

Elektromagnetische Induktion ist das physikalische Grundprinzip, auf dem die gesamte Stromproduktion beruht (außer Photovoltaik, Batterie). Nachdem Oersted 1820 die magnetische Wirkung von Strom gezeigt hatte, suchte Faraday nach einem Weg, diesen Prozess umzukehren (mit Magnetismus Strom zu erzeugen).

Welche Größen könnten diese Spannung beeinflussen? Wir betrachten zunächst ein einzelnes Elektron, das sich im Leiter befindet, während dieser nach rechts gezogen wird. Ermittle mit Hilfe der UVW-Regel die Richtung der Lorentzkraft! Was passiert dadurch mit dem Elektron? Trage die Polung im Leiter ein, die sich daraus ergibt! Stelle den Gleichgewichtszustand mit Kräften dar und leite eine Formel für  $U_{ind}$  ab!

## 4. Induktion

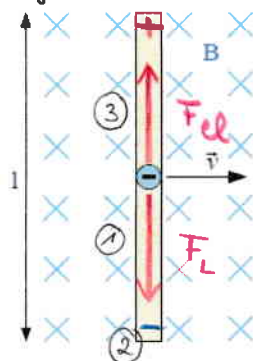
### 4.1 Induktion im bewegten Leiter Grundexperiment

Wird ein Leiter innerhalb eines Magnetfeldes bewegt, so entsteht an den Leiterenden eine elektrische Spannung (Induktionsspannung). Verbindet man die Leiterenden, so ergibt sich ein elektrischer Strom (Induktionsstrom). Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Richtung des Magnetfeldes, die Bewegungsrichtung und die Richtung des Magnetfeldes **senkrecht aufeinander stehen** oder zumindest entsprechende Teilkomponenten besitzen.



#### Erklärung und quantitative Analyse des Grundexperiments

- je mehr Geschwindigkeit, desto mehr Spannung
- je mehr Flussdichte (Magnetfeld), desto mehr Spannung
- je mehr Leiterlänge  $l$ , desto mehr Spannung



12 Induktion 4.1 Induktion im bewegten Leiter

$$F_L = F_{el}$$

$$q \cdot v \cdot B = q \cdot E \quad | : q$$

$$v \cdot B = E = \frac{U_{ind}}{l} \quad | \cdot l$$

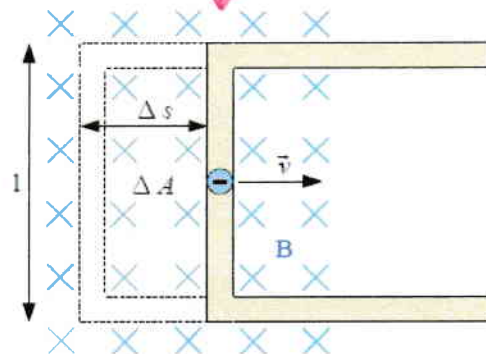
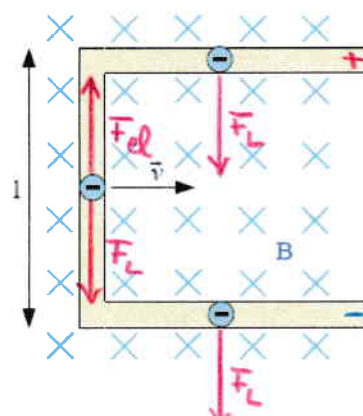
$$U_{ind} = B \cdot v \cdot l$$

Für Experimente führt man die Zuleitungen zum Drahtstück in der Regel innerhalb des Magnetfeldes, eine Leiterschleife entsteht.

Stelle in der oberen Zeichnung die Lorentzkräfte in allen Abschnitten der Leiterschleife durch Kraftpfeile dar! Was bewirken sie in den Drahtstücken, die längs zur Bewegungsrichtung verlaufen?

Im zweiten Bild ist die Leiterschleife zu einem späteren Zeitpunkt dargestellt. Diese Zeichnung dient zur Herleitung einer allgemeineren Formel, die neben dem Bild durchgeführt ist. Arbeite die Herleitung durch!  $A$  ist dabei die "wirksame Fläche", das ist der Bereich innerhalb der Leiterschleife, der vom Magnetfeld durchsetzt wird.  $\Delta A$  ist die Änderung dieser Fläche. Formuliere die Formel in Worten.

#### Leiterschleife (U-förmig):



In den Stücken längs zur Bewegungsrichtung verschiebt die Lorentzkraft die Elektronen quer zum Leiter (Halleffekt). Für die Spannung an den Leiterenden ist nur das Leiterstück quer zur Bewegungsrichtung wirksam.

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

Leiterschleife:

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

Spule mit N Windungen:

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

Die induzierte Spannung ergibt sich als Produkt aus der magnetischen Flussdichte mit der Änderung der wirksamen Fläche pro Zeit.

12 Induktion 4.1 Induktion im bewegten Leiter

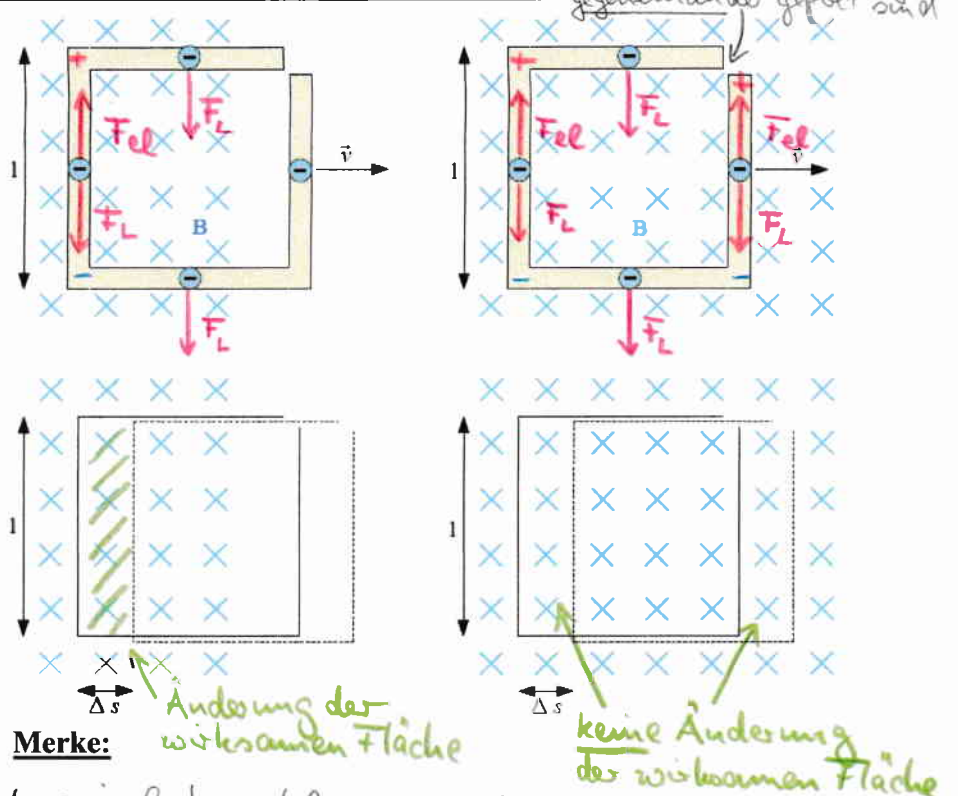
(gegebenenfalls mal Windungszahl bei einer Spule)

Betrachtet man die einzelnen Wicklungen einer Spule, so sind diese fast-geschlossene Leiterschleifen, die in der Spule aneinandergehängt werden. Solche O-förmigen Leiterschleifen zeigen am Rand bzw. ganz innerhalb eines homogenen Magnetfeldes unterschiedliches Verhalten bei der Induktionsspannung.

Zeichne bei den beiden oberen Bildern wieder alle Lorentzkräfte ein (beachte die Ausdehnung des Feldes!), sowie die Ladungstrennungen. Lässt sich an den Leitenden Spannung messen? In den unteren Bildern ist die Leiterschleife vereinfacht dargestellt. Ändert sich während der Bewegung die "wirksame Fläche"? Stelle eine Änderung durch Schraffur dar!

Formuliere einen Merksatz über die Induktionsspannung fast-geschlossener Leiterschleifen am Rand und innerhalb homogener Magnetfelder!

## Endgeschwindigkeit der Elektronen (Formel)



### Merke:

An einer fast-geschlossenen Leiterschleife tritt bei Bewegung im homogenen Magnetfeld nur dann Induktionsspannung auf, wenn die Bewegung am Rand des Magnetfeldes erfolgt (Eintritt bzw. Austritt).

12 Induktion 4.1 Induktion im bewegten Leiter

3

In dieser (alten) Abituraufgabe kommen die Erkenntnisse aus diesem Kapitel zum Einsatz. Aufgabe sinngemäß und Abb. aus leifiphysik.de. Ein homogenes Magnetfeld der Flussdichte  $B = 0,80 \text{ T}$  steht senkrecht zur Zeichenebene und ist dort auf ein quadratisches Gebiet der Kantenlänge  $9,0 \text{ cm}$  begrenzt. Durch dieses wird ein rechteckiger Drahtrahmen mit  $R = 4,0 \Omega$  (Maße in Skizze  $s = 3 \text{ cm}$ ) mit der konstanten

Geschwindigkeit  $v = 1,5 \text{ cm/s}$  genau  $11 \text{ s}$  lang von links nach rechts gezogen, danach wieder  $11 \text{ s}$  lang zurück. Zum Zeitpunkt  $t = 0 \text{ s}$  liegt der Rahmen am Rand des Magnetfeldes.

a) Bestimme die verschiedenen Induktionsspannungen, die in den einzelnen Abschnitten auftreten und zeichne ein  $t-U_{\text{ind}}$ -Diagramm.

b) Bestimme die Beträge der Kräfte, die dabei auf den Rahmen wirken.

