



Technische Grundlagen der Informatik

WS 2023/24

Teil 1: Elektrotechnik

Vorlesung

Magnetisches Feld und Spule

Dr. Solveig Schüßler



Neues Thema

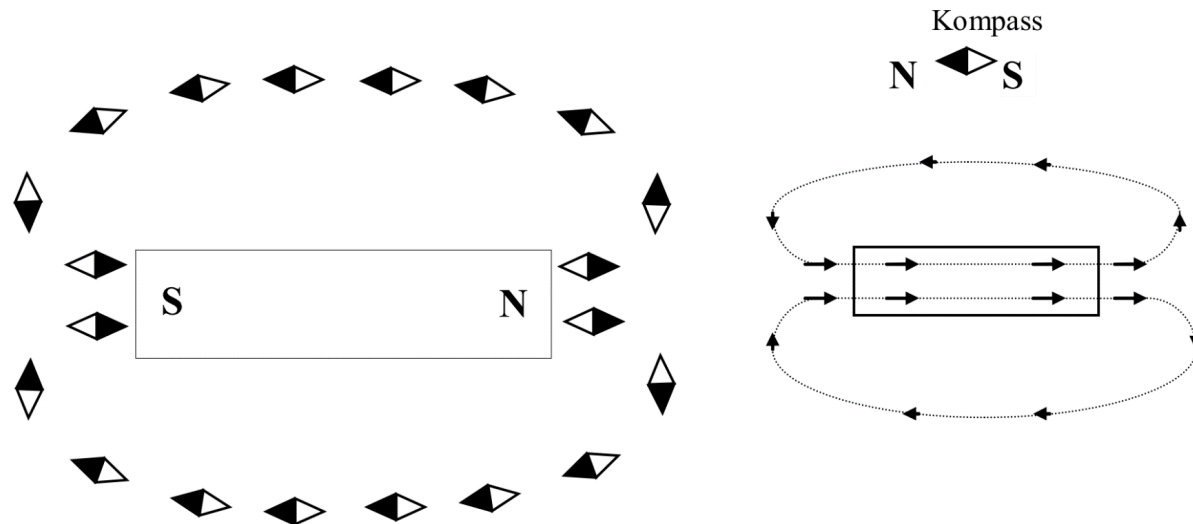
5. Magnetisches Feld und Spule

5. Magnetisches Feld und Spule



Magnete

- Körper, der Eisen-, Nickel- und Kobaltteile anzieht
- sind von einem magnetischen Kraftfeld umgeben
- Versuch mit Stabmagneten /Kompass



<https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/faraday/latest/faraday.html?simulation=faraday&locale=de>



Magnete

- Körper, der Eisen-, Nickel- und Kobaltteile anzieht
- sind von einem magnetischen Kraftfeld umgeben

Magnetisches Feld

- Nord- und Südpol
- gleichnamige Pole: Abstoßung; ungleichnamige Pole: Anziehung
- Darstellung durch Feldlinien

Magnetische Feldlinien

- Immer geschlossen (im Gegensatz zu elektr. Feldlinien !)
- Richtung der Feldlinien: außerhalb des Magneten $N \rightarrow S$
- Dichte der magn. Feldlinien = Maß für Stärke des magn. Feldes
- magnetische Felder überlagern sich



Ferromagnetische Stoffe

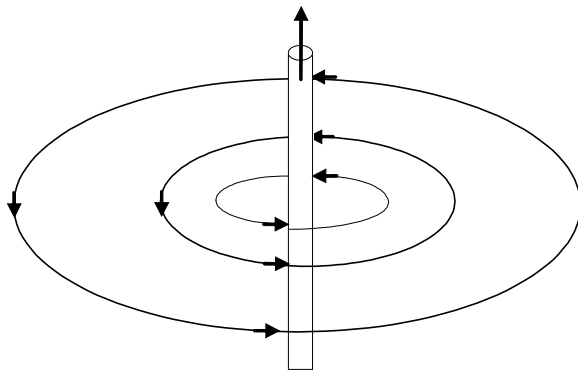
- bewegte Ladungen im Inneren erzeugen „Elementarmagneten“
- diese richten sich bei Anliegen eines äußeren Magnetfeldes nach diesem aus. Das innere Magnetfeld verstärkt sich.
- **Hardmagnetische Stoffe** (Dauermagneten) erhalten die Ausrichtung der Elementarmagneten nach Verschwinden des Magnetfeldes
- **Weichmagnetische Stoffe** verlieren die Ausrichtung weitestgehend; Verwendung für Spulenkerne, Transformatorbleche, Motorbleche ...



Entstehung/Vorkommen von magnet. Feldern

(1) um ferromagnetische Stoffe ✓

(2) um stromdurchflossene Leiter



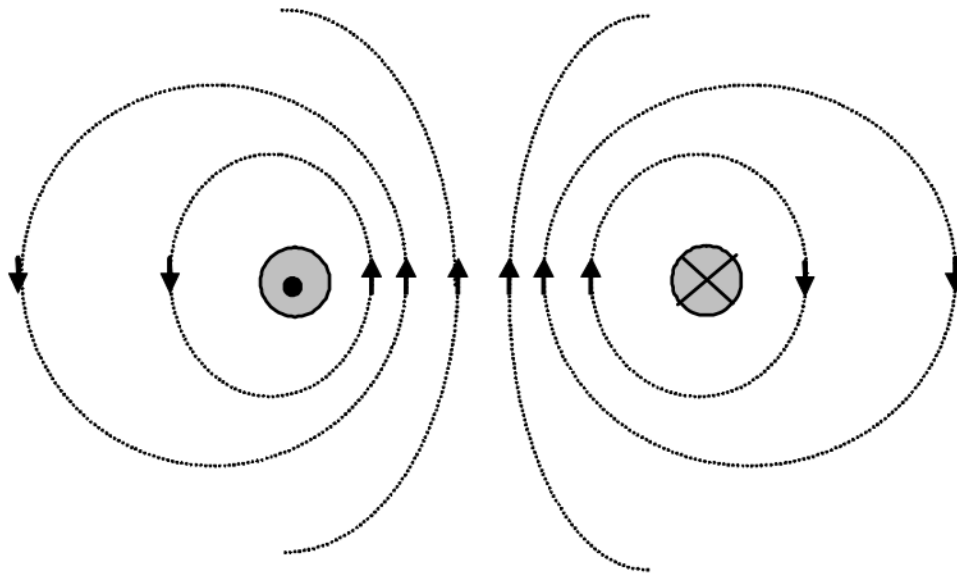
Rechte-Hand-Regel

Die Richtung der Magnetfeldlinien wird durch die gekrümmten Finger der rechten Hand angezeigt, wenn der Daumen in Richtung der technischen Stromrichtung weist.

