

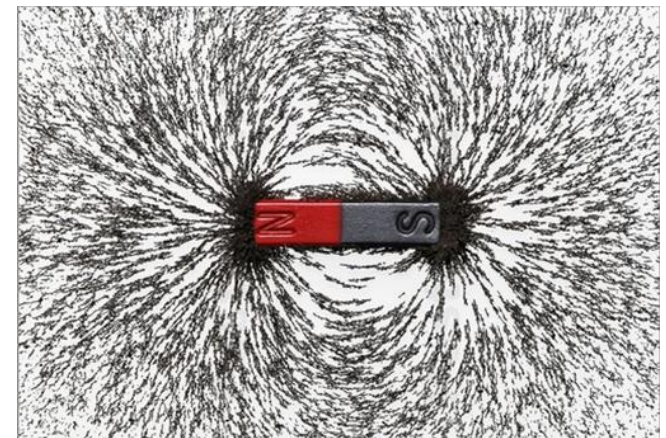
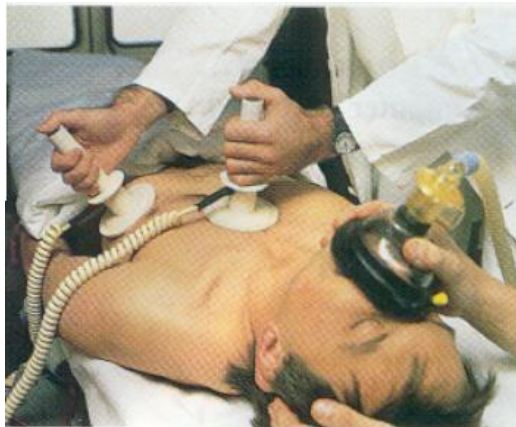
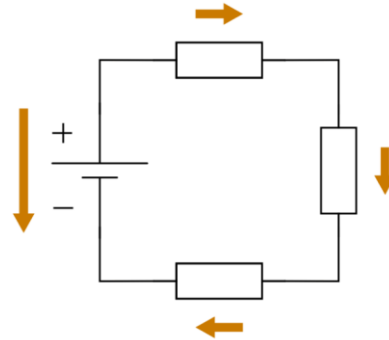
# Grundlagen der medizinischen Biophysik

8. Vorlesung 04. 10. 2023

Ádám Orosz

Elektrizitätslehre 2

Magnetismus



# Ohmsches Gesetz, Widerstand, Leitwert, spez. Widerstand, Leitfähigkeit

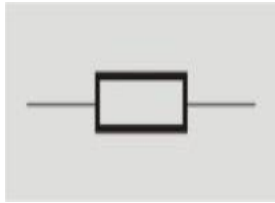
$$I \sim U$$

**Ohmsches Gesetz:**  $U = R \cdot I$

$$I = G \cdot U$$

**Elektrischer Widerstand (R):**

$$R = \frac{U}{I} \left( \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega \text{ (Ohm)} \right)$$



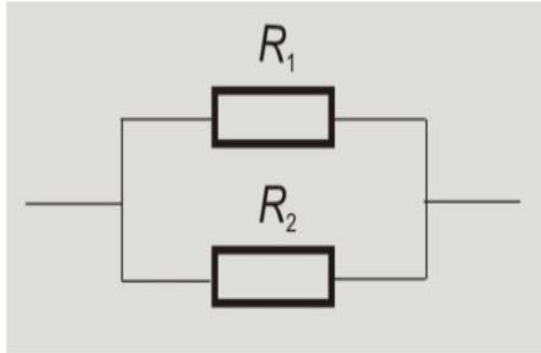
**Elektrischer Leitwert (G):**

$$G = \frac{I}{U} \left( \frac{\text{A}}{\text{V}} = \text{S (Siemens)} \right)$$

- Der elektrische Widerstand eines Leiters hängt u.a. von dessen **Geometrie** ab:
  - Je **größer** die Querschnittsfläche  $A$ , desto **geringer** ist der Widerstand
  - Je **länger** der Leiter  $l$ , desto **größer** ist der Widerstand
$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$
- $\rho$  ist der **spezifische Widerstand** und ein von der **Temperatur** abhängiger **stoffspezifischer** Koeffizient mit einer Maßeinheit von  $\Omega \cdot \text{m}$
- Der elektrische Leitwert eines Leiters hängt u.a. von dessen **Geometrie** ab:
  - Je **größer** die Querschnittsfläche  $A$ , desto **größer** ist der Leitwert
  - Je **länger** der Leiter  $l$ , desto **kleiner** ist der Leitwert
$$G = \sigma \cdot \frac{A}{l}$$
- $\sigma$  ist die **elektrische Leitfähigkeit** und ein von der **Temperatur** abhängiger **stoffspezifischer** Koeffizient mit einer Maßeinheit von  $\text{S/m}$

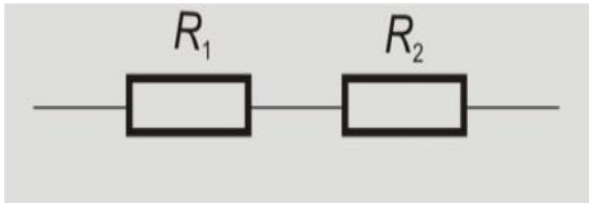
# Schaltung von Widerständen

## Parallelschaltung



$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

## Reihenschaltung

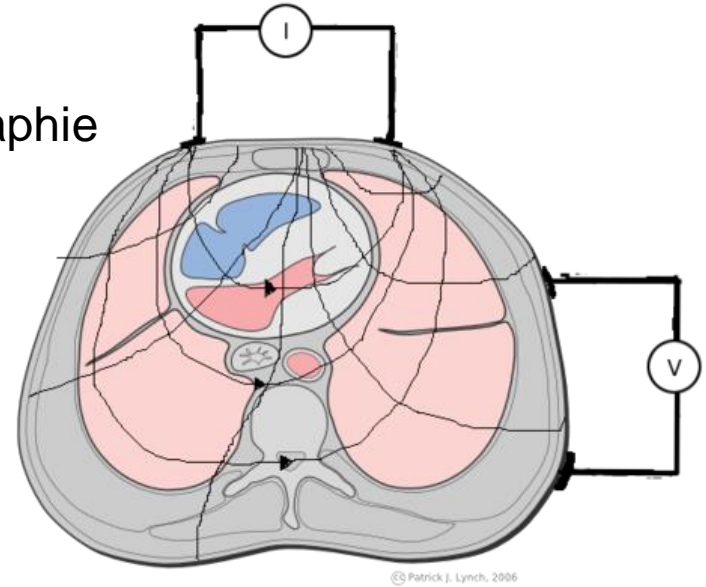


$$R = R_1 + R_2 + \dots$$

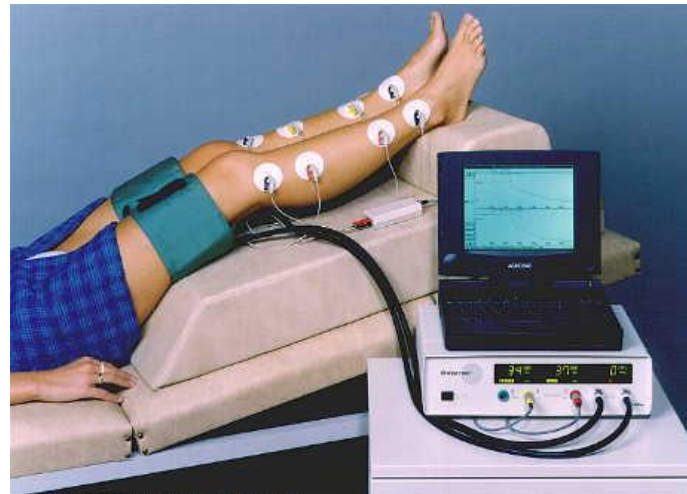
# Elektrische Leitfähigkeit in der Diagnostik

