Laden und Entladen einer Spule

UNTERSUCHUNG DES VERLAUFS DES SPULENSTROMS BEIM EINSCHALTEN UND AUSSCHALTEN EINER GLEICHSPANNUNG

- **Messung des Spulenstroms beim Ein- und Ausschalten einer Gleichspannung.**
- **Bestimmung der Halbwertszeit beim Ein- und Ausschalten einer Gleichspannung.**
- **Untersuchung der Abhängigkeit der Halbwertszeit von Induktivität und Widerstand.**

UE3050201

06/17 UD

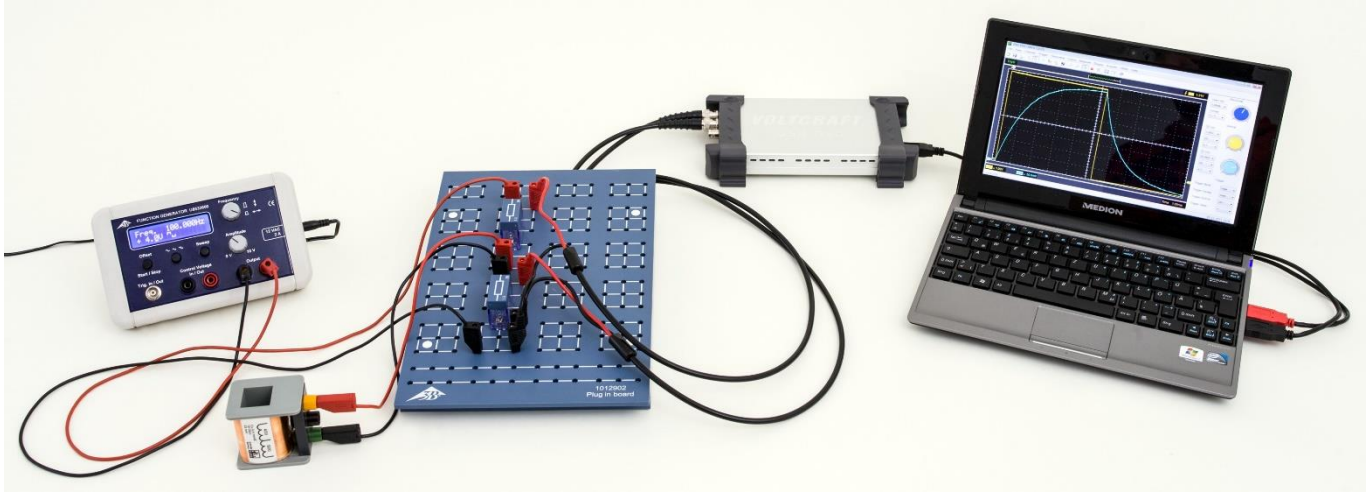

Fig. 1: Messanordnung

ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

Das Verhalten einer Spule in einem Gleichstromkreis ändert sich, sobald die Gleichspannung ein- und ausgeschaltet wird. Die Stromänderung wird durch Selbstinduktion in der Spule verzögert, bis beim Einschalten der Maximalwert und beim Ausschalten der Wert Null erreicht ist. Der Verlauf des Spulenstroms lässt sich als Exponentialfunktion darstellen.

Für einen Gleichstromkreis mit der Induktivität L, dem Ohmschen Widerstand R und der Gleichspannung $U_0 = R \cdot I_0$ gilt beim Einschalten

$$(1) \quad I(t) = I_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t \cdot \ln 2}{T_{1/2}}}\right)$$

und beim Ausschalten

$$(2) \quad I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t \cdot \ln 2}{T_{1/2}}}$$

mit

$$(3) \quad T_{1/2} = \ln 2 \cdot \frac{L}{R}.$$

$T_{1/2}$ ist die Halbwertzeit; d.h. innerhalb der Zeit $T_{1/2}$ nimmt der Spulenstrom auf die Hälfte ab. Die gleiche Zeit vergeht bei der Abnahme von der Hälfte auf ein Viertel und von einem Viertel auf ein Achtel.

