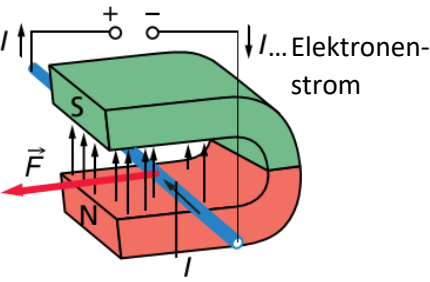
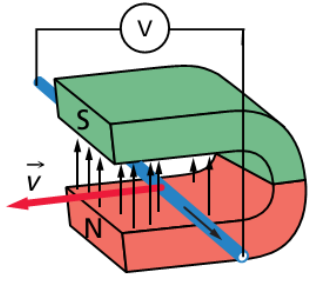


Elektromagnetische Induktion

1. Induktionsgesetz

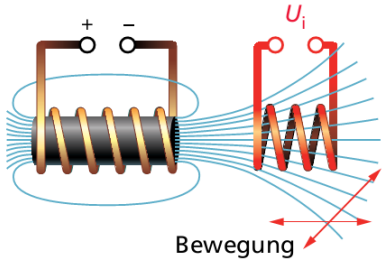
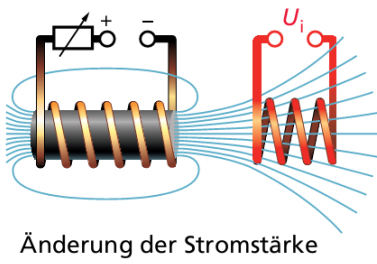
Physikalische Grundlagen:

elektromotorisches Prinzip	Generatorprinzip
 <p>Diagramm des elektromotorischen Prinzips: Ein Leiter (blau) ist in einem Magnetfeld (grün) zwischen den Polen S (Südpol) und N (Nordpol) bewegt. Ein Strom I fließt durch den Leiter, und eine Kraft \vec{F} wirkt auf ihn. Ein Elektronenstrom fließt in die gleiche Richtung.</p>	 <p>Diagramm des Generatorprinzips: Ein Leiter (blau) ist in einem Magnetfeld (grün) zwischen den Polen S (Südpol) und N (Nordpol) bewegt. Eine Spannung U wird zwischen den Enden des Leiters gemessen.</p>
Auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld wirkt eine Kraft.	Bei einem bewegten Leiter im Magnetfeld entsteht eine Spannung als Wirkung der Lorentzkraft.

Wird ein Leiter der Länge l in einem homogenen Magnetfeld senkrecht zu den Feldlinien gleichförmig bewegt, so kommt es zur Ladungsverschiebung. Die dadurch zwischen seinen Enden auftretende Spannung kann berechnet werden:

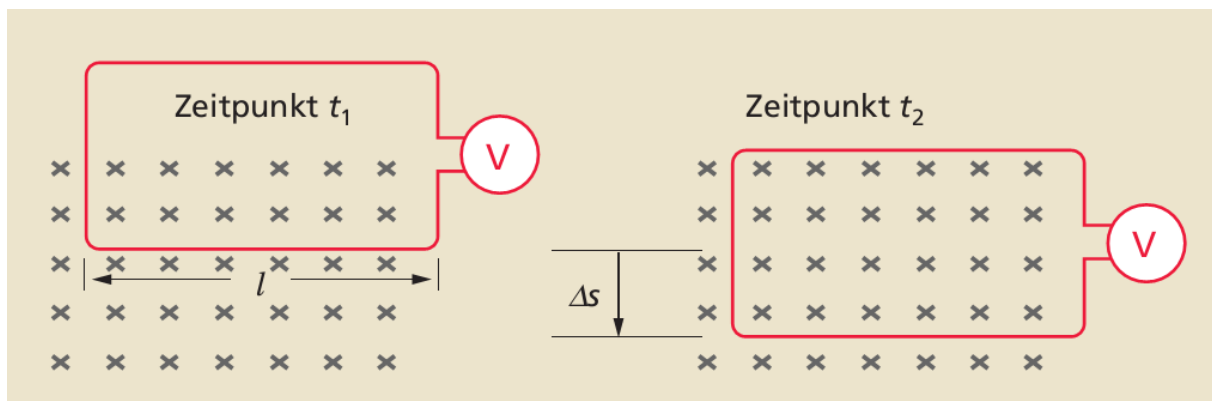
Lorentzkraft auf ein Elektron $F_L = e \cdot v \cdot B$	Elektrische Feldkraft im Leiter $F_E = e \cdot E = e \cdot \frac{U}{l}$
Kräftegleichgewicht $F_L = F_E$ $e \cdot v \cdot B = e \cdot \frac{U}{l}$	
Spannung	$U = v \cdot B \cdot l$ mit v ... Geschwindigkeit des Leiters B ... magnetische Flussdichte l ... Länge des Leiters