Gewebe	$\sigma$ (mS/m)
Blut	700
graue Hirnmasse	300
weiße Hirnmasse	150
Haut	100
Fett	40
Knochen	10

Elektrische  
Impedanztomographie  
(EIT)



Impedanzplethysmographie  
(IPG)



# Das joulesche Gesetz

- Bei der **Abbremsung** von Ladungsträgern durch Widerstände verlieren diese Energie, die in Form von **joulescher Wärme** (elektrische Arbeit, **Stromarbeit**) frei wird:

$$W_{\text{Strom}} = U \cdot I \cdot t$$

$$\text{Elektrische Leistung (P): } P = U \cdot I$$

Elektrokauter (Hitzekauter):





# Übung

In einer elektrotherapeutischen Behandlung fließt ein Strom mit einer Stromstärke von 5 mA durch die Haut. Der elektrische Widerstand der Haut beträgt  $2000\ \Omega$ . Berechnen Sie

a) den Leitwert der Haut

b) die Spannung, die zu dieser Stromstärke nötig ist

c) die Ladungsmenge, die während einer 5 Minuten langen Behandlung durch die Haut hindurchfließt

d) die Wärme, die während der Behandlung in der Haut entsteht





# Elektrische Stromkreise

Geschlossene Anordnungen von elektrischen Schaltelementen (Spannungsquellen, Kondensatoren, Widerständen), durch die ein elektrischer Strom fließen kann.

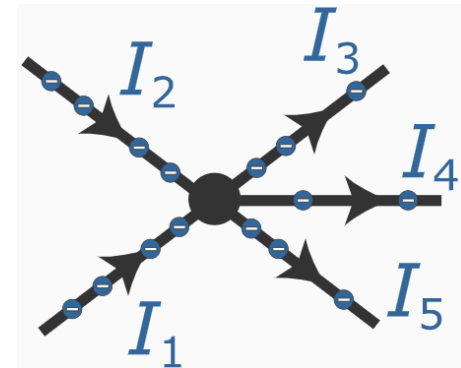
Zusammenhänge für die **Verteilung** von **Strom** und **Spannung** in Stromkreisen

**1. kirchhoffsche Regel (Knotenregel):** in einem Verzweigungspunkt ist die Summe der Stromstärken der zufließenden Ströme gleich der Summe der Stromstärken der abfließenden Ströme



$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

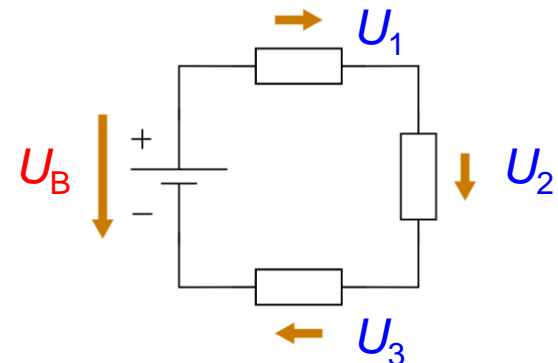
$$\sum_i^n I_n = 0$$



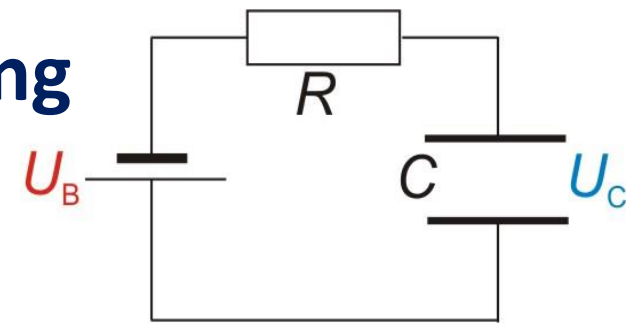
**2. kirchhoffsche Regel (Maschenregel):** in einem geschlossenen Stromkreis (Masche) ist die Summe der Teilspannungen an den einzelnen Elementen (Widerständen, Spannungsquellen, ...) gleich null

$$U_B = U_1 + U_2 + U_3$$

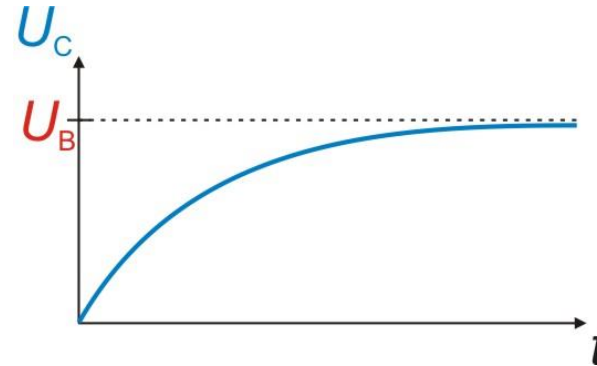
$$\sum_i^n U_n = 0$$



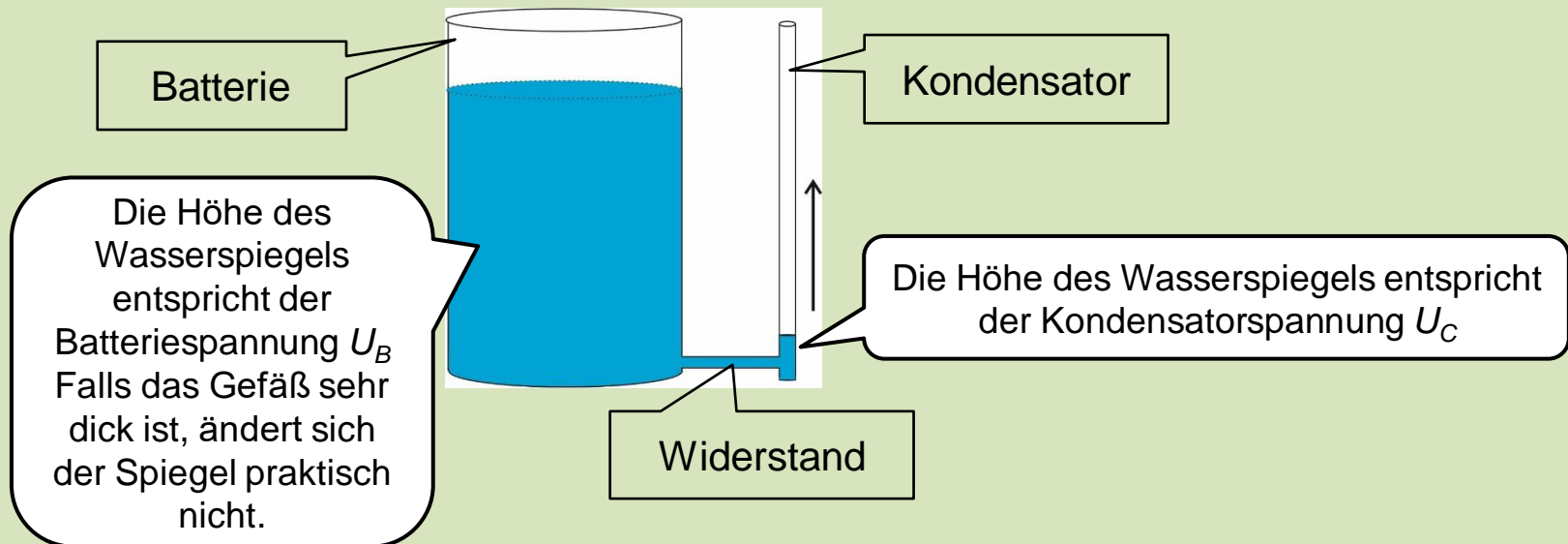
# RC-Kreis - Ladevorgang



$$U_C = U_B \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

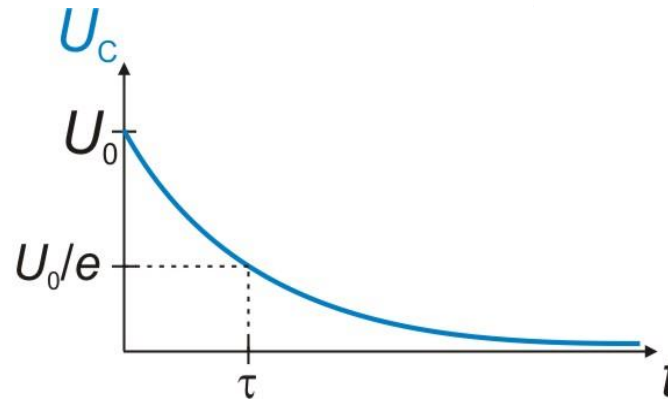
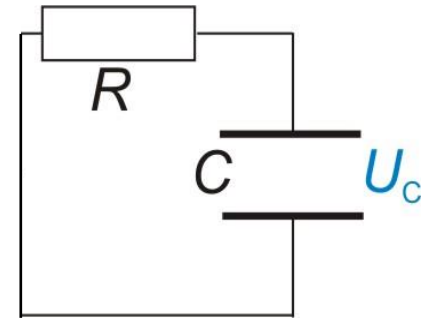


