



# **Physik für Infotronik (16)**

**Gerald Kupris**

**06.12.2012**

## Physik Themenbereiche (3)



Teil 4: Elektrizität und Magnetismus

21 Das elektrische Feld I: Diskrete Ladungsverteilungen

22 Das elektrische Feld II: Kontinuierliche Ladungsverteilungen

23 Das elektrische Potenzial

24 Die Kapazität

25 Elektrischer Strom – Gleichstromkreise

26 Das Magnetfeld

27 Quellen des Magnetfelds

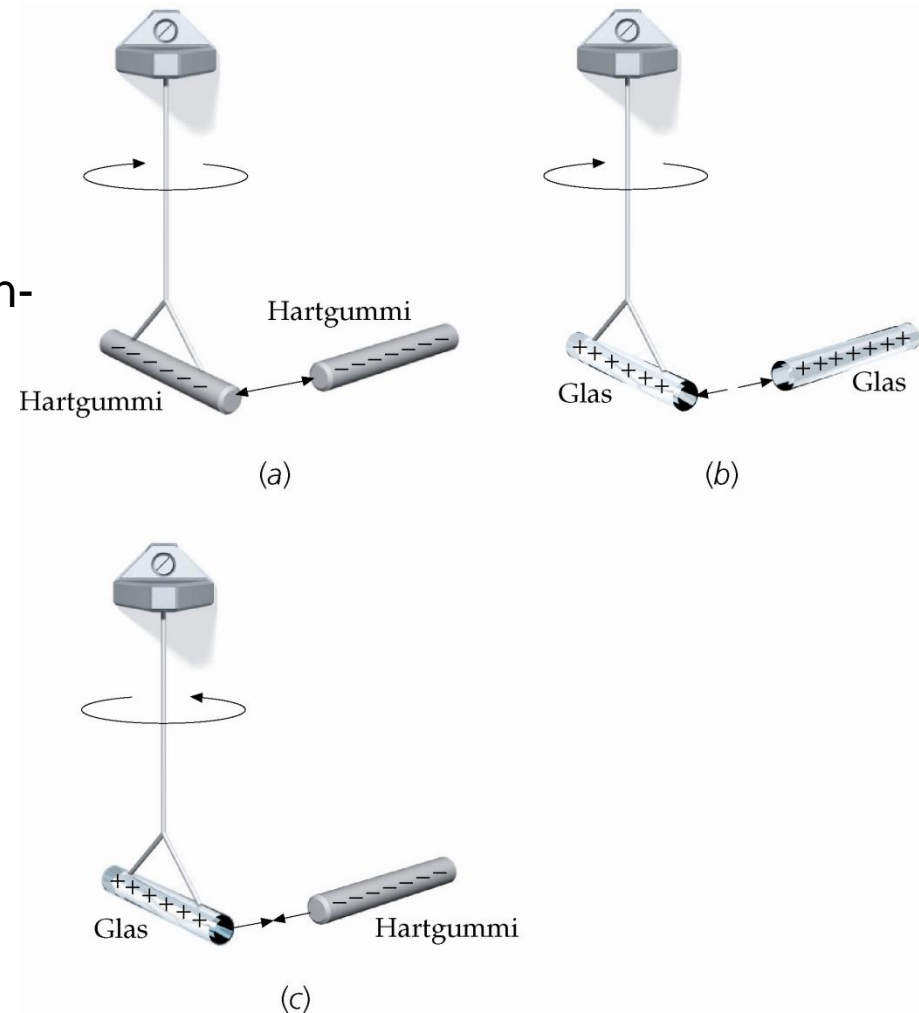
28 Die magnetische Induktion

29 Wechselstromkreise

30 Die Maxwellschen Gleichungen – Elektromagnetische Wellen

# Anziehung und Abstoßung

- a) Zwei an einem Fell geriebene Hartgummi-  
stäbe stoßen sich gegenseitig ab.
- b) Auch zwei Glasstäbe, die an einem Seiden-  
tuch gerieben wurden, stoßen sich gegen-  
seitig ab.
- c) Ein an einem Fell geriebener Hartgummi-  
stab und ein an Seide geriebener Glas-  
stab ziehen einander an.



# Die triboelektrische Reihe

Je weiter unten ein Material in der Reihe steht, desto größer ist seine Affinität für Elektronen:

+ Positives Ende der Reihe:

**Asbest  
Glas  
Nylon  
Wolle  
Blei  
Seide  
Aluminium  
Papier  
Baumwolle  
Stahl  
Hartgummi  
Nickel und Kupfer  
Messing und Silber  
Synthetischer Gummi  
Orlon  
Frischhaltefolie (Polyvinylidenchlorid, PVdC)  
Polyethylen  
Teflon  
Silikon**

- Negatives Ende der Reihe:

# Ladungsquantisierung

Alle beobachteten Ladungen treten in ganzzahligen Vielfachen der Elementarladung  $e$  auf, d.h. die Ladung ist quantisiert (in kleinste Portionen zerlegt). Eine beobachtete Ladung, die irgendwo in der Natur vorkommt, kann als  $q = \pm n \cdot e$  mit einer natürlichen Zahl  $n$  geschrieben werden.

Für gewöhnliche Objekte ist  $n$  jedoch im Allgemeinen sehr groß, und die Ladung scheint kontinuierlich verteilt zu sein.

Das Aufladen eines Kunststoffstabes durch Reiben mit einem Stück Fell überträgt etwa  $10^{10}$  oder mehr Elektronen auf den Stab.

Die Elementarladung  $e$  hat in der SI-Einheit Coulomb den Wert:

$$e = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ C} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

## Welche Ladung steckt in einer Kupfermünze?

Die alte, von 1793 bis 1837 geprägte Pennymünze in den USA bestand aus reinem Kupfer und hatte eine Masse von 3,10 g.

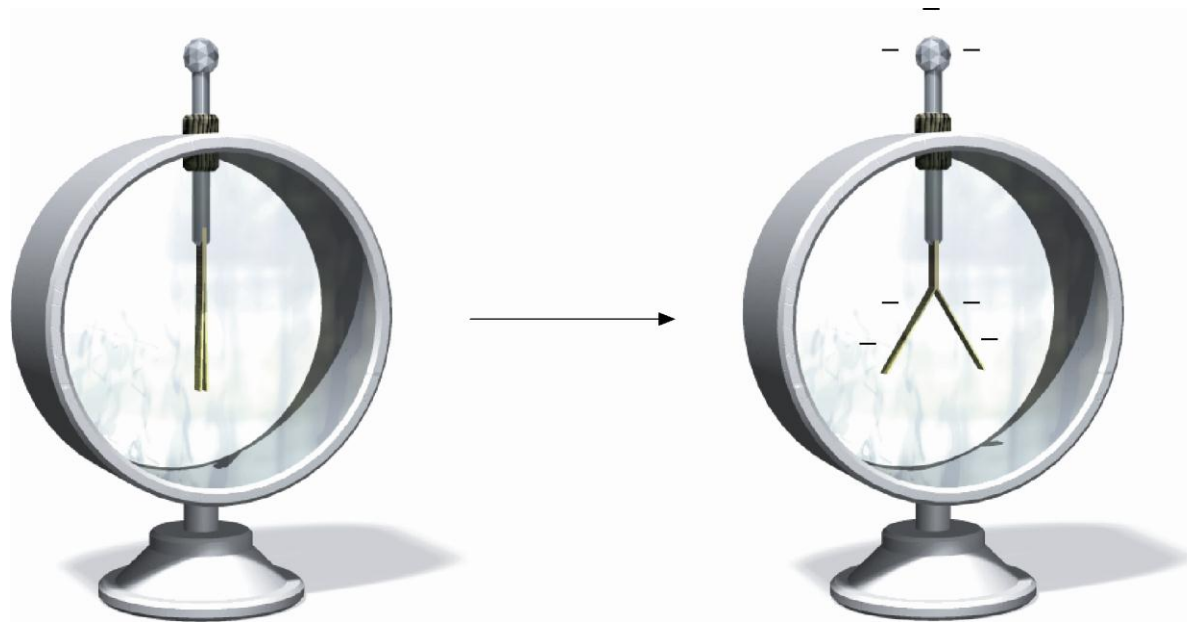
Moderne „Kupfermünzen“ werden aus einer Kupfer-Zink-Legierung geprägt, so der heutige US-Penny, oder bestehen aus einem Stahlkern mit Kupferummantelung wie der Eurocent.

