

<http://maren.desy.de/hex/holm>

Experimentalphysik I/II für Studierende der Biochemie/Molekularbiologie, Biologie und Zahnmedizin

Transparente zur Vorlesung

WS 2005/06, U. Holm

Einleitung

Physikalische Größen und Einheiten

Mechanik

Wärmelehre

Schwingungen und Wellen

Elektrizität und Magnetismus

Optik

Atom- und Kernphysik

Steuerung und Regelung

Elektrizität und Magnetismus

Geschichte von Elektrizität und Magnetismus

Electrum : Bernstein

5. Jahrhundert v. Chr.:

Reiben von Bernstein

18. Jh.:

Anziehende und abstoßende Kräfte

Gray, Dufay, Franklin:

Positive, negative Ladung; Blitz als elektrischer Effekt

Franklin, Priestley, Cavendish:

Kraft proportional zu $1/r^2$

Anfang 19. Jh.:

Magnetismus (damals “unabhängig von Elektrizität”); Klärung um etwa 1820:

Oerstedt, Ampère, Faraday

1860er:

Theorie des Elektromagnetismus von **Maxwell**

Geschichte der Elektrizität in der Medizin:

- **Franklin (1769):**
Behandlung von Patienten mit Lähmungserscheinungen mit statischer Reibungselektrizität: Muskelzuckungen, kein dauerhafter Erfolg.
- **Galvani und Volta (1800):**
Leistungsfähige Stromquellen in Elektrotherapie (“Galvanisation”), wird auch heute noch angewendet.
- **Faraday, de Boulogne (1861):**
Mit Induktionsspule “Faradisierung” (Therapie), heutzutage für Diagnose.
- **d’Arsonval (1890):**
Hochfrequenter Strom für Elektrochirurgie, Elektro-Diathermie.

Weitere wichtige Entwicklungen:

Herzschrittmacher
Elektrodefibrillation
Elektrokardiographie (mV)
Elektroenzephalographie (μV)

Der **Mensch** hat **kein Sinnesorgan für elektrische bzw. magnetische Felder**, wohl aber einige Tiere (Hai mit Elektrorezeptoren).

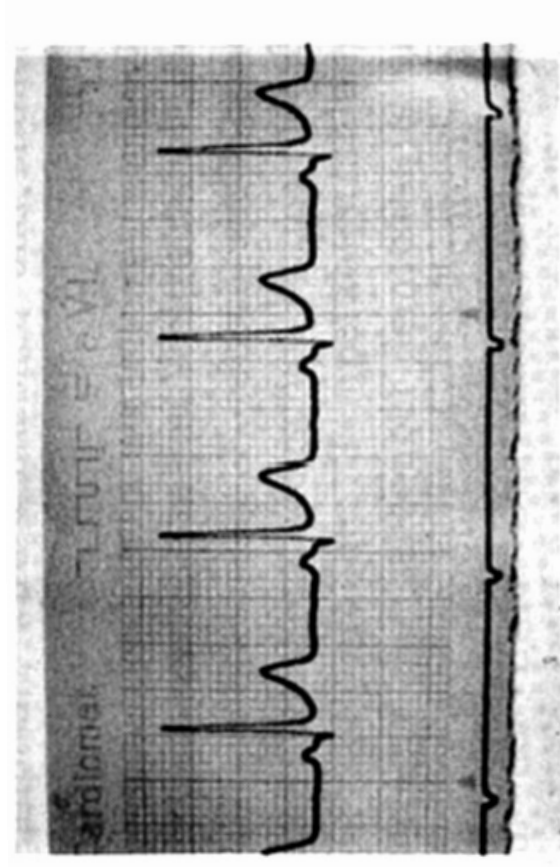


Abb. 6.01. Elektrokardiogramm eines gesunden Menschen; unten Zeitmarken im Sekundenabstand, Pulsfrequenz demnach ca. $72/\text{min} = 1,2 \text{ Hz}$

Elektrostatik

Es ist nur eine zusätzliche neue Grundgröße nötig, um alle elektromagnetischen Effekte beschreiben zu können:

Elektrische Ladung Q

(Später stattdessen SI-Größe **elektrischer Strom I**).

Experimentelle Ausgangspunkte für neue Größe:

“Reibungsversuche” Glasstab am Seidentuch und Hartgummistab am Katzenfell:

- Es gibt offenbar zwei Arten von “Ladungen”, (genannt) **positiv** bzw. **negativ**.
- Bei Reibungsversuchen erfolgt Trennung von positiver und negativer Ladung. Gesamtladung bleibt erhalten, wenn Vorzeichen berücksichtigt wird.
- Ladungen erzeugen **abstoßende** (wenn gleichnamig) bzw. **anziehende** (wenn ungleichnamig) **Kräfte**:

- **Coulomb-Gesetz:**

$$F = f' \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r_{12}^2}$$

$$f' = 1/4\pi\epsilon_0 = 8,99 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{A}^2 \text{ s}^2.$$

Einheit der Ladung:

$$[Q] = 1 \text{ Coulomb (C)} = 1 \text{ Ampère} \cdot \text{ Sekunde (A s)}.$$

Bei gleichnamigen Q_i ist $F > 0$ (abstoßend), sonst < 0 (anziehend).

$\vec{F}$ entlang der Verbindungslinie.

