

## Das Induktionsgesetz

Die Induktion ist ein wichtiges Thema im Physikunterricht der Oberstufe, da sie Grundlage vieler technischer Anwendungen im Alltag ist. Deshalb sollte sie im Physikunterricht sowohl experimentell als auch theoretisch gründlich behandelt werden.

Seit Langem gibt es zum Induktionsgesetz einen Standardversuch, der in nur wenigen Physiksammlungen fehlen dürfte. Dabei wird in einer großen Feldspule mit einem Dreiecksgenerator ein veränderliches Magnetfeld erzeugt. In einer weiteren Spule, die sich im Inneren der Feldspule befindet, wird dadurch eine konstante Spannung induziert. Damit wird die Proportionalität zwischen der Induktionsspannung und der Ableitung des magnetischen Flusses nachgewiesen. Der beschriebene Versuch erlaubt zwar eine perfekte, quantitative Verifizierung des Gesetzes, doch wird bereits sehr viel vorgegeben und vorausgesetzt. Die Lernenden haben dabei keine Möglichkeit, durch eigenes Experimentieren den Zusammenhang zwischen der Induktionsspannung und der zeitlichen Änderungsrate der Flussdichte herauszufinden.

Seit es die sog. Supermagneten gibt, die aus einer Neodymlegierung bestehen und eine Sättigungsmagnetisierung von über 1 T aufweisen, sind technisch einfache Experimente zur Induktion möglich. Die Induktionsspannungen, die bei der Bewegung dieser Magneten auftreten, sind ohne Vorverstärker messbar, insbesondere wenn man Spulen mit großer Windungszahl verwendet.

Mit dem Experiment „Schüttellampe“ in diesem Heft ist bereits in das Phänomen der Induktion eingeführt worden. Mit den nun beschriebenen Experimenten sollen die Schülerinnen und Schüler herausfinden, dass eine Proportionalität zwischen der Induktionsspannung und der zeitlichen Änderungsrate der magnetischen Flussdichte besteht. Sie vollziehen damit den Weg nach, auf dem FARADAY das Induktionsgesetz entdeckt hatte.

Man kann diesen Prozess erleichtern, indem man durch geeignete Polung der gemessenen Induktionsspannung zunächst die Beziehung

$$(1) U_{\text{ind}}(t) \sim \frac{dB(t)}{dt}$$

nachweist. Dazu sollten die Anschlüsse des Spannungssensors an die Spule farblich gekennzeichnet und auch die Seite der Spule markiert werden, vor der der Magnet bewegt wird. Dies hat außerdem den Vorteil, dass die Messergebnisse der einzelnen Gruppen besser vergleichbar sind.

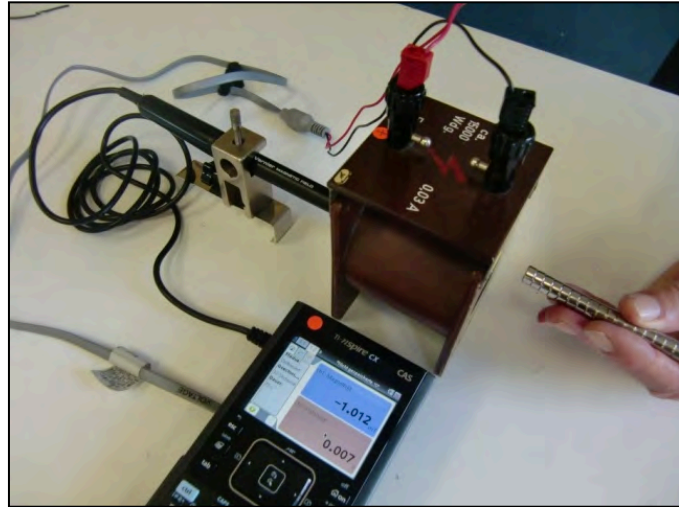
Wenn Schülerinnen und Schüler die Proportionalität zwischen der Induktionsspannung und der Änderungsrate der Flussdichte (1) herausgefunden haben, so ist zwar noch nicht das eigentliche Induktionsgesetz

$$(2) U_{\text{ind}}(t) = -n \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

hergeleitet, aber doch die wesentliche Beziehung zwischen den auftretenden Größen erkannt worden. Im Anschluss an diese Untersuchungen könnte nun das zuvor beschriebene Sammlungsexperiment eingesetzt werden.