Wie groß ist die Gesamtladung aller Elektronen in einer solchen alten Münze?

Die Kernladungszahl von Kupfer ist  $Z = 29$ .



# Elektroskop



Zwei Goldblättchen sind an einem leitenden Stab befestigt, an dessen Spitze sich eine leitende Kugel befindet. Die Blättchen sind gegenüber dem Gefäß isoliert. Wenn sie ungeladen sind, hängen die Blättchen senkrecht nach unten zusammen.

Wird die Kugel mit einem negativ geladenen Kunststoffstab berührt, geht ein Teil der negativen Ladung des Stabes auf die Kugel über und verteilt sich über den Metallstab auf die Goldblättchen, die sich wegen der elektrischen Abstoßung spreizen.

# Das Coulombsche Gesetz

Die Kraft, die von einer Punktladung auf eine andere ausgeübt wird, wirkt längs der Verbindungslinie zwischen den Ladungen. Sie ändert sich umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands der Ladungen und proportional zum Produkt der Ladungen.

Die Kraft ist abstoßend, wenn beide Ladungen ein gleiches Vorzeichen haben, und anziehend für Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens.

$$|F| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,98758 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \approx 8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

$\epsilon_0$  = elektrische Feldkonstante = Dielektrizitätskonstante:

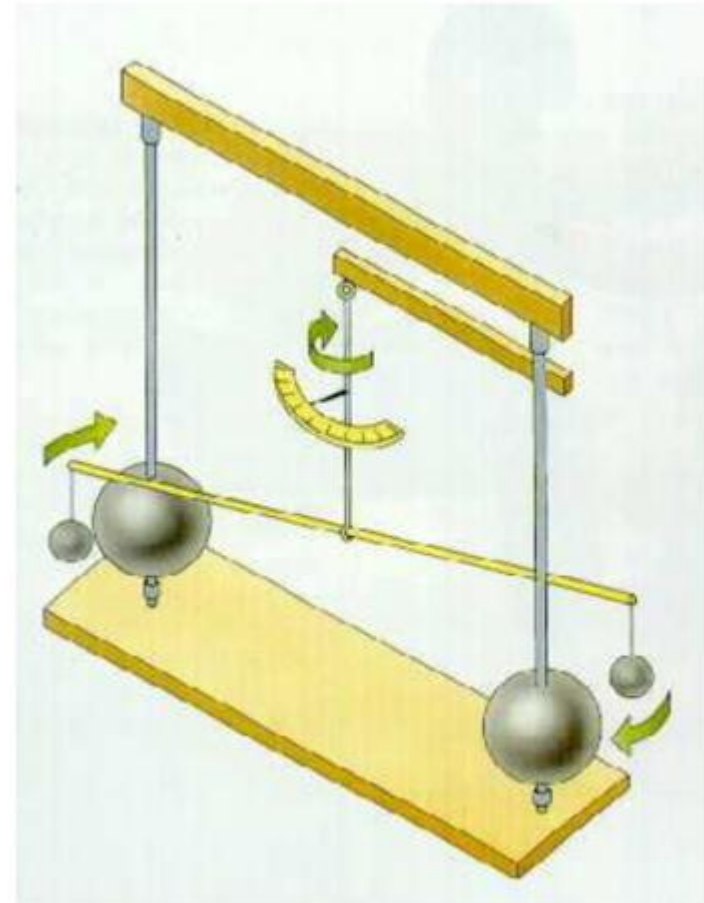
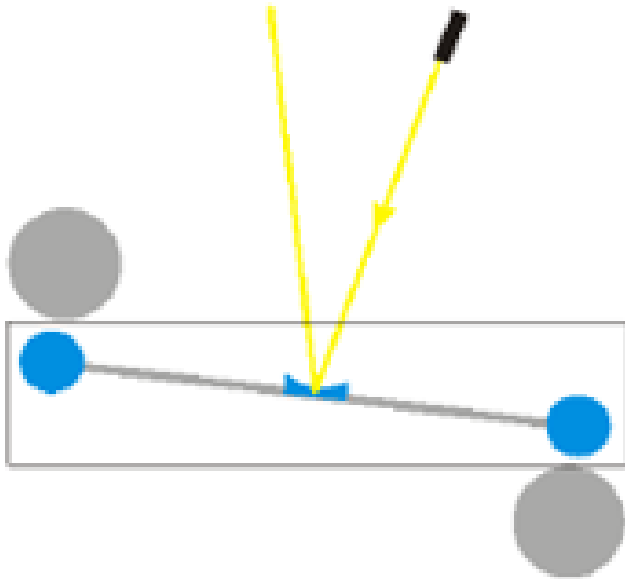
$$\epsilon_0 = 8,85416 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$$



## Zum Vergleich: Gravitationskräfte

$$F_G = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$$G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$



Drehwaage von Cavendish (1798)

# Die vier fundamentalen Wechselwirkungen

Wechselwirkung	Relative Stärke	Reichweite
Starke Wechselwirkung	1	$10^{-15}$ m
Elektromagnetische Wechselw.	$10^{-2}$	$\infty$
Schwache Wechselwirkung	$10^{-5}$	$10^{-18}$ m
Gravitation	$10^{-40}$	$\infty$

Alle diese Wechselwirkungen werden durch Feldtheorien beschrieben. Nur die elektromagnetische und die gravitative Wechselwirkung sind allerdings so langreichweitig, dass sie sich makroskopisch bemerkbar machen und in diesem Bereich durch klassische Feldtheorien erfasst werden können.

Die starke und die schwache Wechselwirkung dagegen sind auf so kleine Abstände beschränkt, dass nur eine Beschreibung im Rahmen quantisierter Feldtheorien sinnvoll ist.

# Elektromagnetische Kraft und Gravitationskraft

Man beachte, dass die elektromagnetische Kraft um einen ungeheuren Faktor stärker ist als die Gravitationskraft: So beträgt beispielsweise das Verhältnis von elektrostatischer Abstoßung zu gravitationeller Anziehung für zwei Protonen bzw. zwei Elektronen etwa  $10^{36}$  bzw.  $4 \cdot 10^{42}$ .