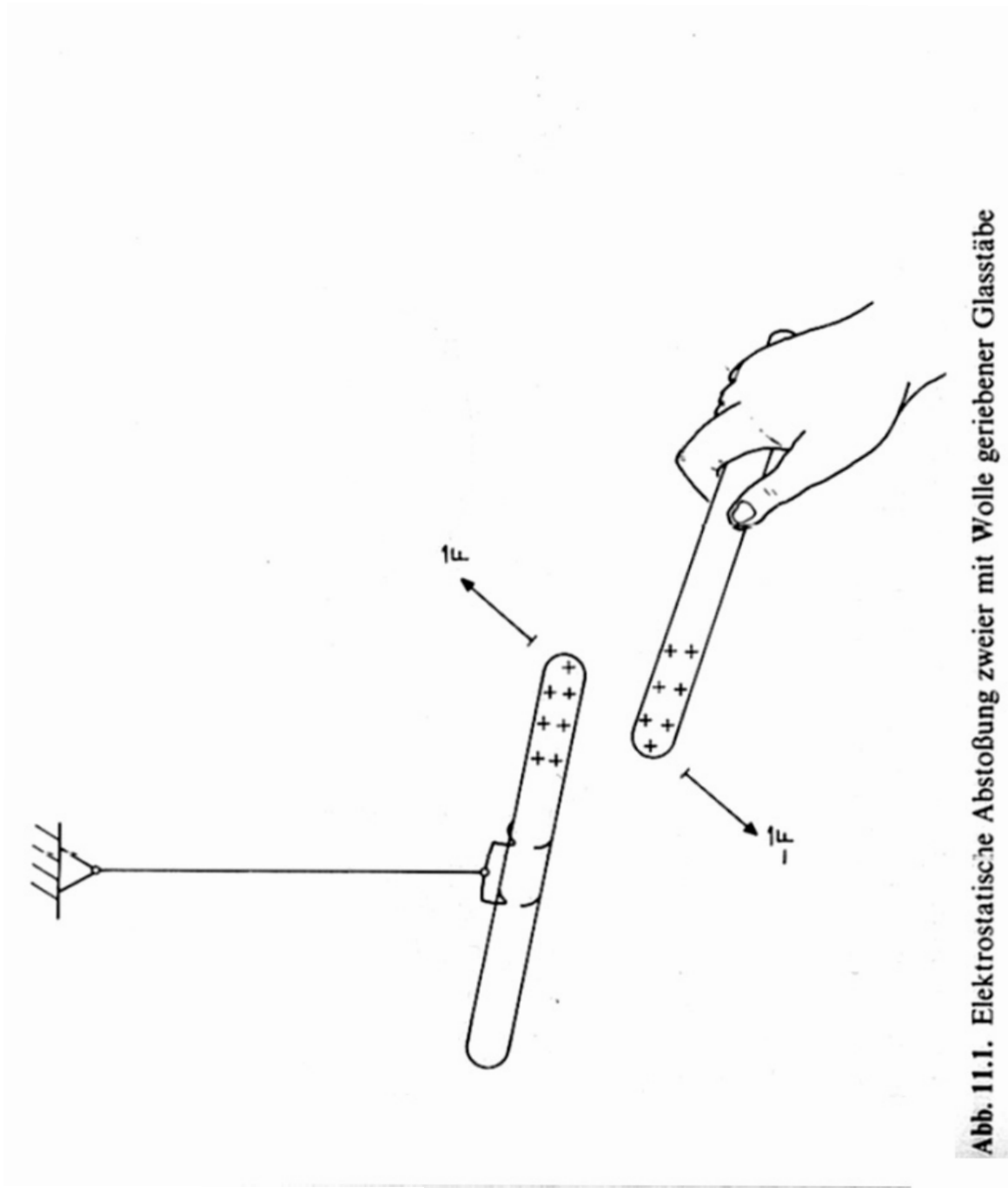


Abb. 11.1. Elektrostatische Abstoßung zweier mit Wolle geriebener Glasstäbe

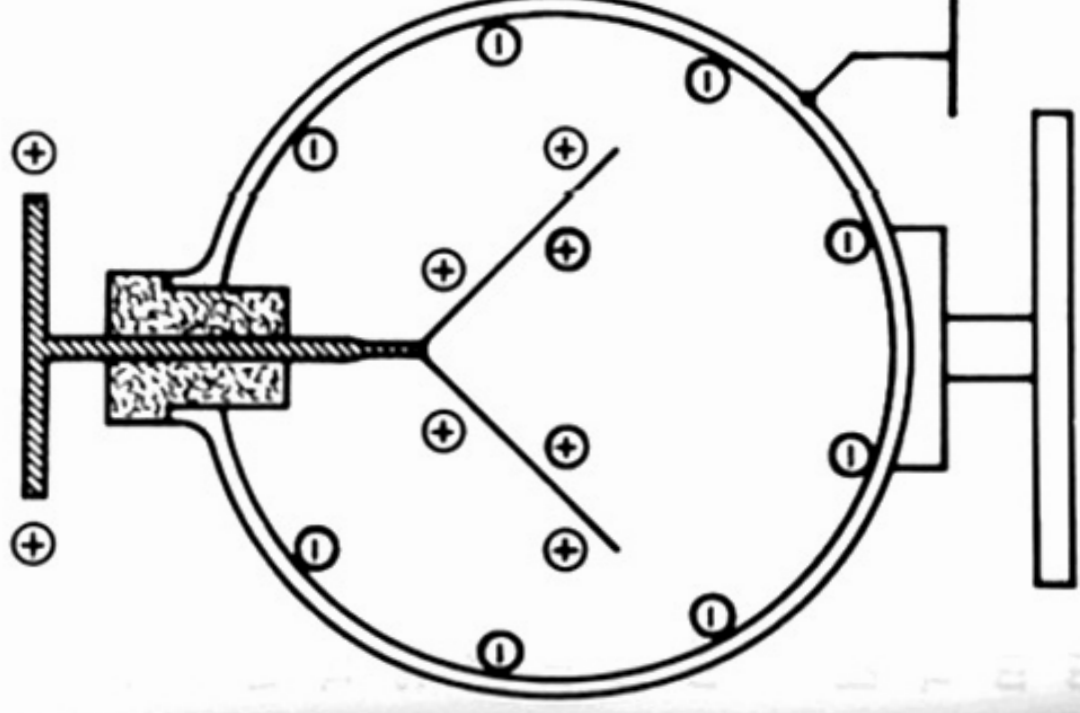


Fig. 7.6 Elektroskop zum Nachweis elektrischer Ladung. 1 bedeutet „geerdet“, d.h. mit der Umgebung leitend verbunden

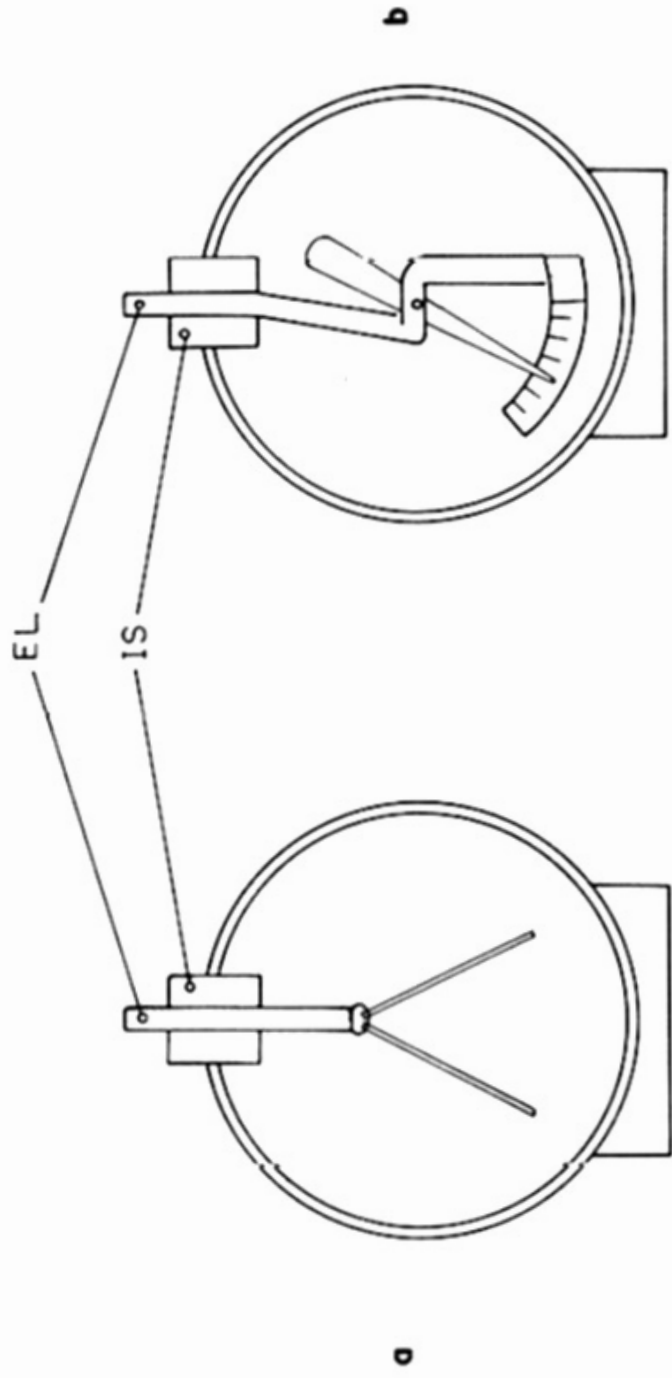


Abb. 11.2. a Blättchen-Elektroskop nach A. Bennet. **b** Elektrometer nach K. F. Braun. *EL* = elektrischer Leiter, *IS* = elektrischer Isolator

Wasserstoffatom:

Elektrische Kraft zwischen Proton und Elektron ist etwa 10^{40} mal so groß wie Gravitationskraft.