Im Experiment wird dieser Sachverhalt überprüft. Dazu wird der zeitliche Verlauf des Spulenstroms mit einem Speicheroszilloskop aufgezeichnet. Gemessen wird der Strom als Spannungsabfall an einem in Reihe geschalteten Messwiderstand R_m. Der Strom I_0 ist so gewählt, dass sich die Hälfte, ein Viertel und ein Achtel dieses Wertes leicht ablesen lassen. Zur Variation des Ohmschen Widerstandes werden zusätzlich verschiedene Testwiderstände R_R in Reihe geschaltet.

Der Ohmsche Widerstand R ergibt sich insgesamt als Summe aus Testwiderstand, Ohmschem Anteil des Spulenwiderstandes und Messwiderstand zu:

$$(4) \quad R = R_R + R_L + R_m$$

GERÄTELISTE

1	Steckplatte für Bauelemente	1012902 (U33250)
1	Widerstand 1 Ω, 2 W	1012903 (U333011)
1	Widerstand 10 Ω, 2 W	1012904 (U333012)
1	Widerstand 22 Ω, 2 W	1012907 (U333015)
1	Widerstand 47 Ω, 2 W	1012908 (U333016)
1	Widerstand 150 Ω, 2 W	1012911 (U333019)
1	Satz 10 Brückenstecker	1012985 (U333093)
2	Spule mit 1200 Windungen S	1001002 (U8498085)
1	Funktionsgenerator FG 100 @230V	1009957 (U8533600-230)
oder		
1	Funktionsgenerator FG 100 @115V	1009956 (U8533600-115)
1	PC-Oszilloskop 2x25 MHz	1020857 (U11830)
2	HF-Kabel, BNC/4-mm-Stecker	1002748 (U11257)
1	Satz 15 Experimentierkabel 1 mm²	1002840 (U13800)

AUFBAU UND DURCHFÜHRUNG

- Messanordnung gemäß Fig. 2 aufbauen.
- Schaltung auf der Steckplatte gemäß Fig. 3 realisieren.
- Am Oszilloskop 1 ms als Zeitbasis, 1 V als Vertikalablenkung für CH1 und 50 mV für CH2, Trigger Mode Edge, Trigger Sweep Auto, Trigger Source CH1 und Triggerschwelle 522 mV einstellen.

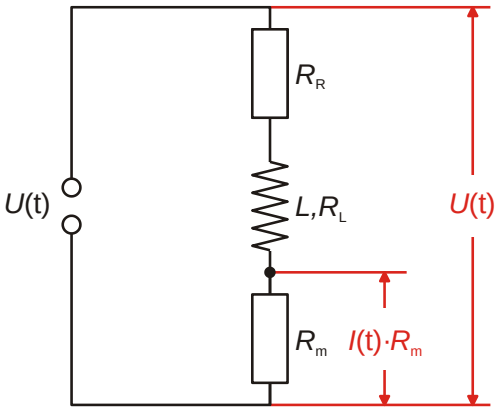

Fig. 3: Schaltskizze

Halbwertszeit beim Ein- und Ausschalten einer Gleichspannung

- Eine der Spulen mit 1200 Windungen / 23 mH und den Messwiderstand R_m = 1 Ω wie in Fig. 2 und 3 skizziert in die Steckplatte einstecken. Anstelle eines Testwiderstandes R_R zunächst einen Brückenstecker einstecken.
- Am Funktionsgenerator eine Frequenz von 100 Hz einstellen und die Signalform Rechteck auswählen.
- Die Amplitude so wählen, dass die Signalhöhe 8 V Spitze-Spitze, entsprechend ±4 Kästchen bei 1 V / Kästchen beträgt.
- Die Halbwertszeiten $T_{1/2}$ beim Ausschalten der Gleichspannung für Spannungsabfälle von 8 V auf 4 V, von 4 V auf 2 V und von 2 V auf 1 V am Oszilloskop ablesen und die Werte in Tab. 1 eintragen.

