

Ein auf den ersten Blick überraschendes Experiment zur Induktion

Holger Hauptmann

Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe

Kurzfassung

Das Induktionsgesetz besagt, dass die in einer Leiterschleife induzierte Spannung proportional zur Änderung des magnetischen Flusses innerhalb der Leiterschleife ist. Um dies im Unterricht experimentell zu bestätigen, bringt man gewöhnlich eine Leiterschleife, die mit einem empfindlichen Volt- oder Amperemeter verbunden ist, in das Innere einer Spule mit zeitlich veränderlichem Magnetfeld.

Was passiert, wenn die Leiterschleife außerhalb der felderzeugenden Spule verläuft? Am Ort der Leiterschleife ist praktisch kein Magnetfeld mehr vorhanden. Im Experiment beobachtet man trotzdem eine, von der Form und Größe der Leiterschleife fast unabhängige Induktionsspannung. Obwohl das Induktionsgesetz dieses Ergebnis vorhersagt, ist es dennoch überraschend. Man könnte erwarten, dass sich der Draht der Leiterschleife dort befinden muss, wo sich das magnetische Feld ändert. Woher weiß die Schleife von der Änderung des Magnetfeldes in ihrem Inneren? Wie kommt die Energie von der Spule zum Draht der Leiterschleife?

Einleitung

Das Induktionsgesetz besagt, dass die in einer Leiterschleife induzierte Spannung proportional zur zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses innerhalb dieser Leiterschleife ist:

$$U_{ind} = -n \cdot \dot{\Phi}$$

Der magnetische Fluss Φ ist dabei das Integral der Flussdichte \vec{B} über die Fläche \vec{A} der Leiterschleife:

$$\Phi = \iint \vec{B} d\vec{A}$$

Eine zeitliche Änderung des magnetischen Flusses kann man daher auf zwei Arten realisieren:

- über eine Änderung der Fläche \vec{A} oder
- über eine Änderung des Magnetfeldes, d.h. eine Änderung von \vec{B} .

Um dies im Unterricht zu demonstrieren kann man zwei verschiedene Experimente durchführen:

- Ein Leiter bewegt sich in einem zeitlich konstanten Magnetfeld. Die Induktionsspannung wird durch die Änderung der Fläche erklärt.
- Eine ruhende Leiterschleife befindet sich in einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld. Hier kommt die Induktionsspannung durch die Änderung der Flussdichte zustande.

Zur Herleitung des Induktionsgesetzes wird manchmal mit dem ersten Experiment begonnen. Die Induktionsspannung wird dann zunächst mit Hilfe der Lorentzkraft erklärt, später wird gezeigt, dass man beide Erscheinungen mit einem Gesetz, dem Induktionsgesetz beschreiben kann.

Ein Induktionsexperiment

Im Folgenden soll das zweite Experiment genauer betrachtet werden.

Das sich zeitlich ändernde Magnetfeld erzeugt man z. B. mit einer langen Spule, die an eine Wechselspannung angeschlossen wird.

Zum Nachweis der induzierten Spannung in der Leiterschleife kann ein empfindliches Voltmeter für Wechselstrom verwendet werden.

Die Leiterschleife wird in das Innere der felderzeugenden Spule gebracht, Abb. 1. Wenn erwünscht, kann man leicht zeigen, dass die induzierte Spannung proportional zur Windungszahl der Leiterschleife und zu ihrer Fläche ist.

Es ist auf den ersten Blick einsichtig die Leiterschleife dort zu positionieren, wo sich das Magnet-

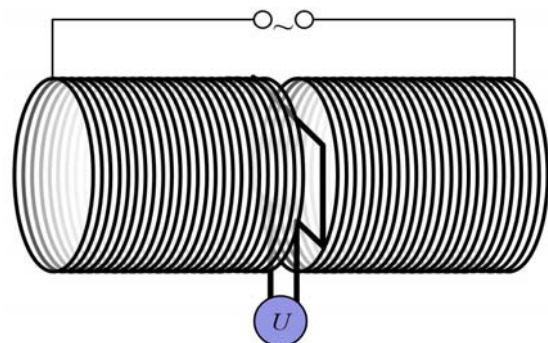


Abb. 1: Die Leiterschleife befindet sich im zeitlich veränderlichen Magnetfeld der Spule. Es wird eine Spannung induziert.

feld ändert, d. h. in der Feldspule. Ist das aber wirklich notwendig? Was passiert, wenn man die Leiterschleife in größerem Abstand um die felderzeugende Spule herumlegt, Abb. 2?

