

Frin bis 6.1. 2015

M<sub>6</sub> 5.1. 2015 Reime Vorlesung

D<sub>0</sub> 8.1. 2015 V̄bung HG

M<sub>6</sub> 12.1. 2015 1. Vorlesung 2015

H<sub>6</sub> 11.12 Download

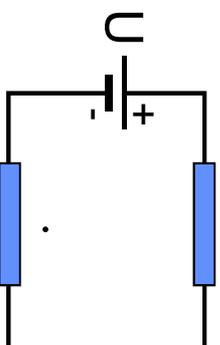
18.12 Abgabe

# 5 Elektrizitätslehre

## Grundbegriffe:

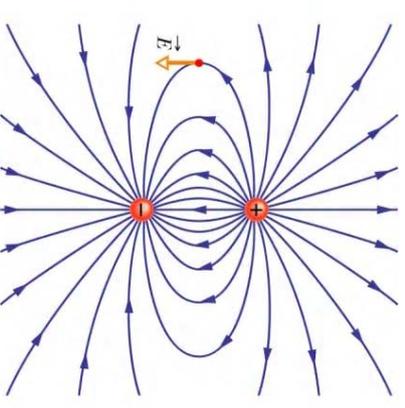
Ladung, Coulomb-Kraft, Spannung, Strom, Widerstand, Arbeit, Energie, Potential, Leistung

## Elektrische Netzwerke



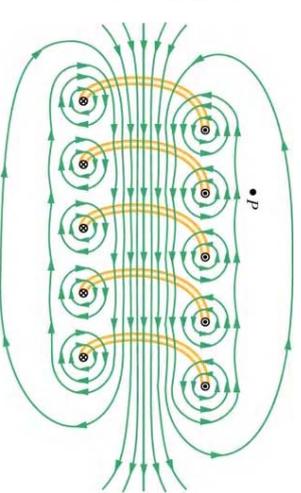
## Elektrisches Feld

Feldstärke, Dipol, Potential, Kondensator, Materie im Feld / Polarisation



## Magnetfeld

Felder von Strömen, Lorentz-Kraft, magn. Dipol, Spule, Induktion

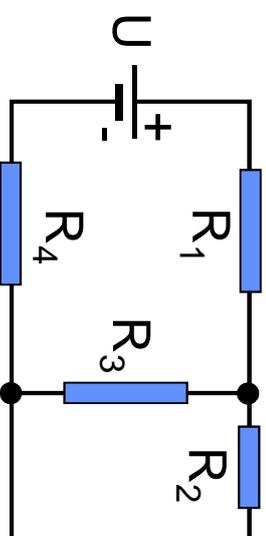


## Wechselfelder

Wechselstromwiderstand, elektromagnetische Wellen

## 5.2 Elektrische Netzwerke

### Kirchhoffsche Regeln



*Welcher Strom fließt  
in den einzelnen Zweigen ?*

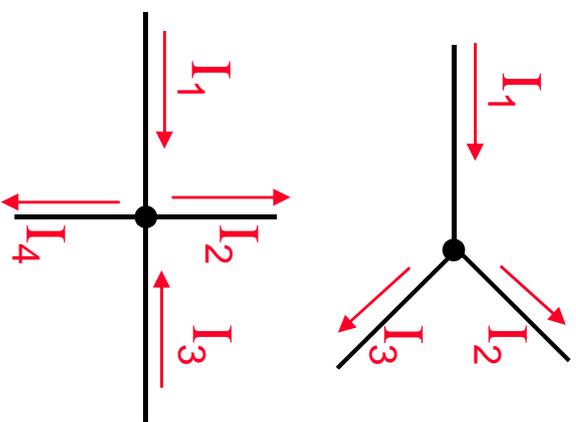
Aus der Ladungserhaltung bzw. der Kontinuitätsgleichung folgt:

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$\sum_j I_j = 0$$

zum Knoten: +  
vom Knoten: -

**Knotenregel:**  
Die Summe aller Ströme, die zu einem Knoten hin fließen, ist gleich der Summe der Ströme, die von diesem Knoten weg fließen.



$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4$$

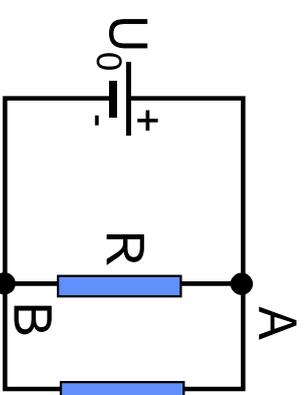
Aus der Energieerhaltung:

$$U_{AB} = -U_{BA}$$

$$U_{AB} + U_{BA} = 0$$

$$\sum_{\text{Masche}} U_j = 0$$

**Maschenregel:**  
Beim Durchlaufen einer Masche (d.h. einer geschlossene Schleife) ist die Summe aller Spannungen gleich Null.

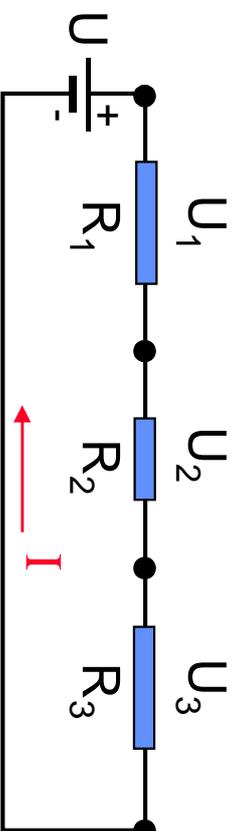


$U_{AB} = U_0 \Rightarrow U_{AB} - U_0 = 0 \Rightarrow$  Batterie von „-“ nach +“ zählt mit  $-U_0$  in der Masche

## 5.2 Elektrische Netzwerke

### Reihenschaltung von Widerständen (oder Serienschaltung)

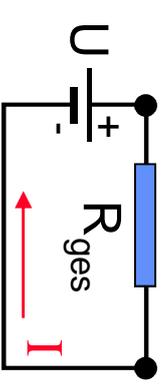
In den Schaltungen haben die Leitungen  $R = 0$  (Falls der Widerstand der Leitungen berücksichtigt werden muss, dann wird er als  $R_{\text{Leitung}}$  eingezeichnet)



$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

Knoten

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad \text{Masche}$$



Reihenschaltung

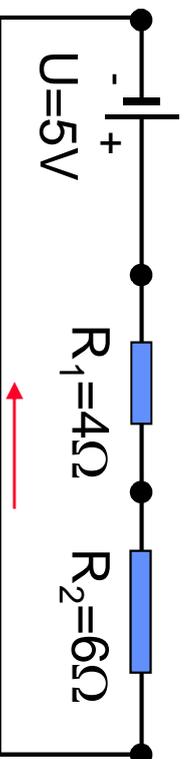
$$R_{\text{ges}} = \sum_j R_j$$

$$= R_1 I + R_2 I + R_3 I \\ = (R_1 + R_2 + R_3) I$$

$$U = R_{\text{ges}} \cdot I$$

$$\Rightarrow R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 + R_3$$

Ersatzschaltbild



$$U / R_{\text{ges}} = I = 0.5 \text{ A}$$



### Bsp. Spezifischer Widerstand

Cu-Draht:

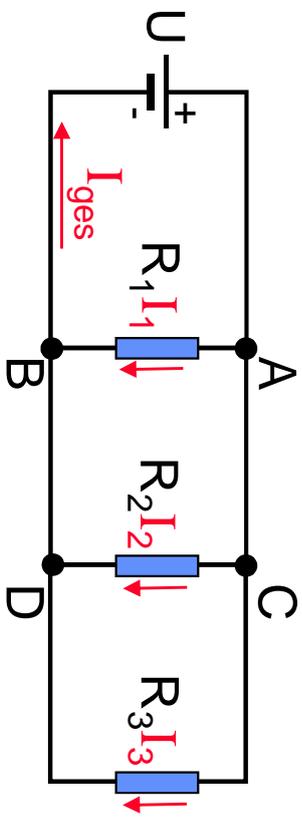
$$R = \rho \frac{L}{A}$$

doppelte Länge  $\rightarrow$  doppelter Widerstand

$$R = R_1 + R_1 = 2R_1$$

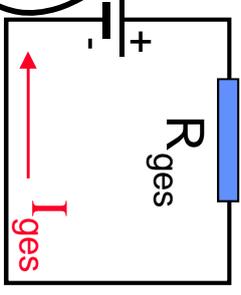
## 5.2 Elektrische Netzwerke

### Parallelschaltung von Widerständen



$$I_{\text{ges}} = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

$$= \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = U \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$



Ersatzschaltbild

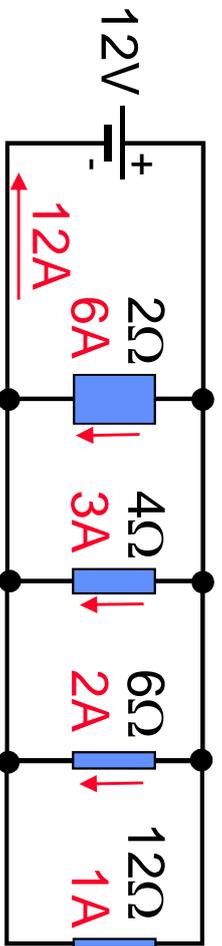
Parallelschaltung

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \sum_j \frac{1}{R_j}$$

$$U = U_{AB} = U_{CD}$$

$$U = R_{\text{ges}} \cdot I_{\text{ges}}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$



