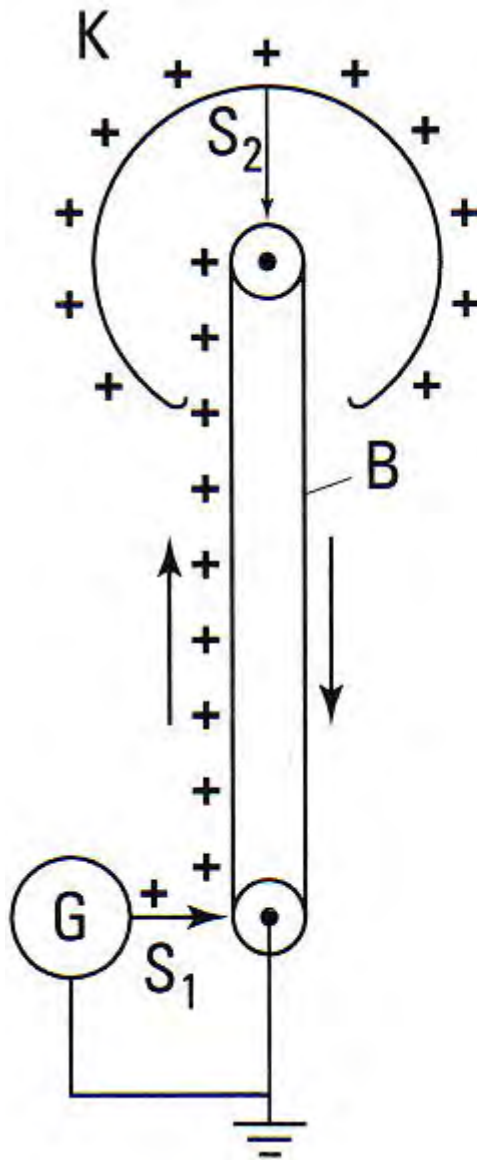
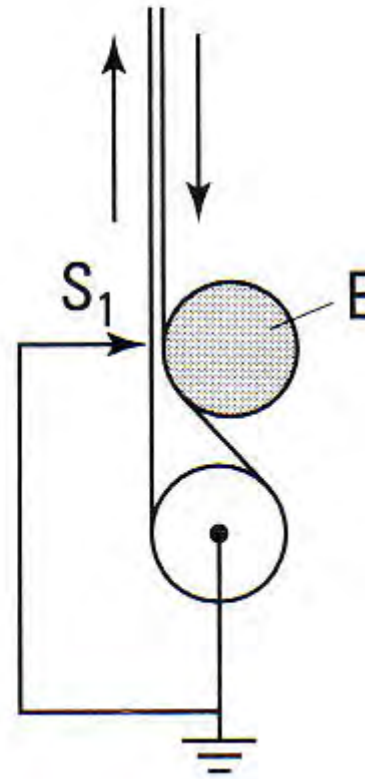


Van de Graaf Generator



fremderregt



eigenerregt

Bandgenerator. Sowohl bei den Reibungsmaschinen mit rotierenden Kugeln, Zylindern oder Scheiben als auch bei der oben beschriebenen Influenzmaschine erfolgt der Ladungstransport vom Ort der Ladungstrennung zum Konduktor über den rotierenden Körper. Eine neue Idee ist der Bandgenerator, bei dem der mechanische Ladungstransport auf einem isolierenden endlosen Band (z. B. aus Gummi oder Seide) erfolgt, das zwischen Erde und Hochspannungselektrode umläuft und so lang sein kann, wie es hochspannungstechnisch notwendig ist. Nach seinem Erfinder R. J. Van de Graaff (1901–1967) wird diese Maschine auch **Van-de-Graaff-Generator** genannt. Abb. 2.17 zeigt zwei verschiedene Möglichkeiten für die Be- und Entladung des Bandes: Die Anordnung (a) zeigt Fremderregung: Zwischen der Sprühvorrichtung S_1 und der unteren Walze liegt die Gleichspannung des Generators G . Die aufgesprühte positive Ladung wird vom Band B ins Innere des Konduktors K transportiert, der als Faraday-Käfig wirkt, so daß die von der Sprühvorrichtung S_2 abgenommene Ladung sofort nach außen fließt. Die Fremderregung wird bei großen Maschinen bevorzugt, weil mit der angelegten Gleichspannung der Bandstrom gesteuert und so die Hochspannung stabilisiert werden kann.

Die Anordnung Abb. 2.17b zeigt die technisch einfachere Selbsterregung, bewirkt durch eine aus Kunststoff oder hochisoliertem Metall bestehende Erregerwalze E in Kontakt mit dem laufenden Band. Die durch elektrostatische Ladungstrennung auf das Band gebrachten Ladungen sind für den eigentlichen Transport zu vernachlässigen. Aber schon nach einigen Bandumläufen ist die Erregerwalze so stark (z. B. negativ) aufgeladen, daß an dem geerdeten Sprühdraht S_1 Entladung einsetzt und dadurch das aufwärtslaufende Band mit (positiver) Ladung besprüht wird. Bei der Anordnung (b) soll die enge Bandführung schleifende Bandhälften andeuten: Damit lassen sich hohe Flächenladungsdichten erreichen, weil keine ladungskompensierenden Sprühentladungen zwischen den Bandhälften auftreten. Diese Bauart empfiehlt sich für Demonstrationsgeräte mit geringen Betriebszeiten, bei denen der Bandabrieb kein Problem ist.

Die einfache Bauweise und das klare Prinzip der Hochspannungserzeugung hat den Bandgenerator zum beliebten Eigenbau-Projekt für Schüler und Studenten werden lassen. Es gibt auch kleine kommerzielle Bandgeneratoren, die für Vorlesungsdemonstrationen sehr gut geeignet sind. Ein Modell von Leybold-Heraeus mit einem Konduktor von 19 cm Durchmesser und Selbsterregung liefert ca. 100 kV. Bandgeneratoren, die Spannungen von einigen 10 MV erzeugen, werden in der Kern- und Teilchenphysik eingesetzt (Van-de-Graaff-Beschleuniger, Abschn. 11.3.5).

