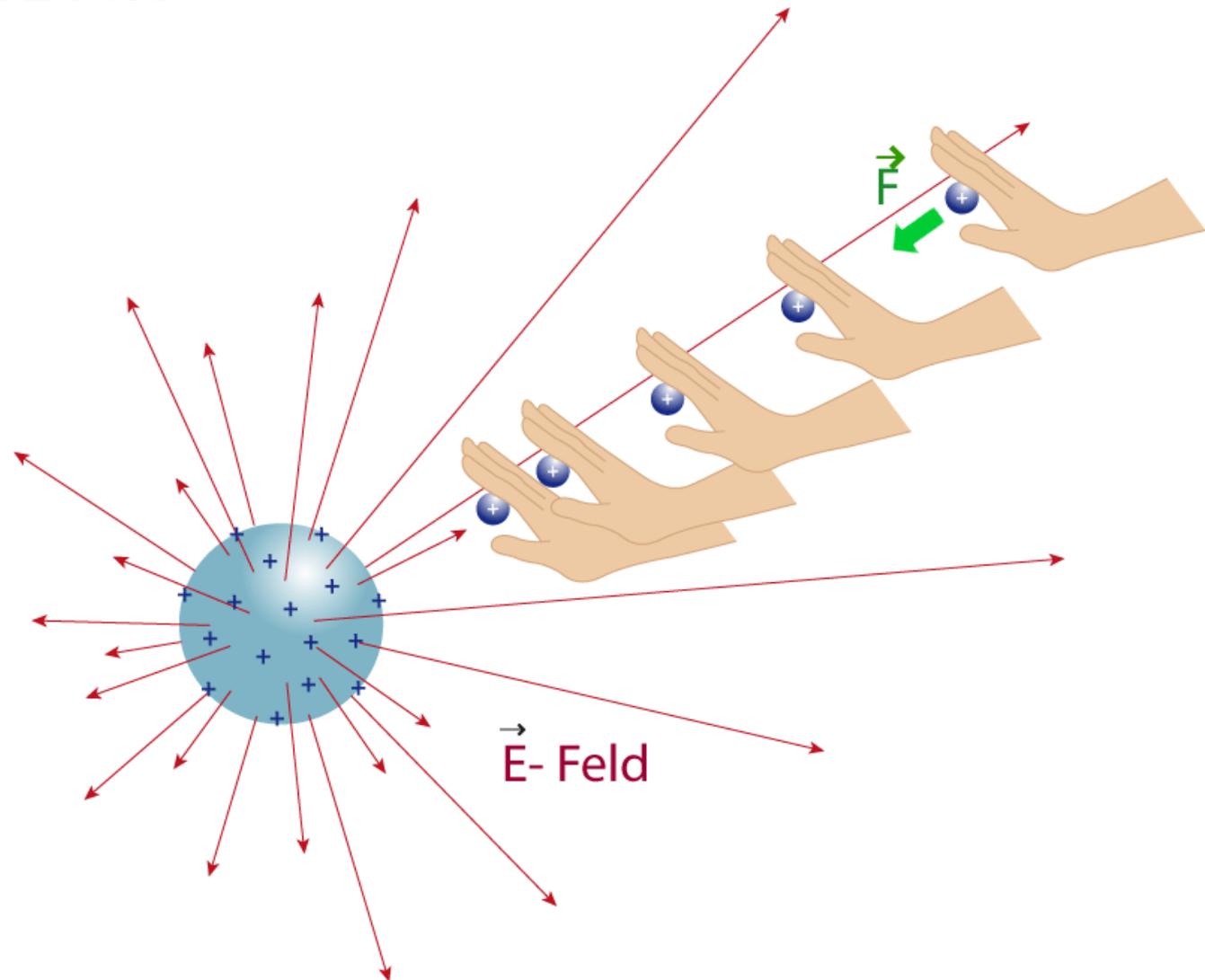




- 1.1 Elektrische Ladung**
- 1.2 Coulombgesetz**
- 1.3 Elektrisches Feld**
- 1.4 Gauß'sches Gesetz**
- 1.5 Arbeit im elektrischen Feld**
- 1.6 Ladung im E-Feld**
- 1.7 Leiter im E-Feld, Influenz**
- 1.8 Dielektrika**
- 1.9 Kapazität und Kondensator**

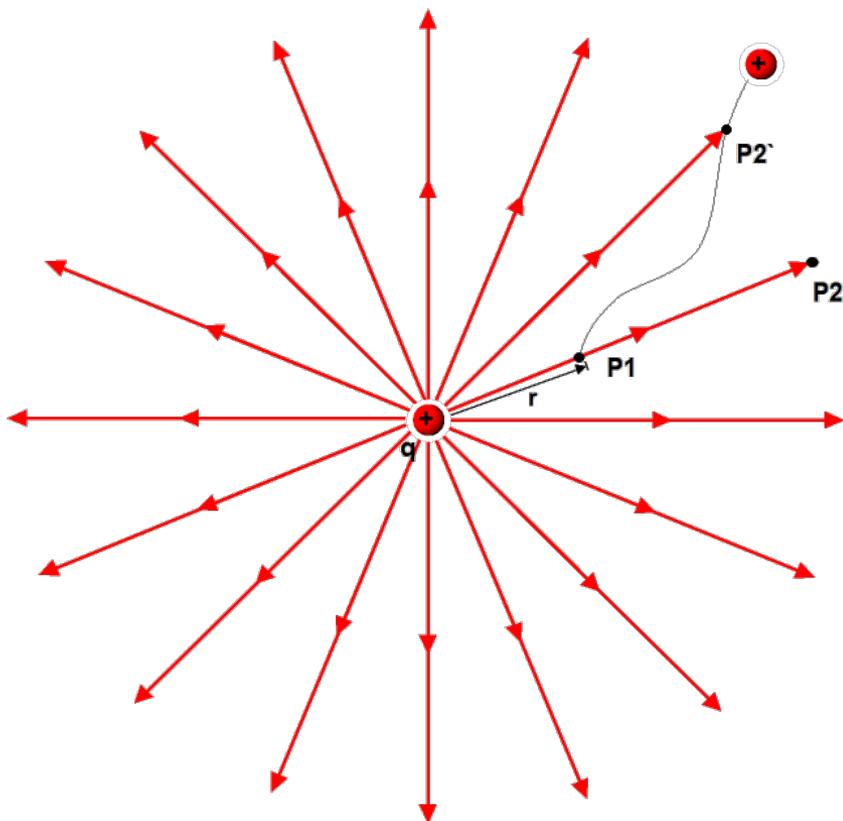
„Äußere“ Arbeit im E-Feld





Arbeit im E-Feld

- radiale Verschiebung
- Zusammensetzungen





Potential:

In einem elektrischen Feld $\vec{E}(\vec{r})$
wird von weit her (von unendlich)
eine Ladung q zum Ort \vec{r} gebracht.



Dabei muss Arbeit gegen die
Coulombkraft verrichtet werden.



Allg.: Arbeit von der Position 1 zur Position 2:

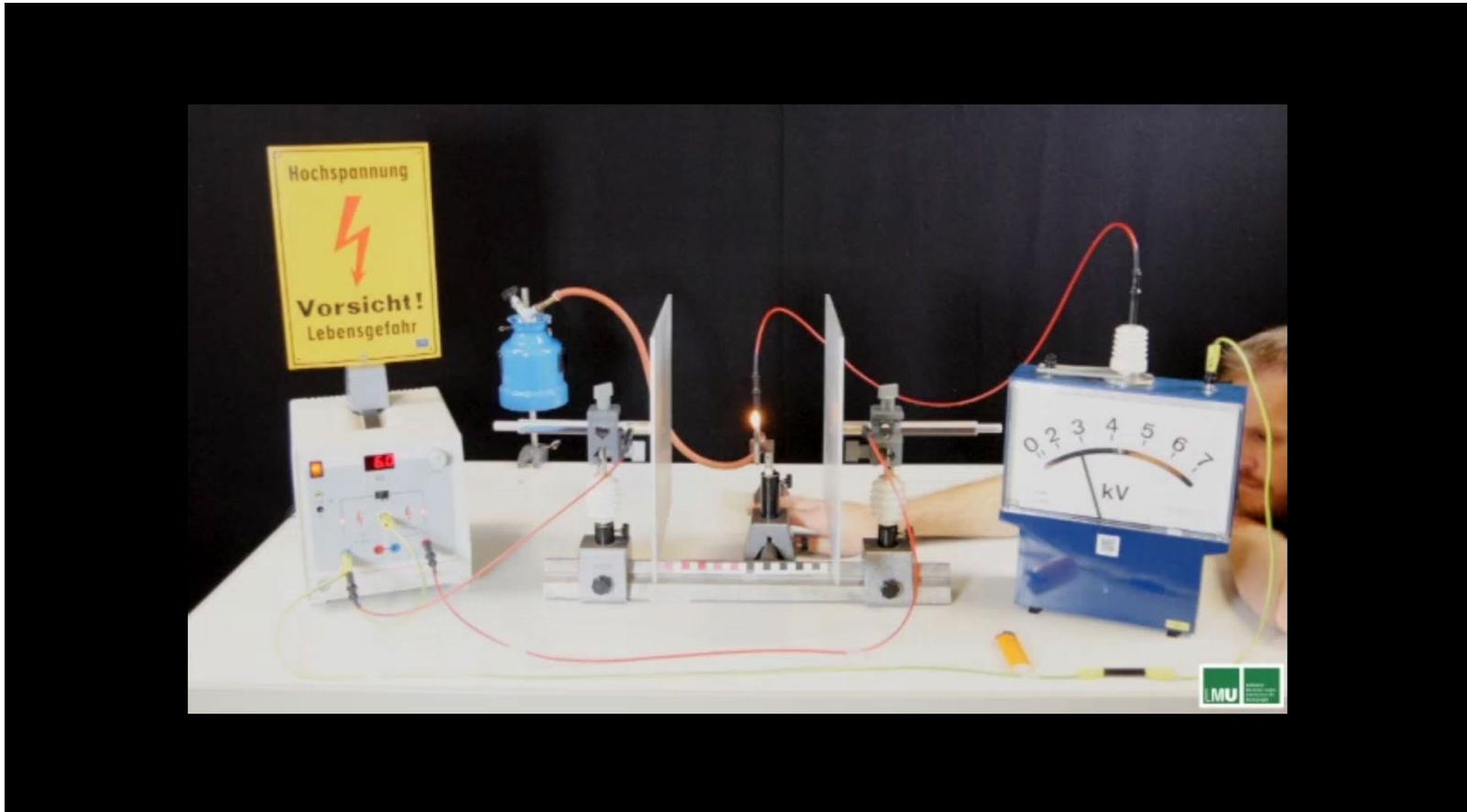
$$W_{12} = q(\varphi_2 - \varphi_1)$$

$$= q \cdot \Delta\varphi$$

Mit $\Delta\varphi$ als Potentialdifferenz

$$[\varphi] = 1V$$

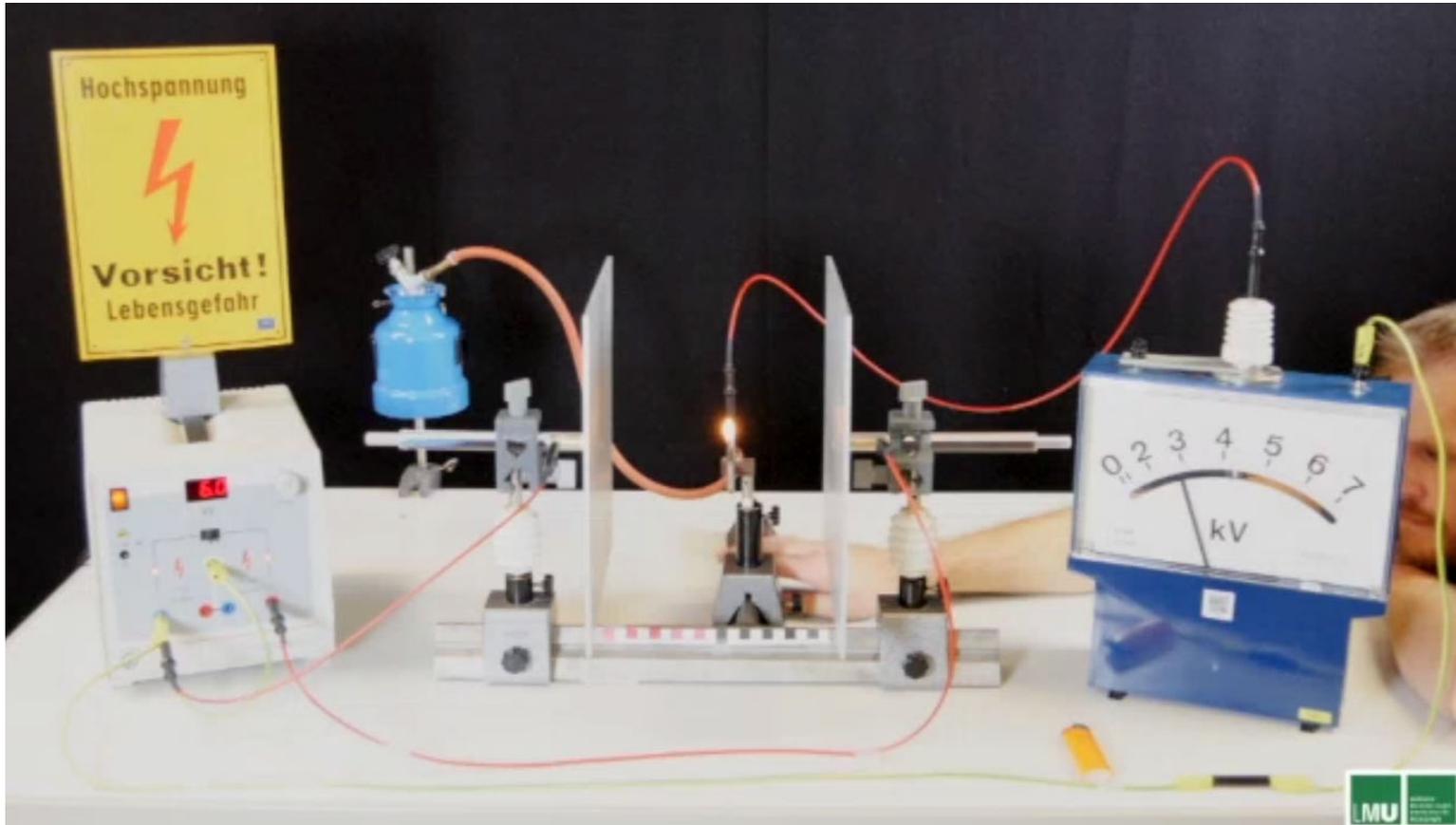
Potentialverlauf im Plattenkondensator



https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-5-Flammensonde-Pot.m4v

Äquipotentiallinien:

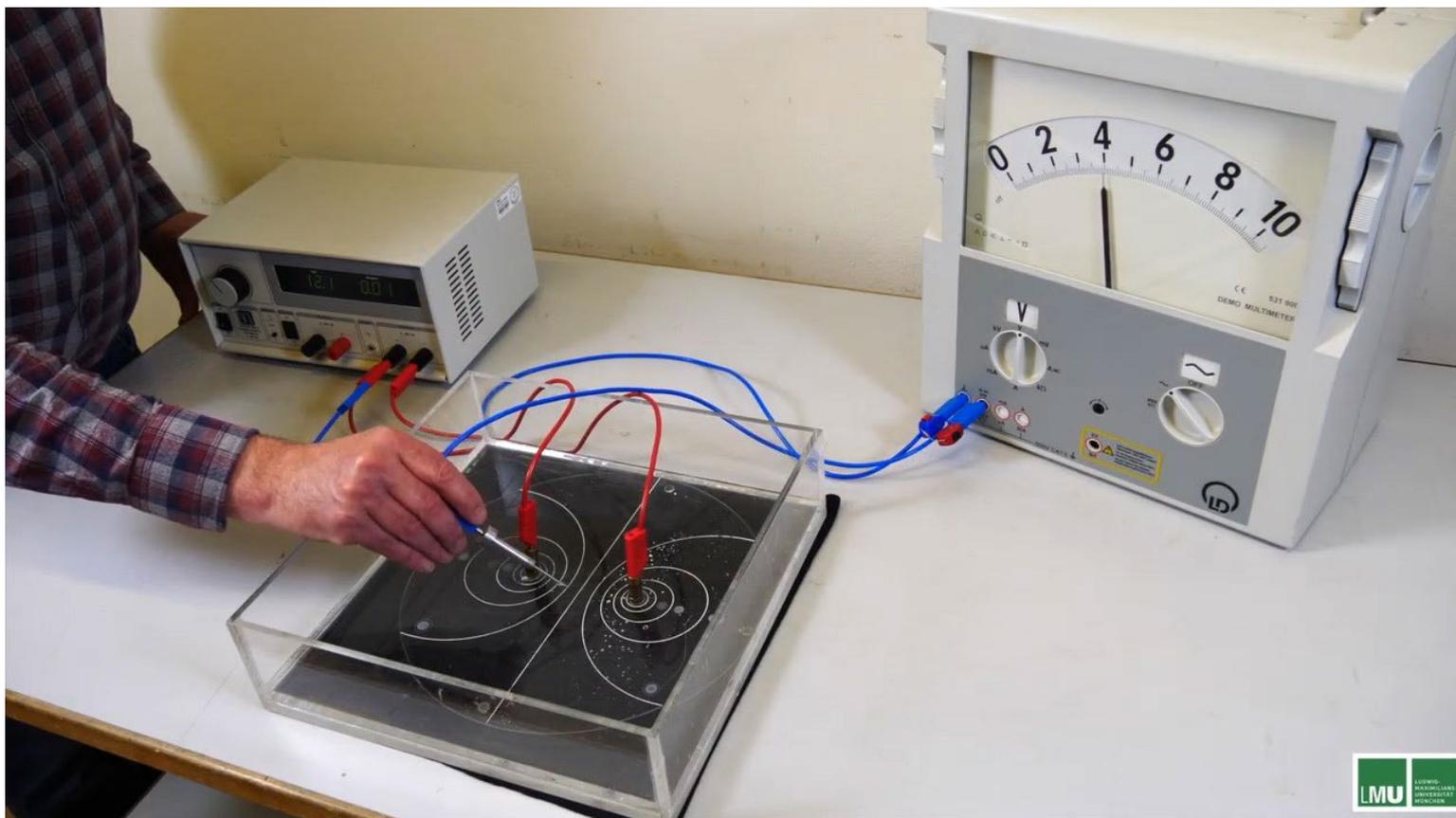
- sind Linien (Flächen) gleichen Potentials



https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-5-Aequipot_flamm.m4v

Äquipotentiallinien:

- sind Linien (Flächen) gleichen Potentials
- stehen *senkrecht* auf den elektrischen Feldlinien



https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-5-Aequipot-Linien.m4v



Potentialgradient & elektrische Feldstärke

Definition:

$$\varphi = - \int_{\infty}^{\vec{r}} \vec{E} d\vec{s}$$



Potentialgradient & elektrische Feldstärke

Definition:

$$\varphi = - \int_{\infty}^{\vec{r}} \vec{E} d\vec{s}$$

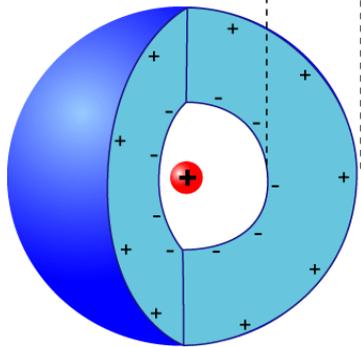
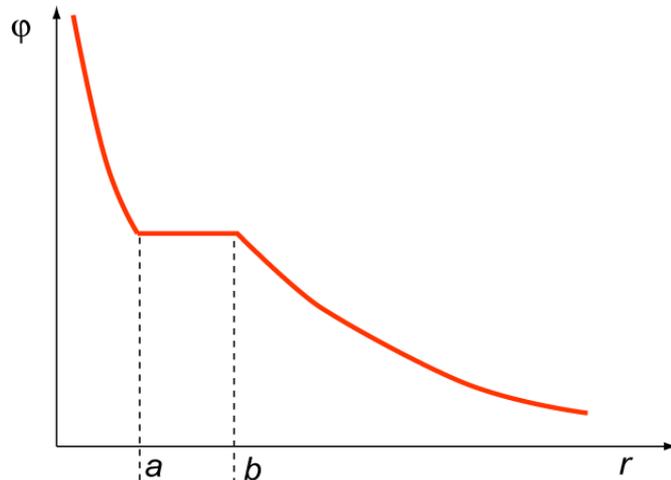
"Umkehrung" / Ableitung nach 3 Raumrichtungen:

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi$$

$$\vec{E} = - \left(\frac{d\varphi}{dx} \vec{e}_x + \frac{d\varphi}{dy} \vec{e}_y + \frac{d\varphi}{dz} \vec{e}_z \right)$$

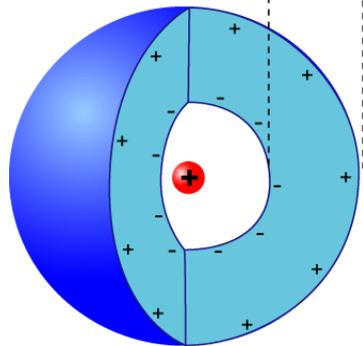
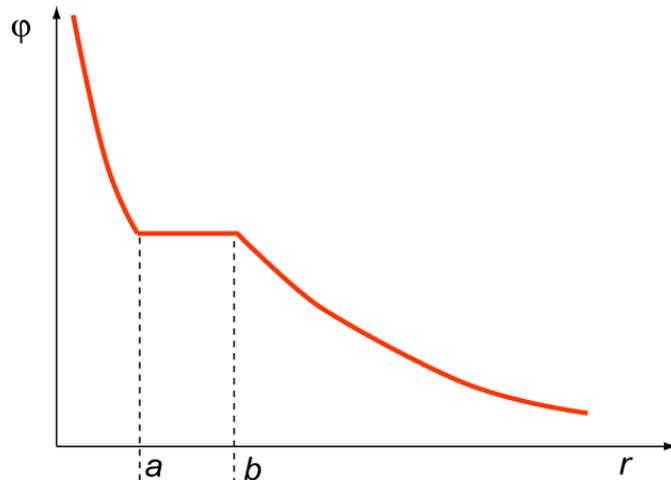


Potentialverlauf bei einer konzentrischen Kugel



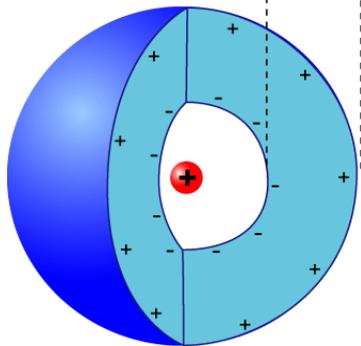
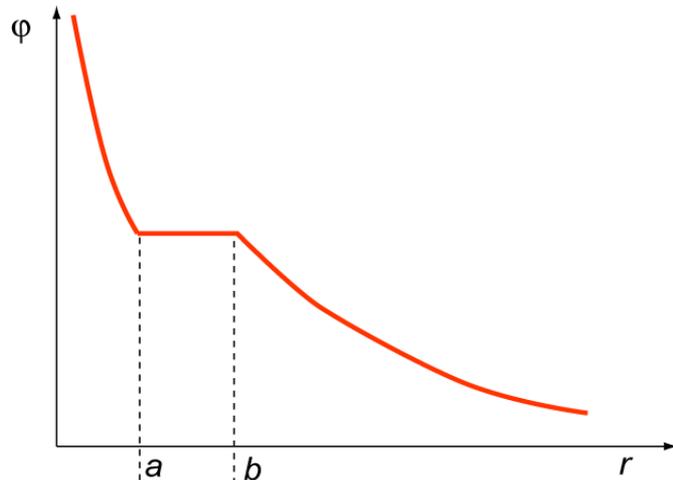


Potentialverlauf bei einer konzentrischen Kugel



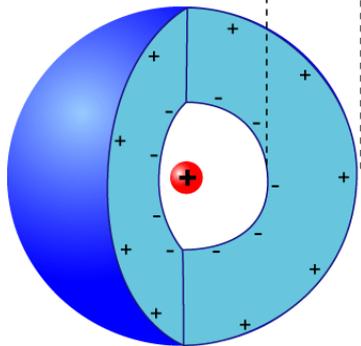
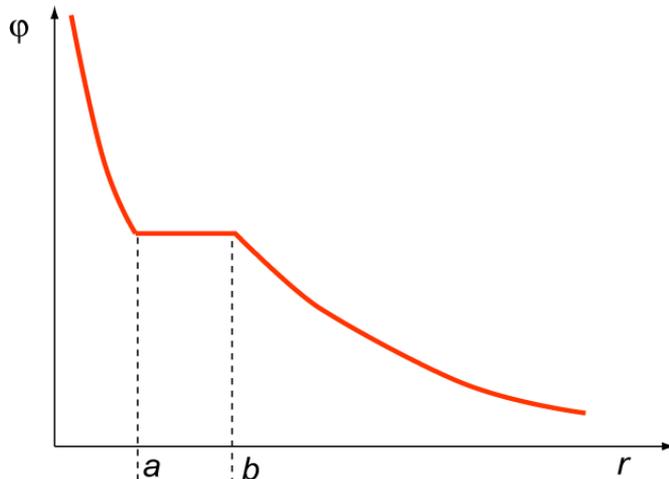


Potentialverlauf bei einer konzentrischen Kugel





Potentialverlauf bei einer konzentrischen Kugel



$$\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q}{r} - \frac{q}{a} + \frac{q}{b} \right];$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{b};$$

$$\varphi_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r};$$



Wird eine Ladung zwischen Punkten unterschiedlichen Potentials verschoben, ändert sich die potentielle Energie.

Wir nennen die elektrische Potentialdifferenz eine elektrische Spannung zwischen den beiden Punkten \vec{r}_1 und \vec{r}_2



Wird eine Ladung zwischen Punkten unterschiedlichen Potentials verschoben, ändert sich die potentielle Energie.

Wir nennen die elektrische Potentialdifferenz eine elektrische Spannung zwischen den beiden Punkten \vec{r}_1 und \vec{r}_2

$$U_{12} = \varphi(\vec{r}_1) - \varphi(\vec{r}_2);$$

Die Einheit der elektrischen Spannung $[U]$ ist ein *Volt*.



Spannungsquellen:

Blitz	10 000 000 V
Fernsehröhre	20 000 V
„Steckdose“	230 V
Max. Berührungsspannung (VDE)	65 V
Batterie-Zelle	1.5 V
Membranspannung (Zelle)	0.05 V



Rechenbeispiele für Potentialverteilungen bei verschiedenen Ladungsanordnungen:

geladene Kugel

"unendlich" ausgedehnte Ladungsschicht

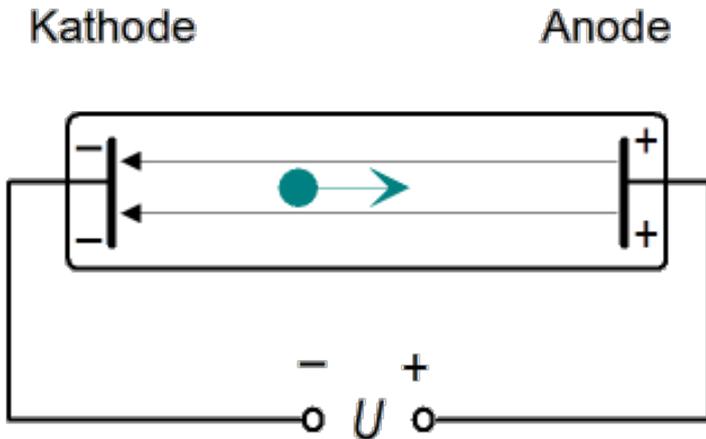
"unendlich" lange Linienladung

idealer Plattenkondensator



Vakuumpipeline (Prinzipische Skizze)

Elektronen werden zur Anode hin beschleunigt,
da sie negativ geladen sind
(vereinfachend: homogenes Feld):



U : Elektrodenspannung

d : Elektrodenabstand

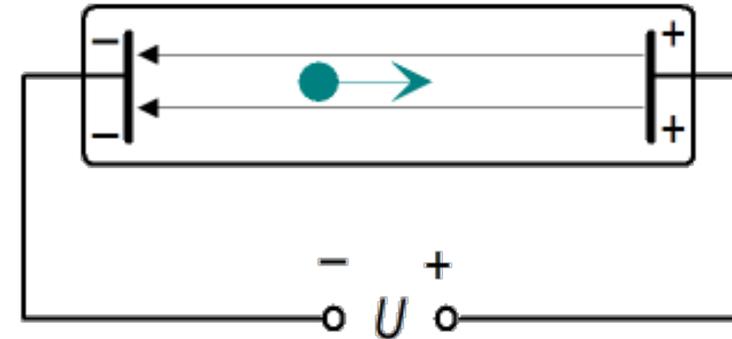
m : Elektronenmasse

a : Elektronenbeschleunigung

Vakuumpipeline (Prinzipskizze)

Kathode

Anode



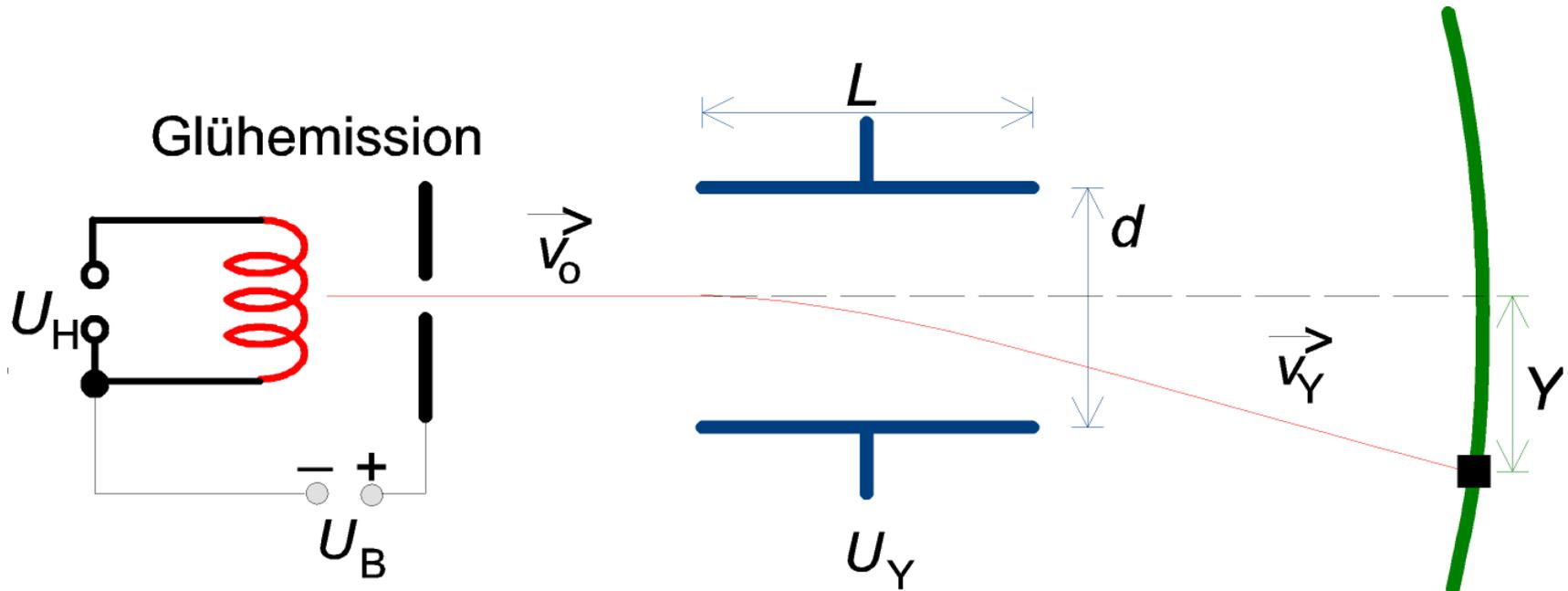
$$W_{kin} = e \cdot U$$

Nach Durchfliegen der Potentialdifferenz (Spannung) U hat ein Elektron die kinetische Energie $e \cdot U$ gewonnen.

oft gebrauchte Energieeinheit: Elektronenvolt eV

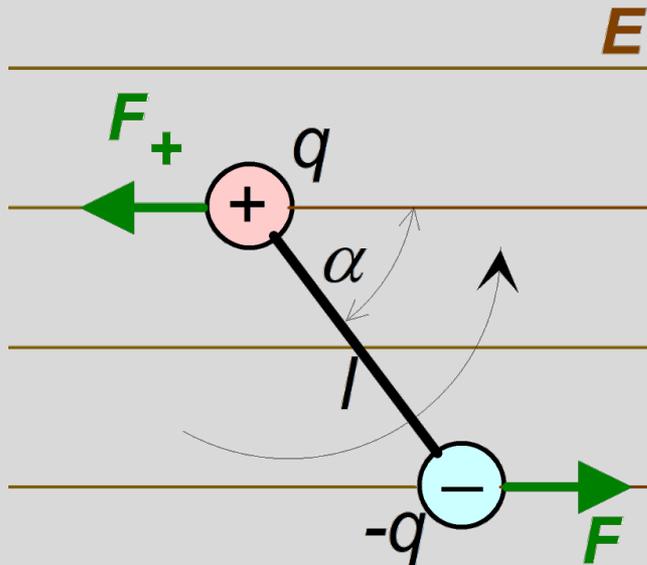
$$\begin{aligned} 1\text{eV} &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

Kathodenstrahlröhre (Braunsche Röhre)



Die Strahlauslenkung ist proportional zur Spannung an den „Ablenkplatten“
-> siehe auch

<http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/multimedia/elektronenablenkroehre>



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

$$W_p = \vec{p} \cdot \vec{E}$$

(siehe Rechenbeispiel)



- Ein Leiter im elektrostatischen Gleichgewicht trägt die el. Ladung auf der Oberfläche.
- Das E-Feld im Innern des Leiters verschwindet.
- Unmittelbar außerhalb besitzt es die Stärke:

$$\frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (\sigma: \text{Oberflächenladungsdichte})$$