$R_{\text{ges}} = 1\Omega$ , kleiner als der kleinste Einzelwiderstand

Analog: Fluss von Blut durch Gefäße

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{12V}{2\Omega} = 6A$$

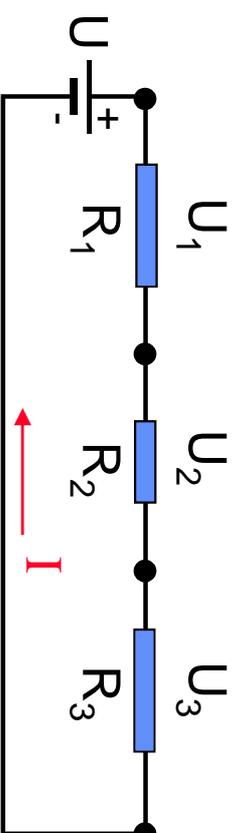
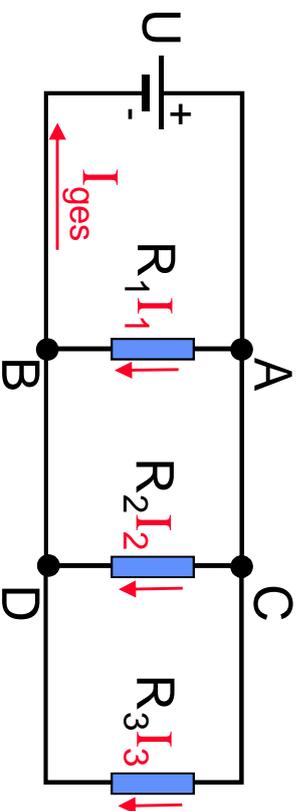
$$I_{\text{ges}} = \sum_{j=1}^4 I_j = 12A = \frac{U}{R_{\text{ges}}}$$

## 5.2 Elektrische Netzwerke

### Zusammenfassung

#### Ohmsches Gesetz

$$I = \frac{U}{R}$$



#### „Parallelschaltung“

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$U = U_{AB} = U_{CD}$$

$$I_1 R_1 = I_2 R_2$$

$$\frac{1}{R_{ges}} = \sum_j \frac{1}{R_j}$$

#### „Reihenschaltung“

$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

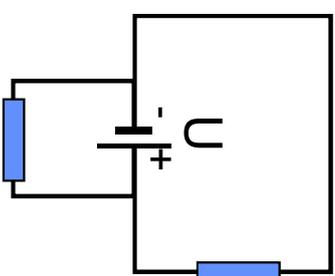
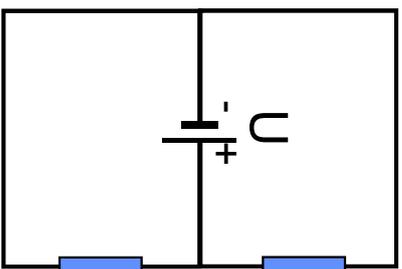
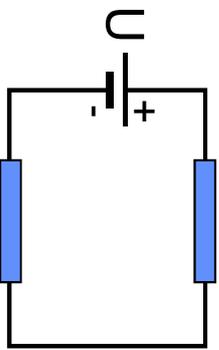
$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

$$U_1 / R_1 = U_2 / R_2$$

$$R_{ges} = \sum_j R_j$$

## 5.2 Elektrische Netzwerke

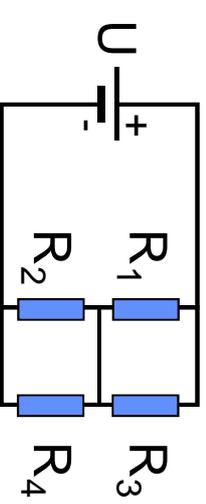
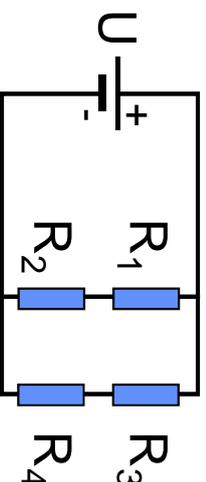
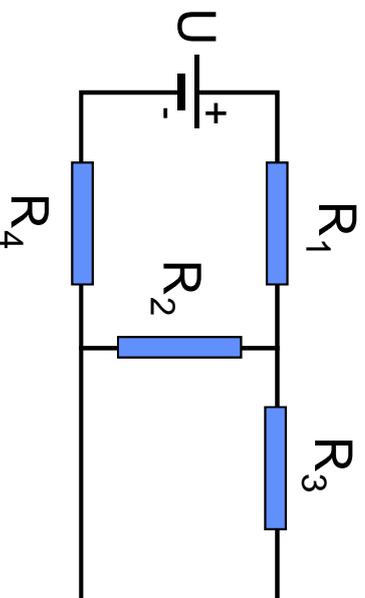
Beispiele: Reihe oder parallel ?



Zwei Widerstände sind in Reihe geschaltet, wenn durch sie derselbe Strom fließt.

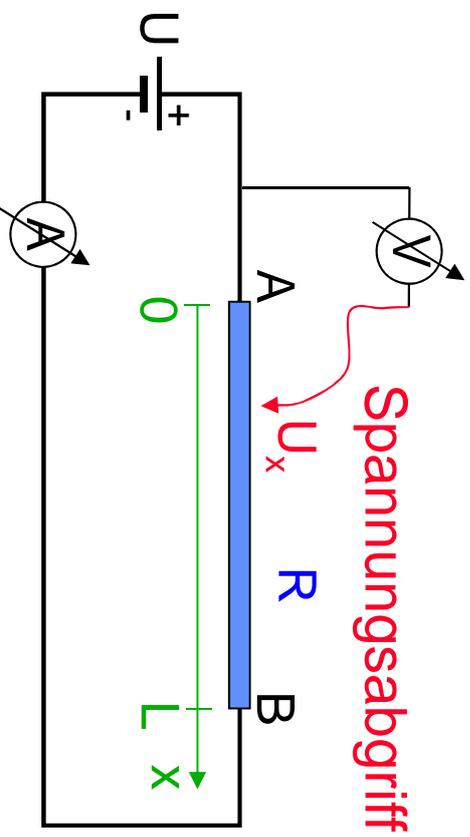
Zwei Widerstände sind parallel geschaltet, wenn über ihnen dieselbe Spannung abfällt.

Noch mehr Beispiele:



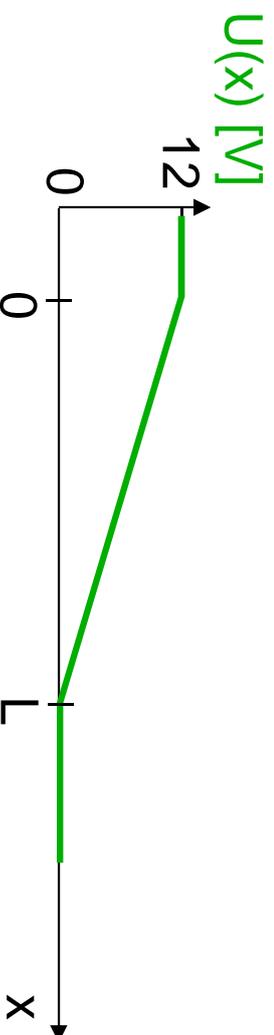
## 5.2 Elektrische Netzwerke

### Spannungsteiler



R: hochohmige Schicht (Kohle, Manganin)

Leitung aus Cu, d.h.  $R_{\text{Leit}}$  vernachlässigbar klein



Bsp.:

$$U = 12 \text{ V}, R = 12 \Omega \rightarrow I = 1 \text{ A}$$

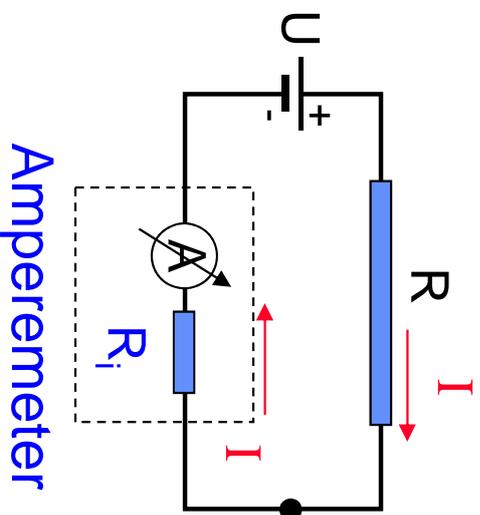
$$U_{AB} = 12 \text{ V} \quad U(x) = U_{AB} x/L$$

(für eine homogene Schicht)

Mit dem Spannungsteiler lässt sich jede Spannung  $U(x)$  zwischen 0 V und  $U$  einstellen.