Dass sich elektrische Kräfte in unserer alltäglichen Welt trotz ihrer Stärke und ihrer langen Reichweite recht wenig bemerkbar machen und historisch gesehen erst spät entdeckt wurden, beruht auf der Existenz von Ladungen beiderlei Vorzeichens und darauf, dass sich gleichsinnige Ladungen abstoßen, gegensinnige Ladungen aber anziehen.

Makroskopisch gesehen bildet dadurch alle Materie eine im wesentlichen gleichmäßig fein verteilte Mischung aus positiven und negativen Ladungen, deren elektrische Kraftwirkungen sich praktisch vollständig aufheben. Im Gegensatz dazu sind Massen stets positiv, und Gravitationskräfte sind stets anziehend, können also nicht kompensiert werden. Nur so ist es möglich, dass in unserer Umwelt die um so viele Größenordnungen schwächeren, aber ebenfalls langreichweitigen Gravitationskräfte unter normalen Umständen gegenüber den elektrischen Kräften überwiegen.

# Doch keine neue Naturkraft?

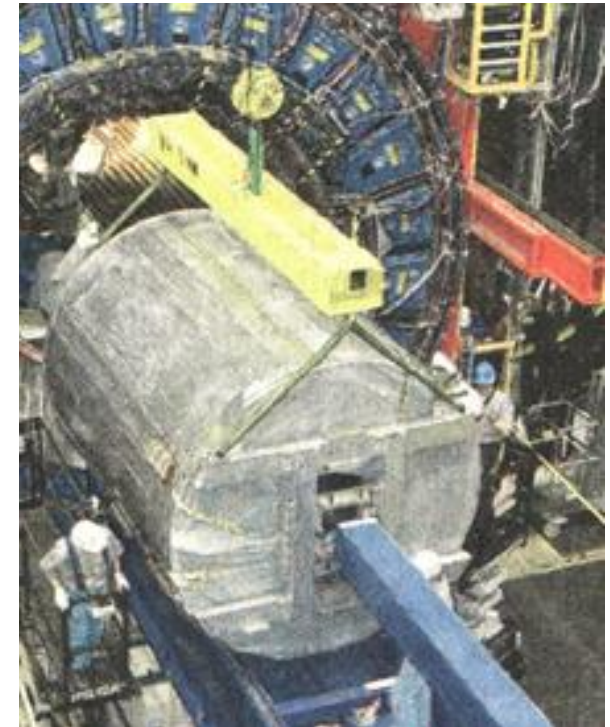
Forscher finden in den Daten bislang keinen Nachweis

**Batavia.** (dpa) Spekulationen um eine fünfte fundamentale Naturkraft haben herbe Dämpfer erhalten. Physiker am US-Beschleunigerzentrum Fermilab konnten keine ungewöhnlichen Phänomene in ihren Daten entdecken, wie sie vor zwei Monaten von Forschern desselben Zentrums berichtet worden waren. Auch Wissenschaftler am europäischen Teilchenforschungslabor Cern bei Genf konnten die Beobachtungen bislang nicht bestätigen.

„Unsere Experimente haben ihre Daten aus dem Jahr 2010 angesehen und nichts gefunden“, berichtete Cern-Sprecher James Gillies am

Donnerstag. „Allerdings sind das auch noch nicht genug Daten, damit wir etwas erwarten würden.“ Daten aus 2011 würden nun analysiert.

Am Fermilab-Beschleuniger Tevatron werden nahezu lichtschnelle Wasserstoffatomkerne aufeinandergeschossen. Zwei Detektoren beobachten die Teilchenkollisionen unabhängig voneinander, CDF und D0. Physiker der CDF-Arbeitsgruppe hatten Anfang April von einem scheinbaren Überschuss bestimmter Kollisionsprodukte berichtet, der auf ein bislang unentdecktes Teilchen oder sogar eine unbekannte Naturkraft hindeutete.



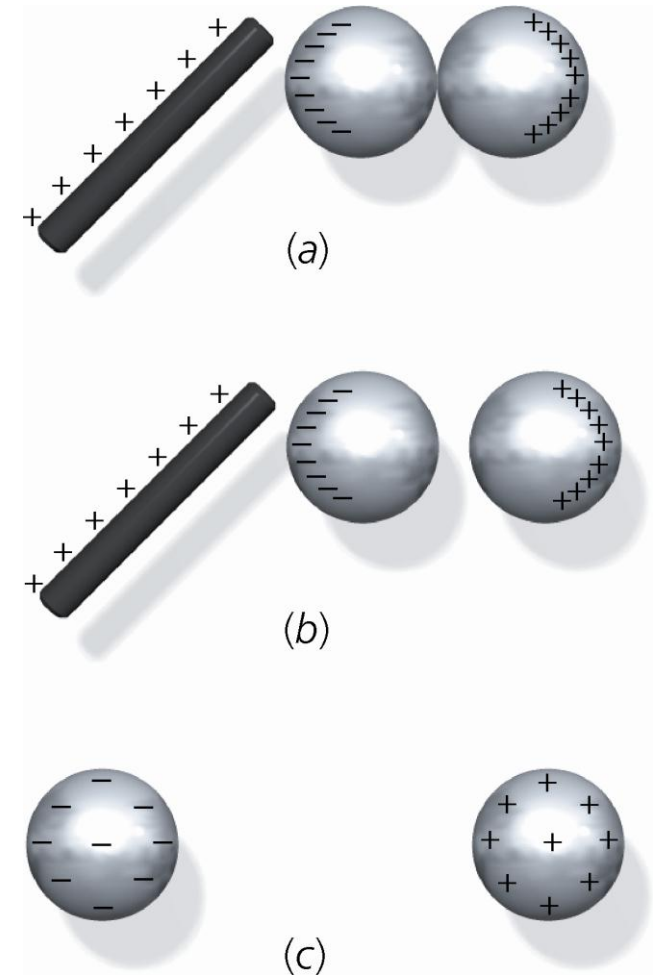
Donau Anzeiger, 17.06.2011

## Aufladen durch Influenz

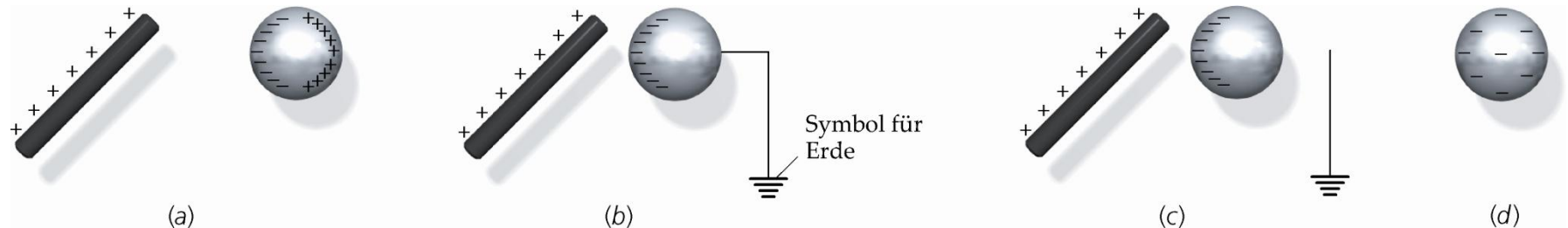
a) In Kontakt stehende, neutrale Leiter werden entgegengesetzt geladen, wenn ein geladener Stab Elektronen in der linken Kugel anzieht.

b) Wenn die Kugeln getrennt werden, bevor man den Stab entfernt, behalten die Kugeln ihre entgegengesetzt gleich großen Ladungen.

c) Wenn der Stab entfernt ist und die Kugeln weit voneinander entfernt sind, dann verteilen sich die Ladungen auf jeder Kugel gleichförmig.