**Material**

- Spule mit hoher Windungszahl (mehr als 1000 Windungen, idealerweise 15000 Windungen)
- stabförmiger Neodym-Magnet („Supermagnet“)
- (Taschen-)Computer mit Messwerterfassung (hier TI-Nspire™ CX mit Lab Cradle™)
- Hallsonde (z. B. Magnetic Field Sensor, MG-BTA)
- Spannungssensor (z. B. Voltage Probe, VP-BTA)

**Versuchsaufbau**

**Abb.1: Versuchsanordnung zur Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Induktionsspannung und magnetischer Flussdichte einerseits und der Bewegung des Magneten andererseits.**

**Einstellungen**

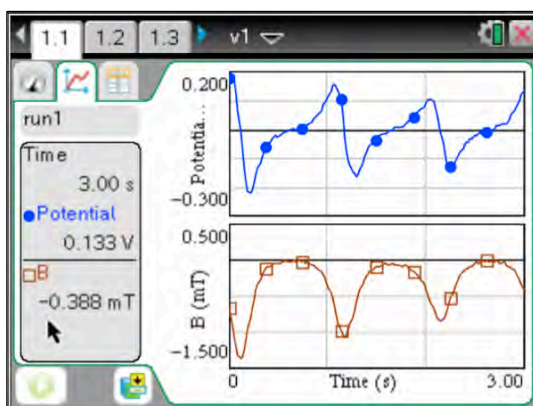
- Messmodus: Time Based (zeitbasiert)
- Messzeit: 1 s bis 3 s
- Messrate: z. B. 50 Messungen pro Sekunde

**Versuchsdurchführung und Auswertung**

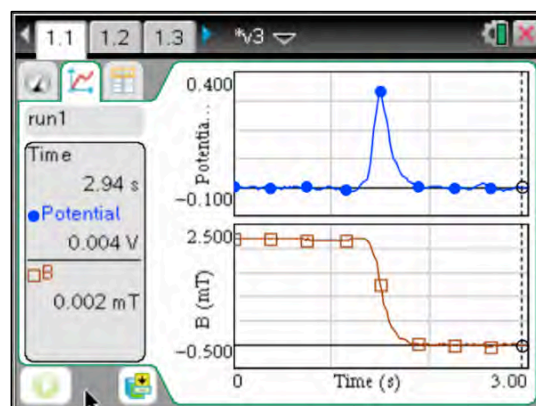
Die Hallsonde ist zunächst so in der Spule zu positionieren, dass die magnetische Flussdichte in der Mitte der Spule gemessen werden kann. In dieser Position wird die Nulleinstellung des Magnetfeldsensors vorgenommen. Der Spannungssensor wird mit der richtigen Polung (Markierung beachten!) an die Spule angeschlossen.

Im Versuch bewegen die Schülerinnen und Schüler den Magneten vor der Spule und zeichnen dabei die magnetische Flussdichte und die erzeugte Induktionsspannung auf. Die Bewegungen müssen so ausgeführt werden, dass eine gut messbare Induktionsspannung entsteht.

Vorbereitung und Durchführung: 45 Minuten (ohne Auswertung)