Analogie: Ausgleich der Wasserspiegel in den Gefäßen



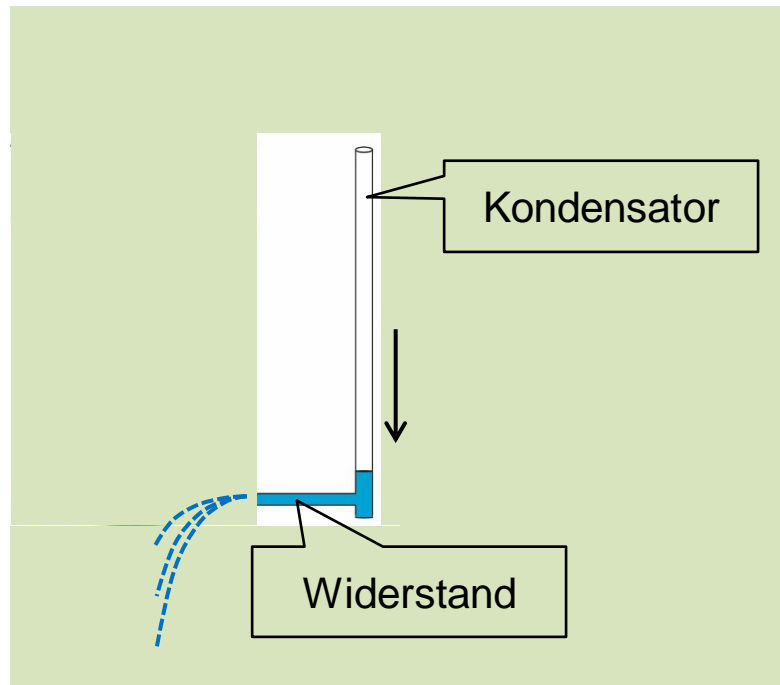


# RC-Kreis - Entladevorgang



$$U_C = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$$

Analogie: Senkung des  
Wasserspiegels im dünnen Rohr





# Übung

Man lädt den Kondensator eines Defibrillators vor der Anwendung 0,5 s lang mit einer Spannungsquelle von 5000 V. (Die Zeitkonstante des Ladekreises beträgt 100 ms.) Berechnen Sie die Spannung des Kondensators am Ende der Aufladung.

Nach der Aufladung wird der Kondensator des Defibrillators ( $C = 20 \mu\text{F}$ ) in der Anwendung mit Hilfe von zwei Elektroden an den Patienten geschaltet. Der Körper stellt einen Widerstand von etwa  $2000 \Omega$  dar. Berechnen Sie

a) die Zeitkonstante des Kreises

b) die Zeit, während welcher die Spannung auf 1% sinkt



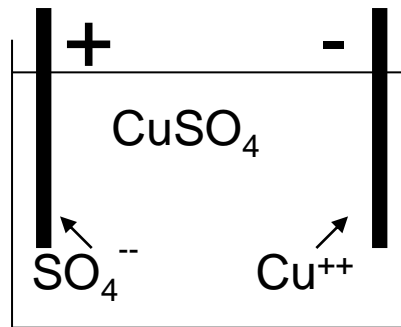
# Wirkungen des elektrischen Stromes

- Wärmewirkung



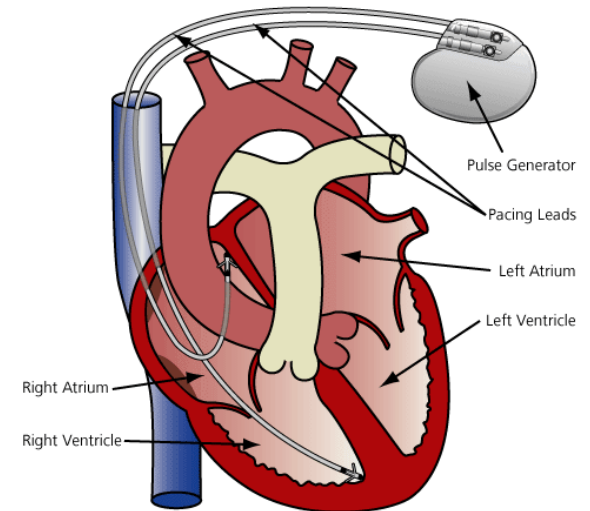
Behandlung mit  
Kondensatorplatten  
- hochfrequenter  
Wechselstrom

- chemische Wirkung

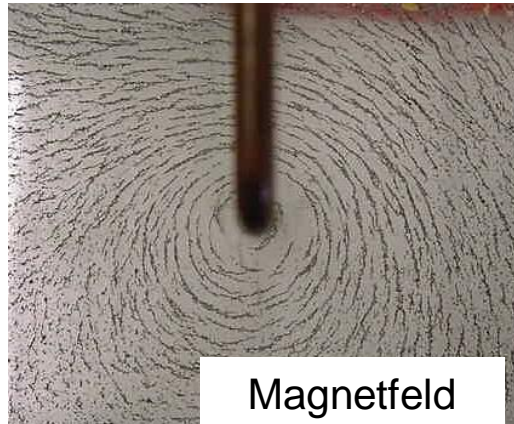


Elektrolyse -  
Gleichstrom

- biologische Wirkung



- magnetische Wirkung

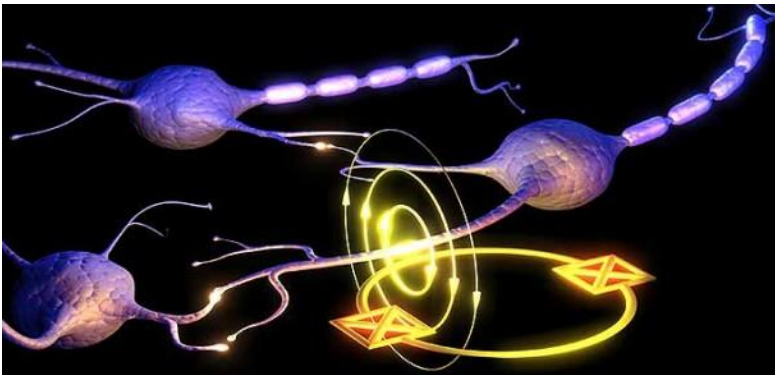


Magnetfeld



Herzschrittmacher -  
Stromimpulse

# Magnetismus und elektromagnetische Induktion



# Magnete

Grundsätzlich gibt es zwei Ursachen des Magnetismus:

- **Permanente Magnete** (z.B. natürlich magnetisierte Steine)
- **Elektromagnete** (durch bewegte Ladungsträger verursachte Magnetfelder)



