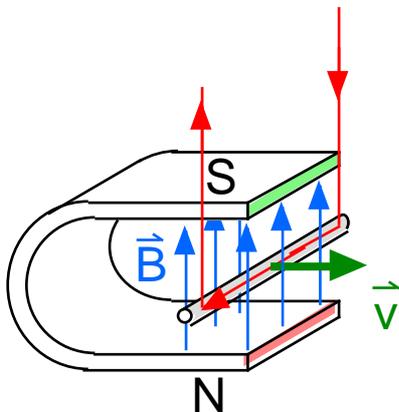


Induktion

Phänomene

1. Induktion im bewegten Leiter (bei konstantem Magnetfeld)



Bewegt man einen Leiter senkrecht zu den Feldlinien eines Magnetfeldes, so wird ihm eine Spannung induziert.

Die Richtung des Induktionsstromes ergibt sich aus der

UVW-Regel der rechten Hand:

Daumen in Bewegungsrichtung (**U**rsache)

Zeigefinger in Magnetfeldrichtung (**V**ermittlung)

Mittelfinger in Richtung des Induktionsstromes (**W**irkung)

Fließt nun ein Induktionsstrom, so erfährt dieser stromdurchflossene Leiter wiederum eine LORENTZkraft, die nach der anderen **UVW**-Regel der rechten Hand der Bewegung entgegengerichtet ist. Um also einen Induktionsstrom zu erzeugen, ist Kraftaufwand und somit Arbeitsaufwand nötig. Man kennt diesen Sachverhalt als

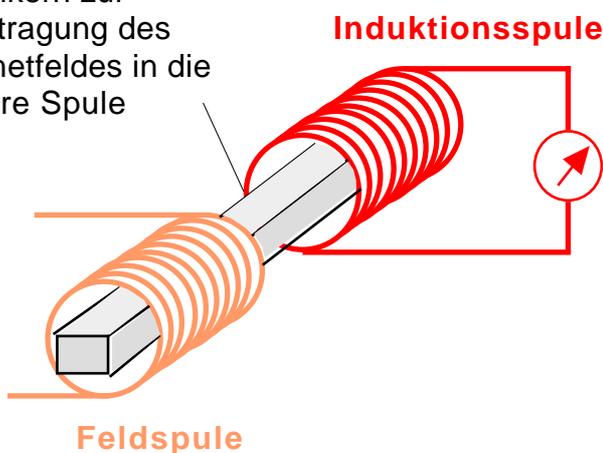
LENZsche Regel:

Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass seine Wirkung (die Kraft auf den stromdurchflossenen Leiter) der Ursache (also der Bewegung) entgegenwirkt.

2. Induktion im ruhenden Leiter (bei Änderung des Magnetfeldes)

Auch im ruhenden Leiter kann ein Induktionseffekt auftreten, wenn sich nämlich das den Stromkreis durchsetzende Magnetfeld ändert.