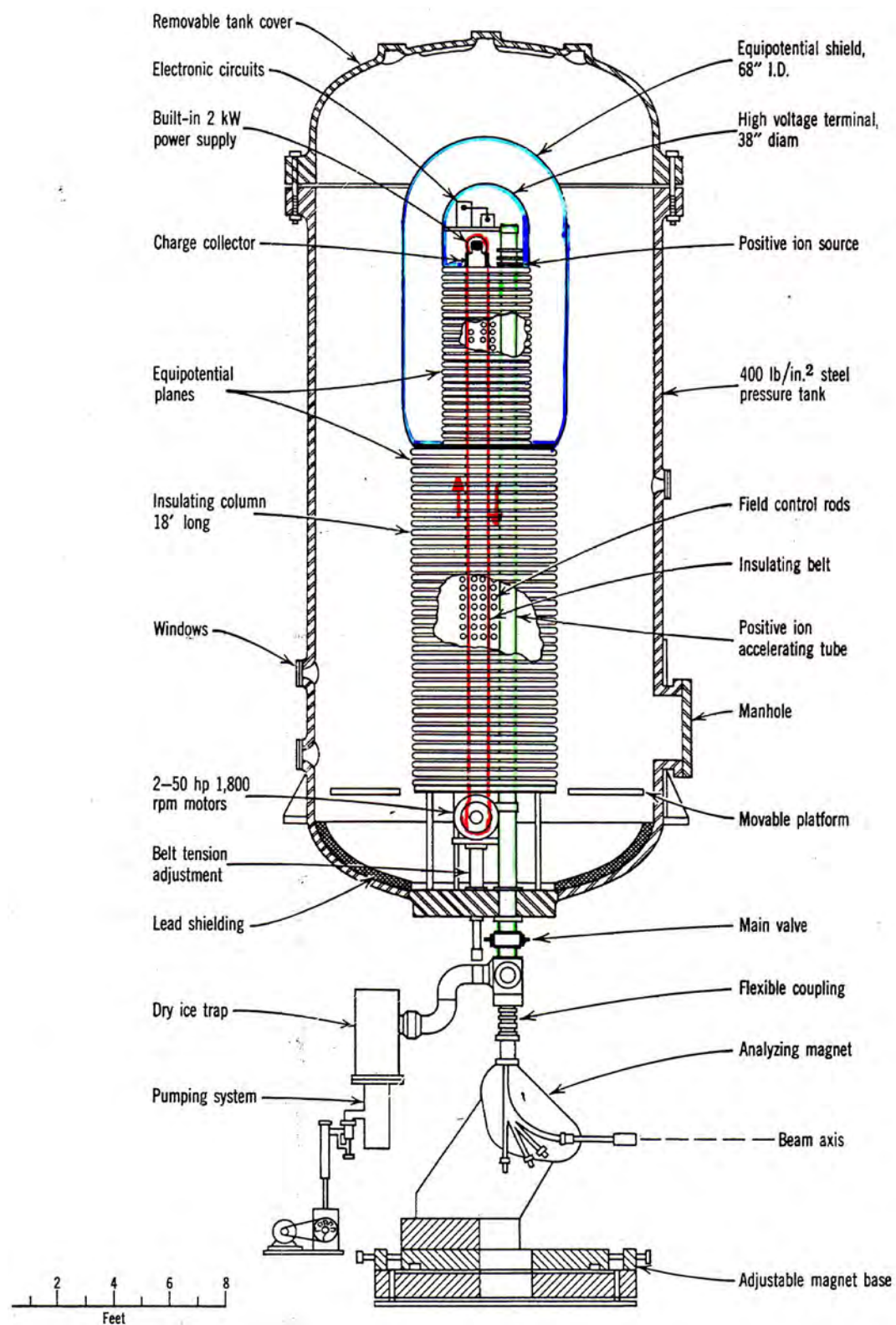
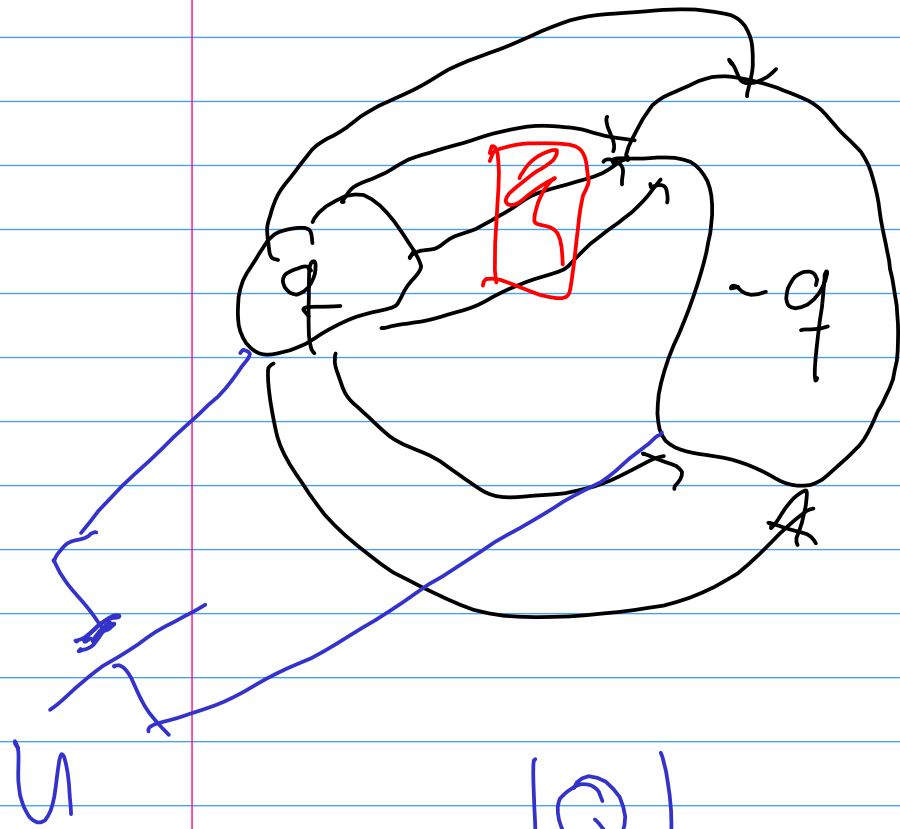


figure 21
 An electro
 capable of
 The proton
 vertically
 into a hori
 analyzing
 bottom. (C

