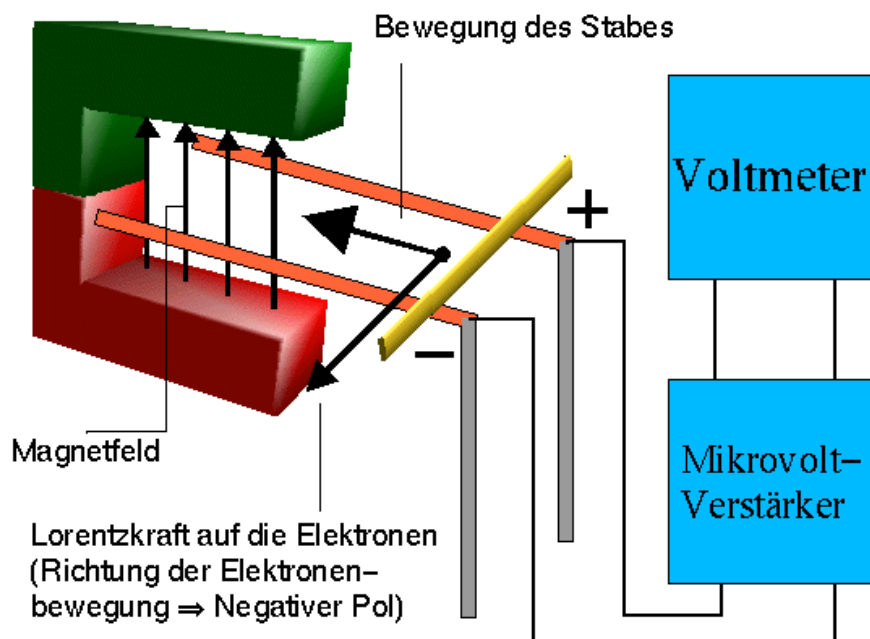


In dieser Stunde stand Induktion als neues Thema auf dem Programm. Zunächst wurde auf experimentellem Weg das zu untersuchende Phänomen aufgezeigt.

Eine Leiterschaukel wird in das vertikale Feld eines starken Hufeisenmagneten gehängt. An die Schaukel wird nicht, wie bei dem Versuch zur Demonstration der Lorentzkraft, eine Spannungsquelle angeschlossen, sondern ein Mikrovolt-Verstärker. Dieser wird so eingestellt, dass der Zeiger des an ihm angeschlossenen Voltmeters sich in Mittelposition befindet und nach zwei Seiten ausschlagen kann. Anschließend wird die Schaukel in Schwingung versetzt. Der Zeiger des Voltmeters schlägt nun synchron mit dieser aus, an den Umkehrpunkten der Schwingbewegung fällt er auf null, dann schlägt er in die entgegengesetzte Richtung aus. Daraus kann man schließen, dass die Bewegung eines Leiters in einem magnetischen Feld eine Spannung im Leiter verursacht.

In einem zweiten Versuch soll dieser Zusammenhang näher untersucht werden. Dazu werden zwei blankpolierte Kupferstäbe in zwei Halterungen horizontal parallel zueinander ausgerichtet. Zwischen die beiden Stäbe wird ein Mikrovolt-Verstärker mit dazugehörigem Anzeigegerät geschaltet. Am einen Ende der beiden Stäbe wird eine kurze Messingstange quer zu diesen aufgelegt. Am anderen Ende wird ein Hufeisenmagnet so aufgestellt, dass sein vertikal aufwärts gerichtetes Feld den Raum zwischen den beiden Stäben ausfüllt. Dann lässt man die Messingstange langsam auf den Magneten zurollen. Am Voltmeter kann man einen Ausschlag beobachten. Nach mehrmaliger Wiederholung stellt man fest, dass der Ausschlag um so größer ist, je schneller sich die Stange zum Magneten hin bewegt.