<https://www.falstad.com/vector3dm/>



Magnetische Feldlinien einer Doppelleitung

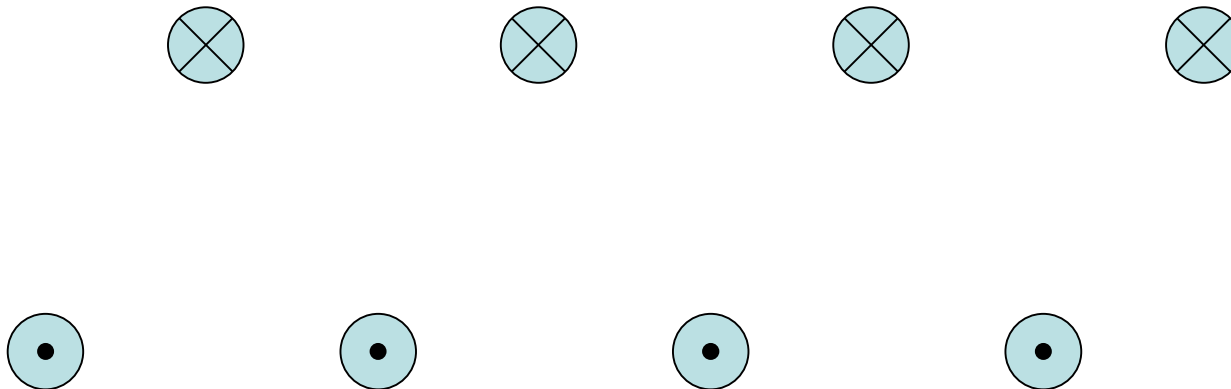
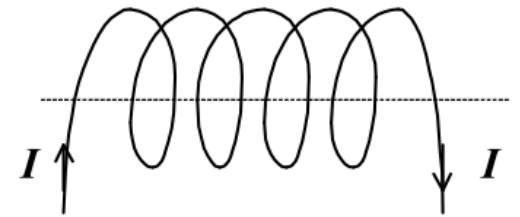


- Überlagerung der Felder zu Gesamtfeld
- Bereiche mit gleichgerichteten Feldern: Verstärkung
- Bereiche mit entgegengesetzter Feldrichtung: Abschwächung

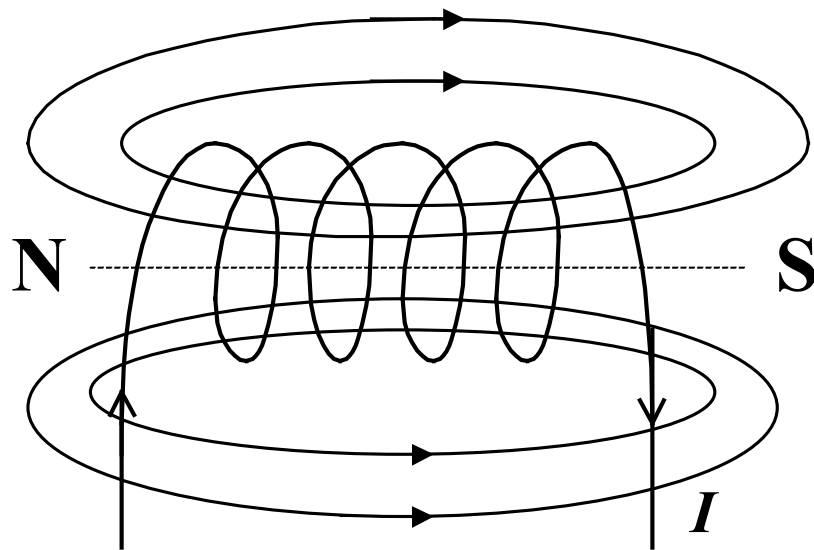
<https://www.falstad.com/vector3dm/>



Magnetische Feldlinien einer Spule



Magnetische Feldlinien einer Spule



Wieder eine Rechte Hand-Regel:

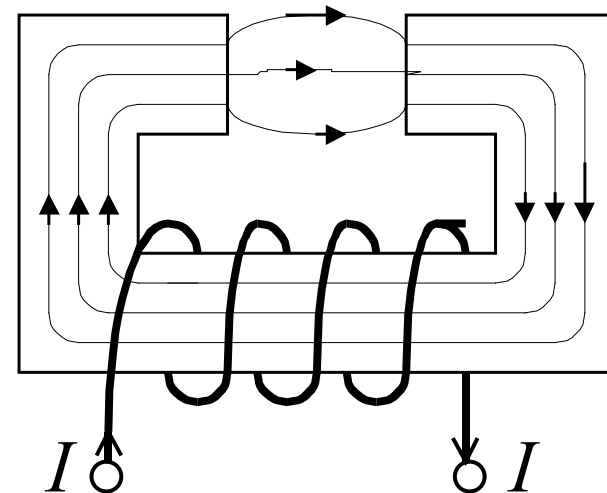
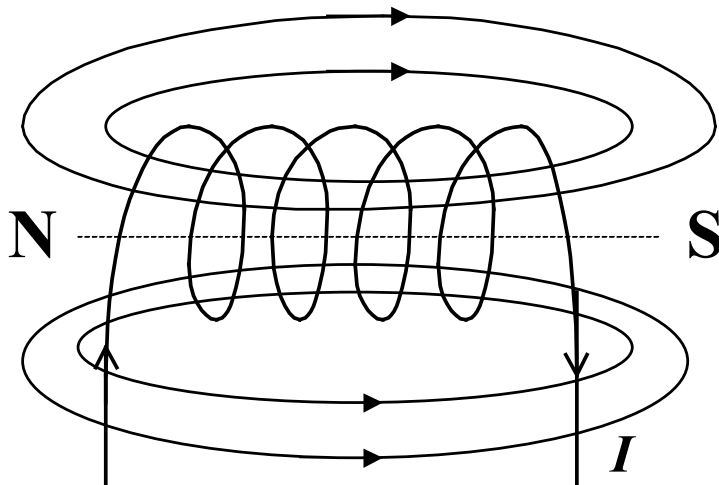
- gekrümmte Finger fahren den Stromfluss (technische Richtung) in den Wicklungen nach
- Daumen zeigt zum magnetischen Nordpol

- stromdurchflossene Spulen erzeugen magnetische Felder
- mit stromdurchflossenen Spulen werden elektrische Magneten realisiert