### Training: Leiterschleife bewegt sich durch Magnetfeld

a) Breite Rahmen:  $2s = 2 \cdot 3 \text{ cm} = 6 \text{ cm}$

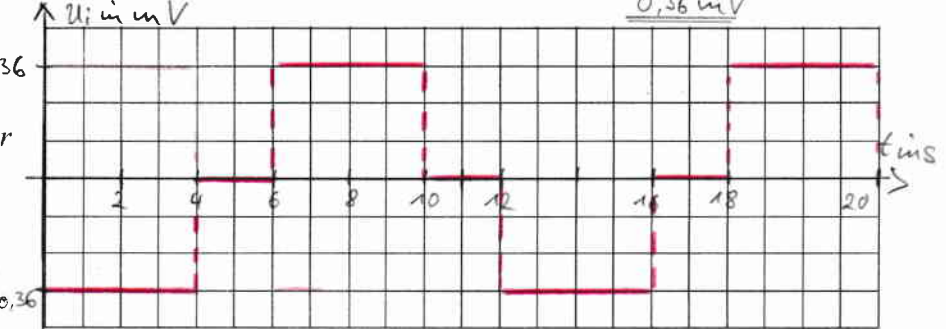
Dauer Eintritt:  $t = \frac{6 \text{ cm}}{1,5 \text{ cm/s}} = 4,0 \text{ s}$

Weg vollständig im Feld:  $9 \text{ cm} - 6 \text{ cm} = 3 \text{ cm}$

Dauer vollständig im Feld:  $\frac{3 \text{ cm}}{1,5 \text{ cm/s}} = 2,0 \text{ s}$

Dauer Austritt:  $4,0 \text{ s}$  (wie Eintritt)

Spannung bei Ein- und Austritt:  $U_i = B \cdot l \cdot v = 0,80 \text{ T} \cdot 0,03 \text{ m} \cdot 0,015 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,36 \text{ mV}$



$$I_{\text{ind}} = \frac{U_{\text{ind}}}{R} = \frac{0,36 \text{ mV}}{4,0 \Omega} = 0,090 \text{ mA}$$

$$F_L = B \cdot I_{\text{ind}} \cdot l = 0,80 \text{ T} \cdot 0,090 \text{ mA} \cdot 0,030 \text{ m} = 2,2 \mu\text{N}$$

nur bei Ein- und Austritt

### Selbst-Check:

- Analyse eines bewegten Leiterstückes (Formel)
- Flächenformel
- Bewegung im Magnetfeld und am Rand

### Übungsmöglichkeiten:

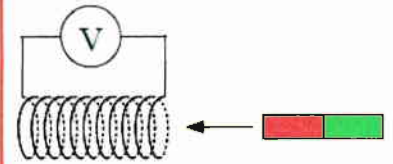
Auf Leifiphysik finden sich Aufgaben unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Induktion - Magnetischer Fluss und Induktionsgesetz Aufgaben z.B. die aus der Archäologie. Ebenso im Buch (S.101/1). Dieser Themenbereich wird aber in den weiteren Kapiteln des Skriptes auch noch ausgebaut.



Statt die Spule oder Leiterschleife gegenüber dem Magnetfeld zu bewegen, kann man auch das Feld verändern, während die Spule ruht, in dem man z.B. den Magneten bewegt. Es kommt nur auf die relative Bewegung zueinander an.

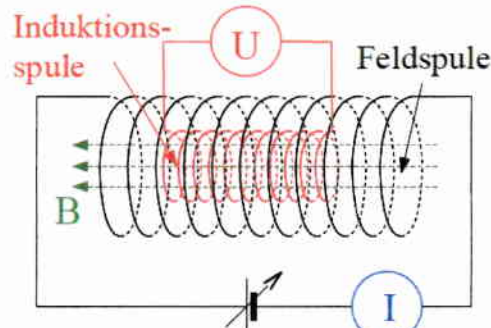
## 4.2 Induktion im ruhenden Leiter Grundexperiment

Verändert sich das Feld, das eine Leiterschleife (bzw. Spule) durchsetzt, so entsteht an der Leiterschleife eine Spannung (Induktionsspannung). Verbindet man die Leiterenden, so ergibt sich ein elektrischer Strom.



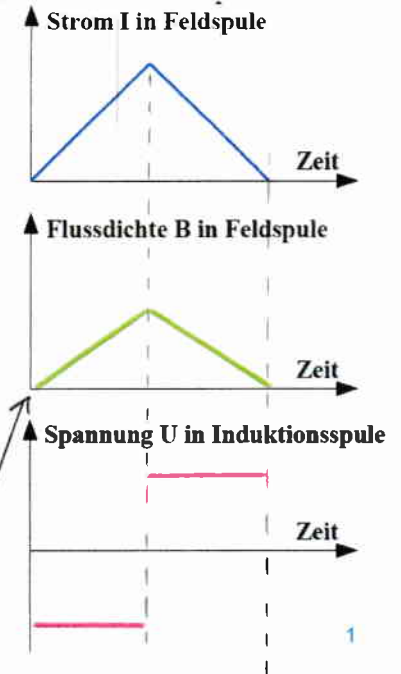
Nun verwenden wir statt des Stabmagneten einen Elektromagnet (also eine weitere Spule). Diese können wir auch ein- und ausschalten bzw. hochregeln. Damit ist die ruhende Induktionsspule einem sich verändernden Feld ausgesetzt. Zum Hochregeln verwenden wir ein Netzgerät, das dies automatisch macht. **Weshalb platzieren wir die Induktionsspule in die Feldspule hinein?** Skizziere den zeitlichen Verlauf der Flussdichte qualitativ! (siehe Formel für Spule in 3.3) **Beobachte die Induktionsspannung und zeichne den Verlauf in das Diagramm ein.**

### Hauptexperiment: Feldänderung durch variablen Strom in der Feldspule



- Feld im Inneren homogen und sehr stark
  - Feldlinien senkrecht zum Querschnitt der Induktionsspule
- Flussdichte  $B$ :
- $$B = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot N}{l} \text{ proportional zu } I$$

12 Induktion 4.2 Induktion im ruhenden Leiter



Eine ausführliche Darstellung des Experiments inklusive Messreihen findest Du auf Leifiphysik unter **Teilgebiet Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Induktion - Versuche - Induktion durch Änderung der magnetischen Feldstärke.**

### Durchführung des Experiments:

a) Variation der Änderungsgeschwindigkeit der Stromstärke  
Induktionsspule: Windungszahl  $N = 300$ , Durchmesser  $d = 41 \text{ mm}$

$\Delta I / \Delta t$ in A/s	0,5	1,0	2,0
$U_i$ in mV			

$$\rightarrow U_i \sim \Delta I / \Delta t$$

da  $B \sim I$  gilt auch  $U_i \sim \Delta B / \Delta t$

Wir führen für die drei bestimmten Messgrößen nur Teilmessreihen (jeweils 3 Messungen) durch, da wir hier insbesondere durch die zur Verfügung stehenden Spulen limitiert sind. **Notiere jeweils die gemessene Induktionsspannung und folgere aufgrund des Vergleichs der Messdaten (ohne Graph) den Zusammenhang zwischen  $U_i$  und der variierten Größe. Verwende für a) auch den Zusammenhang zwischen Stromstärke und Flussdichte (siehe Folie 1).**

### b) Variation der Windungszahl der Induktionsspule

Feldspule:  $\Delta I / \Delta t = 2,0 \text{ A/s}$ , Induktionsspule: Durchmesser  $d = 41 \text{ mm}$

$N$	100	200	300
$U_i$ in mV			

$$\rightarrow U_i \sim N$$

### c) Variation der Querschnittsfläche der Induktionsspule

Feldspule:  $\Delta I / \Delta t = 2,0 \text{ A/s}$ , Induktionsspule: Windungszahl  $N = 300$

$d$ in mm	26	33	41
$A$ in $\text{cm}^2$			
$U_i$ in mV			
$U_i / A$ in $\text{mV/cm}^2$			

$$\rightarrow U_i \sim A$$

Fasse die drei Zusammenhänge aus a) - c) zu einem einzigen zusammen (das haben wir bei früheren Experimenten auch schon in entsprechender Weise gemacht). Mit einer (sehr einfachen) Konstanten ergibt sich dann eine Formel für die Induktionsspannung. Die Definitionen in unserem internationalen Einheitensystem sorgen dafür, dass die Konstante, die man beim Übergang von einer Proportionalität zu einer Gleichung benötigt, hier genau den Wert "-1" hat (ohne weitere Einheit).