## 5.2 Elektrische Netzwerke

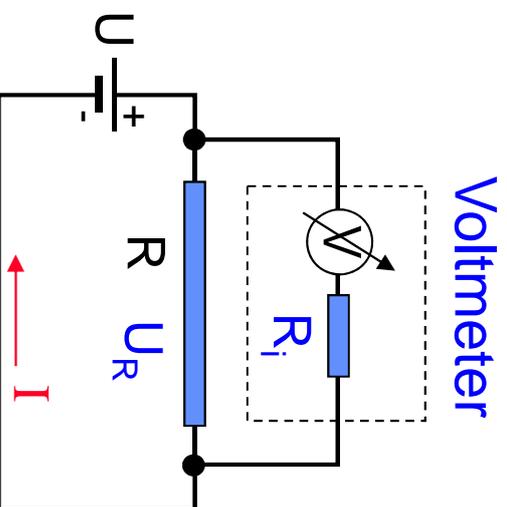
### Strom-Messung



Jedes reale Messinstrument hat einen Innenwiderstand  $R_i$ .

- Amperemeter in **Serie** schalten (Knotenregel).
- Innenwiderstand soll **klein** sein (typisch:  $50 \Omega$ ) (am Amperemeter soll wenig Spannung abfallen, bzw. es soll den Strom nicht reduzieren)

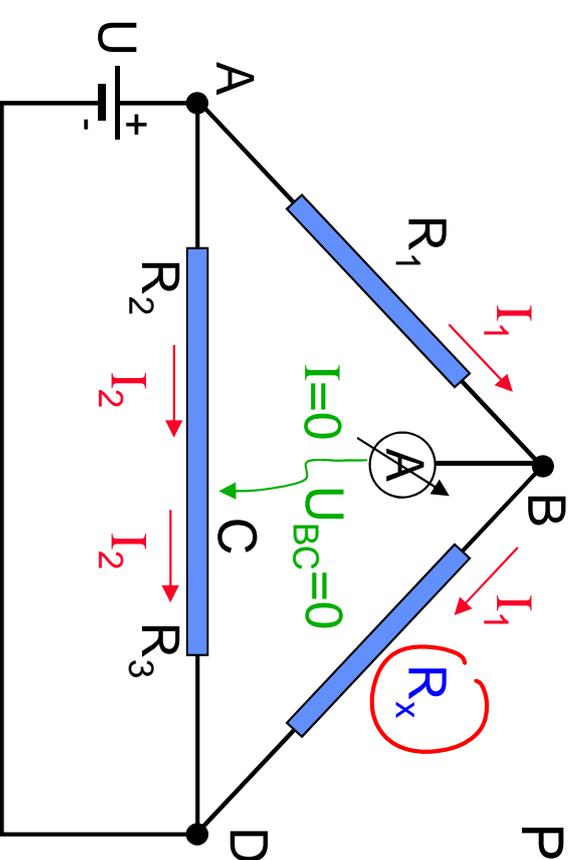
### Spannungs-Messung



- Voltmeter **parallel** schalten (Maschenregel).
- Innenwiderstand soll **groß** sein (typisch:  $> 1 M\Omega$ ) (durch das Voltmeter soll nur wenig Strom fließen, bzw. es soll den Gesamtwiderstand und damit die Spannung nicht reduzieren)

## 5.2 Elektrische Netzwerke

### Wheatstone-Brücke



Präzisionsmessung eines unbekanntes Widerstandes

Schleifer (Punkt C) auf Spannungsteiler „ $R_2+R_3$ “  
 verschieben, bis Potential in B und C gleich,  
 d.h.  $U_{BC} = 0$ , bzw.  $I_{\text{Brücke}} = 0$ . Dann gilt:

$$U_{AB} = U_{AC} \Rightarrow R_1 I_1 = R_2 I_2$$

$$U_{BD} = U_{CD} \Rightarrow R_x I_1 = R_3 I_2$$

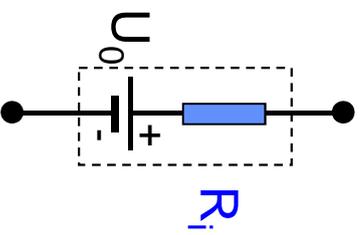
$$\Rightarrow R_x = R_3 \frac{I_2}{I_1}$$

$$R_x = R_3 \frac{R_1}{R_2}$$

**Vorteil:** *stromlose* Messung  
 (es fließt kein Strom durch  
 das Messinstrument), d.h.  
 der Innenwiderstand des  
 Messinstruments stört nicht.

## 5.2 Elektrische Netzwerke

### Innenwiderstand Batterie



Auch eine Spannungsquelle (z.B. Batterie)

zeigt **effektiv** einen **Innenwiderstand**  $R_i$ .

- stromlos: **Leerlaufspannung**  $U_0$

- unter Last (Strom  $> 0$ ): **Klemmenspannung**  $U < U_0$ :  $U = U_0 - R_i \cdot I$   
 → die Spannung sinkt mit steigendem Strom.

→ der maximal entnehmbare Strom beträgt:  
 (für  $I = I_{\max}$  ist  $U = 0$ )  
 $I_{\max} = U_0 / R_i$

Ursache:

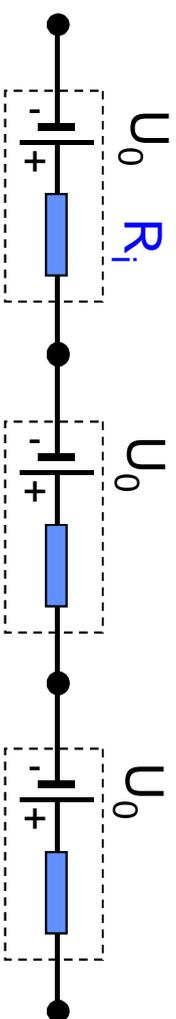
*Die Spannungsquelle benötigt zum Trennen der Ladungen (zum Bereitstellen) eine gewisse Zeit. Fließt die Ladung an den Klemmen schneller ab (großer Strom), dann sinkt die Spannung.*

## 5.2 Elektrische Netzwerke

**Bsp.: Walkman**

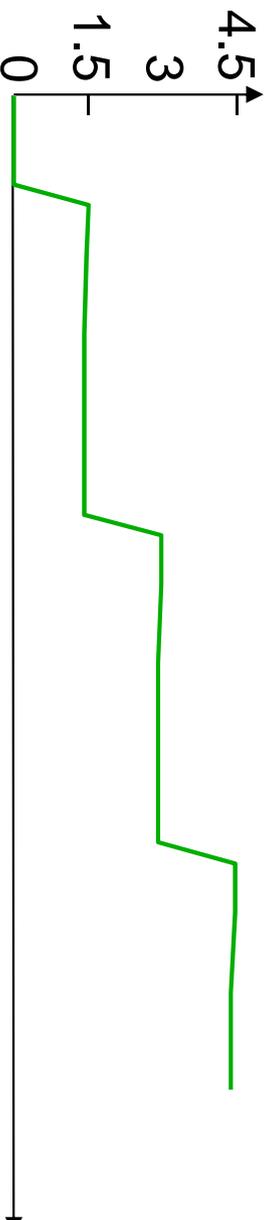
Die benötigte Spannung von 4.5 V wird durch

Hintereinanderschalten von drei  $U_0 = 1.5$  V Batterien erreicht.



+ an -

$U [V]$



$$U \approx U_0 + U_0 + U_0$$

*Innenwiderstände  
vernachlässigt.*



*Analog:  
Hintereinander liegende  
Wasserräder / Schleusen.*

## 5.2 Elektrische Netzwerke

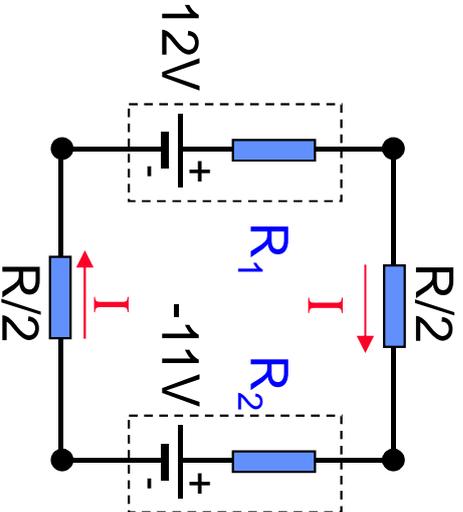
### Batterie-Starthilfe

Bsp.: Starthilfe für eine „schwache“ Autobatterie (11V) mit einer neuen 12V-Batterie.

Innenwiderstand der Batterien:  $R_1 = R_2 = 0.02 \Omega$ , Widerstand des Starthilfekabels:  $R = 0.01 \Omega$

- (a) Wie müssen die Pole der Batterien verbunden werden ? **+ an +**
- (b) Wie groß ist der Ladestrom ?
- (c) Wie groß wird der Strom, wenn die Batterien falsch verbunden sind ?

