

## 11. Selbstinduktion

### a. Auf- und Abbau des Magnetfeldes

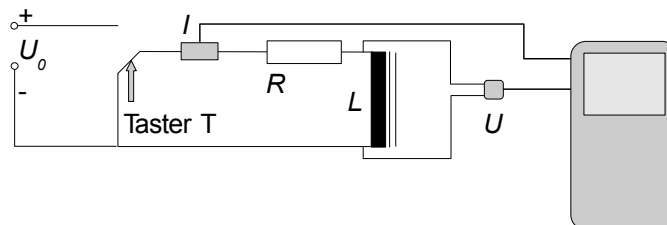
Wenn sich die Stromstärke in einem Leiter ändert, entsteht stets eine Induktionsspannung in diesem Leiter selbst, die Selbstinduktionsspannung  $U_i(t) = -L \cdot \dot{i}$ . Sie ist nach der Lenz'schen Regel stets so gerichtet, dass sie der Änderung des Magnetfeldes entgegenwirkt, also den Aufbau verzögert und den Abbau verlängert, was bei Spulen hoher Induktivität zu deutlich merkbaren Effekten führt. Der Verlauf von Spannung und Stromstärke soll gleichzeitig gemessen werden.

Zur Berechnung des funktionalen Zusammenhanges im Idealfall betrachtet man den Aufbau als Masche und stellt die entsprechenden Gleichungen für die Spannungen auf.

Man erhält als Lösung für den Aufbau  $I_L(t) = I_0 \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$   $U_L(t) = -U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$   
 und für den Abbau des Magnetfeldes  $I_L(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$   $U_L(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$

Der Widerstand  $R$  setzt sich dabei zusammen aus dem ohmschen Widerstand des Spulendrahtes und den Vorwiderständen. Als Induktivität wird eine Spule auf einem geschlossenen Eisenkern (Transformatorkern) verwendet.

#### Aufbau:



Gleichspannungsquelle  $U_0 < 10 \text{ V}$  (im Versuch  $4 \text{ V}$ )

Umschalter (Morsetaster)

Widerstand  $R = 120 \ \Omega$

Selbstinduktionsspule  $L$  hoher Windungszahl auf geschlossenem Trafokern,  
 z. B.  $n = 1600$  Windungen bei  $R_i = 45 \ \Omega$  und  $L = 50 \text{ mH}$  (ohne Kern)

Spannungssensor (Eingang 1)

Stromsensor (Eingang 2)

**Durchführung:***Einstellungen:*

Messrate: 500 Messungen pro Sekunde

Messdauer: 0,5 s

*Trigging:* Spannung (Eingang 1)

Abnahme über den Schwellenwert

Schwellenwert: 0,01 V

Vorspeicherung 50 %

*Durchführung:*

Messung starten und Taster T **kurz** drücken und loslassen.

Spannungssensor für die richtige Darstellung evtl. umpolen.

Versuch so oft durchführen, bis sich für die Spannung eine Darstellung wie in Bild 11.1 und für die Stromstärke wie in 11.2 ergibt.