### Zusammenführung der Ergebnisse:

$$\left. \begin{array}{l} U_i \sim \frac{\Delta B}{\Delta t} \\ U_i \sim N \\ U_i \sim A \end{array} \right\} U_i \sim N \cdot A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

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

hier: konst = -1

Befindet sich eine Spule in einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld, wird in ihr eine Spannung  $U_i$  induziert:

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

N: Windungszahl  
A: Fläche der Spule  
senkrecht zum Magnetfeld  
 $\Delta B/\Delta t$ : Änderung der  
Flussdichte pro Zeit

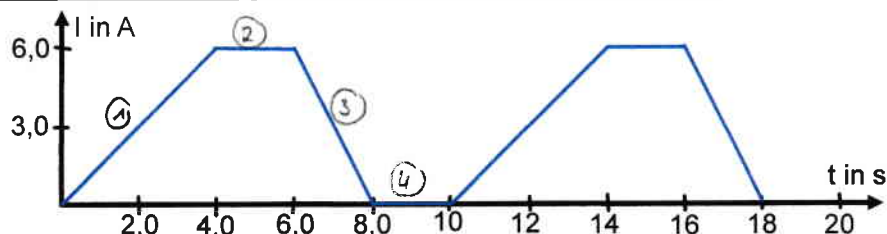
Eine große Feldspule mit 60 cm Länge und 200 Windungen wird von einem zeitlich veränderlichen Strom (siehe Diagramm) durchflossen. Im Inneren der Feldspule befindet sich eine 10 cm lange Induktionsspule mit 500 Windungen. Sie hat einen kreisförmigen Querschnitt mit 5,0 cm Durchmesser.

- a) Berechne die maximale Flussdichte, die im Inneren der Feldspule erreicht wird.  
b) Bestimme die verschiedenen Spannungen, die in der Induktionsspule in den einzelnen Abschnitten auftreten und zeichne ein  $t-U_{\text{ind}}$  Diagramm.

### Selbst-Check:

- Induktionsspannung bei zeitlich veränderlichem Feld: Einflussfaktoren
- zeitlich veränderliche Stromstärke durch Feldspule
- gesamte Formel

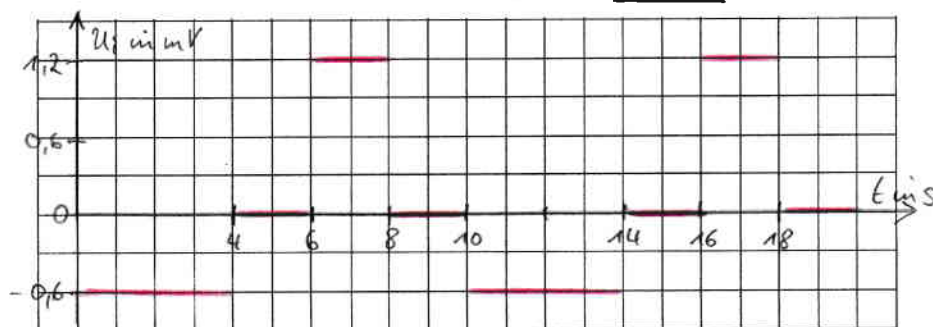
### Training: Spule im zeitlich veränderlichen Magnetfeld



a)  $B_{\text{max}} = \mu_0 \cdot \frac{I_{\text{max}} \cdot N_F}{l} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{6,0 \text{ A} \cdot 200}{0,6 \text{ m}} = 0,0025 \text{ T} = \underline{\underline{2,5 \text{ mT}}}$

b)  $U_{i1} = - N_i \cdot A_i \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} = - 500 \cdot (0,025 \text{ m})^2 \pi \cdot \frac{0,0025 \text{ T}}{4,0 \text{ s}} = \underline{\underline{-0,61 \text{ mV}}}$

$U_{i3} = - 500 \cdot (0,025 \text{ m})^2 \pi \cdot \frac{-0,0025 \text{ T}}{2,0 \text{ s}} = \underline{\underline{1,2 \text{ mV}}}$



### Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifiphysik finden sich Aufgaben unter **Teilgebiet Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Induktion - Induktion durch Änderung der magnetischen Flussdichte** z.B. "Induktion durch Magnetfeldänderung". Ebenso im Buch (S.101/2). Viele Aufgaben beziehen sich auf sinusförmige Wechselspannung (erst in Kap. 4.4).

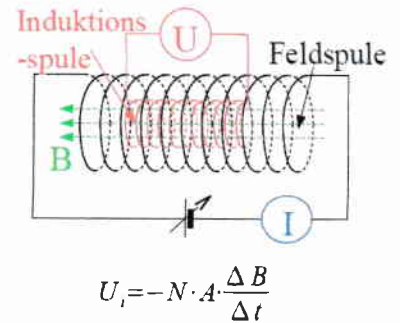
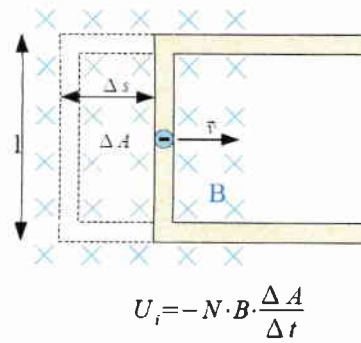
Für die zwei Situationen "bewegter Leiter im Magnetfeld" und "ruhender Leiter im veränderlichen Magnetfeld" ergaben sich zwei Formeln, die sich stark ähneln. (Anmerkung: das "-" hatten wir in der ersten Formel noch gar nicht drinnen, weil das Vorzeichen zu diesem Zeitpunkt noch keine Rolle spielte.)

Betrachtet man ein Produkt aus einer konstanten und einer variablen Größe, so lässt sich die Differenz zweier Produktwerte auch als Konstante mal Differenz der variablen Werte schreiben.

**Klingt kompliziert, probiere das mal für ein Zahlenbeispiel aus:**  
 $A = 5, B_1 = 8, B_2 = 6.$

### 4.3 Induktionsgesetz in allg. Form - Magnetischer Fluss

#### Vergleich der bisher gefundenen Gesetze



#### Differenzenrechnung - ein Ausflug in die Mathematik

$$A \cdot \Delta B = A \cdot (B_1 - B_2) = A \cdot B_1 - A \cdot B_2 = \Delta AB \quad \text{wobei } A \text{ konstant und } B \text{ variabel}$$

$$B \cdot \Delta A = B \cdot (A_1 - A_2) = B \cdot A_1 - B \cdot A_2 = \Delta BA \quad \text{wobei } B \text{ konstant und } A \text{ variabel}$$

$$A \cdot \Delta B = A \cdot (B_1 - B_2) = 5 \cdot (8 - 6) = 5 \cdot 2 = 10$$

$$\Delta AB = AB_1 - AB_2 = 5 \cdot 8 - 5 \cdot 6 = 40 - 30 = 10$$

Die beiden unterschiedlichen Formen des Induktionsgesetzes (1. Folie) kommen dadurch zustande, dass im ersten Fall die Flussdichte  $B$ , im zweiten Fall die Fläche  $A$  konstant bleiben. Du kannst auch so argumentieren: aus der Differenz (dafür steht das  $\Delta$ ) kann man einen konstanten Faktor (im ersten Fall  $B$ , im zweiten Fall  $A$ ) vorklammern. Dann entstehen aus der vereinheitlichten Form wieder die beiden unterschiedlichen Formeln.

Zunächst einmal ist der Fluss ein reines Rechenkonstrukt. Er lässt sich aber anschaulich erklären. Er gibt an, "wie viel magnetisches Feld durch die Leiterschleife fließt". Wenn man die Flussdichte durch die Dichte der Feldlinien darstellt, dann ist  $\Phi$  ein Maß dafür, "wie viele Feldlinien durch die Leiterschleife gehen". **Vergleiche die magnetischen Flüsse  $\Phi_1$  bis  $\Phi_4$ .**

#### Zusammenführung der Formeln:

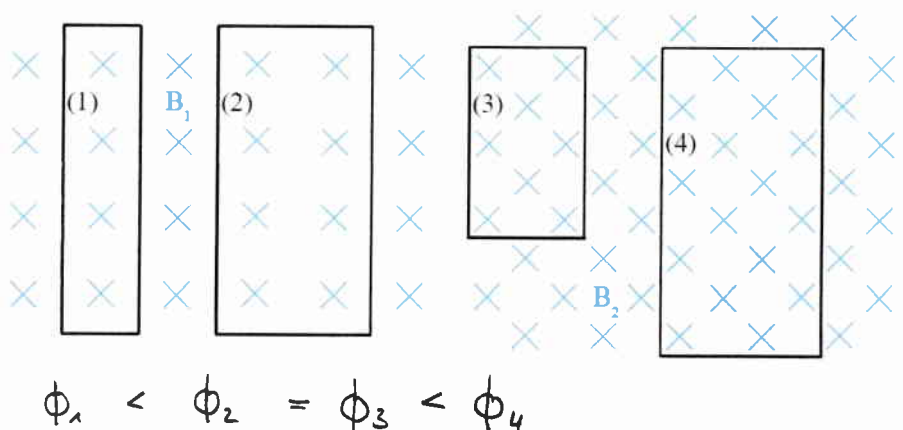
Beide Formeln für die Induktionsspannung lassen sich in derselben (vereinheitlichten) Form schreiben:

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

wir führen eine neue Größe ein:  $A \cdot B = \Phi$  **magnetischer Fluss**

damit ergibt sich:  $U_i = -N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  **Induktionsgesetz**

#### Anschauliche Deutung der Größe "magnetischer Fluss" (Modell)





Eine quadratische Spule mit 10 cm Kantenlänge und 50 Windungen befindet sich 5 cm vor einem magnetischen Feld, das sich über einen Bereich von 30 cm erstreckt. Sie wird mit einer Geschwindigkeit von 5,0 cm/s durch das Feld bewegt.  $B = 60 \text{ mT}$

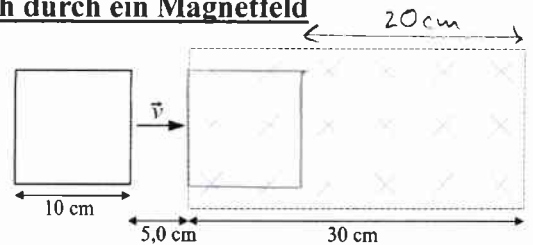
a) Benenne die einzelnen Phasen der Bewegung und bestimme jeweils die Zeitdauer dafür.

b) Berechne den maximalen Fluss durch die Spule.

c) Zeichne ein  $t$ - $\Phi$ -Diagramm.