*richtig*



Maschenregel:

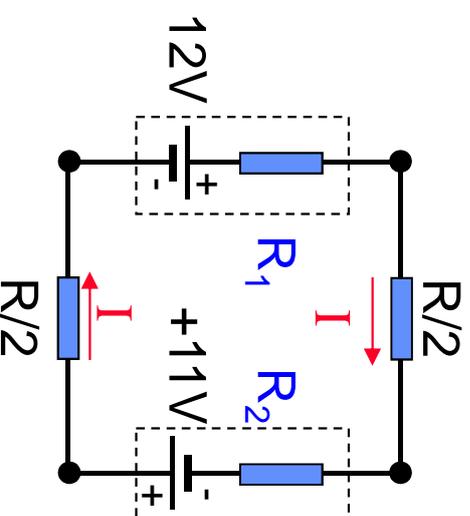
$$12V = 11V + R_{\text{ges}} I$$

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 + R$$

$$\Rightarrow I = \frac{1V}{0.05\Omega} = 20A$$

*Die gute Batterie lädt die schlechte auf.*

*falsch*



$$12V + 11V = R_{\text{ges}} I$$

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 + R$$

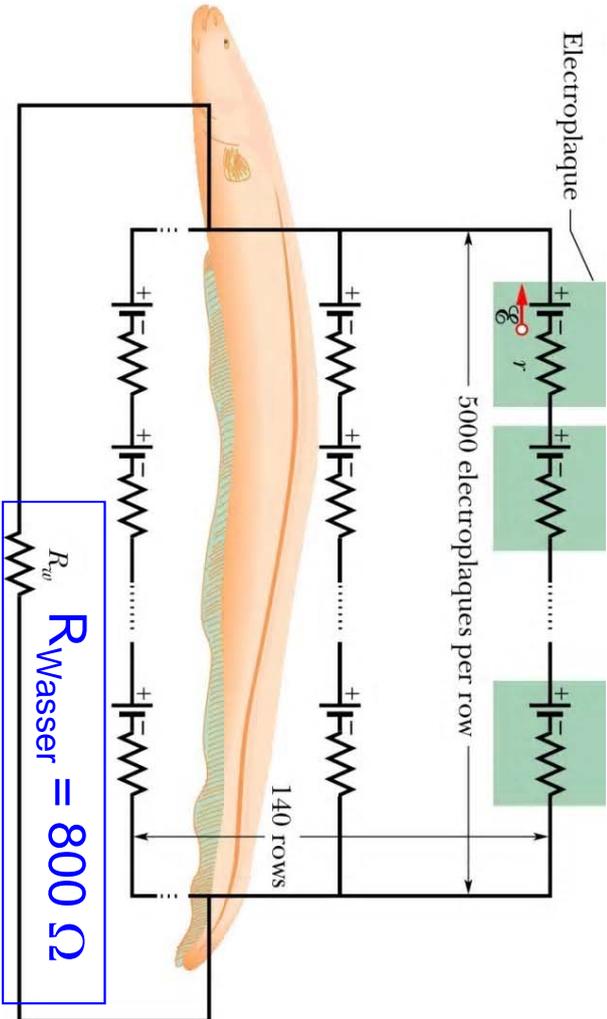
$$\Rightarrow I = \frac{23V}{0.05\Omega} = 460A$$

*Kurzschluss: Die Batterien entladen sich gegenseitig und liefern dabei einen sehr hohen Strom.*

# 5.2 Elektrische Netzwerke

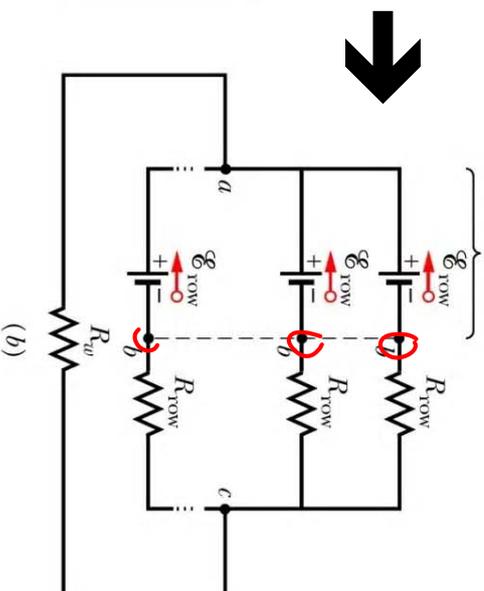
## Zitteraal (*Electrophorus*)

- a) 5000 Zellen / Reihe
- jede Zelle:  $U_Z = 0.15 \text{ V}$ ,  $R_Z = 0.25 \Omega$

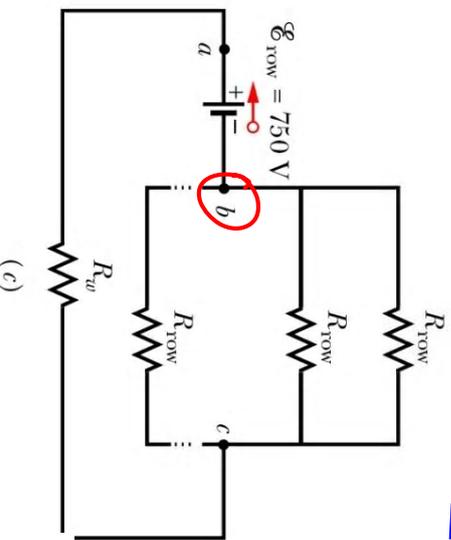


Welchen Strom erzeugt der Aal und wieso tötet er sich damit nicht selbst ?

- b) 140 Reihen
- jede Reihe:  $U_R = 5000 * 0.15 \text{ V} = 750 \text{ V}$
- $R_R = 5000 * 0.25 \Omega = 1250 \Omega$



- c) Alle Punkte **b** haben das gleiche Potential
- Parallelschaltung von 140  $R_R$  ( $1250 \Omega$ ) →  $1/R_{ges} = 140/R_R$
- $R_{ges} \sim 8.93 \Omega$



$$I = U_R / (R_{ges} + R_{Wasser}) \sim 0.93 \text{ A}$$

Aber: durch jede Reihe fließt nur  $I / 140 \sim 0.007 \text{ A}$

## 5.2 Elektrische Netzwerke: Zusammenfassung

**Knotenregel:** Die Summe aller Ströme, die zu einem Knoten hin fließen, ist gleich der Summe der Ströme, die von diesem Knoten weg fließen.

$$\sum_j I_j = 0$$

**Maschenregel:** Beim Durchlaufen einer Masche (d.h. einer geschlossene Schleife) ist die Summe aller Spannungen gleich Null.

$$\sum_{\text{Masche}} U_j = 0$$

Zwei Widerstände sind in **Reihe** geschaltet, wenn durch sie derselbe Strom fließt.

Zwei Widerstände sind **parallel** geschaltet, wenn über ihnen dieselbe Spannung abfällt.

(Zusammenfassung der Regeln: s. S. (4))

**Parallelschaltung:**

**Reihenschaltung:**

**Strom misst man in Reihe, Spannung parallel.**

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \sum_j \frac{1}{R_j}$$

$$R_{\text{ges}} = \sum_j R_j$$

Der Innenwiderstand eines Amperemeters sollte

klein sein, der eines Voltmeters groß.

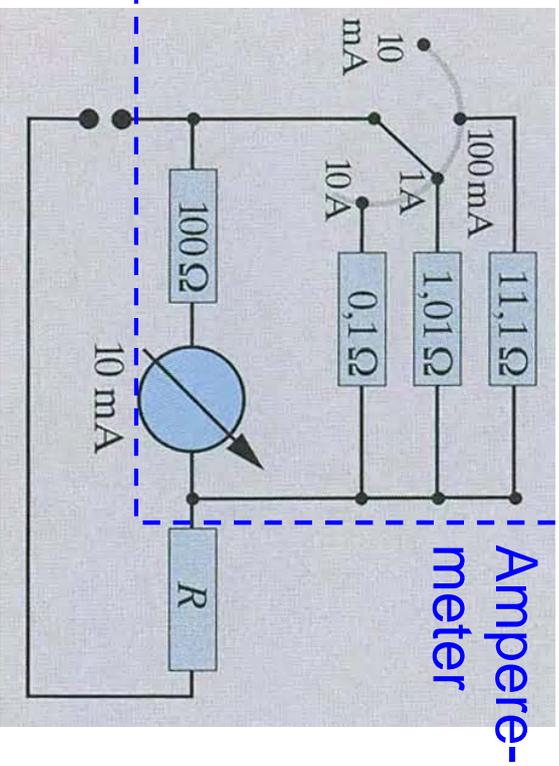
Alle elektrischen Messgeräte und Spannungsquellen haben einen **Innenwiderstand**.

Bei einer stromlosen Messung (z.B. Wheatstone-Brücke) stört der Innenwiderstand nicht.

Aufgrund des Innenwiderstandes ist die Klemmenspannung einer Batterie unter Last kleiner als die Leerlaufspannung.

