

Faraday hatte den genialen Gedanken, die bisherigen Experimente zur "Kraft auf den stromdurchflossenen Leiter" einfach umzukehren. Und das klappte tatsächlich, das Grundprinzip der Stromerzeugung war geboren. **Kehre das Prinzip um, Deine Lehrkraft informiert Dich über die Bezeichnungen der Effekte. Beschreibe die Beobachtung im Versuch.**

## 2. Induktion

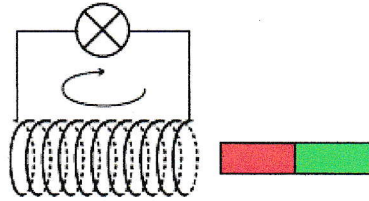
### 2.1 Induktion im bewegten Leiter

bisher: Strom  $\longrightarrow$  Bewegung

"elektromotorisches Prinzip"

jetzt: Bewegung  $\longrightarrow$  Strom

"Generator-Prinzip"



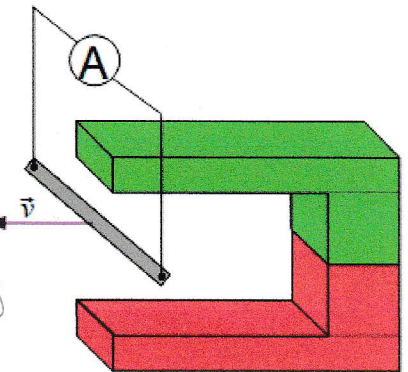
Wenn die Spule schnell gedreht wird, dann leuchtet die Lampe.  
 $\rightarrow$  Strom

Zur Vereinfachung nutzen wir wieder die Leiterschaukel, an die wir ein Strommessgerät angeschlossen haben. Jetzt bewegen wir die Schaukel von Hand. **Beschreibe Deine Beobachtung.**

#### Grundversuch: Leiterschaukel

##### Beobachtung:

Während sich die Schaukel bewegt, fließt Strom durch den Leiter. Wenn sich die Bewegungsrichtung ändert, ändert sich auch die Stromrichtung. Die Stromrichtung hängt auch von der Richtung des Magnetfeldes ab.



10 Induktion - 2.1 Induktion im bewegten Leiter

1

Mit unseren Erkenntnissen aus dem ersten Kapitel können wir diesen Effekt sogar erklären. Wir betrachten dazu ein einzelnes Elektron in der Schaukel (da sind natürlich gaaaanz viel drinnen). Dieses bewegt sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Leiterschaukel (weil es da drin sitzt wie ein Schüler im fahrenden Bus). **Wende die UvW-Regel auf die Bewegung des Elektrons an. Was bewirkt die Lorentzkraft in diesem Fall?**

#### Erklärung des Induktionsstromes

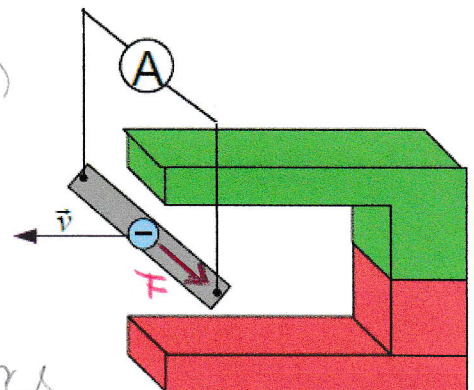
(UvW-Regel linke Hand oder rechte Hand entgegengesetzt zu  $\vec{v}$ )

Auf das Elektron wirkt eine Kraft nach vorn.  $\rightarrow$

Das Elektron setzt sich nach vorn in Bewegung.  $\rightarrow$

Ladungstransport = Stromfluss

Ändert man Bewegungsrichtung oder Magnetfeldrichtung dann ändert sich auch die Kraftrichtung (Stromrichtung)

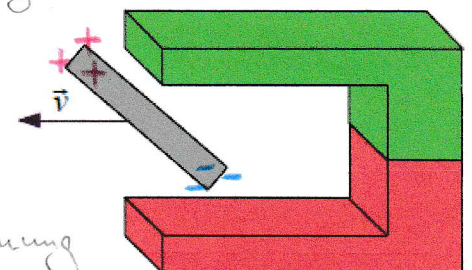


Wenn man die Leiterenden nicht über ein Amperemeter verbindet, kann dauerhaft kein Strom fließen. Dennoch findet zunächst eine Bewegung der Elektronen statt, die bald zum Erliegen kommt. **Zeichne die entstehende Ladungsverteilung in das Leiterstück ein. Warum kommt die Bewegung der Ladungen zum Erliegen?**

#### Erklärung der Induktionsspannung

Je stärker die Ladungstrennung ausgeprägt ist, umso schwieriger wird es für weitere Elektronen, sich nach vorn zu bewegen.