Die Erscheinung, dass zwischen den Enden eines Leiters bei Bewegung im magnetischen Feld oder bei einer Änderung des Magnetfeldes eine Spannung entsteht, wird als **elektromagnetische Induktion** bezeichnet. Die Spannung wird **Induktionsspannung** genannt. Der bei geschlossenem Stromkreis fließende Strom heißt **Induktionsstrom**.

Fall ①	Fall ②
Induktion im zeitlich konstanten Magnetfeld	Induktion im zeitlich veränderlichen Magnetfeld
	
Durch die Bewegung einer Spule im zeitlich konstanten Magnetfeld wird eine Spannung induziert.	Durch die zeitliche Änderung der Stärke des Magnetfeldes wird in der ruhenden Spule eine Spannung induziert.

Fall ①: Betrag der Induktionsspannung bei zeitlich konstantem Magnetfeld

Ein zeitlich konstantes, homogenes Magnetfeld kann durch einen Dauermagneten oder einen Elektromagneten bei konstanter Stromstärke hervorgerufen werden. Die rechteckige Leiterschleife befindet sich senkrecht zum Magnetfeld. Wird die Leiterschleife in das Magnetfeld hineingeschoben, so entsteht eine Induktionsspannung im wirksamen Leiterstück der Länge l .



Induktionsspannung: $U_i = v \cdot B \cdot l$
 $U_i = \frac{\Delta s}{\Delta t} \cdot B \cdot l$

Die Änderung der vom Magnetfeld durchsetzten Fläche beträgt $\Delta A = \Delta s \cdot l$.

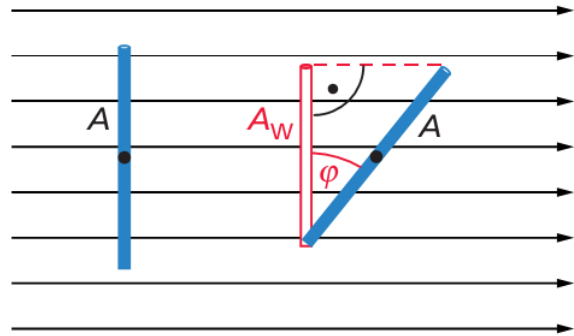
$$U_i = \frac{\Delta A}{\Delta t} \cdot B$$

Eine Spule mit der Windungszahl N wird als Reihenschaltung von Leiterschleifen betrachtet. Somit addieren sich die Teilspannungen.

$$U_i = N \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} \cdot B$$

Befindet sich die Spule unter einem beliebigen Winkel φ zu den Feldlinien, ist die wirksame Fläche A_w kleiner als die Spulenfläche A .

$$A_w = A \cdot \cos \varphi$$



In einem zeitlich konstanten Magnetfeld hängt die induzierte Spannung von der Änderungsgeschwindigkeit der wirksamen Fläche ab.

Fall ②: Betrag der Induktionsspannung bei zeitlich veränderlichem Magnetfeld

Ein zeitlich veränderliches Magnetfeld entsteht durch einen Elektromagneten mit veränderlicher Stromstärke oder durch Verschieben des Eisenkerns in der Spule. Die induzierte Spannung hängt von der Änderungsgeschwindigkeit der magnetischen Flussdichte ab.

$$U_i = N \cdot A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

Der magnetische Fluss:

Bei gleichzeitiger zeitlicher Änderung von wirksamer Fläche und magnetischer Flussdichte ist es sinnvoll, die Größen Fläche und Flussdichte miteinander zu verknüpfen. Dafür wird die Größe **magnetischer Fluss** eingeführt.