### Training: Spule bewegt sich durch ein Magnetfeld

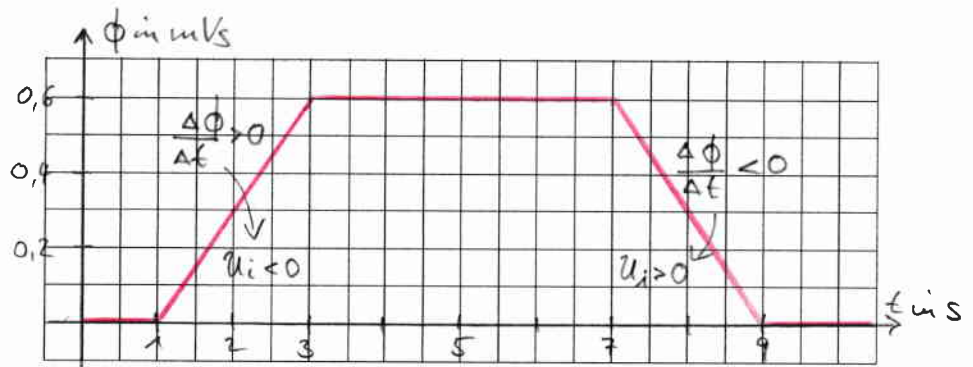
- a) bis zum Feld: 1 s  
 Eintritt: 2 s  
 innerhalb des Feldes:  
 20 cm  $\rightarrow$  4 s  
 Austritt: 2 s



$$b) \phi_{\max} = A \cdot B = (0,1 \text{ m})^2 \cdot 0,06 \text{ T} = 0,60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{T}$$

$$= 0,60 \text{ mVs} \quad \text{m}^2 \cdot \text{T} = \text{m}^2 \cdot \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = \text{Vs}$$

Änderung von  $\phi$  erfolgt linear, da Geschwindigkeit konstant ist



12 Induktion 4.3 Magnetischer Fluss

3

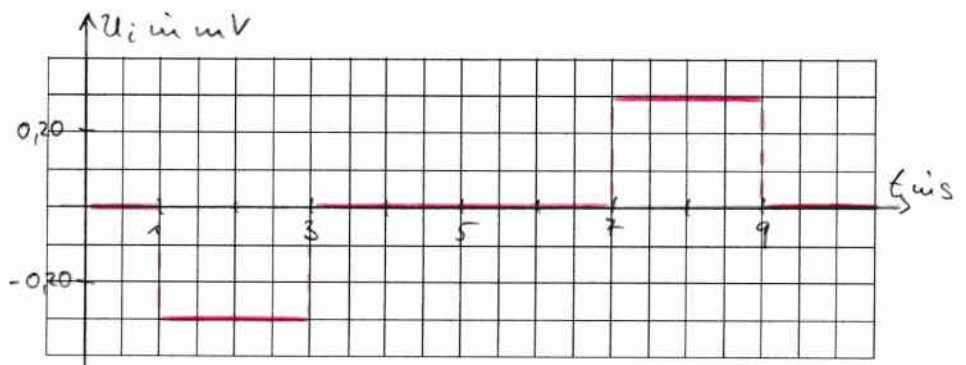
d) Berechne die entstehenden Induktionsspannungen und gib an, wann sie auftreten.

e) Zeichne ein  $t$ - $U_i$ -Diagramm.

### Training: Fortsetzung der Aufgabe

$$d) u_i = -N \cdot \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -50 \cdot \frac{0,60 \text{ mVs}}{2,0 \text{ s}} = -0,30 \text{ mV}$$

- nur beim Eintritt und beim Verlassen (dann positiv)
- Induktionsspannung jeweils konstant, da sich der Fluss  $\phi$  linear ändert ( $\frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \text{konst.}$ )



### Selbst-Check:

- Vergleich der bisherigen Versuche
- Induktionsgesetz in allgemeiner Form
- magnetischer Fluss

### Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifiphysik finden sich Aufgaben unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Induktion - Induktion durch Änderung des Flächeninhalts Aufgaben. z.B. "Spulenbewegung im Magnetfeld" und "Geschwindigkeitsmessung beim Fahrrad". Du kannst die Aufgabenstellung der Trainingsaufgabe auch auf das Aufgabenbeispiel in Kap. 4.1 anwenden.

12 Induktion 4.3 Magnetischer Fluss

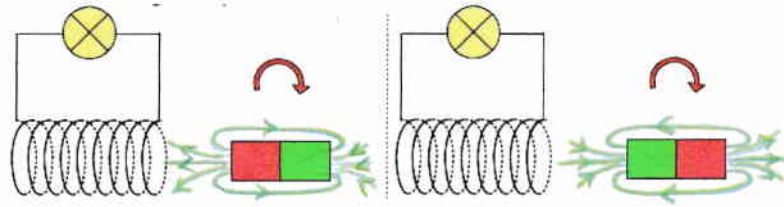
4

Die großtechnologische Nutzung der Induktion zur Stromerzeugung gelang durch die Anwendung auf rotierende Spulen (da diese Bewegung ohne Unterbrechung ablaufen kann). Auf diese Weise erzeugt Dein Dynamo am Fahrrad ebenso Strom, wie die Generatoren in Wärme-, Wind- und Wasserkraftwerken.

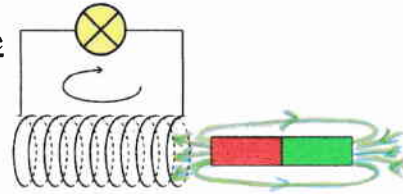
Der Grund für die Induktion liegt hier auch wieder in der Änderung des magnetischen Flusses, der den Spulenquerschnitt durchsetzt. Im Fall der Rotation ändert sich dabei nicht nur der Betrag des Flusses, sondern auch seine Richtung (= Richtung der Feldlinien) bezogen auf die Spule. Diese Begründung hast Du in der 10. Jgst. als "alternative Induktionsregel" kennengelernt. Diese ist lediglich eine anschauliche Formulierung des allgem. Induktionsgesetzes.

## 4.4 Induktion in rotierender Spule

### Experiment: rotierender Magnet



### Experiment: rotierende Spule



### Beobachtung und Erklärung:

**Rotiert eine Spule in einem Magnetfeld, so wird in ihr eine**

*Spannung induziert* ..... Der gleiche Effekt tritt auch auf, wenn die Spule ruht und der Magnet rotiert.

**Grund:** In einer Leiterschleife (Spule) tritt **Induktionsstrom** auf, wenn

sich *die Anzahl der Feldlinien* .....

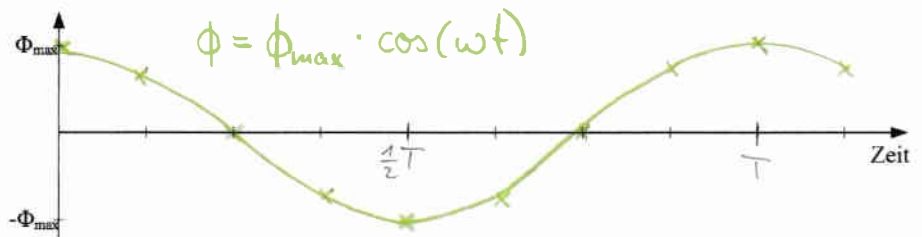
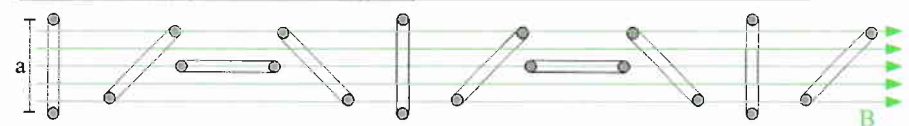
die durch sie hindurchgehen oder deren *Orientierung* ..... zur der Schleife **ändert (das bedeutet, der magn. Fluss ändert sich).**

12 Induktion 4.4 Rotierende Spule

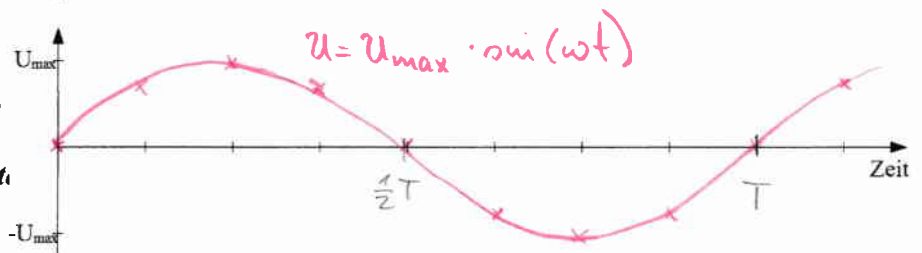
1

Für diese theoretische Herleitung betrachten wir nur eine einzige Windung. Deren Lage während der Rotation ist in der oberen Bildreihe nebeneinander (die Windung bleibt bei der Rotation natürlich an der gleichen Stelle) in Seitenansicht dargestellt. Jede Position korrespondiert dabei mit einem Zeitpunkt auf der Zeitachse der beiden Diagramme darunter.