In diesem Bereich ist das Magnetfeld der Spule nahezu Null. Ist die Induktionsspannung jetzt verschwunden oder funktioniert der Versuch noch?

Schüler erwarten nach meiner Erfahrung eher, dass man nun keine Induktionsspannung mehr messen kann.

Tatsächlich funktioniert das Experiment noch, man erhält sogar eine größere Induktionsspannung als zuvor.

Der Wert der Induktionsspannung ist nahezu unabhängig davon, ob die Leiterschleife in einem großen oder kleinen Abstand um die Spule verläuft. Auch die Form der Leiterschleife spielt keine Rolle. Man kann sie beliebig verknautschen, die angezeigte Induktionsspannung ändert sich dabei nicht, Abb. 3a und 3b.

Der Grund ist, dass sich der magnetische Fluss auf die Fläche der felderzeugenden Spule konzentriert, und daher in allen Experimenten praktisch gleich ist. (Vorausgesetzt die Feldspule ist hinreichend lang. Dann kann man den Streufluss um die Spule vernachlässigen. Im Idealfall einer unendlich langen Spule ist gar kein Streufluss vorhanden. Dann ist am Ort der Leiterschleife auch kein Magnetfeld.)

Die Induktionsspannung hängt bei diesem Experiment nur noch von der Windungszahl der Leiterschleife ab, Abb. 3c. Windet man den Draht zweimal um die Spule erhält man die doppelte Induktionsspannung usw.

Fragen

Die Ergebnisse des Experimentes entsprechen den Vorhersagen des Induktionsgesetzes. Trotzdem bleiben einige Fragen zurück. Die wichtigste: Woher weiß die Leiterschleife, dass sich in ihrem Inneren das Magnetfeld ändert?

Oder mit einer anderen Formulierung: Wie können die Ladungsträger im Draht der Leiterschleife von einer Magnetfeldänderung in weitem Abstand beeinflusst werden?

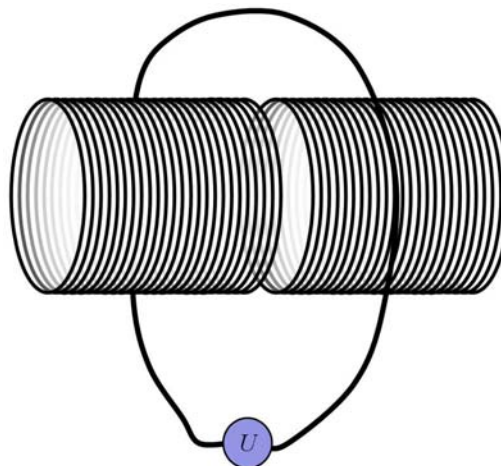


Abb. 2: Die Leiterschleife wird in großem Abstand außen um die Spule gelegt

Wie das Experiment gezeigt hat ist ja gerade nicht der Streufluss für die Induktionsspannung verantwortlich, d.h. mit der kleinen Änderung des Streuflusses am Ort der Spule ist die Induktionsspannung nicht zu erklären.

Die Antwort liefert die zweite Maxwellgleichung:

$$\oint \vec{E} d\vec{s} = \iint -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{A}$$

Tatsächlich ist das Induktionsgesetz nichts anderes als eine spezielle Formulierung dieser Gleichung: die linke Seite ist gerade gleich der Induktionsspannung, die rechte gleich der magnetischen Flussänderung $\dot{\Phi}$.

Die Gleichung sagt: in der Umgebung eines sich ändernden Magnetfeldes entsteht überall ein elektrisches Wirbelfeld, d. h. ein elektrisches Feld mit geschlossenen, ringförmig um das Magnetfeld verlaufenden Feldlinien. Das Feld ist auch ohne Leiterschleife vorhanden.