Mit Hilfe der Drei-Finger-Regel der linken Hand kann man sogar die Polung der gemessenen Spannung ermitteln. Der Daumen zeigt in Richtung der Elektronenbewegung, die hier der Bewegungsrichtung der Stange entspricht (Schließlich bewegen sich die Elektronen der Stange im Feld des Hufeisenmagneten). Das äußere Magnetfeld verläuft von unten nach oben (Referenz für die Richtung eines Magnetfeldes ist die Ausrichtung des Nordpols einer Kompassnadel, und dieser zeigt hier in Richtung des Südpols). Der Mittelfinger der linken Hand zeigt nun in die Wirkrichtung der Lorentzkraft auf die Elektronen. Diese bewegen sich in diese Richtung, dort entsteht also ein negativer Pol, auf der gegenüberliegenden Seite folglich ein positiver. Es baut sich also auch ein Magnetfeld in Längsrichtung der

Messingstange auf. Die hierdurch auf die Elektronen wirkende Kraft ist der Lorentzkraft entgegengerichtet und betragsgleich, so dass sich ein dynamisches Kräftegleichgewicht einstellt. Nun kann rechnerisch die Induktionsspannung bestimmt werden. Da die elektrische Feldkraft und die Lorentzkraft betragsgleich sind, gilt $F_L = F_{el}$.

Für die Lorentzkraft wurde bereits folgender Zusammenhang ermittelt:

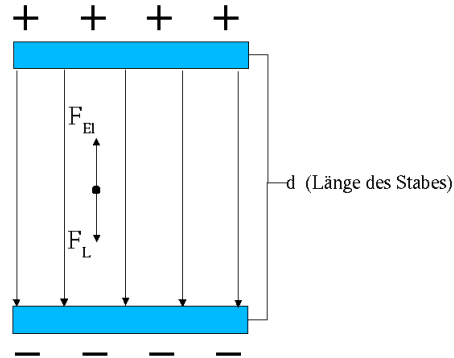
$$F_L = e \cdot v \cdot B_s$$

Daraus folgt:

$$F_L = F_{El}$$

$$F_{El} = e \cdot \frac{U}{d}$$

$$e \cdot v \cdot B_s = e \cdot \frac{U}{d}$$



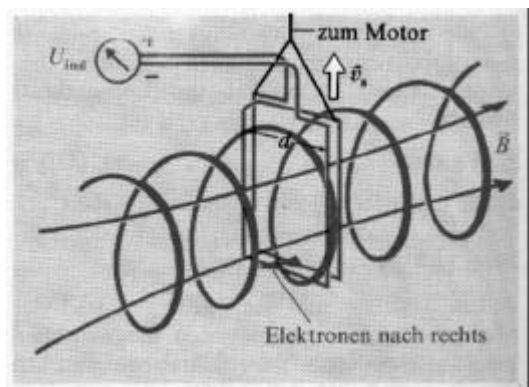
Für die induzierte Spannung U_i kann man daraus ableiten

$$U_i = d \cdot v \cdot B_s$$

Diese Gleichung deutet auf einen linearen Zusammenhang zwischen der induzierten Spannung und der Geschwindigkeit des Leiters hin.

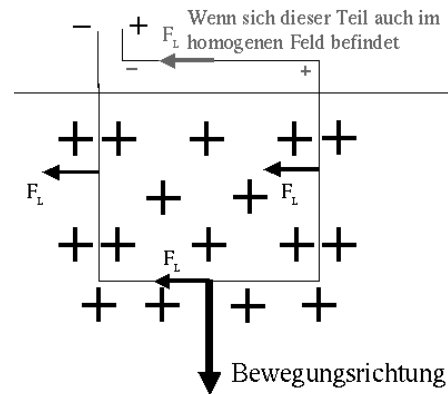
Es wurde somit ein neuer Zusammenhang aus der Anwendung bereits bekannter Gesetze auf ein neues Phänomen ermittelt. Diesen Weg bezeichnet man als deduktives Vorgehen.

Da dieses Gesetz bisher nur theoretischer Natur ist, soll mit einem Versuch sein Wahrheitsgehalt überprüft werden. Hierzu wird nach der Skizze eine Probespule mittels eines langsam laufenden Synchronmotors durch einen Spalt in das homogene Feld einer langen Spule eingeführt. An die Probespule ist ein Messverstärker mit einem Voltmeter angeschlossen, um die induzierte Spannung zu messen. Auch der Stromfluss durch die felderzeugende Spule wird mit einem Amperemeter bestimmt. Beim Aufbau ist darauf zu achten, dass die Probespule ungehindert in die große Spule gleiten kann, ohne am Rand anzustoßen. Feine Korrekturen können mit den an der Probespule befestigten Stromzuführungsdrähten vorgenommen werden. Die felderzeugende Spule wird so angeschlossen, dass alle 16 000 Windungen vom Strom durchflossen werden, die Stromstärke wird auf 0,1 A eingestellt. Die Probespule wird an einem Faden befestigt, der über eine Umlenkrolle zum Synchronmotor führt. Dieser bietet dank seiner drei unterschiedlich großen Rollen die Möglichkeit, den Faden mit drei verschiedenen Geschwindigkeiten (1 mm/s, 2 mm/s, 4 mm/s) auf- oder abzuwickeln. Zunächst wird die Rolle mit dem größten Durchmesser verwendet ($v = 4 \text{ mm/s}$). Wenn die Probespule so aufgehängt ist, kann die Feinjustierung mit den beiden Zuführungsdrähten vorgenommen werden.



