



# Übersicht zur E-Lehre

- ➔ **Elektrostatik**
- ➔ **Elektrische Ströme**
- ➔ **Magnetismus**
- ➔ **Nichtstationäre elektrische Ströme**



- 1.1 Elektrische Ladung**
- 1.2 Coulombgesetz**
- 1.3 Elektrisches Feld**
- 1.4 Gauß'sches Gesetz**
- 1.5 Arbeit im elektrischen Feld**
- 1.6 Ladung im E-Feld**
- 1.7 Leiter im E-Feld, Influenz**
- 1.8 Dielektrika**
- 1.9 Kapazität und Kondensator**



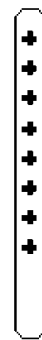
## *Anwendungen, Bezüge:*

- **Kopiergeräte**
- **Rasterkraftmikroskop**
- **Explosionsgefahr bei Treibstofftanks**
- **Elektrische Entstaubungsfilter**

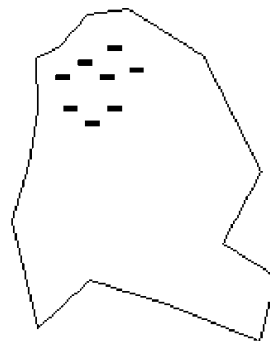


- **Experimentelles aus der Schulphysik:**
  - **Nachweis der Reibungselektrizität: Elektroskop**
  - **van-de-Graaff-Generator**
  - **Übertragung („Löffeln“) von Ladungen**
  - **Auftreten zweier verschiedener Zustände (pos., neg.)**

## Reibversuche



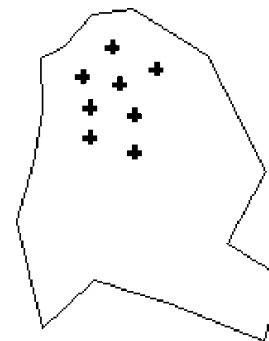
Glasstab



Seide



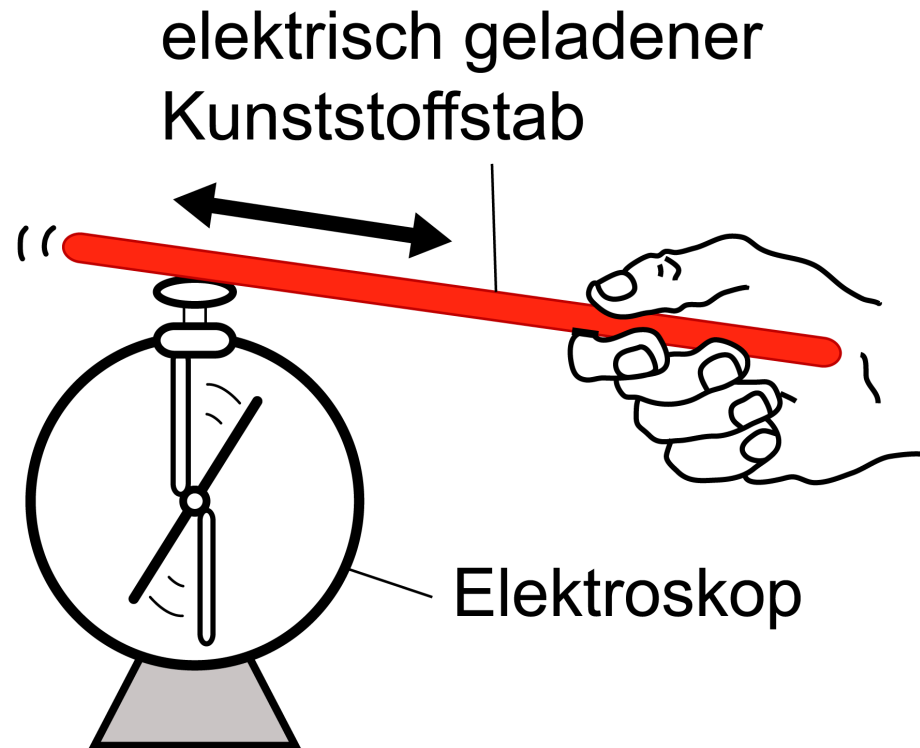
Kunstharz



Wolle

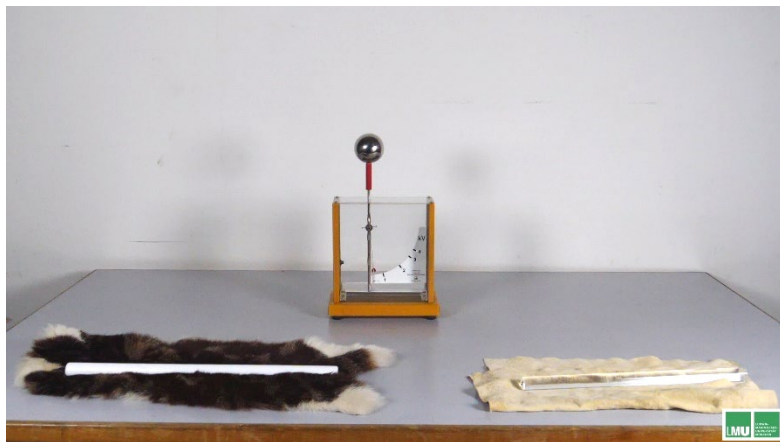
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/1-1-Elskop.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-1-Elskop.m4v)

- **Reibung**
- Influenz
- chem. Prozesse
- Fotoeffekt



Reibungselektrizität/Kontaktelektrizität  
(bereits im griechischen Altertum bekannt)

## Reibversuche – Links zu Experimenten



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/1-1-Reiben-2.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-1-Reiben-2.m4v)

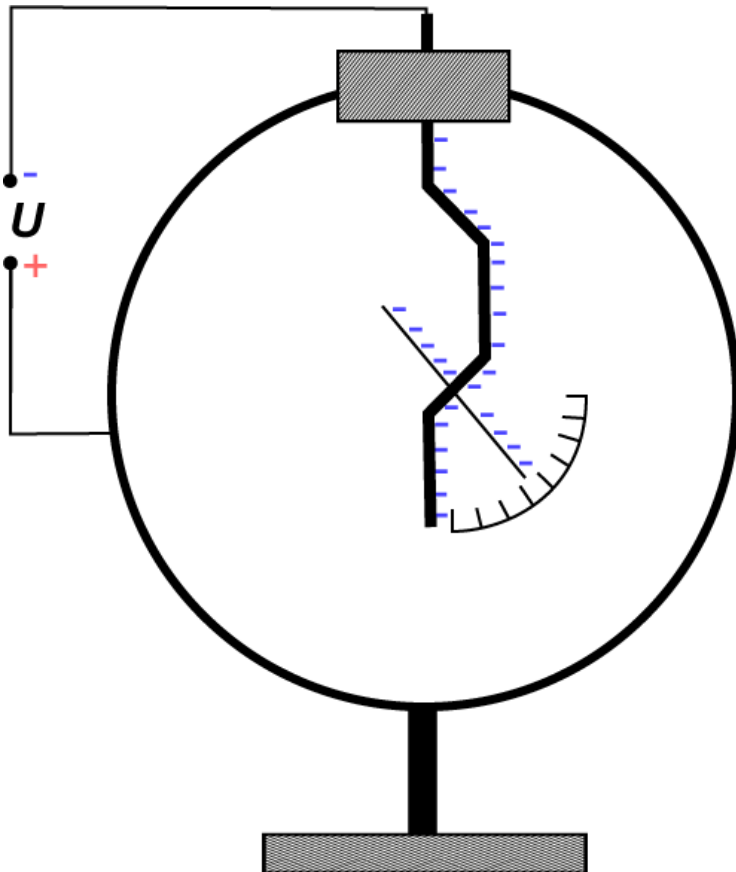
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/1-1-Reiben-EI-Messing-4.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-1-Reiben-EI-Messing-4.m4v)

[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/1-1-Reiben-Bueschel.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-1-Reiben-Bueschel.m4v)

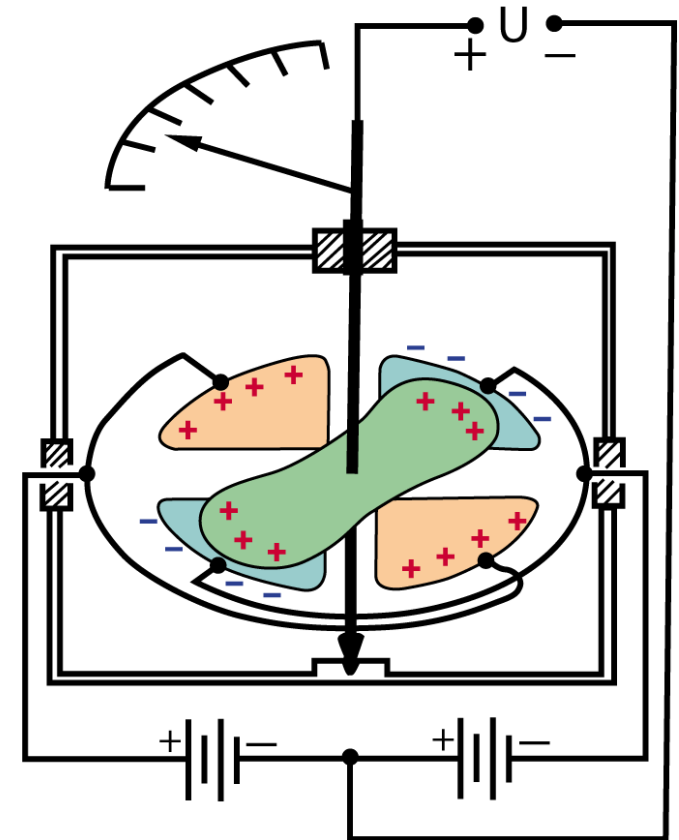


## Einfache Geräte zur Ladungsmessung

### Brownsches Elektrofeldmeter



### Quadrantenfeldmeter

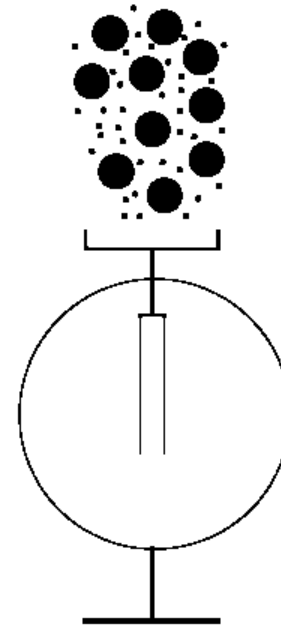




## ■ Versuch „Gewitter“

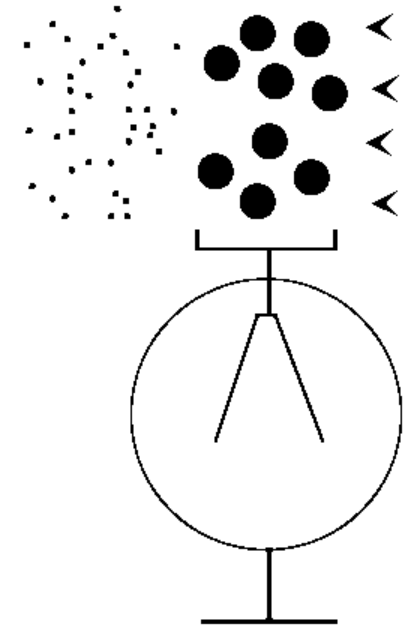


Stahlkugeln + Schwefel



Kein Ausschlag

Schwefel weggeblasen



Ausschlag

[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/1-1-Gewitt1k.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-1-Gewitt1k.m4v)

## Eigenschaften elektr. Ladung (bekannt aus der Schulphysik)

a) Es gibt 2 Arten:

- + : Glas (Seide)
- : Harzstab (Wolle)

b) Kraft zwischen Ladungen: gleiche Art - Abstoßung  
ungleich - Anziehung

c) Ladung übertragbar / transportierbar

d) An Masse gekoppelt (Elektron, Myon, Proton)

e) Ladungsmenge ist portioniert (gequantelt)  
Elementarladung  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  - siehe Versuch von Millikan -

f) Gesamtladung bleibt erhalten  
(Summe aus neg. und pos. Ladungen ist konstant) Bsp: Paarerzeugung

g) Dimension: Ladungsmenge  $Q$  wird in „Coulomb“ gemessen  $[Q] = \text{As} = \text{C}$



## Ladungen kleinster Teilchen

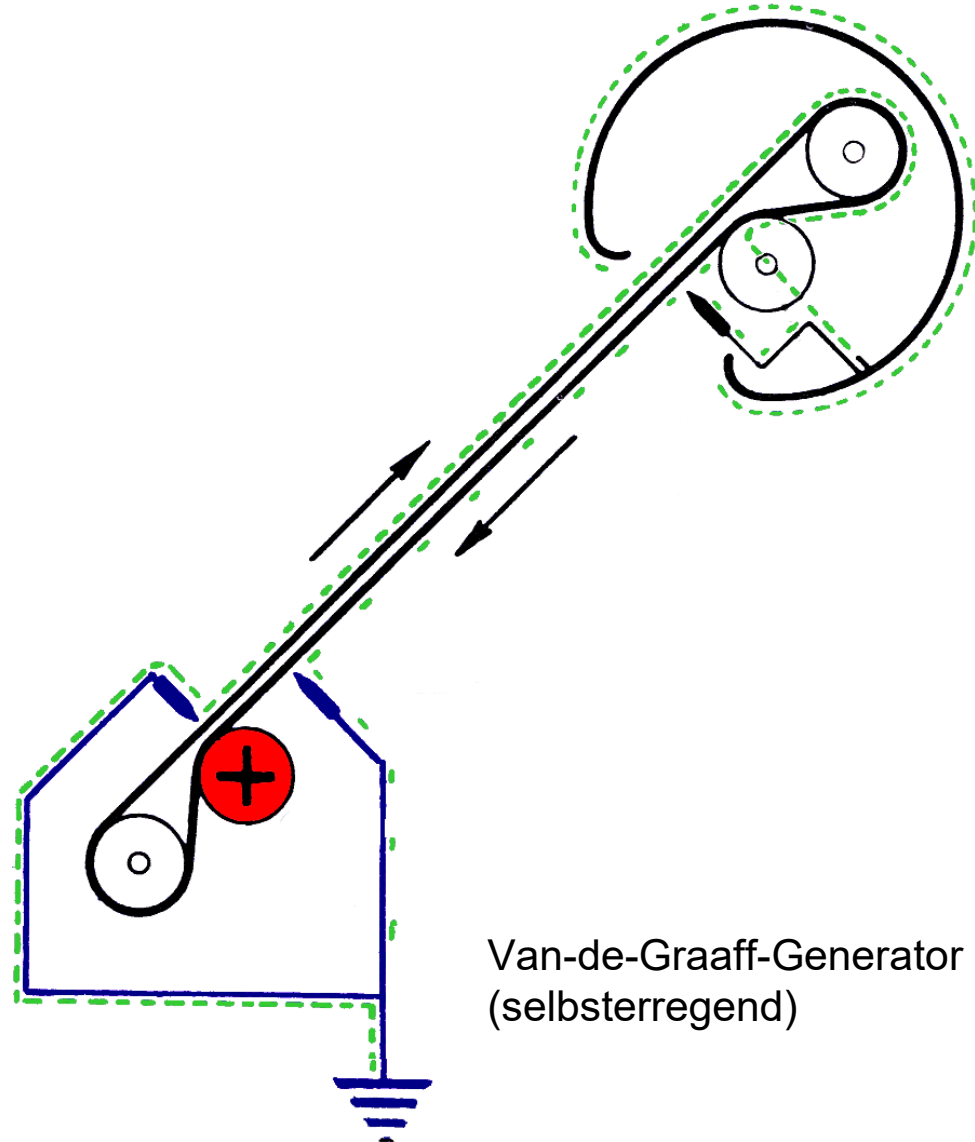
**$e = 1.6021892 \cdot 10^{-19} \text{C}$**