Ladungstrennung = Spannung



10 Induktion - 2.1 Induktion im bewegten Leiter

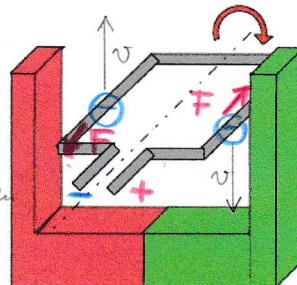
2

Nun widmen wir uns dem ersten Experiment dieser Stunde. Zur Vereinfachung betrachten wir nicht eine Spule, sondern nur eine einzige Leiterschleife davon.  
**Betrachte die Bewegung der beiden langen Leiterstücke, die parallel zur Drehachse verlaufen. Wiederhole die Erklärung des Induktionsstromes für diese beiden Leiterstücke und gib die Polung an den Enden an.**

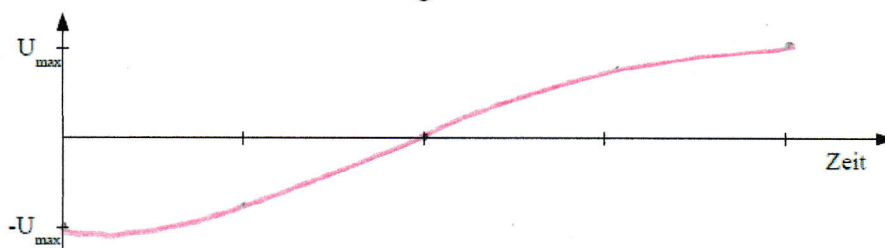
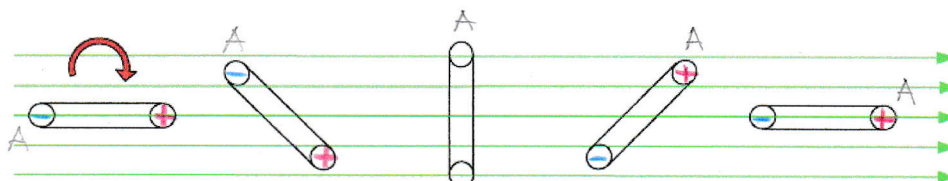
### rotierende Spule - rotierende Leiterschleife

das linke Leiterstück bewegt sich nach oben  
 → Kraft nach vorn → neg. Pol links

das rechte Leiterstück bewegt sich nach unten  
 → Kraft nach hinten → pos. Pol rechts



### Induktionsspannung an rotierender Leiterschleife

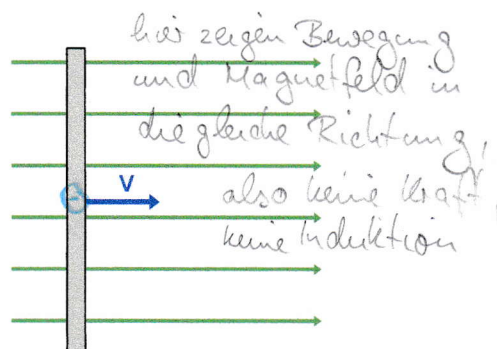
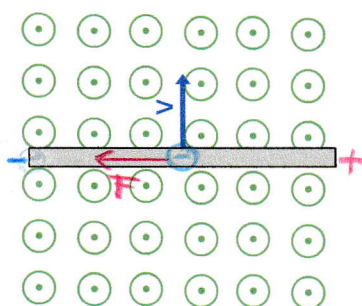
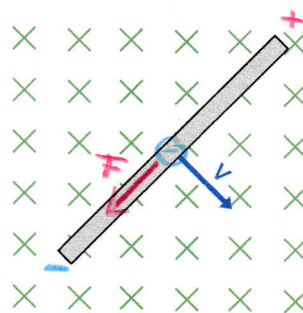
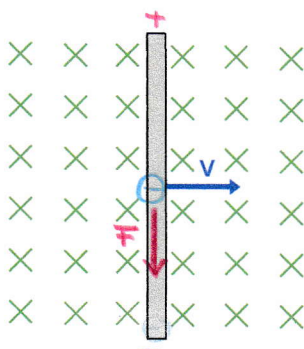


An den Enden der Leiterschleife finden Polwechsel statt  
 → Wechselspannung

Diese Abbildung zeigt in mehreren Teilbildchen die dauerhafte Drehung der Leiterschleife im Querschnitt. Markiere an den Anschlussdrähten (kleine Kreise), ob diese gerade negativ, positiv oder gar nicht geladen sind. Verfolge den Anschluss A, der zunächst links liegt, über alle fünf Positionen. Welche Folge hat das für die Spannung, die an den Enden der Leiterschleife gemessen werden kann?