## 5.2 Elektrische Netzwerke

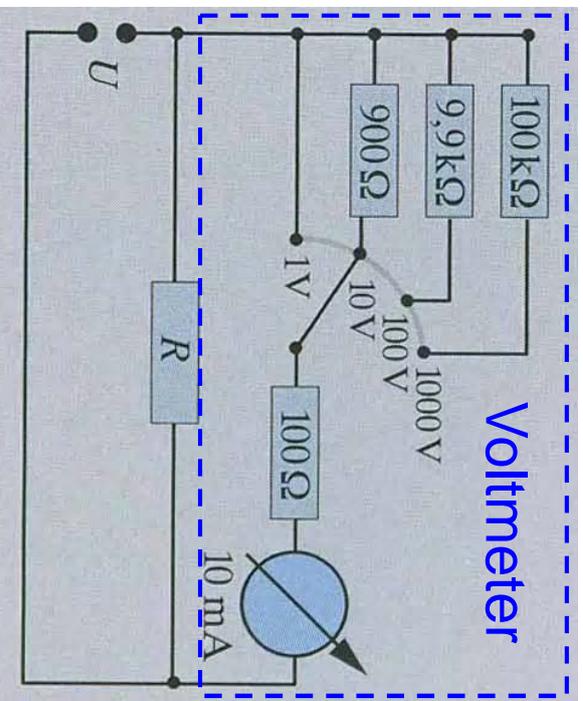
### Strom-Messung, Messbereichsumschaltung



Das eigentliche Messinstrument verträgt z. B. einen Strom von 0 – 10 mA.

Größere Ströme können durch **Parallelschaltung** von **kleineren** Widerständen (z. B. 1/9) gemessen werden (der Großteil des Stroms wird vorbei geleitet).

### Spannungs-Messung, Messbereichsumschaltung



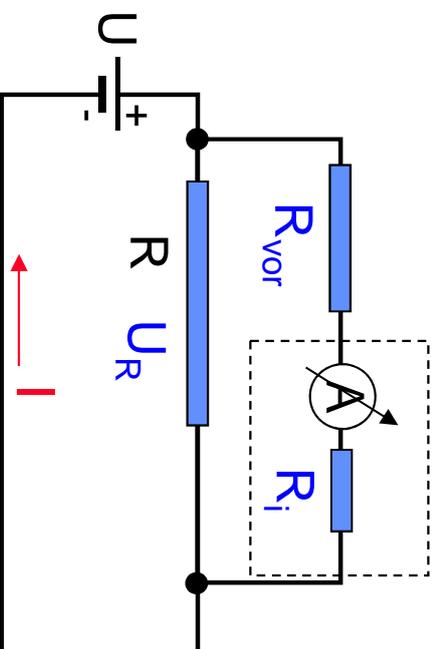
Das eigentliche Messinstrument verträgt z. B. einen Strom von 0 – 10 mA.

Größere Spannungen können durch **Reihenschaltung** von **größeren** Widerständen (z. B. 9-fach) gemessen werden.

## 5.2 Elektrische Netzwerke

### Spannungs-Messung mit dem Amperemeter

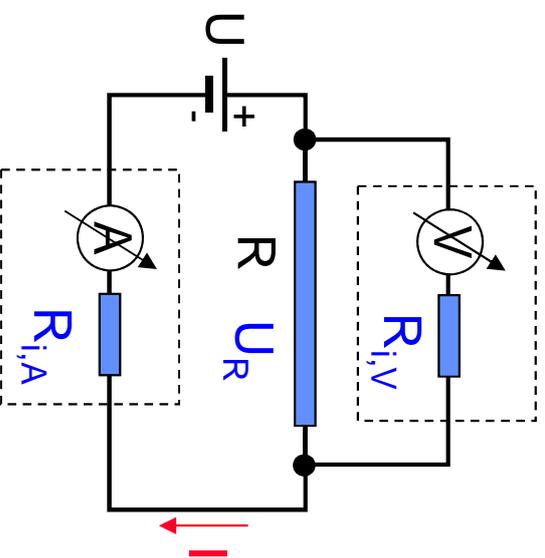
#### Amperemeter



Einbau eines bekannten Vorwiderstandes  $R_{\text{vor}} \gg R, R_i$   
 Der Vorwiderstand ersetzt den großen Innenwiderstand  
 eines Voltmeters.

$$U_R = (R_{\text{vor}} + R_i) \cdot I \approx R_{\text{vor}} \cdot I$$

### Widerstands-Messung

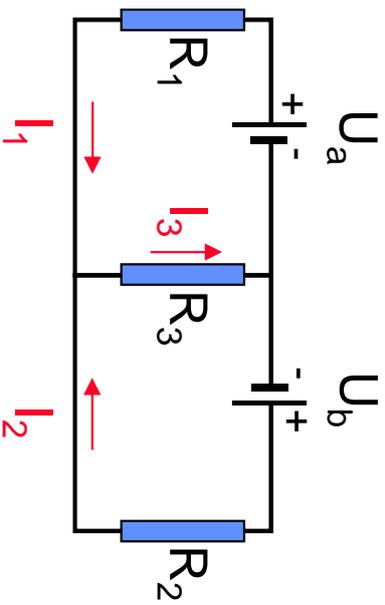


$$R = U / I$$

Aufgrund der Innenwiderstände der Messinstrumente ist  
 die stromlose Messung mit der Wheatstone-Brücke  
 genauer.

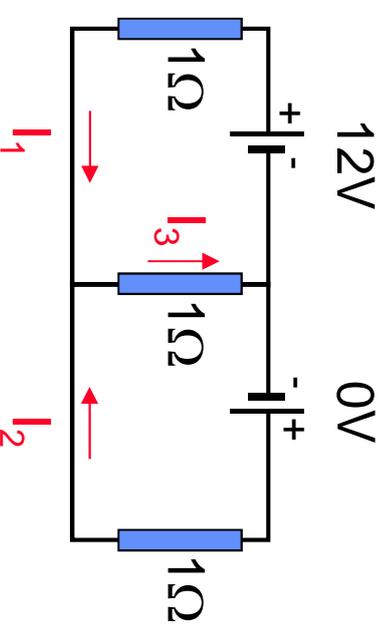
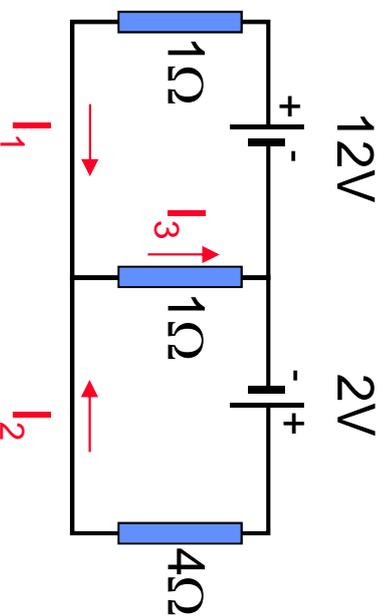
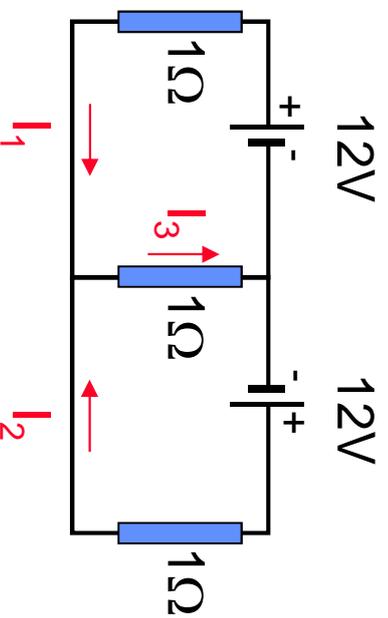
## 5.2 Elektrische Netzwerke

Noch ein Beispiel:



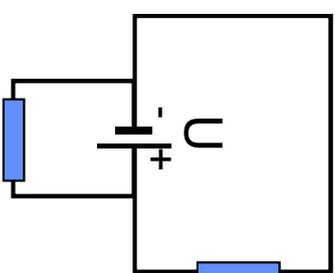
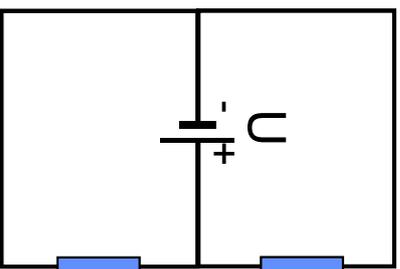
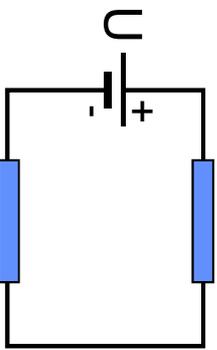
Bekannt seien  $U_a$ ,  $U_b$ , und  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ .  
Wie groß sind die Ströme  $I_1$ ,  $I_2$  und  $I_3$  ?