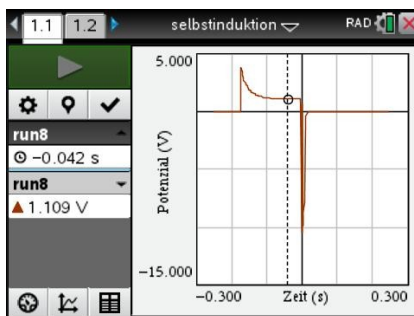


Bild 11.1

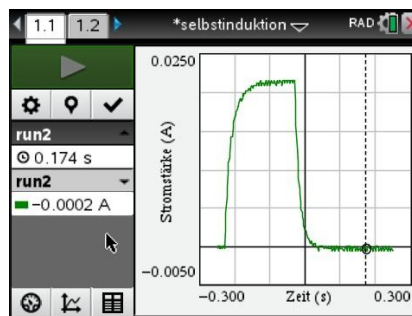


Bild 11.2

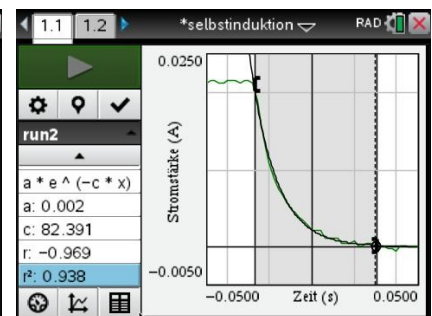


Bild 11.3

**Auswertung:**

1. Beim Auf- und Abbau des Magnetfeldes entstehen durch *Selbstinduktion* hohe Spannungen, beim Einschalten eine kleinere (3,8 V) als beim Ausschalten (-9,8 V), wohingegen die Spannung an der Induktivität im Dauerbetrieb nur 1,1 V beträgt.
2. Am besten lässt sich der *Abbau des Magnetfeldes* bei der Stromstärke  $I$  auswerten. Dazu müssen die Fenstereinstellungen so verändert werden, dass dieser Bereich gut dargestellt wird (Bild 11.3).
2. Dann werden die zur Auswertung vorgesehenen Daten markiert (grau hinterlegter Bereich in Bild 11.3).
3. Mit diesen Daten wird eine exponentielle Regression zur Basis  $e$  durchgeführt.
4. Das Ergebnis ist ebenfalls in Bild 11.3 dargestellt. Man erhält  $I_0 = 0,002$  A (abhängig von der Wahl der Triggerschwelle) sowie  $R/L = 78,109$  1/s. Mit dem Gesamtwiderstand von  $R = 165$   $\Omega$  ergibt sich daraus eine Induktivität  $L = 2,11$  H.

## b. Hohe Spannungen beim Feldabbau

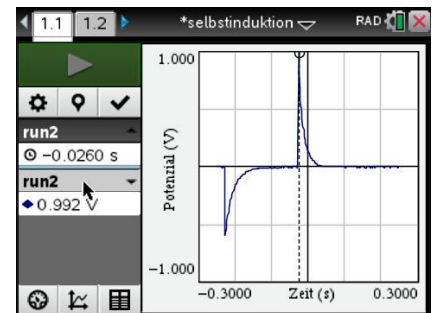
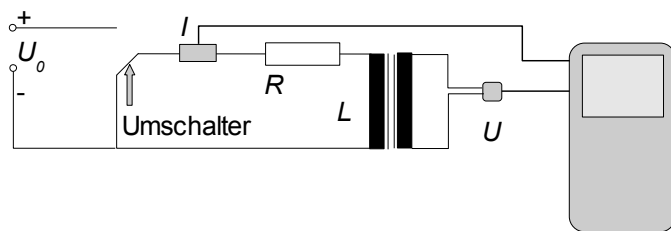


Bild 11.4

Zum Schutz des Sensors und zur besseren Darstellung der reinen Induktionsspannung wird jetzt die Spannung an einer Sekundärspule mit deutlich geringerer Windungszahl von z. B. 400 Windungen gemessen (Bild 11.4). Deutlich ist wieder zu erkennen, dass beim Einschalten die Spannungsspitze kleiner ausfällt als beim Ausschalten ( $-0,591\text{ V}$  gegenüber  $+0,992\text{ V}$ ) (die Umkehrung der Spannungsspitzen folgt aus dem Induktionsgesetz).

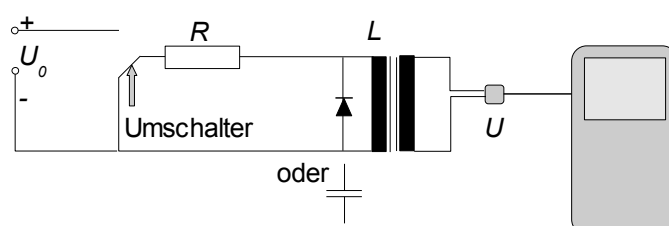
### Auswertung:

1. Vorwiderstand ( $120\ \Omega$ ) und Drahtwiderstand ( $45\ \Omega$ ) der Induktionsspule (Primärspule) bilden einen Spannungsteiler. Bei einer Betriebsspannung von jetzt  $U_0 = 6\text{ V}$  entfällt auf die Primärspule eine Teilspannung von  $U_1 = 1,6\text{ V}$ .
2. Das Verhältnis der Windungszahlen der verwendeten Spulen ist 4:1. Beim Einschalten wurden  $-0,591\text{ V}$  in der Sekundärspule gemessen; das entspricht rund  $2,4\text{ V}$  in der Primärspule.
3. Beim Ausschalten sind es sogar fast  $-4\text{ V}$  in der Primärspule.
4. Beide Spannungen sind ein Vielfaches von  $U_1$ . Man sieht recht gut, dass insbesondere beim Ausschalten recht hohe Spannungen entstehen können. Es entstehen Funken, die Kontakte können schmelzen („Abbrand“) und die hohen Spannungen können andere Bauteile schädigen.