In diesen Bildchen kannst Du nochmal trainieren, wie Du mit der UVW-Regel die Polung des bewegten Drahtes (Leiterschaukel) ermittelst. Bestimme jeweils die Kraft auf ein Elektron, das im Drahtstück sitzt und erschließe daraus die Polung an den Enden des Drahtstückes.

### Training: Polung von bewegten Drähten ermitteln



### Selbst-Check:

- elektromotorisches Prinzip und Generator-Prinzip
- bewegte Leiterschaukel
- Induktionsstrom und Induktionsspannung
- rotierende Leiterschleife und Wechselspannung

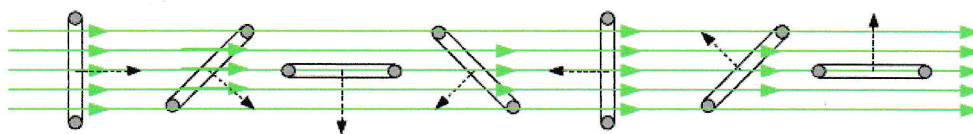
### Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifiphysik findest Du unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Induktion und Transformator - Generator- und Motorprinzip Aufgaben weitere Aufgaben zum Üben (sehr passend ist Generator-Grundlagen) sowie ein Leifiquiz, das sehr gut zur Folie 3 passt (manche Fragen gehen über den Lehrstoff hinaus).



Betrachte die Abbildung. Welcher Vorgang ist hier abgebildet? Notiere darunter, wie viele Feldlinien in den ersten drei Positionen jeweils durch die Leiterschleife hindurchgehen. An der Leiterschleife ist ein schwarzer Pfeil gezeichnet, der die Richtung darstellt, in der die Leiterschleife "schaut". Ergänze den Text.

## 2.2 Alternative Induktionsregel



Durch die Leiterschleife gehen in ...

- Position 1: 5 Feldlinien,  
Position 2: 3 Feldlinien,  
Position 3: 0 Feldlinien, usw.

Die Leiterschleife schaut zu Beginn nach rechts, im zweiten Teil nach links.

Regel:

In einer Leiterschleife tritt Induktionsstrom auf, wenn sich

die Anzahl der Feldlinien, die durch sie hindurchgehen oder deren Orientierung gegenüber der Schleife ändert.

Aus unseren Untersuchungen leiten wir eine Regel ab, mit der wir bestimmen können, ob in einer bestimmten Situation eine Induktionsspannung entsteht. Ergänze den Text mit den Erkenntnissen aus dem oberen Bildchen.

Wenn gerade keine Batterien verfügbar sind, dann ist die Schütteltaschenlampe ein praktisches Gerät. Beschreibe Deine Beobachtung.

### Anwendung: Die Schütteltaschenlampe

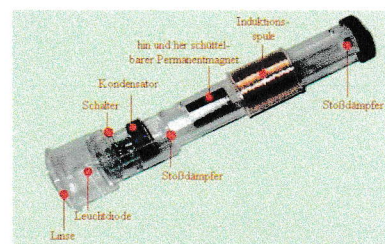
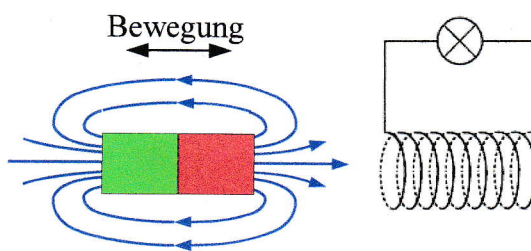
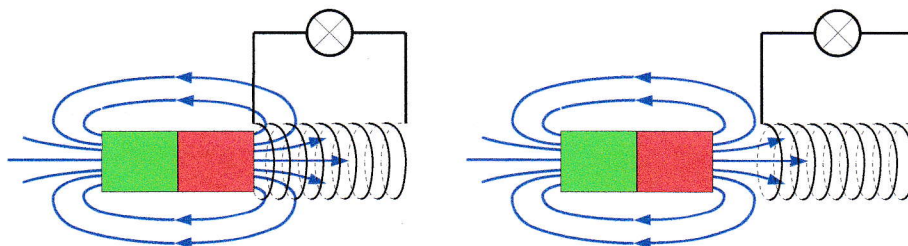


Abb. aus Leifiphysik

Direkt am Pol ist das magnetische Feld am stärksten, die Feldlinien verlaufen dort besonders dicht. Befindet sich der Magnet nahe an der Spule, laufen besonders viele Feldlinien durch die Spule, mit zunehmender Entfernung werden es weniger. → Induktionsstrom → Lampe leuchtet