- **Influenz:**
In einem äußeren Feld verlagern sich die Ladungen im Leiter



- Rechnung: Unmittelbar an Oberfläche von Leitern:

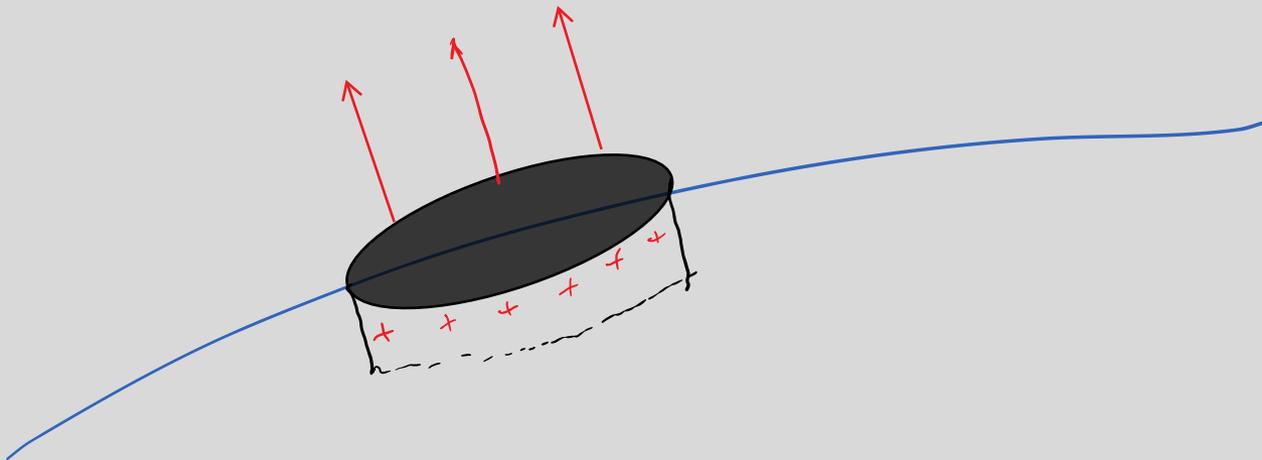
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (\sigma: \text{Oberflächenladungsdichte})$$





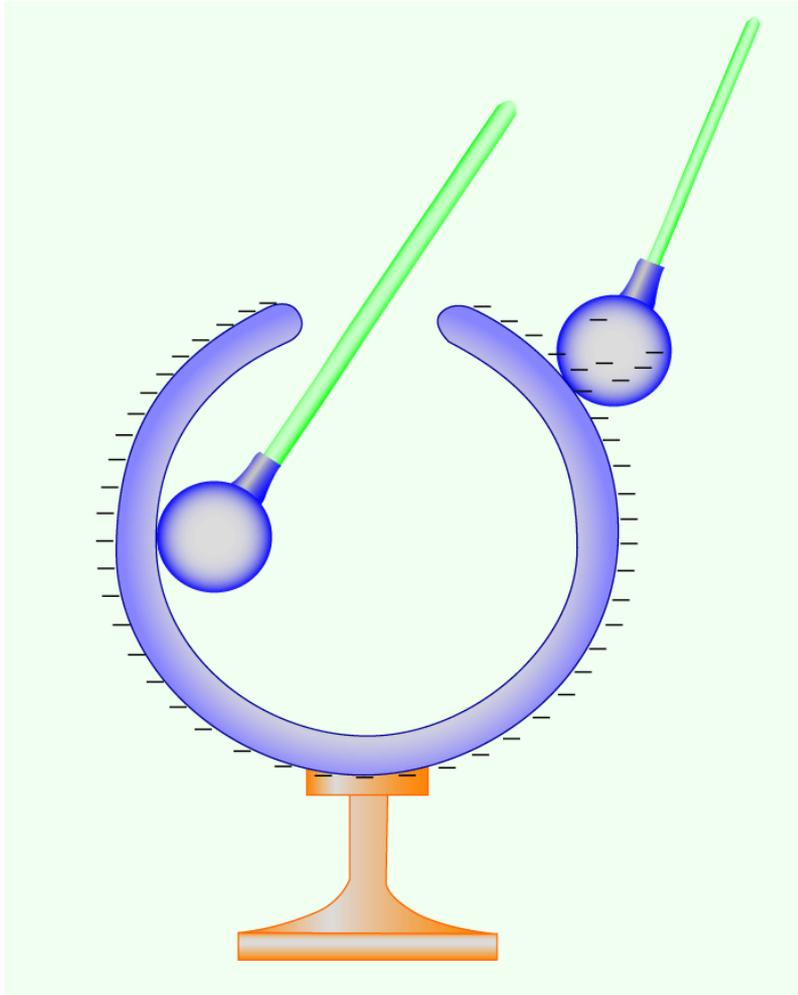
- Rechnung: Unmittelbar an Oberfläche von Leitern:

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (\sigma: \text{Oberflächenladungsdichte})$$



$$\oint \vec{D} \, d\vec{A} = \epsilon_0 \cdot E \cdot A = \frac{\sigma \cdot A}{\epsilon_0}$$

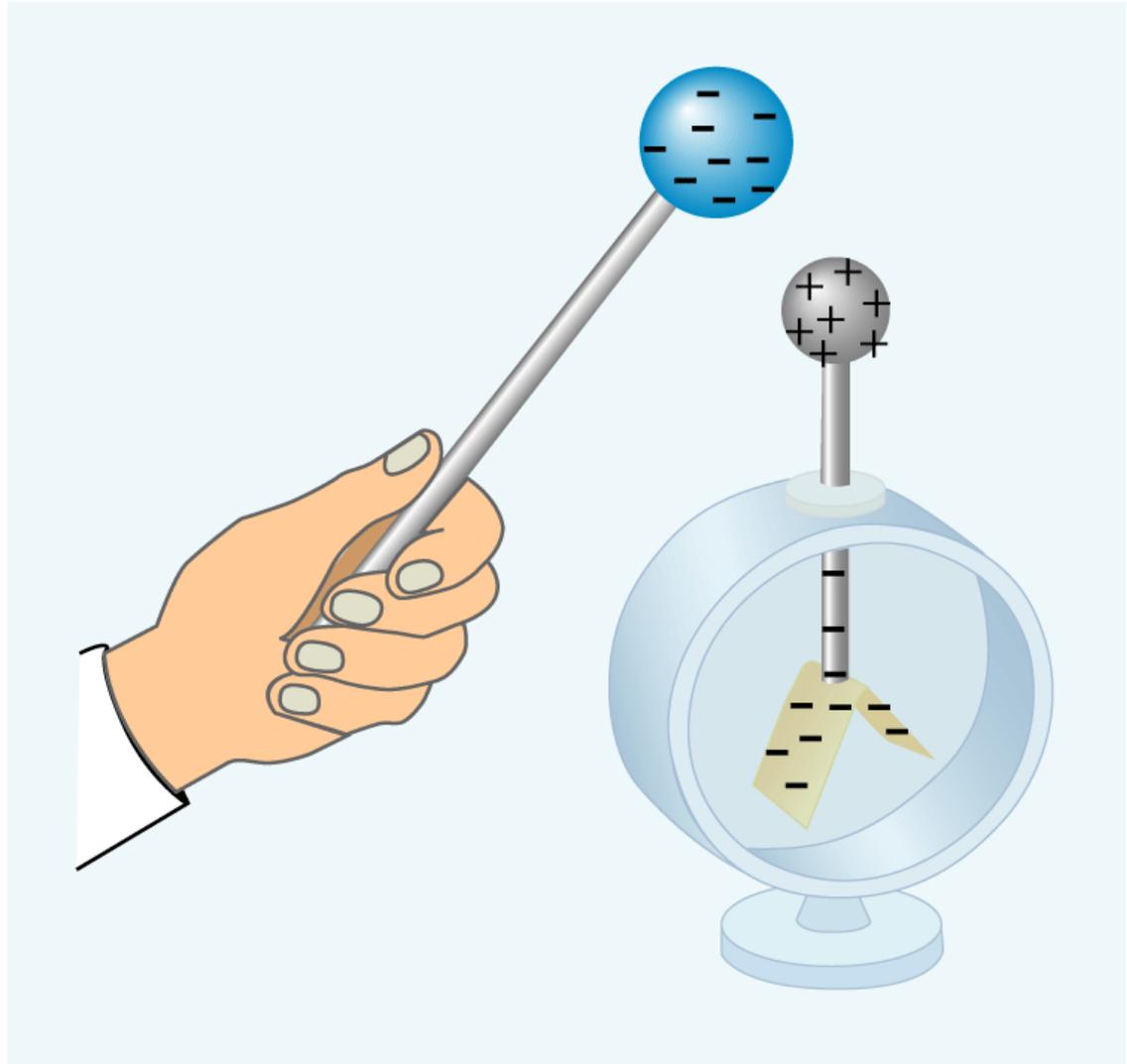
◆ Ladung auf Leitern:



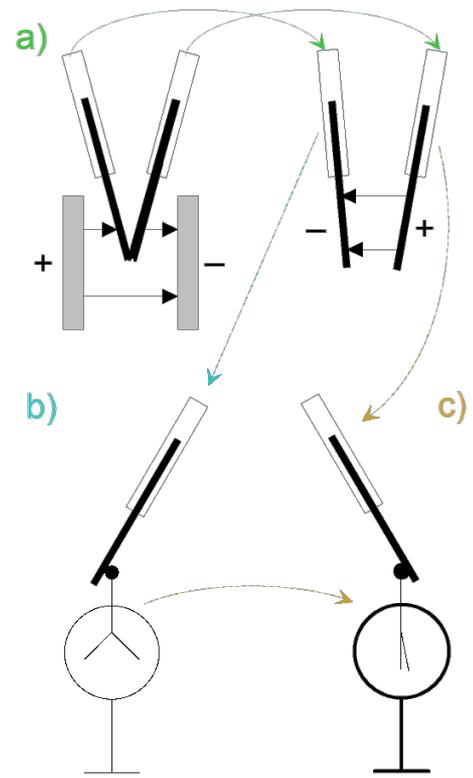
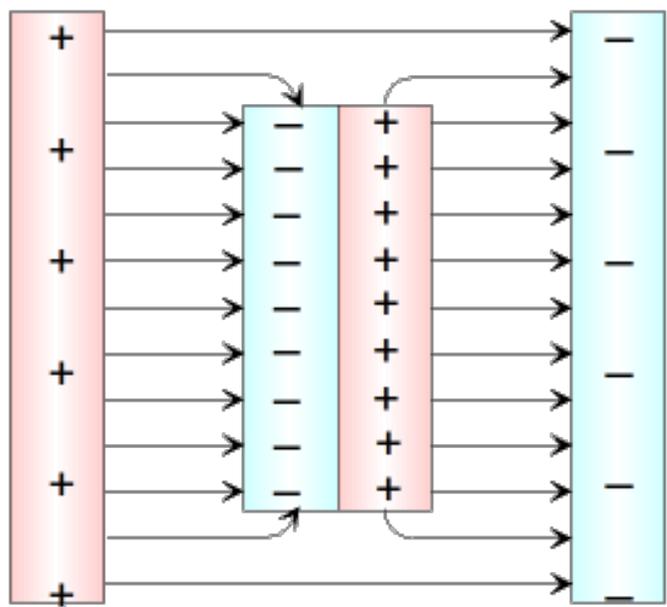
↘ Influenz:



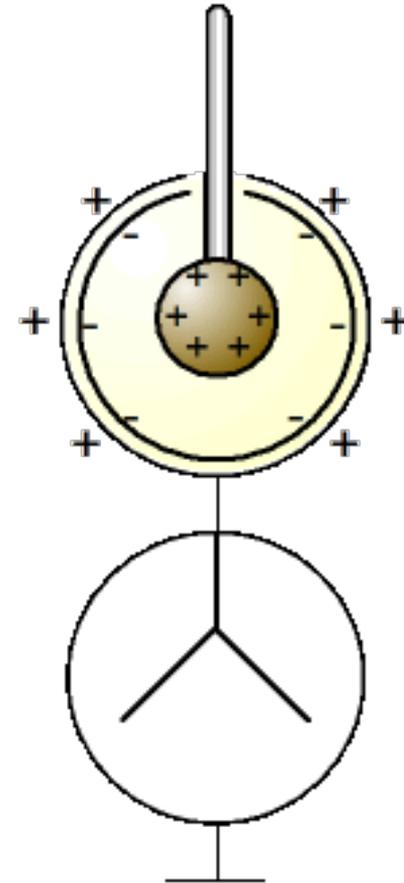
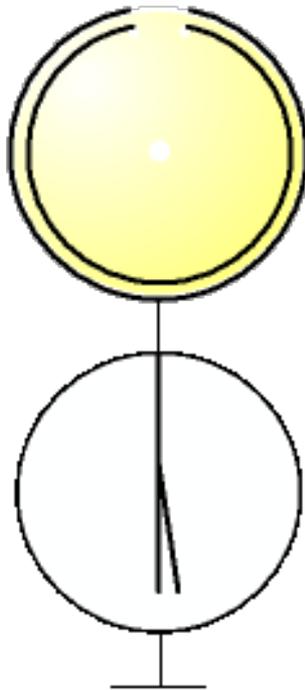
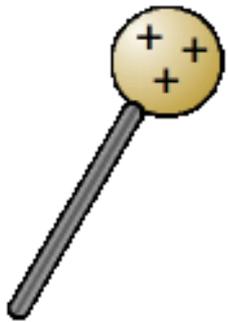
➔ zur Influenz:



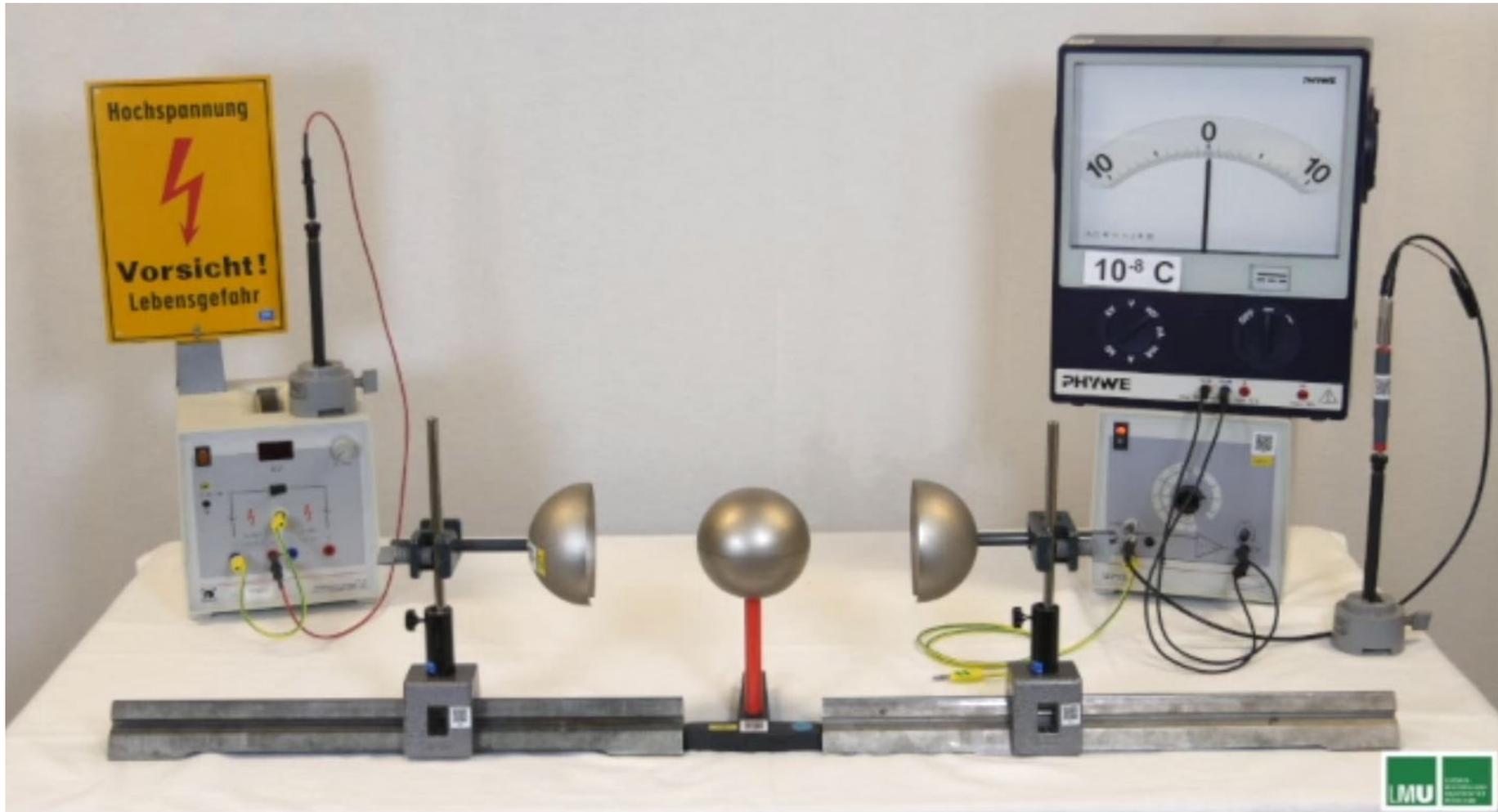
zur Influenz:



↘ Influenz:



➔ Influenz:



https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-7-Cavendish.m4v



➔ Influenz bei elektrischen Leitern:

Elektrische Leiter enthalten frei bewegliche Ladungsträger, die in el. Feldern infolge der Coulombkraft verschoben werden.