Funktion eines Relais: <https://tinyurl.com/2qqwzltu>

Magnetische Kreise

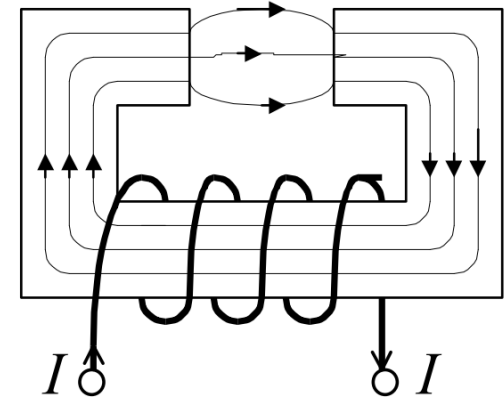
- Magnetische Feldlinien können „gelenkt“ werden
- Ausbreitung immer in Medien mit geringerem „magnetischen Widerstand“, bevorzugt in ferromagnetischen Stoffen





Abschätzung der Größe des Magnetischen Feldes

- Das magnetische Feld ist größer, je mehr Windungen gewickelt wurden und je größer der Erregerstrom ist
- Das magnetische Feld ist umso größer, je besser das „durchflutete Material“ die Feldlinien leiten kann (magnetischer Widerstand: abhängig von Material, Querschnitt und mittlerer Länge)

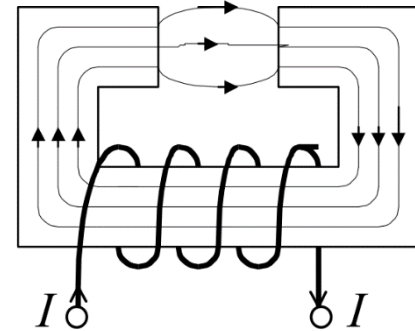




Kenngrößen des Magnetischen Feldes

Magnetischer Fluss Φ \leftarrow (Φ)

- Maß für Gesamtheit der Feldlinien
- Abhängig von Windungszahl, Erregerstrom, Material und Geometrie des Körpers/Stoffes, in dem sich das magnetische Feld ausbreitet.



$$[\Phi] = \text{Wb} = \text{Vs} \quad \text{Wb - Weber}$$



Kenngrößen des Magnetischen Feldes

Magnetische Flussdichte B

- Magnetischer Fluss pro durchströmter Fläche

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad [B] = \frac{Vs}{m^2} = \frac{Wb}{m^2} = T \quad T - Tesla$$



Kenngrößen des Magnetischen Feldes

Bestimmung der Feldgrößen anhand Ihrer Wirkung

Magnetische Flussdichte B [B] = T (Tesla)

- über die Kraft auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld

Magnetische Feldstärke H [H] = A/m

- über das Drehmoment, dass entsteht, wenn sich ein drehbarer Probemagnet im Magnetfeld befindet (und ausrichtet)

Flussdichte B und Magn. Feldstärke H beschreiben das gleiche
Magnetische Feld

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad \text{Permeabilität } \mu$$

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \quad (\text{Magnetische Feldkonstante})$$

$$\mu_r \quad - \quad (\text{Relative Permeabilitätskonstante})$$

μ_r gibt an, um welchen Faktor der Werkstoff die Feldlinien besser leitet als Vakuum/Luft.



Abschirmung von Magnetischen Feldern

- Zur Abschirmung empfindlicher Bauteile und Anlagen können Gehäuse mit hoher magnetischer Leitfähigkeit (Permeativität μ) verwendet werden
- Diese leiten das Magnetische Feld (Magnetfeldlinien) um die empfindlichen Teile herum, so dass ihr Innenraum feldfrei ist

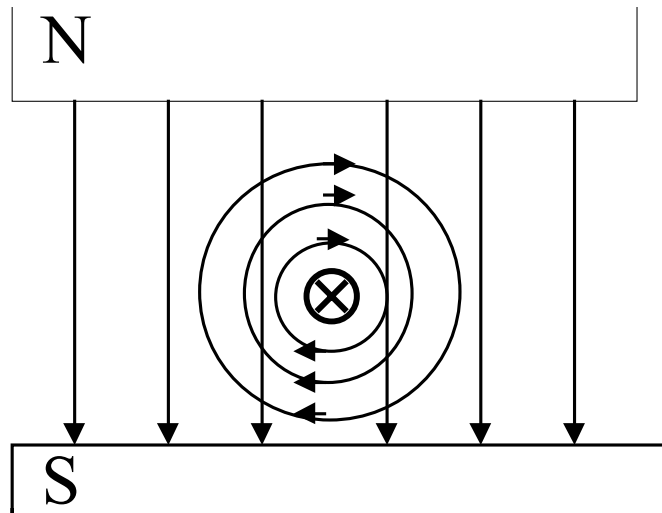


Zwischenzusammenfassung

- **Magnetfelder entstehen, wenn sich elektrische Ladungen bewegen**
 - Dauermagneten
 - Stromdurchflossene Leiter
- Magnetfeldlinien sind geschlossen
- Richtung außerhalb des Magneten $N \rightarrow S$
- Mehrere Magnetfelder überlagern sich
- Gebräuchlichste Kenngröße des Magnetfeldes ist die Magnetische Flussdichte B $[B]=1T$



Kraftwirkung magnetischer Felder



Auf einen stromdurchflossenen Leiter in einem magnetischen Feld wirkt eine Kraft. Diese Kraft wird Lorentzkraft genannt.

Vektorgleichung
für $B = \text{const.}$):

$$\vec{F} = (\vec{I} \times \vec{B}) \cdot l$$

Für I senkrecht auf B :

$$F = I \cdot B \cdot l$$

(noch eine)

Rechte-Hand-Regel (FBI):