Elementarteilchen	Ladung	Ruhemasse	Energie
Elektron	-e	$m_0$	0,511 MeV
Positron	+e	$m_0$	
Proton	+e	$1836 m_0$	938,280 MeV
Neutron	0	$1839 m_0$	939,573 MeV
$\pi^+$ -Meson	+e	$273 m_0$	139,6 MeV
$\pi^-$ -Meson	-e	$273 m_0$	
$\pi^0$ -Meson	0	$264 m_0$	135,0 MeV
Neutrino	0	$0,00... (?) > 10^{-36}$	
Photon	0	0	
Myon	+e; -e		105,7 MeV

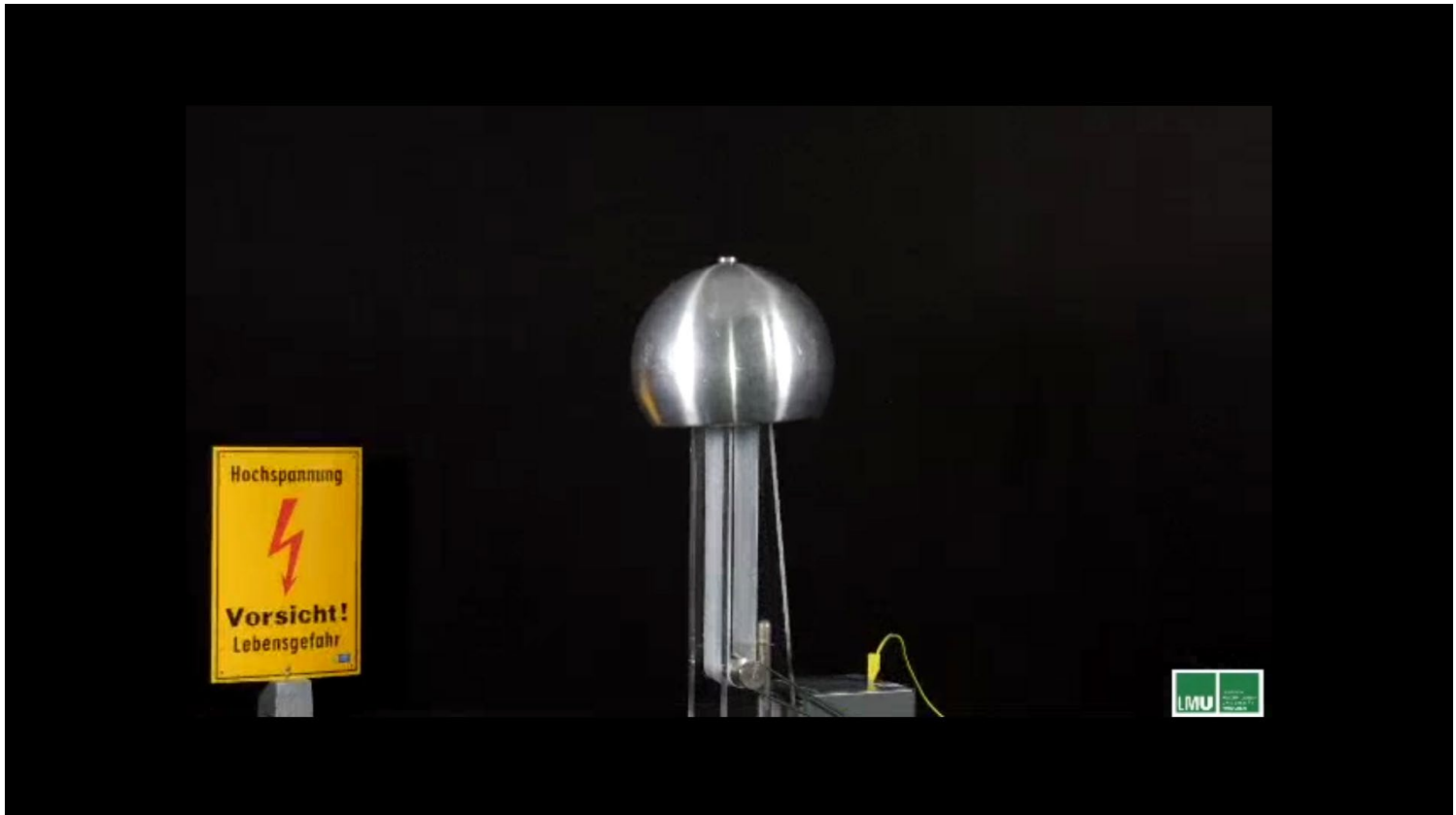
## ◆ Van de Graaff (1932)

### Beispiel:

- 12 MV in Druckkesseln
- 2-MV-Generator:  
Höhe 2,2 m; Durchmesser 0,9 m  
Bandgeschw. 30 m/s  
 $I_{\text{max}}$ : 0,25 mA
- $P < 2 \text{ kW}$

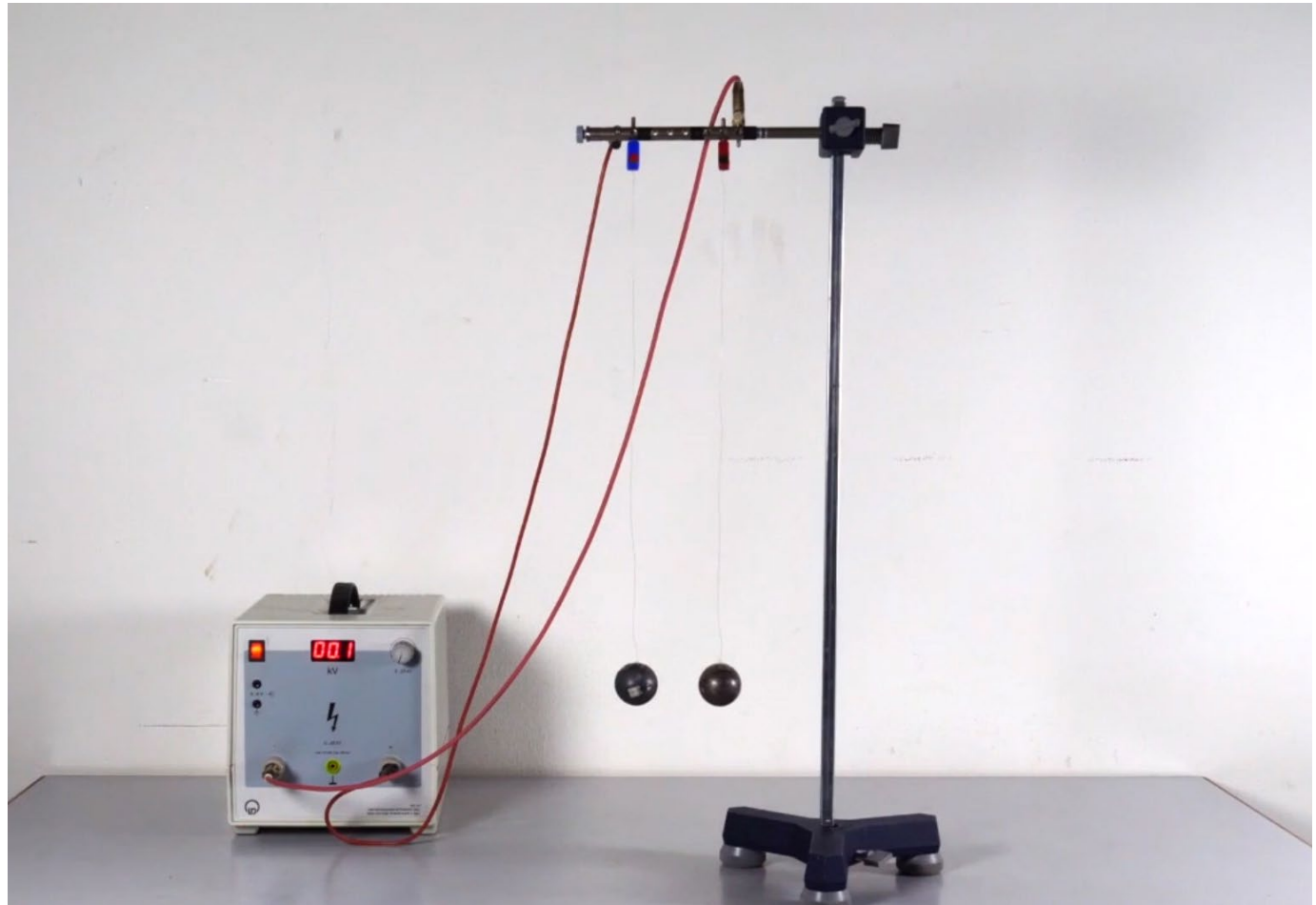


## ◆ Van de Graaff-Generator



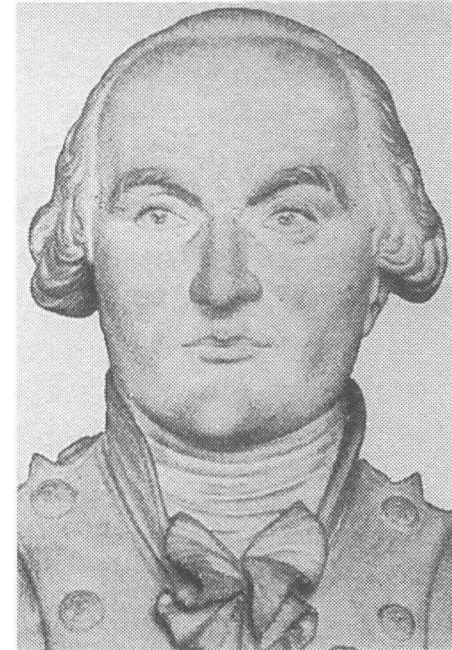
[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/1-1-Reiben-vdG.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-1-Reiben-vdG.m4v)

## Kräfte zwischen Ladungen



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/1-1-Coulomb-Kugeln-1.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-1-Coulomb-Kugeln-1.m4v)

## Charles Augustin de Coulomb (1736-1806)



### Beobachtungen:

- Kraft proportional zur Ladungsmenge:

$$F \sim q_1 ; F \sim q_2$$

- anziehende, abstoßende Kraft:

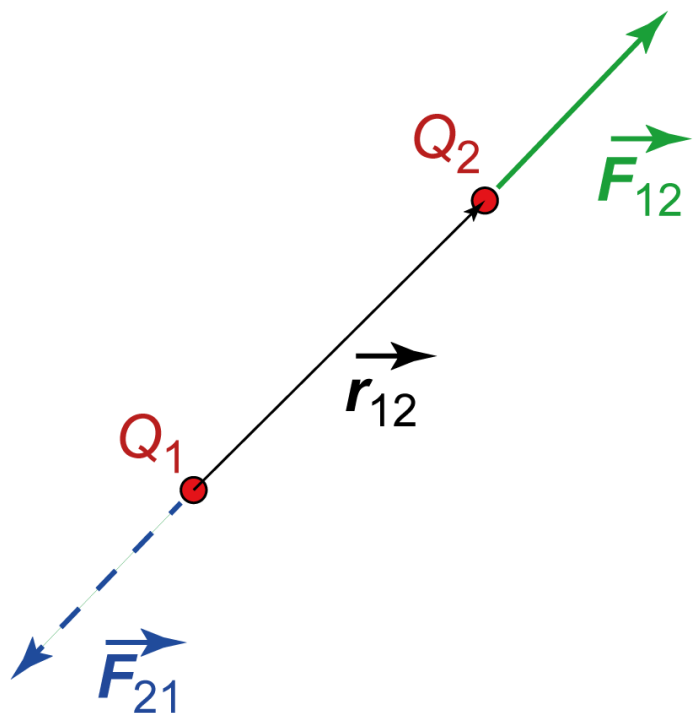
$$F \sim \text{Vorzeichen}(q_1, q_2)$$

- Quadratische Abstandsabhängigkeit:

$$F \sim \frac{1}{r^2}$$



Zwei Punktladungen die sich im Abstand  $r$  voneinander befinden, üben eine Kraft aufeinander aus. Es gilt folgende Gesetzmäßigkeit:







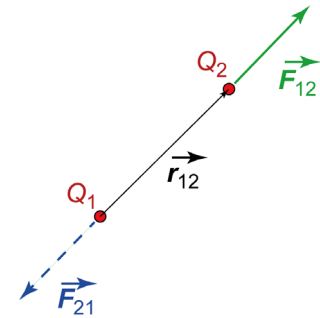
Die Kraft hat eine bestimmte Richtung:

+ - , - + von einer Ladung *zur* anderen Ladung hin.

+ + , - - von der Ladung *weg*.