# Influenz durch Erdung



- Die freie Ladung auf der leitenden Kugel wird durch den positiv geladenen Stab polarisiert. Freie Elektronen bewegen sich zu der Seite, die dem Stab zugewandt ist. Die gegenüberliegende Kugelseite ist positiv geladen.
- Wenn der Leiter geerdet wird, dann neutralisieren die Elektronen von der Erde die positive Ladung auf der rechten Seite der Kugelfläche. Der Leiter ist dann negativ aufgeladen.
- Die negative Ladung verbleibt auf der Kugel, wenn die Verbindung zur Erde unterbrochen wird, bevor der Stab entfernt wird.
- Nachdem der Stab entfernt wurde, eine über die Oberfläche gleich verteilte negative Ladung.

# Das elektrische Feld

Das elektrische Feld  $\mathbf{E}$  am Ort der Ladung  $q_0$  ist definiert als der Quotient aus der resultierenden Kraft  $\mathbf{F}$  auf  $q_0$  und dem Betrag der Ladung  $q_0$ :

$$E = \frac{F}{q_0} [N / C]$$

Elektrisches Feld einer Punktladung:

$$E_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_i}{r^2} [N / C]$$

Felder können besonders anschaulich mit Hilfe von Feldlinien beschrieben werden, deren Tangenten in jedem Raumpunkt die Richtung der Feldgrößen (Vektoren) darstellen. Die Feldstärke, also der Betrag der Feldvektoren in den Raumpunkten, wird durch die Dichte der Feldlinien dargestellt.



# Elektrische Feldkonstante

Die elektrische Feldkonstante  $\epsilon_0$  (auch: Permittivität des Vakuums) ist die physikalische Konstante, die im internationalen Einheitensystem die SI-Einheit der Ladung (Coulomb) mit den mechanischen Einheiten in Beziehung setzt.

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c_0^2} = \frac{10^7}{4\pi \cdot 299\,792\,458^2} \frac{\text{A}^2 \text{s}^4}{\text{kg m}^3} \approx 8,854\,187\,817 \dots \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$$

$$\text{F m}^{-1} = \text{A}^2 \text{s}^4 \text{kg}^{-1} \text{m}^{-3} = \text{As V}^{-1} \text{m}^{-1} = \text{C V}^{-1} \text{m}^{-1}$$



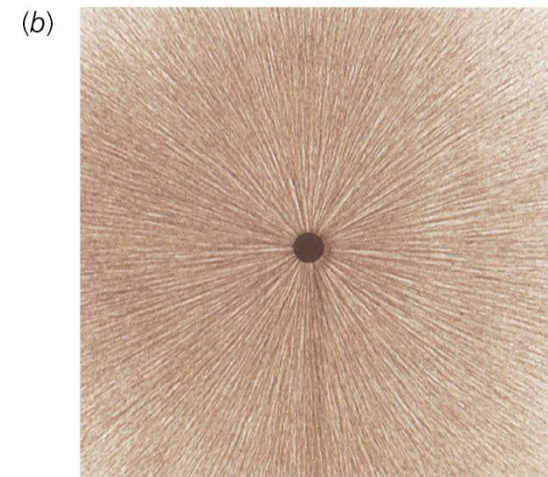
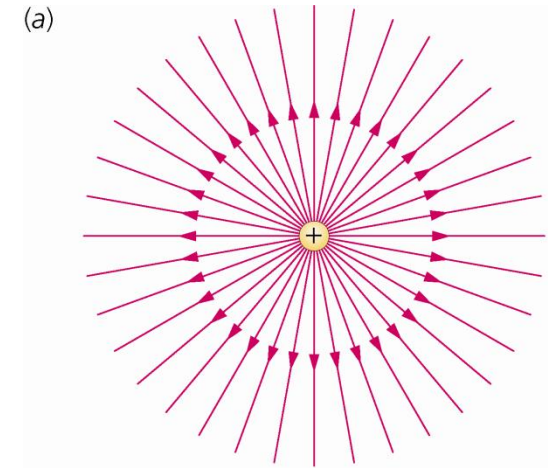
# Elektrische Feldlinien einer einzelnen positiven Punktladung

a) Man kann sich das elektrische Feld durch gerichtete Linien veranschaulichen, die man elektrische Feldlinien nennt und aus denen man sowohl den Betrag als auch die Richtung des Feldes ablesen kann.

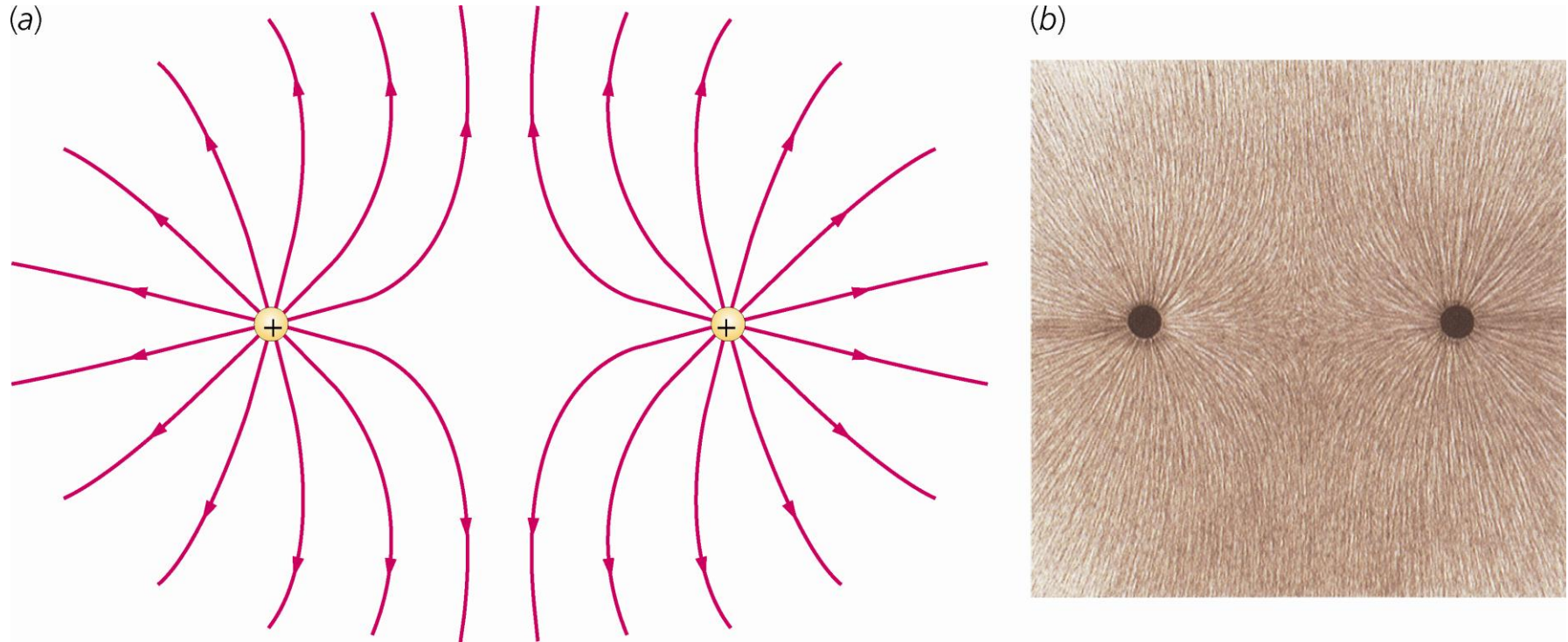
Wenn die Ladung positiv ist, dann zeigen die Pfeile von der Ladung weg, wenn die Ladung negativ wäre, dann würden die Pfeile in die andere Richtung zeigen.