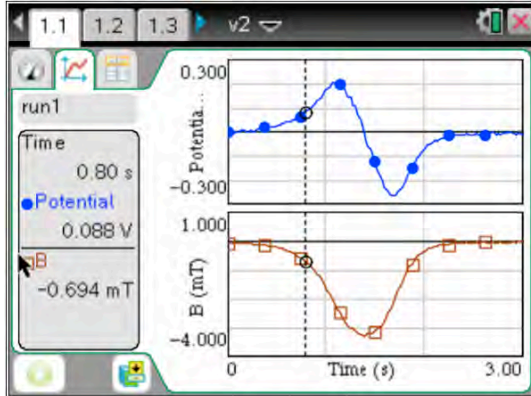


**Abb.2: Aufzeichnung von  $U_{ind}$  und  $B$  für eine willkürliche Bewegung des Magneten vor der Spule.**



**Abb.3: Aufzeichnung von  $U_{ind}$  und  $B$ , wenn der Magnet von der Spule entfernt wird.**

Die Schülerinnen und Schüler neigen dazu, anfangs recht unübersichtliche Änderungen des Magnetfeldes in der Spule zu erzeugen, die nicht leicht zu interpretieren sind (Abb.2). Das ist anders bei möglichst einfachen Bewegungen, wenn z. B. der Magnet nur zur Spule hin und von ihr weg oder von rechts nach links bewegt wird. In Abb.3 und 4 sind die Induktionsspannung und die magnetische Flussdichte für einfache Bewegungen aufgezeichnet worden, an denen der Zusammenhang zwischen beiden Größen untersucht werden kann. Dazu sollte man in beiden Graphen Werte markieren, die zur gleichen Zeit auftreten. Das kann man erreichen, indem man auf einen der Punkte klickt. Die gestrichelte Linie durch die Punkte kann zu weiteren Untersuchungen mit den Cursorstasten verschoben werden.



**Abb.4: Aufzeichnung von  $U_{\text{ind}}$  und  $B$ , wenn der Magnet zu der Spule hin und wieder zurück bewegt wird.**

So lassen sich die charakteristischen Werte beider Graphen wie Nullstellen, Extrem- oder Wendestellen einander zuordnen.

So lassen sich die charakteristischen Werte beider Graphen wie Nullstellen, Extrem- oder Wendestellen einander zuordnen.

Ergebnisse dieser Untersuchungen sollten sein:

- Solange der Magnet nicht bewegt wird, wird keine Spannung induziert.
- Je schneller der Magnet bewegt wird, desto größer ist die Induktionsspannung.
- Wenn sich das Magnetfeld abschwächt, entsteht ein negativer Spannungsimpuls. Beim Ansteigen ist der Impuls positiv. (Das ist durch den entsprechenden Anschluss des Spannungssensors so eingerichtet worden.)
- Je größer die Änderungsrate des Magnetfeldes ist, desto größer ist auch die Induktionsspannung.

Und mit Kenntnis der Differenzialrechnung:

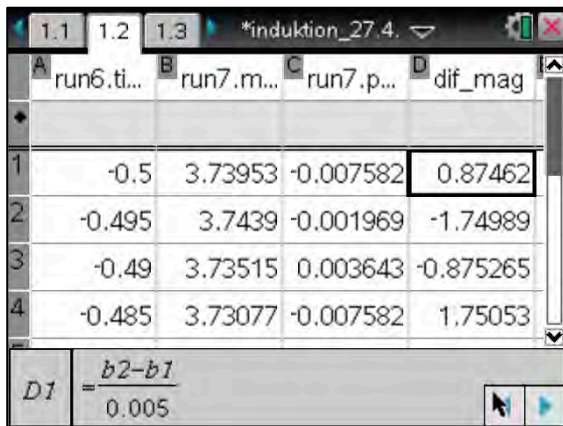
- Die Induktionsspannung  $U_{\text{ind}}(t)$  wird maximal oder minimal, wenn  $B'(t)$  minimal oder maximal wird.
- Die Induktionsspannung  $U_{\text{ind}}(t)$  hat den Wert 0 V, wenn  $B'(t) = 0$  ist.

Aus diesen Ergebnissen kann dann auf den Zusammenhang (1) geschlossen werden. Die Vermutung kann jetzt anhand der Messdaten bestätigt werden. Dazu ist entweder die Flussdichte gemäß (1) numerisch zu differenzieren oder die Induktionsspannung zu integrieren.

$$(3) \int U_{\text{ind}}(t) dt \sim B(t)$$

Bei der numerischen Differenziation sind die Differenzen der Messwerte zu bilden. Dabei können sich kleine Schwankungen der magnetischen Flussdichte erheblich auswirken, so dass das Ergebnis sehr stark verrauscht sein kann (s. Abb.6). Zu einem ‚glatteren‘ Ergebnis führt das Integral der Beziehung (3) (s. Abb.7).