Mittelfinger: Kraft F

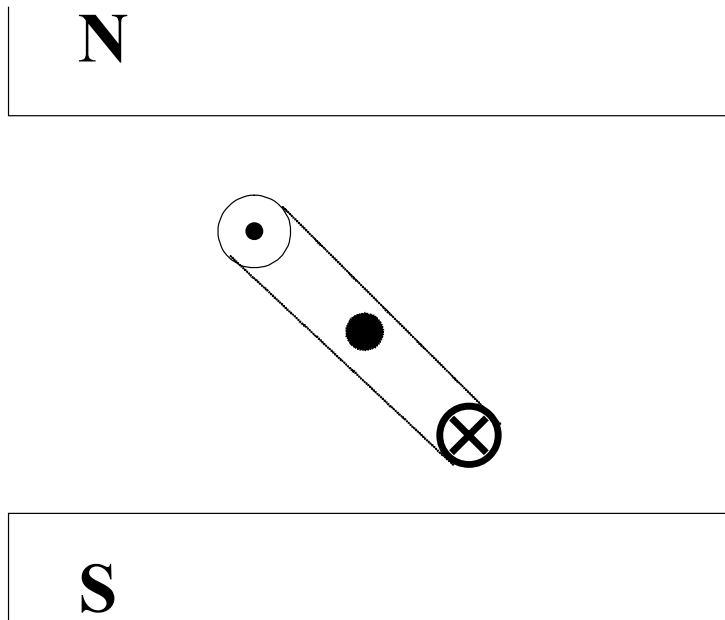
Zeigefinger: magn. Flussdichte B

Daumen: techn. Stromrichtung I

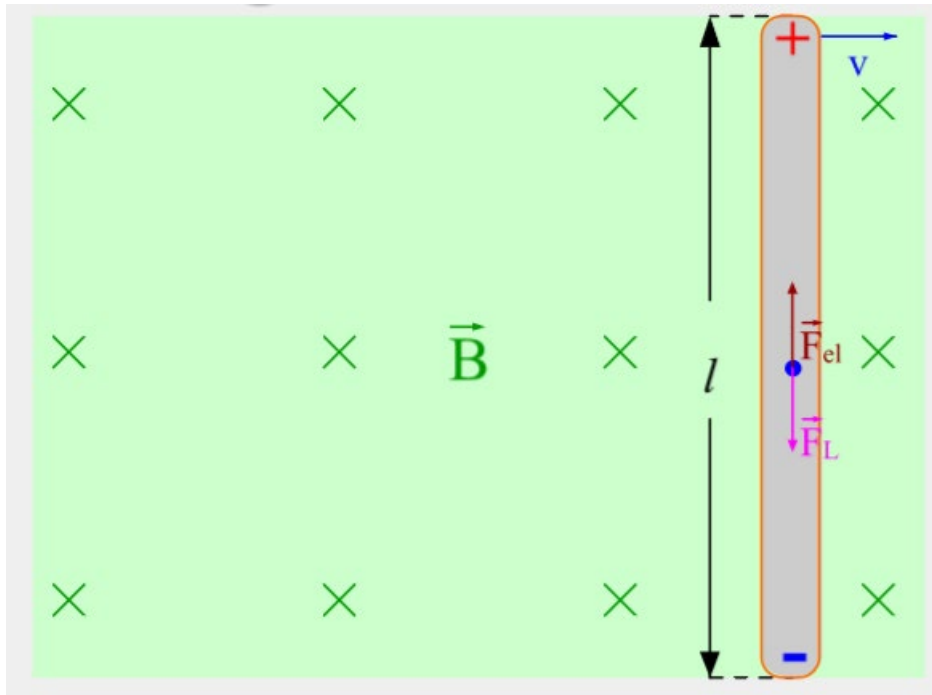


Warum dreht sich ein Motor?

(Kraftwirkung eines statischen Magnetfeldes auf eine stromdurchflossene Spule/ Windung)



Kraftwirkung magnetischer Felder



Hier:
Kraftwirkung auf die Elektronen
in einem durch das Magnetfeld
bewegten Stab ($v=\text{konst.}$)

Es gilt:

- Durch die Lorentzkraft erfolgt eine Ladungsträgertrennung (F_L)
- Die Trennung der Ladungsträger bewirkt eine elektr. Anziehungskraft (F_{el})
- **Gleichgewicht $F_{el}=F_L$:**
An den Leiterenden ist eine Spannung messbar

Siehe auch: **erste** Simulation auf dieser Webseite

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft>



Bewegung einer Leiterschleife durch ein homogenes Magnetfeld

Siehe zweite und vierte Simulation auf dieser Webseite

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft>

Für eine Leiterschleife gilt also:

Eine messbare Spannung wird induziert, wenn

- sich die Leiterschleife in das oder aus dem Feldbereich bewegt
- Oder sich der magnetische Fluss durch die Leiterschleife ändert



Induktion

Die Kraftwirkung der Lorenzkraft bewirkt eine Ladungsträgertrennung im Leiter
→ eine Spannung entsteht / wird induziert.

Für eine Leiterschleife gilt:

- Eine messbare Spannung wird induziert, wenn sich der magnetische Fluss in der Leiterschleife ändert (z.B. Konstante Flussdichte, veränderte Fläche)
- Für die induzierte Spannung in der Leiterschleife gilt dann:

$$u_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \cdot \frac{d(B \cdot A)}{dt}$$



Richtung der induzierten Spannung / Regel von LENZ

- Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass er die Ursache seiner Entstehung zu hemmen sucht

oder

- Die Richtung der induzierten Spannung ist stets so gerichtet, dass der hierdurch entstehende Stromfluss und das hierdurch entstehende neue Magnetfeld dem äußeren Magnetfeld entgegengerichtet ist



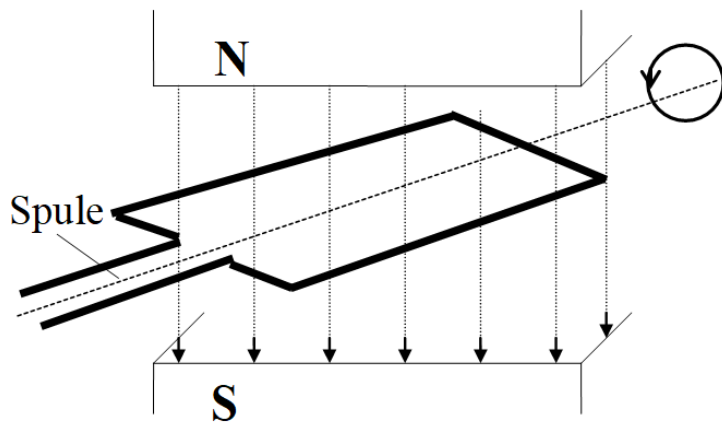
Bewegliche Leiterschleife in konstantem Magnetfeld

- Generator
- Die Drehbewegung verändert die effektive Fläche der Leiterschleife stetig
- Wir werden sehen: die induzierte Spannung ist bei gleichmäßiger Drehbewegung sinusförmig

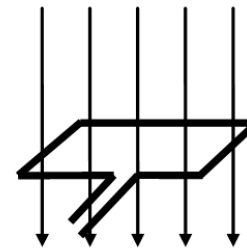
Starre Leiterschleife in veränderlichem Magnetfeld

- Transformator
- Das veränderliche Magnetfeld entsteht durch eine Spulenwicklung auf einem Eisenkern, die von einem veränderlichen Strom durchflossen wird
- In einer 2. Leiterschleife wird eine veränderliche Spannung induziert