**Elektrische Feldlinien gehen von + nach -**

b) elektrische Feldlinien, sichtbar gemacht durch in Öl suspendierte Fasern. Das elektrische Feld des geladenen Objektes in der Mitte lädt die Enden jeder Faser durch elektrostatische Influenz entgegengesetzt auf, wodurch sich die Fasern parallel zum Feld ausrichten.



# Elektrische Feldlinien von zwei positiven Punktladungen



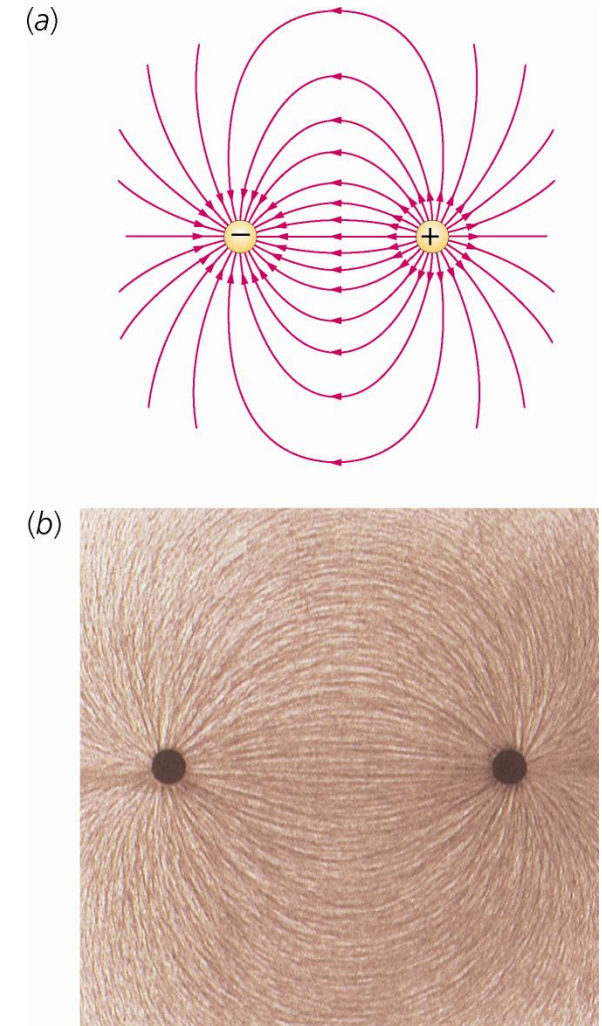
- a) Die Pfeile würden in entgegengesetzte Richtung zeigen, wenn die Ladungen negativ wären.
- b) Die gleichen elektrische Feldlinien, sichtbar gemacht durch in Öl suspendierte Fasern.

# Elektrische Feldlinien eines elektrischen Dipols

In unmittelbarer Nähe der positiven Ladung sind die Linien radial nach außen gerichtet.

In unmittelbarer Nähe der negativen Ladung sind die Linien radial nach innen gerichtet.

Da die Ladungen den gleichen Betrag haben, ist die Zahl der Linien, die an der positiven Ladung beginnen, gleich der Zahl der Linien, die an der negativen Ladung enden.

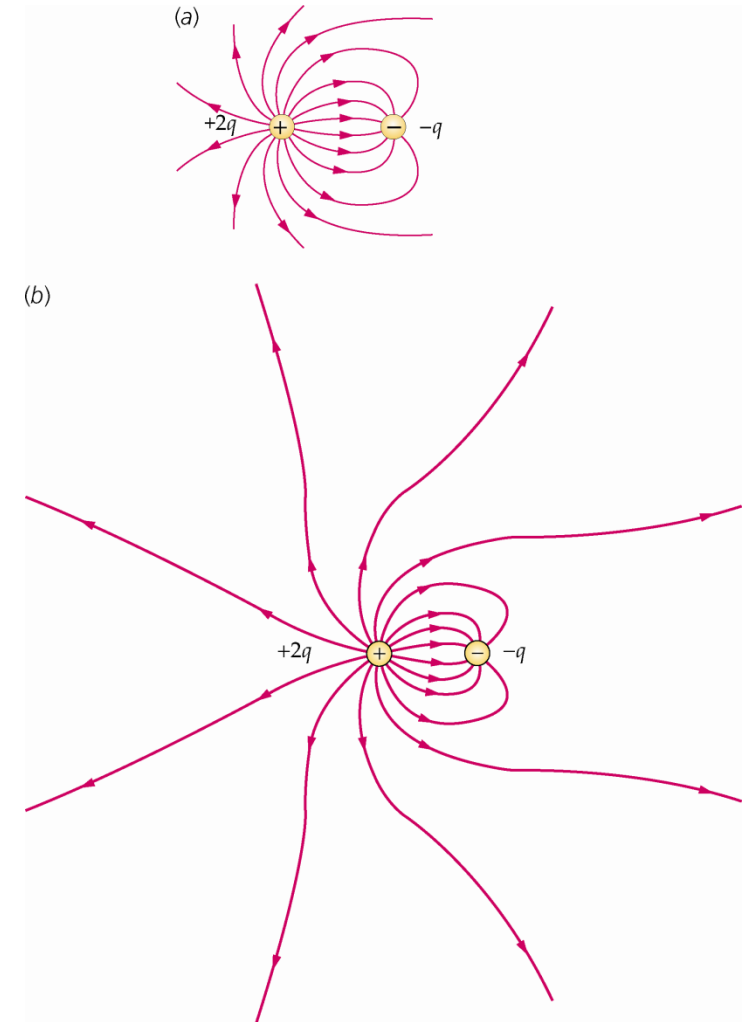


# Feldlinien für eine Punktladung $+2q$ und eine weitere Punktladung

Zweimal so viele Linien treten aus der positiven Ladung heraus wie in die negative Ladung hinein. So tritt die Hälfte der an der positiven Ladung  $+2q$  beginnenden Linien in die negative Ladung  $-q$  ein.