Der **magnetische Fluss** ist ein Maß für das die wirksame Fläche einer Leiterschleife oder Spule durchsetzende Magnetfeld. Unter der Voraussetzung, dass die Fläche senkrecht zur Feldrichtung liegt, gilt:

$$\Phi = A \cdot B$$

$$\Phi = 1 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A}} = \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{A}} = \frac{\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}}{\text{A}} = \text{V} \cdot \text{s}$$

$$\Phi = 1 \text{ Wb} \dots \text{Weber}$$

Ist der Betrag des magnetischen Flusses konstant, durchdringt die gleiche Anzahl von Feldlinien unterschiedlich große Flächen. Je kleiner die Fläche, desto dichter verlaufen die Feldlinien. Somit liegt bei der kleinen Fläche die größere magnetische Flussdichte vor.

Formulierung des Induktionsgesetzes (Michael Faraday):

In einer Leiterschleife oder Spule wird eine Spannung induziert, solange sich der magnetische Fluss durch die Leiterschleife oder Spule zeitlich ändert.

$$U_i = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{mit } N \dots \text{Windungszahl der Spule}$$

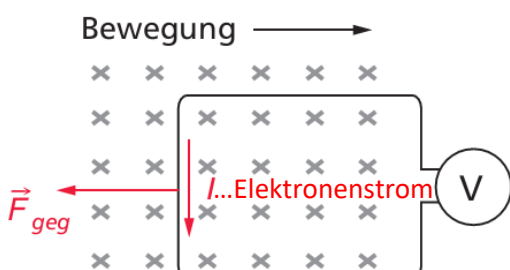
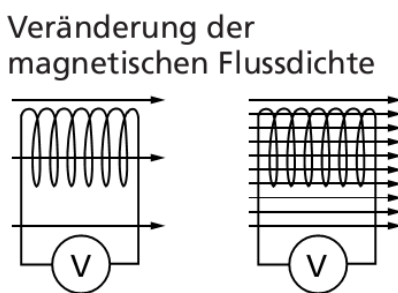
$\Delta\Phi \dots$ Änderung des magnetischen Flusses
 $\Delta t \dots$ Zeitintervall

Das negative Vorzeichen wird unter Berücksichtigung des **Lenzschen Gesetzes** eingeführt (➤ folgendes Kapitel).

A

2. Lenzsches Gesetz

Für Induktionsvorgänge gilt im abgeschlossenen System der Energieerhaltungssatz.

Induktion im zeitlich konstanten Magnetfeld	Induktion im zeitlich veränderlichen Magnetfeld
	
Wird eine Leiterschleife bewegt, so wird eine Spannung induziert und damit ein Strom hervorgerufen.	Vergrößert sich die magnetische Flussdichte, so wird eine Spannung induziert und damit ein Strom hervorgerufen.
Der Induktionsstrom ist so gerichtet, dass er eine Kraft entgegen der Bewegungsrichtung hervorruft.	Der Induktionsstrom ist so gerichtet, dass er ein Magnetfeld hervorruft, das der Verstärkung des magnetischen Flusses entgegenwirkt.
Es wird mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt.	Es wird Energie des magnetischen Feldes in elektrische Energie umgewandelt.

Formulierung des Lenzschen Gesetzes:

Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass er der Ursache seiner Entstehung entgegenwirkt.

Selbstinduktion:

Wird ein Stromkreis mit Spule geschlossen oder geöffnet bzw. wird die Spule von Wechselstrom durchflossen, ändert sich das Magnetfeld, das die Spule umfasst. Somit werden in der felderzeugenden Spule selbst eine Spannung und ein Strom induziert. Diese Erscheinung überlagert sich mit der vorhandenen Spannung der Spannungsquelle und dem dadurch im Stromkreis fließenden Strom. Für eine Spule ergibt sich der Betrag der **Selbstinduktionsspannung** aus dem Induktionsgesetz:

$$U_i = -N \cdot A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad \text{mit} \quad B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

$$U_i = -N \cdot A \cdot \frac{\Delta \left(\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{l} \right)}{\Delta t}$$

Die Stromstärke erfährt eine zeitliche Änderung.

$$U_i = -\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Die Konstanten werden zusammengefasst. Dieser Faktor wird als **Induktivität L** der Spule bezeichnet.