Kondensator, Kapazität



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

$$[C] = \frac{C}{V} = \text{Farad} \\ (\mu\text{F}, \text{nF})$$

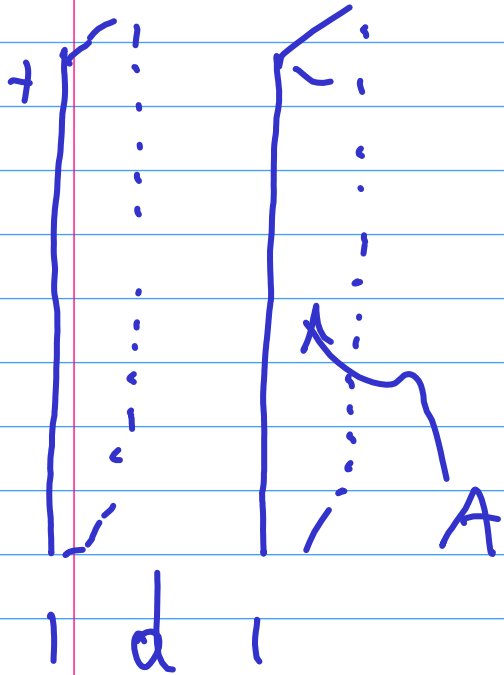
Felder vorgeben

Materialien im Feld

Energie speichern

Elektrische Signale
bearbeiten

Plattenkondensator



$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

$$U = - \int_{\text{links}}^{\text{rechts}} E dx = - \frac{1}{\epsilon_0} \sigma d$$

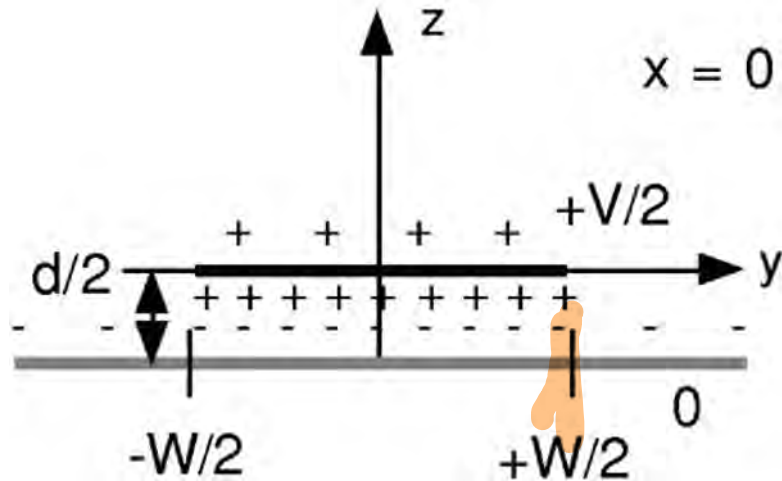
$$C = \frac{|Q|}{|U|} = \frac{\sigma A \epsilon_0}{\sigma d} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Größe eines Kondensators

(Separate Folie zu
"Segeln")

Electric field outside a parallel plate capacitor

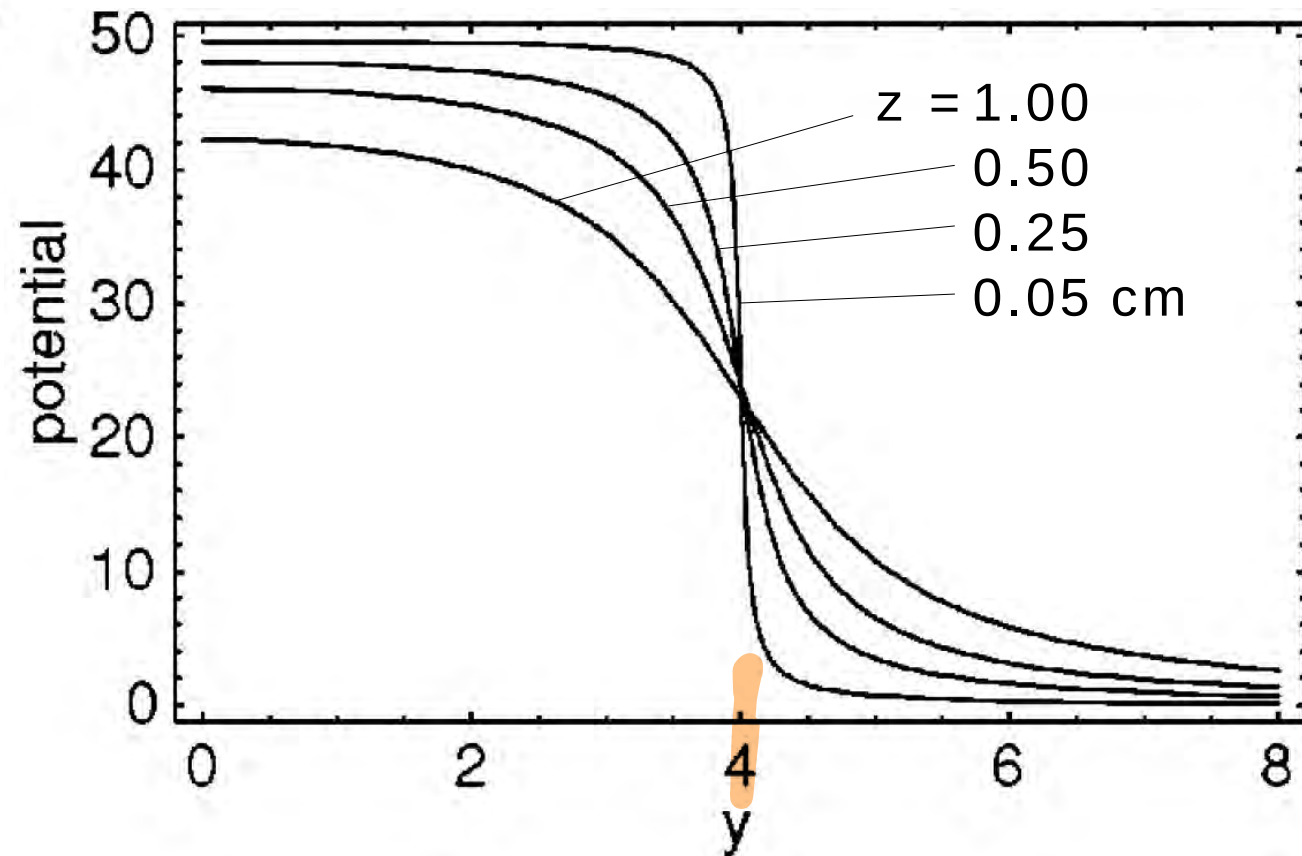
G. W. Parker, Am. J. Phys. 70, 502 (2002) DOI: 10.1119/1.1463738