Bringt man die (über das Messgerät geschlossene) Leiterschleife in das Wirbelfeld fließt ein elektrischer Strom und man kann eine Spannung messen.

Das Experiment bestätigt die Maxwellgleichung und ist ein Nachweis für das elektrische Wirbelfeld.

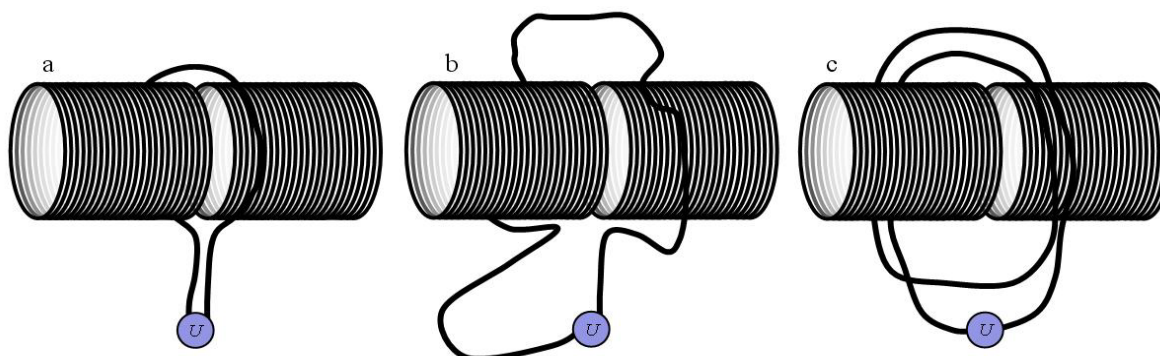


Abb. 3: Die induzierte Spannung ist unabhängig von der Größe (a) und der Form (b) der Leiterschleife. Sie ist proportional zur Windungszahl (c)

Aber ist der Verweis auf die Maxwellgleichung eine befriedigende Antwort? Schließlich kann man genauso fragen: Wie erzeugt das sich ändernde Magnetfeld um sich herum ein elektrisches Wirbelfeld? Diese Frage ist allerdings genau wie die folgende: Wie erzeugt ein elektrischer Strom um sich herum ein magnetisches Wirbelfeld? Woher weiß das Magnetfeld, dass in der Mitte ein elektrischer Strom fließt? An diese Erscheinung ist aber jeder Physiker gewöhnt, so dass er im Allgemeinen kein Problem damit hat.

Betrachtet man die 1. Maxwellgleichung erkennt man die Analogie:

$$\oint \vec{H} d\vec{s} = \iint (\vec{j}_{el} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) d\vec{A} = I + \dot{\Phi}_{el}$$

Jeder elektrische Strom ist von einem magnetischen Wirbelfeld umgeben. Für elektrische Ströme gibt es zwei Möglichkeiten, den Leitungsstrom und den Verschiebungsstrom. Maxwell hat beide zum „wahren Strom“ zusammengefasst.

Ursache der Induktionsspannung ist also das durch die Änderung des magnetischen Feldes in seiner Umgebung erzeugte elektrische Feld, genauso, wie ein elektrischer Strom in seiner Umgebung magnetische Felder erzeugt.

Eine weitere Frage: Im beschriebenen Experiment fließt in der Leiterschleife ein elektrischer Strom. Dazu ist Energie nötig.

Wie kommt die für den Strom notwendige Energie vom Magnetfeld der Spule zur Leiterschleife?

Die Energiestromdichte im elektro-magnetischen

Feld wird beschrieben durch den Poynting-Vektor:

$$\vec{j}_E = \vec{E} \times \vec{H}$$

Der Poynting-Vektor zeigt, dass für einen Energiestrom zwei Feldanteile nötig sind, ein elektrisches und ein magnetisches Feld, die senkrecht zueinander stehen.

Wie sieht das im Experiment aus, Abb. 4?