## Magnetisches Moment

- Das **magnetische Moment** ( $m$  oder  $\mu$ ) beschreibt die **Stärke eines Magneten**
- **Elektronen, Protonen und Neutronen** innerhalb eines Atoms/Atomkerns besitzen ein magnetisches Moment, sie können als **winzige Magnete** betrachtet werden
- **Magnete üben Kräfte aufeinander aus**, die nicht durch andere Wechselwirkungen erklärbar sind: **magnetische Wechselwirkung**

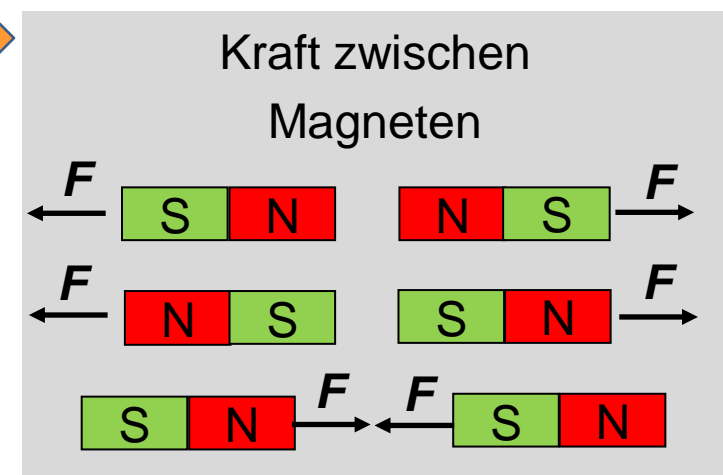
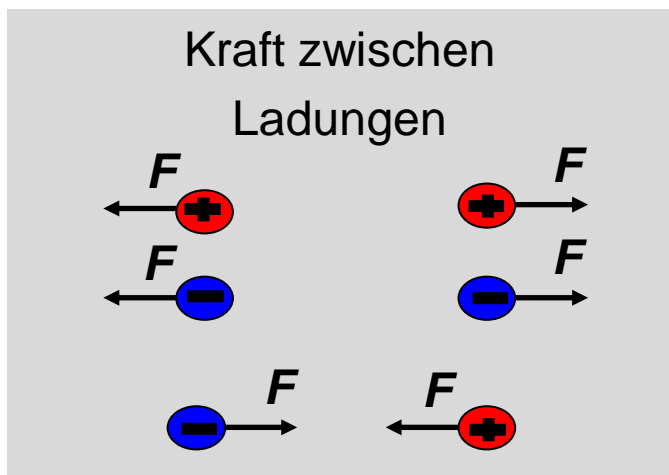
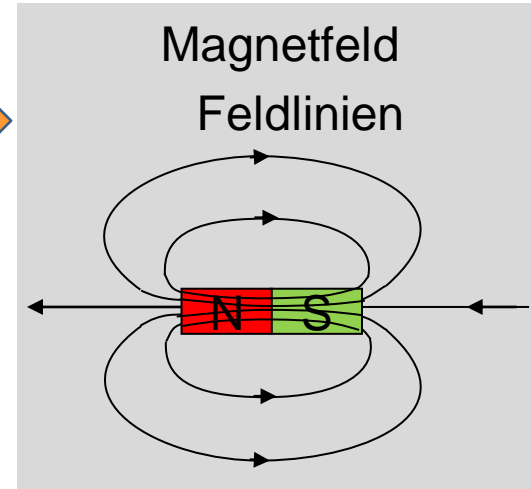
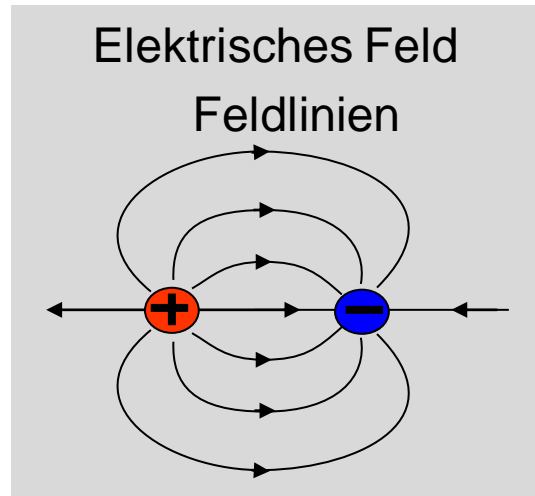
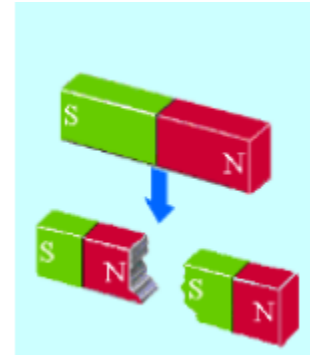


# Elektrische vs. magnetische Wechselwirkung

Ladung  
+ —  
trennbar



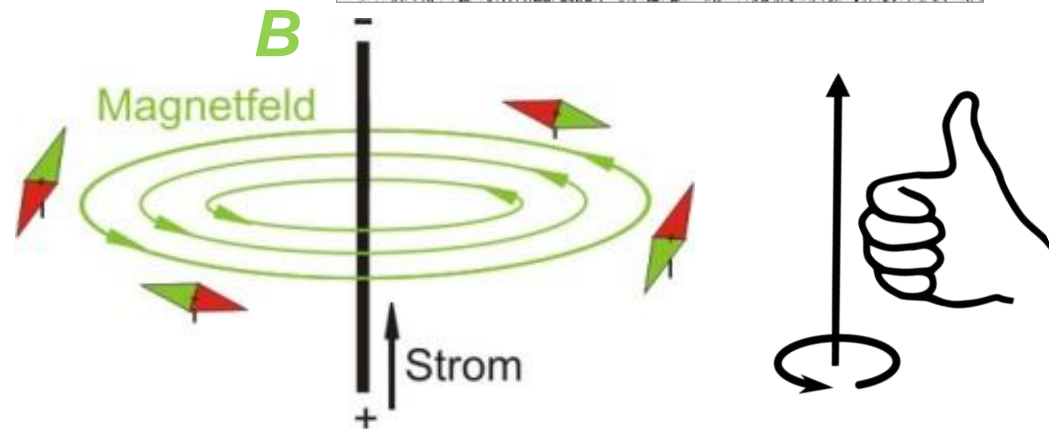
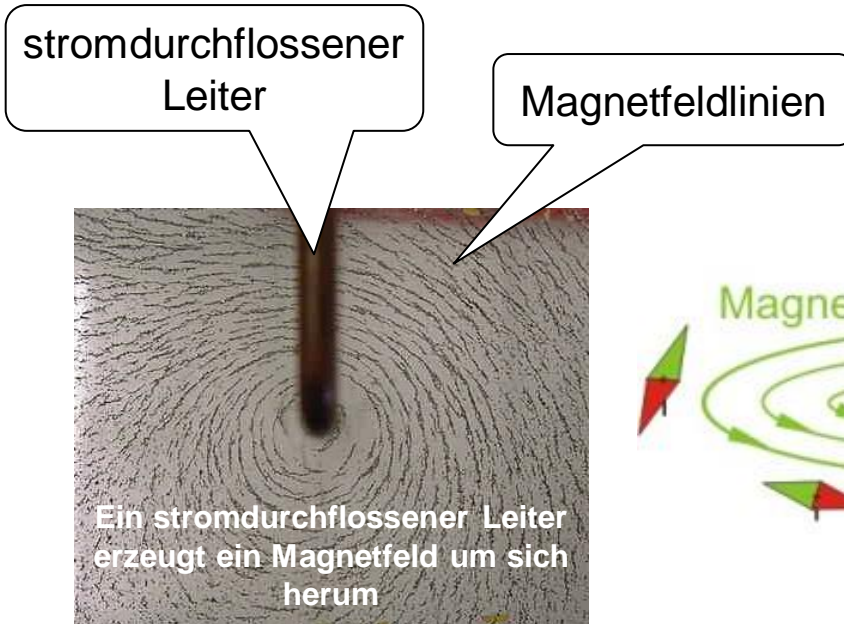
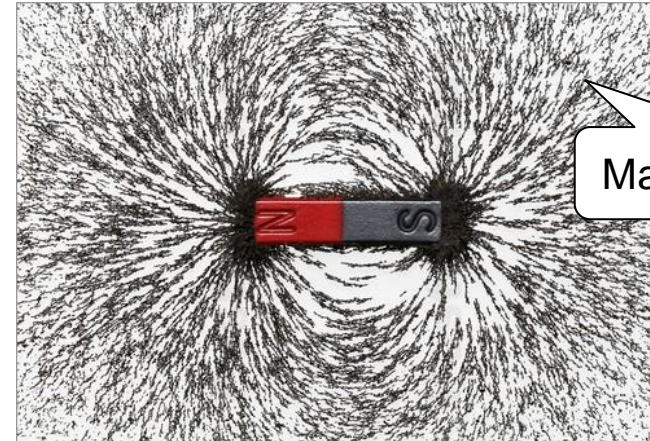
magnetischer Pol  
Süd Nord  
**untrennbar !!!**