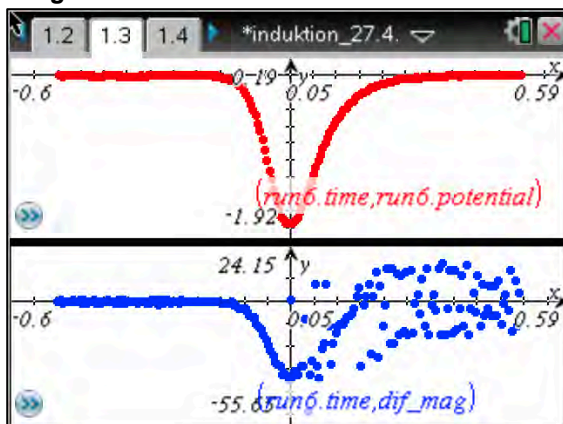
Die numerischen Berechnungen lassen sich mithilfe der Tabellenkalkulation des TI-Nspire™ durchführen. Sie sind in der Anleitung 16 detailliert beschrieben. Nachfolgend werden weitgehend nur die Ergebnisse gezeigt.



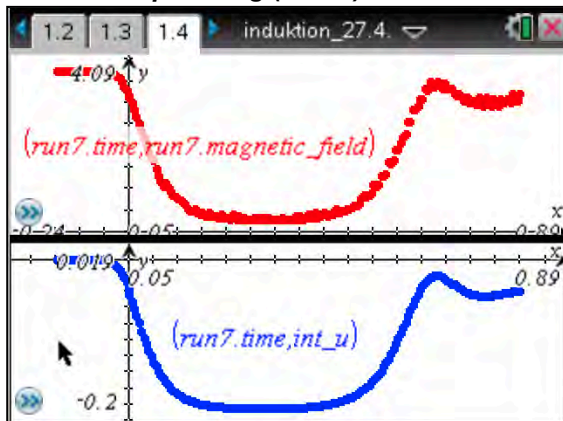
	A	B	C	D
	run6.ti...	run7.m...	run7.p...	dif_mag
1	-0.5	3.73953	-0.007582	0.87462
2	-0.495	3.7439	-0.001969	-1.74989
3	-0.49	3.73515	0.003643	-0.875265
4	-0.485	3.73077	-0.007582	1.75053

$$D1 = \frac{b2-b1}{0.005}$$

**Abb.5: Numerische Differenziation und Integration in der Tabellenkalkulation**



**Abb.6: Gemessene Induktionsspannung und die aus der Flussdichte berechnete Induktionsspannung (unten)**



**Abb.7: Gemessene Flussdichte (oben) und die aus der Induktionsspannung berechnete Flussdichte (unten)**

In die Spalten A, B und C sind die Messdaten für Zeit, Magnetfeld und Induktionsspannung eingetragen worden. In der Spalte D erfolgt die numerische Differenziation (s. Formelfeld unten in Abb.5) der magnetischen Flussdichte, in einer weiteren Spalte die numerische Integration der Induktionsspannung (nicht sichtbar).

Bei der numerischen Überprüfung der Beziehung (1) lassen die starken Streuungen nur ansatzweise einen Vergleich von Messung und Rechnung zu. Verkleinert man die Abfragerate, so kann die Streuung verringert, aber nicht vollständig verhindert werden.

Integriert man hingegen die Induktionsspannung gemäß der Beziehung (3) numerisch, so ist die Übereinstimmung sehr deutlich und damit die Vermutungen (3) und letztlich auch (1) zwar nicht bewiesen, aber doch nochmals durch die Berechnungen bestätigt worden.

**Ein alternativer Versuchsaufbau sowie weitere Anmerkungen zur Theorie finden sich in den TI-Nachrichten 2/08, 2/12 und in der Sonderausgabe 2005.**