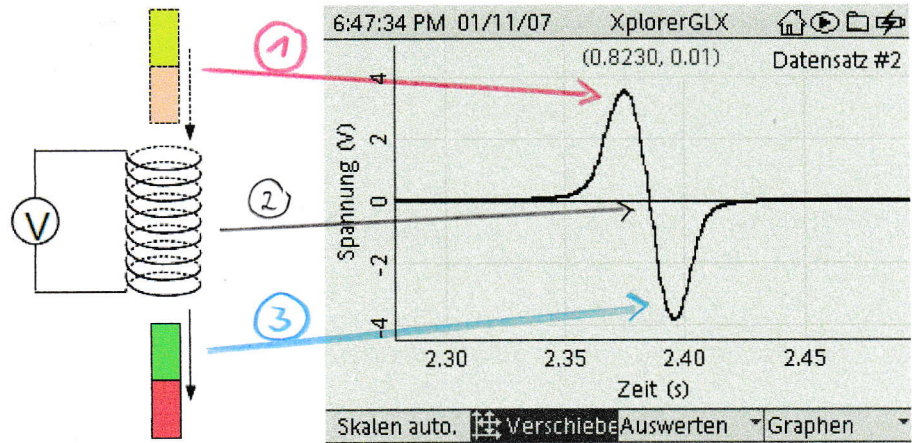
Mit der UVW-Regel wären wir hier chancenlos. Die alternative Induktionsregel eignet sich dagegen perfekt, um die Leuchtwirkung zu erklären. Die Bildchen zeigen den Magnet in zwei unterschiedlichen Positionen. Skizziere jeweils das Magnetfeld des Stabmagneten und erkläre damit, weshalb hier ein Induktionsstrom entsteht.



Computerbasierte Messtechnik erlaubt uns, das Geschehen in der Schütteltaschenlampe detailliert zu erfassen. In diesem Experiment lassen wir den Magneten nur einmal durch die Spule fallen und messen die dabei auftretende Induktionsspannung.

**Erläutere den Zusammenhang zwischen der Bewegung des Magneten und dem zeitlichen Verlauf der Spannung. Ordne dabei einzelne Teile des Diagramms bestimmten Abschnitten der Bewegung zu.**

### fallender Magnet - Spannungsstoß

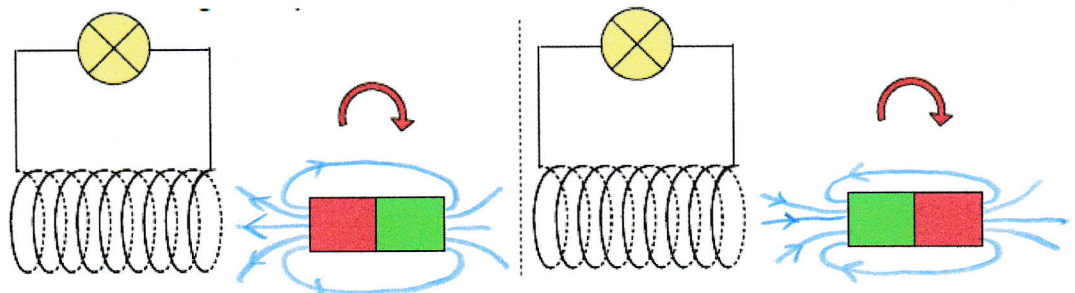


- ① Bei Annäherung an die Spule nimmt die Anzahl der Feldlinien durch die Spulenfläche zu → Spannung wird induziert
- ② Magnet vollständig in der Spule, keine Änderung der Anzahl der Feldlinien → keine Spannung
- ③ Magnet entfernt sich wieder, Anzahl der Feldlinien durch die Spule nimmt ab → Spannung wird induziert (Vorzeichenwechsel!)

Hier passt sehr gut die Simulation "Elektromagnetische Induktion", die Du auf der Seite der University of Colorado (phet.colorado.edu) findest.

Dieses Experiment ist fast identisch zum Experiment aus der vorhergehenden Stunde. Vom Prinzip ist dieser Aufbau ein Modell für den Fahrraddynamo. **Welcher Teil der Induktionsregel liefert hier besonders eindeutig den Hinweis, dass hier ein Induktionsstrom auftritt?**

### Rotierender Magnet - Dynamo



Orientierung des Magnetfeldes gegenüber der Spule ändert sich → Induktionsspannung

**Induktionsstrom, ja oder nein?**

ja, Anzahl Feldlinien ändert sich

ja, Anzahl Feldlinien ändert sich

### Training: alternative Induktionsregel

nein, Anzahl Feldlinien bleibt gleich

nein, Anzahl Feldlinien bleibt gleich

nein, Anzahl Feldlinien durch Schleife immer gleich 0

**Selbst-Check:**

- alternative Induktionsregel
- Schütteltaschenlampe
- fallender Magnet
- rotierender Magnet