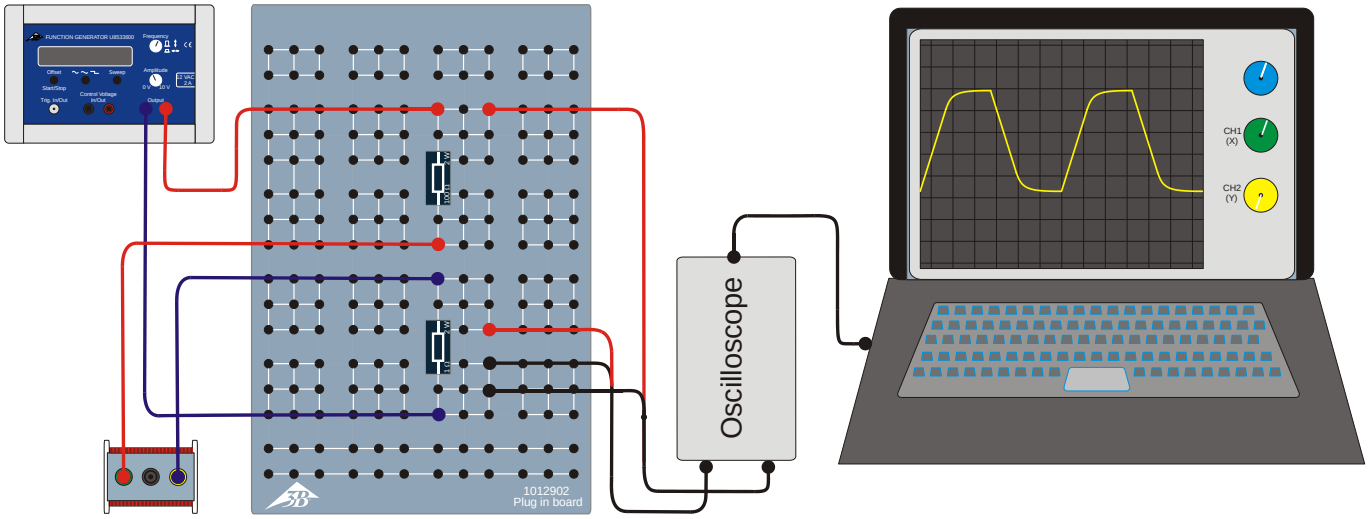

Fig. 2: Skizze der Messanordnung

- Die Halbwertszeiten $T_{1/2}$ beim Einschalten der Gleichspannung für Spannungsanstiege von 0 V auf 4 V, von 4 V auf 6 V und von 6 V auf 7 V am Oszilloskop ablesen und die Werte in Tab. 2 eintragen.

Da der Strom $I_0 = U_0 / R = U_m / R_m$ mit $R_m = 1\ \Omega$ sowohl durch den Messwiderstand als auch die Spule fließt, spiegeln die Spannungsabfälle und –anstiege am Messwiderstand insbesondere die Abfälle und Anstiege des Stroms durch die Spule wider.

Halbwertszeit für verschiedene Widerstände

- Eine der Spulen mit 1200 Windungen / 23 mH verwenden.
- Nacheinander den Brückenstecker ($R_R = 0\ \Omega$) sowie Testwiderstände mit R_R = 10, 22, 47 und 150 Ω einstecken.
- Für jeden Testwiderstand R_R die Halbwertszeit $T_{1/2}$ beim Ausschalten am Oszilloskop ablesen und die Werte in Tab. 3 eintragen. Optional die Halbwertszeit beim Einschalten zusätzlich bestimmen und jeweils Mittelwerte bilden.

Halbwertszeit für verschiedene Induktivitäten

- Den Testwiderstand $R_R = 47\ \Omega$ verwenden.
- Nacheinander Induktivitäten L = 23, 46 und 11,5 mH durch eine Reihen- oder Parallelschaltung der beiden Spulen mit 1200 Windungen / 23 mH realisieren.
- Für jede Induktivität L die Halbwertszeit $T_{1/2}$ beim Ausschalten am Oszilloskop ablesen und die Werte in Tab. 4 eintragen. Optional die Halbwertszeit beim Einschalten zusätzlich bestimmen und jeweils Mittelwerte bilden.

MESSBEISPIEL

Fig. 4 zeigt beispielhaft das Oszillogramm beim Ein- und Ausschalten der Gleichspannung. Die gelbe Kurve (CH1) zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannung, die über dem gesamten Ohm'schen Widerstand (s. Gl. (4)) abfällt, die blaue Kurve (CH2) den zeitlichen Verlauf des Spulenstroms.