Eisenkern zur Übertragung des Magnetfeldes in die andere Spule



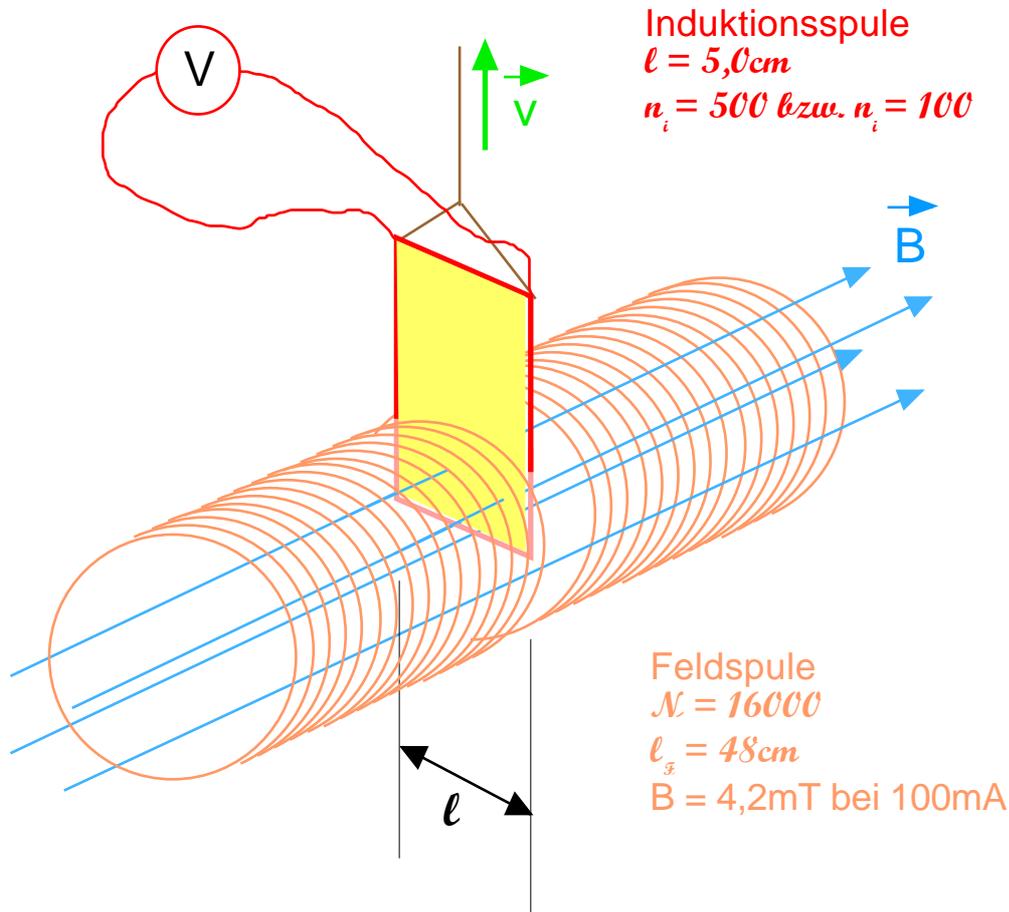
Beim Ein- bzw. Ausschalten des Feldspulenstromes wird in der Induktionsspule ein Induktionsstrom induziert.

Der Induktionsstrom ist dabei so gerichtet, dass er beim Einschalten dem Aufbau des Feldes, beim Ausschalten dem Abbau des Magnetfeldes entgegenwirkt.

Gesetz

1. Teil: $B = \text{const.}$, Leiter wird bewegt

Zur Ermittlung des Gesetzes benötigt man eine **Versuchsanordnung**, bei der man die einzelnen Größen gezielt einstellen und verändern kann.



Die rechteckförmige Induktionsspule wird mit konstanter Geschwindigkeit aus dem Feld gezogen bzw. eingelassen. Während des Herausziehens bzw. Einlassens ist $B = \text{const.}$. Mit einem Röhrenvoltmeter wird die jeweilige Induktionsspannung gemessen.

Messreihe:

Messung Nr.	1	2	3	4	5
n_i	500	500	500	100	100
B / mT	2,1	4,2	4,2	4,2	2,1
$v / \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	4,0	4,0	2,0	4,0	2,0
$U_{\text{ind}} / \text{mV}$	0,2	0,4	0,2	0,09	0,04