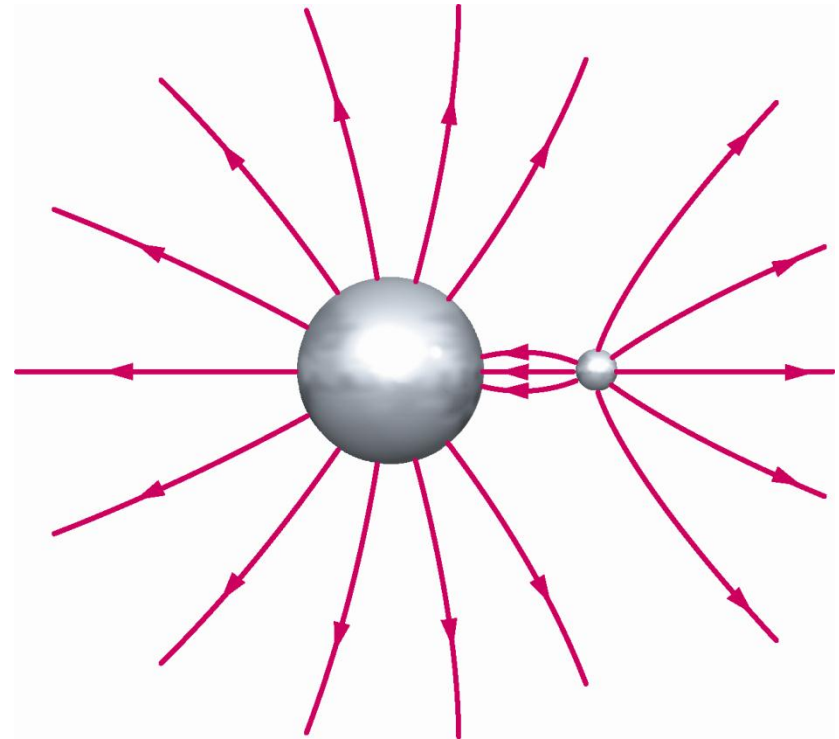
Die andere Hälfte der Linien aus der positiven Ladung verlässt das System und erstreckt sich bis ins Unendliche.

In großer Entfernung von den Ladungen sind die das System verlassenden Linien näherungsweise kugelsymmetrisch radial nach außen gerichtet wie von einer einzelnen Ladung  $+q$ .



# Aufgabe

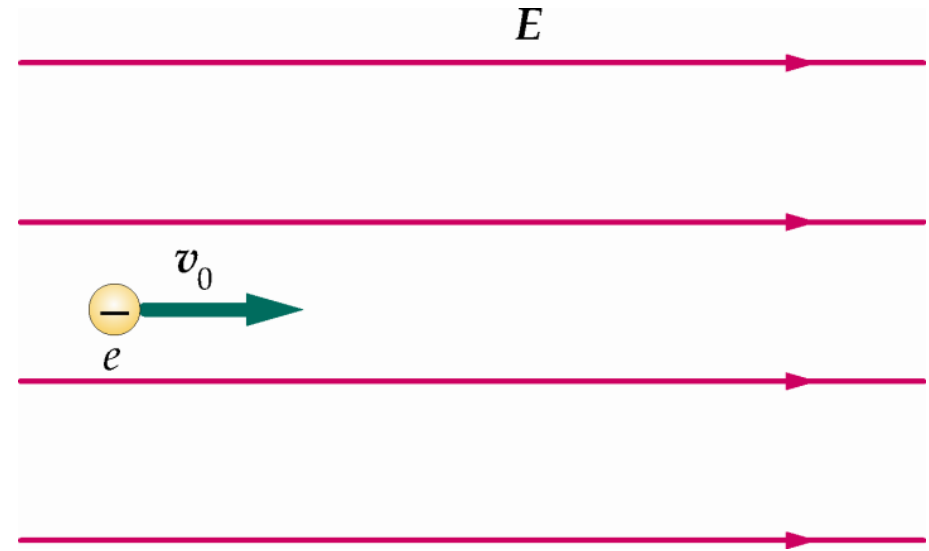
Welche Vorzeichen haben die Ladungen auf den Kugeln und wie groß sind sie relativ zueinander?



## Elektron in einem elektrischen Feld (1)

Ein Elektron tritt mit einer Anfangsgeschwindigkeit  $v_0 = 2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$  in Richtung des Feldes in ein homogenes elektrisches Feld  $E = 1000 \text{ N/C}$  ein.

Wie weit bewegt sich das Elektron, bis es zur Ruhe kommt?



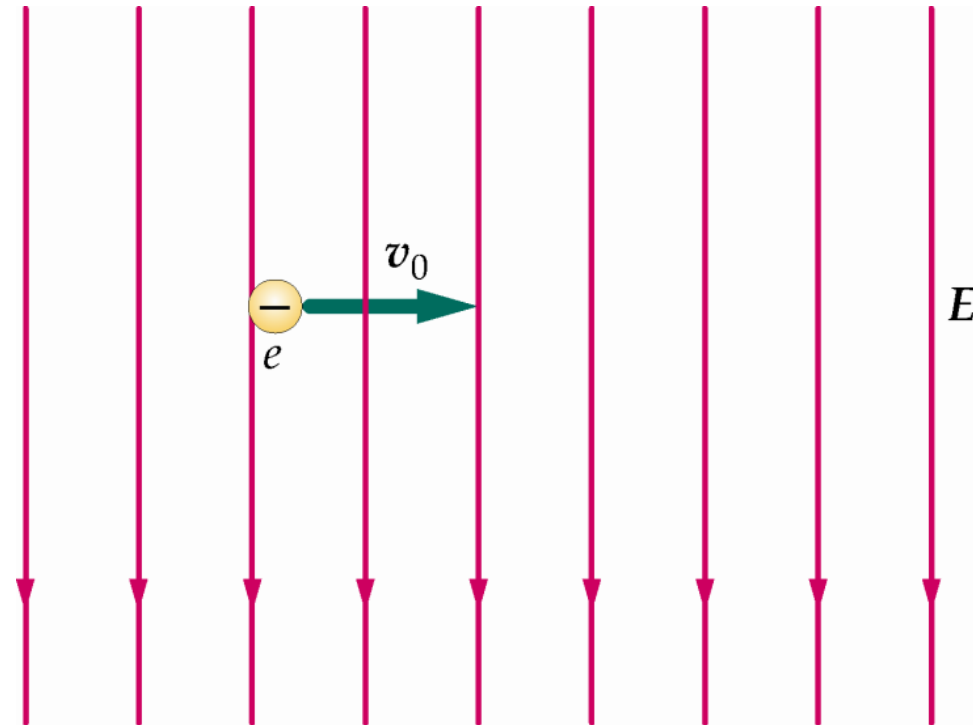


## Elektron in einem elektrischen Feld (2)

Ein Elektron tritt mit einer Anfangsgeschwindigkeit  $v_0 = 2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$  senkrecht zum Feld in ein homogenes elektrisches Feld  $E = -2000 \text{ N/C}$  ein.

Vergleichen Sie die Gravitationskraft mit der elektrischen Kraft, die beide auf das Elektron wirken.

Um wieviel wurde das Elektron abgelenkt, nachdem es sich 1,0 cm in x-Richtung bewegt hat?