Elektrische Ladung ist **gequantelt**:

Kleinste Ladung ist $q_{el} = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ A s}$ (Elektron) bzw. $q_{prot} = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ A s}$ (Proton).

Messung der elektrischen Ladungen: Über Kraftwirkung mit Elektrometern.

Elektrische Feldstärke

Die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ beschreibt **den Zustand des Raumes**, der **durch eine Ladung Q** (oder mehrere) hervorgerufen wird.

Die Feldstärke ist die Kraft $\vec{F}$, die pro positiver "Einheitsladung" q auf diese ausgeübt wird:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \vec{r_0}$$

$$[E] = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$

r : Abstand Q von Probeladung q .

$\vec{E}$ hat dieselbe Richtung wie $\vec{F}$.

Mehrere Ladungen Q_i ($i = 1, \dots, n$): Einzelkräfte $\vec{F}_i$ bzw. Feldstärken $\vec{E}_i$ vektoriell addieren.

“Zustand” des Raumes wird durch **Feldlinien** beschrieben:

- a) **Tangente** an Feldlinie gibt in jedem Ortspunkt die **Richtung** von $\vec{E}$ und damit **der Kraft** an.
- b) **Feldliniendichte ist Maß** für Feldstärke $|\vec{E}| = E$ und damit der **Stärke der Kraft**.

Feldlinienbilder für verschiedene Ladungsanordnungen werden gezeigt.

Eigenschaften der **elektrischen Feldlinien**:

1. Sie beginnen bei positiven und enden bei negativen Ladungen;
2. sie schneiden einander nicht;
3. auf Metalloberflächen stehen sie senkrecht.

Influenz

In **Metallen** gibt es **frei bewegliche Elektronen** (“frei” bedeutet “nicht-ortsfest”; aber Reibung).

Wird Metallstück positive Ladung gegenübergestellt, so versuchen (negative) Elektronen im Metall, der positiven Ladung so nahe wie möglich zu kommen $\Rightarrow$ Elektronenanhäufung gegenüber der positiven Ladung, weiter weg Elektronenverarmung.

Ladungen verschieben sich solange, bis die durch die neu entstandene Ladungsteilung auftretenden Gegenkräfte gleich groß werden. Diese Ladungstrennung nennt man **Influenz**.

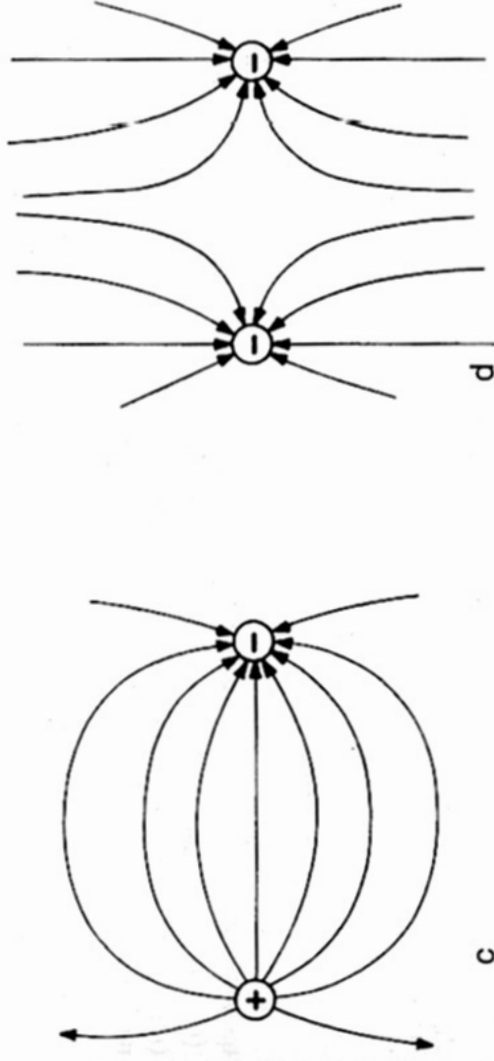


Abb. 14.8 Feldlinienverlauf (a) um eine positive Ladung, (b) um eine negative Ladung, (c) zwischen einer positiven und einer negativen Ladung und (d) zwischen zwei negativen Ladungen. (Bei (a), (b) und (d) ist angenommen, daß sich jeweils Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens in sehr großer Entfernung befinden, von denen die Feldlinien ausgehen bzw. auf denen sie enden.)