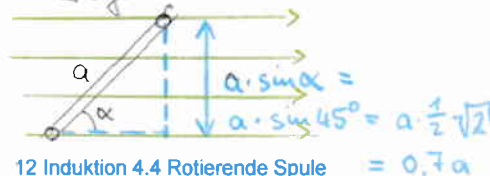
### Zeitlicher Verlauf des Flusses und der Induktionsspannung:



Entnimm erst für die 1., 3., 5., ... Position der Schleife den magnetischen Fluss (in Form der Anzahl der Feldlinien durch die Schleife) und trage ihn in das erste Diagramm ein (die Orientierung der Fläche lässt auch negative Werte zu). Für die schrägen Lagen (2., 4., ...) ist die Bestimmung des Flusses nicht so einfach. Du kannst die Anzahl der Feldlinien nehmen oder die Projektion der Fläche bestimmen. Die Spannung ergibt sich dann nach dem Induktionsgesetz als Differentialquotient (= Ableitung) der ersten Kurve.



• dabei ist  $\Phi_{\max} = A \cdot B$   
 $\Phi$  ergibt sich aus der Projektion



•  $\omega$  ergibt sich aus der Umlaufdauer  $\omega = \frac{2\pi}{T}$

•  $U_i = -N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  wird zu  
 $U_i = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -N \cdot \dot{\Phi}$   
 (Ableitung)

12 Induktion 4.4 Rotierende Spule

= 0,7 a

2

Eine quadratische Spule mit 10 cm Kantenlänge und 20 Windungen rotiert in einem homogenen magnetischen Feld der Flussdichte  $B = 80 \text{ mT}$  mit einer Drehzahl von 3000 Umdrehungen pro Minute.

- Berechne Frequenz, Periodendauer und Winkelgeschwindigkeit der Rotationsbewegung.
- Berechne den maximalen magnetischen Fluss durch die Spule.
- Stelle den Funktionsterm für die  $t$ - $\Phi$ -Funktion auf (mit konkreten Zahlenwerten). Dabei ist die Spulenachse zum Zeitpunkt 0 parallel zu den Feldlinien orientiert.
- Leite davon die  $t$ - $U$ -Funktion ab.
- Stelle beide Funktionen mit Diagramm dar (auf der nächsten Folie).

### Training: rotierende Spule, Ermittlung der Funktionsterme

$$a) f = \frac{3000}{1 \text{ min}} = \frac{3000}{60 \text{ s}} = 50 \frac{1}{\text{s}}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50 \frac{1}{\text{s}}} = 0,02 \text{ s} = 20 \text{ ms}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 \frac{1}{\text{s}} = 314 \frac{1}{\text{s}}$$

$$b) \phi_{\max} = A \cdot B = (0,1 \text{ m})^2 \cdot 0,08 \text{ T} = 0,0008 \text{ Tm}^2 \\ = 0,0008 \text{ Vs} = 0,80 \text{ mVs}$$

$$c) \phi(t) = \phi_{\max} \cdot \cos(\omega t) = 0,80 \text{ mVs} \cdot \cos(314 \frac{1}{\text{s}} \cdot t)$$

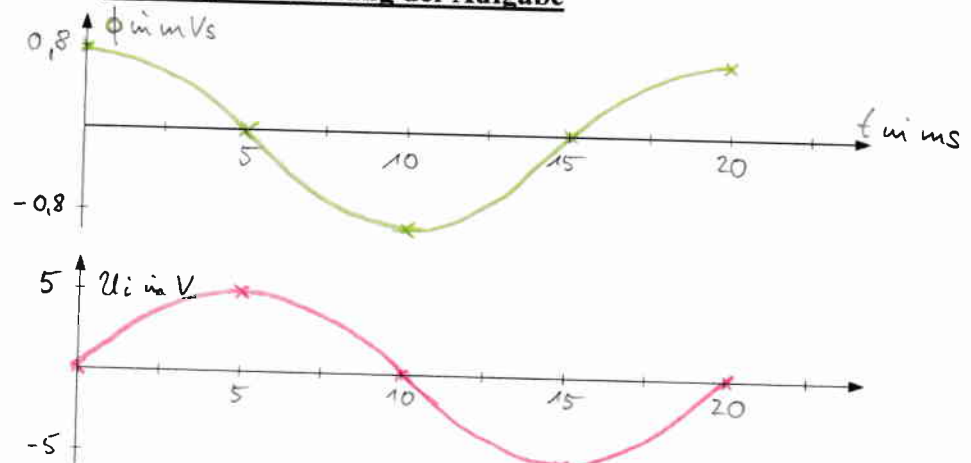
$$d) u_i = -N \cdot \phi'(t) = -N \cdot (\phi_{\max} \cdot \cos(\omega t))' \\ = -N \cdot \phi_{\max} \cdot (-\sin(\omega t) \cdot \omega) \quad \text{nach Differenzieren nicht vergessen} \\ = + N \cdot \phi_{\max} \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \\ = 20 \cdot 0,80 \text{ mVs} \cdot 314 \frac{1}{\text{s}} \cdot \sin(314 \frac{1}{\text{s}} \cdot t) \\ = 5,0 \text{ V} \cdot \sin(314 \frac{1}{\text{s}} \cdot t)$$

12 Induktion 4.4 Rotierende Spule

3

Aufgabenstellung siehe 3. Folie.

### Training: Fortsetzung der Aufgabe



### Anmerkung:

Da die Erzeugung unseres Stromes für Haushalt und Industrie mit rotierenden Spulen erfolgt, zeigt auch der Strom aus der Steckdose den typisch sinus-(cosinus-)förmigen zeitlichen Verlauf (Wechselstrom). Dadurch entstehen bei Transformatoren (Netzteilen), Induktionskochfeldern und beim kabellosen (induktiven) Laden Magnetfelder mit sinus-(cosinus-)förmigem Verlauf. Auch wenn hier bei der Nutzung vor Ort nichts mehr rotiert, werden damit wieder cosinus-(sinus-)förmige Spannungen induziert (siehe diverse Abi-Aufgaben).

### Selbst-Check:

- rotierender Magnet bzw. rotierende Spule
- zeitlicher Verlauf von magnetischem Fluss und induzierter Spannung
- Funktionsterme und Diagramme

### Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifiphysik finden sich mehrere Aufgaben zu rotierenden Spulen unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Induktion - Induktion durch Änderung der Winkelweite Aufgaben. Zusätzlich gibt es bei Induktion Änderung der magnetischen Flussdichte Aufgaben auch Beispiele zum "Induktionskochfeld" und der "elektrischen Zahnbürste" (siehe Anmerkung).

12 Induktion 4.4 Rotierende Spule

4



Das nebenstehende Bild kennst Du bereits aus der Mittelstufe und aus Kap. 4.1. Es zeigt, wie eine Leiterschaukel mit der Geschwindigkeit  $v$  aus einem Magnetfeld gezogen wird.

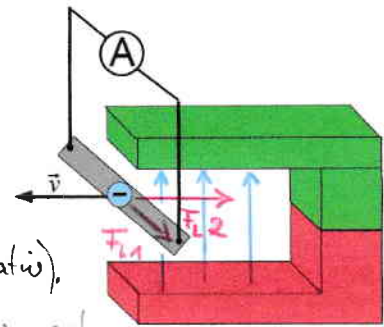
1. Untersuche mit Hilfe der UVW-Regel, welche Auswirkung die Leiterbewegung auf das Elektron innerhalb des Leiters hat (Wiederholung)!

2. Wende auf die eben gefundene Bewegung, die die Elektronen innerhalb des Leiters durchführen, nochmals die UVW-Regel an! Welche Folgerung ergibt sich daraus?

## 4.5 Die Regel von Lenz

Das Elektron bewegt sich mit dem Leiter nach links, dadurch erfährt es eine Kraft  $F_{L1}$  nach vorn (UVW-Regel mit linker Hand oder mit rechter Hand entgegenges. zur Bewegungsrichtung, da  $e$  negativ).

Dadurch bewegt es sich im Leiter nach vorn. Diese Bewegung führt zu einer zweiten Lorentzkraft  $F_{L2}$  nach rechts, also entgegengesetzt zur Bewegung der Leiterschaukel.



### Regel von Lenz:

Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass er seiner Ursache entgegengewirkt.

Bei unserer obigen Betrachtung lag der Fokus auf dem Begriff „Kraft“, jetzt legen wir den Fokus auf den Begriff „Magnetfeld“. Wir lassen einen kleinen Stabmagnet durch ein Kunststoffrohr und danach durch ein Kupferrohr fallen und beobachten die Fallzeit. **Beschreibe deine Beobachtung.**

In den unteren beiden Abbildungen aus leifiphysik sind die Induktionsströme (rot) und die Magnetfelder (grün) eingezeichnet. **Erkläre damit die Beobachtung aus dem Versuch.**

Einige Simulationen finden sich auf Leifiphysik unter Teilgebiet Elektrizitätslehre – Induktion und Transformator – Versuche – fallende Magnete. Dort findet man auch die Animation zum nebenstehenden Bild.

### Bemerkung:

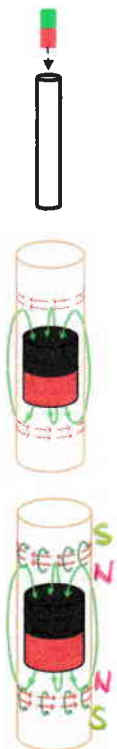
Auf Grund der Energieerhaltung muss das durch den Induktionsstrom erzeugte Magnetfeld seiner Entstehung entgegen-gerichtet sein, denn sonst würde der bewegte Leiter beim Eintritt in das Magnetfeld beschleunigt werden und somit Energie gewinnen.