### Übungsmöglichkeiten:

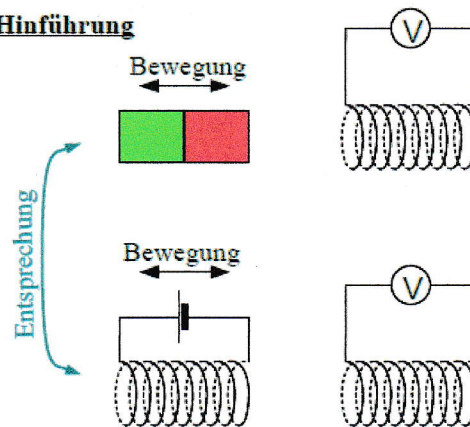
Auf Leifisphysik findest Du unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Induktion und Transformator - Auftreten von Induktion Aufgaben weitere Aufgaben zum Üben (perfekt passt hier Induktion oder nicht?).



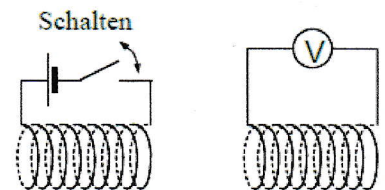
Bei der Schütteltaschenlampe haben wir einen Magneten vor einer Spule hin- und herbewegt, um Spannung zu induzieren. Genauso gut funktioniert das natürlich, wenn wir statt eines Permanentmagneten einen Elektromagnet verwenden. **Warum gibt es im rechten Bild keinen entsprechenden Versuch mit dem Permanentmagneten? Fasse Deine Beobachtungen aus den Versuchen im roten Kasten zusammen.**

## 2.3 Induktion im ruhenden Leiter

### Hinführung



Im Gegensatz zum Elektromagnet lässt sich der Permanentmagnet nicht ein- und ausschalten



### Erkenntnisse aus den Experimenten:

In einer Leiterschleife wird auch dann Spannung induziert, wenn die

die Änderung des Magnetfeldes von einem Elektromagneten hervorgerufen wird.

Diesen können wir auch bewegen, aber auch ein- und ausschalten

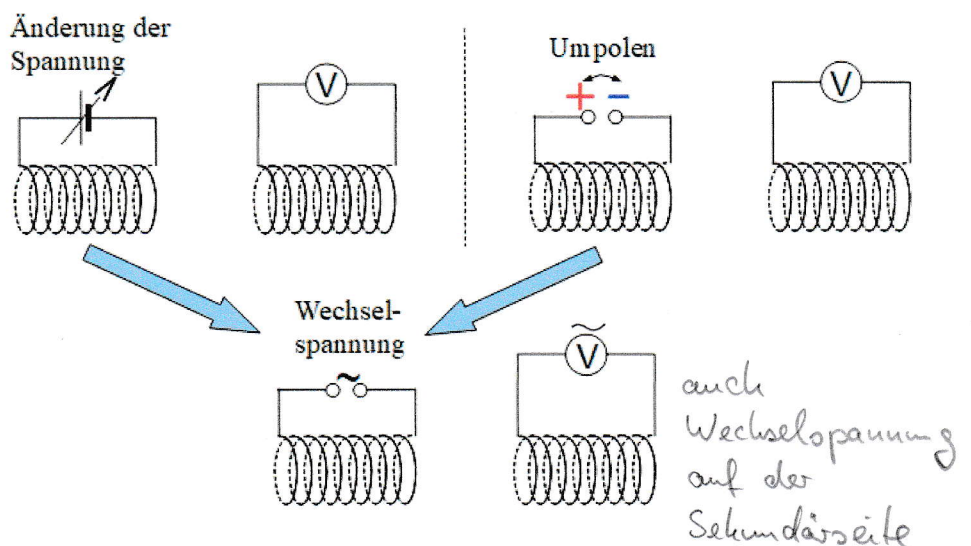
Statt die Spannung für den Elektromagneten ein- und auszuschalten, kann man sie auch kontinuierlich hochregeln. Auch ein Umpolen ist möglich.

**Wie würde ein entsprechender Versuch mit Permanentmagneten aussehen.**

In der Technik haben wir bereits eine Spannung zur Verfügung, die sich ständig ändert und dabei auch umpolt: die Wechselspannung (siehe Kap. 2.1). Wir erzeugen sie wie in früheren Kapiteln gelernt in Kraftwerken mit Generatoren. Sie eignet sich perfekt für die Nutzung dieses Effektes.