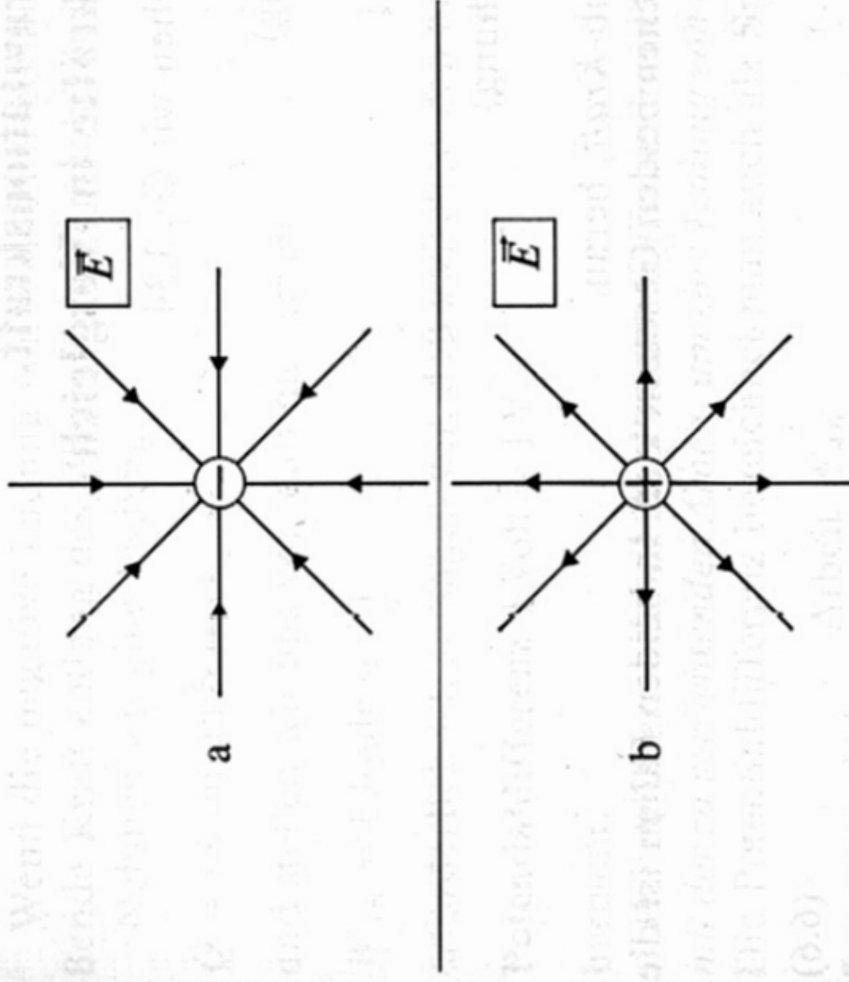


Abb. 6.3. Die elektrischen Feldlinien in der Umgebung einer negativen (a) und einer positiven (b) elektrischen Ladung. Die Richtung der Feldlinien weist stets in die Richtung der Kraftwirkung, die eine positive Probeladung erfährt; das ist auf die negative Ladung zu und damit anziehend (a) und von der positiven Ladung weg und damit abstoßend (b).

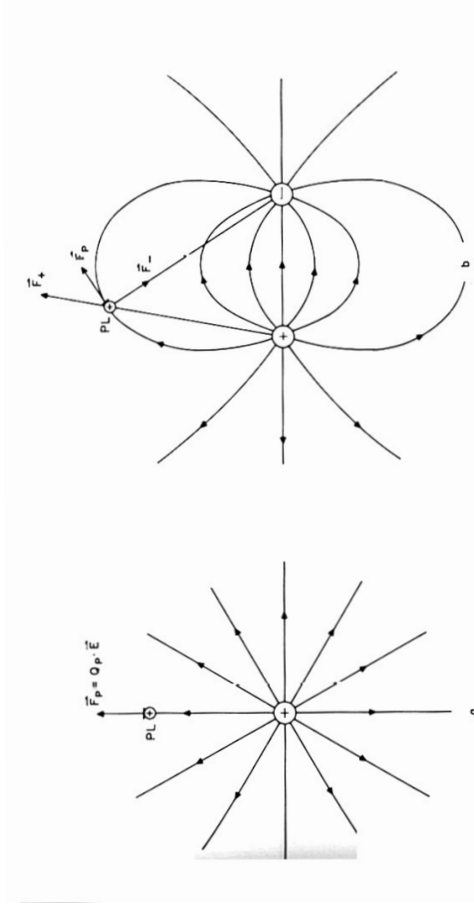


Abb. 11.4. Feldlinien eines elektrischen Monopols **a** und eines ungleichnamigen elektrischen Dipols **b**. PL ist die Probeladung, auf diese wirkt die Coulombkraft $F_P = Q_P \cdot E$. Beim Dipol ist F_P die Resultierende aus den von den beiden Ladungen ausgehenden Coulombkräften F_+ und F_- . Der Verlauf der Feldlinien ergibt sich aus der Richtung von F_P .

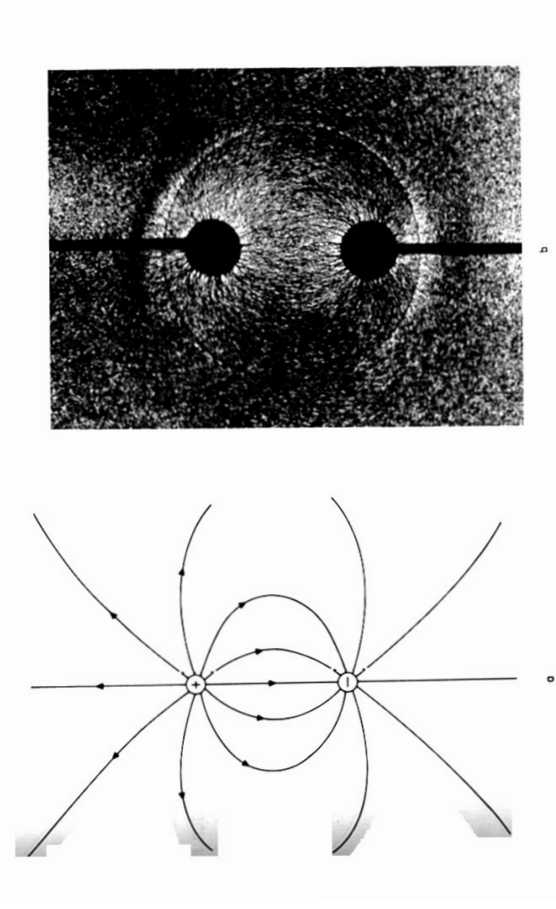


Abb. 11.5. **a** Feldlinien eines ungleichnamigen elektrischen Dipols. **b** Sichtbarmachung des elektrischen Felds mit Hilfe von Kunststoffsfasern. Diese richten sich in Richtung der Feldlinien aus.

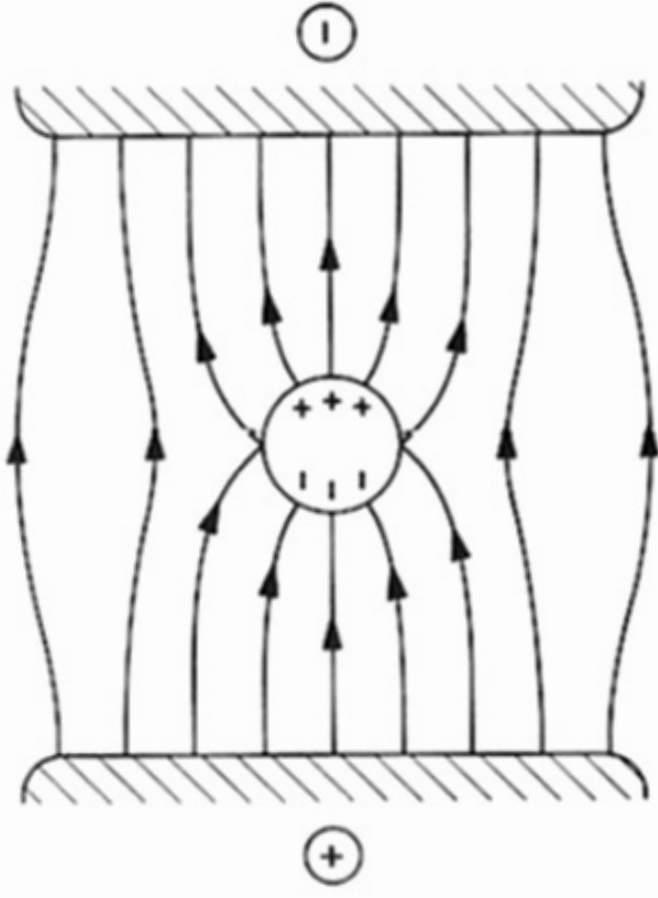


Fig. 9.36 Isolierte, ungeladene Metallkörper werden im elektrischen Feld äquipotentiale Körper, in ihrem Innern besteht kein elektrisches Feld