Bewegliche Leiterschleife in konstantem Magnetfeld / Generator



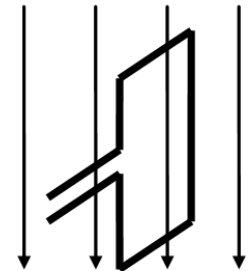
Drehbewegung



$t=t_1 \quad (\alpha=0)$

A entspricht Größe
der Leiterschleife (maximal)

$\Phi(t_1)$ ist maximal



$t=t_2 \quad (\alpha=90^\circ)$

$A=0\text{mm}^2$

$\Phi(t_2) = 0$

**Veränderung der aktiven Fläche der Leiterschleife bei Drehbewegung
siehe fünfte Simulation auf dieser Webseite**

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/grundwissen/induktion-und-lorentz-kraft>

$$u_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$



Bewegliche Leiterschleife in konstantem Magnetfeld / Generator

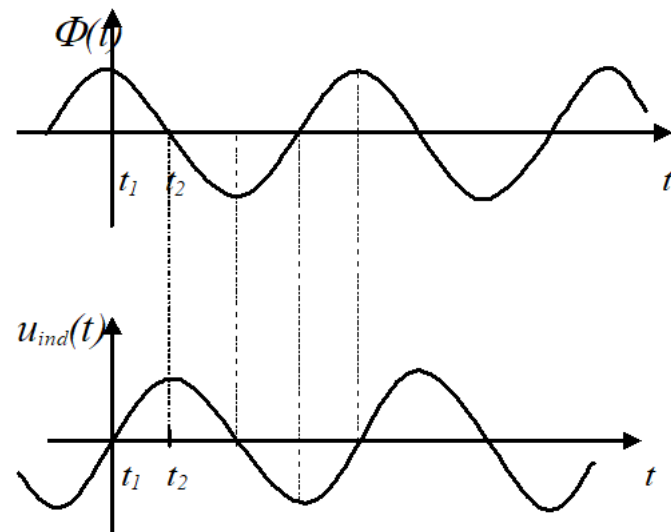
Sonderfall: konstante Drehbewegung

- Die effektive Fläche der Leiterschleife folgt einer Sinusfunktion

⇒ Fluss Φ durch Spule ändert sich zeitlich

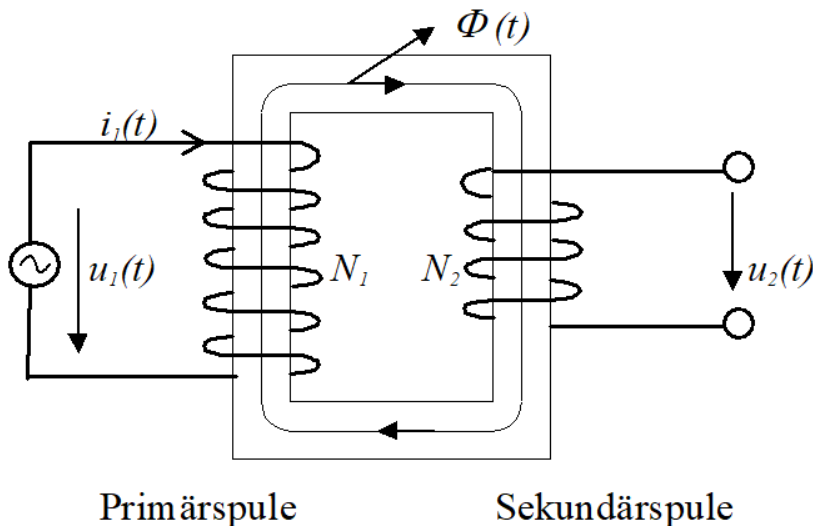
$$u_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

⇒ sinusförmige Spannung wird induziert





Starre Leiterschleife im veränderlichen Magnetfeld/ Transformator



geg.: $u_1(t) \rightarrow$ sinusförmige Spannung

\Rightarrow magn. Fluss $\Phi(t)$ durch Kern ändert sich zeitlich, $\Phi(t) \sim i_1(t)$

\Rightarrow in Sekundärspule wird sinusförmige Spannung $u_2(t)$ induziert

Für die Amplitude einer sinusförmigen Spannung gilt:

$$\frac{\hat{u}_1}{\hat{u}_2} = \frac{N_1}{N_2}$$



Selbstinduktion

Spule = Leiterschleife

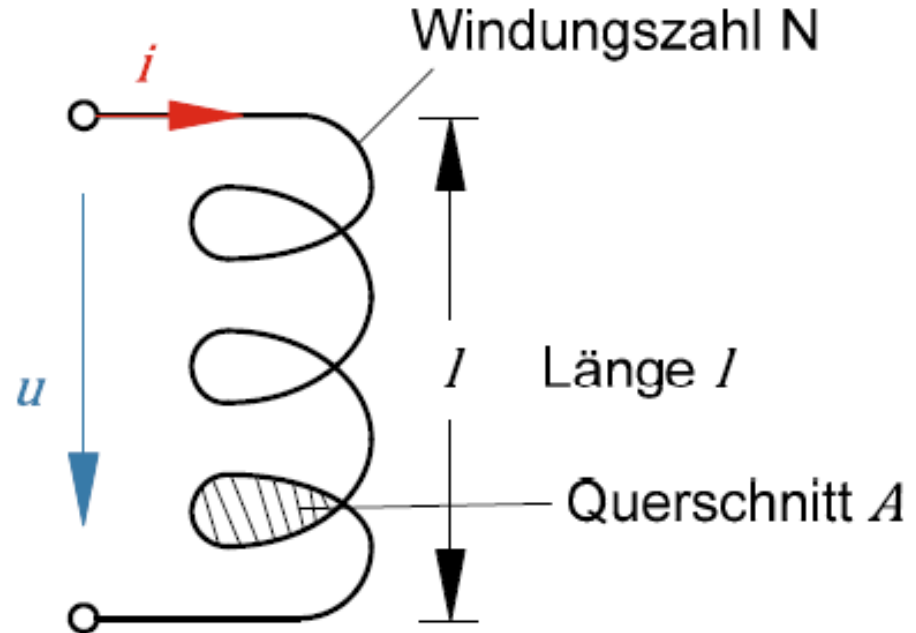
Unter Selbstinduktion versteht man die Induktionswirkung eines Stromes auf seinen eigenen Leiterkreis:

- Ändert sich der durch eine Spule fließende Strom (z.B. beim Ein- und Ausschalten), so bewirkt dieser eine Änderung des magnetischen Flusses durch die "eigene" Spule.
- Aufgrund des Induktionsgesetzes tritt eine Induktionsspannung zwischen den Enden der Leiterschleife auf
- Die induzierte Spannung ist so gerichtet, dass Sie die Ursache ihrer Entstehung zu hemmen/ auszugleichen sucht.
(Diese Ursache kann das Zu- oder Abschalten einer Spannungsquelle oder eine sich ändernde Versorgungsspannung sein.)