## c. Wirkung einer Freilaufdiode oder eines Schutzkondensators

Beide dienen dazu, die schädlichen hohen Spannungen beim An- und Abschalten eines Magnetfeldes zu unterdrücken.

### Aufbau-Änderungen:



- kein Stromsensor
- Spannungssensor an Eingang 1
- Kondensator z. B.  $C = 0,56 \mu\text{F}$  oder größer
- Si-Diode als Freilaufdiode (Polung beachten!)

### Durchführung – Änderungen:

- für alle:                      *Triggerung:* Potenzial (Eingang 1)
- nur Kondensator:         5000 Messungen pro Sekunde
- Dauer: 0,2 s

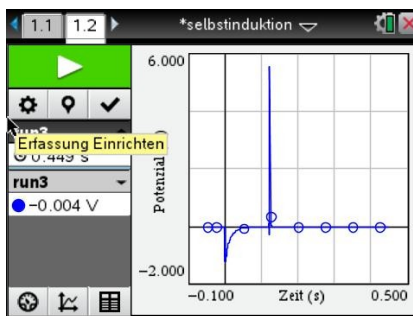


Bild 11.7

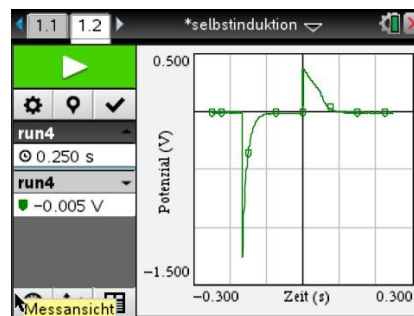


Bild 11.8

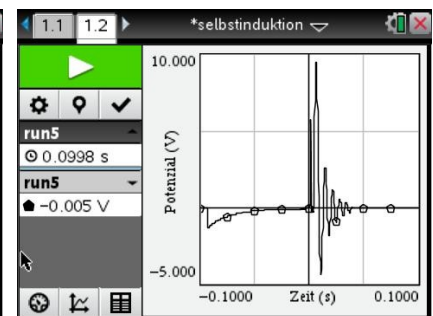
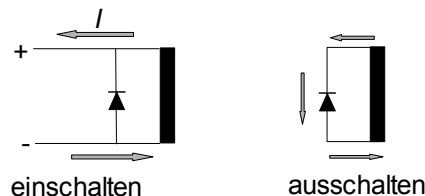


Bild 11.9

### Auswertung:

1. Durch den Wegfall des Stromsensors sind die Spannungsspitzen noch größer geworden, was man insbesondere beim Ausschalten gut sehen kann (Bild 11.7). Hier können auch u. U. noch größere Werte entstehen.
2. Baut man eine Freilaufdiode ein, so bleibt die unschädlichere Einschaltspitze unverändert erhalten, aber die Ausschaltspitze wird stark gekappt (Bild 11.8). Denn die Diode wird beim Einschalten in Sperrrichtung betrieben, sodass kein Strom hindurchfließen kann (dargestellt ist die physikalische Stromrichtung).



3. Beim Ausschalten fließt der Strom in dieselbe Richtung weiter. Jetzt kann er die Diode passieren, da sie jetzt leitet. Die Spannung wird dabei auf die Durchlassspannung von ca. 0,7 V bei Siliziumdioden begrenzt. Die im Magnetfeld gespeicherte Energie wird über die ohmschen Widerstände von Spule und Diode in Wärme umgewandelt.
4. Verwendet man einen Schutzkondensator, so werden die Spannungsspitzen nicht so gut gekappt. Stattdessen entsteht eine gedämpfte Schwingung (Bild 11.9), durch die die Energie des Magnetfeldes abgebaut wird.

5. Der Schwingkreis schwingt mit seiner Eigenfrequenz  $f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}}$  .

Bei der Beispielmessung sind  $C = 0,56 \mu\text{F}$  und  $L = 2,11 \text{ H}$ .

Damit ist  $f = 146 \text{ Hz}$  und  $T = 6,8 \text{ ms}$ . Man kann in Bild 11.9 mit dem Cursor den Graphen entlangfahren und so die Periodenlänge ausmessen. Über 3 Perioden gemessen erhält man dabei mit  $T = 7,5 \text{ ms}$  einen etwas größeren Wert als berechnet.