**Fasse die Ergebnisse im Kasten zusammen.**

### weitere Möglichkeiten beim Elektromagnet:

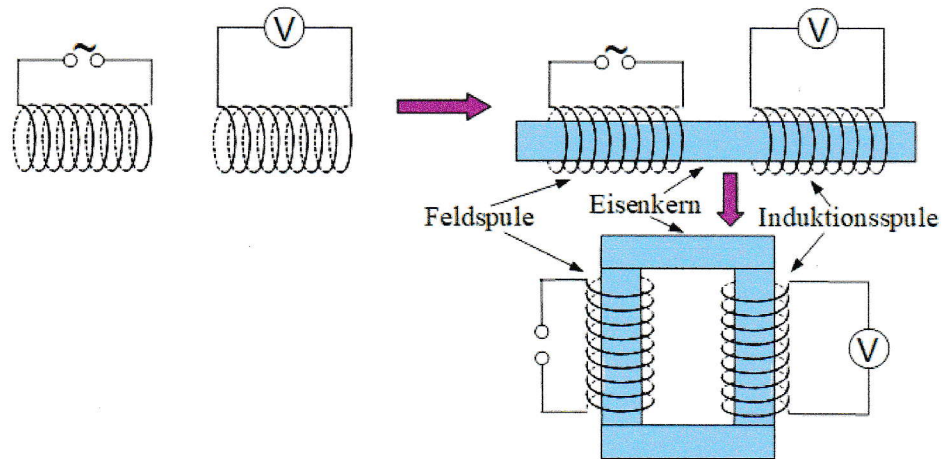


### Zusammenfassung der Beobachtungen:

Auch bei der Änderung oder dem Umpolen der Spannung an der Feldspule (Magnet) wird in der Induktionsspule Spannung induziert. Bei Verwendung von Wechselspannung tritt die Induktionsspannung ebenso auf.

Sowohl das in der Feldspule erzeugte Magnetfeld, also auch die in der Induktionsspule hervorgerufene Spannung lassen sich durch Eisenkerne verstärken. Eine starke Kopplung zwischen beiden Spulen erreichen wir, wenn wir hierzu einen gemeinsamen Eisenkern, am besten in geschlossener Form verwenden. **Im Versuch verwenden wir zuerst Spulen ohne Kern und schieben dann den Kern ein. Fasse Deine Beobachtungen zusammen.**

### Optimierung des Versuchsaufbaus - der Trafo



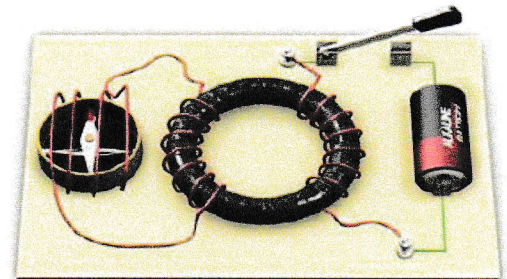
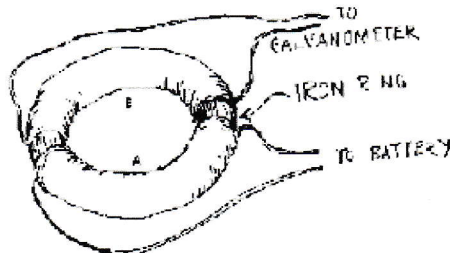
### Zusammenfassung:

Wird das Magnetfeld mit einem Eisenkern,  
von der Feldspule zur Induktionsspule geleitet, so ist der Effekt  
stärker. Noch besser geht es mit einem  
geschlossenen Ringkern aus Eisen.  
Das so entstandene Gerät heißt Transformator.

Die Erfindung des Trafos gelang dem Amerikaner Faraday im Jahr 1831. Die Abbildungen zeigen eine Originalzeichnung von Faraday sowie eine moderne Konstruktion des vollständigen Versuches. **Woraus besteht das mit Galvanometer bezeichnete Gerät und zu welchem Zweck könnte es dienen? Beschreibe auf Basis unserer eigenen Versuche den Ablauf des Versuchs von Faraday und erläutere die Beobachtung, die er damit machen konnte.**

Eine Animation hierzu findest Du auf Leifiphysik unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Induktion - Geschichte - Faradays Versuche zur Induktion.

### Originalexperiment von Faraday 1831



Originalzeichnung entnommen aus leifiphysik.de Rekonstruktion aus micro.magnet.fsu.edu

Das Galvanometer entspricht einem Amperemeter, es misst den Stromfluss. Je größer die Stromstärke, desto stärker wird die Kompassnadel ausgelenkt.

Der Aufbau entspricht dem dritten Experiment auf der ersten Folie. Wenn man den Schalter schließt, entsteht in der rechten Spule ein Magnetfeld. Diese Änderung ruft in der linken Spule einen Induktionsstrom hervor.