In Formeln wird dies vektoriell dargestellt:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r_{12}^2} \cdot \vec{e}_r$$



$\vec{e}_r$  gibt die Richtung zwischen  $q_1$  und  $q_2$  an und hat die Länge 1

$\vec{r}_{12}$  Verbindungsvektor zwischen  $q_1$  und  $q_2$

$r_{12}$  Länge des Verbindungsvektors zwischen  $q_1$  und  $q_2$

$$\vec{e}_r = \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}$$

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r_{12}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}$$

## Vektoren beschreiben Größen mit Betrag und Richtung

### Darstellung eines Vektors:

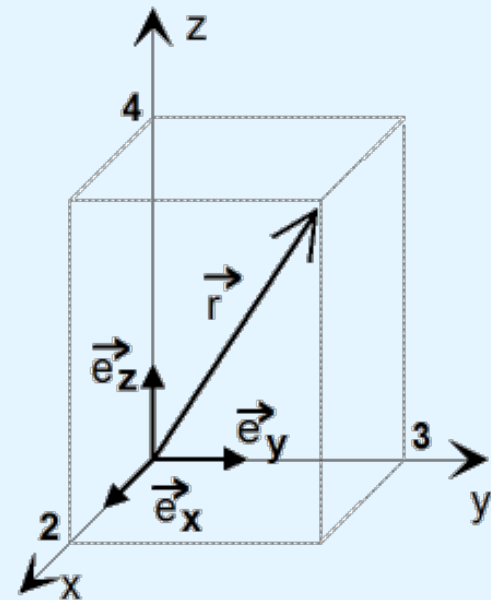
$$\vec{r} = x \cdot \vec{e}_x + y \cdot \vec{e}_y + z \cdot \vec{e}_z$$

$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$  sind Einheitsvektoren in x,y,z-Richtung mit der Länge „1Einheit“

**Vereinfachte Darstellung:**  $\vec{r} = (x, y, z)$

Beispiel:

$$\begin{aligned}\vec{r} &= 2\vec{e}_x + 3\vec{e}_y + 4\vec{e}_z \\ &= (2, 3, 4)\end{aligned}$$



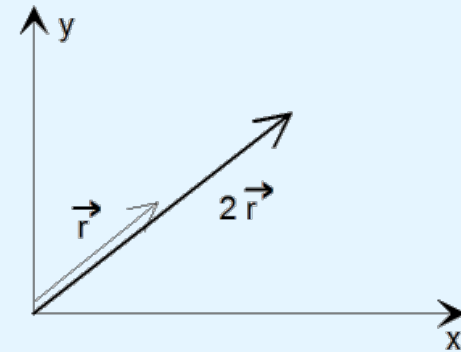
## Eigenschaften und Rechenregeln

### 1) Betrag = Länge des Vektorpfeils:

$$|\vec{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (\text{Pythagoras!})$$

### 2) Multiplikation eines Vektors mit einer Zahl (Skalar)

$$a \cdot \vec{r} = (ax, ay, az)$$



### 3) Summe von Vektoren:

$$\vec{r} = \vec{r}_1 + \vec{r}_2 = (x_1 + x_2, y_1 + y_2, z_1 + z_2)$$

### 4) Differenz von Vektoren:

$$\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2 = (x_1 - x_2, y_1 - y_2, z_1 - z_2)$$

$\vec{r}$  ist Abstandsvektor zwischen  $\vec{r}_1$  und  $\vec{r}_2$

Rechenregeln II:

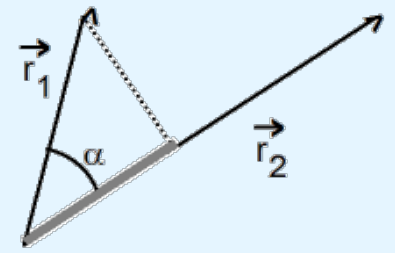
5) Einheitsvektor (Länge „1“):

$$\hat{r} = \vec{e}_r = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} = \left( \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right)$$

6) Multiplikation zweier Vektoren – Skalarprodukt („Vektor \* Vektor -> Zahl“)

$$\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2 = r_1 \cdot r_2 \cdot \cos \alpha$$

(Beispiel: Mechanische Arbeit)

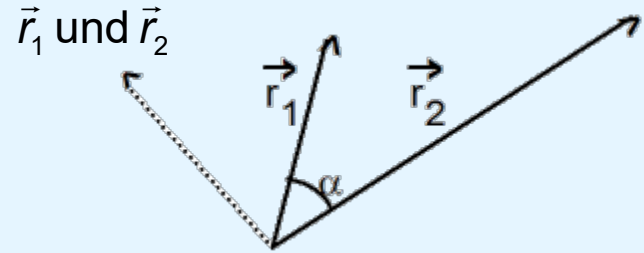


7) Multiplikation – Vektorprodukt (Vektor \* Vektor -> Vektor)

Das Ergebnis steht senkrecht auf den Vektoren

$$|\vec{r}_1 \times \vec{r}_2| = r_1 \cdot r_2 \cdot \sin \alpha$$

(Beispiel: Drehmoment)





**Vergleich zwischen Coulomb- und Gravitationskraft**

	$\vec{F}_{Coul}$	$\vec{F}_{Grav}$
<b>Ursache:</b>	2 Ladungen (Vorzeichen!)	2 Massen
<b>Kraftrichtung:</b>	Anziehung/ Abstoßung	Anziehung
<b>Stärke</b>	groß	sehr klein
<b>abschirmbar</b>	ja	nein
<b>Bedeutung:</b>	Zusammenhalt der Atome	Zusammenhalt des Makrokosmos

gleiche Abstandsabhängigkeit:  $1/r^2$

Kräfte zwischen zwei Elektronen:

$$\frac{F_{Grav}}{F_{Coul}} = \frac{1}{4.2 * 10^{42}} \ll 1$$



## ◆ Verallgemeinerung 1: Mehrere Ladungen



## ◆ Verallgemeinerung 2: Kontinuierliche Ladungsverteilung

**Definition: Ladungsdichte als Ladung pro Volumen**





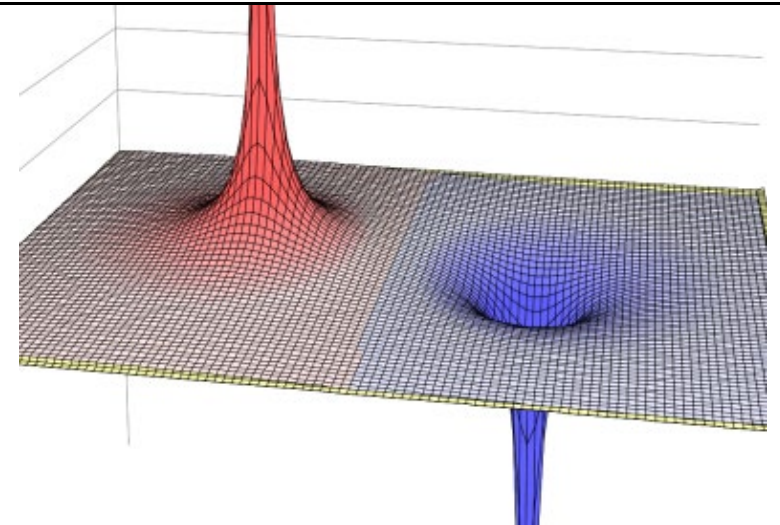
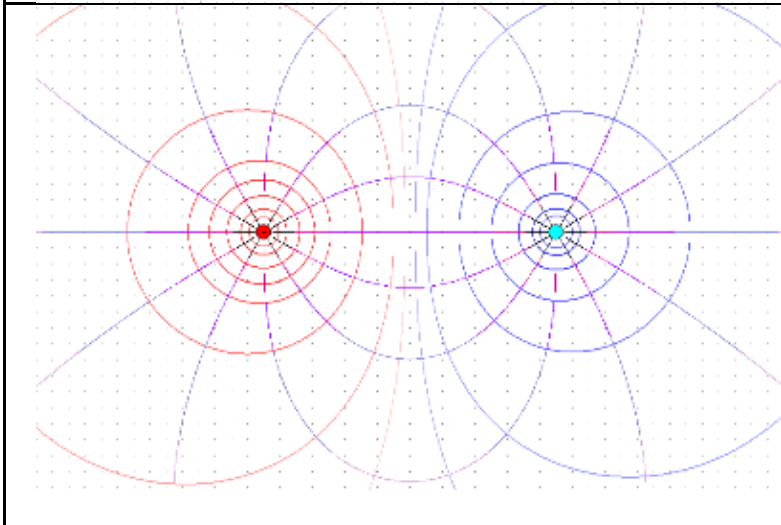
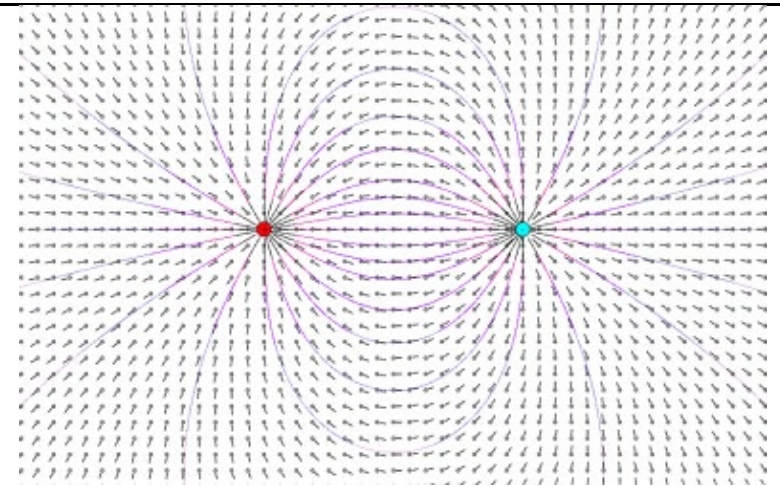
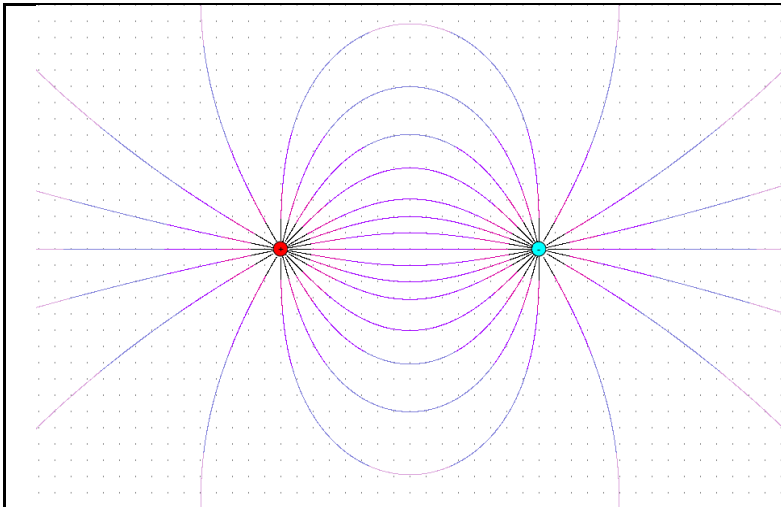
- ◆ **Verallgemeinerung 2: Kontinuierliche Ladungsverteilung**  
Ladung in einem Volumen bei gegebener Ladungsdichte  $\rho(\vec{r})$  :

$$dq = \rho(\vec{r})dV$$

$$Q = \int dq = \int_V \rho(\vec{r}) dV$$

**Kraft auf Ladung  $q_0$  am Ort  $\vec{r}_0$  :**

$$\vec{F}_{q_0} = q_0 \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(\vec{r}) \cdot (\vec{r} - \vec{r}_0)}{|\vec{r} - \vec{r}_0|^3} dV$$







Im freien Raum reicht die Coulombkraft bis ins Unendliche  
„der Raum ist von einem elektrischen Kraftfeld erfüllt“  
Das elektrische Feld beschreibt diesen Zustand

### Definition der Elektrischen Feldstärke:

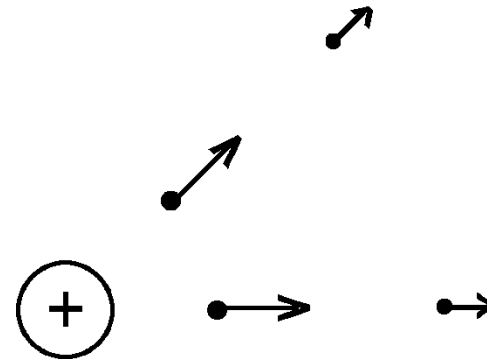
$$\vec{E}(\vec{r}) := \frac{\vec{F}(\vec{r})}{q}$$

Dabei ist  $F$  die Kraft, die auf eine punktförmige Probeladung  $q$  am Ort  $r$  ausgeübt wird

Einheit:  $[E] = \frac{N}{C}$

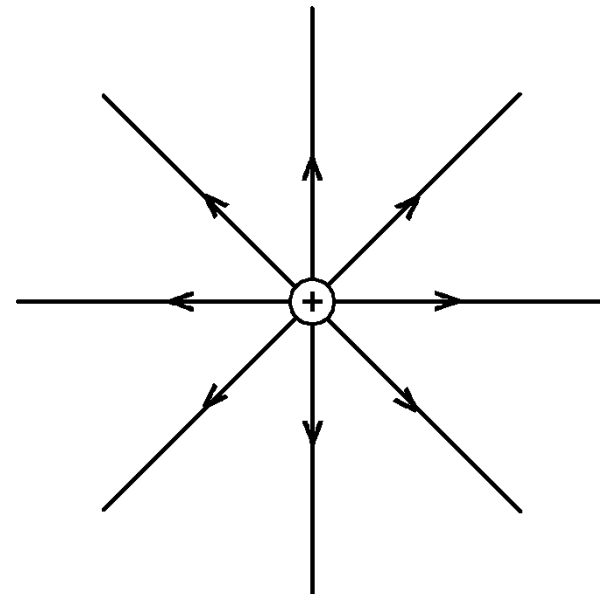
## Darstellung des E-Feldes

- **Richtungsfeld**

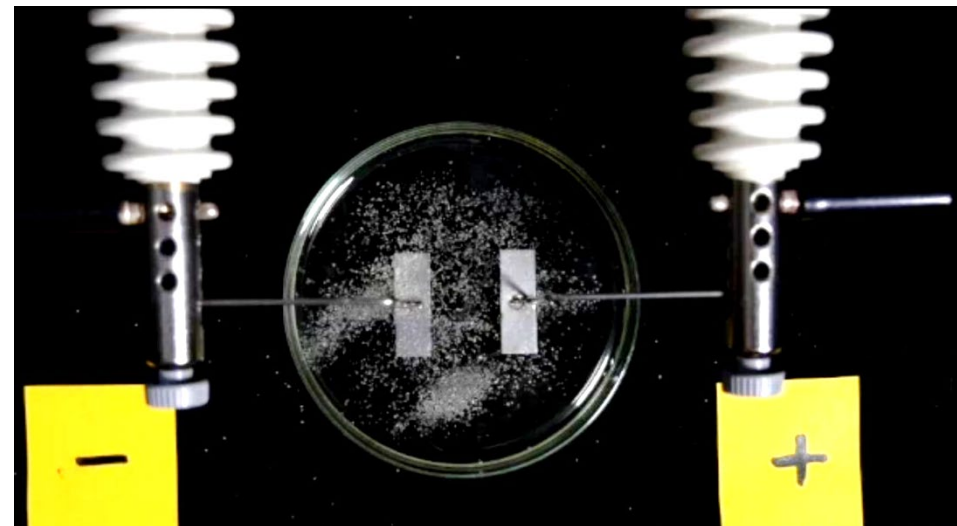
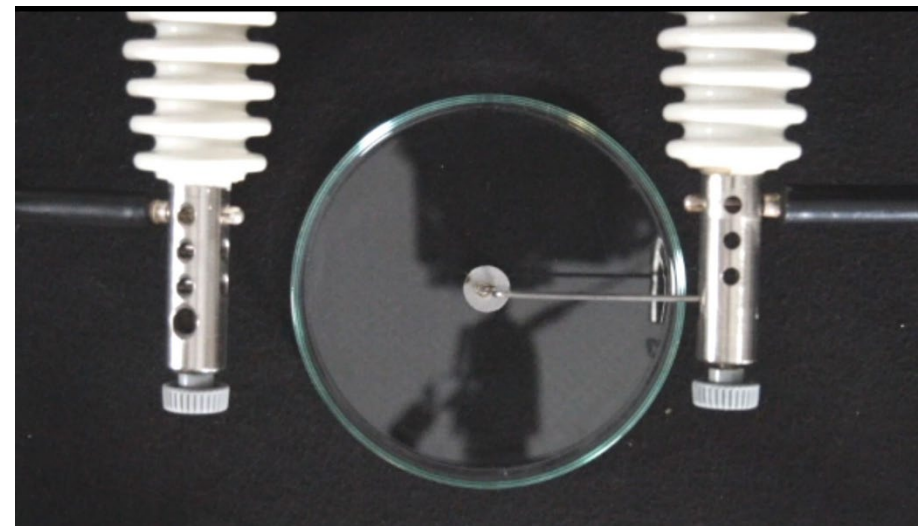


- **Feldlinien:**

Richtung der Kraft auf eine positive Ladung ist gleich der Tangente an die Feldlinien



## Felder einiger grundlegender Ladungskonfigurationen



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/1-3-Feld-Punkt.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-3-Feld-Punkt.m4v)

[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/1-3-Feld-homogen.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-3-Feld-homogen.m4v)



