da ein magnetisches Feld quellenfrei ist, steht auf der anderen Seite der Gleichung die 0.

Die beiden ersten Maxwellgleichungen beschreiben also **statische** Felder.



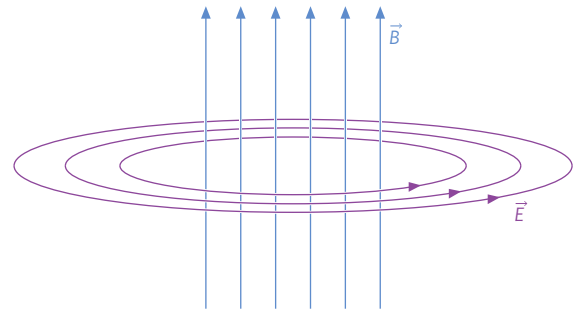
B2 | Feldlinienbild eines Stabmagneten.

3. Maxwellgleichung (Faradaysches Induktionsgesetz)

Die dritte Maxwellgleichung hat die folgende Form:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Die Gleichung besagt, dass ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld ein zirkulierendes elektrisches Feld erzeugt. Dieses elektrische Wirbelfeld ist so orientiert, dass es dieser Änderung entgegenwirkt. Dieses Prinzip kennen Sie bereits als Induktionsgesetz für eine stromdurchflossene Spule (vgl. Kapitel 7 im Buch).



B3 | Darstellung des Induktionsgesetzes für eine Verkleinerung des magnetischen Flusses mit der Zeit.

Exkurs – Mathematische Beschreibung:

$\vec{\nabla} \times \vec{E}$ beschreibt die Rotation des elektrischen Feldes. Der Operator $\vec{\nabla} \times$ ergibt die Wirbel eines Feldes. Auf der rechten Seite steht die Ableitung des magnetischen Feldes nach der Zeit, aber mit einem negativen Vorzeichen. Die rechte Seite repräsentiert also ein zeitlich veränderliches Magnetfeld, die linke Seite besagt, dass davon ein elektrisches Wirbelfeld erzeugt wird (vgl. B3) und das negative Vorzeichen gibt an, dass dieses entgegen seiner Ursache orientiert ist.

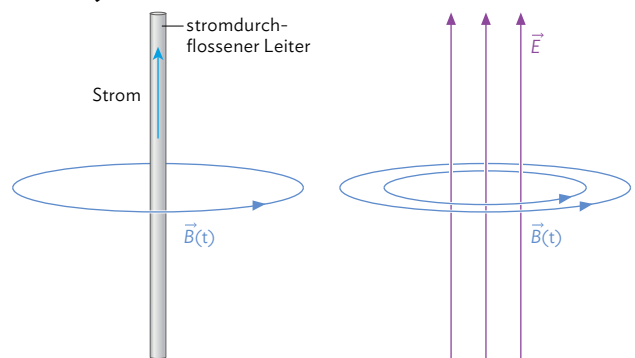
4. Maxwellgleichung (Amperesches Gesetz)

Die vierte Maxwellgleichung ist nochmal etwas komplizierter als die drei anderen und hat die folgende Form:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Die vierte Maxwellgleichung besagt, dass ein Magnetfeld erzeugt werden kann durch ...

1. das Fließen eines elektrischen Stroms (Amperesches Gesetz).
2. sich zeitlich ändernde elektrische Felder (Gegenstück zur dritten Maxwellgleichung).



B4 | Darstellung der vierten Maxwellgleichung. Links: Fall 1); Rechts: Fall 2) für eine Vergrößerung der elektrischen Feldstärke mit der Zeit.

Exkurs – Mathematische Beschreibung:

Hier geht es jetzt um ein magnetisches Wirbelfeld, da der „Rotations-Operator“ $\vec{\nabla} \times$ auf das Magnetfeld angewandt wird. Die rechte Seite besteht aus zwei Teilen:

1. $\mu_0 \vec{J}$ repräsentiert den Stromfluss.
2. $\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ beinhaltet die Ableitung des elektrischen Feldes nach der Zeit und beschreibt damit ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld.

Ein magnetisches Wirbelfeld kann also sowohl durch Stromfluss (z. B. durch einen Draht) als auch durch ein sich änderndes elektrisches Feld entstehen.