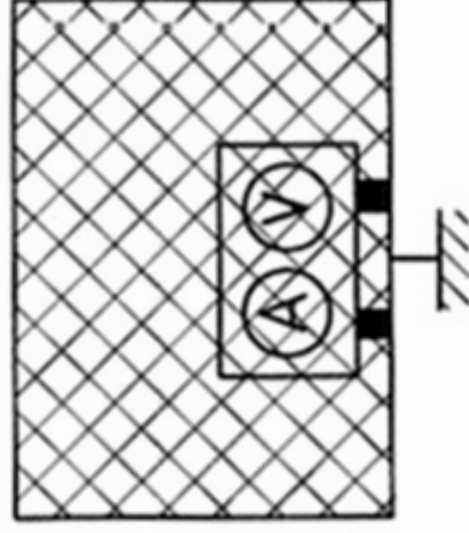


Fig. 9.37 „Faraday-Käfig“ zur Abschirmung elektrischer Störfelder

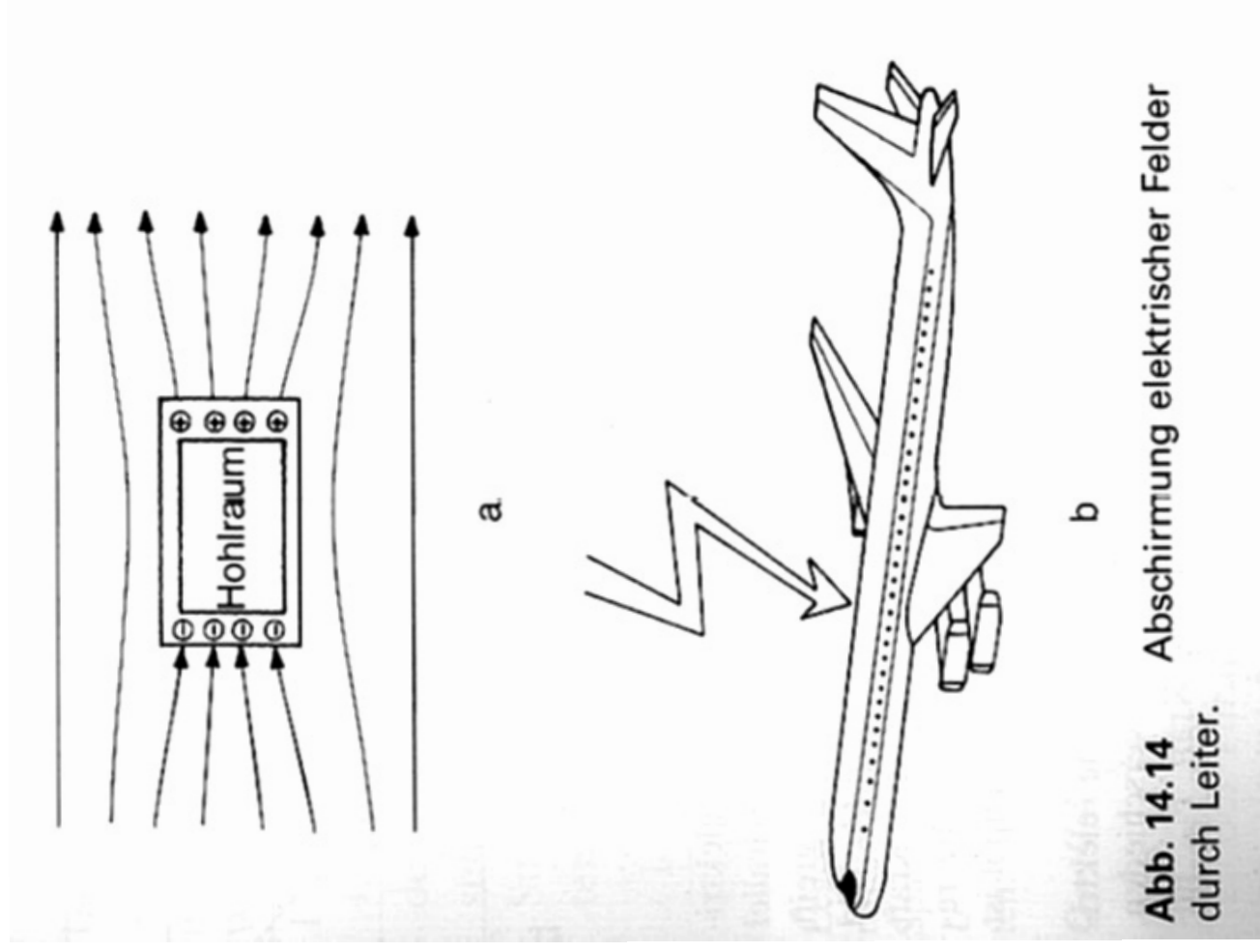


Abb. 14.14 Abschirmung elektrischer Felder durch Leiter.

Der **Faraday-Käfig** funktioniert wegen der Influenz: in den Innenraum eines metallischen Käfigs kann ein äußeres elektrisches Feld nicht eindringen.

Polarisation

Bei Nichtleitern (**Isolatoren**) ist eine Ladungsverschiebung nicht möglich, da etwa vorhandene **Ladungen ortsfest** sind. Daher keine Influenz.

Allerdings lädt sich auch bei ihnen bei Annäherung einer positiven Ladung die zugewandte Seite negativ und die abgewandte Seite positiv auf:

Moleküle dieser **Dielektrika** sind kleine **elektrische Dipole** (oder werden durch das äußere elektrische Feld durch Änderung der Ladungsverteilung dazu gemacht).

Dipole richten sich im äußeren elektrischen Feld mehr oder weniger stark aus, sie sind **polarisierbar**.

Maß für die Polarisierbarkeit ist die relative **Dielektrizitätskonstante** ϵ .

Für Luft und andere Gase ist $\epsilon \approx 1$, für Glas 5–9 und für Wasser 81.

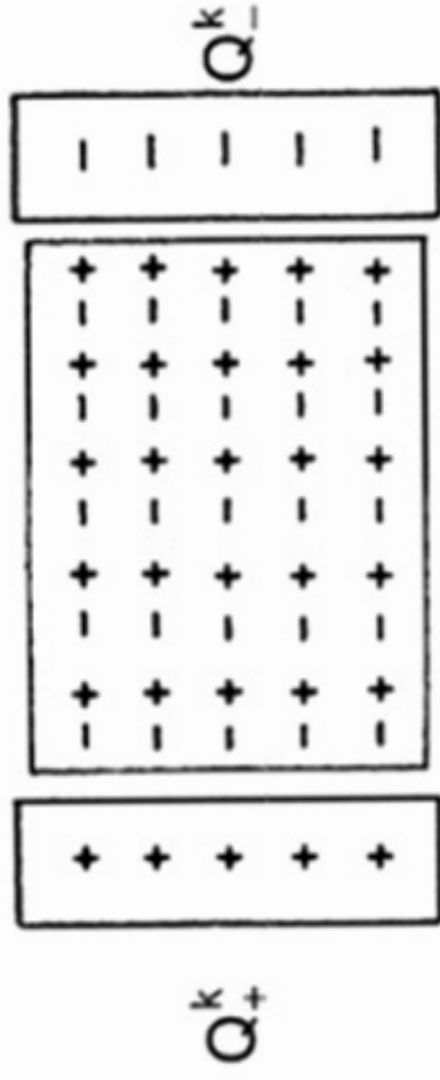


Abb. 14.15 Dielektrikum im Feld.

bleiben, wie Abb. 14.15 zeigt, für eine Wirkung nach außen die Dipole an den Oberflächen.