### Betrachtung der Magnetfelder

Im Kupferrohr ist die Fallzeit wesentlich größer, der Magnet wird beim Fallen gebremst.

Während der Magnet fällt, werden im Kupferrohr vor und hinter dem Magneten Ströme induziert (im Kunststoffrohr ist dagegen Stromfluß nicht möglich).

Diese Ströme erzeugen wiederum Magnetfelder, die jeweils so orientiert sind, dass auf den Magneten Kräfte nach oben wirken (den Fall abbremsen).



Abbn. aus leifiphysik.de

### Zitat:

"An induced electromotive force generates a current that induces a counter magnetic field that opposes the magnetic field generating the current."

Die beiden Abbildungen zeigen jeweils einen Ring, der quer zu einem Magnetfeld pendelt (Waltenhofensches-Pendel). Im ersten Fall ist der Ring vollständig, im zweiten Fall ist er durch einen Schlitz unterbrochen. **Beschreibe deine Beobachtung.**

Eine ausführliche Beschreibung der Versuche auf dieser Seite findest Du auf Leifiphysik unter Teilgebiet Elektrizitätslehre – Elektromagnetische Induktion – Versuche – Waltenhofensches Pendel.

Die betrachteten Induktionsströme entstehen nicht nur in Leiterschleifen, sondern auch in flächigen Strukturen (Platten, Quader, Rohre). Nachdem der Verlauf der Ströme auch hier in geschlossenen Schleifen erfolgt, sprechen wir von Wirbelströmen. Die bremsende Wirkung nutzen wir in der Technik in sogenannten **Wirbelstrombremsen** (z.B. in Lokomotiven oder Hometrainern).

**Jeder Stromwirbel erzeugt wieder ein Magnetfeld. In welche Richtung zeigt dieses? (gezeichnet ist die technische Stromrichtung)**

Eine Spule mit 600 Windungen und Eisenkern wird an 230 V-Wechselspannung angeschlossen. **Beschreibe was mit dem Aluminiumring passiert, der auf dem Eisenkern der Spule sitzt, wenn die Spule eingeschaltet wird. Erkläre die Beobachtung qualitativ.**

Der Magnet wird auf einem Wagen, wie in der Abbildung gezeigt gegenüber einer Spule bewegt.

**Gib jeweils mit Hilfe der Regel von Lenz die Polung der Spule an. Bestimme anschließend die technische Stromrichtung in der Spule und trage diese an einer Stelle ein.**

**Selbst-Check:**

- Lenzsche Regel mit UVW
- Lenzsche Regel mit Feldebetrachtung
- Wirbelströme

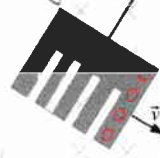
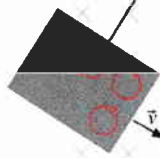
## Maßnahmen gegen diesen Effekt

### Beobachtung:

Der vollständige Ring wird stark abgebremst. Beim geschlitzten ist der Effekt wesentlich schwächer.

### Erklärung:

Auch hier führt die erste Lorentzkraft zu einer Bewegung des Elektrons im Leiter (die bei einem Schlitz nicht möglich ist). Die resultierende zweite Lorentzkraft wirkt gegen die Bewegungsrichtung.



Die Stromwirbel erzeugen Magnetfelder, die entgegengesetzt zum äußeren Magnetfeld sind (es abschwächen).

### Erkenntnis aus den Experimenten:

Durch Schlitz lässt sich die Wirbelbildung und damit die bremsende Wirkung reduzieren oder unterbinden.

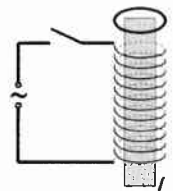
12 Induktion - 4.5 Regel von Lenz

3

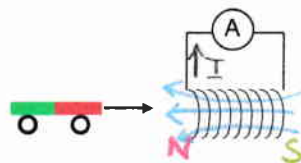
## Thomson-Ring

Der Ring wird beim Einschalten der Spule weggeschleudert.

Erklärung: Der Induktionsstrom im Ring erzeugt ein Magnetfeld, das entgegengesetzt zum Magnetfeld der Spule gerichtet ist → Abstoßung.  
alternativ: Der Ring versucht seinen Zustand (kein Magnetfeld) beizubehalten, indem er vor dem entstehenden Feld flüchtet.



### Training: Lenzsche Regel



### Übungsmöglichkeiten:

Du hast sicherlich schon gemerkt, dass sich hier viele Experimente finden. Probier doch mal die Animationen aus, die zu diesen Experimenten gehören. Die Fundstellen auf Leifi finden sich auf diesem Arbeitsblatt. Viele spannende Anwendungen (Antiblockiersystem, RFID-Transponder, Festplatte, Induktionsherd, Tachometer, Metalldetektoren) sind auf Leifiphysik erläutert unter Teilgebiet Elektrizitätslehre – Elektromagnetische Induktion – Ausblick.

12 Induktion - 4.5 Regel von Lenz

4

Der Effekt der Selbstinduktion ist eine spezielle Ausprägung des großen Bereiches Induktion, er tritt insbesondere beim Ein- und Ausschalten von großen Spulen deutlich zu Tage und kann in der Technik große Probleme bereiten aber auch schlaue genutzt werden. In einem kleinen Experiment (mit einer großen Spule) lernen wir das Prinzip kennen und geben eine Erklärung für den Effekt.

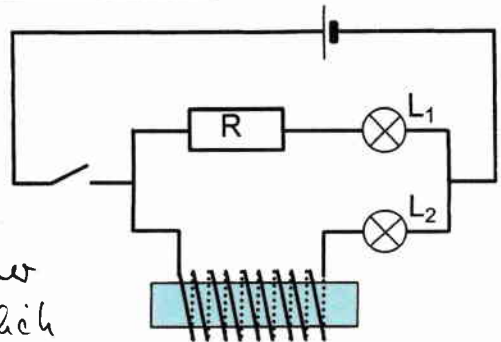
**Beschreibe Deine Beobachtung beim Einschalten des Stromkreises und erläutere, weshalb diese unserem einfachen Verständnis für Stromfluss widerspricht.**

**Mit Unterstützung Deiner Lehrkraft gelingt Dir eine Erklärung dieses merkwürdigen Verhaltens.**

## 4.6 Selbstinduktion Prinzip

### Grundexperiment: Einschaltvorgang qualitativ

Während das Lämpchen  $L_1$  sofort beim Einschalten leuchtet, geht das Lämpchen  $L_2$  hinter der Spule erst mit deutlicher Verzögerung an. Eigentlich sind wir gewohnt, dass beim Einschalten sofort Strom fließt.



#### Erklärung:

In einer felderzeugenden Spule wird Strom (Spannung) induziert, wenn sich das Magnetfeld der Spule ändert (z.B. beim Ein- und Ausschalten). Diesen Effekt nennt man Selbstinduktion.

Nach der Regel von Lenz wirkt dieser Effekt der Feldänderung entgegen, d.h. der Aufbau des Feldes beim Einschalten

wird ebenso gehemmt wie der Abbau beim Ausschalten. Deshalb nimmt der Strom in der Spule beim Einschalten nur langsam zu, beim Ausschalten nimmt er nur langsam ab.

12 Induktion 4.6 Selbstinduktion Prinzip

1

**Berechne die Selbstinduktionsspannung. Die wesentlichen Schritte dabei sind hier gelistet:**

- verwende eine geeignete Form des Induktionsgesetzes (welche Größe ändert sich?)
- für eine langgestreckte Spule kennen wir eine Formel für die Flussdichte, baue diese in die Formel ein
- welche Größen bleiben im Experiment konstant? (diese darf man vor das  $\Delta$  ziehen)
- alle Konstanten in der nun ermittelten Formel werden zusammengefasst zu einer neuen Konstanten  $L$  (sie heißt Induktivität und hat die Einheit 1 Henry), sie quantifiziert die Eigenschaft der Spule bei der Selbstinduktion und ergibt sich aus den Spulendaten
- der Differenzenquotient kann auch als Ableitung geschrieben werden

#### Berechnung der Selbstinduktionsspannung:

$$\begin{aligned} U_i &= -N \cdot A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} \\ &= -N \cdot A \cdot \frac{\Delta (\mu_0 \mu_r \frac{N \cdot I}{l})}{\Delta t} \\ &= -N \cdot A \cdot \mu_0 \mu_r \frac{N}{l} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \\ &= -\underbrace{\mu_0 \mu_r \frac{AN^2}{l}}_L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \end{aligned}$$

$$U_i = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{oder} \quad U_i = -L \cdot \dot{I} \quad (\text{wobei } \dot{I} \text{ die Ableitung von } I \text{ ist})$$

Beim Ein- und Ausschalten einer Spule (auch beim Hoch- und Runterregeln) wird eine Spannung induziert, die der Änderung der externen Spannung entgegengesetzt ist. Diese Selbstinduktionsspannung lässt sich berechnen mit der Formel:

$$U_i = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{bzw.} \quad U_i = -L \cdot \dot{I}$$

Dabei wird die Eigenschaft der verwendeten Spule quantifiziert durch die Induktivität  $L$ , die sich aus den Spulendaten ergibt.

$$L = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{AN^2}{l}$$

Einheit: 1 H (Henry)

12 Induktion 4.6 Selbstinduktion Prinzip

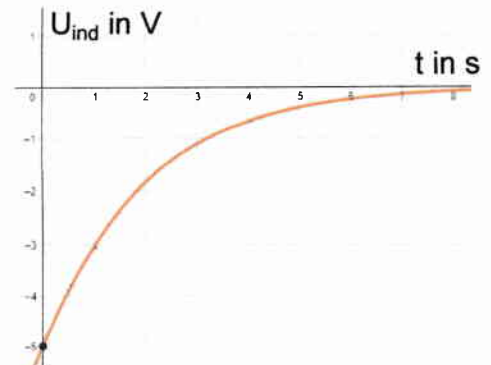
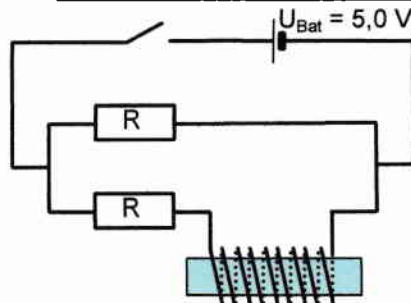
$$1 \text{ H} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

2



Beim Einschalten des abgebildeten Stromkreises (der Widerstandswert der Spulenkwicklung ist vernachlässigbar, die beiden Widerstände haben jeweils den Wert  $50\ \Omega$ ) tritt in der Spule die dargestellte Selbstinduktionsspannung auf.