Wenn nach der neben stehenden Skizze eine Spule in ein homogenes Magnetfeld senkrecht nach unten eingeführt wird, bewegen sich aufgrund der Lorentzkraft die Elektronen im unteren waagrechten Leiter nach links. In den beiden senkrechten Leiterstücken wirkt die Lorentzkraft

ebenfalls nach links; um einen Elektronenfluss zu verursachen müsste hier eine senkrechte Komponente vorhanden sein, dies ist hier nicht der Fall. Aus diesem Grund haben die beiden senkrechten Leiterstücke keinen Einfluss auf die induzierte Spannung. Das obere Querstück befindet sich außerhalb des Magnetfeldes (bzw. das inhomogene Feld, das die Spule umgibt, kann hier vernachlässigt werden), so dass hier auch keine Lorentzkraft auftreten kann. Die Polung der induzierten Spannung ist also die eingezeichnete. Wenn man die Probespule weiter absenkt, so dass auch das obere Querstück in das homogene Feld eintaucht, findet auch hier eine Elektronenbewegung nach links statt. Die hier entstehende Spannung wäre genauso groß wie die im unteren Querstück, dieser aber entgegengerichtet. Die beiden Spannungen würden sich also neutralisieren, so dass man von außen keine Induktionsvorgänge feststellen könnte. Aus diesem Grund ist bei dem Versuch darauf zu achten, dass die Spule nicht zu weit abgesenkt wird.



Zu Beginn des Versuches wird der Faden soweit aufgewickelt, dass der untere Querleiter der Probespule sich im oberen Bereich des Spulenfeldes befindet. Nach dem zuvor beschriebenen Verfahren wird die Polung der zu erwartenden induzierten Spannung bestimmt und der Messverstärker entsprechend angeschlossen. Anschließend muss er noch mittels der Feinjustierung auf 0 gestellt werden. Dann wird die der Motor eingeschaltet, die Probespule senkt sich langsam. Der Ausschlag auf dem Voltmeter wird abgemessen. Wenn etwa 5 cm Faden abgespult worden sind, wird der Motor gestoppt und umgeschaltet, so dass er die Probespule nun nach oben zieht. Zuvor muss der Messverstärker umgepolt werden, da bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung des Leiters auch die induzierte Spannung entgegengesetzt ist. Auch bei der Aufwärtsbewegung wird die angezeigte Spannung abgelesen. Nach mehrmaliger Durchführung wird der Versuch mit einer anderen Geschwindigkeit wiederholt. Hierzu wird der Faden am Synchronmotor auf eine Spule mit kleinerem Durchmesser aufgewickelt.

Zur Kontrolle dieser Werte kann man die Spannung auch nach der zuvor ermittelten Gleichung berechnen:

$$U_i = d \cdot v \cdot B$$

$$B = \mu_0 \cdot \frac{n \cdot I}{l}$$

$$I = 0,1 \text{ A } n = 16000$$

$$l = 0,48 \text{ m}$$

$$B = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \frac{16000 \cdot 0,1 \text{ A}}{0,48 \text{ m}}$$

$$B = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$U_i(v) = v \cdot d \cdot B$$

$$d = 500 \cdot 0,05 \text{ m}$$

$$d = 25 \text{ m}$$

$v [10^4 \text{ V}]$	$v \cdot d \cdot B [10^4 \text{ V}]$	$U_i [10^4 \text{ V}]$ (gemessen)	Fehler (%)
4	4,2	3,9	7
2	2,1	1,9	10
1	1,05	1	5

Um den vermuteten linearen Zusammenhang zu bestätigen reichen diese Ergebnisse nicht aus, jedoch widerlegen sie ihn nicht. Potenzielle Fehlerquellen stellen der etwas betagtere Messverstärker und die Probepule dar. Bei letzterer sind die angenommenen 5 cm für die Länge des Querstücks ein Mittelwert, bei 500 Wicklungen addieren sich auch unbedeutend kleine Abweichung zu einem nicht ganz so unbedeutenden Wert.