# Magnetfeld und magnetische Flussdichte

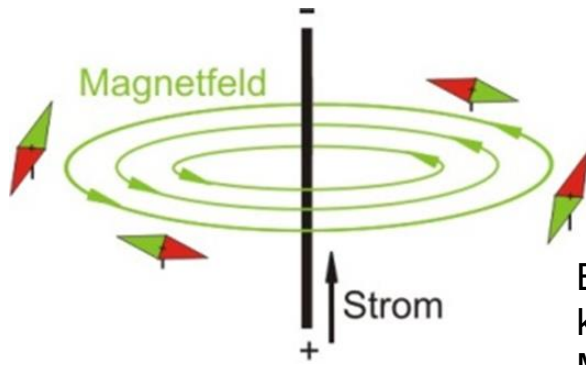
- Das **Magnetfeld übermittelt die Kraftwirkung** zwischen Magneten



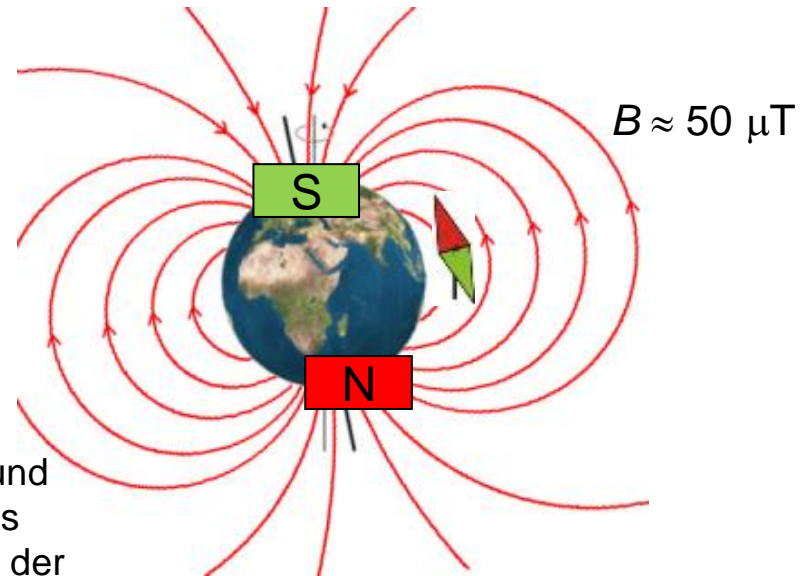
- Richtung der Feldlinien: **Rechte-Hand-Regel** (Schraubenzieher Regel)
- Je größer ist die Stromstärke, desto stärker wird das Magnetfeld

**Magnetische Flussdichte ( $B$ ), SI-Einheit: Tesla (T)**

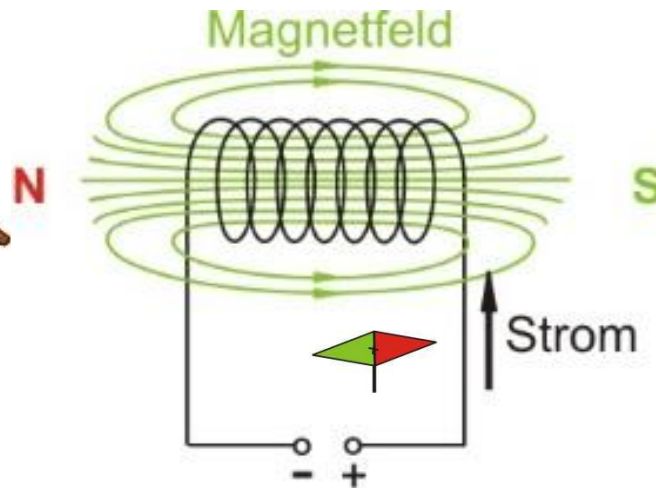
- Die magnetische Flussdichte  $B$  gibt die **Stärke eines Magnetfeldes** an



Besonders stark und konzentriert ist das Magnetfeld, wenn der Leiter in **Form einer Spule gewickelt** wird



Magnetresonanztomografie:  $B \approx 1\text{-}10 \text{ T}$



Elektrischer Strom, bewegte el. Ladungen erzeugen Magnetfeld

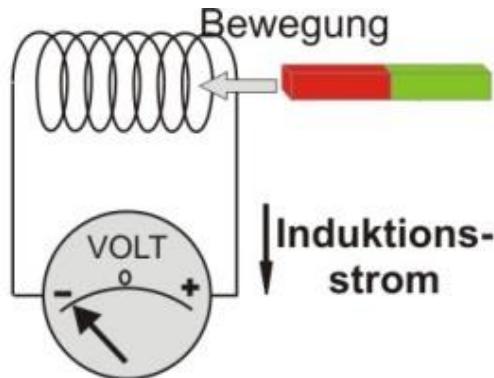
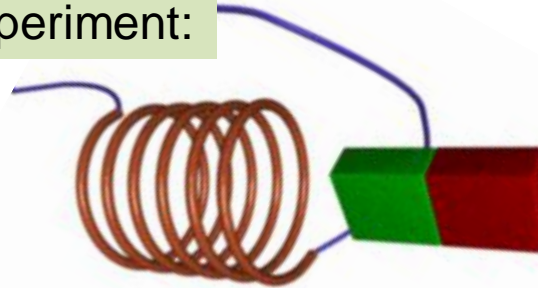
# Magnetische Induktion

Bewegte elektrische Ladungen erzeugen Magnetfeld.



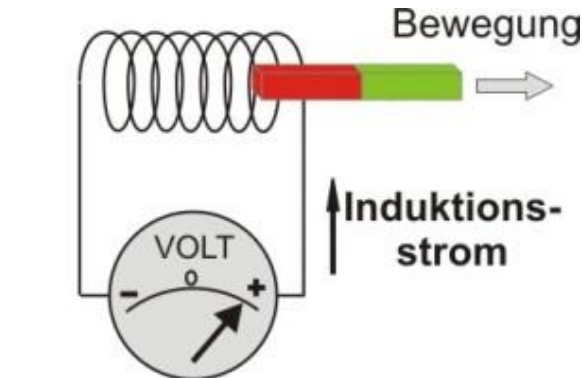
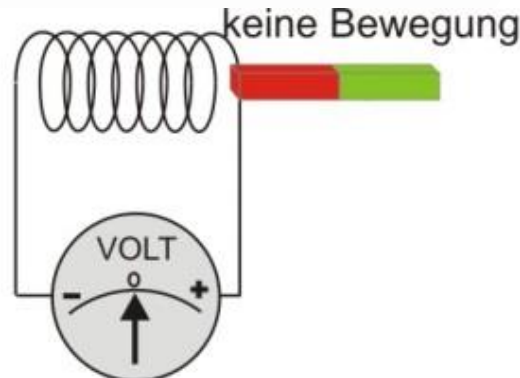
Können bewegte Magnete elektrisches Feld erzeugen und dadurch elektrische Ladungen bewegen? (Faraday)