$$U_{\text{ind}} \sim B$$

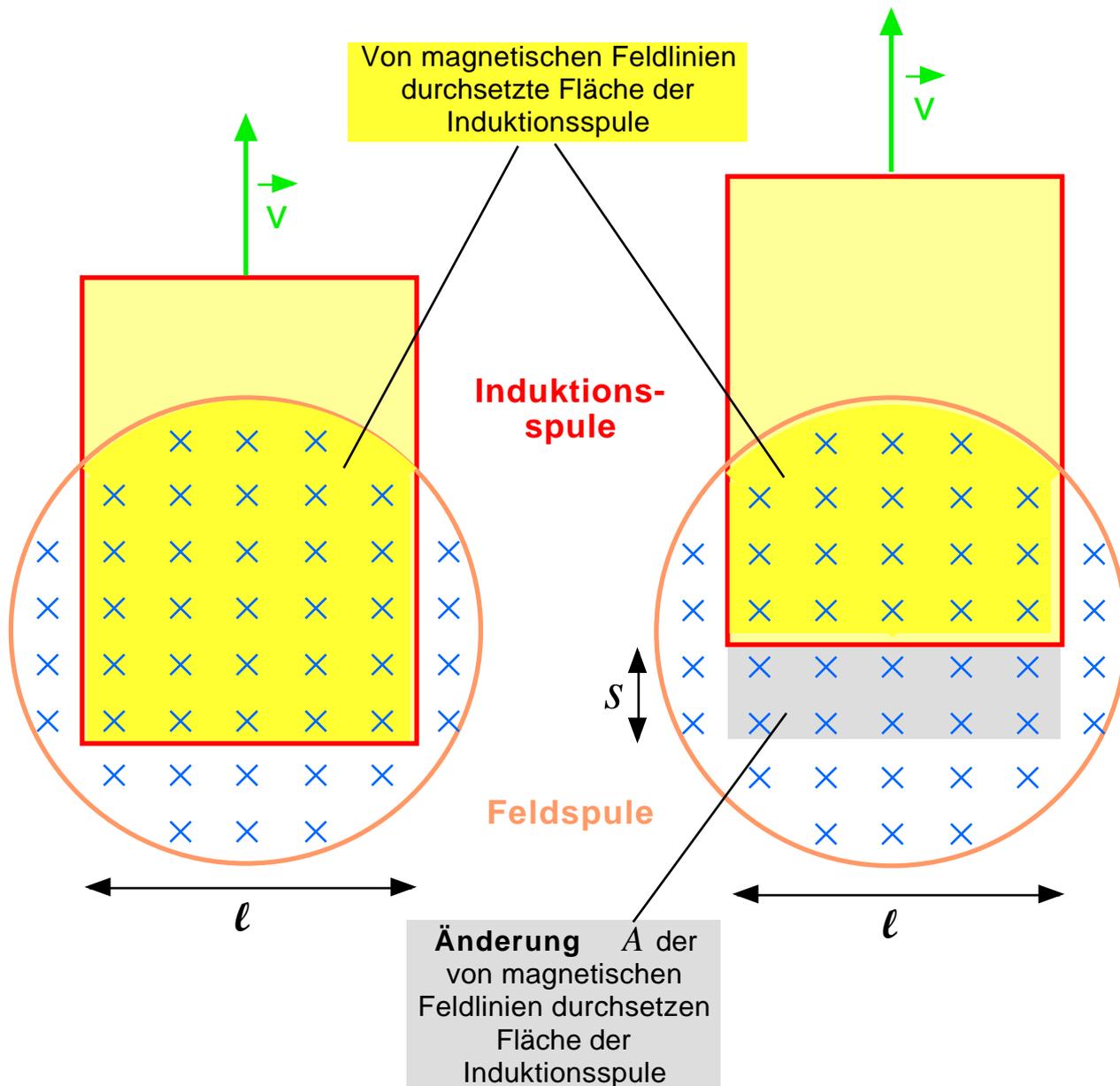
Ergebnisse: $U_{\text{ind}} \sim v$ $U_{\text{ind}} \sim n_i \cdot v \cdot B$ $U_{\text{ind}} = k \cdot n_i \cdot v \cdot B$

$$U_{\text{ind}} \sim n_i$$

Berechnung von k liefert: $k = 0,048\text{m} \cdot 0,05\text{m} = 5\text{cm}$. Offensichtlich ist $k=\ell$.
 Damit gilt:

$$U_{ind} = \underbrace{n_i \ell}_{\text{effektive Länge}} \cdot v \cdot B$$

Der Versuchsaufbau im Schnitt, gezeichnet zum Zeitpunkt t und $t + \Delta t$:



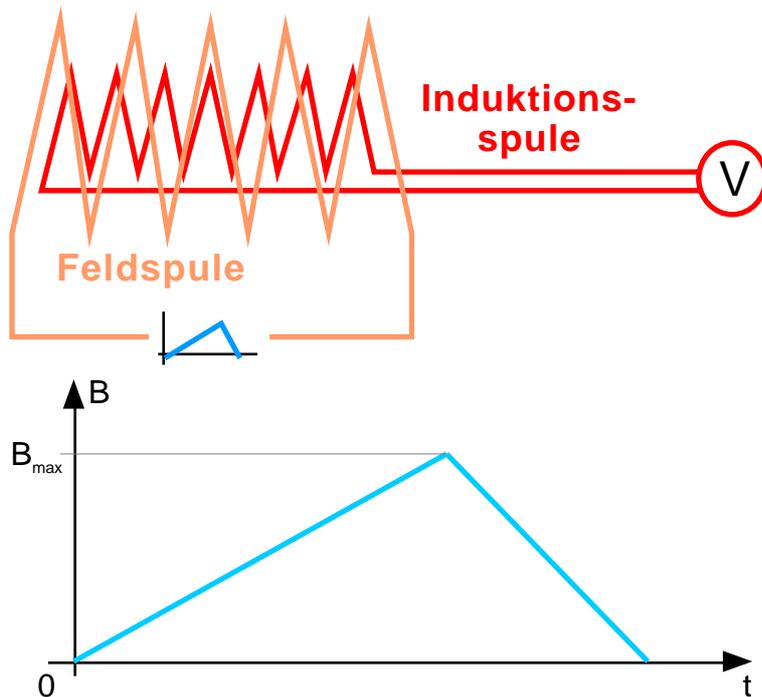
Es gilt: $\ell \cdot v = \ell \cdot \frac{s}{t} = \frac{A}{t}$. Folglich wird aus dem Induktionsgesetz:

$U_{ind} = n_i \frac{A}{t} B$ oder in differentieller Form:

$$U_{ind} = n_i \frac{dA}{dt} B$$

2. Teil: A=const., B ändert sich

Versuchsaufbau schematisch:



Wir schieben in das Innere der Feldspule jeweils eine kleine Induktionsspule. Das verwendete Spezialnetzgerät liefert linear ansteigende und abfallende Spannung, wodurch sich der Feldspulenstrom linear ändert. Bei Änderung des Feldspulenstroms ändert sich die magnetische Flussdichte B proportional dazu. Wir führen den Versuch mit verschiedenen Induktionsspulen durch.

Messreihe: $B_{\max} = 4,2 \text{ mT}$, dh. $|B| = 4,2 \text{ mT}$

Messung Nr.	1	2	3	4	5	6
n_i	2000	2000	1000	1000	2000	2000
A / cm^2	28	28	28	28	14	14
t / s	15,6	8,0	15,6	8,2	15,6	8,2
$\frac{B}{t} / \frac{\text{mT}}{\text{s}}$	0,27	0,53	0,27	0,51	0,27	0,51
$U_{\text{ind}} / \text{mV}$	1,6	3,2	0,8	1,5	0,8	1,6

Ergebnisse:

Aus 1. und 3. folgt:

$$U_i \sim n_i$$

aus 1. und 5. bzw. 2. und 6. folgt:

$$U_i \sim A$$

aus 1. und 2. bzw. 3. und 4. bzw. 5. und 6. folgt:

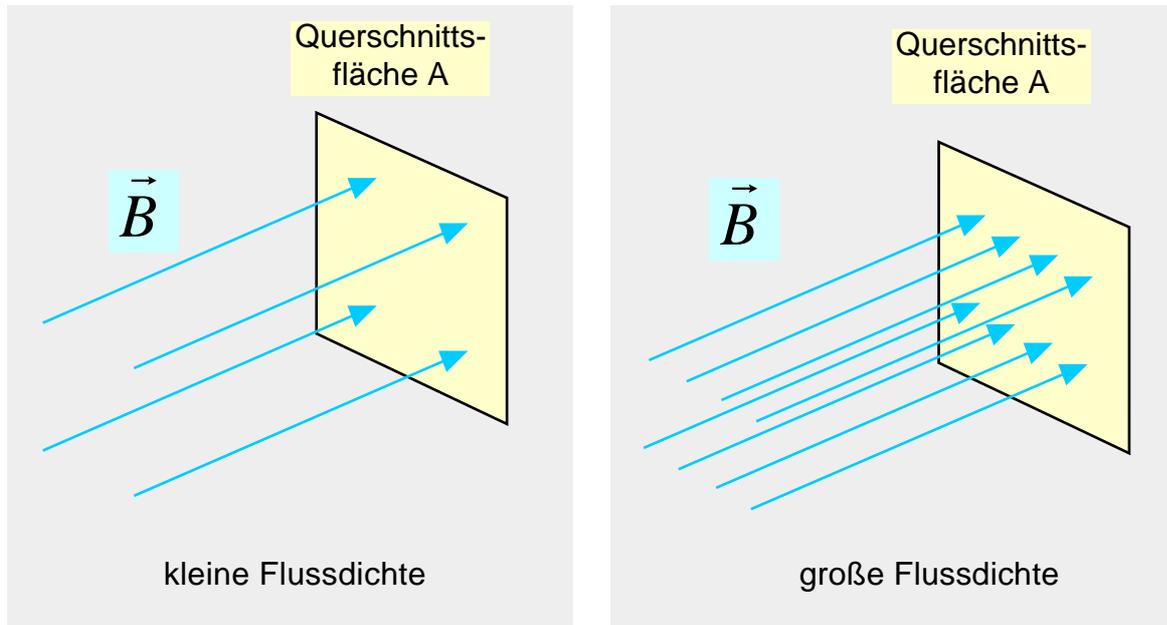
$$U_i \sim \frac{B}{t}$$

Zusammenfassung: $U_i \sim n_i A \frac{B}{t}$, $U_i = k n_i A \frac{B}{t}$

Berechnung von k aus Messung Nr. 2 liefert: $k = 1,1 \frac{\text{V}}{\text{m}^2 \frac{\text{T}}{\text{s}}} = 1,1 \frac{\text{V}}{\text{m}^2 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2 \text{s}}} = 1,1$ 1