Potential vs. y in cm

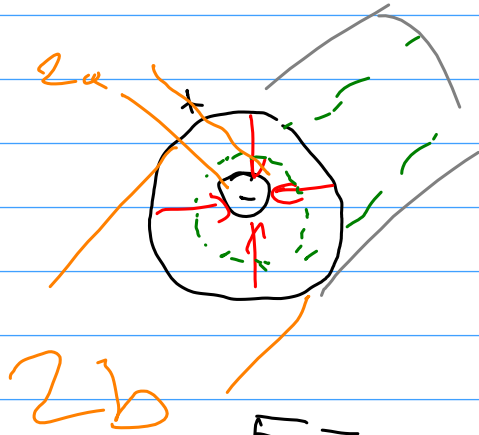
$V = 100$ statvolts, $W = 8$ cm, L infinite

z : height above plate



$$1 \text{ statvolt (cgs)} = 299.792458 \text{ V} = c / (10^6 \text{ m/s}) \text{ V}$$

Zylinderkondensator



$$\epsilon_0 \oint \vec{E} d\vec{a} = q_{\text{innen}}$$

$$\epsilon_0 E(r) 2\pi r l = -q$$

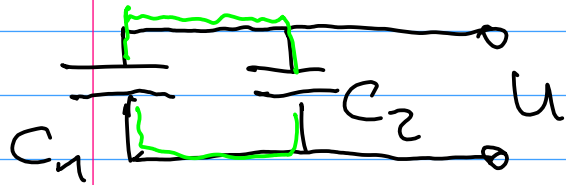
2b

$$E = - \frac{q}{2\pi \epsilon_0 r l} \Rightarrow U = - \int_a^b E dr$$

$$U = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 l} \ln \frac{b}{a}$$

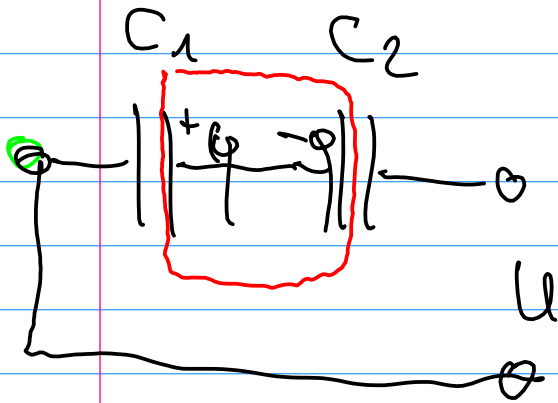
$$C = \frac{q}{U} = \frac{2\pi \epsilon_0 l}{\ln b/a}$$

Zusammengesetzte Kapazitäten



$$C = C_1 + C_2$$

$$U = U_1 = U_2 \Rightarrow q = q_1 + q_2 = \cancel{U}C_1 + \cancel{U}C_2 = \cancel{U}C$$



$$|q_1| = |q_2| = q$$

$$U = U_2 + U_1$$

$$\Rightarrow \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2}$$

$$= \cancel{q} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) = \frac{\cancel{q}}{\cancel{C}} = \frac{q}{C}$$

Energie im $\mathbb{E}$ -Feld

C-tragende Ladung $q' \Rightarrow U' = \frac{q'}{C}$

verschiebe dq' von Platte zu Platte

$$dW = U' dq' = \frac{1}{C} q' dq'$$

$$q' = 0 \dots q' = q$$

$$W = \int dW = \frac{1}{C} \int_0^q q' dq' = \frac{1}{2C} q^2 = \frac{1}{2} C U^2$$

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

Plattenkondensator:

Energiedichte:

$$E_c = \frac{E_c}{A d} = \frac{C U^2}{2 A d}$$

$$U = E d$$

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

$$\boxed{E_c = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2}$$

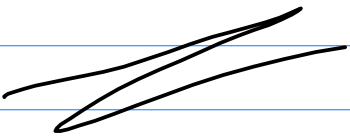
$$4,2 \mu F, 9 kV$$

$$Q = CU = 37,8 \text{ mC}$$

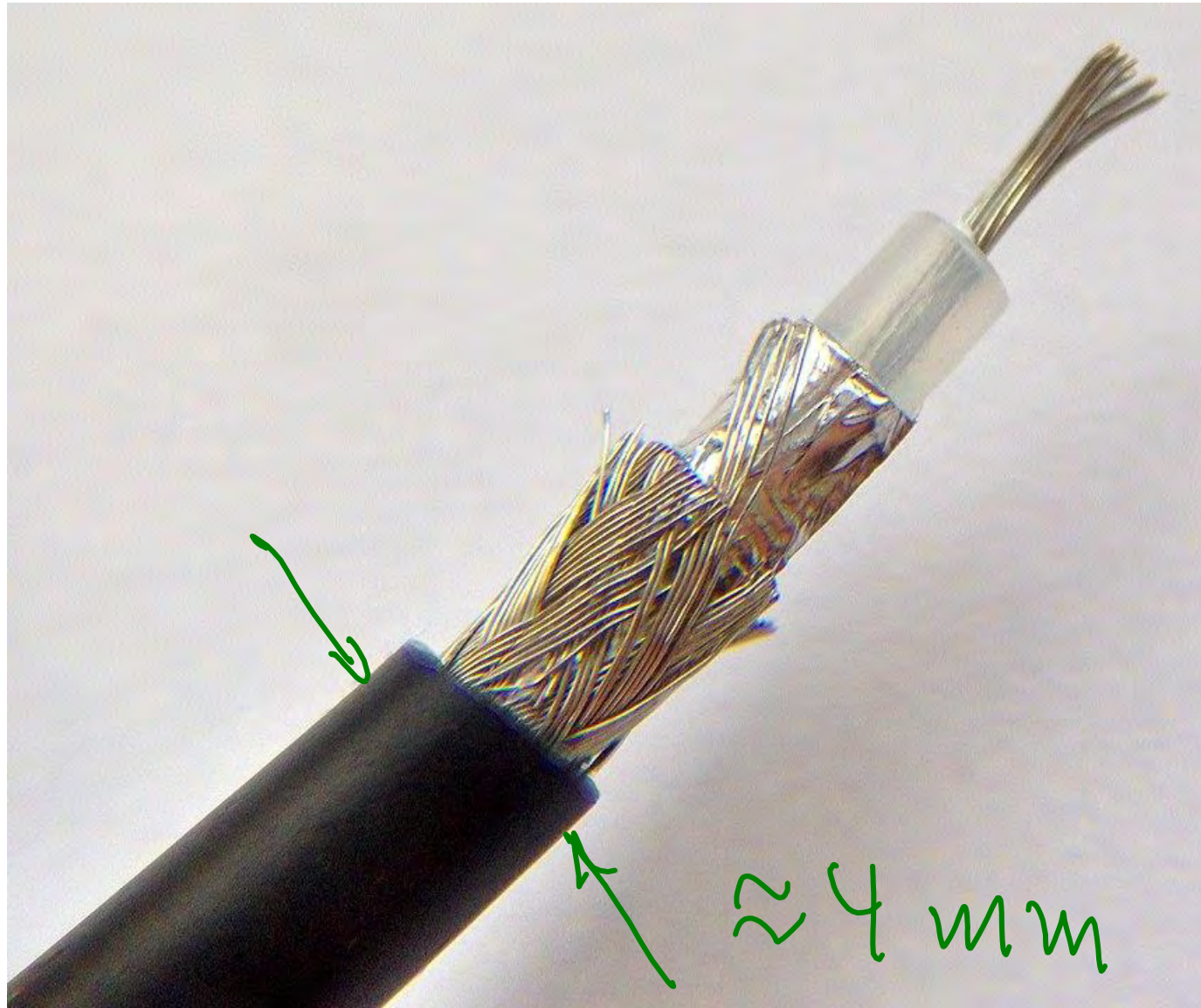
$$E_c = \frac{1}{2} CU^2 = 170 \text{ J}$$

$$P = \frac{170 \text{ J}}{\Delta t} = 170 \text{ MW}$$

$(\approx 1 \mu s)$

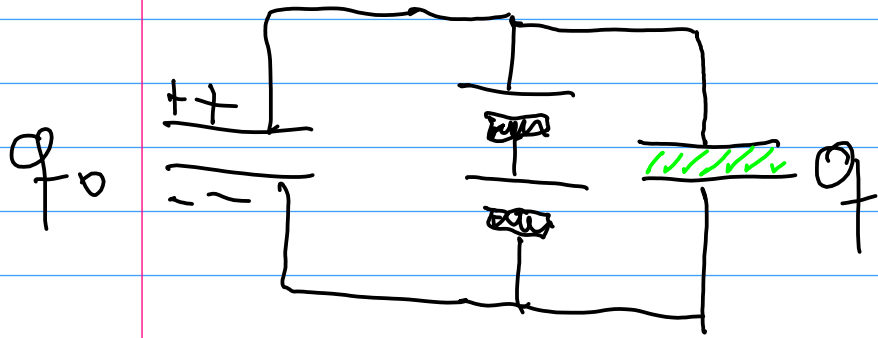


Coaxial Kabel

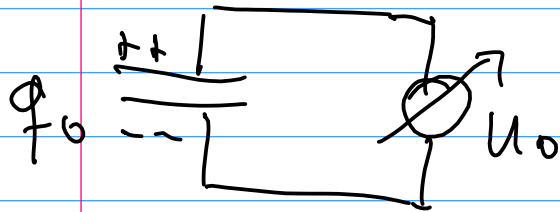


Dielektrika

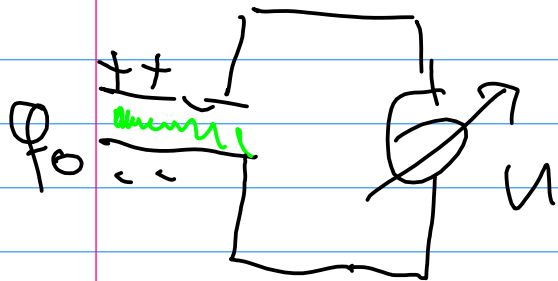
(1837 Faraday)



$$\frac{q}{q_0} = \epsilon = \frac{C U}{C_0 U} = \frac{C}{C_0}$$



gleiches q_0



$$\frac{U}{U_0} = \frac{q/C}{q/C_0} = \frac{C_0}{C} = \frac{1}{\epsilon}$$

$\Rightarrow C = \epsilon C_0$ Permittivität

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

Relative Permittivität oder Permittivitätszahl

~~DIELEKTRIZITÄTSZAHLEN~~

WASSERSTOFF	1.0003
LUFT	1.0006
PETROLEUM	2.1
BENZOL	2.3
HARTGUMMI	2.5 - 3.5
GLAS	5 - 10
GLIMMER	5.7
ÄTHANOL	25
GLYCERIN	43
AQUA DEST	81