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l} \quad \text{mit} \quad L = 1 \frac{V \cdot s}{A} = 1 H \dots \text{Henry}$$

Eine Spule besitzt die Induktivität von 1 H, wenn bei einer Änderung der Stromstärke von 1 A im Zeitintervall von 1 s die Spannung 1 V induziert wird.

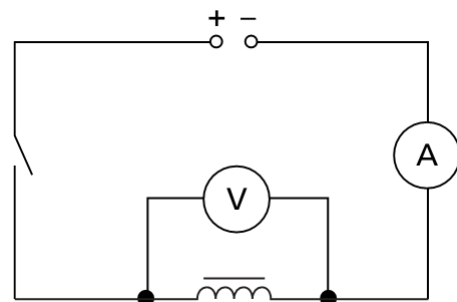
Die **Selbstinduktionsspannung** einer Spule beträgt:

$$U_i = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

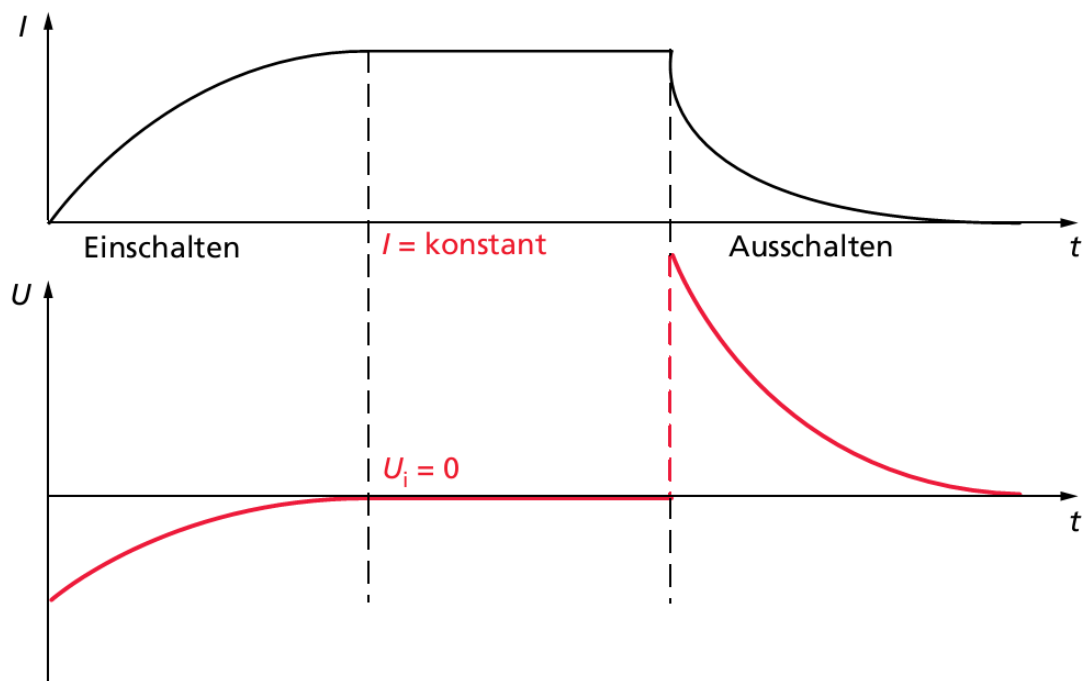


Betrachtung eines Stromkreises mit Spule:

Im **Gleichstromkreis** verzögert die Selbstinduktion beim Einschalten den Anstieg der Stromstärke. Beim Ausschalten bewirkt sie ein Weiterfließen des Stromes.



Zeitlicher Verlauf von Stromstärke I und Selbstinduktionsspannung U_i :



Liegt eine Wechselspannung an, so erfolgt in der Spule ständig Selbstinduktion.
Die Spule wirkt als **induktiver Widerstand**.