Induktionsgesetz in differentieller Form:
$$U_{\text{ind}} = n_i A \frac{dB}{dt}$$

Anschauliche Bedeutung der magnetischen Flussdichte: Feldliniendichte dh. **Anzahl der Feldlinien pro Flächeneinheit** durch einen gedachten Querschnitt senkrecht zu \vec{B}



Unter dem **magnetischen Fluss** versteht man die **Anzahl der Feldlinien durch ein Flächenstück A**. Wird das Flächestück senkrecht von einem homogenen Magnetfeld durchdrungen (wie in der Abbildung), so gilt die einfache Formel:

$$\Phi = B A, \text{ Einheit: } \frac{Vs}{m^2} m^2 = Vs = Wb \text{ (Weber)}$$

Die Induktionsspannung entsteht im ersten Fall dadurch, dass man die Induktionsspule in das Magnetfeld eintaucht, wodurch immer mehr Feldlinien die Induktionsspule durchdringen. Der magnetische Fluss durch die Induktionsspule nimmt also zu. Beim Herausziehen, dh. bei Abnahme des magnetischen Flusses entsteht ebenfalls eine Induktionsspannung.

Im zweiten Fall wird die Änderung des magnetischen Flusses durch die Induktionsspule durch eine Änderung der Flussdichte erreicht. Es entsteht ebenfalls eine Induktionsspannung.

Wir fassen zusammen:

Ändert sich der magnetische Fluss (dh. die Anzahl der Feldlinien) durch die Induktionsspule, so wird eine Spannung induziert.

Zusammenfassung der beiden Induktionsgesetze:

1. Teil: $U_{ind} = n_i \frac{dA}{dt} B = n_i \dot{A} B$ für $B=const.$

1. Teil: $U_{ind} = n_i A \frac{dB}{dt} = n_i A \dot{B}$ für $A=const.$

Mit Hilfe des magnetischen Flusses wird daraus:

$$U_{ind} = n_i \dot{\Phi}$$

Unter Berücksichtigung der LENZschen Regel erhält man schließlich das allgemeine Induktionsgesetz:

$$U_{ind} = -n_i \dot{\Phi}$$

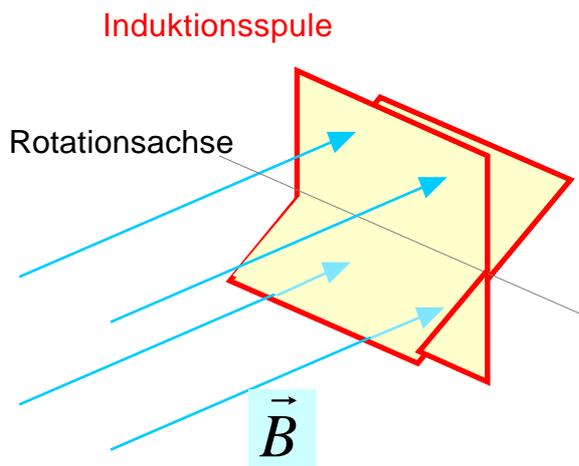
Wird die Induktionsspule nicht senkrecht vom homogenen Magnetfeld durchdrungen, so darf nur die projizierte Fläche eingesetzt werden. Daher gilt für den magnetischen Fluss allgemein die Formel:

$$\Phi = B A \cos\varphi = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

wobei φ der Winkel zwischen dem Normalenvektor der Fläche A und \vec{B} ist.

3. Teil: $A = \text{const.}$, $B = \text{const.}$, der Winkel ändert sich

Versuchsaufbau schematisch:



Die Induktionsspule rotiert mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω im homogenen Magnetfeld.

Es gilt:
 $\varphi = \omega t$

$$\Phi = B A \cos\varphi = B A \cos(\omega t)$$

Folglich:

$$\dot{\Phi} = (B A \cos(\omega t)) \dot{}$$

$$= B A (-\sin(\omega t)) \omega$$

$$= -\omega B A \sin(\omega t)$$

Nach dem Induktionsgesetz ergibt sich:

$$U_{ind} = -n_i \dot{\Phi} = \underbrace{n_i \omega B A}_{\hat{U}} \sin(\omega t) = \hat{U} \sin(\omega t), \text{ wobei } \hat{U} \text{ die Scheitelspannung ist.}$$

Die Scheitelspannung hängt also von der Winkelgeschwindigkeit ab. Das deckt sich mit der Erfahrung: Beim Fahrrad leuchtet die Lampe heller, wenn man schneller fährt.