### Übungsmöglichkeiten:

Nachdem wir das Phänomen erst eingeführt haben, gibt's noch kaum Aufgaben, die sich bearbeiten lassen. Schau Dir doch mal die weiteren Experimente von Faraday an, die auf der angegebenen Leifiseite dargestellt sind.

### Selbst-Check:

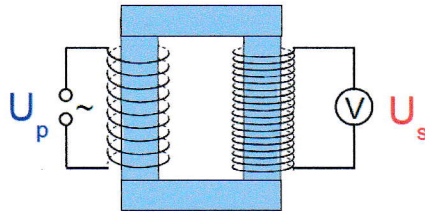
- Elektromagnet statt Permanentmagnet
- Variationsmöglichkeiten
- Transformator



Im letzten Kapitel haben wir Bauweise und prinzipielle Funktion des Transformators kennengelernt, in diesem Kapitel untersuchen wir dieses wichtige Geräte quantitativ mit Hilfe von Messungen. Die erste Spule, an der Strom eingespeist wird, heißt **Primärspule**, die zweite Spule, an der Strom entnommen werden kann, heißt **Sekundärspule**.

**Notiere die Messwerte und finde eine Regel für die Versuchsdaten.**

## 2.4 Transformator



$n_p$	$n_s$	$U_p$ in V	$U_s$ in V
1200	1200	6,0	5,8
1200	600	6,0	2,8
1200	300	6,0	1,4
300	1200	3,0	11,7

### Spannungsregel:

Die Spannungen an den Trafospulen verhalten sich zueinander ungefähr so

*wie die Windungszahlen der Spulen*

Formel:

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{n_p}{n_s}$$

### Achtung:

Exakt gilt diese Formel nur für einen idealen Trafo, bei dem keine nennenswerten Strommengen entnommen werden. In der Praxis fällt die Sekundärspannung deshalb niedriger aus.

**Berechne für die letzte Messung die Sekundärspannung mit Hilfe der Formel und vergleiche.**

$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{n_s}{n_p} \quad | \cdot U_p$$

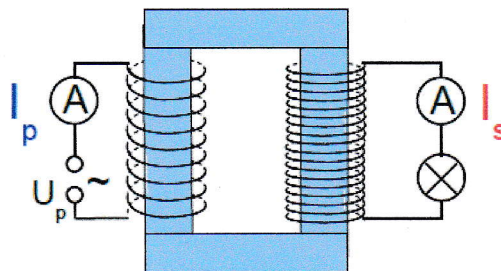
$$U_s = U_p \cdot \frac{n_s}{n_p} = 3,0 \text{ V} \cdot \frac{1200}{300} = \underline{\underline{12,0 \text{ V}}}$$

10 Induktion - 2.4 Transformator

1

Nun geht's um die zweite elektrische Größe, die Stromstärke. Wir untersuchen den Zusammenhang zwischen Primärstromstärke und Sekundärstromstärke hier mit Hilfe einer theoretischen Überlegung und gehen dabei von einem idealen Transformator mit einem theoretischen Wirkungsgrad von 100 % aus. Bei unseren zerlegbaren Experimentiertrafos ist der Wirkungsgrad weit niedriger, im großtechnologischen Einsatz (Umspannwerke) liegen die Wirkungsgrade aber bei fast 100 %. **Vollziehe die einzelnen Schritte der Herleitung an Hand Deines bisherigen Wissens nach. Ersetze die rechte Seite in der letzten Zeile schließlich mit Hilfe der Formel aus der ersten Folie, damit landest Du bei der Stromregel.**

### Ströme bei Spulen mit unterschiedlicher Windungszahl:



$$\eta = \frac{P_{\text{nutz}}}{P_{\text{auf}}} = \frac{P_s}{P_p}$$

$$\eta = 1 \rightarrow P_s = P_p \rightarrow U_s \cdot I_s = U_p \cdot I_p$$

$$\rightarrow \frac{I_s}{I_p} = \frac{U_p}{U_s}$$

### Stromregel:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{n_p}{n_s}$$

Die Ströme verhalten sich *umgekehrt* wie die Windungszahlen der Spulen. (das gilt nur in grober Näherung, da der Wirkungsgrad nie 100 % beträgt).