Kraft zwischen zwei Ladungen Q_1 und Q_2 in **Dielektrikum** (ϵ) ist gegenüber dem Vakuum durch das erzeugte Gegenfeld um den Faktor ϵ herabgesetzt:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1Q_1Q_2}{\epsilon r^2}$$

Damit gilt auch für die elektrische Feldstärke im Dielektrikum:

$$E_{\text{Diel}} = \frac{1}{\epsilon} \cdot E_{\text{Vak}}$$

(Zur Erinnerung: im Metall ist $E = 0$!)

Elektrisches Potential

Im elektrischen Feld $\vec{E}(\vec{r})$ wirken Kräfte auf eine **elektrische (Probe-)Ladung** q .
Wird Ladung q von einem Ort $\vec{r}_1$ nach einem Ort $\vec{r}_2$ **bewegt**, so muss natürlich **Arbeit** W_{21} geleistet (oder gewonnen) werden:

$$W_{21} = \vec{F} \cdot \vec{\Delta r} = F \cdot \Delta r \cdot \cos \alpha.$$

$$(\text{Allgemeiner: } W_{21} = \sum_i \vec{F}_i \cdot \vec{\Delta r}_i \rightarrow \int \vec{F} d\vec{r}).$$

Wird **Arbeit** geleistet $\Rightarrow$ **potentielle Energie** der Ladung nimmt zu (z.B. wenn positive Ladung q von einer negativen Ladung Q wegbewegt wird).

Analogie: Hochheben einer Masse. Auch dabei wird Arbeit gegen anziehende Gravitationskraft geleistet und der Körper erhält potentielle Energie).

Geleistete Arbeit beim **Coulomb-Feld** (wie beim Gravitationsfeld) unabhängig davon, auf welchem Wege die Ladung von $\vec{r}_1$ nach $\vec{r}_2$ bewegt wird.

Die Arbeit (bzw. Änderung der potentiellen Energie), die pro Ladung q geleistet wird, nennt man auch **Potentialdifferenz $\Delta\varphi_{21}$ oder Spannung U_{21}** zwischen den Punkten $\vec{r}_1$ und $\vec{r}_2$:

$$\Delta\varphi_{21} = U_{21} = \frac{W_{21}}{q}.$$

Zur Erinnerung: Im Gravitationsfeld der Erde (an der Erdoberfläche) definiert man die Potentialdifferenz $\Delta\Theta_{21}$ analog als Änderung der potentiellen Energie (bei Höhenänderung der Masse) pro Masse:

$$\Delta\Theta_{21} = \frac{m \cdot g(h_2 - h_1)}{m} = g \cdot (h_2 - h_1) = g \cdot \Delta h.$$

Die **Potentialdifferenzen $\Delta\varphi_{21}$ und $\Delta\Theta_{21}$** sind also **nicht mehr abhängig von der "Probeladung" q bzw. der "Probemasse" m .**

Potential φ eines Punktes im elektrischen Feld $\vec{E}(\vec{r})$:

Arbeit W pro Probeladung q (>0), die aufgebracht werden muss, um diese Probeladung aus dem "Unendlichen" (∞) an diesen Punkt zu bringen:

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{W(\infty \rightarrow \vec{r}_1)}{q}$$

Beschreibungen des elektrischen Feldes über die elektrische Feldstärke $\vec{E}(\vec{r})$ oder das Potential $\varphi(\vec{r})$ sind äquivalent. $\vec{E}(\vec{r})$ und $\varphi(\vec{r})$ können ineinander umgerechnet werden.

Uns interessiert mehr Spannung U (= Potentialdifferenz $\Delta\varphi$) zwischen zwei Punkten!

Spannung U = Arbeit pro bewegter Ladung

$$\text{Einheit: } [U] = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{C}} = 1 \text{ V (Volt)}$$

Elektrische Leiter (Metalle): Alle Punkte eines Leiters haben dasselbe Potential, d.h. keine Spannung zwischen verschiedenen Punkten !

Plattenkondensator (homogenes elektrisches Feld):

a) positive Probeladung q (Vakuum, keine Reibung) wird von positiv geladener Platte zur negativen hin beschleunigt (Analogie zum "freien Fall" im Gravitationsfeld).

Spannung U zwischen Kondensatorplatten. Potentielle Energie $q \cdot U \rightarrow$ kinetische Energie $\frac{1}{2}mv^2$:

$$q \cdot U = \frac{1}{2}mv^2.$$

b) Wird dagegen q von der negativen zur positiven Platte bewegt, so muss Arbeit

$$W = F \cdot d$$

gegen abstoßende Kraft aufgebracht werden (d = Abstand der Kondensatorplatten). Diese Arbeit wird wieder in potentielle Energie $q \cdot U$ "umgewandelt":

$$\begin{array}{lcl} F \cdot d & = & q \cdot U \quad \text{bzw.} \\ U & = & E \cdot d \end{array}$$

(mit $E = F/q$).

Kapazität

Kondensator: Anordnung von zwei Leitern, die gegen die Umgebung als auch gegeneinander isoliert sind.

Ein Kondensator kann elektrische Ladung Q speichern. Ladung Q ist proportional zur angelegten Spannung:

$$Q = C \cdot U$$

Proportionalitätsfaktor C : “Kapazität”

Einheit: $[C] = 1 \frac{C}{V} = 1 \text{ Farad (F)}$.

Ein ausgedehnter **Plattenkondensator** hat die Kapazität

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

A: Plattenfläche, d: Plattenabstand.

