

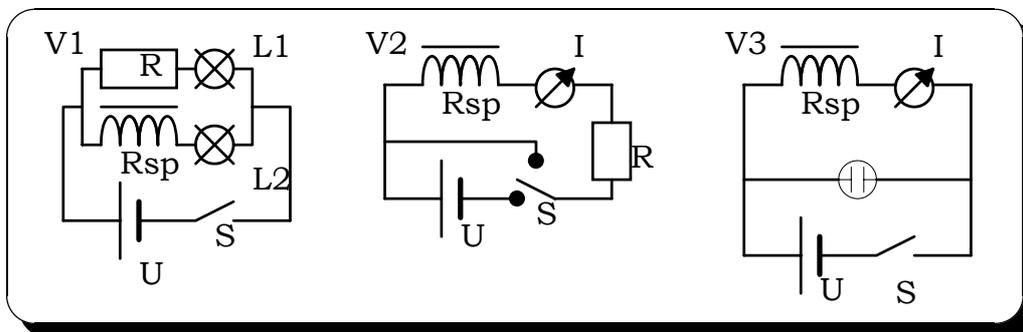
## 1.2.8 Selbstinduktion, Induktivität

### Grundversuche

Versuch 1: An eine Spannungsquelle werden parallel zwei Glühlampen geschaltet. In den Zweig der einen wird eine Spule mit Eisenkern, in den der anderen ein gleich großer ohmscher Widerstand geschaltet (vgl. Skizze 1).  
Ergebnis: Beim Einschalten leuchtet das Lämpchen im Teilkreis mit der Spule deutlich verspätet auf.

Versuch 2: Die "Spule hoher Induktivität" wird über einen Schalter geladen und über den Strommesser entladen (vgl. Skizze 2).  
Ergebnis: Beim Ein- wie beim Ausschaltvorgang nähert sich die Stromstärke asymptotisch den Grenzwerten.

Versuch 3: Ein Glimmlämpchen und eine Spule ( $n = 10000$ ) liegen parallel über einen Schalter an einer Spannungsquelle (vgl. Skizze 3). Die angelegte Spannung ist wesentlich kleiner als die Zündspannung des Glimmlämpchens. Der Schalter wird geöffnet.  
Ergebnis: Es blitzt kurzzeitig die Elektrode der Glimmlampe auf, die mit dem Pluspol der Spannungsquelle verbunden war. Die Spannung war also kurzzeitig wesentlich größer als die angelegte Batteriespannung.



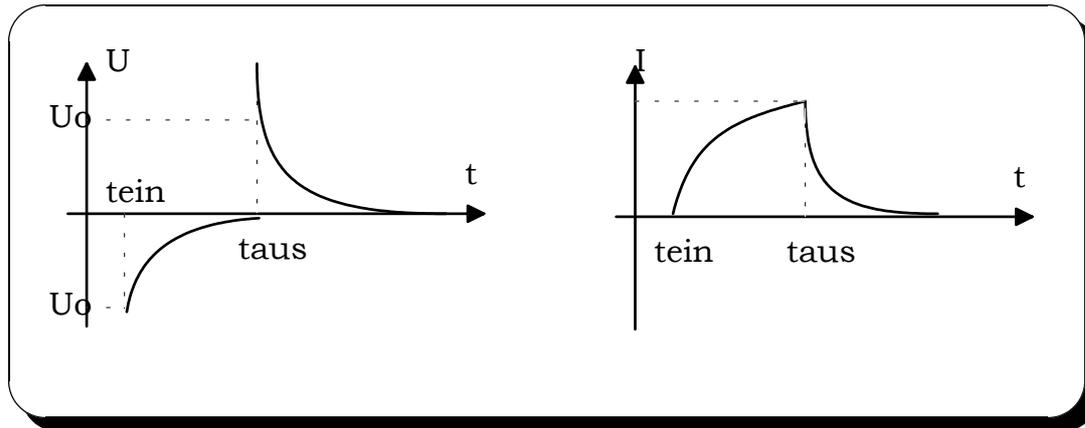
Erklärung: In einer Spule wird eine Spannung induziert, wenn ihr magnetischer Fluss geändert wird. Diese Änderung wird auch durch die Änderung des eigenen Feldes aufgrund der Änderung der Stromstärke beim Ein- und Ausschalten bewirkt. Nach der Lenzschen Regel sucht die Wirkung die Ursache zu hemmen (verzögertes Anwachsen beim Einschalten bzw. Zusammenbrechen beim Abschalten). Weil die Spule gleichzeitig Feld- und Induktionsspule ist, heißt dieser Vorgang Selbstinduktion.

Anmerkungen:

1. Versuch 1 ist zur Beobachtung der Phänomene beim Ausschalten nicht geeignet, da nach Trennung von der Spannungsquelle beide Lämpchen in demselben Stromkreis liegen, also mit gleicher Verzögerung erlöschen.