Für geladene elektrische Leiter gilt:

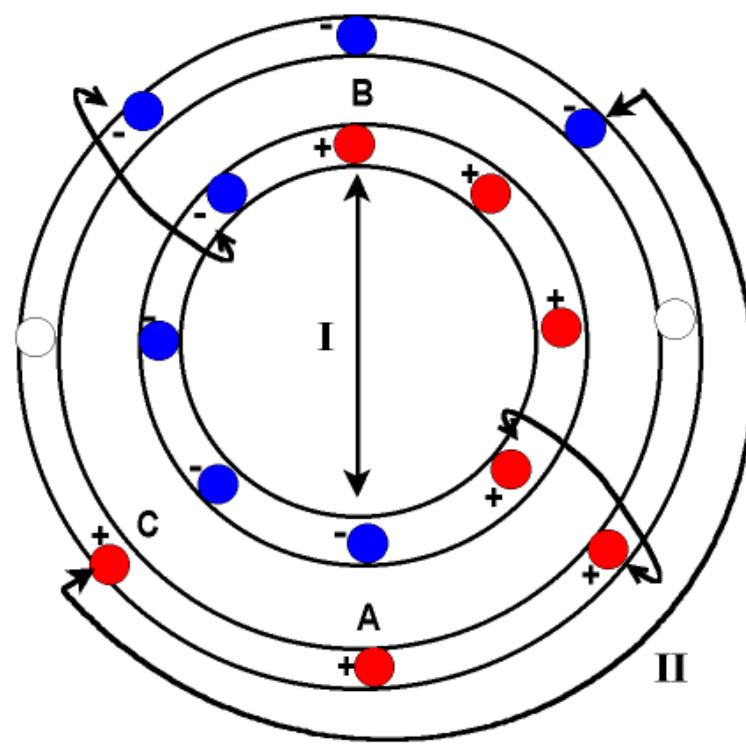
- **Alle Ladungen sitzen auf der Oberfläche**
- **Das el. Feld im Innern ist Null**
- **Das el. Potential im Innern ist konstant**

↘ Influenzmaschine

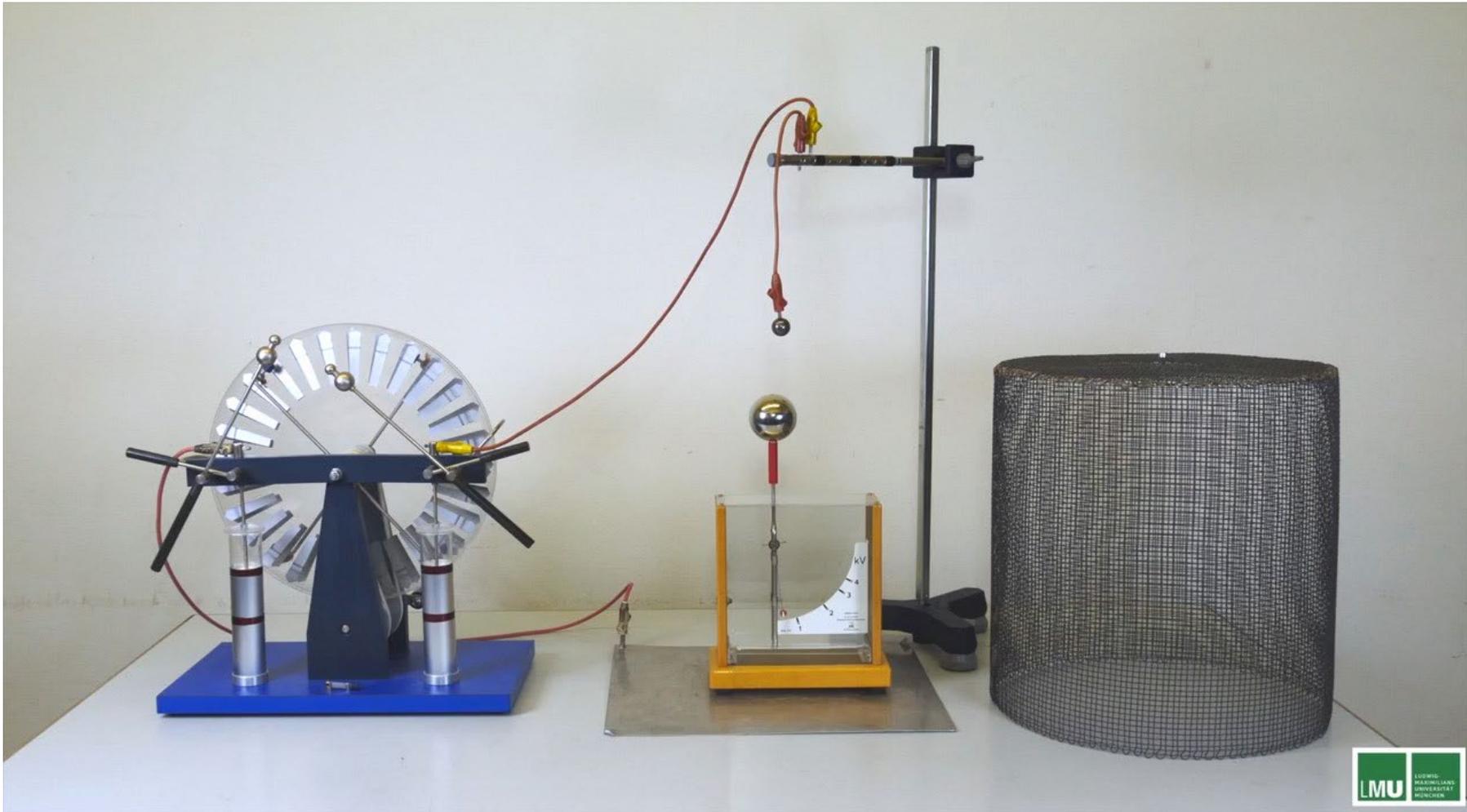


https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-7-Influenzmaschine.m4v

◆ Beispiele zur Influenz:

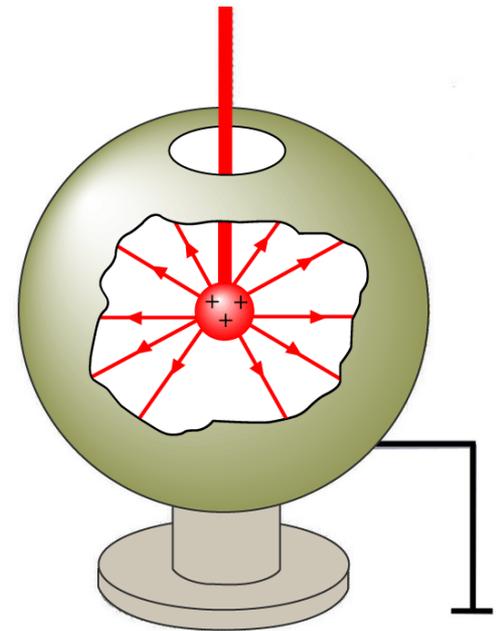


➔ Influenz:

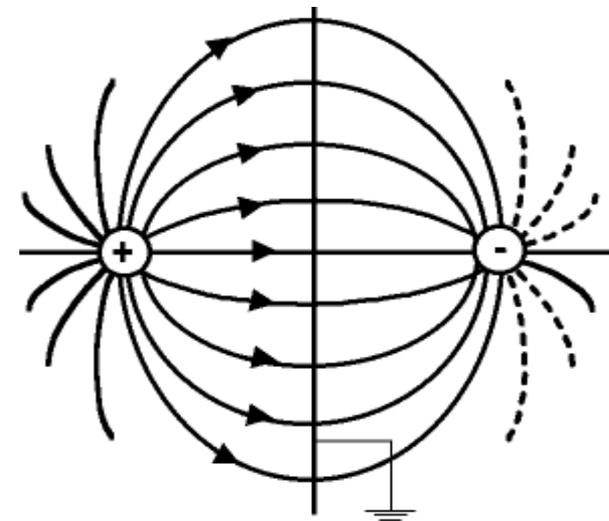


◆ Beispiele zur Influenz:

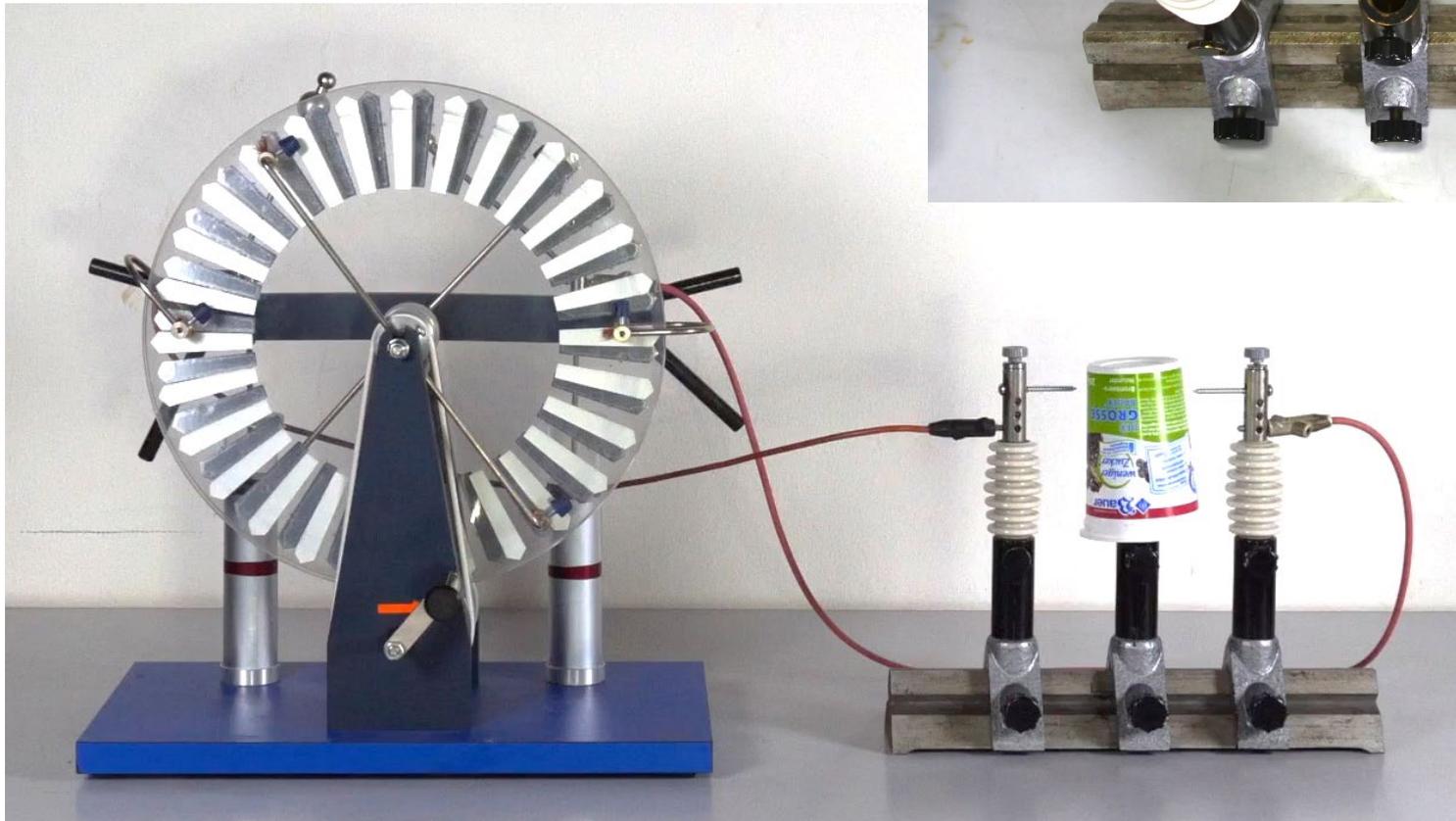
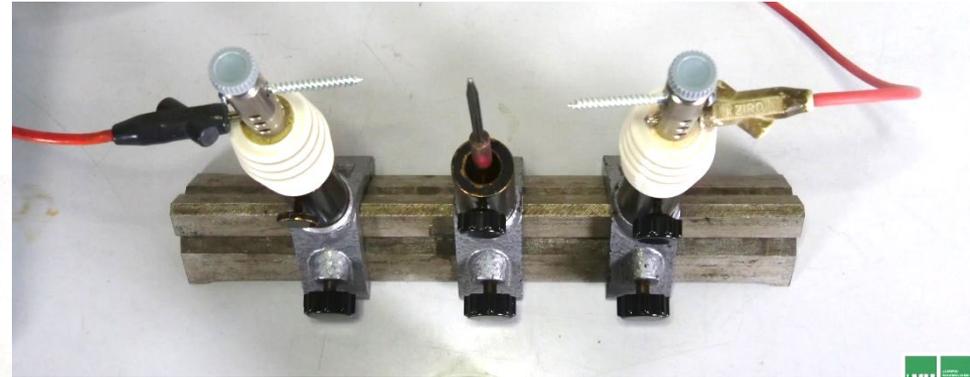
■ Abschirmung



■ Spiegelladung:



➔ Influenz:



https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-7-Influenzrotor.m4v



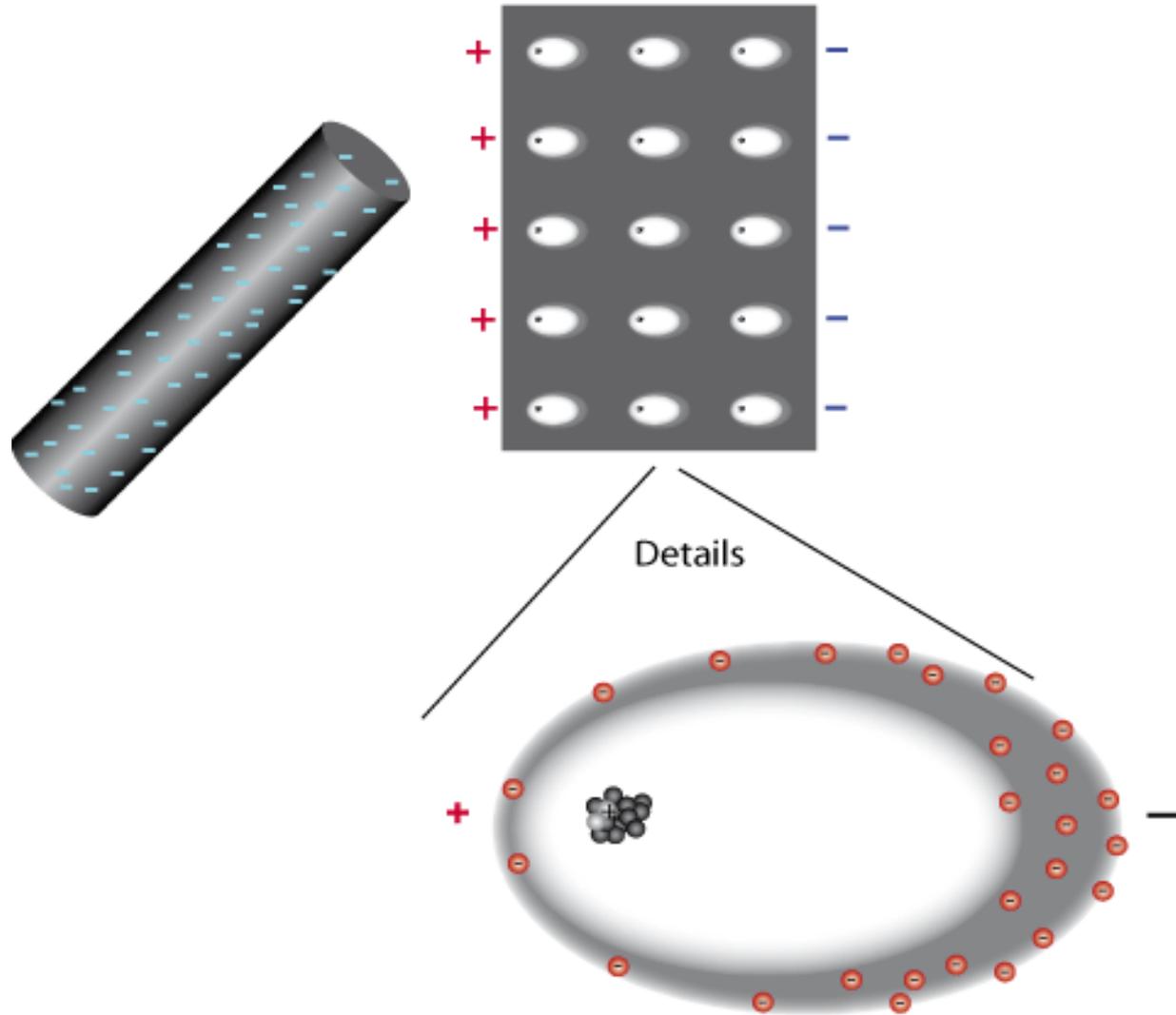
Dielektrika & Polarisierung im E-Feld

https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-8-Dielekt-Schnitzel.m4v