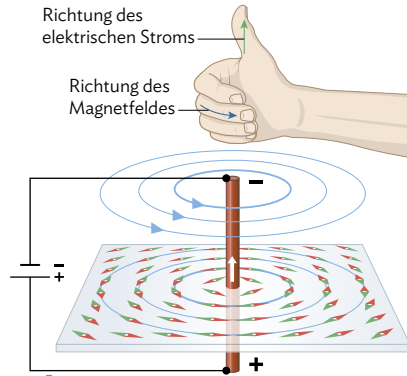
Die dritte und die vierte Maxwellgleichung beschreiben demnach **veränderliche** Felder und insbesondere, wie sich veränderliche elektrische und magnetische Felder gegenseitig erzeugen. Für diese gegenseitige Erzeugung ist kein Medium notwendig: Die dritte und vierte Maxwellgleichung gelten auch im Vakuum (hier ist dann der Stromfluss und damit $\vec{J} = 0$).

Durch die vier Maxwellgleichungen werden alle Prozesse beschrieben, die zur **Entstehung** oder **Veränderung elektrischer und magnetischer Felder** führen. Damit wird dann also auch die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Raum und deren Selbsterhaltung erklärt.

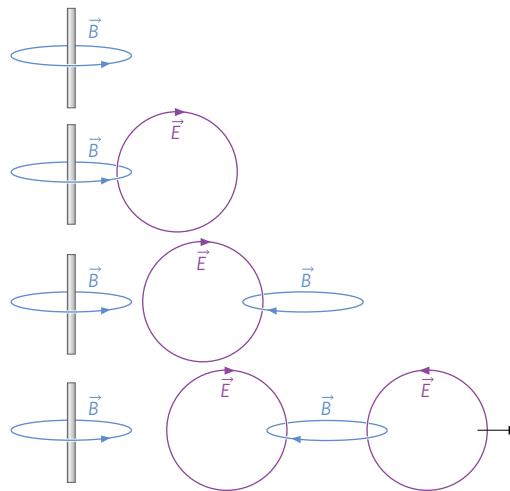
Erklärung der Dipolschwingung mithilfe der Maxwellgleichungen

Mithilfe der Maxwellgleichungen kann auch das Zustandekommen der elektromagnetischen Wellen im Dipol erklärt werden. Hierfür bietet sich eine Kausalkette an (vgl. Methode im Buch auf S. 234):

- Wird an den Dipol eine Wechselspannung angelegt, kommt es zu einer periodischen Verschiebung der Ladungen innerhalb des Dipols.
- Die Verschiebung der Ladungen führt dazu, dass sich das von den Ladungen ausgehende elektrische Feld (vgl. erste Maxwellgleichung) verändert.
- Die Änderung des elektrischen Felds führt gemäß der vierten Maxwellgleichung zu einem sich zeitlich verändernden Magnetfeld, das sich ringförmig um das elektrische Feld ausbreitet (vgl. Rechte-Faust-Regel in B5, die auf die vierte Maxwellgleichung zurückzuführen ist).
- Weil sich das Magnetfeld zeitlich verändert, entsteht senkrecht zum Magnetfeld wiederum ein elektrisches Feld (dritte Maxwellgleichung).
- Das elektrische Feld verändert sich durch die ständige Änderung des magnetischen Feldes ebenfalls ständig und führt wiederum zur Entstehung eines magnetischen Feldes (vierte Maxwellgleichung) usw.

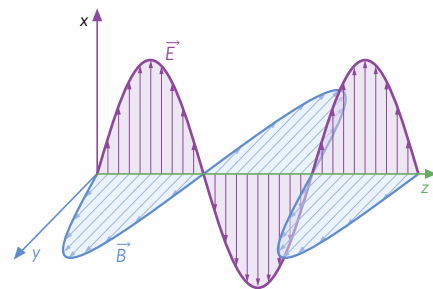


B5 Rechte-Faust-Regel für einen stromdurchflossenen Leiter.



B6 Ausbreitung der elektromagnetischen Felder des Dipols.

Im **Fernbereich** sind die elektromagnetischen Felder nicht mehr direkt an die momentane Ladungsverteilung im Dipol gebunden. Stattdessen erklären die dritte und vierte Maxwellgleichung, wie sich zeitlich veränderliche Felder gegenseitig erzeugen. Dadurch entsteht eine elektromagnetische Welle, die sich im Raum selbständig fortpflanzen kann. Die erste und zweite Maxwellgleichung machen klar, dass diese Felder im Fernbereich quellenfrei sind und als transversale Wellen auftreten.