Zahlenbeispiele:



## 5.2 Elektrische Netzwerke

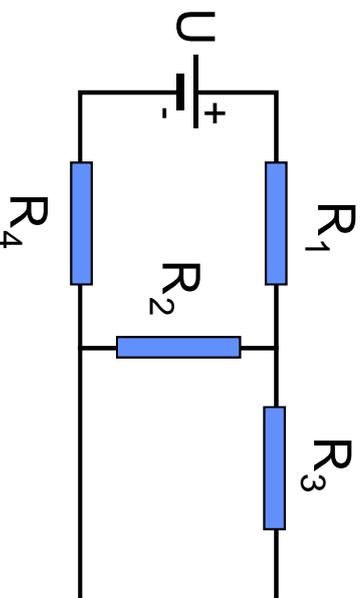
Beispiele: Reihe oder parallel ?



Zwei Widerstände sind in Reihe geschaltet, wenn durch sie derselbe Strom fließt.

Zwei Widerstände sind parallel geschaltet, wenn über ihnen dieselbe Spannung abfällt.

Beispiel:

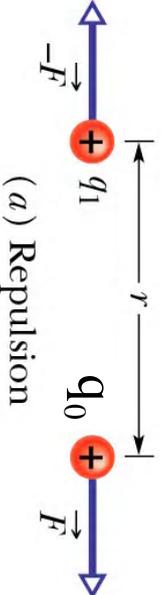


$$\begin{aligned} R_{\text{ges}} &= R_1 + R_{23} + R_4 = R_1 + \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^{-1} + R_4 \\ &= R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + R_4 \end{aligned}$$

## 5.3 Elektrisches Feld

**Coulomb-Kraft zwischen Punkt-Ladungen** (im Vakuum):

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_0}{r^2}$$



$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{F} / q_1$$

*Fernwirkung: Woher weiß  $q_1$  von der Existenz von  $q_0$  ?  
Wie wird die Kraft durch das Vakuum übertragen ?*

*Trenne Eigenschaften von  $q_0$  von denen der Probeladung  $q_1$  !*

Erfährt eine Probeladung  $q_1$  am Ort  $r$  eine Coulomb-Kraft, so herrscht dort ein **elektrisches Feld** mit der **Feldstärke  $E(r)$** .

Einheit der elektr.

Feldstärke  $E$ :

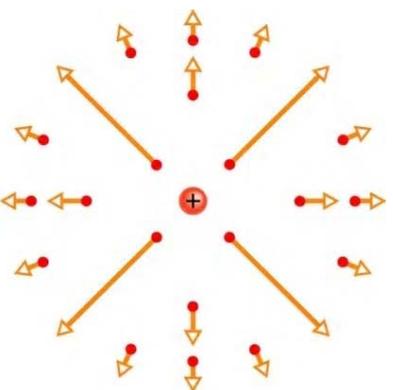
$$1 \text{ N/C}$$

$$= 1 \text{ (Nm/s)} / \text{(Cm/s)}$$

$$= 1 \text{ W / (Am)}$$

$$= 1 \text{ VA / Am}$$

$$= 1 \text{ V / m}$$



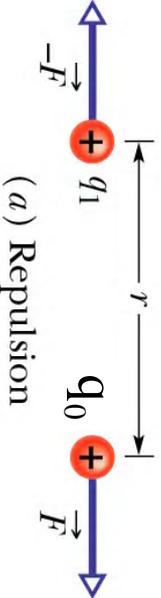
Jede Ladung erzeugt in dem sie umgebenden Raum ein **E-Feld  $E(r)$** .

**$E(r)$**  ist eine Eigenschaft des Raums (um  $q_0$ ), unabhängig von der Probeladung  $q_1$ .

## 5.3 Elektrisches Feld

**Coulomb-Kraft zwischen Punkt-Ladungen (im Vakuum):**

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_0}{r^2}$$



*Fernwirkung: Woher „weiß“  $q_1$  von der Existenz von  $q_0$  ?*

*Wie wird die Kraft durch das Vakuum übertragen ?*

*Trenne Eigenschaften von  $q_0$  von denen der Probeladung  $q_1$  !*

Erfährt eine Probeladung  $q_1$  am Ort  $r$  eine Coulomb-Kraft, so herrscht dort ein **elektrisches Feld** mit der **Feldstärke  $E(r)$** .

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{F} / q_1$$

**Analogie: Temperaturfeld  $T(r)$**

Miss die Temperatur der Luft an verschiedenen Orten  $r$ .

Aber:  $T(r)$  ist ein **skalares Feld**, keine Richtung, nur Betrag



200°C



150°C

40°C



Bsp. für **Vektorfeld: Windgeschwindigkeit  $\vec{v}_{\text{Wind}}(\vec{r})$**

## 5.3 Elektrisches Feld

---

### Elektrostatik:

Kräfte zwischen ruhenden Ladungen und

zeitlich konstante Felder ruhender Ladungen

- Feldlinien
- E-Feld einer Punktladung, eines Dipols, einer unendlichen Platte
- Potential, Äquipotentiallinien
- Kondensator
- Satz von Gauß
- Materie im Feld / Polarisation

### Elektrodynamik:

Kräfte auf bewegte Ladungen und Felder von bewegten Ladungen

→ Magnetismus

Wenn eine Ladung  $q$  sich bewegt, dann ändert sich das E-Feld nicht sofort im gesamten Raum. Die Information, dass  $q$  sich bewegt, pflanzt sich laut der speziellen Relativitätstheorie höchstens mit Lichtgeschwindigkeit von  $q$  aus fort

→ elektro-magnetische Wellen (bzw. Photonen)

*Da sich die Kraftwirkung und damit die von einer Ladung auf die andere übertragene Energie nur mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, muss die Energie zwischenzeitlich im E-Feld gespeichert werden.*

## 5.3 Elektrisches Feld: Punktladung

Richtung von  $E(\vec{r})$ :

von + nach -

$$\vec{F} = q_1 \cdot \vec{E} \quad \text{Vorzeichen von } q_1 \text{ beachten!}$$

Bsp.: E-Feld einer Punktladung  $q_0$  bei  $r_0$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{|\vec{r} - \vec{r}_0|^2} \cdot \frac{\vec{r} - \vec{r}_0}{|\vec{r} - \vec{r}_0|}$$

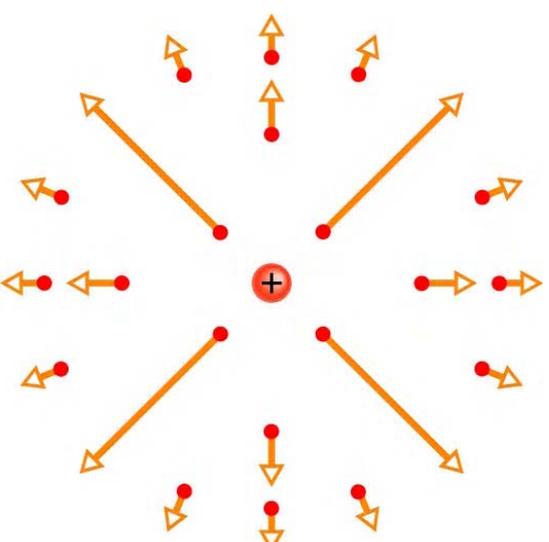
Für  $r_0=0$  (Ursprung):

*Länge* ✓

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{|\vec{r}|^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

Betrag nimmt Richtung:

mit  $1/r^2$  ab. radial



$q_1 > 0$

→  $F \parallel E$

→ Abstoßung

$q_1 < 0$

→  $F$  anti-parallel  $E$

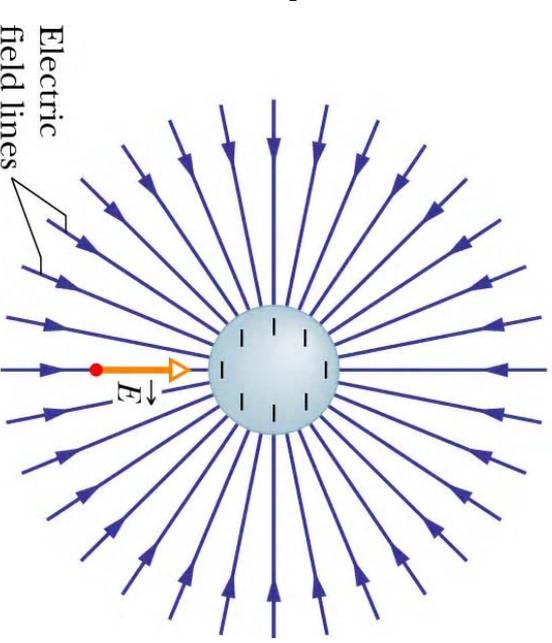
→ Anziehung

## 5.3 Elektrisches Feld: Feldlinien

### Veranschaulichung des E-Feldes über Feldlinien

Feldlinien im **elektrostatischen Feld**:

- verlaufen **von einer positiven Ladung zu einer negativen**.
- beginnen oder enden nie im freien Raum.
- schneiden sich niemals.
- sind nur eine Veranschaulichung (real ist das E-Feld).
- Die Richtung des E-Feldes in  $r$  ist gleich der Richtung der Tangente an die Feldlinie in  $r$ .