✓

Permittivitätszahlen

SiO_2	3,9
Si_3N_4	7
Al_2O_3	9

 ϵ High- κ -dielectrics

Y_2O_3	15
ZrO_2	25
HfO_2	25
La_2O_3	30
Ta_2O_5	26
TiO_2	80

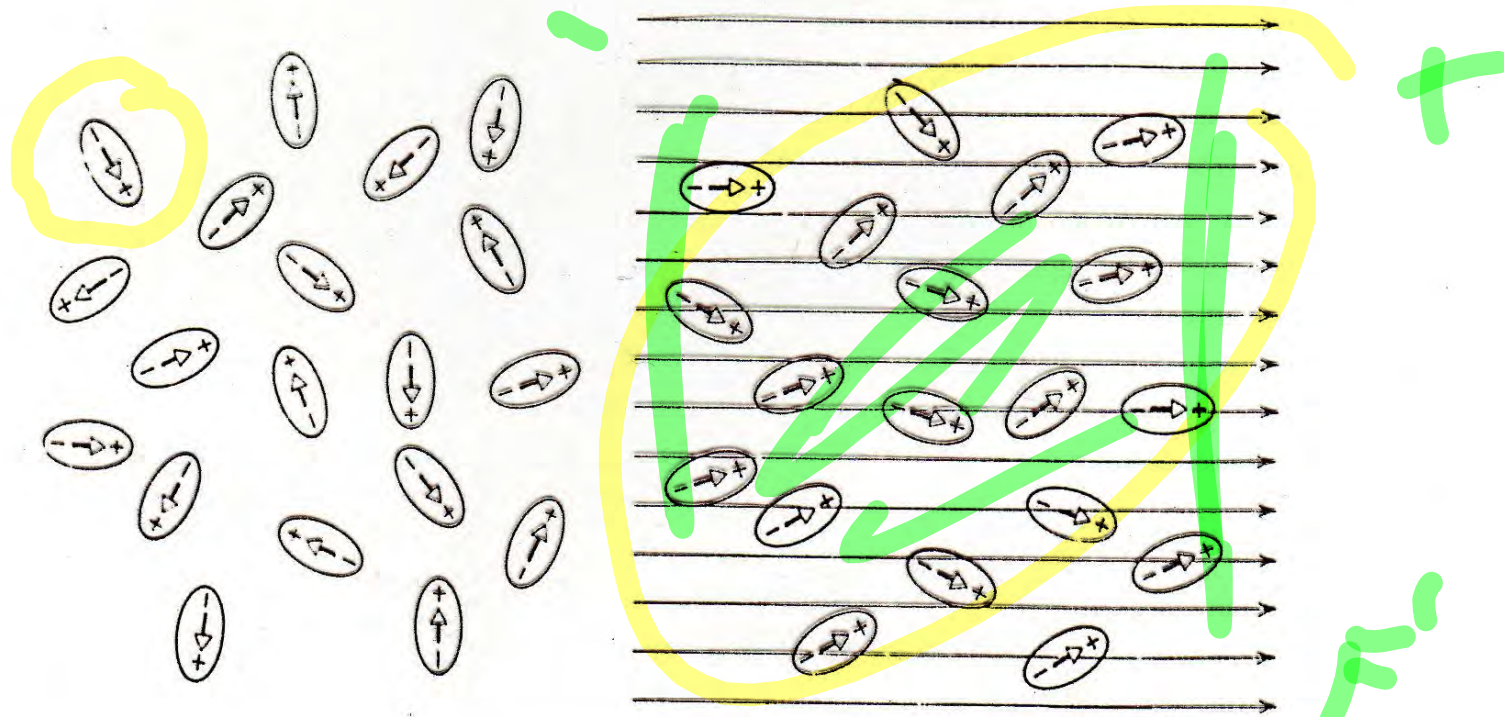
✓

low- κ -dielectrics

fluoriertes Silikatglas	3,3...4,0
amorpher Kohlenstoff	2,7...3,4
Polyimide	3,1...3,4
aromatische Polyether	2,7...2,9
Polyaryle	2,6...2,7
Fluoropolymere	1,9...2,1
poröse org. Materialien	2,1...2,2
silikatische Aerogele	1,8
mesoporöse Silikatgläser	1,3...2,6

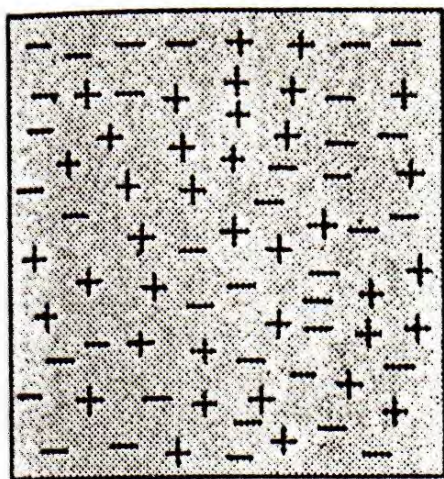
✓

30-8



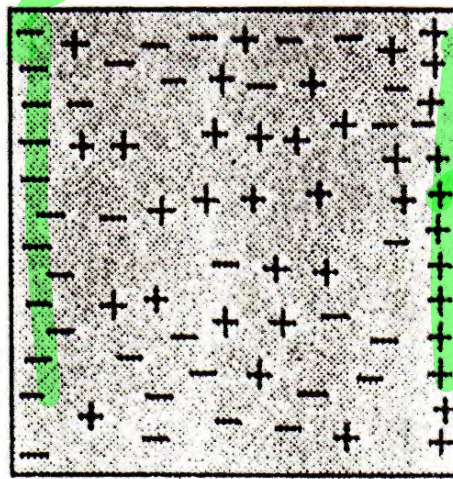
(a)

(b)



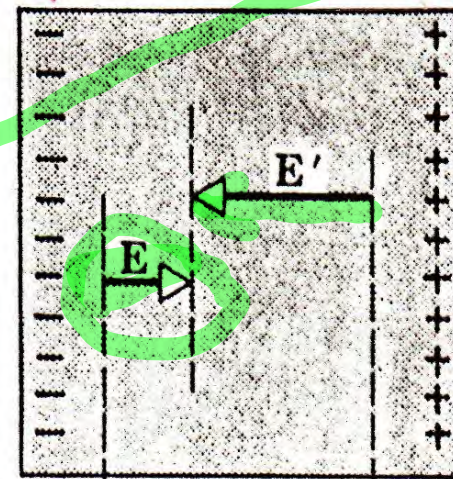
$$E_0 = 0$$

(a)



$$+q \xrightarrow{E_0} -q$$

(b)



$$E_0$$

(c)

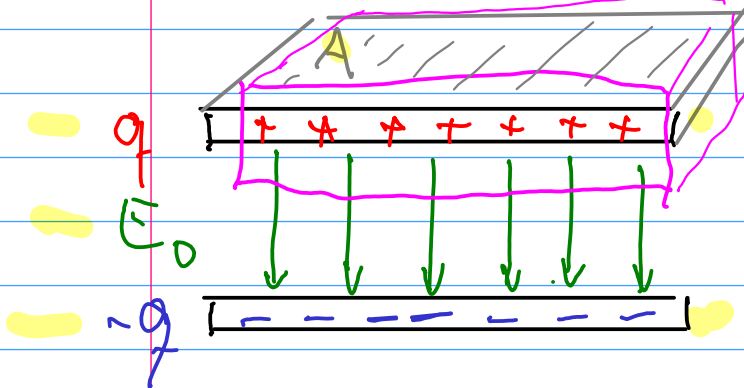
30-9

Energiedichte $\mathcal{E}_c$ im elektrischen Feld E in Materie:

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2$$

Gaußscher Satz für Kondensator mit Dielektrikum

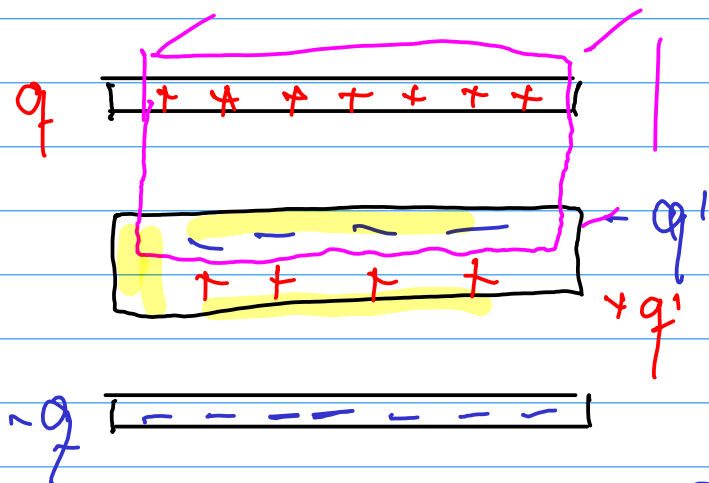
Vakuum im Kondensator



$$\epsilon_0 \int \vec{E} \cdot d\vec{a} = \epsilon_0 E_0 A = q$$

$$\Rightarrow E_0 = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{q}{A}$$

Dielektrikum im Kondensator



$$\epsilon_0 \int \vec{E} \cdot d\vec{a} = \epsilon_0 E A = q - q'$$

$$E = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{q - q'}{A}$$

$$\epsilon = \frac{U_0}{U} = \frac{E_0}{E} = \frac{q}{q - q'}$$

$$\Rightarrow q' = q \left(1 - \frac{1}{\epsilon} \right)$$

$$\epsilon = 1 \rightarrow q' = 0$$

$$|\epsilon| = \infty \rightarrow q' = q$$

$$q - q' = \frac{q}{\epsilon} \Rightarrow \boxed{\epsilon_0 \int \epsilon \vec{E} d\vec{a} = q}$$

allgemein gültig

q freie Ladung

ind. q' in ϵ berücksichtigt
 $\uparrow$ Materialeigenschaft

$$\epsilon = \frac{q}{q - q'} \Rightarrow q = q' + \frac{q}{\epsilon}$$

$$\Rightarrow \frac{q}{A} = \frac{q'}{A} + \epsilon_0 \underbrace{\frac{q}{\epsilon \epsilon_0 A}}_E$$

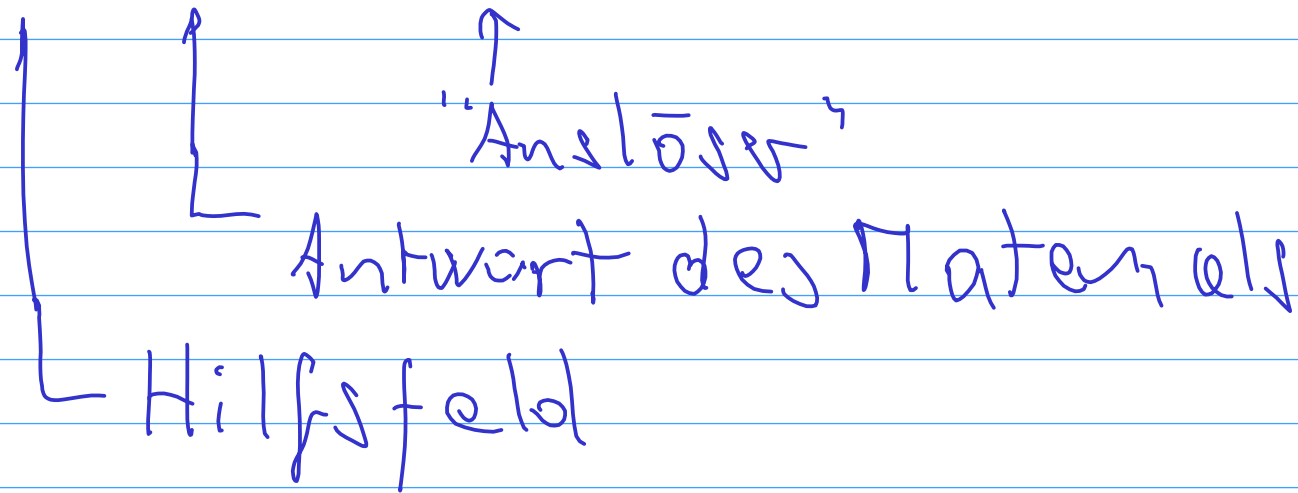
$\frac{q'}{A}$: ind. Ladung / Fläche

$$= \frac{q' d}{A d} = \frac{\text{Dipolmoment}}{\text{Volumen}} = P \text{ Polarisation}$$

$\vec{P}$: $\ominus \rightarrow \oplus$
(ind. Lad.)