Betrachten wir die Spule und nehmen an, dass der magnetische Fluss nach links zeigt und vom Betrage her zunimmt (blauer Pfeil in der Abbildung). Um die Spule entsteht ein elektrisches Wirbelfeld, dessen Orientierung in der Abbildung durch den roten Pfeil angedeutet wird. Befindet sich dort eine Leiterschleife, so fließt der elektrische Strom in dieser Schleife ebenfalls in diese Richtung. Dieser Strom erzeugt um sich ein Magnetfeld, dessen Orientierung grün eingezeichnet ist. Bildet man nun den Poynting-Vektor $\vec{E} \times \vec{H}$, so zeigt er überall in Richtung der Leiterschleife. Die Energie fließt also durch das elektrische Wirbelfeld und das Magnetfeld des induzierten Stroms von allen Seiten in die Leiterschleife.

Anmerkung: Ohne Leiterschleife fließt kein elektrischer Strom. Daher gibt es nur ein magnetisches Feld durch den Streufluss um die Spule. Auch er liefert mit dem elektrischen Wirbelfeld einen Energiestrom. Dieser Energiestrom läuft abwechselnd radial von der Spulenchse weg und auf sie zu, je nachdem, ob der magnetische Fluss gerade zu- oder abnimmt.

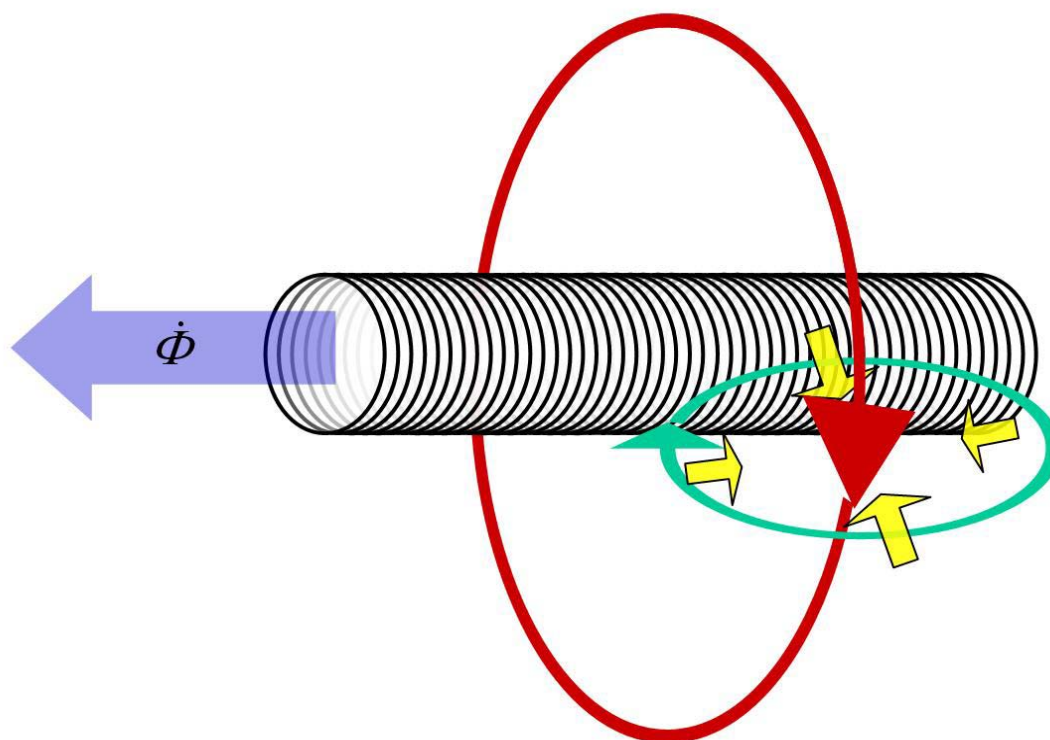


Abb. 4: zunehmender magnetischer Fluss (blauer Pfeil), induziertes elektrisches Feld und Stromrichtung (rot), vom Strom erzeugtes Magnetfeld (grün) und Richtung des Poynting-Vektors (gelb)