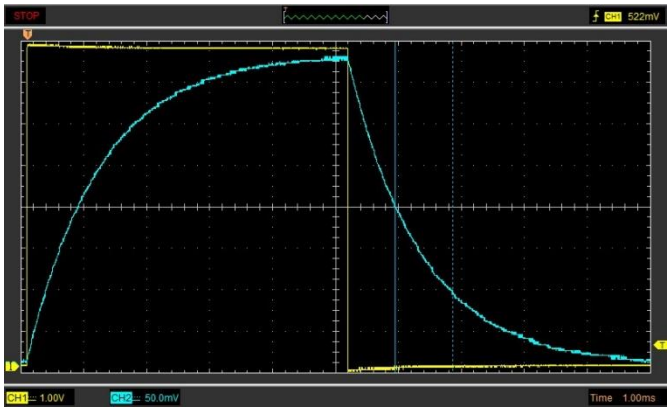

Fig. 4: Am Oszilloskop aufgezeichneter Spulenstrom (blaue Kurve) beim Ein- und Ausschalten.

Tab. 1: Halbwertszeiten $T_{1/2}$ für verschiedene Spannungsabfälle ($R_R = 0\ \Omega$, $R_m = 1\ \Omega$, $R_L = 19\ \Omega$, L = 23 mH).

$T_{1/2}(8\,V \rightarrow 4\,V)$	$T_{1/2}(4\,V \rightarrow 2\,V)$	$T_{1/2}(2\,V \rightarrow 1\,V)$
0,816 ms	0,788 ms	0,830 ms

Tab. 2: Halbwertszeiten $T_{1/2}$ für verschiedene Spannungsanstiege ($R_R = 0\ \Omega$, $R_m = 1\ \Omega$, $R_L = 19\ \Omega$, L = 23 mH).

$T_{1/2}(0\,V \rightarrow 4\,V)$	$T_{1/2}(4\,V \rightarrow 6\,V)$	$T_{1/2}(6\,V \rightarrow 7\,V)$
0,817 ms	0,835 ms	0,840 ms

Tab. 3: Halbwertszeiten $T_{1/2}$ für verschiedene Testwiderstände R_R ($R_m = 1\ \Omega$, $R_L = 19\ \Omega$, L = 23 mH).

R_R / Ω	0	10	22	47	150
R / Ω	20	30	42	67	170
$T_{1/2}$ / ms	0,83	0,44	0,38	0,25	0,10

Tab. 4: Halbwertszeiten $T_{1/2}$ für verschiedene Induktivitäten L ($R_R = 47\ \Omega$, $R_m = 1\ \Omega$).

L / mH	R_L / Ω	R / Ω	$T_{1/2}$ / ms
23,0	19,0	67,0	0,25
46,0	38,0	86,0	0,41
11,5	9,5	57,5	0,14

AUSWERTUNG

Halbwertszeit beim Ein- und Ausschalten einer Gleichspannung

Die Übereinstimmung der aus verschiedenen Kurvenabschnitten beim Ein- und Ausschalten bestimmten Werte für die Halbwertszeit (Tab. 1 und 2) bestätigt den erwarteten exponentiellen Verlauf, siehe Gleichungen (1) und (2).

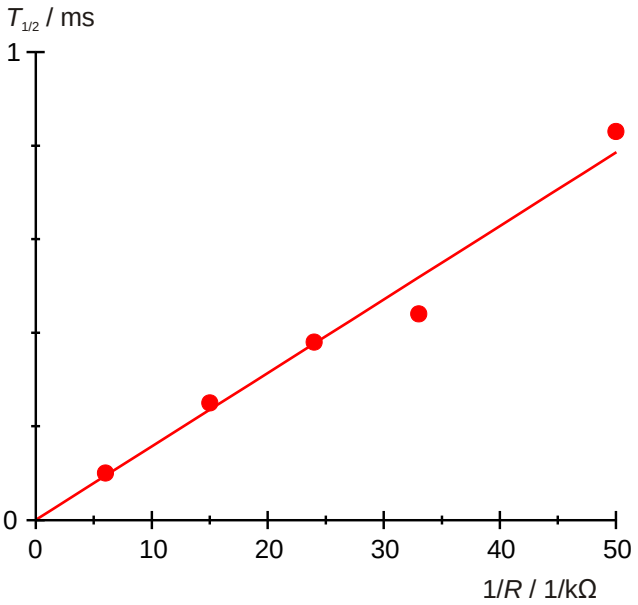

Fig. 5: Halbwertszeit $T_{1/2}$ als Funktion des Kehrwerts des Widerstandes R.