B7 Elektromagnetische Schwingungen im Fernfeld eines Dipols, dargestellt als Transversalwellen.

Im Fernfeld eines Dipols stehen elektrisches und magnetisches Feld senkrecht zueinander und zur Ausbreitungsrichtung, sind zeitlich in Phase und bilden eine transversale elektromagnetische Welle.

Bedeutung grundlegender Naturgesetze

Wie eingangs erwähnt, stellen die Maxwellgleichungen die fundamentalen Prinzipien elektromagnetischer Felder dar – so wie die Newtonschen Gesetze die fundamentalen Prinzipien der Mechanik darstellen. Für die Physik sind solche grundlegenden Gesetze von entscheidender Bedeutung, da sie die Basis für das Verständnis von Naturphänomenen bilden und so die Entwicklung weitergehender Theorien ermöglichen, um auch komplexe Phänomene erklären zu können.

Die Bedeutung von grundlegenden Naturgesetzen lässt sich mithilfe folgender Begriffe zusammenfassen:

- **Vereinheitlichung:** Grundlegende Naturgesetze ermöglichen es, verschiedene physikalische Phänomene mit den gleichen Gesetzen zu beschreiben. Zum Beispiel vereinen die Maxwellgleichungen die Elektrizität und den Magnetismus zu einem einheitlichen Konzept des Elektromagnetismus. Sie zeigen, dass elektrische und magnetische Felder miteinander verbunden sind und sich gegenseitig beeinflussen.
- **Vorhersagekraft:** Naturgesetze erlauben es Forschenden, Vorhersagen über das Verhalten von komplexen Systemen zu treffen. Die Maxwellgleichungen können verwendet werden, um das Verhalten von unterschiedlichen elektromagnetischen Wellen, wie Licht oder Radiowellen, zu berechnen und vorherzusagen. Wichtig ist dabei aber, dass diese Vorhersagen auch stets experimentell überprüft werden. Falls sich dabei neue Erkenntnisse ergeben, können vorhandene Modelle und Theorien angepasst oder erweitert werden, um die Naturgesetze genauer zu beschreiben.
- **Konsistenz und Universalität:** Die grundlegenden Naturgesetze sind universell und gelten in einer Vielzahl von Situationen. Die Maxwellgleichungen sind also nicht nur auf bestimmte Materialien oder Bedingungen beschränkt, sondern lassen sich allgemein für alle elektromagnetischen Felder anwenden.

Arbeitsauftrag

- 1 | Betrachten Sie die folgenden Situationen. Begründen Sie mithilfe der Maxwellgleichungen, ob die Situationen physikalisch betrachtet möglich sind. Verdeutlichen Sie mithilfe einer Skizze, welche Rolle die jeweilige Maxwellgleichung dabei spielt.
 - a) Ein Elektron bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit im Vakuum und erzeugt dabei eine elektromagnetische Welle.
 - b) Durch einen Draht fließt ein konstanter Strom und erzeugt dabei ein statisches Magnetfeld, das sich nicht als elektromagnetische Welle im Raum ausbreitet.
 - c) Ein Permanentmagnet erzeugt ein statisches Magnetfeld, allerdings kein elektrisches Feld.
 - d) Durch einen Draht fließt ein Wechselstrom und erzeugt dabei eine elektromagnetische Welle, die sich im Raum ausbreitet.
- 2 | Beschreiben Sie unter Verwendung der Aussagen der Maxwellgleichungen mithilfe einer Kausalkette die physikalischen Prozesse, die notwendig sind, damit Sie ein Lied im Radio hören können. Gehen Sie dabei insbesondere auf folgende Schritte ein:
Abstrahlung des Signals durch die Sendeantenne; Ausbreitung des Signals; Empfang durch die Empfangsantenne; Umwandlung des elektrischen in ein akustisches Signal.
- 3 | Nennen Sie weitere grundlegende Naturgesetze, die Ihnen bisher begegnet sind. Recherchieren Sie nach Vorhersagen für komplexe oder schwer messbare Phänomene, die auf Basis grundlegender Naturgesetze getroffen werden konnten, und beschreiben Sie in dem Zusammenhang die Bedeutung des jeweiligen grundlegenden Naturgesetzes.
Hinweis: Ein Beispiel wäre die Untersuchung von Planetenbewegungen.