## Felder von Punktladungen

→ **html5-Programm – selbst Ladungskonfigurationen am PC, Tablet, Smartphone untersuchen**

[https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/multimedia/programme\\_applets/e\\_lehre/e\\_feld](https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/multimedia/programme_applets/e_lehre/e_feld)

oder

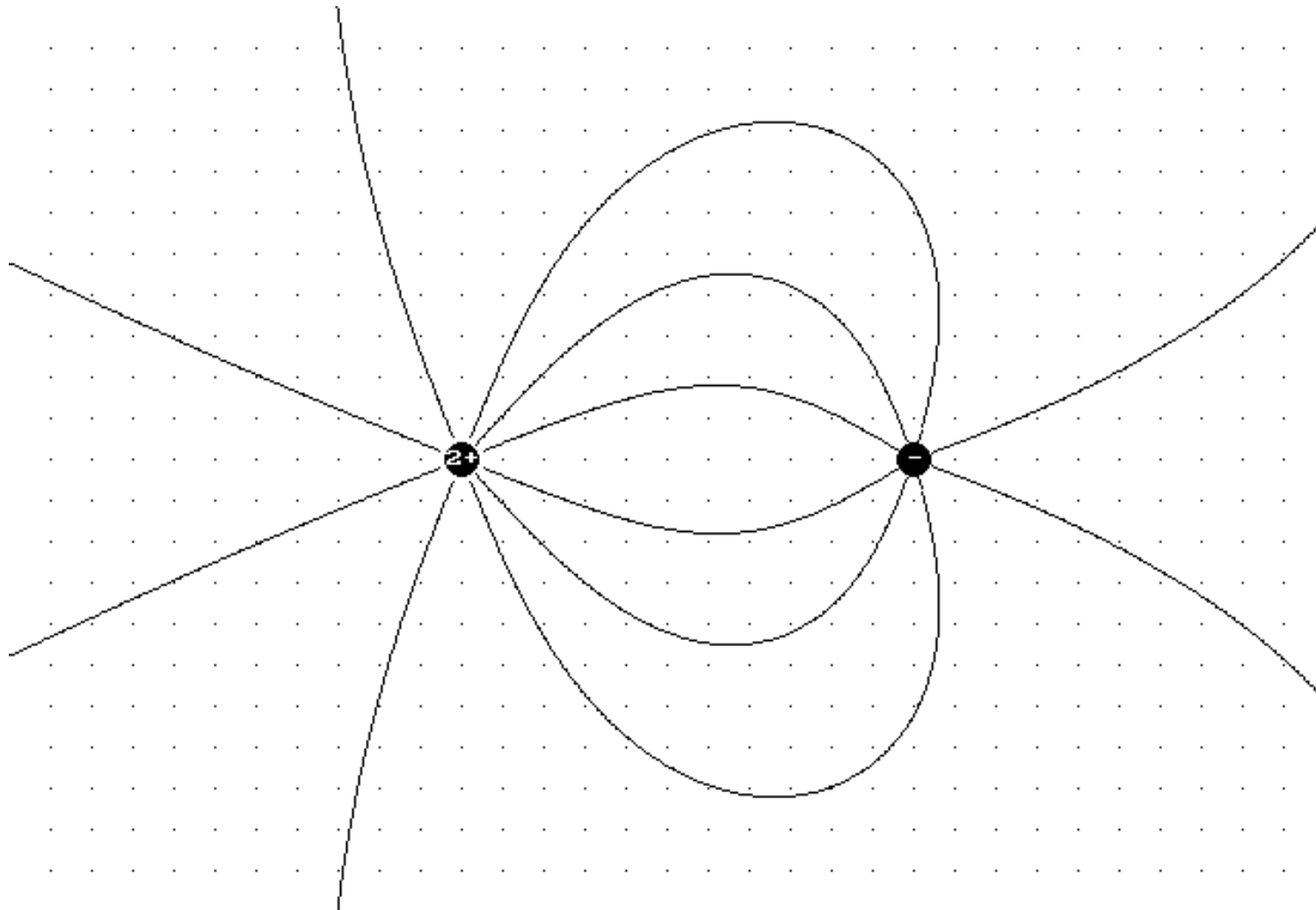
[http://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/programme/e\\_feld/E\\_Feld\\_min.html](http://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/programme/e_feld/E_Feld_min.html)



## Felder einiger grundlegender Ladungskonfigurationen



## Felder einiger grundlegender Ladungskonfigurationen



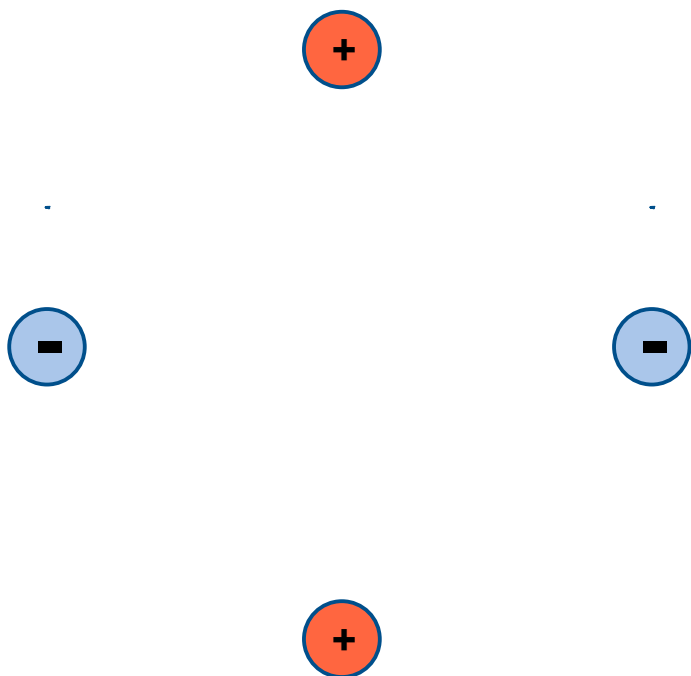


## Felder einiger grundlegender Ladungskonfigurationen





## Felder einiger grundlegender Ladungskonfigurationen



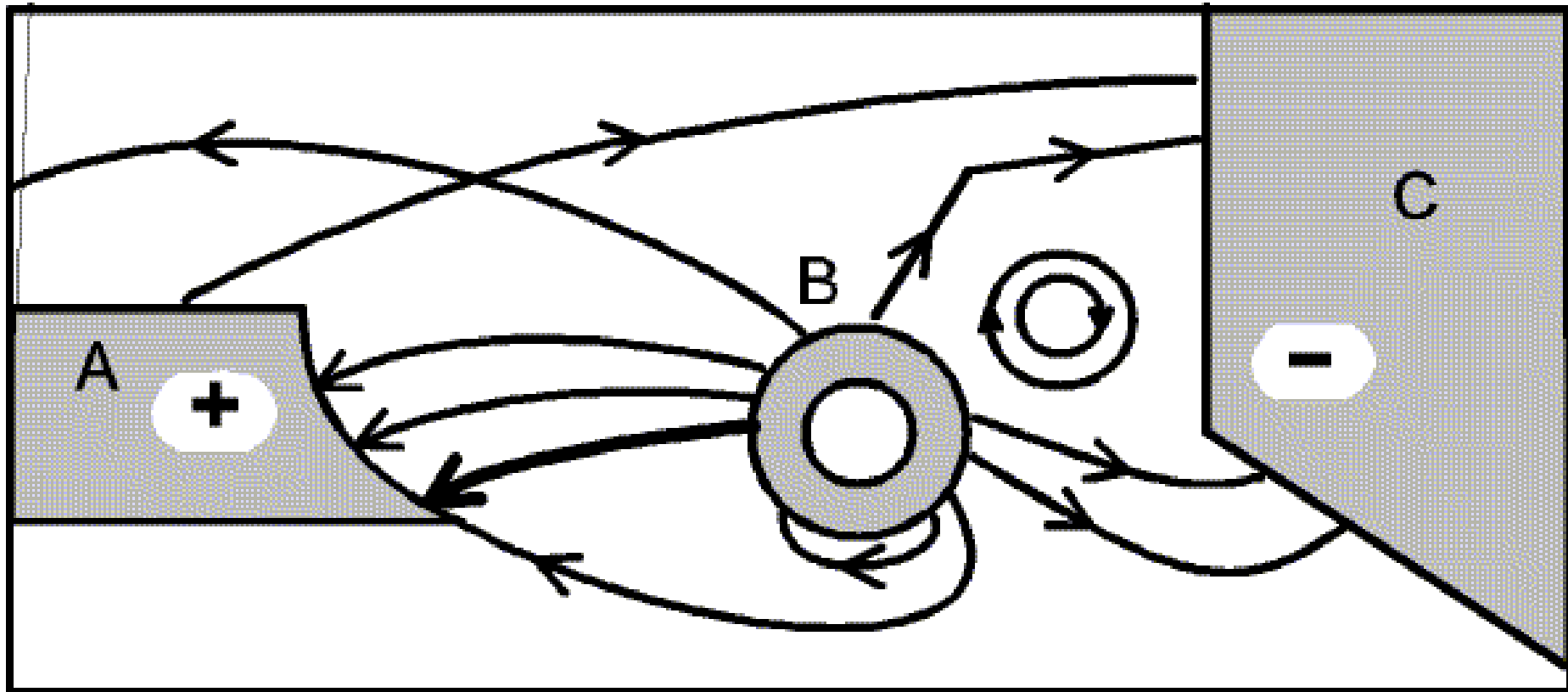




## Felder einiger grundlegender Ladungskonfigurationen

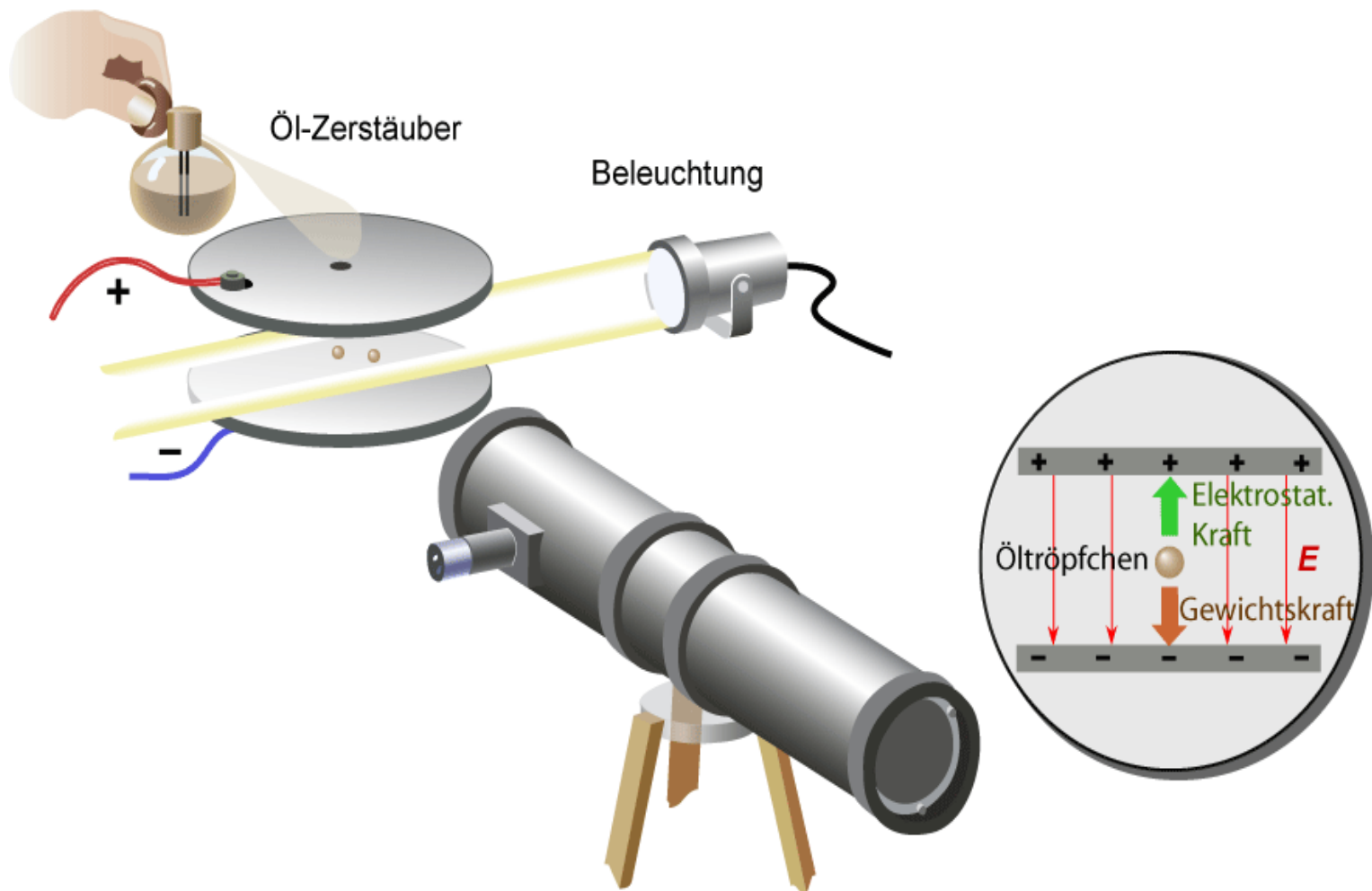


## Felder einiger grundlegender Ladungskonfigurationen



nach Törnkvist, S., Pettersson, K. A., & Tranströmer, G. (1993). Confusion by representation: On student's comprehension of the electric field concept. *American Journal of physics*, 61(4), 335-338.