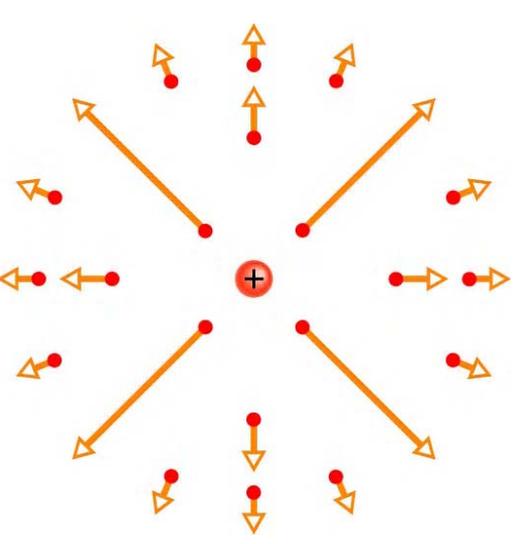
- Die **Dichte** der Feldlinien ist proportional zur Feldstärke.

(Dichte = Anzahl Linien durch **Einheitsfläche**  
senkrecht zu den Linien)

- Für ein elektrostatisches Feld gibt es  
keine in sich geschlossenen Feldlinien

(im Gegensatz zu

z.B. Magnetfeld eines stromführenden Drahtes)



## 5.3 Elektrisches Feld: Feldlinien

### Feldlinien im elektrostatischen Feld

Die **Dichte** der Feldlinien ist proportional zur Feldstärke.

(Dichte = Anzahl Linien durch **Einheitsfläche**  
**senkrecht** zu den Linien)

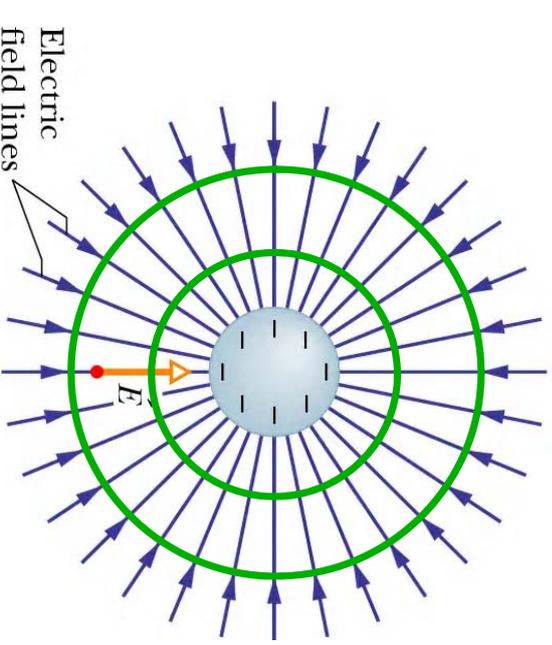
### Bsp.: Punktladung

Feldlinien stehen senkrecht auf Kugelschale.

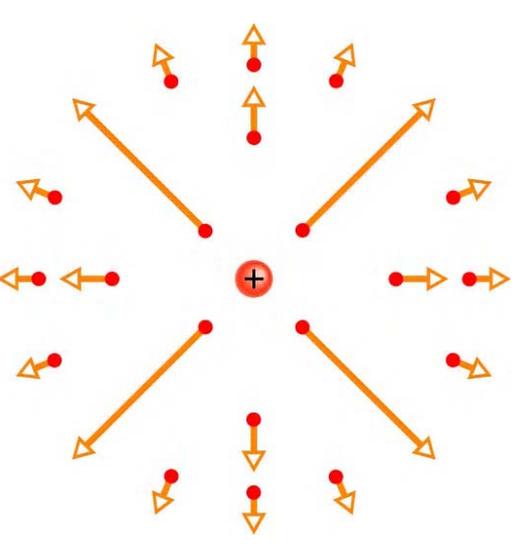
Betrachte N Feldlinien durch Kugelschale mit Radius r.

→ **Dichte** =  $N / 4\pi r^2$

→ Feldstärke nimmt mit  $1/r^2$  ab ✓

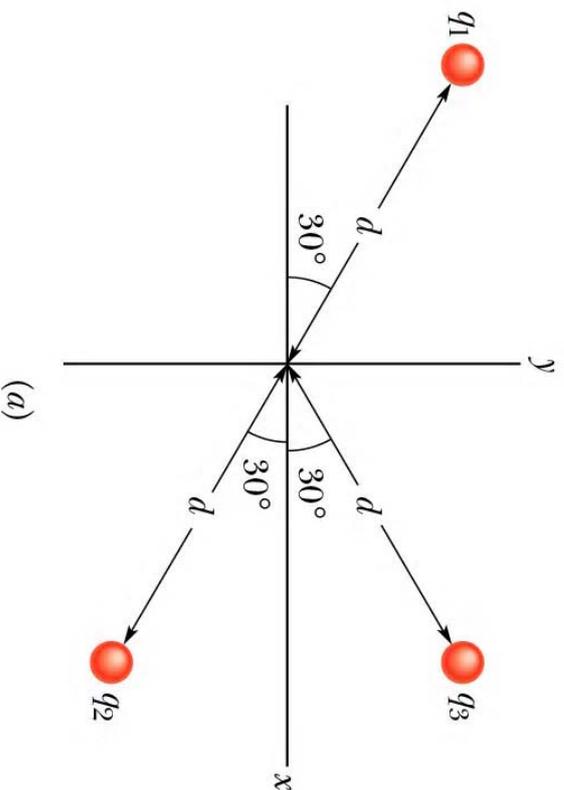


$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{|\vec{r}|^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$



## 5.3 Elektrisches Feld

**Superposition:** genau wie Kräfte addieren sich E-Felder vektoriell.



Frage:

Wie groß ist die Kraft auf eine positive Probeladung  $q$  im Ursprung ?

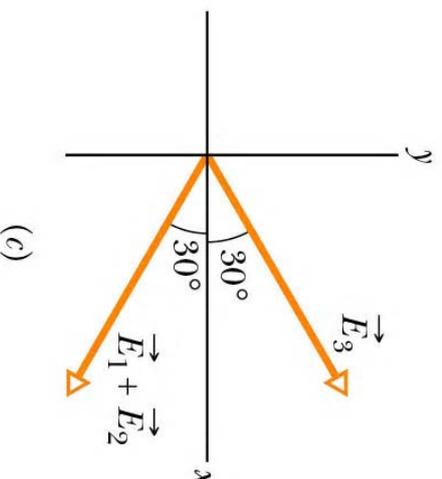
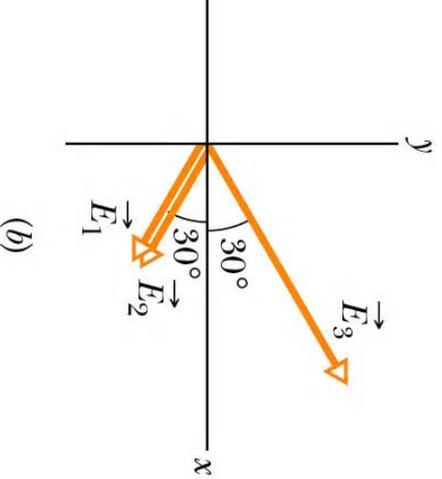
$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 \Rightarrow \vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$$

Frage:

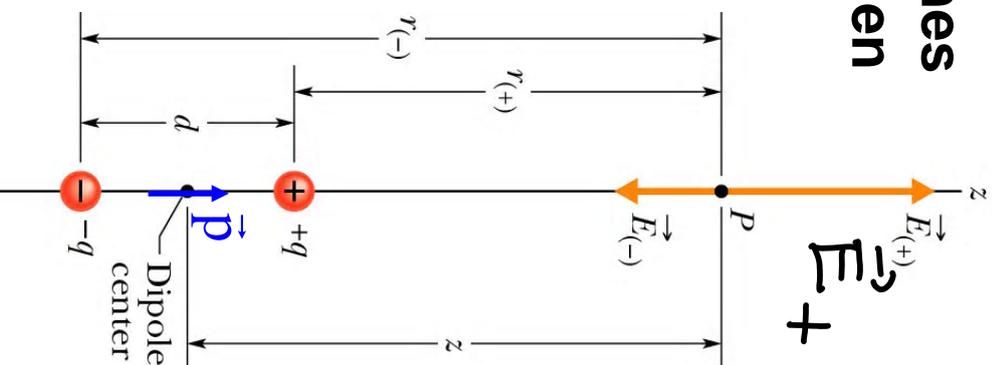
$$q_1 = 2Q$$

Wie groß sind  $q_2$  und  $q_3$  ?