Spulen

= Leiterschleife

- Die Stärke dieses Effektes der Selbstinduktion hängt von den Spulenparametern ab.
- **Dies wird durch die Induktivität L der Spule angegeben.**

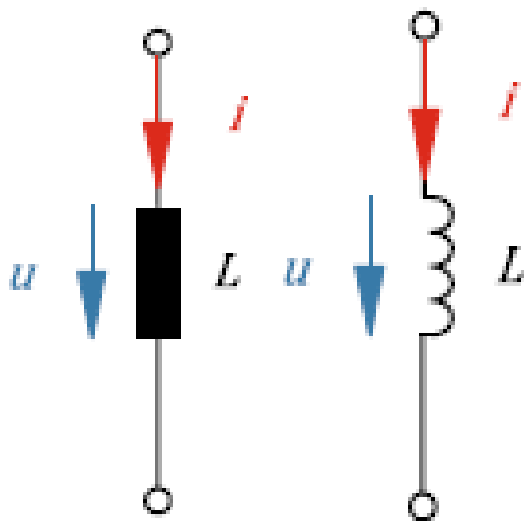


$$L = \frac{N^2 A}{l} \mu_0 \mu_r$$

A : Querschnitt des Kerns
 l : mittlere Feldlinienlänge



Spulen

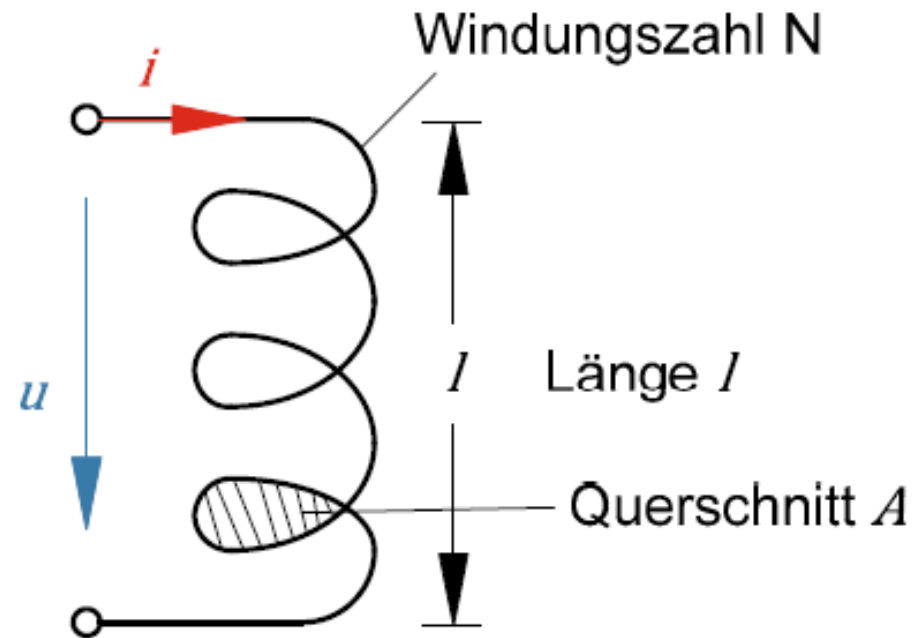


- Induktivität L
- $[L] = \text{Vs/A} = 1\text{H}$ (Henri)
typisch: mH
- Induktivitäten speichern elektrische Energie im magnetischen Feld um die Leiterschleife (Energiebestimmende Größe ist hier der Strom I)

$$W_L = \frac{1}{2} L \cdot i^2$$

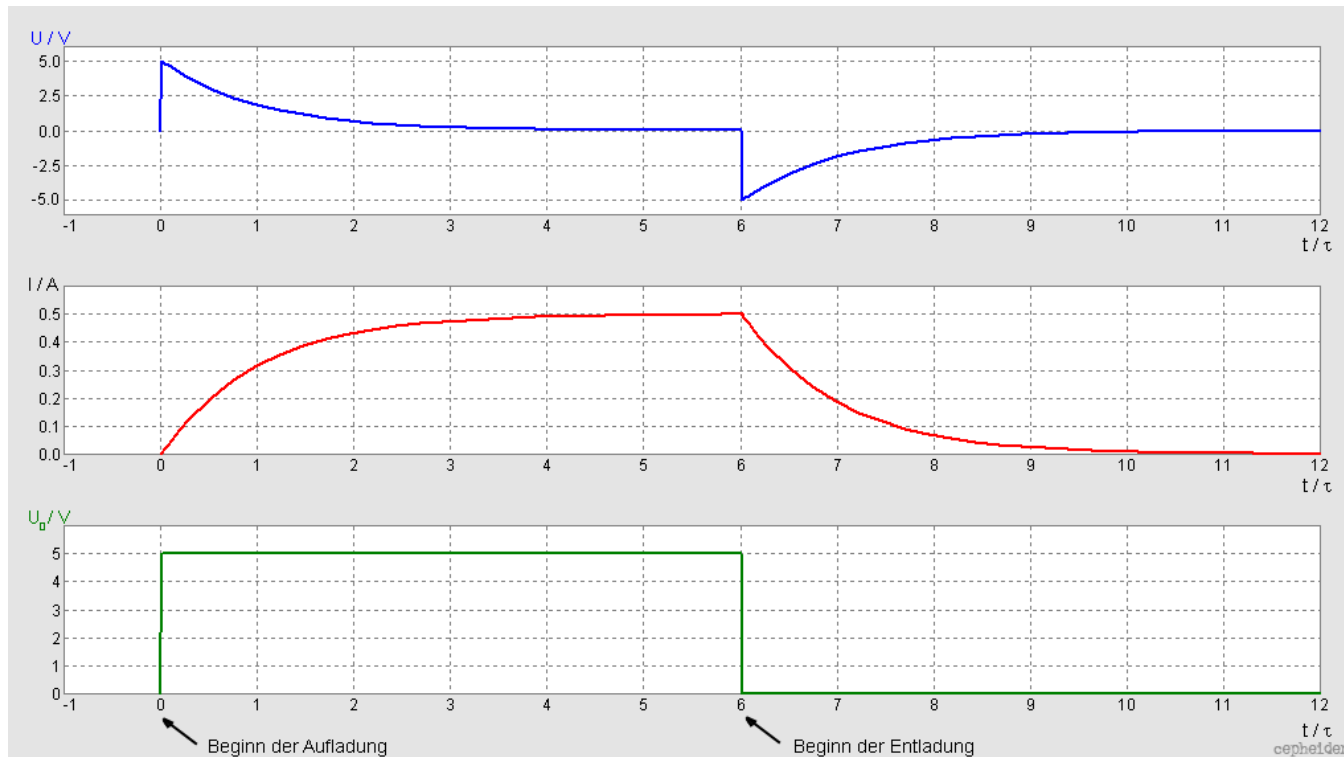
Ein- und Abschalten einer Gleichspannung an Induktivitäten

- Beim Einschalten einer Gleichspannung steigt der Strom durch die Spule erst allmählich auf seinen stationären Endwert.
- Beim Ausschalten einer Gleichspannung wird eine Spannung in der Spule „erzeugt“, es kann noch ein Strom "nachfließen", wenn ein entsprechender Stromkreis zur Verfügung steht.