## Training: Spannung und Stromstärke beim Einschalten



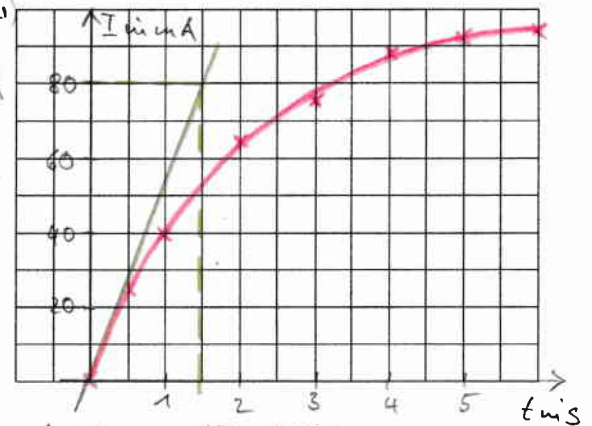
a) Gib eine Beziehung (Formel) zwischen der angelegten Batteriespannung  $U_{\text{Bat}}$ , der Selbstinduktionsspannung  $U_{\text{ind}}$  und dem Strom im unteren Parallelzweig an.

a)  $U = R \cdot I = U_{\text{Bat}} + U_{\text{ind}}$   
(beachte:  $U_{\text{ind}}$  ist negativ)

b) Bestimme die Stromstärken für die Zeitpunkte  $t = 0,0\ \text{s}$ ,  $t = 0,5\ \text{s}$ ,  $t = 1,0\ \text{s}$ ,  $t = 2,0\ \text{s}$ , usw. bis  $t = 6,0\ \text{s}$ . Verwende dabei das abgebildete Diagramm.

b)

$t$ in s	$U_{\text{ind}}$ in V	$U$ in V	$I$ in A
0	5,0	0	0
0,5	3,8	1,2	0,024
1	3,0	2,0	0,040
2	1,8	3,2	0,064
3	1,2	3,8	0,076
4	0,6	4,4	0,088
5	0,4	4,6	0,092
6	0,3	4,7	0,094



c) Zeichne ein  $t$ - $I$ -Diagramm.

d) Bestimme graphisch die Steigung des  $t$ - $I$ -Diagramms im Ursprung und ermittle damit die Induktivität der Spule.

e) Berechne die Windungszahl einer Spule von  $50\ \text{cm}$  Länge und  $1,0\ \text{dm}^2$  Querschnittsfläche mit dieser Induktivität, wenn  $\mu_r = 200$  beträgt.

d) Steigung  $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{0,08\ \text{A}}{1,5\ \text{s}} = 0,053\ \frac{\text{A}}{\text{s}}$   
 $L = \frac{-U_{\text{ind}}}{\Delta I / \Delta t} = \frac{-(-5,0\ \text{V})}{0,053\ \frac{\text{A}}{\text{s}}} = 94\ \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = \underline{\underline{94\ \text{H}}}$

12 Induktion 4.6 Selbstinduktion Prinzip

3

Die Abbildungen zeigen einen merkwürdigen Effekt, der in der Technik schwere Schäden verursachen kann (die Palette reicht hier von der Beeinträchtigung von Funksignalen bis zur Zerstörung ganzer Elektronikplatinen) aber auch trickreich genutzt wird (z.B. zum Starten von Neonröhren oder beim Betrieb von Zündkerzen in Rasenmähern oder von elektrischen Weidezäunen).

Beschreibe und erkläre Deine Beobachtung qualitativ.

### Vorsicht beim Experimentieren:

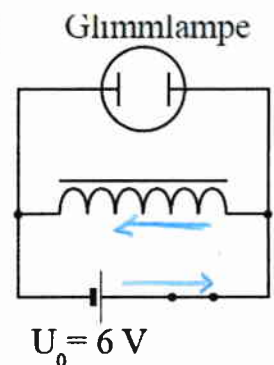
Dieser Effekt beim Ausschalten von Spulen kann für Messtechnik und Stromversorgung tödlich sein!

### Selbst-Check:

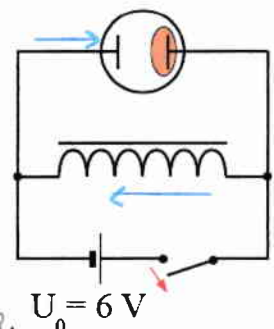
- Verzögerung beim Einschalten einer Spule
- Selbstinduktion
- Selbstinduktionsspannung
- Induktivität
- Spannungsspitzen beim Ausschalten

### Technische Anwendung: Spannungsspitze beim Ausschalten

Bei geschlossenem Schalter wird die Spule von Strom durchflossen. Allerdings reichen die  $6,0\ \text{V}$  nicht aus, um die Glimmlampe zu zünden. Deshalb fließt durch sie kein Strom (kein Licht!).



Beim Ausschalten „sträubt“ sich die Spule gegen den Verlust ihres Magnetfeldes (Regel von Lenz). Sie hält deshalb den Strom noch eine Weile aufrecht. Bei offenem Schalter muss der Strom dann über die Glimmlampe fließen. Hierzu entsteht eine hohe Spannung. ( $> 100\ \text{V}$ )



### Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifphysik finden sich mehrere Aufgaben unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Induktion - Selbstinduktion und Induktivität Aufgaben. "Rund um die Selbstinduktion" passt hier sehr gut. Zusätzlich gibt es bei Ein- und Ausschalten von RL-Kreisen Aufgaben Beispiele zum Ausschaltvorgang (auch Weidezaun). Achtung: wir vertiefen unsere Kenntnisse im nächsten Kapitel noch.

12 Induktion 4.6 Selbstinduktion Prinzip

4

In diesem Kapitel werden wir das Phänomen, das wir im letzten Kapitel qualitativ kennengelernt haben, quantitativ erfassen. Dadurch ergibt sich ein experimenteller Beleg für die Formel, die wir im letzten Kapitel hergeleitet haben. Der vereinfachte Stromkreis in diesem Experiment steht für den Parallelzweig mit Spule im letzten Experiment. Im kombinierten Diagramm sind die Messkurven für Strom und Spannung zeitsynchron dargestellt.

a) Stelle im Schaltbild den Einbau von Strom- und Spannungssensor an geeigneten Positionen dar.  
b) Betrachte zuerst die rote Messkurve für den Strom und erläutere, weshalb diese mit der Beobachtung aus dem Grundexperiment aus dem letzten Kapitel in Einklang steht.

- Fortsetzung nächste Folie -

c) Betrachte jetzt den ersten Teil der schwarzen Messkurve für die Spannung (Skala hierzu rechts) und erkläre damit den Verlauf der Stromkurve. Vergleiche mit der angelegten Spannung.

d) Bestimme graphisch so gut wie möglich die Steigung der Stromkurve im Einschaltmoment (Tangente!) und berechne damit die Induktivität der Spule (Formel aus dem letzten Kapitel!).

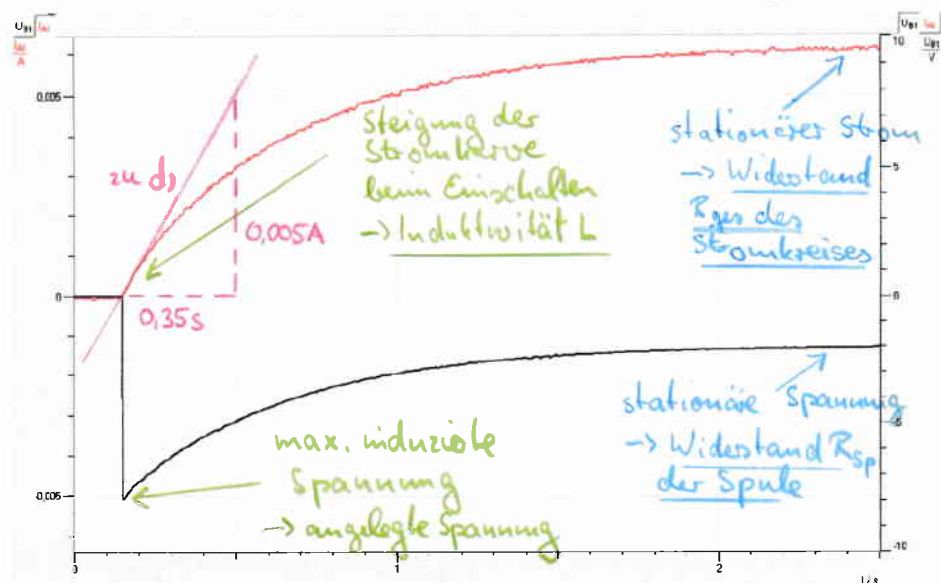
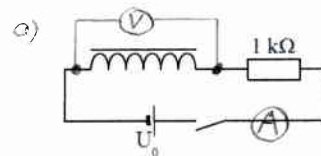
e) Betrachte den hinteren Teil der Stromkurve. Interpretiere die Werte, die sich daraus gewinnen lassen.

f) Betrachte den hinteren Teil der Spannungskurve. Erläutere die Abweichung vom theoretischen Modell aus dem letzten Kapitel.