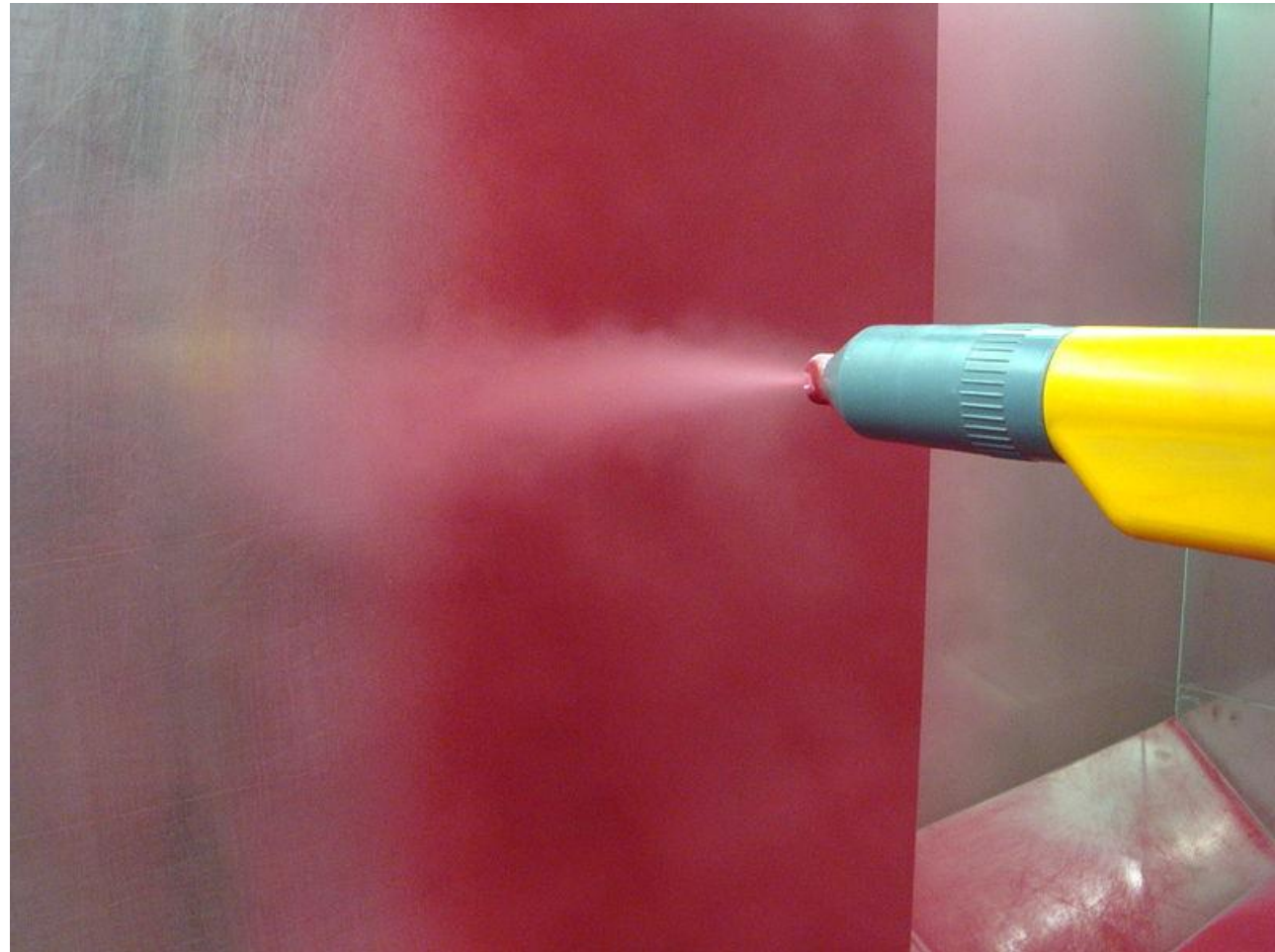
## Beispiel: Pulverbeschichtung

Das Pulver wird aufgebracht, indem das zu beschichtende Teil elektrisch aufgeladen wird.

Dann läd man sehr kleine Teilchen ( $1\text{ }\mu\text{m}$  bis  $100\text{ }\mu\text{m}$ ) entgegengesetzt auf.

Die Beschichtungsteilchen werden dann von dem zu beschichtenden Körper angezogen.