Experiment:



Induktionsspannung

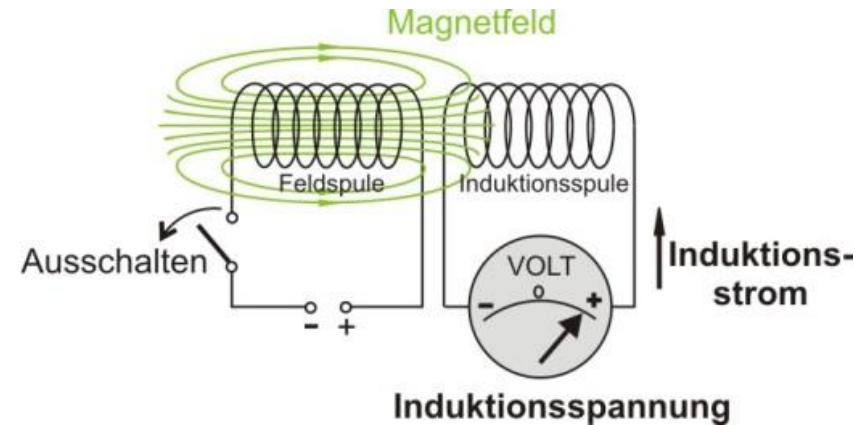
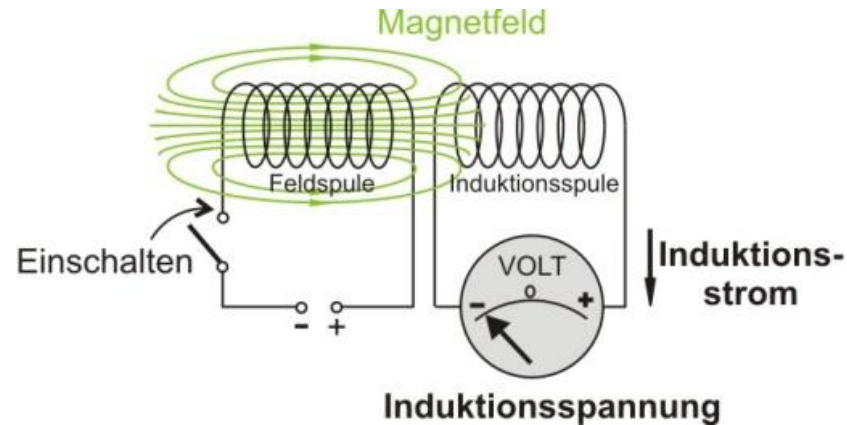
Annäherung des Magnetes erzeugt Spannung!



Induktionsspannung

Entfernung des Magnetes erzeugt Spannung mit entgegengesetztem Vorzeichen

# Magnetische Induktion

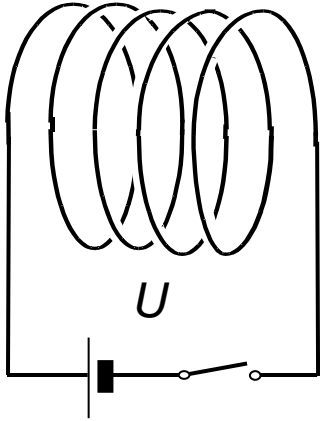


**Sich ändernde Magnetfelder erzeugen elektrisches Feld**

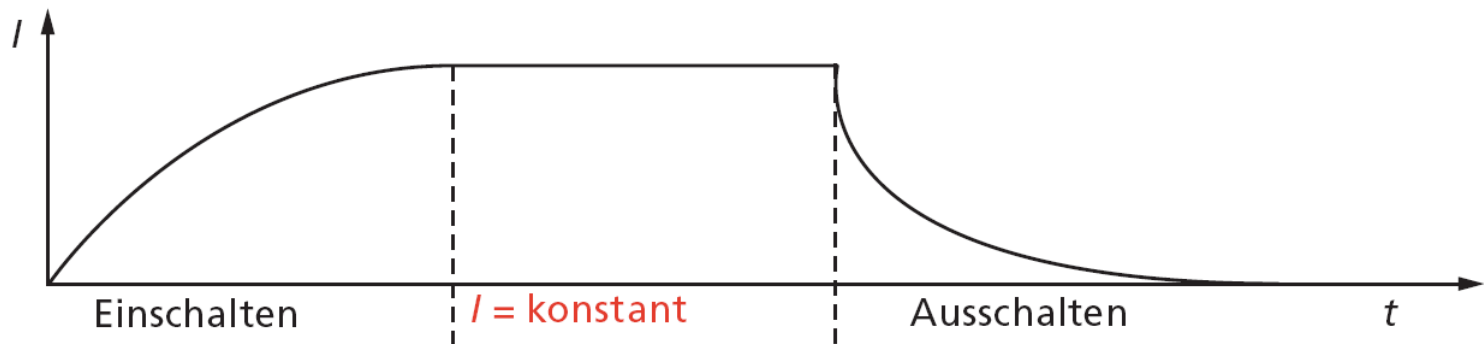
- **Je schneller** und **je stärker** sich das **Magnetfeld** ändert, desto größer ist die **induzierte Spannung**
- **Lenzsche Regel**: Der Induktionsstrom ist stets **so gerichtet**, dass er **seiner Ursache entgegenwirkt**