## 4.7 Selbstinduktion Messkurven

### Experiment: Quantitative Erfassung des Einschaltvorgangs

Stromstärke und Spannung an der Spule werden beim Einschalten in ihrem zeitlichen Verlauf mit Hilfe von Datalogging aufgezeichnet.



b) Stromstärke beim Einschalten wächst während 2s von 0 auf ihren maximalen Wert 6mA  
 ↳ Lichtwirkung setzte im letzten Kapitel erst mit Verzögerung ein

12 Induktion 4.7 Selbstinduktion Messkurven

1

### Auswertung der Messkurven (Fortsetzung):

c) im Einschaltmoment wird in der Spule eine Spannung induziert, die genauso groß ist, wie die angelegte Spannung  $U_0 = 8,0V$  und dieser entgegengerichtet ist  
 $\rightarrow U_0 + U_{ind} = 8,0V + (-8,0V) = 0V \rightarrow$  Stromstärke bleibt 0mA

d) Steigung Stromkurve beim Einschalten:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{0,005A}{0,35s} = 0,014 \frac{A}{s} \quad \text{bzw. } \dot{I} = 0,014 \frac{A}{s}$$

$$U_{ind} = -L \cdot \dot{I} \rightarrow L = -\frac{U_{ind}}{\dot{I}} = -\frac{-8,0V}{0,014 \frac{A}{s}} = \underline{560 H} \quad (\text{Erwartungswert } 630 H)$$

e) der stationäre Wert der Stromstärke hängt nur noch von der angelegten Spannung  $U_0$  und dem ohmschen Widerstand ab (da bei gleich bleibendem Strom keine Induktion mehr auftritt)

$$\rightarrow \underline{R_{ges}} = \frac{U_0}{I_{stat}} = \frac{8,0V}{0,006A} = \underline{1333 \Omega} \quad (\text{Erwartungswert } 280 \Omega)$$

$$\rightarrow \underline{R_{sp}} = R_{ges} - R_{wid} = 1333 \Omega - 1000 \Omega = \underline{333 \Omega}$$

f) an der Spule fällt bei Stromfluß aufgrund ihres ohmschen Widerstandes eine Spannung ab (die hat nichts mit Induktion zu tun)

$$\rightarrow \underline{U_{sp}} = R_{sp} \cdot I_{stat} = 333 \Omega \cdot 0,006A = \underline{2,0 V}$$

in Übereinstimmung mit der Messkurve

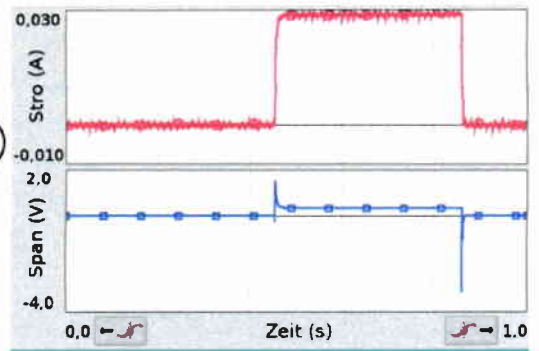
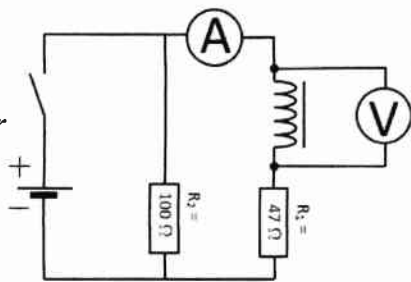


Will man auch den Ausschaltvorgang messen, wird der Aufbau komplizierter. Man benötigt einen Parallelzweig, um den Strom "auslaufen" zu lassen, sonst drohen Beschädigungen der Messtechnik. Dieses Experiment führst Du selbst durch. Die Messkurve für die Spannung ist hier aufgrund des Sensoreinbaus gespiegelt (hochgeklappt) dargestellt.

a) Vergleiche mit den Messkurven auf der ersten Folie.  
 Woran erkennt man, dass hier eine "kleinere" Spule aus dem Praktikum zum Einsatz kam?  
 b) Erkläre, weshalb bei der Spannung die Abweichung von der theoretischen Kurve nur im Mittelteil zu sehen ist.

Auch dieser Versuch zeigt, dass im magnetischen Feld einer Spule Energie gespeichert ist, die beim Ausschalten freigesetzt werden kann. Die Formel hierfür wird hier nur mitgeteilt.

## Ein- und Ausschaltvorgang zusammen



- a) der Anstieg der Stromkurve erfolgt wesentlich rascher, der verzögernde Effekt ist nicht so ausgeprägt  
 → Induktivität  $L$  kleiner (weniger Windungen,  $\mu_r$  kleiner)  
 b) nur im Mittelteil gibt es einen Stromfluss  $I_{stat}$  und damit eine ohmsch abfallende Spannung  $U_{sp} = R_{sp} \cdot I_{stat}$ .

### Energie des magnetischen Feldes:

Die Energie des Magnetfeldes einer stromdurchflossenen Spule lässt sich berechnen mit:

$$E_{mag} = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$

Beachte: Diese Formel hat dieselbe Struktur wie die für den Kondensator (das ist kein Zufall):

$$E_{el} = \frac{1}{2} C \cdot U^2$$

12 Induktion 4.7 Selbstinduktion Messkurven

3

Hier bereiten wir die Analyse im Praktikumsversuch vor und vertiefen gleichzeitig das Verständnis für die Induktionsspitzen im letzten Kapitel, in dem ungefähr der gleiche Schaltungsaufbau verwendet wurde.

Der ohmsche Widerstand  $R_{sp}$  der Spule im Praktikum beträgt  $3 \Omega$ .

a) Berechne die stationäre Stromstärke im Spulenzweig.

b) Unmittelbar nach dem Ausschalten wird dieser Strom durch die Spule aufrecht erhalten. Zeichne den Stromweg dafür in den Schaltplan und berechne die Induktionsspannung an der Spule.

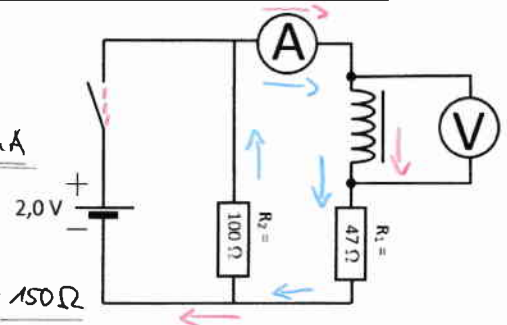
c) Erläutere den Einfluss des Widerstandes  $R_2$  im Parallelzweig. Welche Konsequenzen hätte ein Weglassen dieses Zweiges?

### Induktionsspitze im Praktikumsexperiment - Berechnung

$$a) R_{ges} = R_1 + R_{sp} = 47 \Omega + 3 \Omega = 50 \Omega$$

$$I_{stat} = \frac{U_{ges}}{R_{ges}} = \frac{2,0 V}{50 \Omega} = 40 \mu A$$

$$b) R_{ges} = R_1 + R_{sp} + R_2 = 47 \Omega + 3 \Omega + 100 \Omega = 150 \Omega$$



$$U_{ind} = R_{ges} \cdot I_{stat} = 150 \Omega \cdot 0,04 A = 6,0 V$$

(die Spule stellt in diesem Moment die Stromversorgung dar)

c) Die Überhöhung der Induktionsspitze ergibt sich aus dem Verhältnis der Widerstände von Spulenzweig allein zu gesamten Kreis.  $\frac{U_{ind}}{U_p} = \frac{R_1 + R_{sp} + R_2}{R_1 + R_{sp}} = \frac{150 \Omega}{50 \Omega} = 3$   
 Je größer  $R_2$ , desto größer  $U_{ind}$ .

Lässt man Parallelzweig weg, ist  $R_2 = \infty$  und  $U_{ind}$  wird beliebig groß → Voltmeter brennt durch

### Übungsmöglichkeiten:

Auf Leifiphysik finden sich mehrere Aufgaben unter Teilgebiet Elektrizitätslehre - Elektromagnetische Induktion - Selbstinduktion und Induktivität Aufgaben. "Selbstinduktion im Diagramm" passt hier sehr gut zu den ersten beiden Folien. Die Abituraufgabe zum "Weidezaun" unter Ein- und Ausschalten von RL-Kreisen vertieft nochmal die letzten beiden Folien.

12 Induktion 4.7 Selbstinduktion Messkurven

4

### Selbst-Check:

- Analyse von Spannungs- und Stromkurve beim Einschalten einer Spule
- Ausschaltvorgang
- Energie des magnetischen Feldes
- Induktionsspitzen