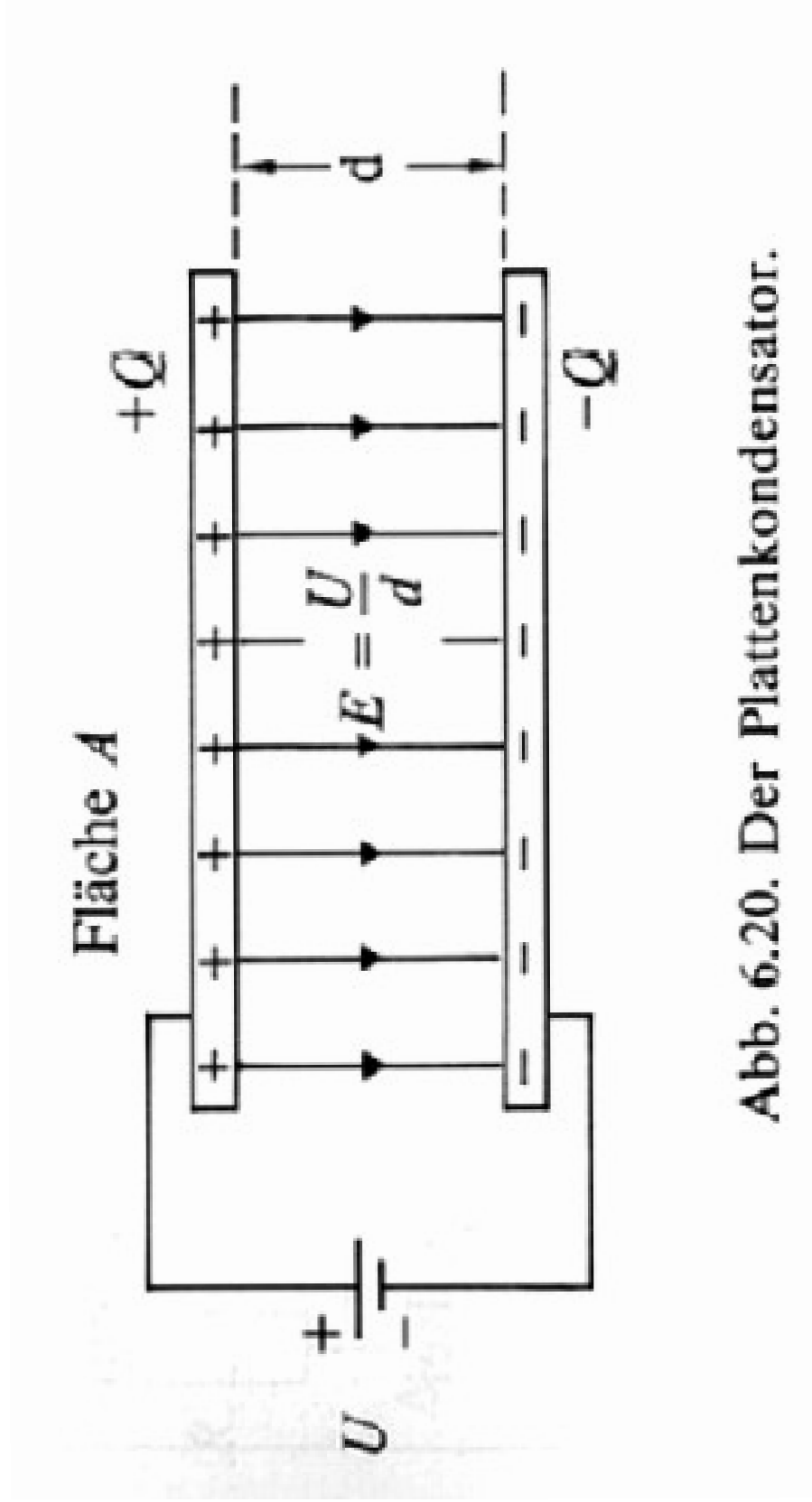


Abb. 6.20. Der Plattenkondensator.

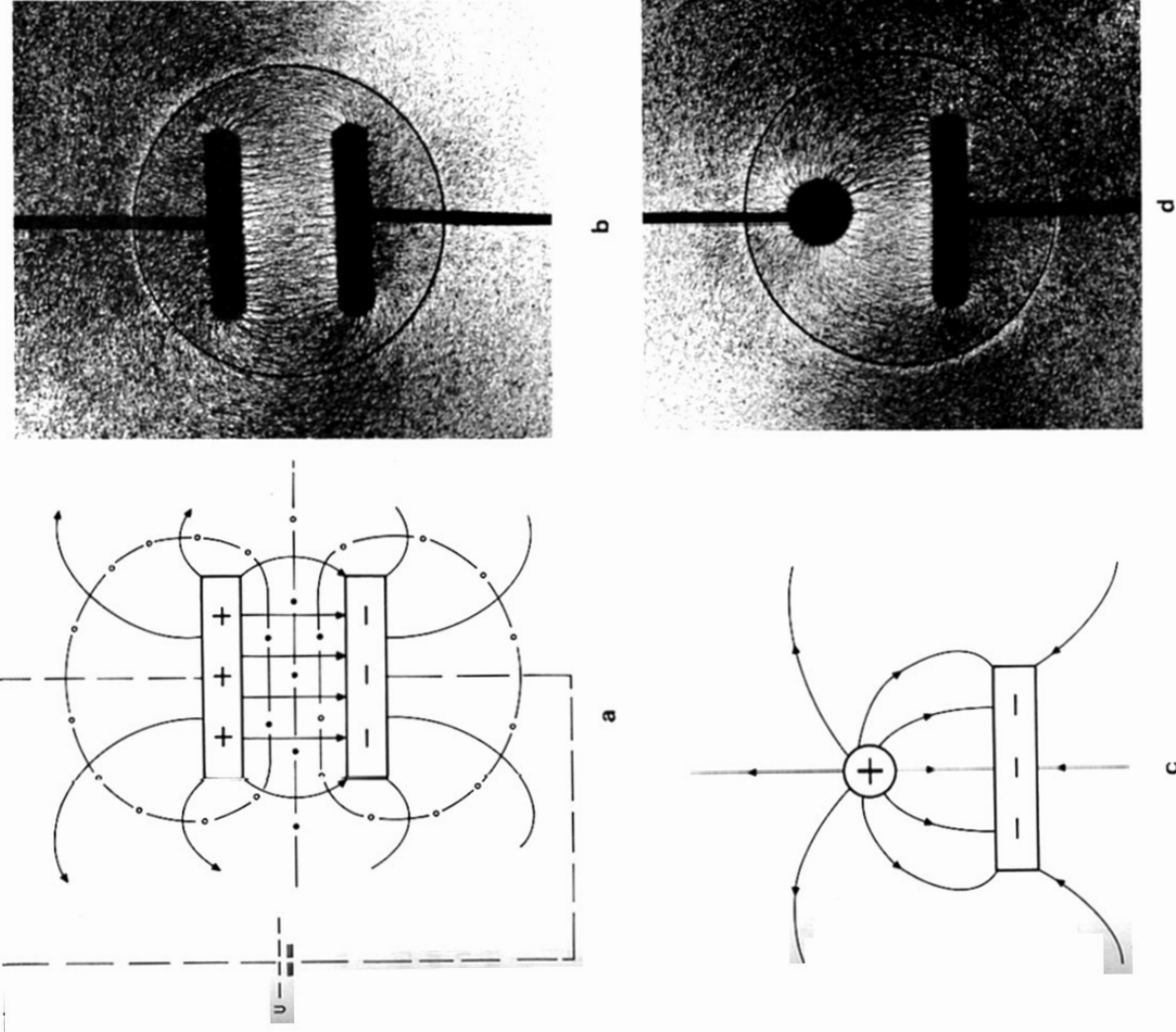


Abb. 11.13. a Feldlinien und (strichpunktiert) Äquipotentialflächen beim Plattenkondensator. Zwischen den Platten herrscht weitgehend gleiche elektrische Feldstärke, was an der konstanten Feldliniendichte erkennbar ist. Es herrscht ein sogenanntes homogenes elektrisches Feld im Gegensatz zu dem sehr inhomogenen Feld am Plattenrand und außerhalb des Kondensators. **b** Mit Hilfe von Kunststofffasern sichtbar gemachter Verlauf des elektrischen Felds des Plattenkondensators. **c** und **d** zeigen die entsprechenden Feldlinienbilder bei Knopf- und Plattenelektrode