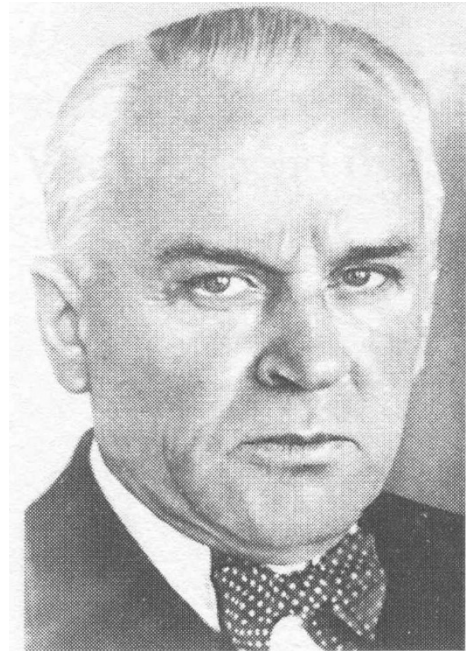
- Millikan (1868-1953), Nobelpreis 1923:  
Bestimmung der Elementarladung (1910)





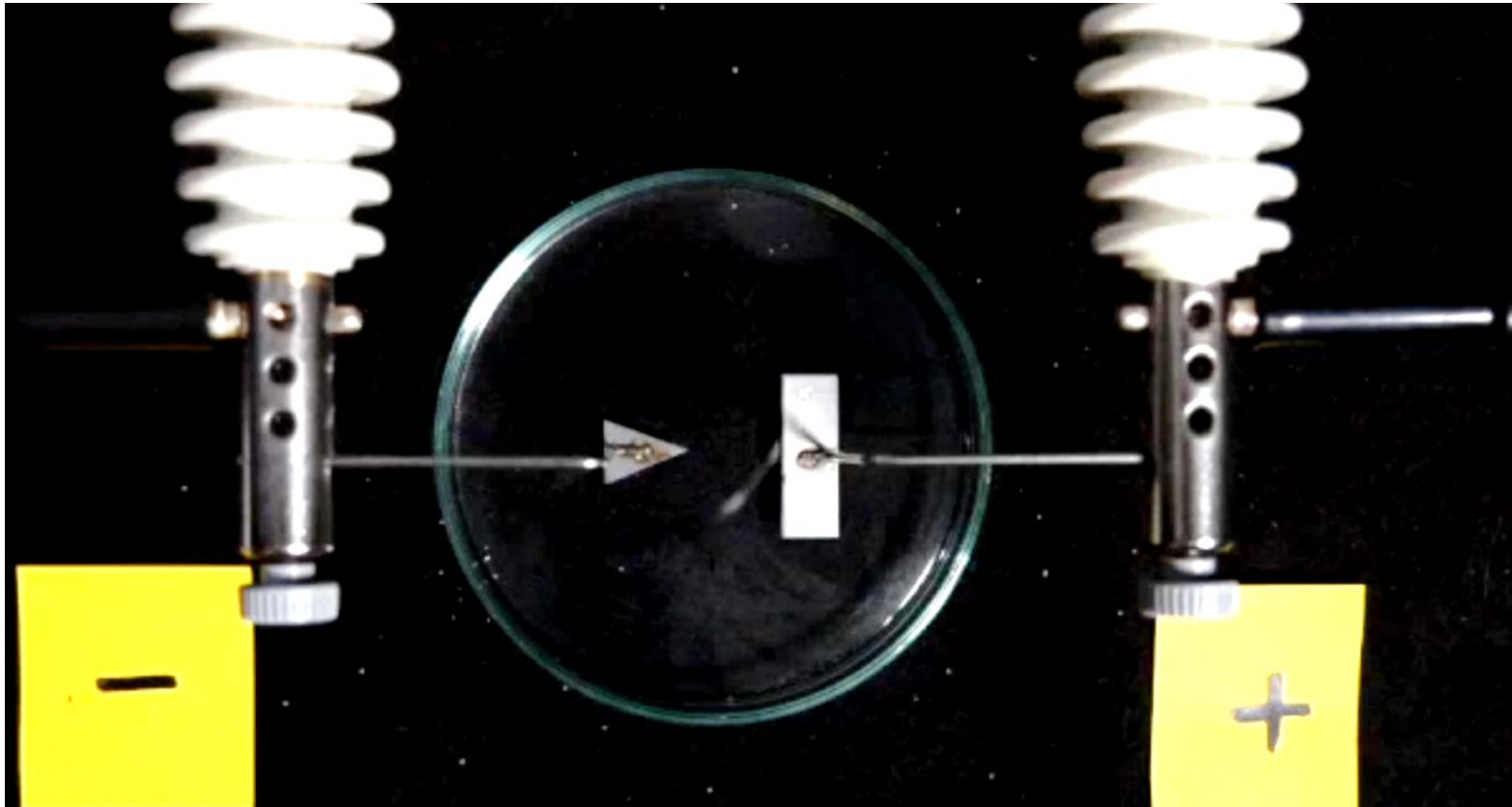
- **Millikan (1868-1953), Nobelpreis 1923:  
Bestimmung der Elementarladung (1910)**

(Rechnung siehe Übungsaufgaben)



- **Weitere Hinweise auf die Elementarladung:**
  - Einzelladungen im B-Feld
  - Elektrolytische Leitung (kleinste Einheiten)
  - Schwankungserscheinungen bei el. Strömen

## Felder einiger grundlegender Ladungskonfigurationen



[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/1-3-Feld-Spitze.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-3-Feld-Spitze.m4v)



## Feldstärke an Spitzen





## Charakteristika des E-Feldes

- **"Quellen- und Senkenfeld"**

Ladungen sind Quellen und Senken des E-Feldes  
(Feldlinien beginnen bzw. enden in Ladungen oder Singularitäten  
des Feldes)

- **Das (elektrostatische) E-Feld ist wirbelfrei**

Es gibt keine geschlossenen Feldlinien / keine Wirbel



## Berechnung elektrischer Felder

- Feld einer Punktladung:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q \cdot \vec{r}}{r^3}$$

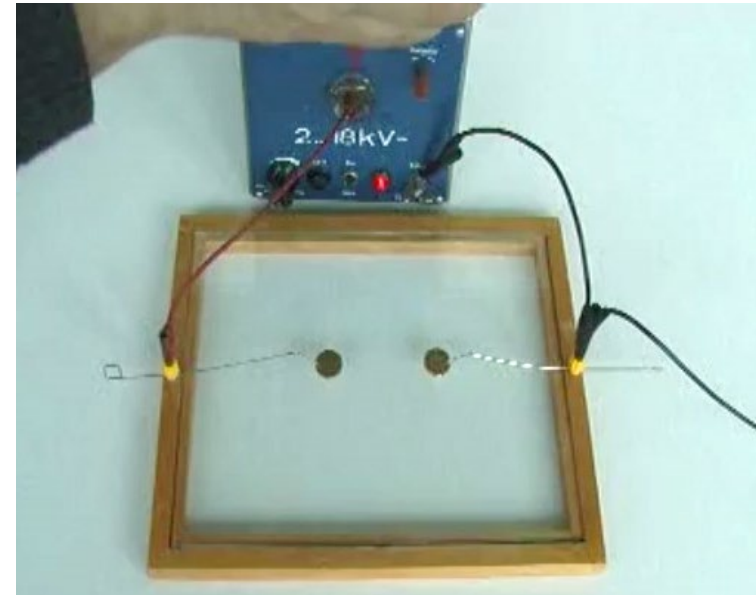
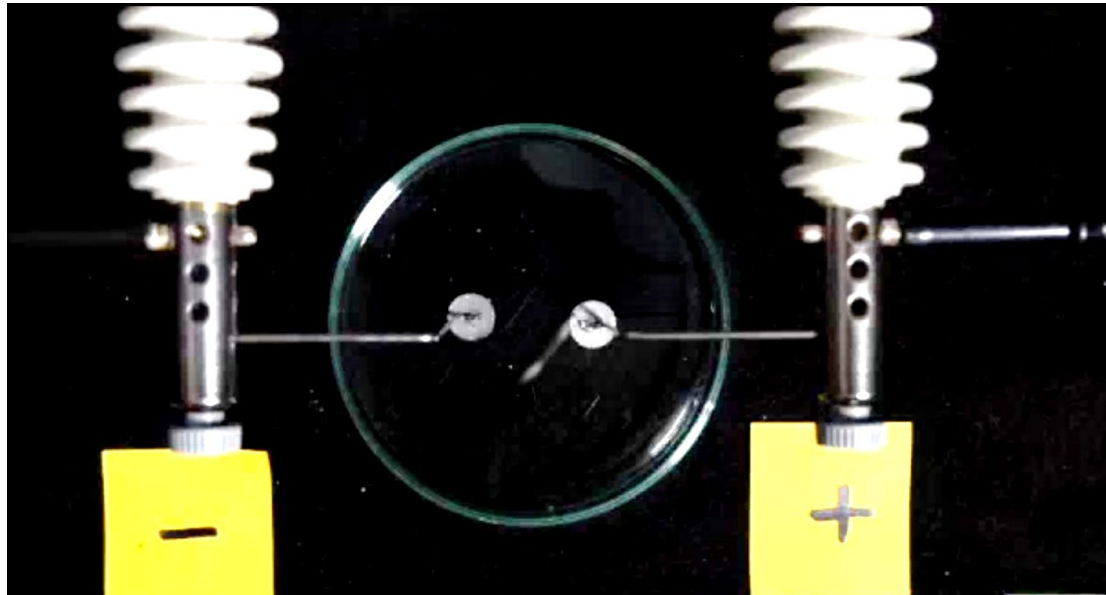
$$|\vec{E}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q|}{r^2}$$

- **Feldstärke bei einer diskreten Ladungsverteilung und Superpositionsprinzip**

(siehe Aufgabe)



# Felder einiger grundlegender Ladungskonfigurationen

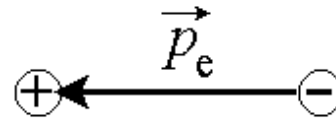


[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/1-3-Feld-2Punkte.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-3-Feld-2Punkte.m4v)

[https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2\\_E\\_Video/1-3-Feld-Dipol.m4v](https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-3-Feld-Dipol.m4v)

## ▪ Dipolfeld (Berechnungen siehe Beispielaufgaben)

- Def. Dipolvektor:



$$|\vec{p}_e| = q \cdot a$$

- Feldstärke auf der Dipolachse (x-Achse):

$$E_\alpha \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p_e}{x^3} \quad \text{für } x \gg a$$

- Feldstärke auf der Mittelsenkrechten zur Dipolachse (y-Achse)  
(siehe Rechnungen)

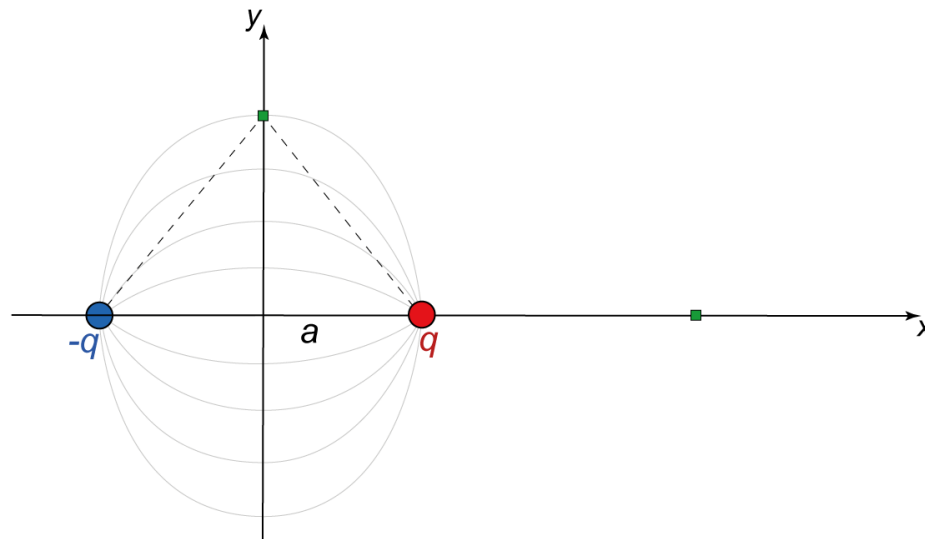
$$E_\beta \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_e}{y^3} \quad \text{für } y \gg a$$

- Allgemein:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{3(\vec{p} \cdot \vec{r})\vec{r} - (\vec{r} \cdot \vec{r})\vec{p}}{r^5}$$



## ▪ Dipolfeld





- **Dipolfeld**





- **Dipolfeld**

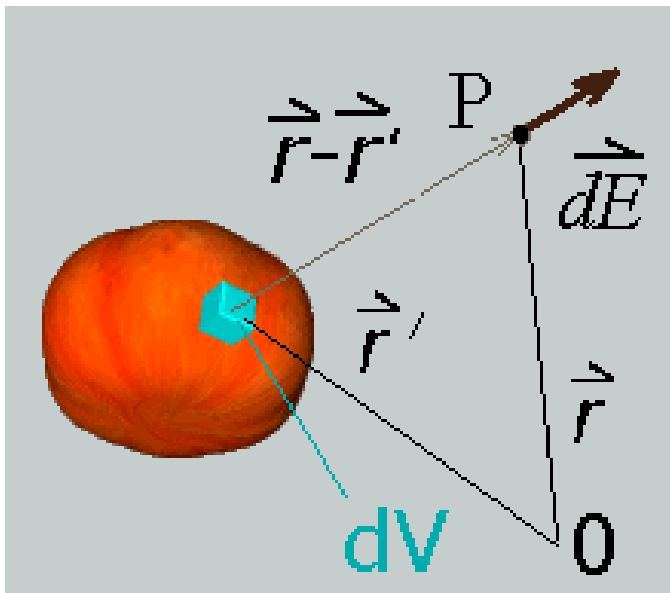




- **Dipolfeld**



- Felder kontinuierlicher Ladungsverteilungen (siehe Aufgaben)



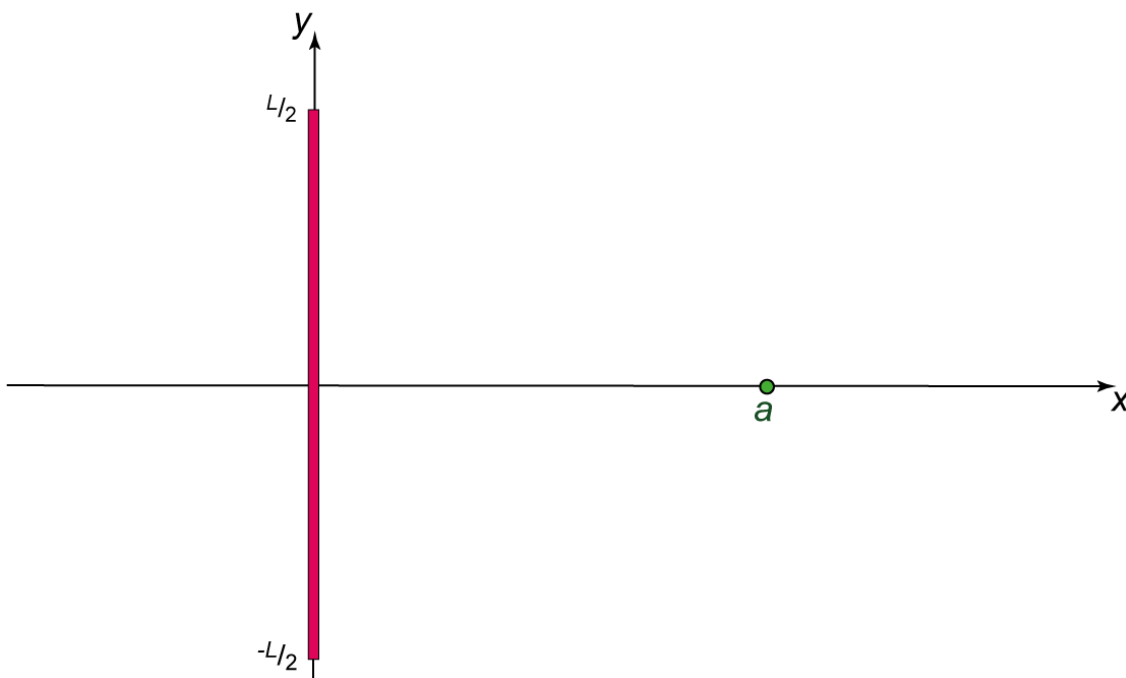
$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(\vec{r}') \cdot (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(\vec{r}') \cdot (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} d^3\vec{r}'$$