*Achte genau auf die Indices -p, -s!*

10 Induktion - 2.4 Transformator

2

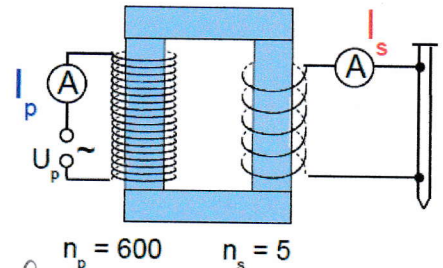
Die letzte Formel liefert eine Technik, um hohe Ströme zu erzeugen, diese nutzen wir z.B. beim Elektroschweißen. Im folgenden Versuch besteht der Trafo aus einer Primärspule mit 600 Windungen und einer Sekundärspule mit 5 Windungen. Die Sekundärspule wird mit einem Nagel kurzgeschlossen. **Vergleiche die Stromstärken  $I_p$  und  $I_s$  relativ und beschreibe Deine Beobachtung.**

### Hochstromversuch: Nagelschmelzen

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{n_p}{n_s} = \frac{600}{5} = \frac{120}{1}$$

$$\rightarrow I_s = 120 \cdot I_p$$

Durch den Nagel fließt ungefähr 120-mal so viel Strom wie in der Primärspule.  
 $\rightarrow$  Nagel glüht und schmilzt



Zu Beginn dieser Stunde haben wir gesehen, dass man mit geeigneten Spulenkombinationen auch die Spannung vergrößern kann. Im Versuch verwenden wir eine extreme Spulenkombination und schließen die Primärspule an 230 V Netzspannung an (**bitte nicht selbst ausprobieren, Lebensgefahr!**).

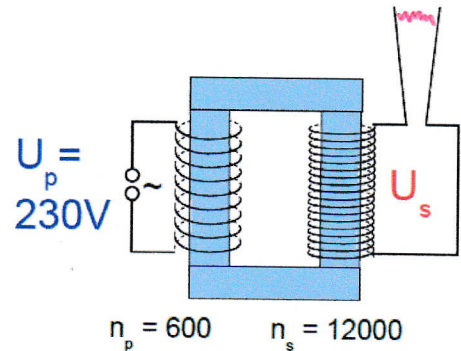
**Berechne die theoretische Sekundärspannung und notiere auch die Beobachtung im Experiment.**

$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{n_s}{n_p} = \frac{12000}{600} = \frac{20}{1}$$

$$U_s = U_p \cdot \frac{20}{1}$$

$$= 230V \cdot 20 = 4600V$$

$$= \underline{\underline{4,6 \text{ kV}}}$$



Wird die Luft ionisiert (durch eine Flamme), so findet an den Hörnspitzen eine Funkenentladung statt.

10 Induktion - 2.4 Transformator

3

a) Um die 12 V - Halogenstrahler einer Deckenleuchte mit der passenden Spannung zu versorgen, ist in der Lampe ein Trafo eingebaut. **Berechne die Windungszahl auf der Sekundärseite, wenn der Trafo auf der Primärseite 920 Windungen hat.**

$$a) \frac{n_s}{n_p} = \frac{U_s}{U_p} \quad | \cdot n_p$$

$$n_s = n_p \cdot \frac{U_s}{U_p} = 920 \cdot \frac{12V}{230V} = \underline{\underline{48}}$$

b) Ein Steckernetzteil soll ein Smartphone mit 5 V Ladespannung versorgen. **Gib das Verhältnis der Windungszahlen von Primär- und Sekundärspule an. Berechne auch die Stromstärke an der Steckdose, wenn das Smartphone mit 1 A geladen wird** (die Ergebnisse sind Näherungswerte auf Basis der idealisierten Formeln).

$$b) \frac{n_p}{n_s} = \frac{U_p}{U_s} = \frac{230V}{5V} = \frac{46}{1}$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{n_s}{n_p} \quad | \cdot I_s$$

$$I_p = I_s \cdot \frac{n_s}{n_p} = 1A \cdot \frac{1}{46} = 0,022A = \underline{\underline{22mA}}$$

**An Aufnahmestationen für Kriegsflüchtlinge konnte man häufig ein Gewirr von Smartphones und Ladegeräten an Vielfachsteckdosen sehen. Erläutere, ob dadurch ein Problem für die Strominfrastruktur entstehen könnte und beurteile die Bedeutung der Lademöglichkeit für die Betroffenen.**

Auf der Seite der Netzspannung ist die Stromstärke sehr gering, deshalb können sehr viele Handys per Vielfachsteckdose an einer Stromversorgung geladen werden. Kommunikationmöglichkeit sehr wichtig für die Geflohenen.

### Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifaphysik gibt's unter **Teilgebiet Elektrizitätslehre - Induktion und Transformator - Transformator Aufgaben** ein Quiz sowie einige gut geeignete Aufgaben zum Üben (z.B. Hörnerblitzableiter, Schweißtransformator, heißer Nagel, Transformator für Netzteil).

### Selbst-Check:

- Spannungsregel
- Stromregel
- Anwendungen