Beim Aushärten verbinden sich die Moleküle der Beschichtung,



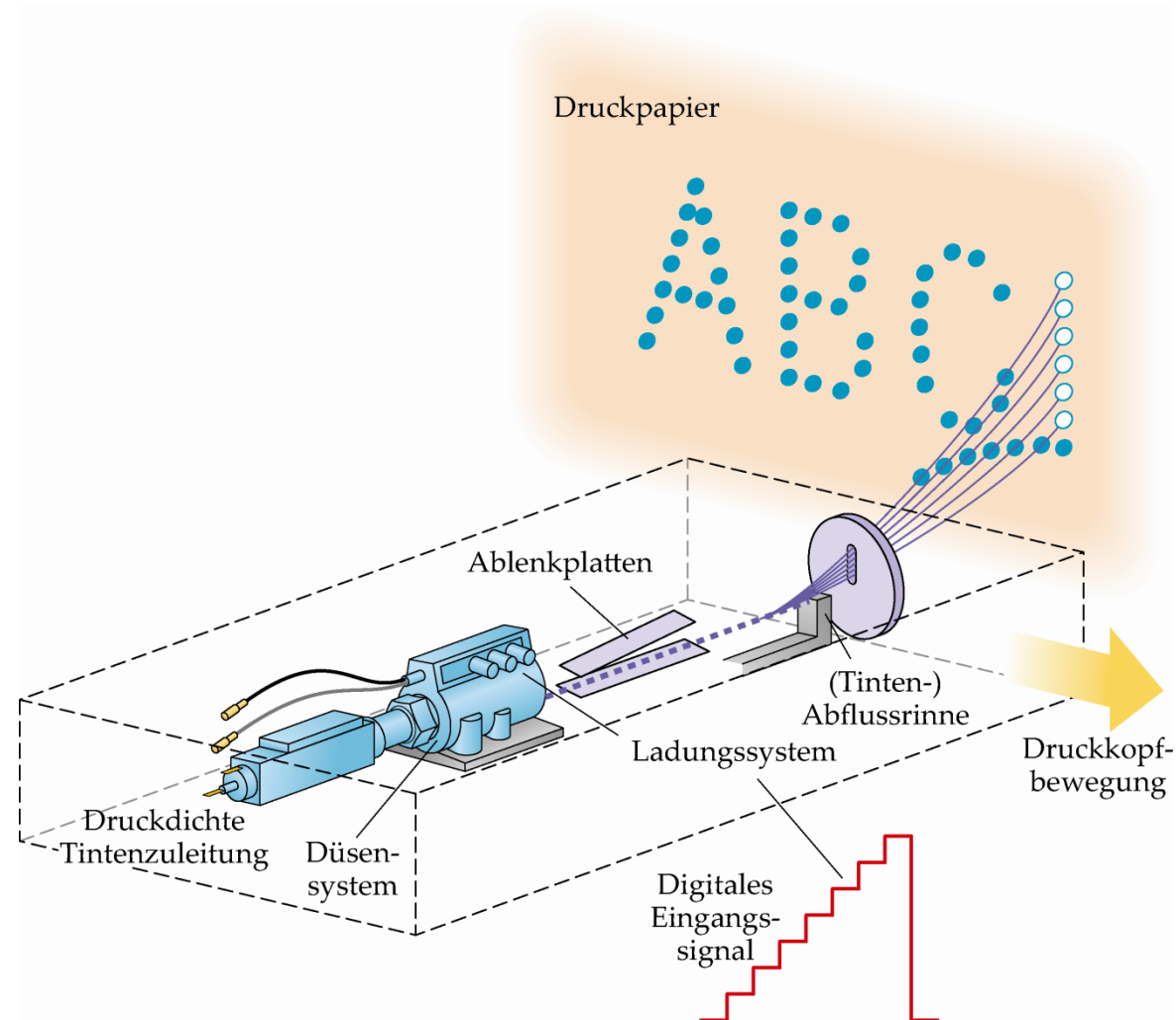


## Beispiel: Tintenstrahldrucker

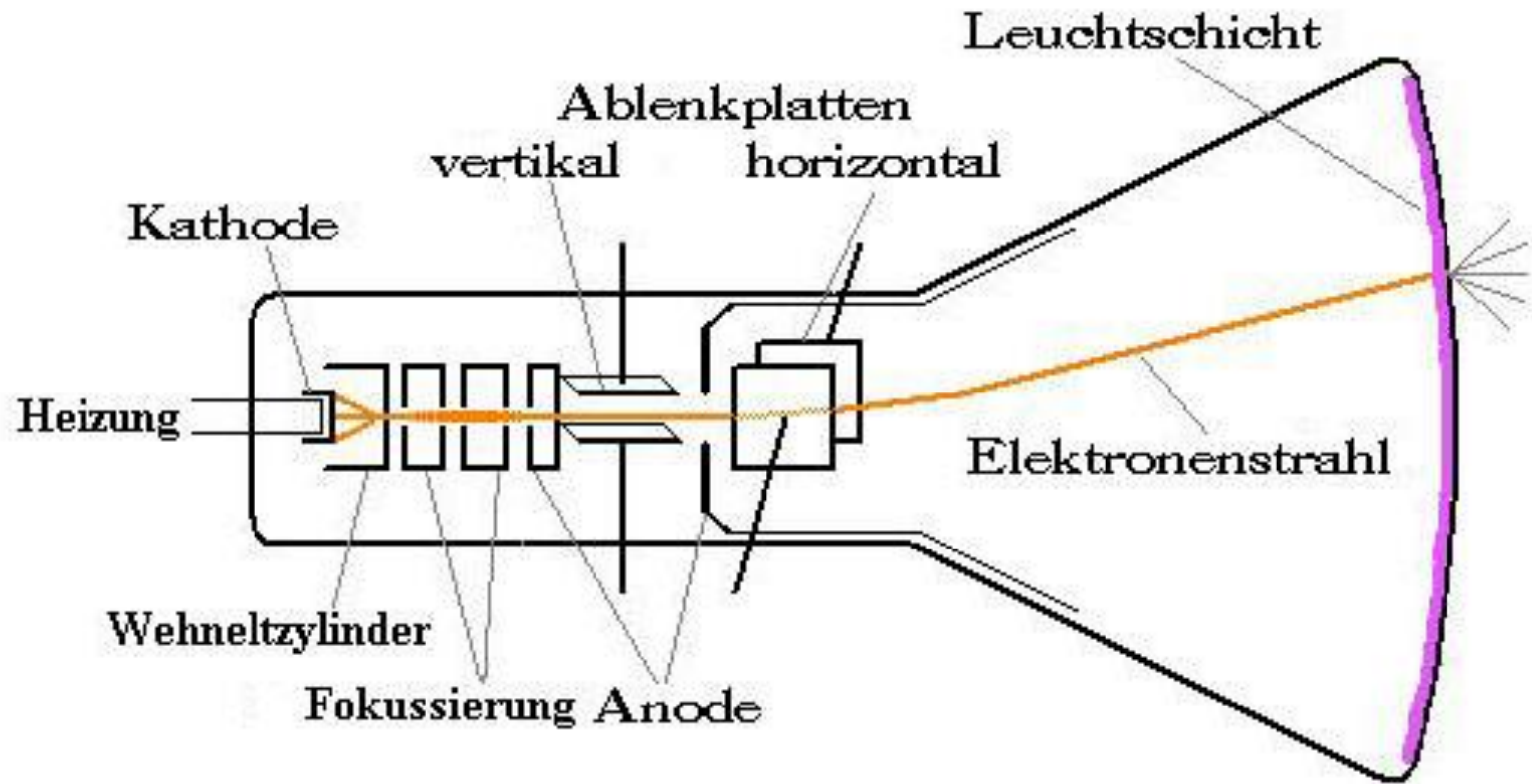
Im Tintenstrahldrucker wird die Tinte in Form von einzelnen Tröpfchen aus dem Düsensystem gepumpt. Jedes Tröpfchen, das beim Auftreffen auf dem Papier einen Punkt erzeugen soll, wird elektrisch aufgeladen.

Das Ablenksystem besteht aus einem Paar von entgegengesetzt geladenen Platten.

Je größer die Ladung auf einem Tintentropfen ist, umso mehr wird der Tropfen abgelenkt, wenn er die Ablenkplatten passiert.



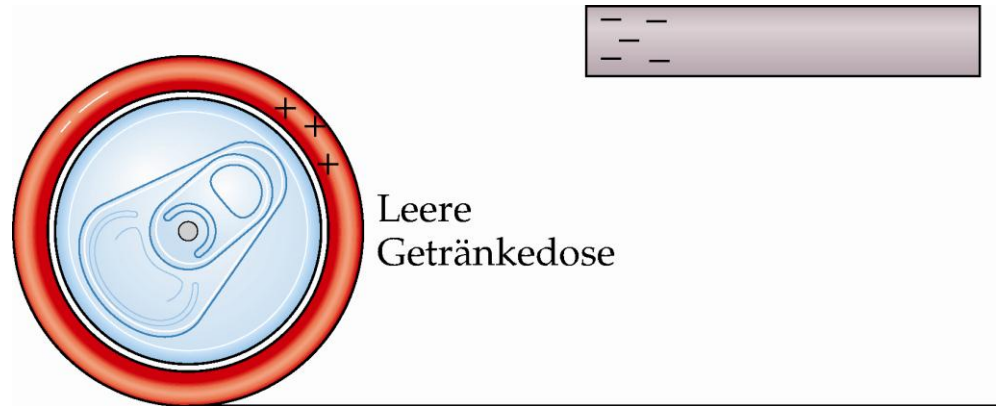
# Kathodenstrahlröhre



# Kathodenstrahlröhre



# Aufgaben



1. Bei einem verbreiteten Schauversuch reibt man einen Kunststoffstab an einem Fell, um ihn aufzuladen, und hält den Stab dann in die Nähe einer leeren Getränkedose. Erläutern Sie, warum die Dose sich auf den Stab zu bewegt.
2. Zwei punktförmige Teilchen sind durch einen Abstand von 0,60 m voneinander getrennt und tragen eine Gesamtladung von  $200\ \mu\text{C}$ . Bestimmen Sie die Ladungen von jedem der beiden Teilchen, wenn sie sich mit
  - a) mit einer Kraft von 80 N abstoßen,
  - b) mit einer Kraft von 80 N anziehen.

# Literatur und Quellen

Paul A. Tipler, Gene Mosca: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, Spektrum Akademischer Verlag, August 2009

<http://de.wikipedia.org/>



Hochschule Deggendorf – Edlmairstr. 6 und 8 – 94469 Deggendorf