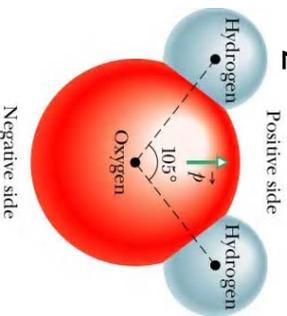


## 5.3 Elektrisches Feld: Dipol

### E-Feld eines elektrischen Dipols



### Bsp.: H<sub>2</sub>O-Molekül



**Dipol:** 2 Ladungen im Abstand  $d$  mit **gleichem Betrag  $q$**  aber entgegengesetztem Vorzeichen ( $+q, -q$ ).

→ **Gesamtladung  $q_{\text{ges}} = q + (-q) = 0$**

**E-Feld auf der Dipol-Achse** (z-Achse)

für  $z \gg d$  ( $z=0$  in der Mitte zw. den Ladungen):

$$E = E_+ - E_- = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{qd}{z^3} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{z^3}$$

$E \sim 1/r^3$  gilt für alle  $r \gg d$ , nicht nur auf der z-Achse.

Vgl. Punktladung:  $1/r^2$ .

Für  $r \gg d$  heben sich  $E_+$  &  $E_-$  **fast** auf ( $q_{\text{ges}} = 0$ ).

**Dipolmoment**

$$\vec{p} = q \cdot \vec{d} = q \cdot (\vec{r}_+ - \vec{r}_-)$$

Einheit: 1 Cm

beschreibt die wesentlichen Eigenschaften  $q$  &  $d$ .

*Richtung:* auf der Verbindungslinie

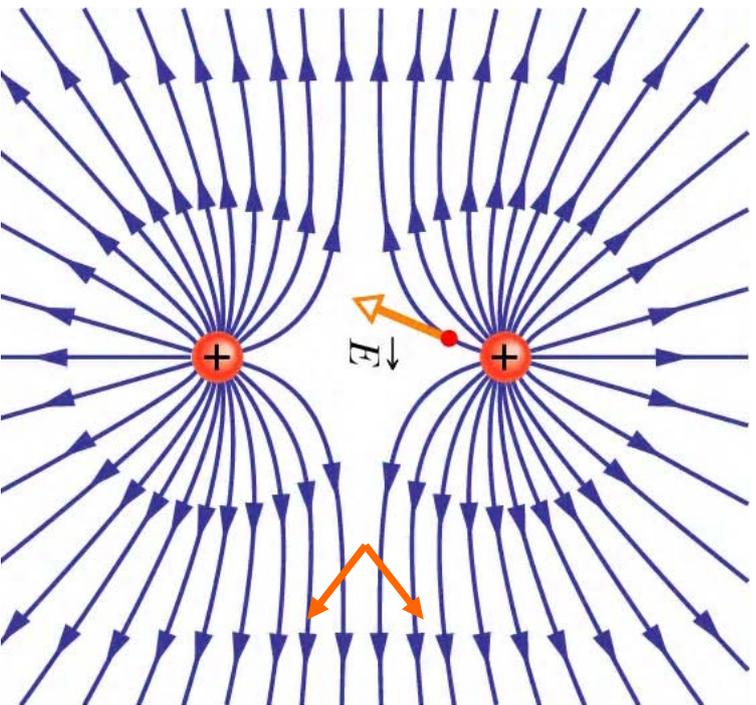
von – nach +

## 5.3 Elektrisches Feld: Dipol

Feldlinien

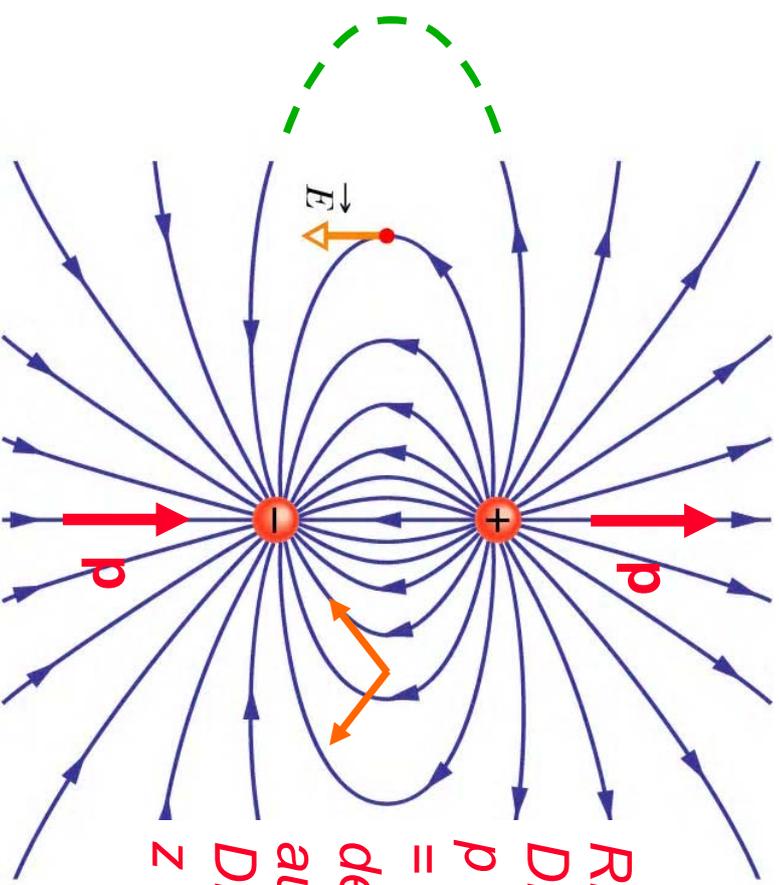
**Superposition:** E-Felder addieren sich vektoriell.

2 gleichnamige Ladungen  
(gleich groß)



In der Mitte heben sich die Felder der 2 Ladungen gegenseitig auf, außen verstärken sie sich (für  $r \gg d$  ähnlich dem Feld einer Punktladung mit  $2q$ ).

Dipolfeld: 1 positive und 1 gleich große negative Ladung

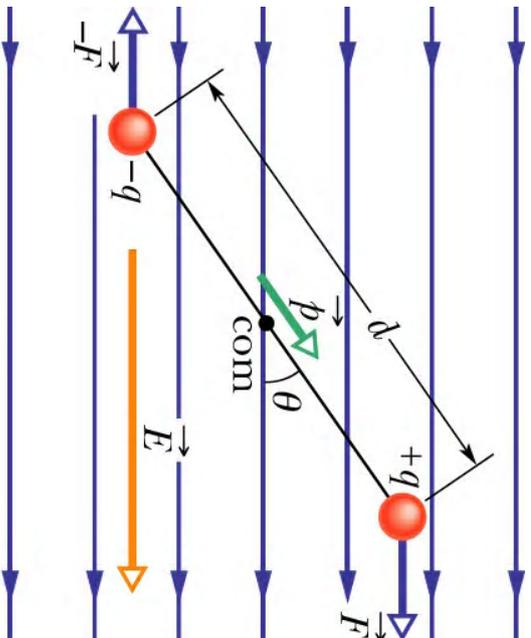


Richtung des  
Dipolmoments  
 $p$   
= Richtung  
des E-Feldes  
auf der  
Dipolachse für  
 $z > d/2$

In der Mitte verstärken sich die Felder der 2 Ladungen, außen heben sie sich (**fast**) auf ( $\sim 1/r^3$ ,  $q_{\text{ges}}=0$ ).

## 5.3 Elektrisches Feld: Dipol

Dipol  $\mathbf{p} = q\mathbf{d}$  im homogenen Feld:



(a)

Auf die beiden Ladungen wirkt insgesamt die **Kraft**

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = q \cdot \vec{E} - q \cdot \vec{E} = q_{\text{ges}} \cdot \vec{E} = 0$$

und das **Drehmoment**

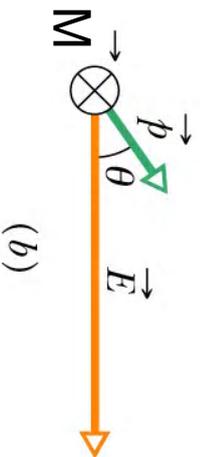
$$\vec{M} = \vec{r}_1 \times \vec{F}_1 + \vec{r}_2 \times \vec{F}_2 = \frac{d}{2} F \sin \theta + \frac{d}{2} F \sin \theta = \frac{p}{q} \cdot qE \sin \theta$$

$$\Rightarrow \vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}$$

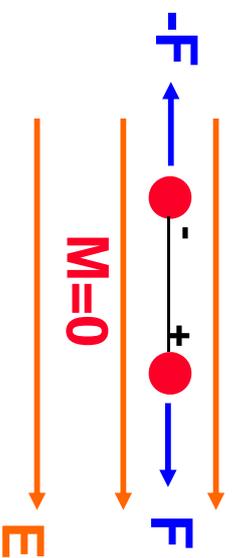
Der Dipol wird durch das Drehmoment

**parallel zum Feld ausgerichtet.**

Für  $\mathbf{p}$  parallel  $\mathbf{E}$  ist das Drehmoment  $M = 0$ .



(b)



Im **inhomogenen Feld** ist im Allg.  $F \neq 0$ ,  
der Dipol wird in **Richtung**  
**größerer Feldstärke** gezogen  
→ um gelöste Ionen bilden sich  
**Hydrathüllen**