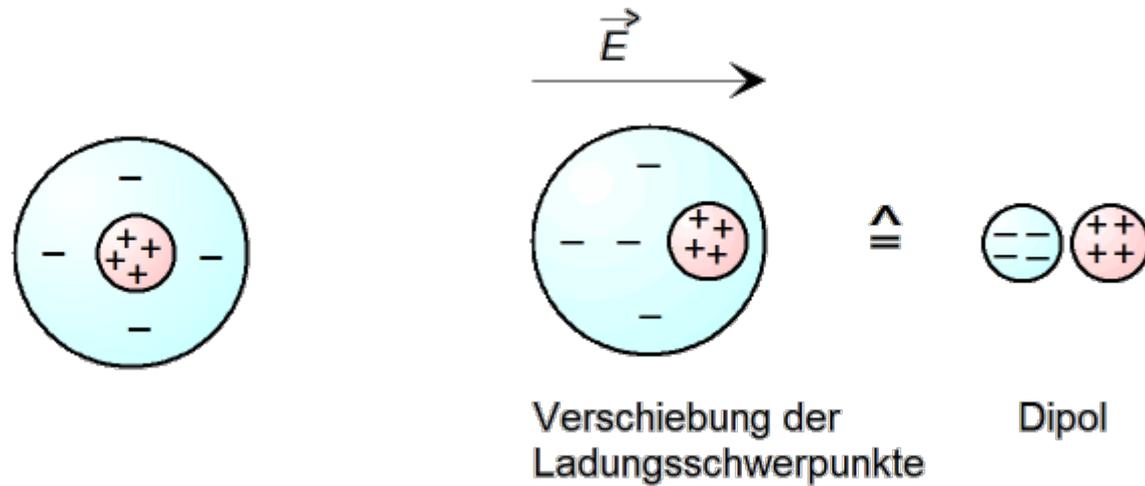
◆ Influenz bei Nicht-Leitern:



◆ "Influenz" / Ladungsverschiebung bei Isolatoren



A) Unipolare Atome / Moleküle:



- Im E-Feld wird ein Dipolmoment induziert:

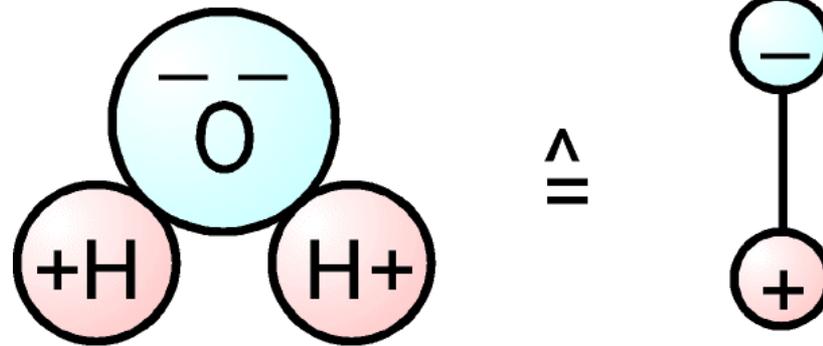
$$\vec{p} = q \cdot \vec{a} \quad (\vec{a} \text{ von } -q \text{ nach } +q)$$

$$\vec{p} = \alpha \cdot \vec{E}$$

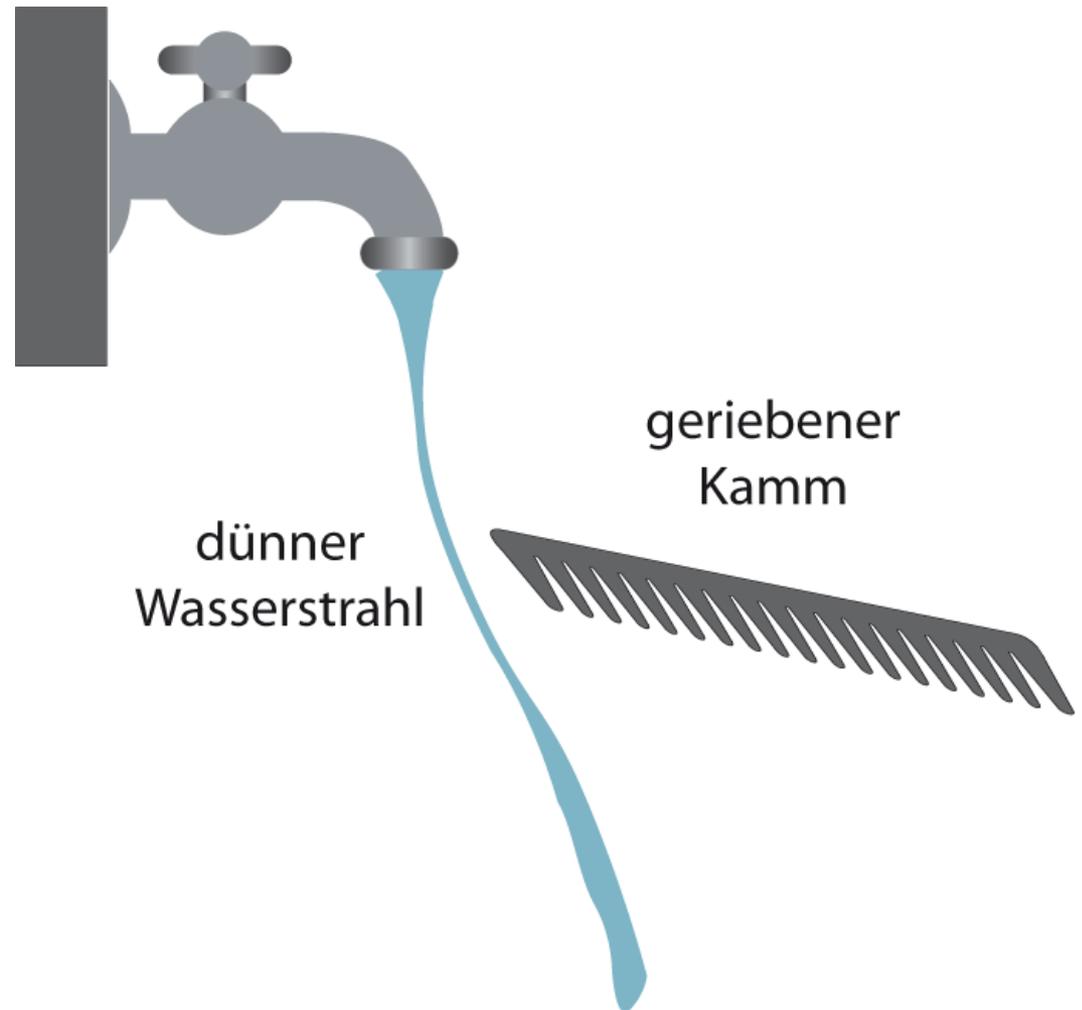


B) Polare Atome / Moleküle

(haben auch ohne E -Feld ein Dipolmoment)



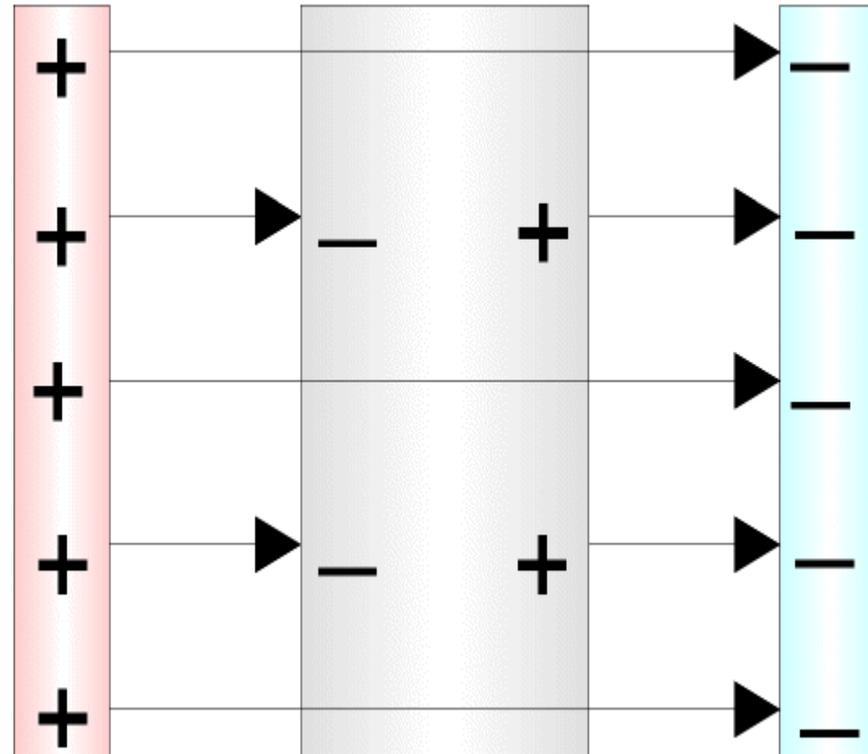
◆ Kraftwirkung auf Dielektrika



https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-8-Wasserablenk.m4v



Dielektrika im E-Feld





- Def. ϵ_r : relative Dielektrizitätskonstante

$$E_{Diel} = \frac{E_0}{\epsilon_r}$$

$$D = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot E$$

(D : Dielektrische Verschiebung)



■ **Relative Dielektrizitätskonstanten:**

Luft: 1,0006

Schwefel: 4,0

Quarz: 4,3

Kochsalz: 6,1

Porzellan: 7,0

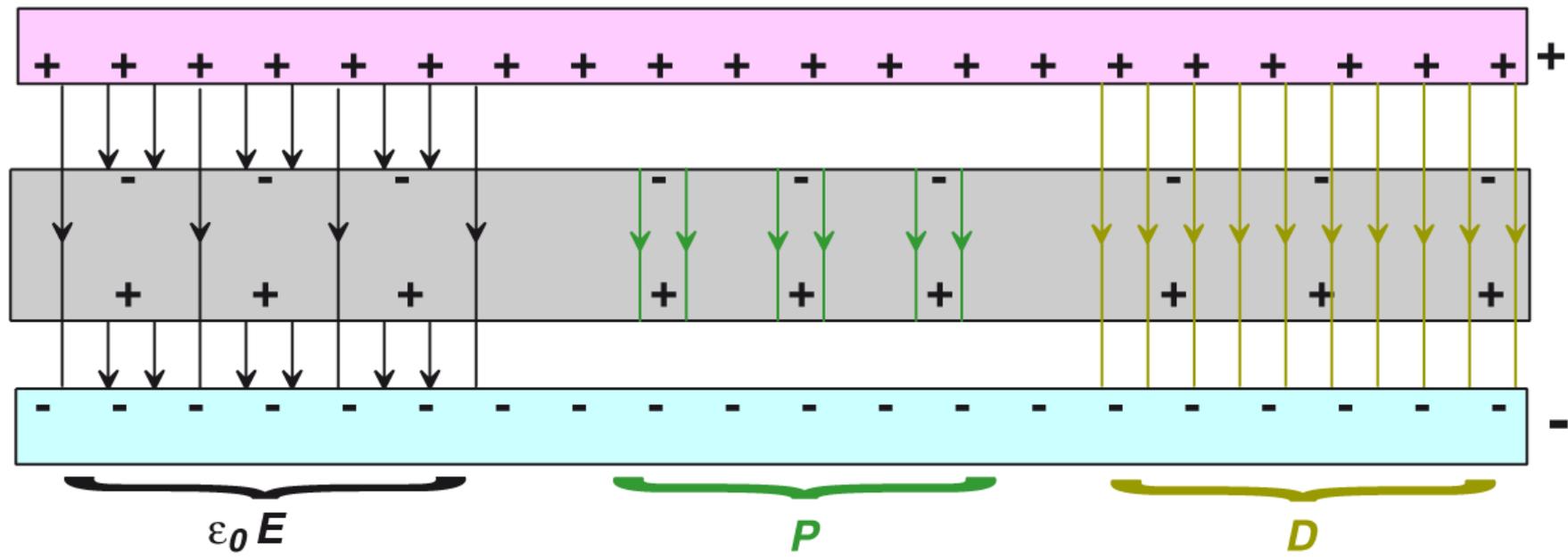
Trafoöl: 2,3

Methanol: 36,0

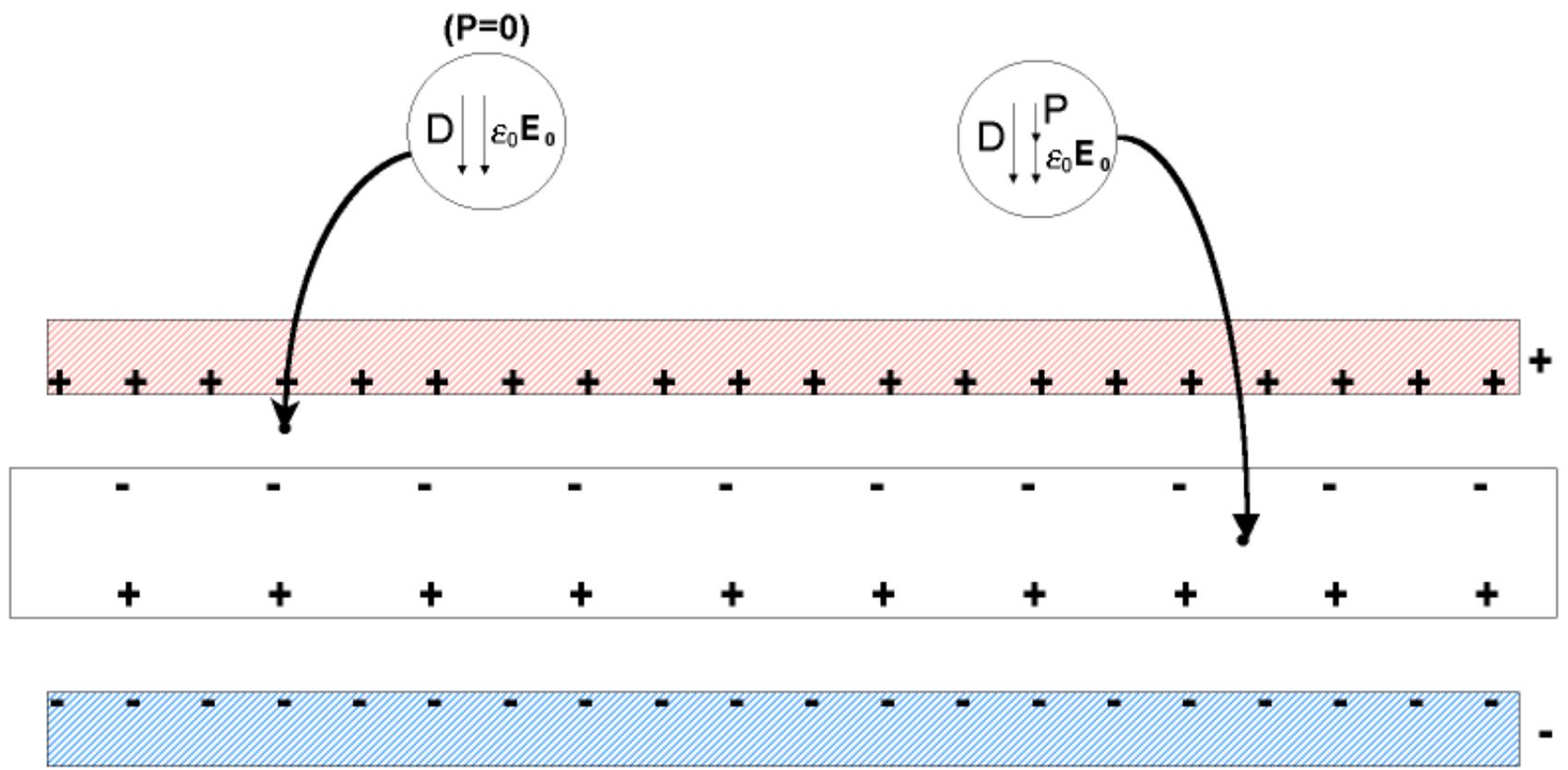
Wasser: 81,0

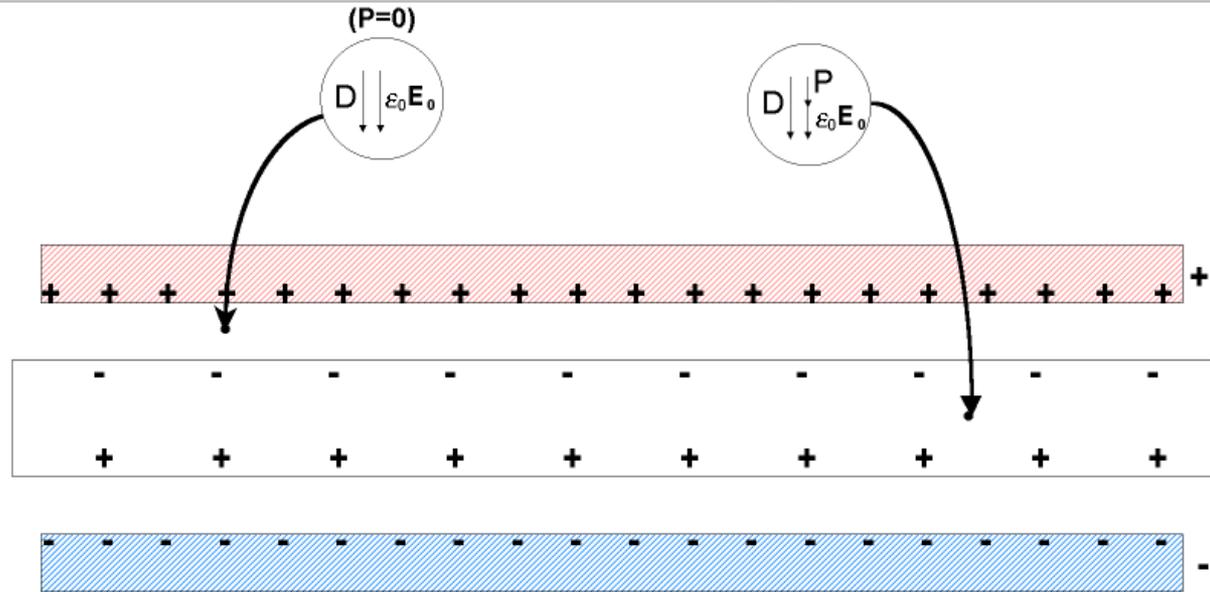
◆ Vorstellung:

- **D-Feldlinien** verbinden freie Ladungen
- **P-Feldlinien** verbinden induzierte Dipole (Richtung wie Dipolvektor)
- **E-Feldlinien** verbinden „Nettoladungen“



➔ Vorstellung:





Gesetz von Gauß

$$\oint \vec{D} d\vec{A} = Q_{\text{frei}}$$

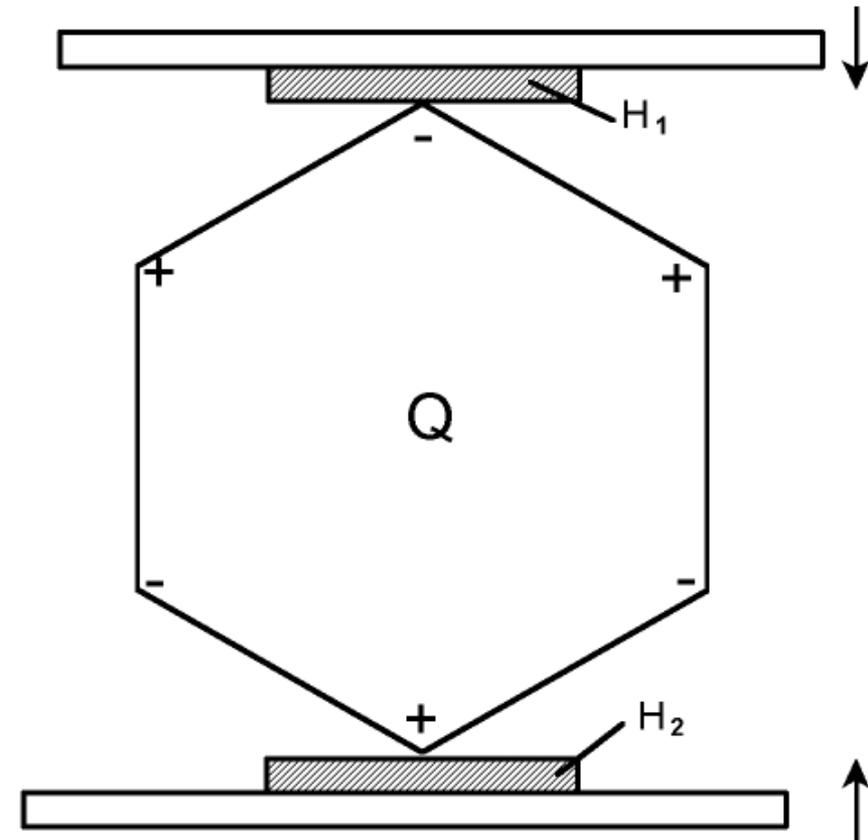
$$D = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot E$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P}$$

\vec{P} : Polarisation
(Dipolmomentdichte)

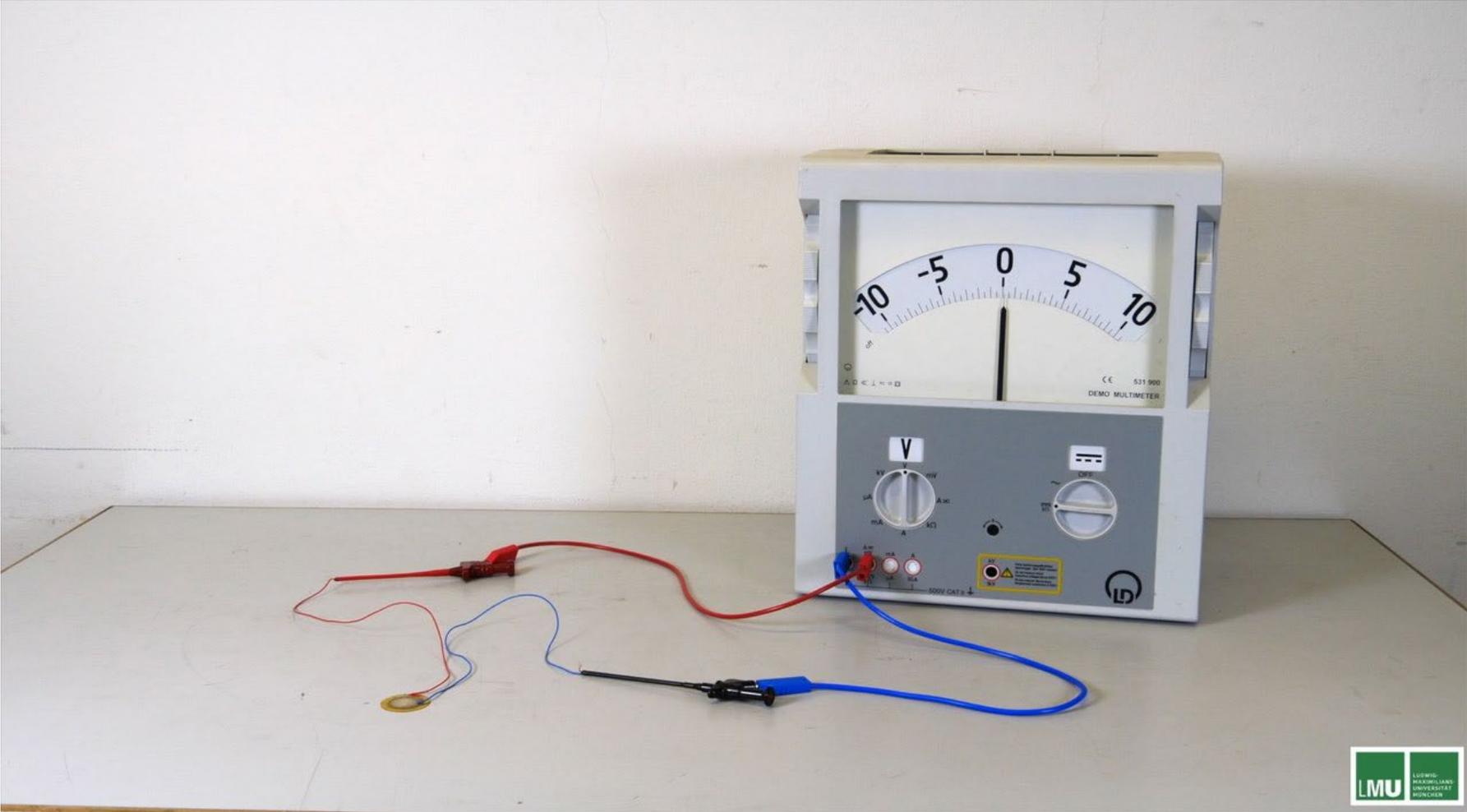
Piezoelektrischer Effekt / Elektrostriktion

- Piezozünder,
Piezo-Tonabnehmer,
Piezo-Mikrofon,
Schwingquarz,
Ultraschallgeber,
Akustik-Sensoren
- Perowskite,
Quarz,
Turmalin,
Seignette-Salz



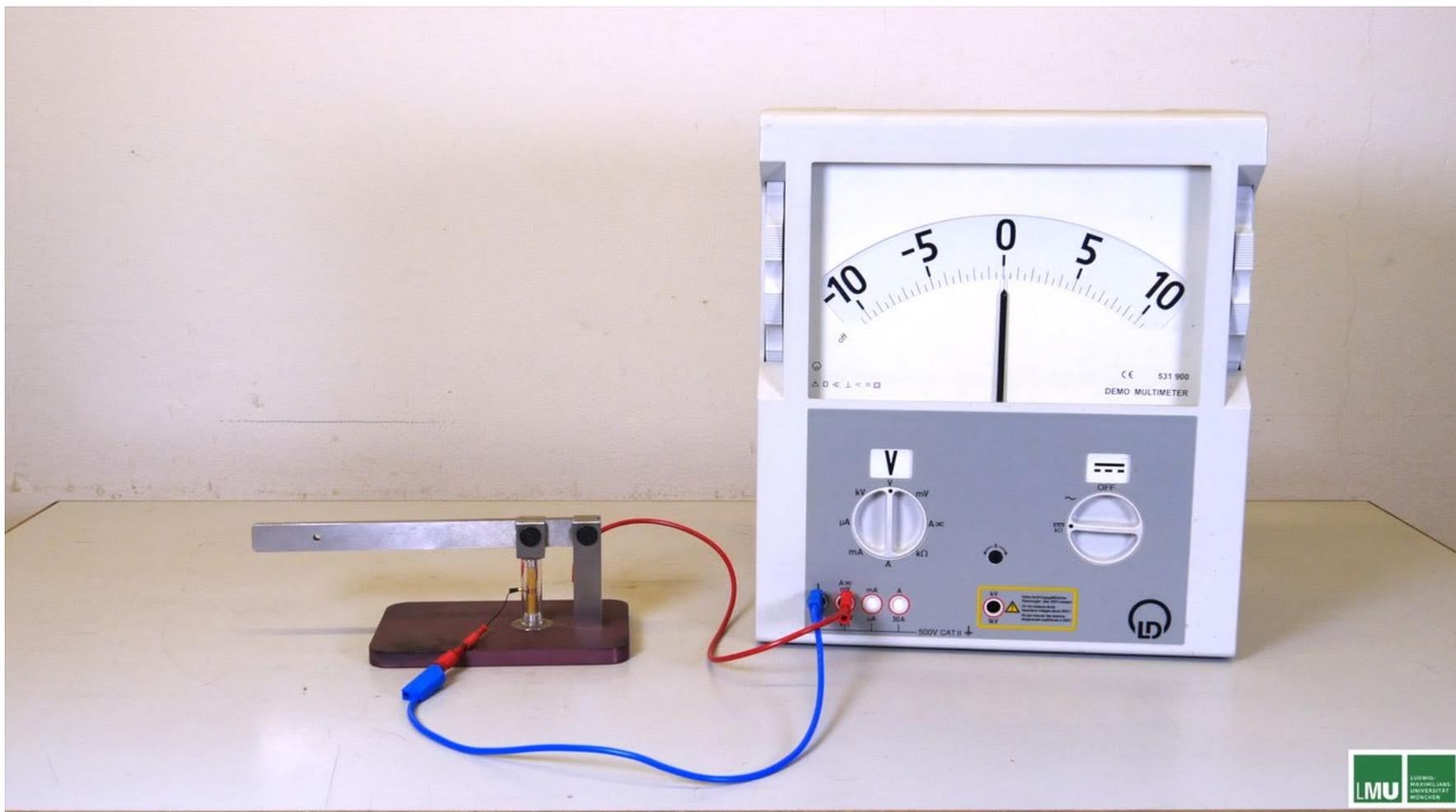


➤ Zum Piezo-Effekt



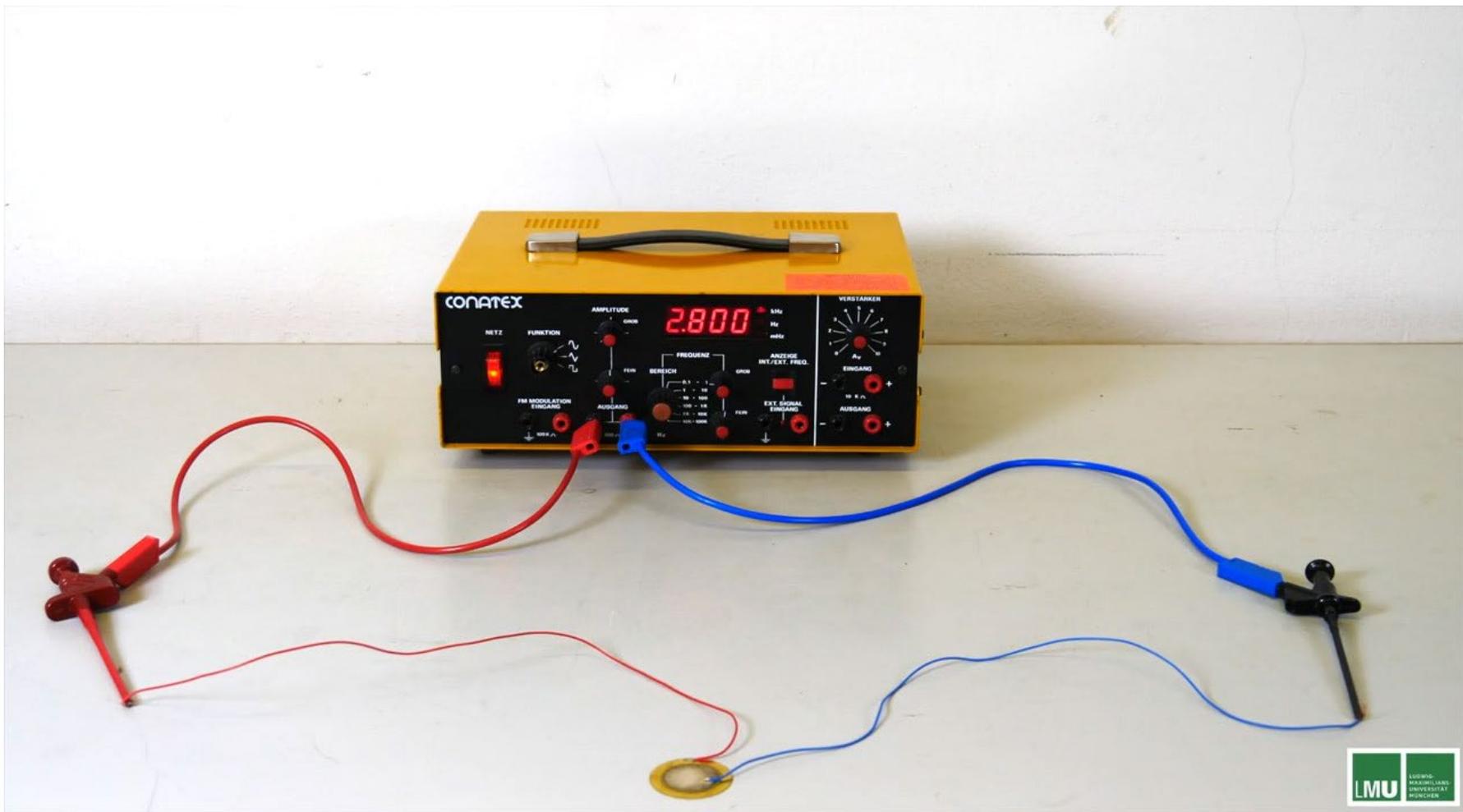
https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-8-Piezzo-Hand.m4v