Beispiel: Feld eines Stabes mit homogener Linienladungsdichte  $\lambda$

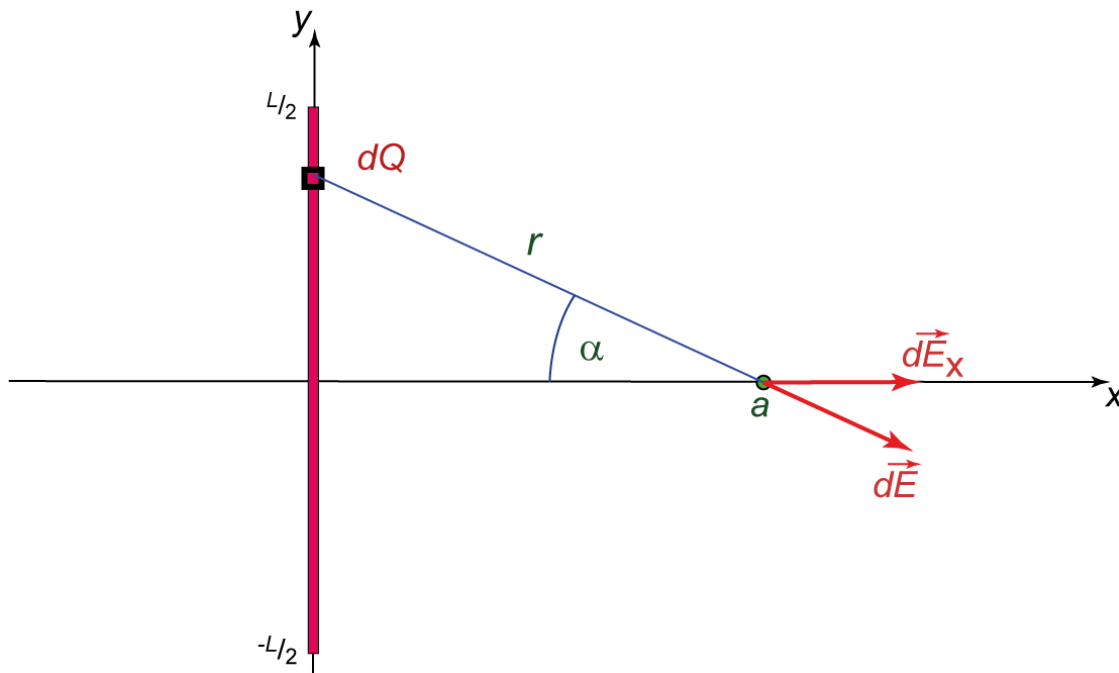
$$\lambda = \frac{Q}{L}$$



Gesucht: Feldstärke auf der Mittelsenkrechten bei  $a$



Beispiel: Feld eines Stabes mit homogener Linienladungsdichte  $\lambda$



$$\lambda = \frac{Q}{L}$$

$$r = \frac{a}{\cos \alpha} ;$$

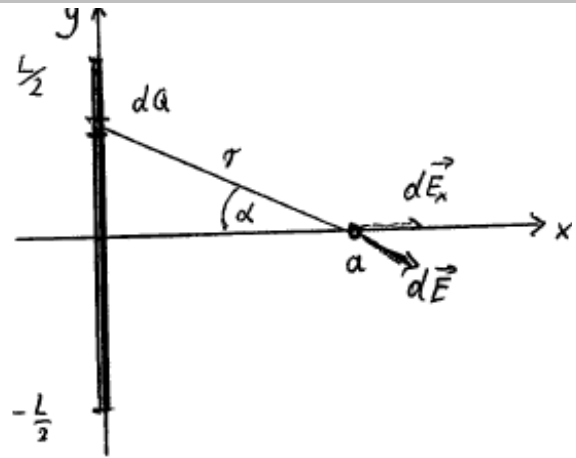
$$y = a \cdot \tan \alpha ;$$

Gesucht: Feldstärke auf der Mittelsenkrechten bei a

$$E_y = 0 ; \quad (\text{aus Symmetriegründen})$$



# 1.3 Elektrisches Feld, El. Feldstärke



$$E_x = \int dE_x = \int dE \cdot \cos \alpha$$

Beitrag von da

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\lambda \cdot dy}{r^2} \cdot \cos \alpha$$

$$\frac{dy}{d\alpha} = \frac{a}{\cos^2 \alpha}$$

$$dy = \frac{a}{\cos^2 \alpha} d\alpha$$

$$E_x = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\alpha_{max}}^{\alpha_{max}} \frac{a \cdot \cos \alpha \cdot \frac{a}{\cos^2 \alpha}}{a^2} d\alpha$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{a} \left[ \sin \alpha \right]_{-\alpha_{max}}^{\alpha_{max}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{a} 2 \cdot \sin \alpha_{max}$$

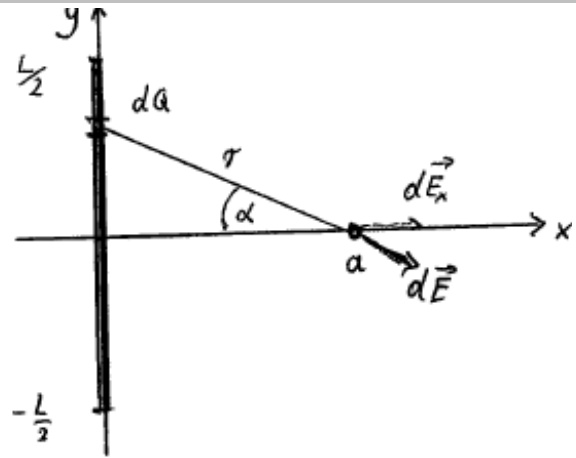
$$\sin \alpha_{max} = \frac{L}{2r_m}$$

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{a} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{a^2}{L^2}}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{a} \frac{2}{\sqrt{1 + \frac{4a^2}{L^2}}} = \frac{L}{2\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + a^2}}$$

für  $L \rightarrow \infty$  (unendl. Leitendg)  $E \Rightarrow \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{a}$



# 1.3 Elektrisches Feld, El. Feldstärke



$$E_x = \int dE_x = \int dE \cdot \cos \alpha$$

Beitrag von da

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\lambda \cdot dy}{r^2} \cdot \cos \alpha$$

$$\frac{dy}{d\alpha} = \frac{a}{\cos^2 \alpha}$$

$$dy = \frac{a}{\cos^2 \alpha} d\alpha$$

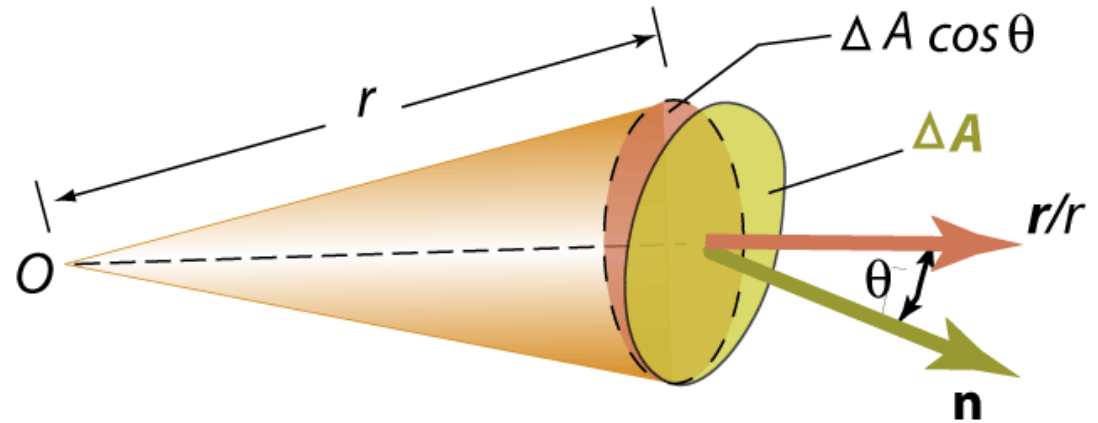
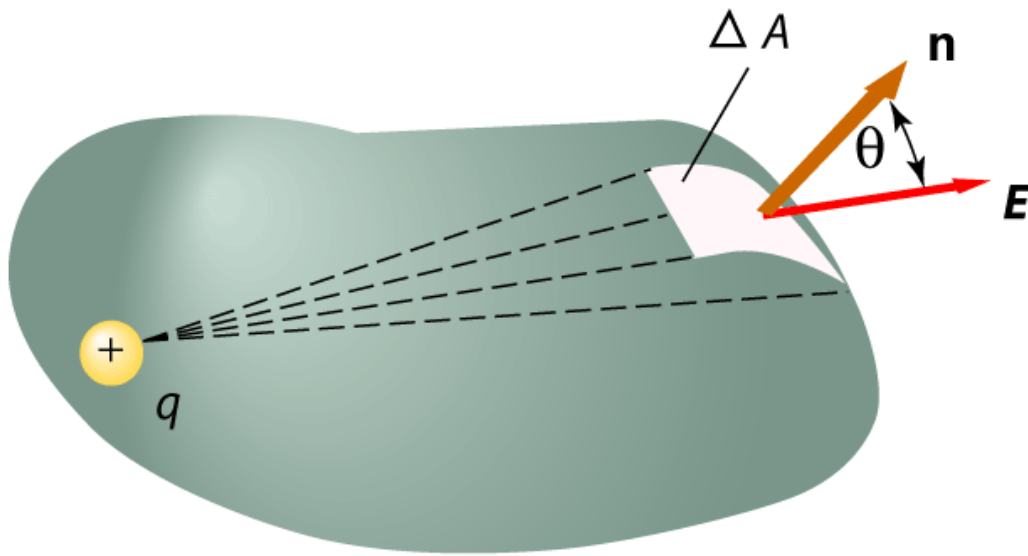
$$E_x = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\alpha_{max}}^{\alpha_{max}} \frac{a \cdot \cos \alpha \cdot \frac{a}{\cos^2 \alpha}}{a^2} d\alpha$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{a} \left[ \sin \alpha \right]_{-\alpha_{max}}^{\alpha_{max}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{a} 2 \cdot \sin \alpha_{max}$$

$$\sin \alpha_{max} = \frac{L}{2r_m}$$

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{a} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{a^2}{L^2}}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{a} \frac{2}{\sqrt{1 + \frac{4a^2}{L^2}}} = \frac{L}{2\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + a^2}}$$

für  $L \rightarrow \infty$  (unendl. Liniendtg)  $E \Rightarrow \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{a}$



"Quellen- und Senkenfeld math. erfasst"

## A) Definitionen

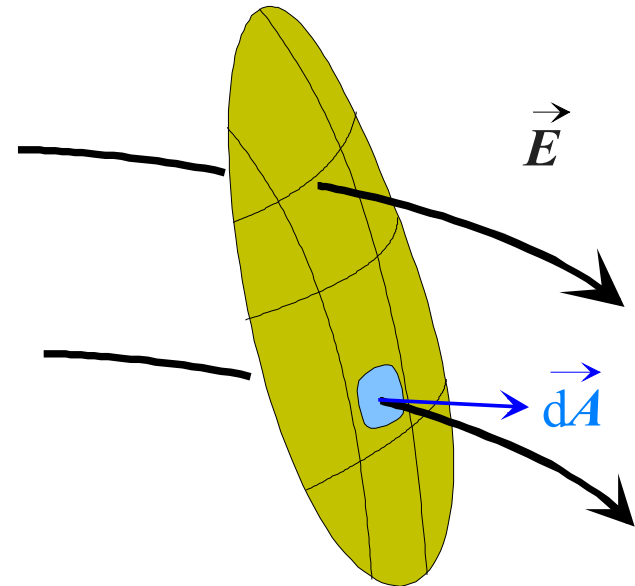
- Elektrischer Fluss  $\phi$ :

$$\phi = \int_A \epsilon_r \epsilon_0 \cdot \vec{E} d\vec{A}$$

$\epsilon_r = 1$  im Vakuum

- Elektrische Flussdichte /  
dielektrische Verschiebung

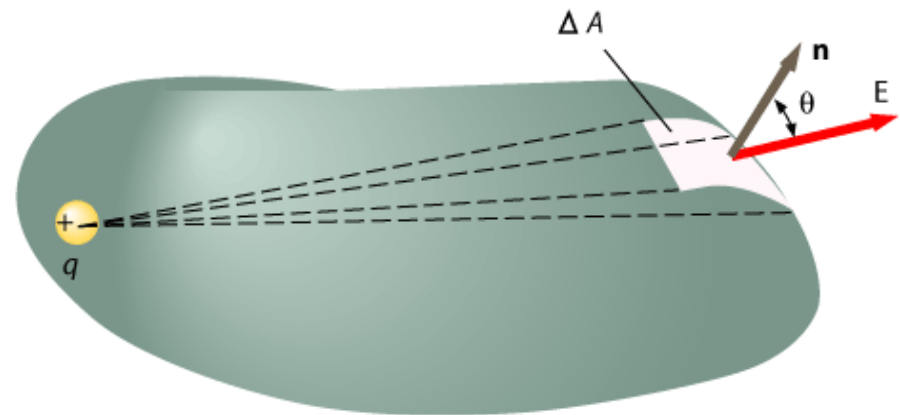
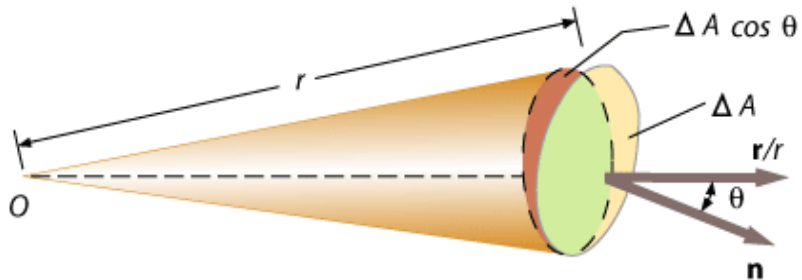
$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \cdot \vec{E}$$



Der Flächenvektor steht senkrecht  
auf der Oberfläche  
Er ist bei geschlossenen Oberflächen  
nach außen gerichtet

- Der elektrische Fluss

$$\phi = \int_A \epsilon_r \epsilon_0 \cdot \vec{E} d\vec{A}$$



Der Flächenvektor steht senkrecht auf der Oberfläche  
Er ist bei geschlossenen Oberflächen nach außen gerichtet