Ein- und Abschalten einer Gleichspannung an Induktivitäten



Von Henrik Schumacher - Von Henrik Schumacher am 12. Januar 2006 in die deutschsprachige Wikipedia geladen.,
Copyrighted free use, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11929082>

https://www.elektroniktutor.de/analogtechnik/I_gleich.html



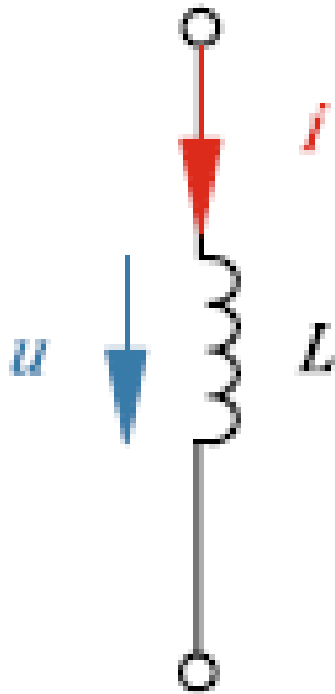
Zusammenfassung: Ausgleichsvorgänge an Induktivitäten

- Eine Änderung des Stromflusses durch die Spule bewirkt eine Veränderung des magnetischen Flusses in der Spule. Dieser induziert eine Spannung in der Spule, die so gerichtet ist, dass sie der Änderung des Stromes entgegenwirkt. Die elektrische Energie hierfür kommt aus dem Magnetfeld der Spule.
- Der Stromfluss durch eine Spule ist stetig und kann nicht springen.
 - Die Induktivität wirkt nach Abklingen der Einschaltvorgänge bei Gleichspannung wie ein Kurzschluss. Sie begrenzt den Stromfluss nicht.



Zusammenhang Strom und Spannung

Es gilt allgemein:



$$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$
$$i(t) = \frac{1}{L} \int u(t) dt$$

→ Nach Ende der Ein- und Ausschaltvorgänge ($i=\text{konst.}$) liegt über der idealen Spule keine Spannung an ($u_L=0V$).



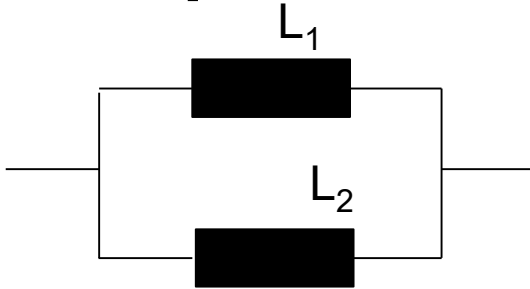
Selbstinduktion, Anwendungen

- Erzeugung der notwendigen hohen Zündspannung für Leuchtstofflampen oder für Zündkerzen im Ottomotor (Spannungen von einigen 1000 V)
- Erzeugung von Hochspannungsimpulsen im Elektrozaun und im Funkeninduktor
- Das Abschalten jeder Induktivität stellt für Schalter eine Belastung dar. Die dabei entstehende hohe Spannung ist für Schalter, insbesondere elektronische Schalter wie Transistoren, gefährlich, denn beim Ausschalten ändert sich das Magnetfeld sehr abrupt. Bei mechanischen Schaltern kann ein „Abreissfunken“ an den Schalterkontakten entstehen. Um die Zerstörung des Schalters zu vermeiden oder die Spannung zu begrenzen, wird ein Kondensator oder eine Freilaufdiode antiparallel zur Spule geschaltet.

siehe auch: http://www.schule-bw.de/unterricht/faecher/physik/online_material/e_lehre_2/selbstinduktion/selbstind_aus.htm

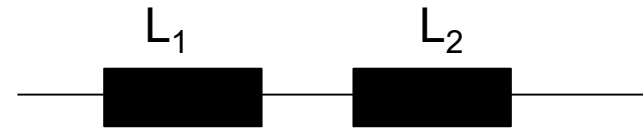


Parallelschaltung von Spulen



$$\frac{1}{L_{ges}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$$

Reihenschaltung von Spulen



$$L_{ges} = L_1 + L_2$$

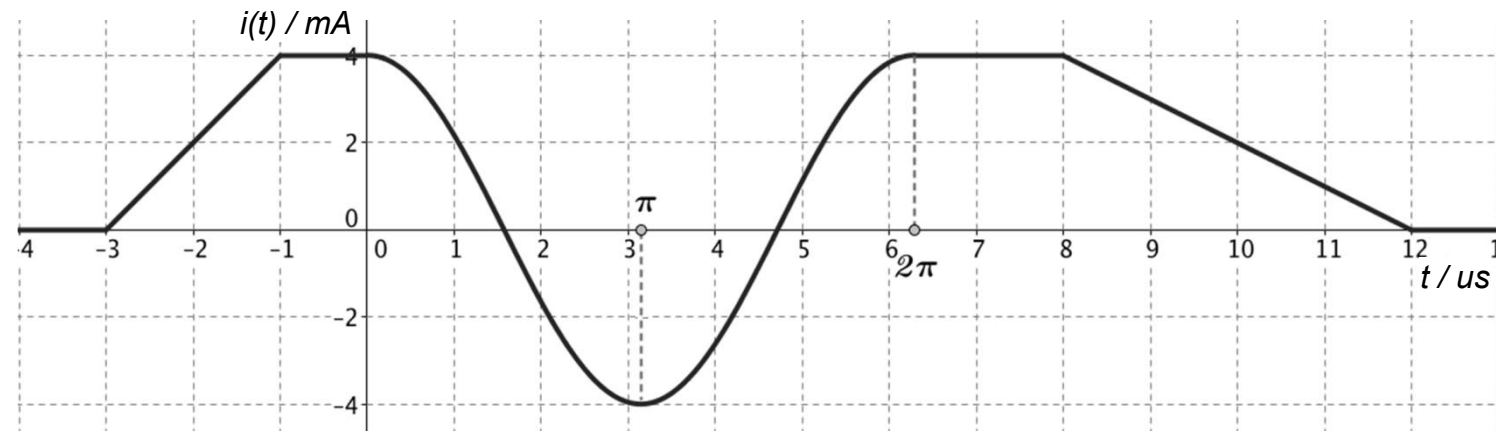
5. Magnetisches Feld und Spule



abschließende Aufgabe (ähnlich A20/ A21)

Bestimmen Sie die Spannung $u_L(t)$, die in der Spule ($L=1\text{mH}$) induziert wird, wenn der angegebene Strom durch sie fließt.