$\frac{q}{A} = D$ Dielekt. Verschiebung

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

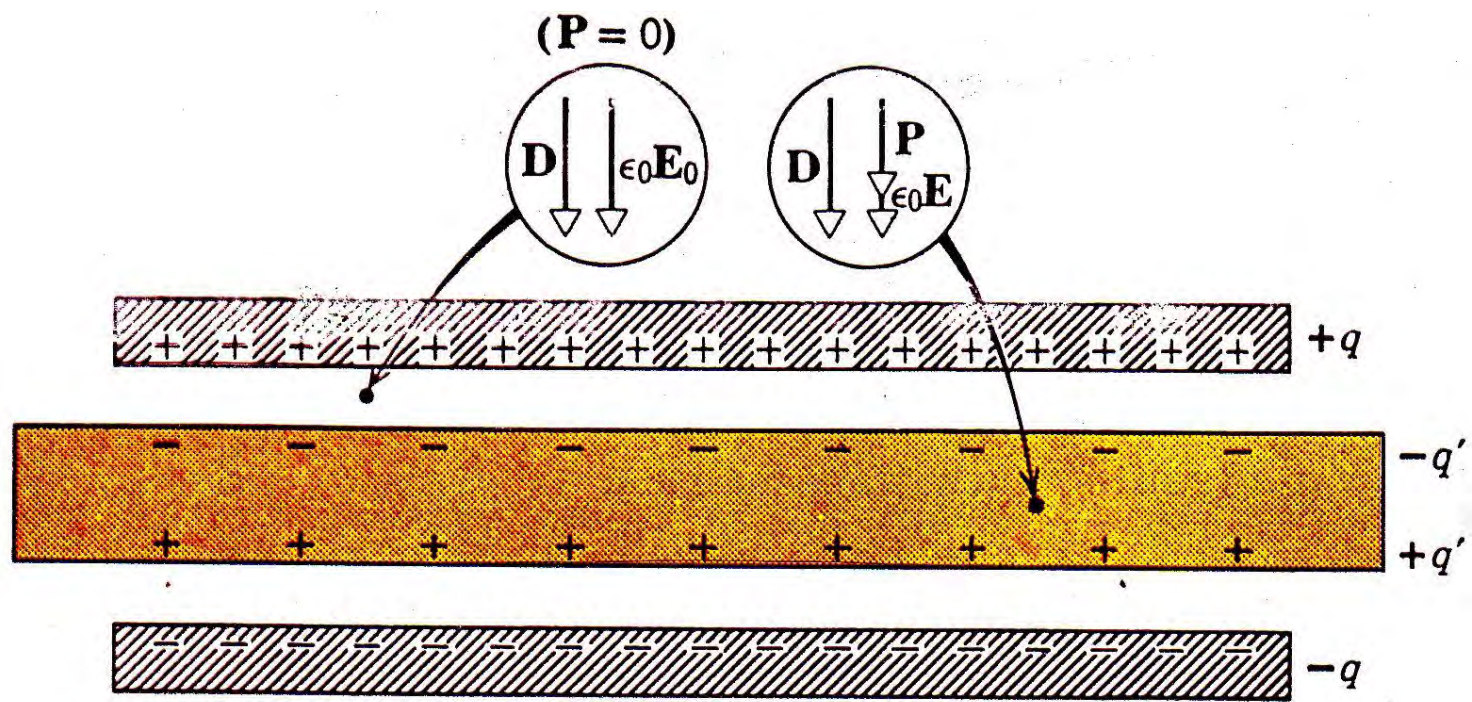


Zusammengefasst:

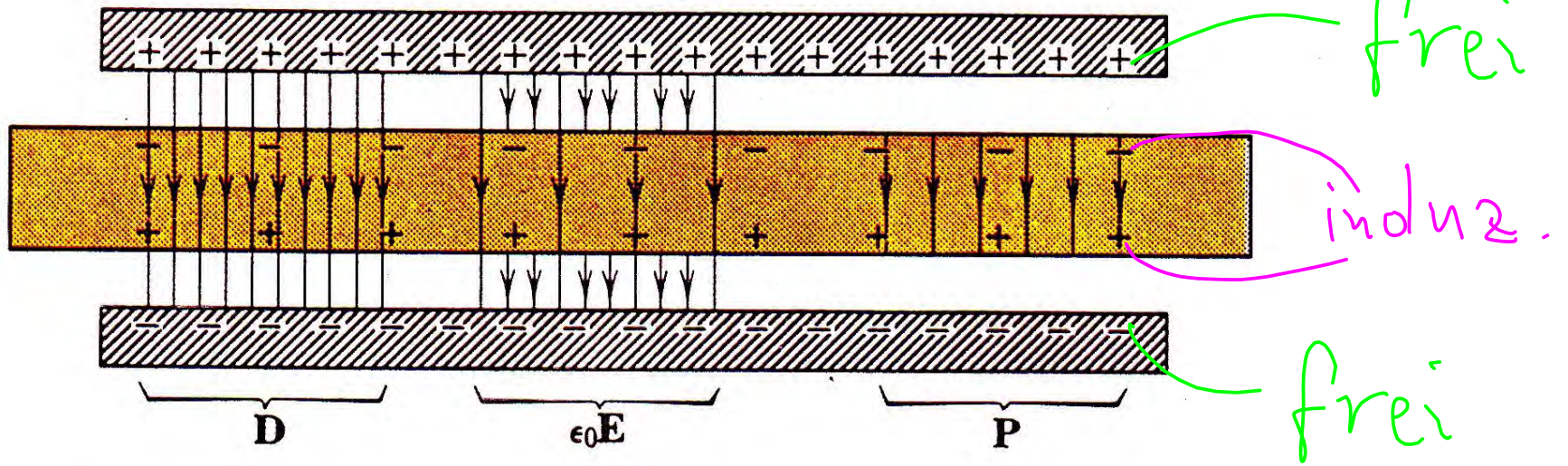
$$\vec{D} = \vec{P} + \epsilon_0 \vec{E}$$

$$P = \frac{1}{A} q' \quad \text{induz. Ladung}$$

$$D = \frac{1}{A} q \quad \text{freie Ladung}$$



(a)



(b)

$$[P] = [D] = \frac{C}{m^2} \left(= \frac{C \cdot m}{m^3} \right)$$

Für viele Materialien, nicht zu große $\vec{E}$

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\begin{array}{l} \nearrow : \sim E^2 \\ \text{Kristall: } \vec{D} \not\parallel \vec{E} \\ \Rightarrow \nearrow \end{array}$$

$$\boxed{\int \vec{D} d\vec{a} = q_{\text{frei}}}$$

"Souß" in Materie

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

$$\vec{P} = \vec{D} - \epsilon_0 \vec{E} = \frac{(\epsilon - 1) \epsilon_0 \vec{E}}{1} = \cancel{\epsilon_0 \vec{E}}$$

Suszeptibilität

Punktladung im Isolator:

$$\int \epsilon \epsilon_0 \vec{E} d\vec{a} = q_{\text{frei}}$$

$$\Rightarrow \epsilon_0 \int \vec{E} d\vec{a} = \frac{q_{\text{frei}}}{\epsilon}$$

$$\Rightarrow \text{Coulomb: } E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \frac{q_{\text{frei}}}{r^2}$$