Tab. 5: Halbwertszeiten $T_{1/2}$ für die Quotienten L / R, berechnet aus den Werten in Tab. 3 und 4.

L/R / ms	$T_{1/2}$ / ms
0,14	0,10
0,20	0,14
0,34	0,25
0,55	0,38
0,53	0,41
0,77	0,44

Halbwertszeit für verschiedene Widerstände

- Die Halbwertszeiten $T_{1/2}$ aus Tab. 3 gegen die Kehrwerte der Ohm'schen Widerstände R in einem Diagramm auftragen und eine Ursprungsgerade anpassen (Fig. 5).
- Zur Überprüfung von Gleichung (3) aus der Geradensteigung m_L die Induktivität L bestimmen.

(5) $$T_{1/2} = \frac{m_L}{R} \text{ mit } m_L = \ln 2 \cdot L$$

$$\Rightarrow L = \frac{m_L}{\ln 2} = \frac{15{,}7}{\ln 2} = 22{,}5\,\text{mH}.$$

Der aus der Messung bestimmte Wert stimmt gut mit dem Nennwert L = 23 mH überein.

Halbwertszeit für verschiedene Induktivitäten

Da die Realisierung verschiedener Induktivitäten auch den Ohm'schen Widerstand verändert, wird die Abhängigkeit der Halbwertszeit vom Verhältnis L / R untersucht.

- Den Wert für die Induktivität L = 23 mH durch die Werte für die Ohmschen Widerstände R aus Tab. 3 dividieren, die Werte für die Induktivitäten L aus Tab. 4 durch die Werte für die Ohmschen Widerstände R aus Tab. 4 dividieren, und die Quotienten L / R mit den zugehörigen Halbwertszeiten aus Tab. 3 und 4 in Tab. 5 eintragen.
- Die Halbwertszeiten $T_{1/2}$ aus Tab. 5 gegen die Quotienten L / R in einem Diagramm auftragen und eine Ursprungsgerade anpassen (Fig. 6).
- Zur Überprüfung von Gleichung (3) aus der Geradensteigung m den Proportionalitätsfaktor ln2 bestimmen.

(6) $$T_{1/2} = m \cdot \frac{L}{R} \text{ mit } m = \ln 2$$

Der aus der Messung bestimmte Wert m = 0,66 stimmt gut mit dem theoretischen Wert ln2 = 0,69 überein.

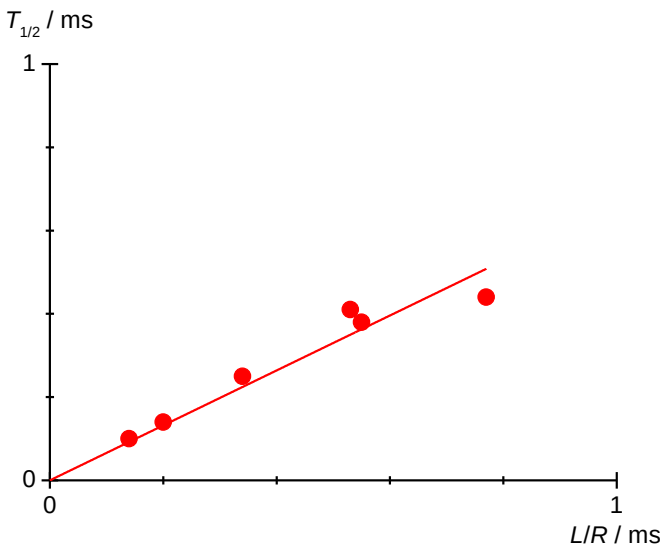

Fig. 6: Halbwertszeit $T_{1/2}$ in Abhängigkeit von L / R.

© Copyright 2017 3B Scientific GmbH