➤ Zum Piezo-Effekt



https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-8-Piezzo-Hebel.m4v

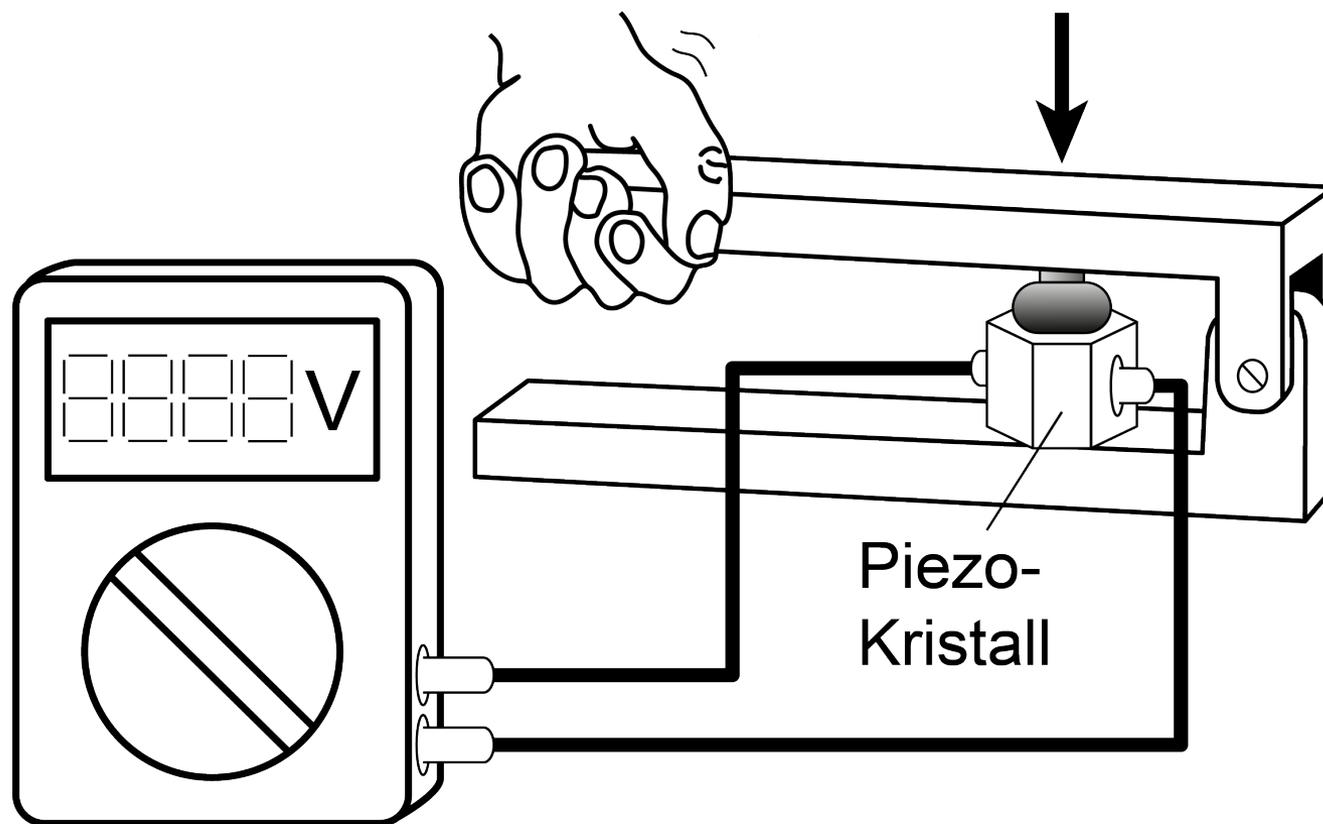
➤ Zum Piezo-Effekt



https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-8-Piezzo-Ton.m4v

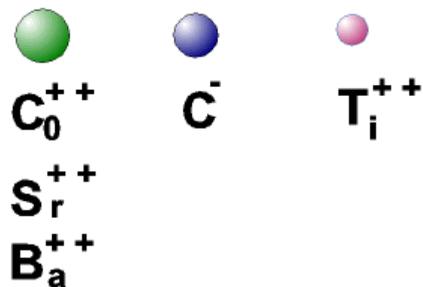
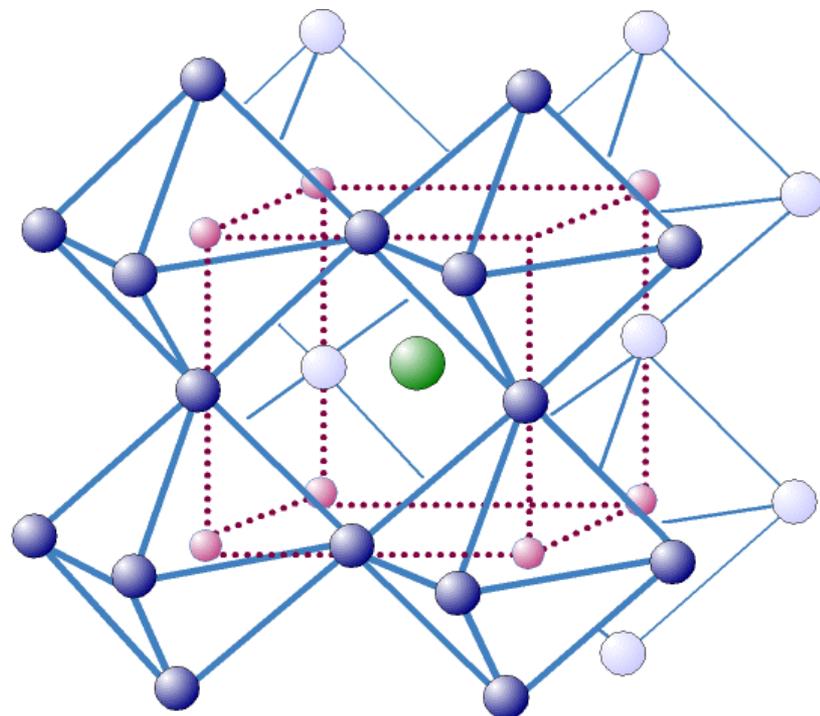
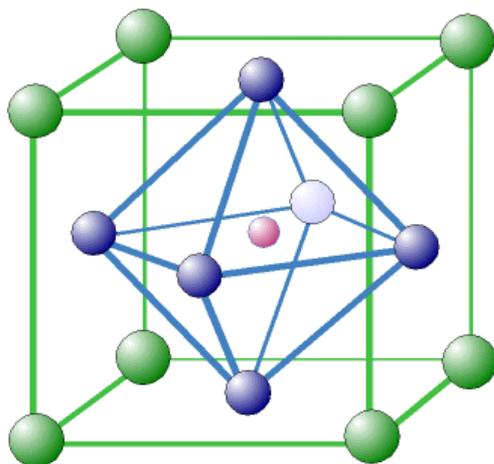
Piezoelektrischer Effekt

Pierre Curie 1880



Piezoelektrischer Effekt / Elektrostriktion

- Perowskitestruktur



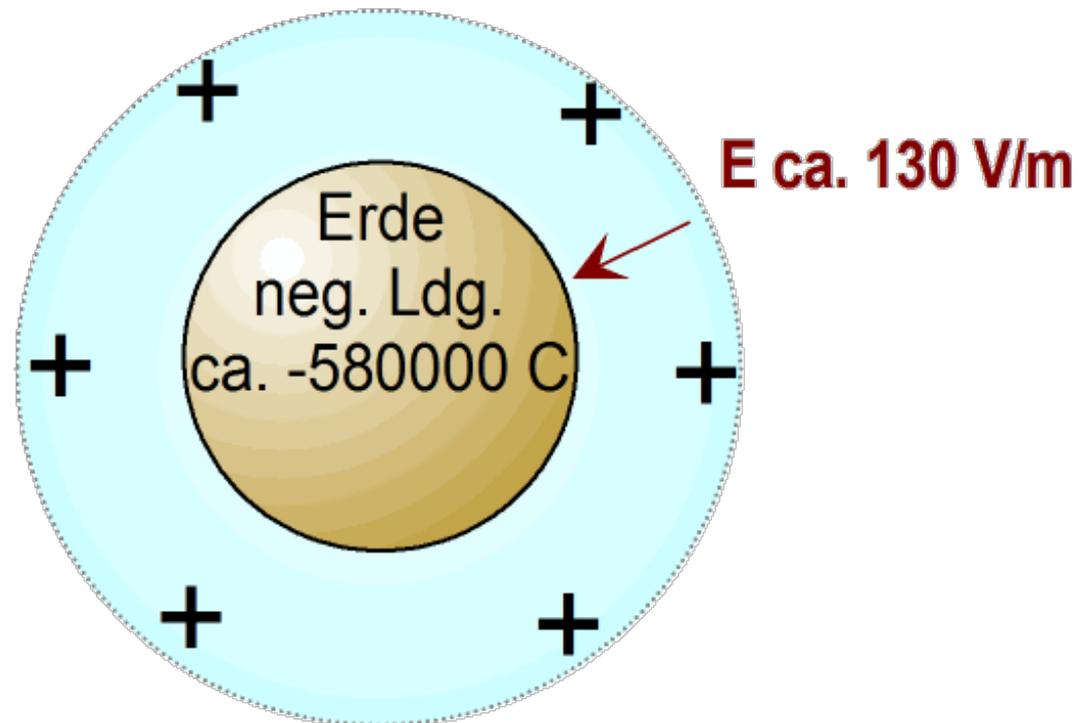
◆ Dielektrika werden in ein Feld „hineingezogen“

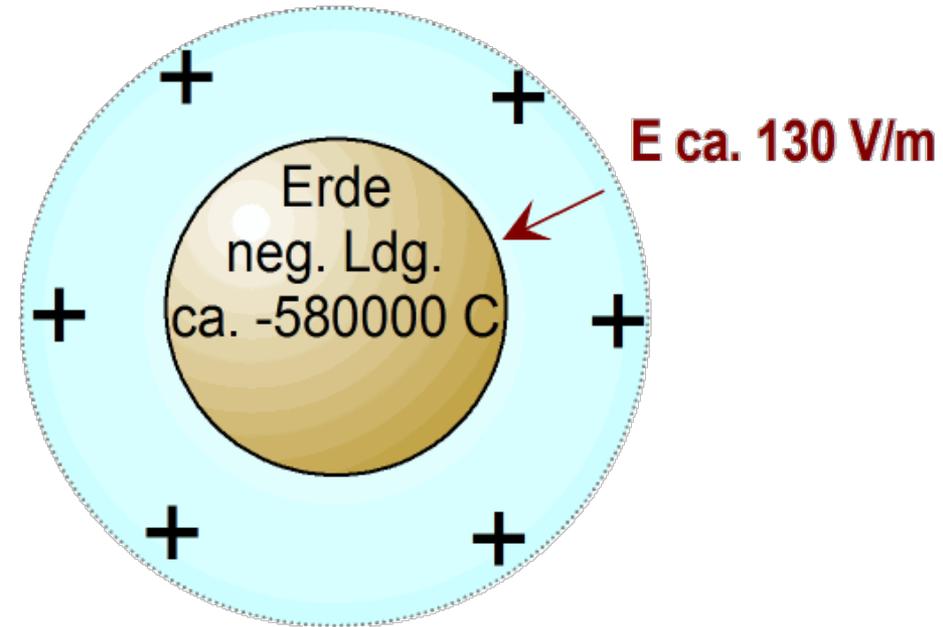


https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-8-Diel-Oel.m4v

▪ Elektrizität der Atmosphäre

- positive Raumladung in der Atmosphäre
- permanenter Ladungstransport ca. 1000 A



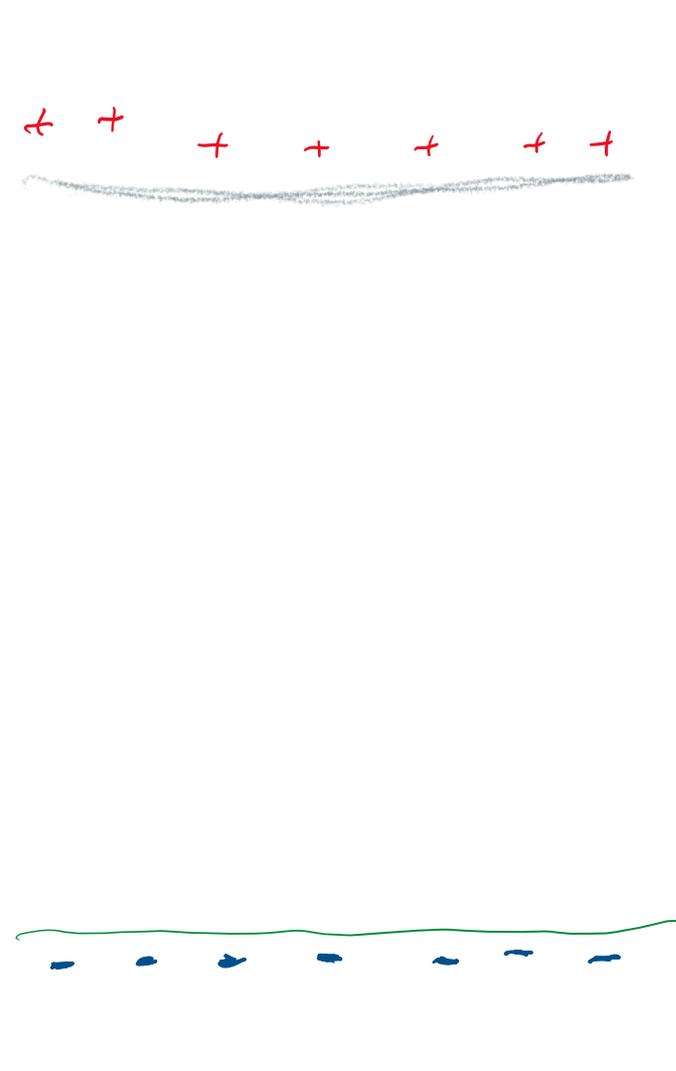


- **Warum keine Neutralisation? – "Gewitter sind nötig."**
 - ca. 100 Blitze / Sekunde
 - Orientierungsgrößen: 100 MV, 20 kA (bis 400 000 A), 5 MWh, 10-20 C, ca. 10 ms, (Aufheizung auf etwa 30000 Grad)
 - in Bayern: 6 Blitzeinschläge jährlich auf einem Quadratkilometer
 - 2016 in Deutschland 432 000 Blitzeinschläge (Mainpost, 14.7.17)