2. Die zunächst überraschenden Ergebnisse von Versuch 3 lassen sich bei konsequenter Denkweise zwanglos erklären: Wegen der Lenzschen Regel versucht die Selbstinduktion das Zusammenbrechen des Stromes beim Abschalten der Batteriespannung zu verhindern; der Strom bricht nicht sofort völlig zusammen, sondern fließt noch kurzzeitig, aber rasch abfallend, in der ursprünglichen Richtung durch die Spule weiter (vgl. Skizzen!). Das Zusammenbrechen des Magnetfeldes aufgrund des Stromabfalls ändert den magnetischen Fluss in kurzer Zeit sehr stark und bewirkt daher eine hohe Induktionsspannung, die die Glimmlampe aufblitzen lässt. Ein Kontrollversuch zeigt, dass die leuchtende Elektrode einer Glimmlampe stets mit dem negativen Pol einer Spannungsquelle verbunden ist; daraus lässt sich die Stromrichtung durch die Stromquelle ermitteln. Es leuchtet also diejenige Elektrode auf, von der die technische Stromrichtung durch die Spannungsquelle weg zeigt. Genau dies ist auch in Versuch 3 der Fall!
3. Die Größe der beobachteten Selbstinduktionsspannung kann auch durch folgende Überlegung abgeschätzt werden: Im Moment des Abschaltens hat die Stromstärke noch den Wert  $I$ , die Spule stellt die alleinige Quelle dar. Für die Selbstinduktionsspannung gilt in diesem Moment  $U_i = R \cdot I$ , wobei  $R$  der Widerstand desjenigen Kreises ist, durch den der Strom jetzt fließt. Hat die Spule den ohmschen Widerstand  $R_{Sp} = 10 \Omega$ , so fließt bei 6 V Batteriespannung zunächst ein Strom der Stärke  $I = 0,6 \text{ A}$ . Hat die Glimmlampe nur einen Widerstand  $R_{Gl} = 1000 \Omega$ , dann beträgt der kurzzeitige Spannungsabfall bereits  $U_i = 600 \text{ V}$ , ein Vielfaches der nötigen Zündspannung!
4. Das rasche Abklingen des Stroms bei hohem Widerstand im Stromkreis kann so erklärt werden: Unmittelbar nach dem Abschalten fließt noch der hohe stationäre Endstrom. Er erzeugt in dem Gesamtwiderstand die Wärmeleistung  $P = R_{ges} \cdot I^2$ , die um so höher ist, je größer  $R_{ges}$  ist. Eine hohe Wärmeleistung bedingt jedoch einen raschen Abbau der Feldenergie und damit des Magnetfeldes der Spule. Da der magnetische Fluss in der Spule proportional zum Spulenstrom ist, ist der rasche Feldabbau mit einem raschen Abbau des Spulenstroms verbunden.

Skizzen zur Verdeutlichung des zeitlichen Verlaufs von Stromstärke und induzierter Spannung beim Ein- und Ausschalten eines Kreises mit Selbstinduktion:



Die hohen Spannungsstöße können beim Ausschalten von Motoren und Elektromagneten gefährlich werden. Auch an den Spulen einer elektrischen Klingel treten solche Funken bei jeder Unterbrechung auf und lassen die Kontakte allmählich verschmoren. Auch elektrische Weidezäune und Unterbrecher im Auto basieren auf der erhöhten Selbstinduktionsspannung beim Abschalten von Stromkreisen.

Zusammenfassung: Die Selbstinduktionsspannung  $U_{\text{ind}}$  verzögert nach Lenz sowohl den Anstieg als auch die Abnahme des Stromes. Nach Abschalten der äußeren Spannung  $U_a$  fließt der Spulenstrom in der ursprünglichen Richtung weiter.

### Die Induktivität L

Die Erscheinungen bei den bisherigen Versuchen lassen sich nur die Wirkung einer Induktionsspannung erklären. Diese Spannung lässt sich für den Fall einer langgestreckten Zylinderspule ( $n$ ,  $l$ ,  $d$ ) aus dem Induktionsgesetz leicht berechnen:

Für die Induktionsspannung gilt wegen

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

$$U_{\text{ind}} = -n \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -n \cdot \mu_0 \cdot n \cdot \frac{A}{l} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \text{ bzw.}$$

$$U_{\text{ind}} = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \text{ mit } L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot \frac{A}{l}.$$

Die Größe  $L$  heißt Induktivität der langgestreckten Zylinderspule und hat die Einheit  $1 \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = 1\text{H}$ .

Anmerkung:

Die Gleichung  $U = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$  (für Mittelwerte) bzw.  $U = -L \cdot \dot{I}$  (für Momentanwerte) gilt für beliebige Spulen. Allerdings lässt sich im allgemeinen die Induktivität  $L$  nicht nach obiger Gleichung berechnen.

Zusammenfassung: Wenn sich ein Strom ändert, induziert er im eigenen Leiterkreis eine Selbstinduktionsspannung. Sie wirkt ihrer Ursache, der Stromstärkeänderung, entgegen. Die Selbstinduktionsspannung  $U_{\text{ind}}$  ist der Änderungsgeschwindigkeit  $\frac{dI}{dt}$  der Stromstärke  $I$  proportional ( $\mu_r = \text{konstant}$ ):

## Selbstinduktion

---

$$U_{\text{ind}} = -L \cdot \frac{dI}{dt}.$$

Der Proportionalitätsfaktor  $L$  heißt Eigeninduktivität:

$$[L] = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = 1 \text{H (Henry)}.$$

Die Eigeninduktivität  $L$  schlanker Spulen ist  $L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot n^2 \cdot \frac{A}{l}$ .