## B) Gesetz von Gauß

Der Gesamtfluss durch eine beliebige geschlossene Oberfläche ist gleich der eingeschlossenen Gesamtladung

$$\phi_{Ges} = \oint \epsilon_0 \cdot \vec{E} d\vec{A} = Q_{innen}$$

zunächst im Vakuum)

$$\phi_{Ges} = \oint \vec{D} d\vec{A} = Q_{innen}$$



## C) Anwendung bei charakteristischen Feldverteilungen

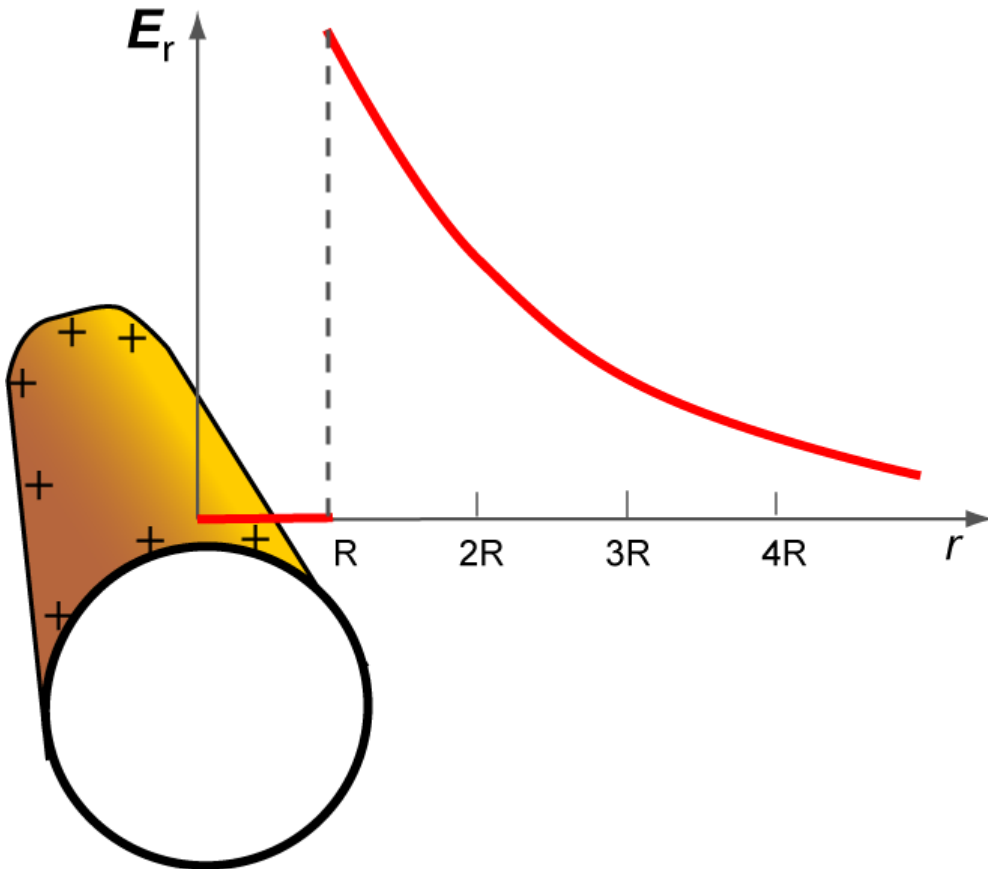
- **Feld einer Punktladung**
- **Feld einer unendlich langen Linienladung**
- **Feld innerhalb einer leitenden Kugel / Hohlkugel**
- **Feld einer unendlich ausgedehnten Ladungsschicht**
- **Feld eines idealen Plattenkondensators**