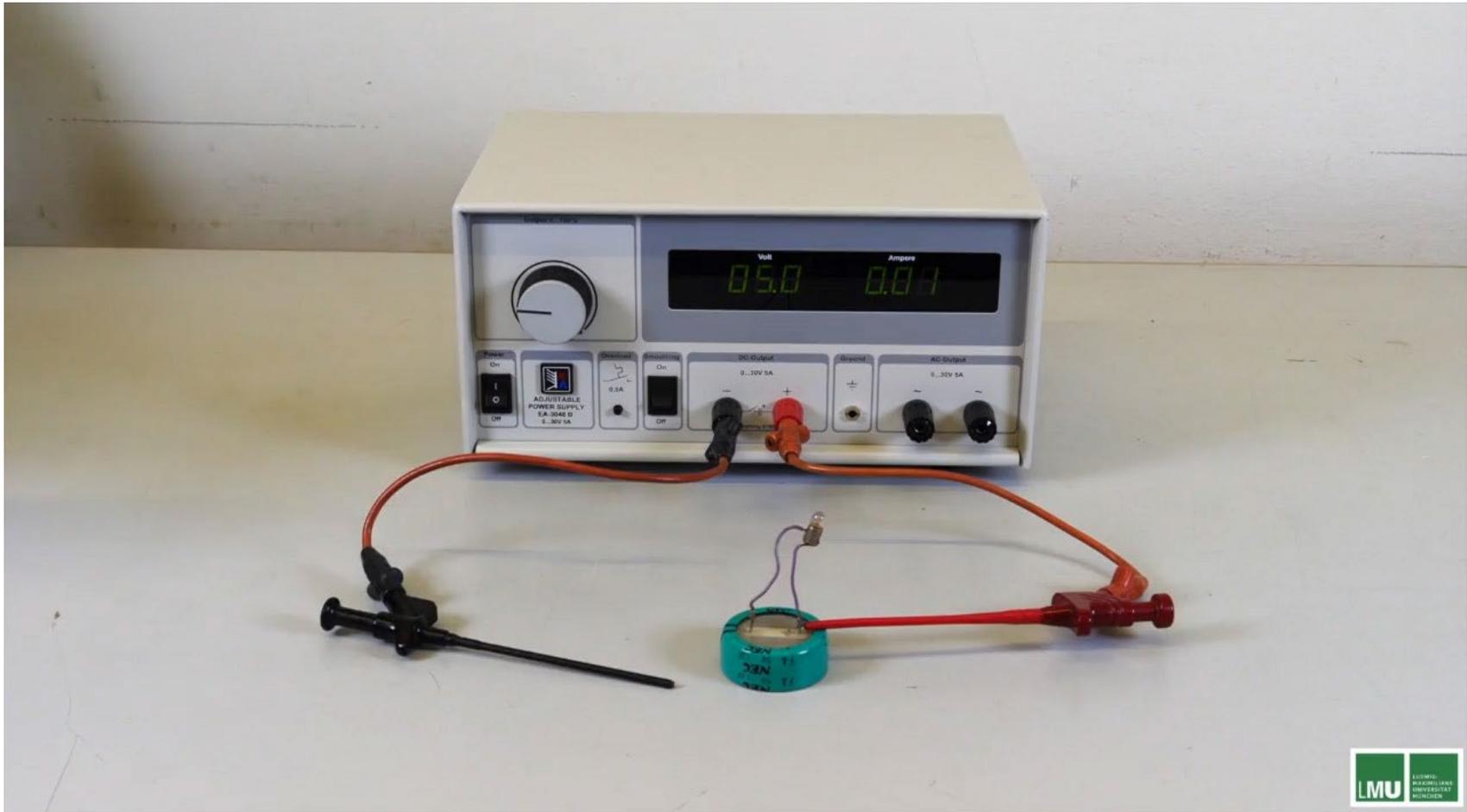


Vorher

nach Bewegung von H₂O



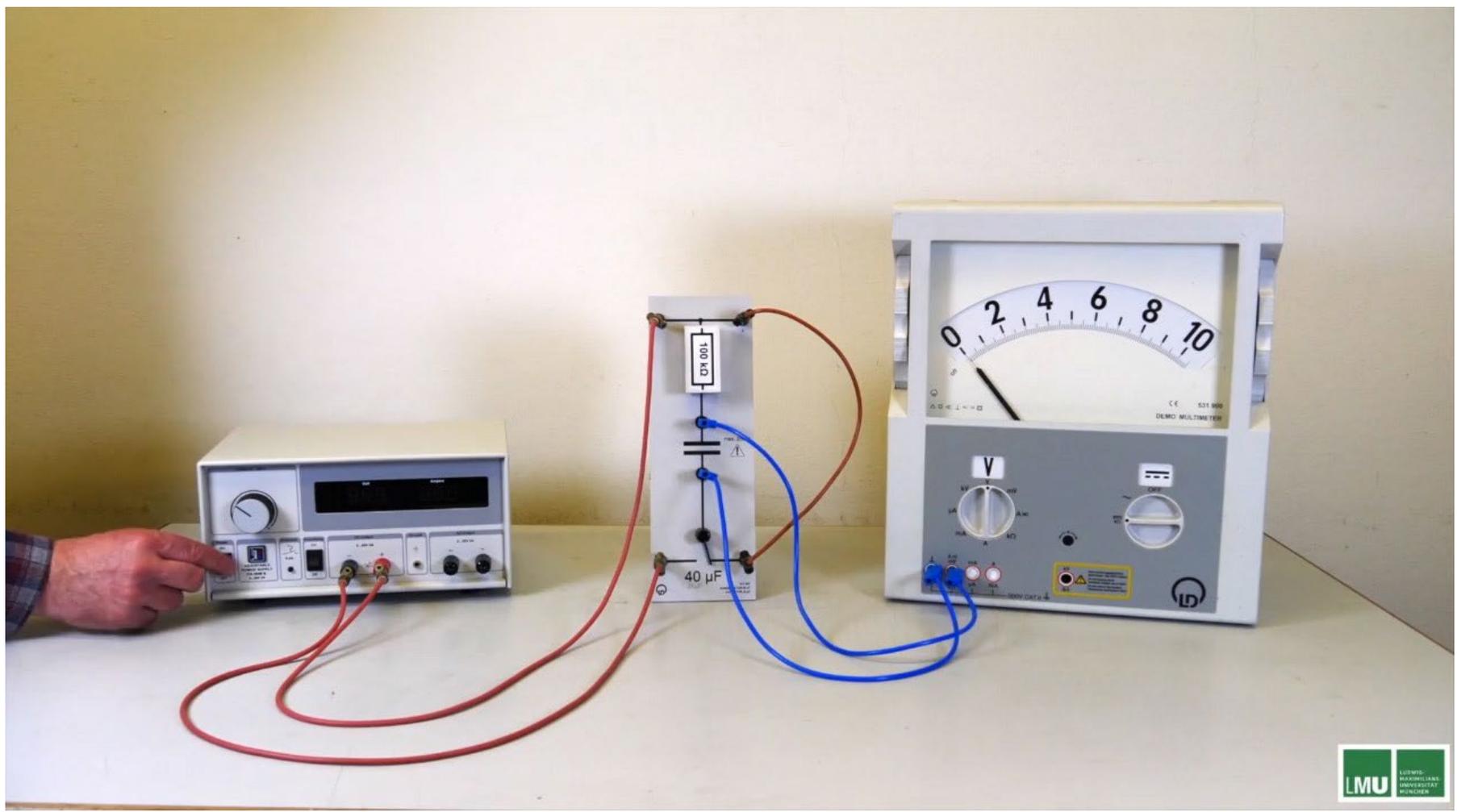
■ Kondensator



https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-9-C1-Laden-Birne.m4v



■ Kondensator



https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-9-C2-Auf-Entladen-Mess.m4v



- Def. Kapazität:

$$Q \sim U$$

$$C := \frac{Q}{U}$$

$$[C] = 1\text{F}$$

Typische Größenordnungen: pF, nF, μF

■ Kondensator



https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-9-C3-Abstand.m4v



Rechenbeispiele:

- **Plattenkondensator:**

$$C = \frac{A\epsilon_0}{d}$$

- **Zylinderkondensator:**

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{r_a}{r_i}}$$

- **Kugelkondensator:**

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0 R_i R_a}{R_a - R_i}$$



Rechenbeispiel: Kapazität eines Plattenkondensators





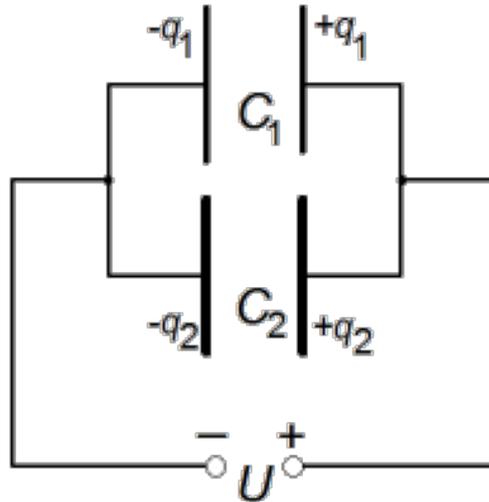
Rechenbeispiel: Kapazität eines Zylinderkondensators





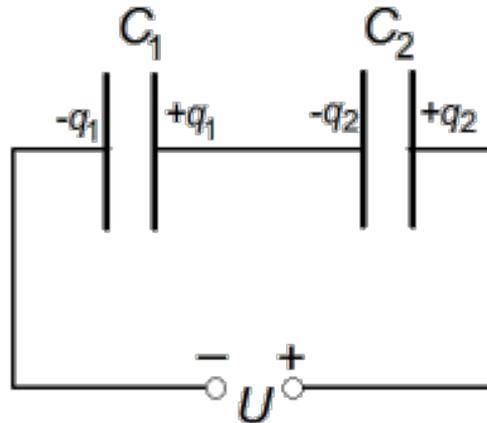
Zusammenschaltung von Kondensatoren:

- parallel



$$C = C_1 + C_2$$

- seriell



$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

siehe Rechnung



■ Feldenergie

Energiedichte im Vakuum:

$$\frac{W}{V} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot E^2$$

■ Plattenkondensator:

- Feldenergie

$$W = \frac{1}{2} C U^2$$

- Kraft zw. Platten

$$F = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{d^2} U^2$$

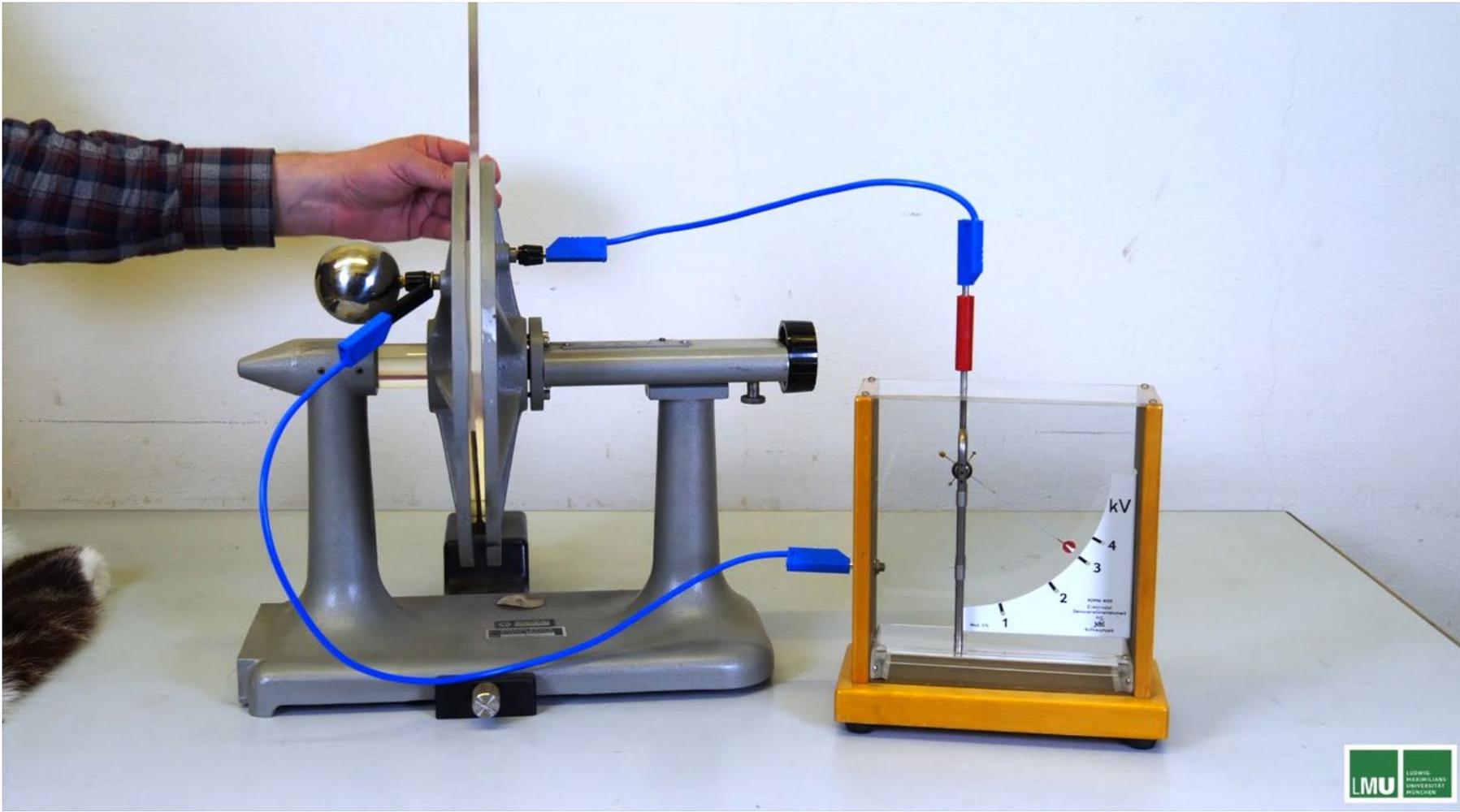


Rechenbeispiel: Feldenergie im Plattenkondensator:





■ Kondensator



https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/EP2_E_Video/1-9-C6-Kondensator-Diel.m4v



Über Betrachtungen am Plattenkondensator motiviert

- Def. ϵ_r : relative Dielektrizitätskonstante

$$\frac{Q_{Diel}}{Q} = \epsilon_r$$

(bei gleicher Spannung)

$$C_{Diel} = \epsilon_r \cdot C$$

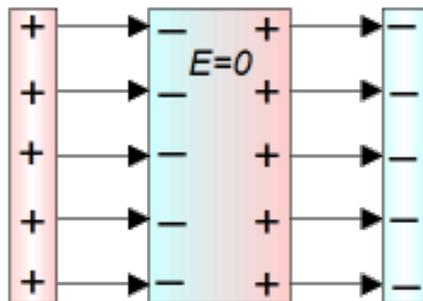
$$\frac{U}{U_{Diel}} = \epsilon_r$$

$$Q = \text{const};$$

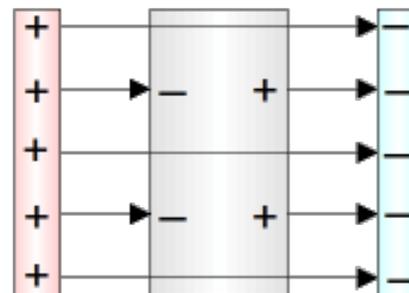
Luft



Metall



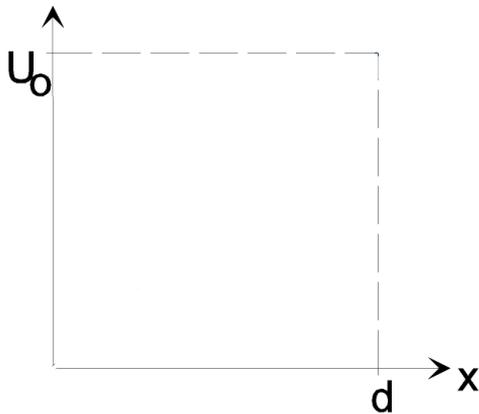
Isolator



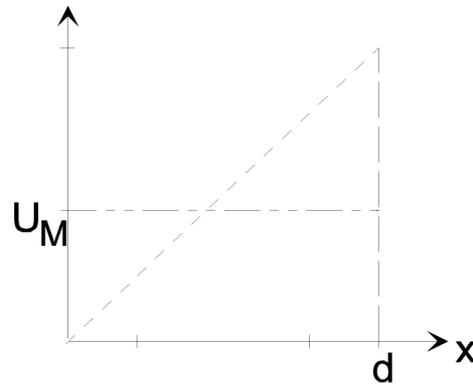
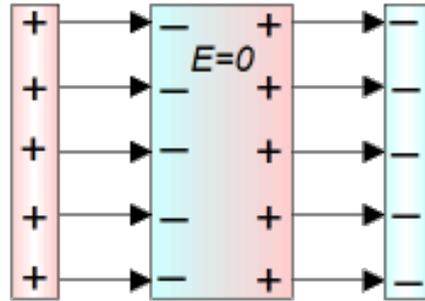


$Q = const;$

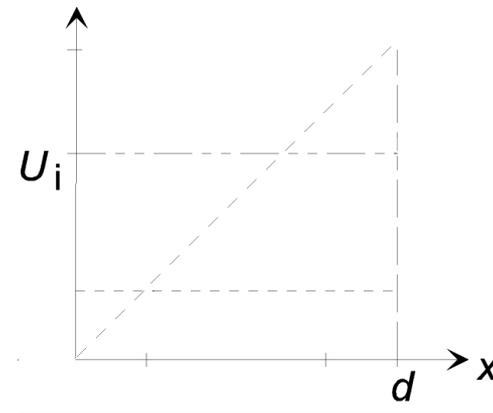
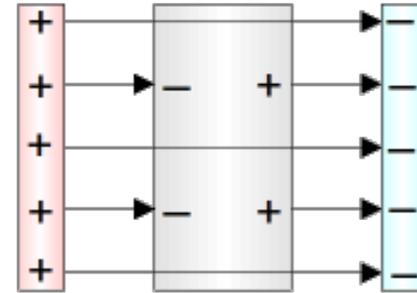
Luft



Metall



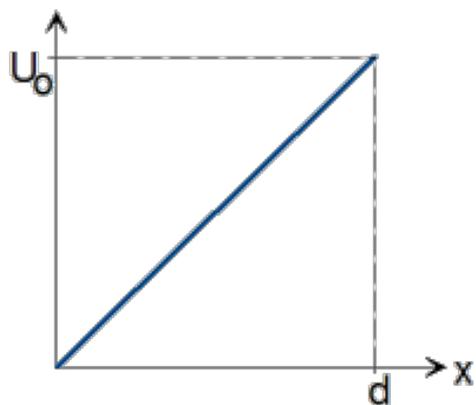
Isolator





$Q = const;$

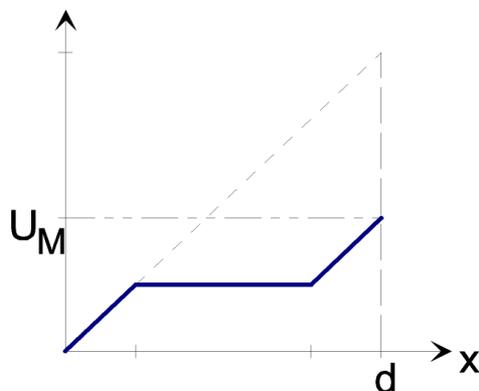
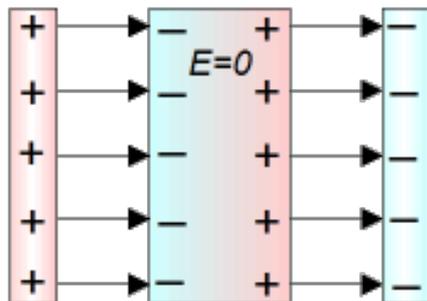
Luft



$$C_0 = \frac{q}{U_0}$$

$$U_0 = E \cdot d$$

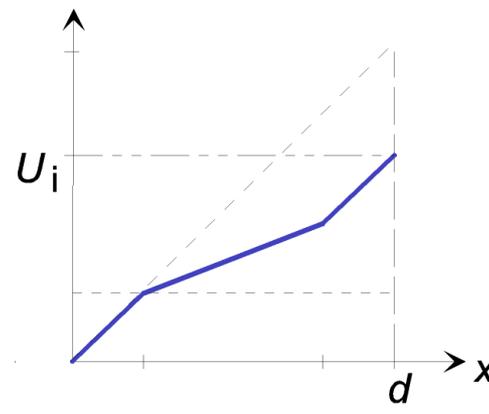
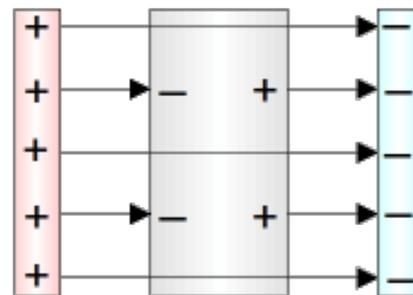
Metall



$$U_M < U_0$$

$$C_M > C_0$$

Isolator



$$U_{Isolator} < U_0$$

$$(U_{Isolator} > U_{Metall})$$

$$C_i = \epsilon_r \cdot C_0$$

$$U_i = \frac{1}{\epsilon_r} U_0$$