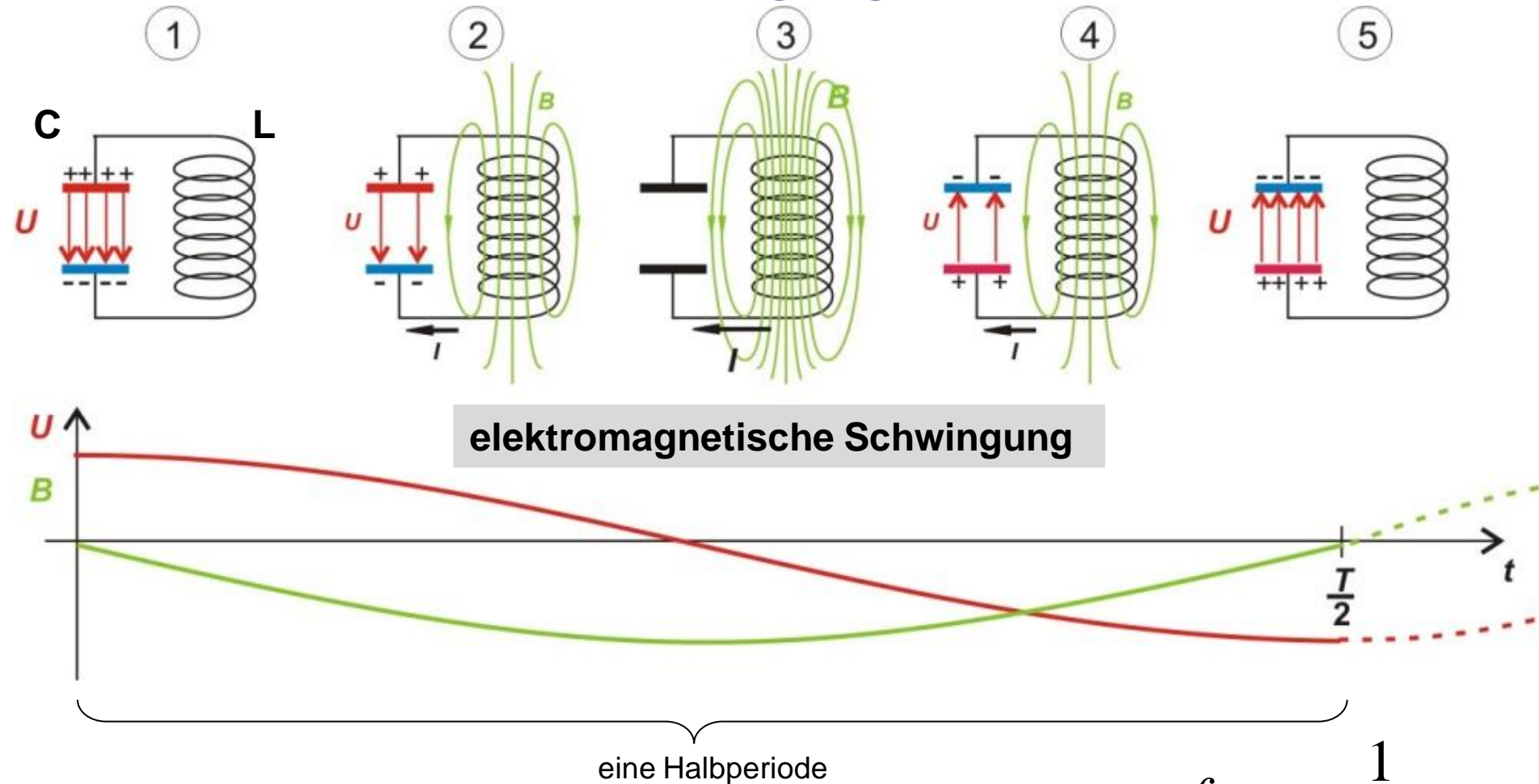
# Selbstinduktion



- **Magnetische Induktion in der selben Spule**, die das Magnetfeld erzeugt (Feldspule = Induktionsspule)
- Typisch beim Ein- und Ausschalten
- **Selbstinduktion einer Spule** hängt von den Eigenschaften der Spule (Windungszahl, ...) - **Induktivität ( $L$ )**



# Schwingkreis (LC-Kreis) – elektromagnetische Schwingungen



elektromagnetische Schwingung

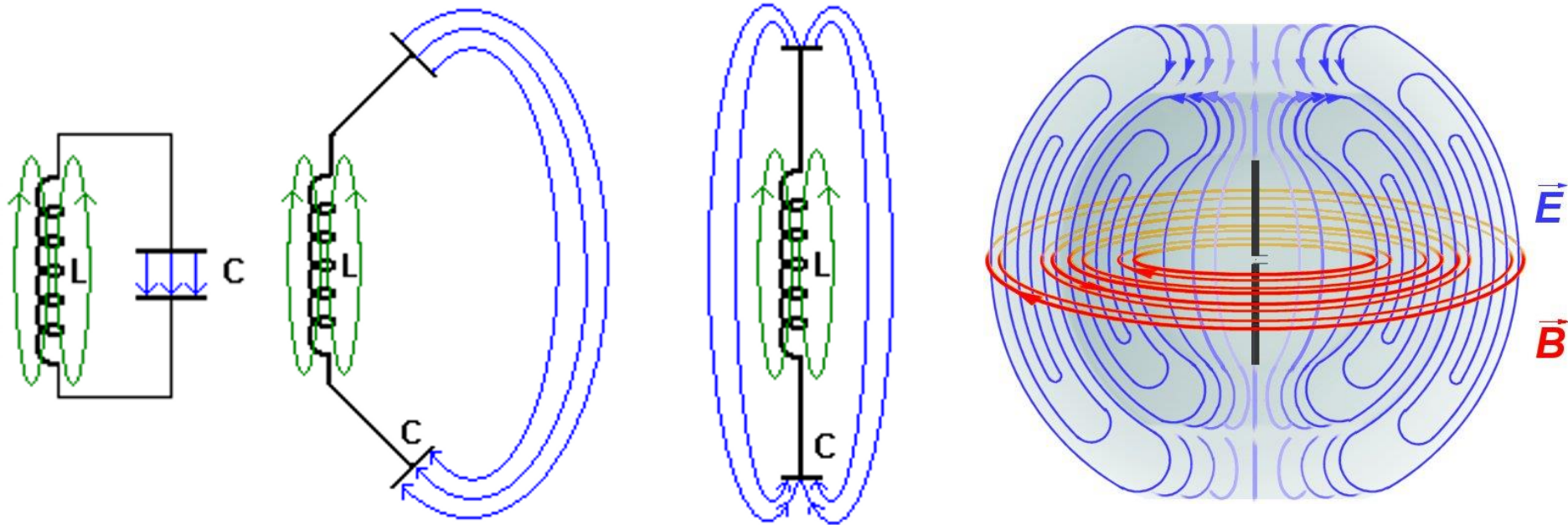
**Eigenfrequenz:** 
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- Im Idealfall (Energieverluste ausgeschlossen) wird die Schwingung ungedämpft und sinusförmig
- In der Wirklichkeit muss man Energie zuführen die konstante Amplitude aufrechtzuerhalten



# Erzeugung elektromagnetischer Wellen

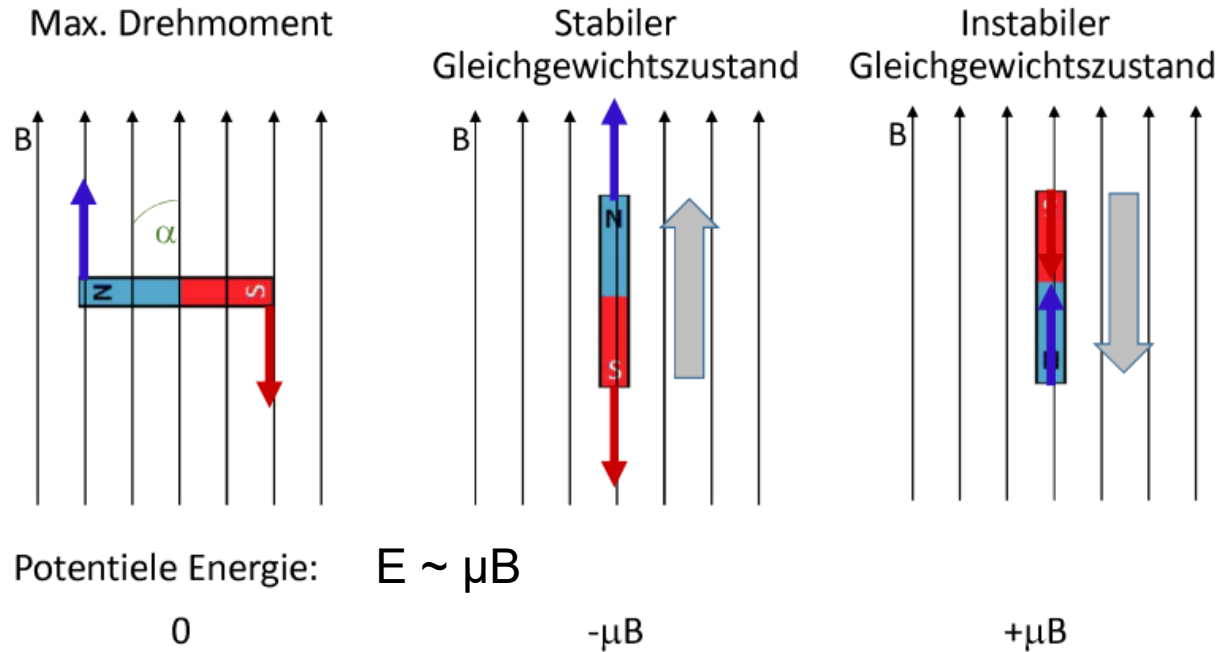
Eine Möglichkeit zur Erzeugung elektromagnetischer Wellen: **Hertzsche Dipol**  
der Hertzsche Dipol kann als offener Schwingkreis interpretiert werden



- Die Entstehung eines **offenen Schwingkreises** kann man sich schematisch als Deformation eines **geschlossenen Schwingkreises** vorstellen
- Dabei werden die Kondensatorplatten auseinandergezogen. Die Fläche der Kondensatorplatten sowie die Windungszahl der Spule werden reduziert
- So erhält man einen geraden Draht. Das **elektrische Feld** ragt nun weit in den Raum hinaus. Auch das **magnetische Feld** der Spule breitet sich in dem umgebenden Raum aus.
- Wir erhalten eine **hochfrequente elektromagnetische Schwingung** innerhalb des oben gezeichneten Metallstabs ---- **Antenne**