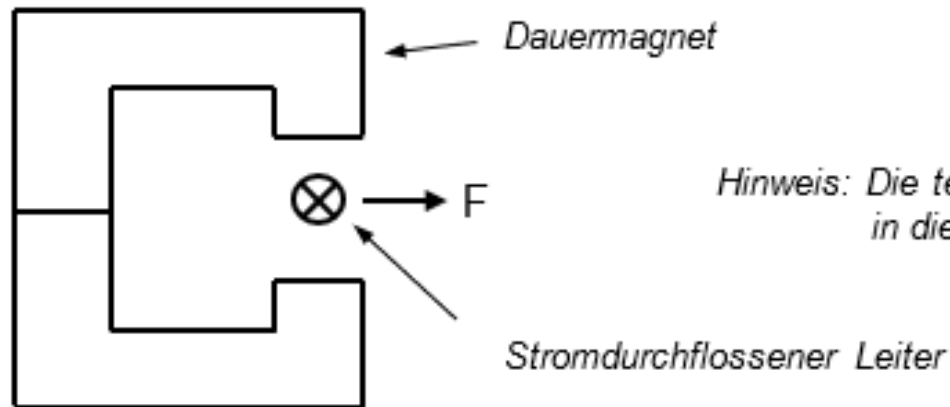
$$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$



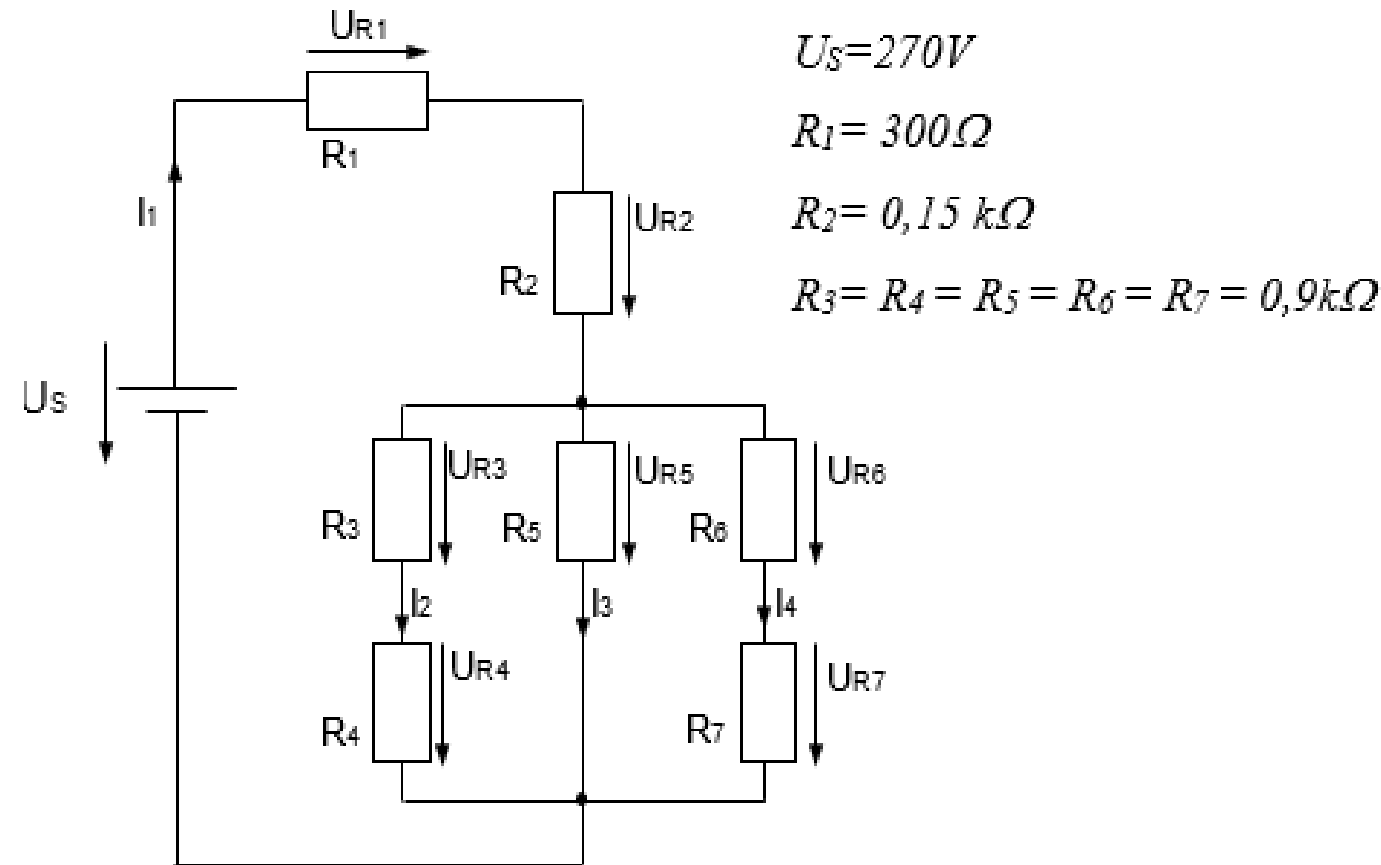
5. Magnetisches Feld und Spule



- c) In einem konstanten Feld eines Dauermagneten befindet sich ein Leiter, der von einem konstanten Strom durchflossen wird. Der Draht erfährt eine Kraftwirkung nach rechts. Zeichnen Sie exemplarisch eine Magnetfeldlinie in das gegebene Bild ein und kennzeichnen Sie Nord- und Südpol des Dauermagneten!



5. Magnetisches Feld und Spule





Letzte Themen für diese Lehrveranstaltung

- Wechselstrom und Leistung in Widerständen, Kondensatoren und Spulen
- Halbleiter