**(siehe Rechnungen)**



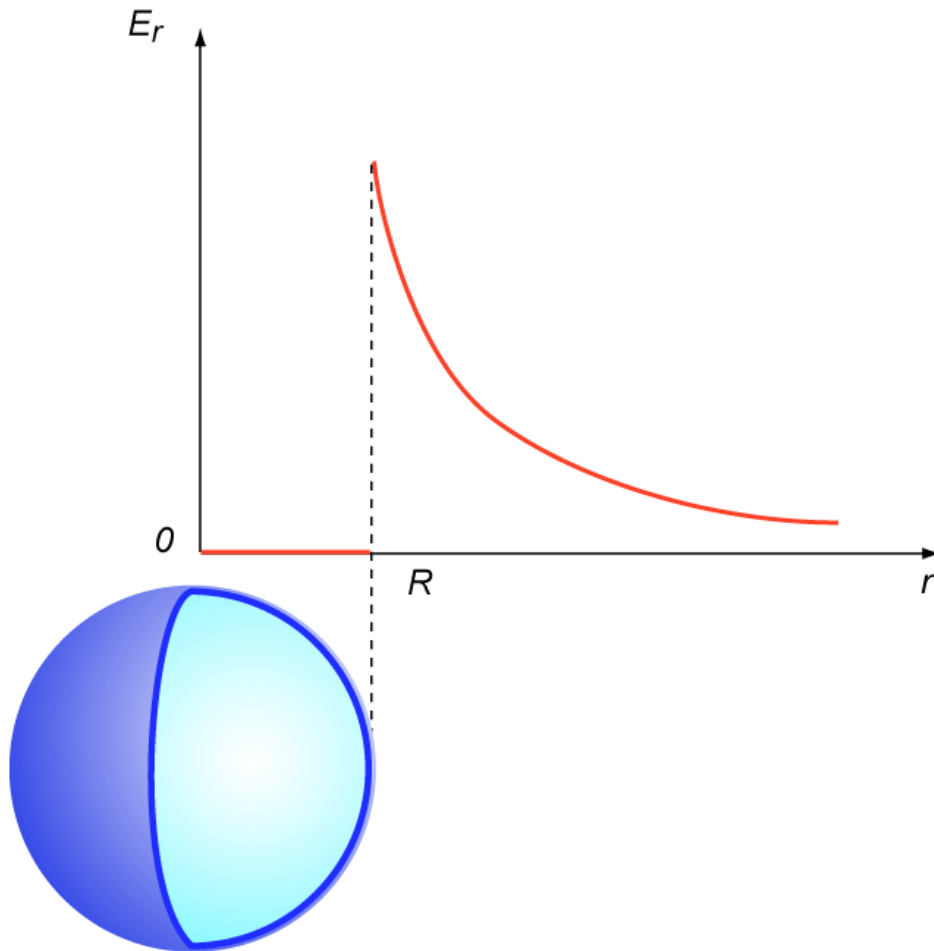


## Geladener Stab (leitend / hohl; Ladung pro Länge $Q/L=\lambda$ )



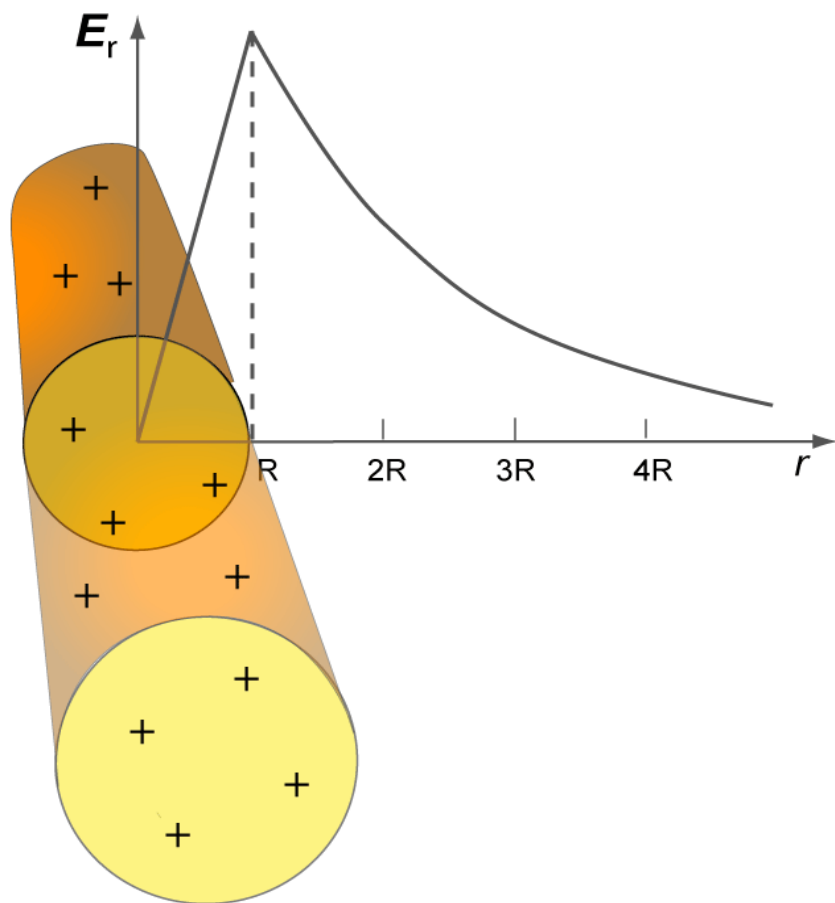


## Geladene Kugel (leitend / hohl; Ladung $Q$ )

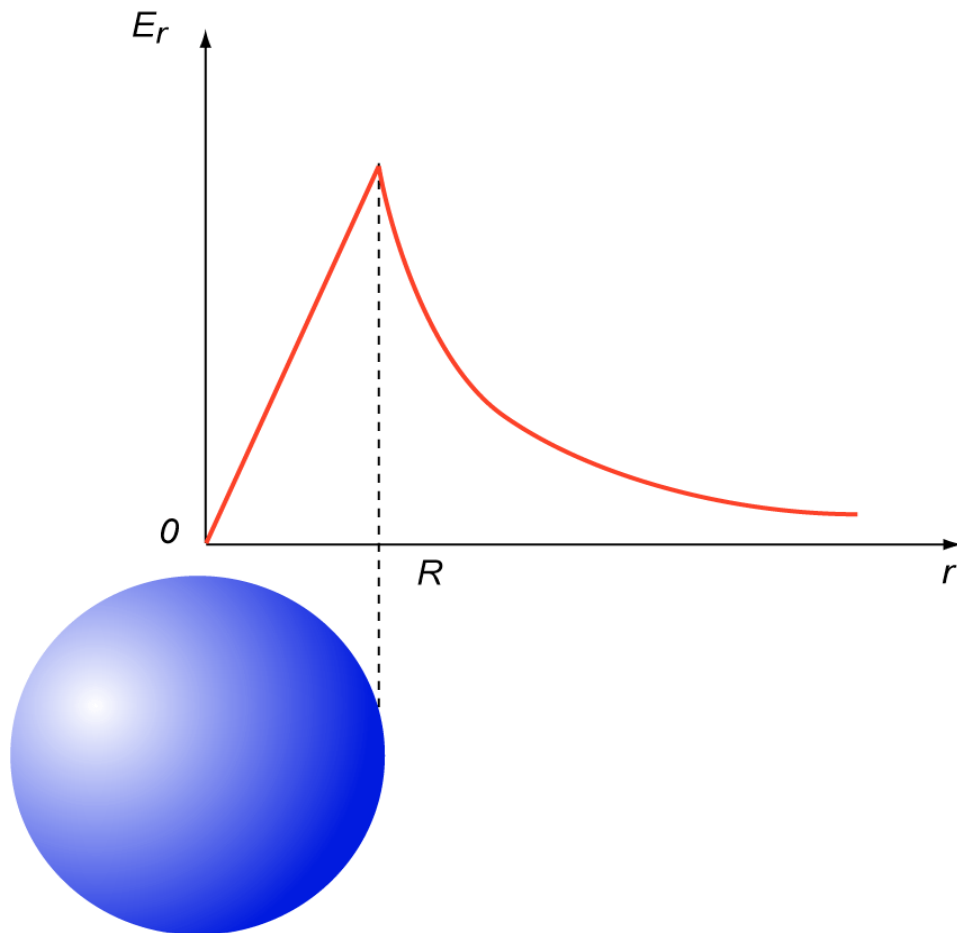




**Geladener Stab** (isolierend, konst. Ladungsdichte; Ladung pro Länge  $\frac{Q}{L} = \lambda$ )

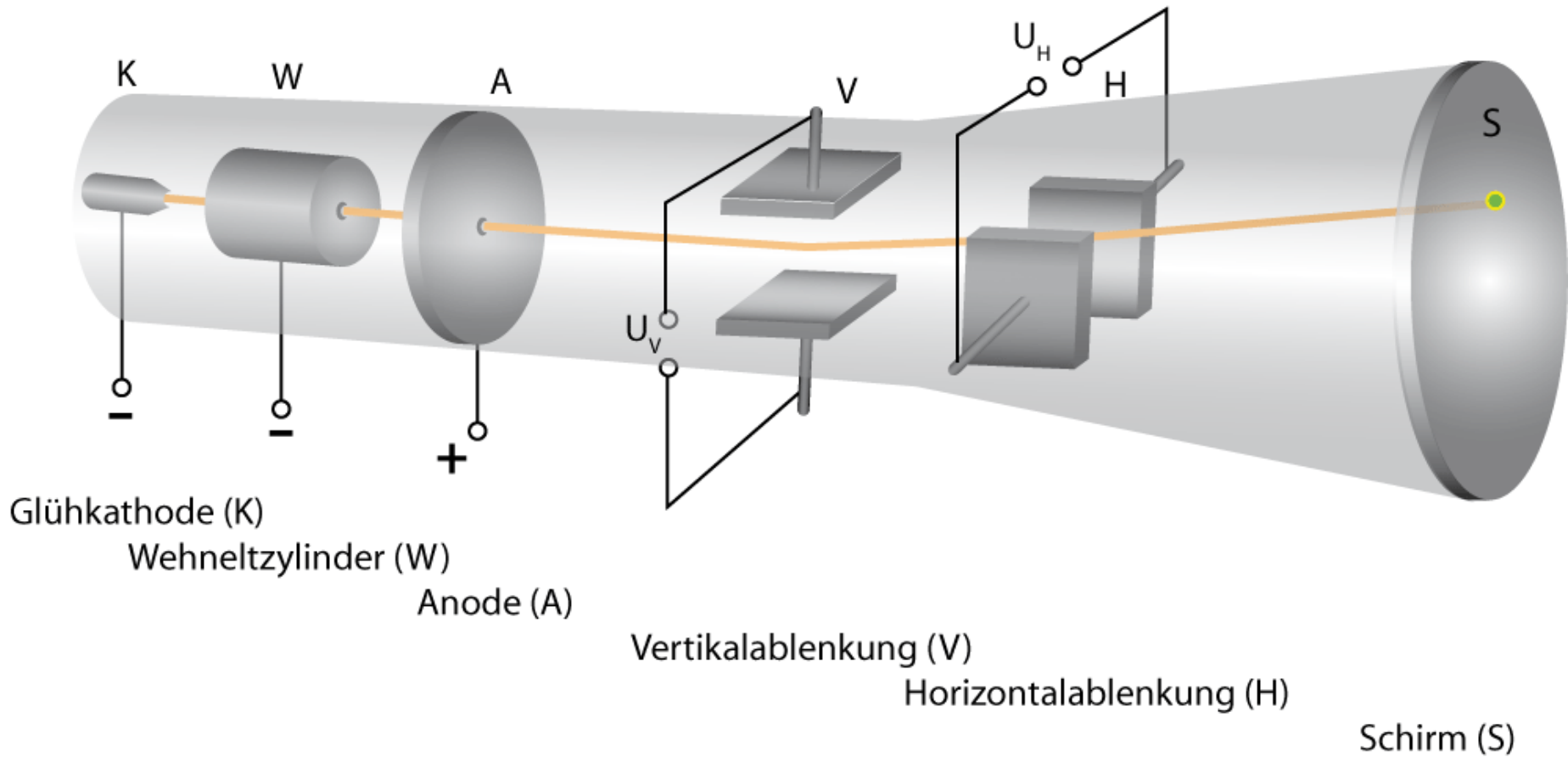


## Geladene Kugel (homogene Ladungsdichte; Ladung $Q$ )

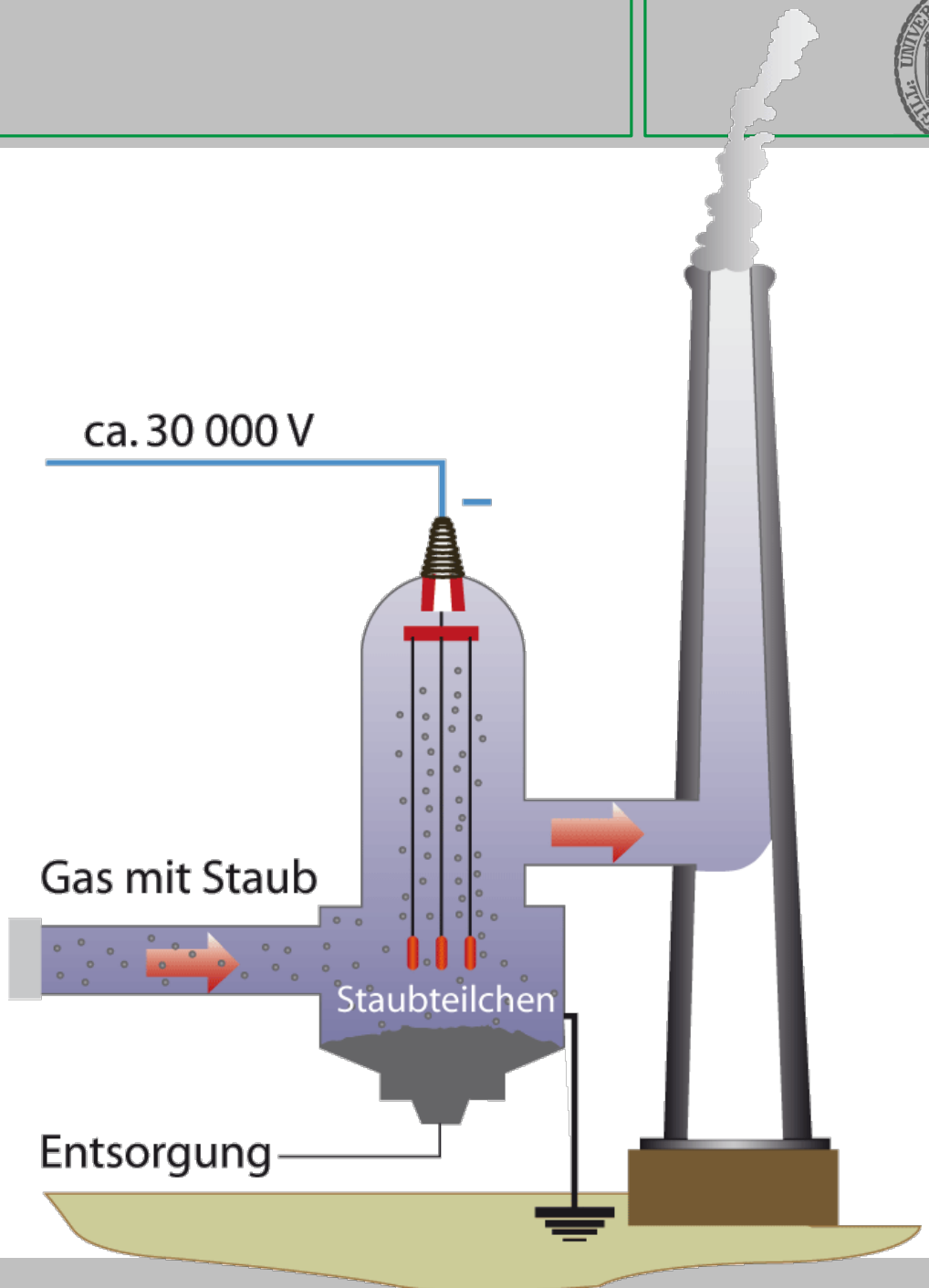


# Oszilloskop

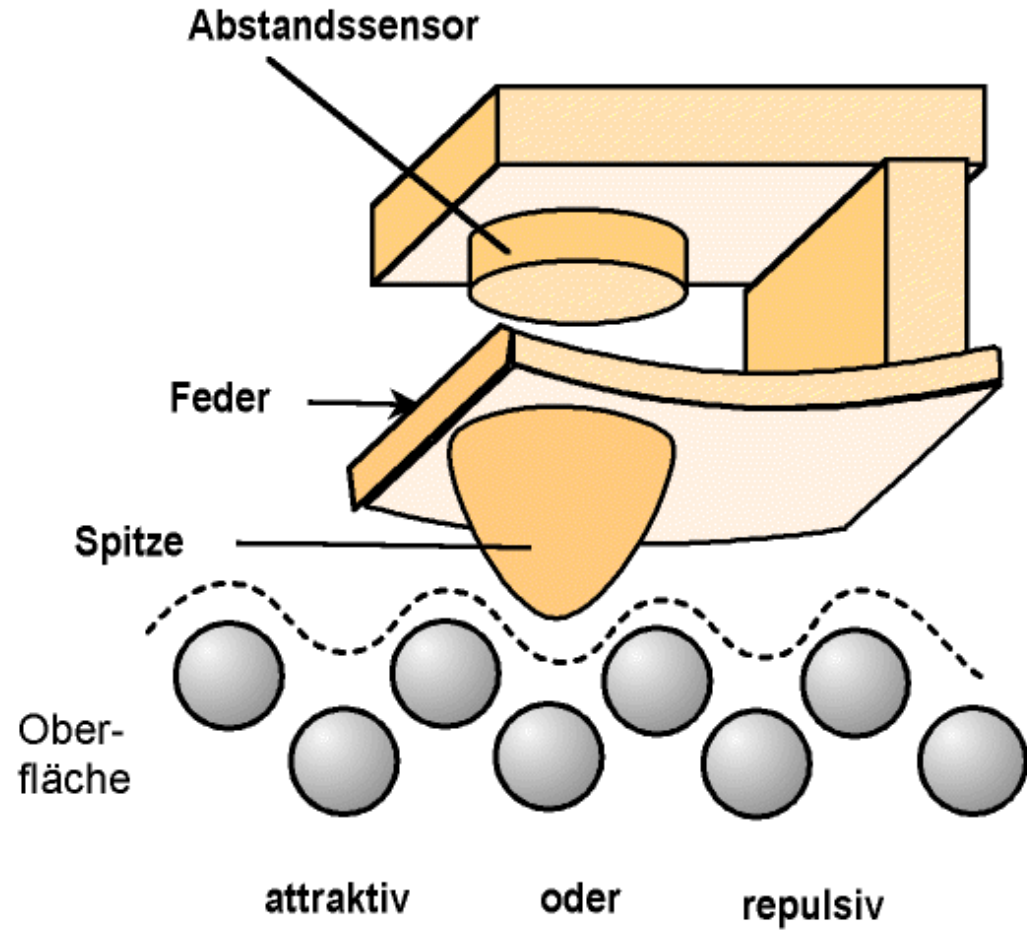
Prinzipieller Aufbau des Elektronenstrahl-Oszilloskops



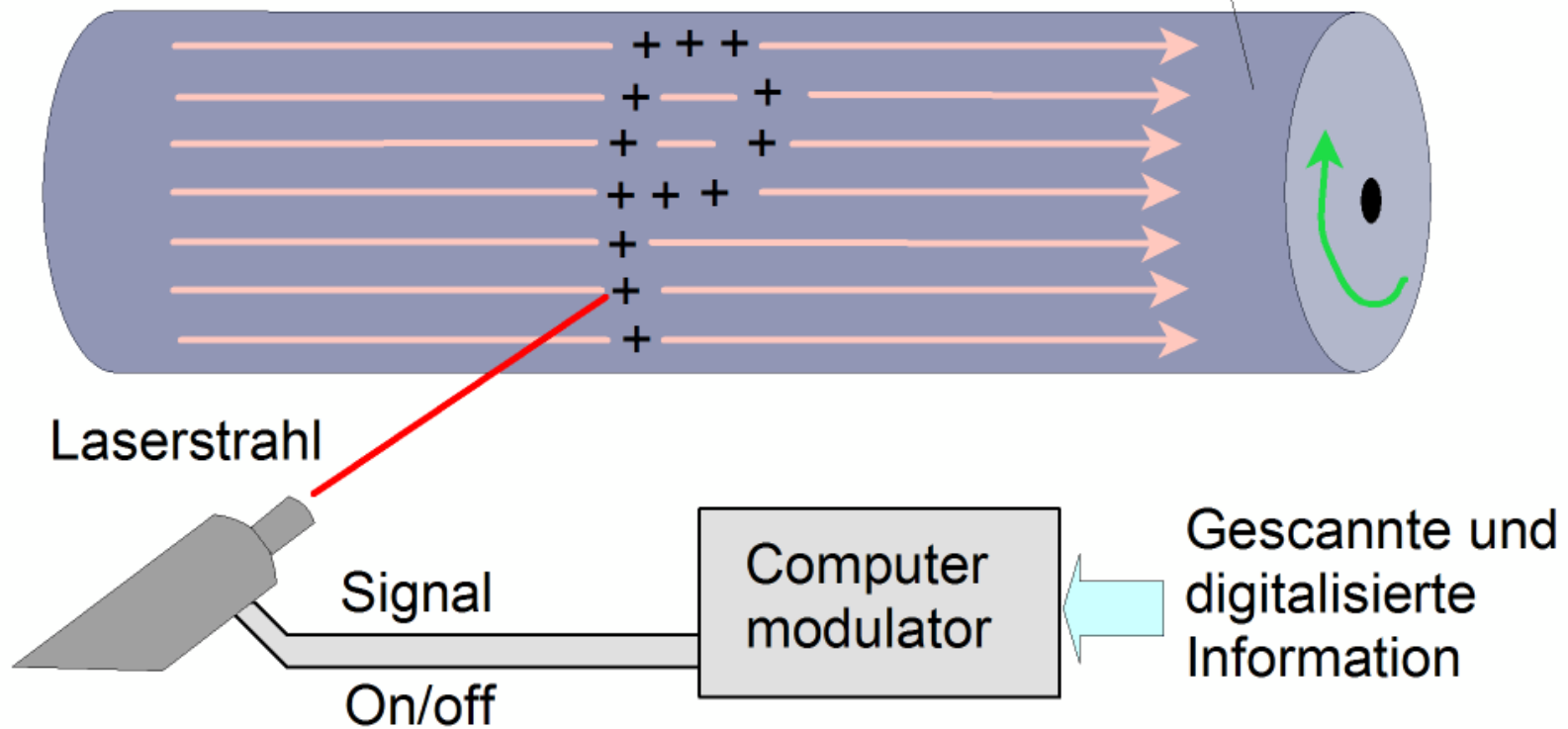
# Entstaubungsanlage



# Tunnel - Kraftmikroskop

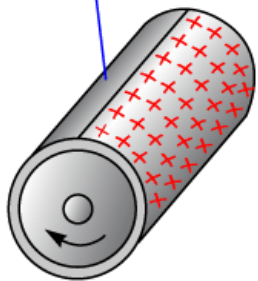


Laserstrahl "schreibt" auf die lichtempfindliche Walze



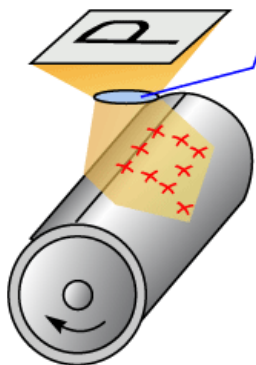


Selen-Trommel



①  
Trommel wird  
aufgeladen

Linse



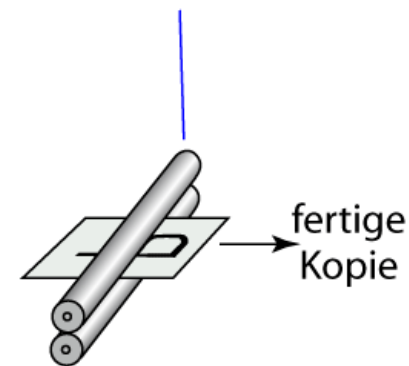
②  
Bild wird auf  
die Trommel  
projiziert

Toner  
(neg. geladen)

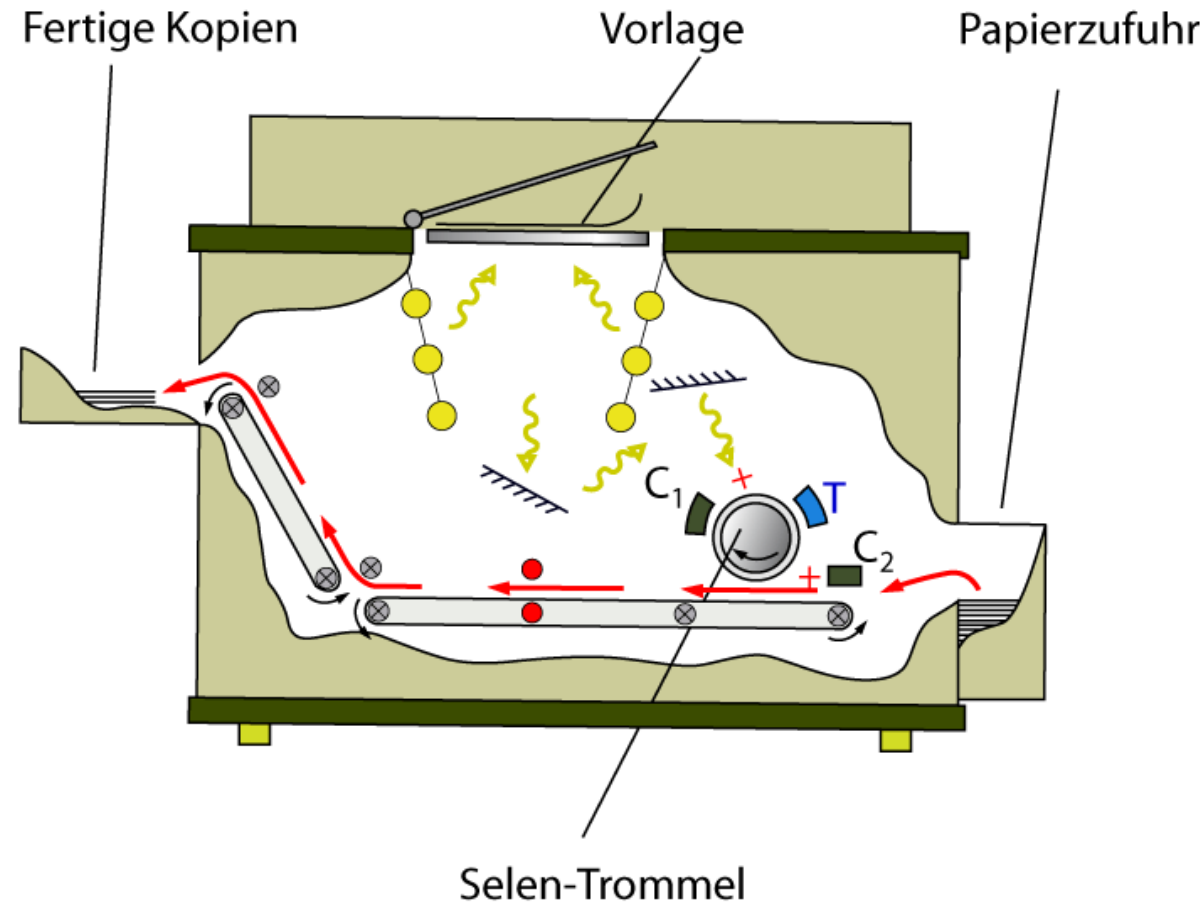
③  
Toner lagert  
sich an die  
Trommel an








④  
Toner wird  
auf das Papier  
übertragen

Walzen  
(heiß, Druck)

⑤  
Toner wird  
auf das Papier  
geschmolzen



-  = Beleuchtung
-  = Weg des Papiers
-  = Spiegel / Linsen
- C<sub>1</sub> = Elektrode zum Laden der Trommel (+)
- C<sub>2</sub> = Elektrode zum Laden des Papiers (+)
- T = Tonerdüse
-  = heiße Andruckrollen
-  = Rollen des Förderbandes