# Verhalten von Magneten und Ladungsträger im Magnetfeld

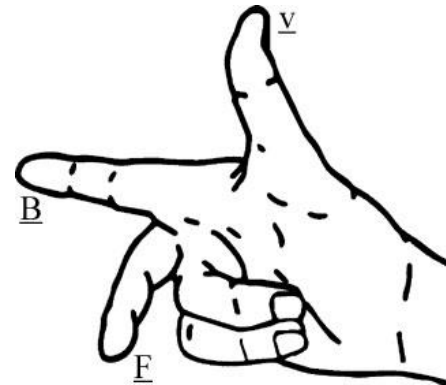
Drehmoment:  $B \cdot \mu \cdot \sin \alpha$



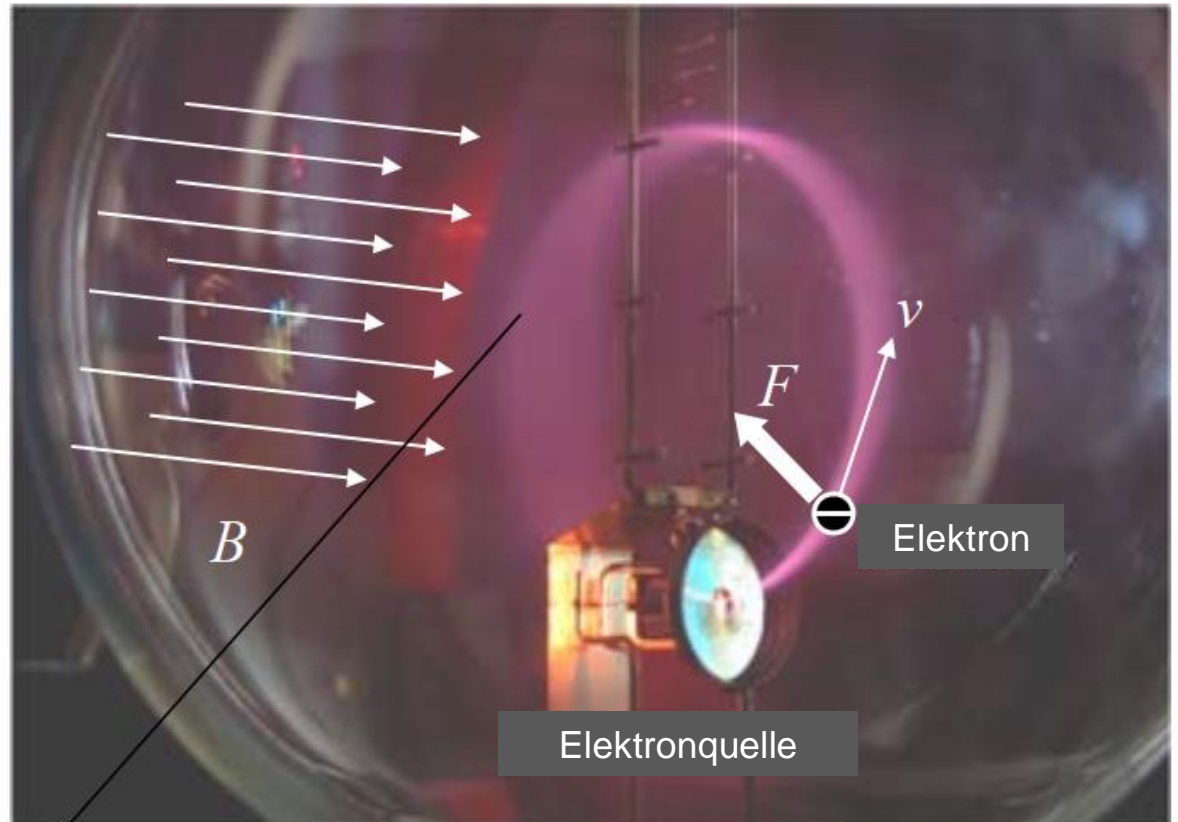
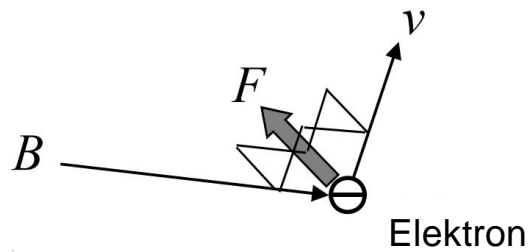
Ein Magnetfeld übt Kraft auch auf bewegte Ladungen aus

**Lorenzkraft:**

$$F_{max} = q \cdot v \cdot B$$

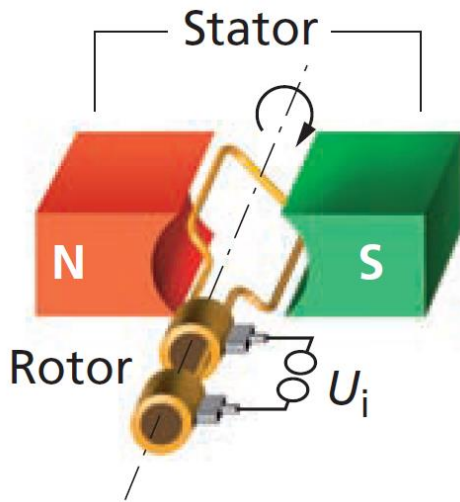


# Lorentzkraft



Das Elektron bewegt sich im Vakuum im Kreis.  
(in der Abbildung zeigt das Ionisationslicht einer kleinen Gasladung den Weg der Elektronen an)

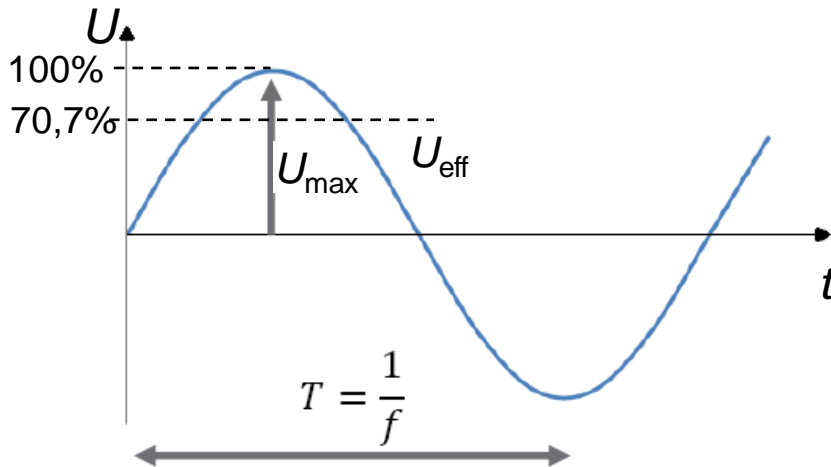
# Wechselstrom



## Elektrischer Generator

- Die Leiterschleife wird gedreht → **Induktionsspannung** ( $U_i$ ) erscheint beim Ausgang der Leiterschleife

$$U = U_{\max} \cdot \sin \omega t$$



- $U_{\max}$  ist der Maximalwert (= Amplitude) und wird auch Scheitelwert genannt
- $\omega$  ist die Kreisfrequenz:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$$

- Die Wärmewirkung von der Wechselspannung  $U$  ist gleich der Wärmewirkung der Gleichspannung  $U_{\text{eff}}$ .

## Wechselstromkreise

In einem Wechselstromkreis vertritt ein Kondensator auch einen Widerstand - **kapazitiver Widerstand** ( $X_C$ ):

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Den **Gesamtwiderstand** des Wechselstromkreises nennt man: **Impedanz**

**Viel Erfolg zur Grundklausur!**