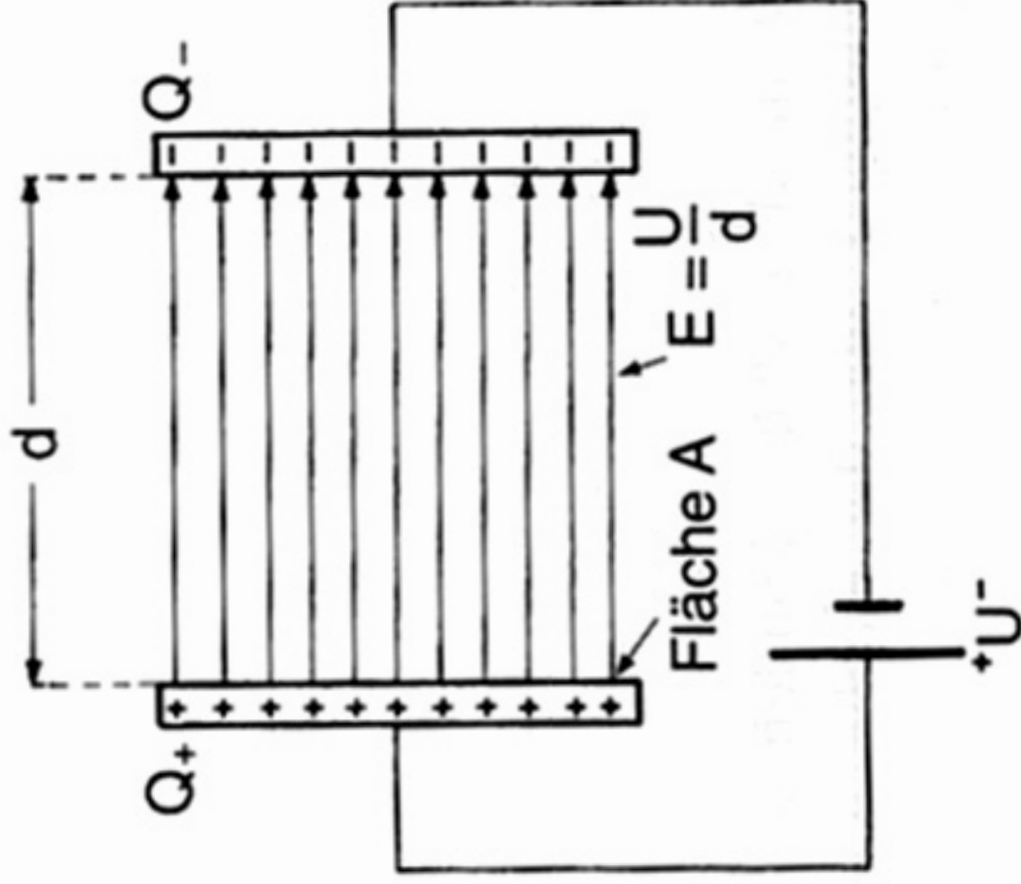


Abb. 14.11 Zur Definition der Kapazität.

Parallelschaltung von Kondensatoren:

$$C_{\text{Ges}} = C_1 + C_2.$$

Serienschaltung:

$$\frac{1}{C_{\text{Ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Aufladen des Kondensators:

Es muss Arbeit geleistet werden.

Ladungen müssen gegen abstoßende Kräfte der schon auf den Platten sitzenden Ladungen aufgebracht werden.

Nach Aufladung auf Spannung U steckt dann im Kondensator **potentielle Energie**

$$W_{\text{pot}} = \frac{1}{2} C \cdot U^2.$$

Elektrodynamik

Elektrischer Strom: Bewegte elektrische Ladungen

Elektrische Stromstärke I ist die pro Zeit Δt fließende Ladungsmenge ΔQ :

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \left(\text{besser} \quad \frac{dQ}{dt} \right).$$

SI-Einheit 1 A(mpere): wird über Kraft zwischen zwei stromdurchflossenen parallelen Drähten definiert.

Elektrische Stromdichte j ist der pro Querschnittsfläche A fließende Strom:

$$j = \frac{I}{A} = n \cdot q \cdot v$$

n : Ladungsträgerdichte (Zahl der Ladungsträger pro Volumen)

q : Ladung

v : Geschwindigkeit

Tragen **negative und positive Ladungen** zum Gesamtstrom I_{Ges} bei (z.B. bei Elektrolyse), so gilt

$$I_{\text{Ges}} = I_- + I_+ = (n_- q_- v_- + n_+ q_+ v_+) A.$$

Produkte $q_- \cdot v_-$ und $q_+ \cdot v_+$ haben jeweils dasselbe Vorzeichen, da sich mit Polarität der Ladungen im elektrischen Feld auch Geschwindigkeit (Richtung) umkehrt.

Strom von positiven Ladungen, die sich von $\oplus$ nach $\ominus$ bewegen, hat also dieselbe Richtung (dasselbe Vorzeichen) wie ein Strom von negativen Ladungen, die sich von $\ominus$ nach $\oplus$ bewegen.

Voraussetzungen dafür, dass ein elektrischer Strom fließt, sind

1. das Vorhandensein von “**verschiebbaren**” **Ladungsträgern** (z.B. Elektronen in Metallen, positive und negative Ionen in Elektrolyten) und
2. eine **elektrische Spannung** U (elektrisches Feld E).

Analogie zum Strömen von Wasser: Es muss **sowohl Wasser** vorhanden sein **als auch ein Gefälle** (oder Druckunterschied).

Stromwirkungen:

1. Stromfluss durch Leiter erzeugt **Wärme** (die z.B. den Faden einer Glühlampe zum Leuchten anregt).
2. Stromfluss hat ein **Magnetfeld** (konzentrisch zum Strom, s.u.) zur Folge: Kompassnadel wird abgelenkt.
3. Stromfluss durch Elektrolyten führt zur Zersetzung des **Elektrolyten** mit evtl. **Abscheidungen** an den Elektroden (chemische Wirkung).

Nach Anlegen einer Spannung U an einen Leiter fließt ein Strom I , dessen Größe vom **elektrischen Leitwert** G des Leiters abhängt:

$$G = \frac{I}{U} \quad \left(\text{besser } \frac{dI}{dU} \right),$$

$$[G] = 1 \frac{\text{A}}{\text{V}} = 1 \text{ S (iemens)}$$

Je mehr Strom I pro angelegter Spannung U fließt, desto besser leitet der Körper.

Der inverse Wert ist der **elektrische Widerstand** R :

$$R = \frac{U}{I}, \quad [R] = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \Omega \quad (\text{Ohm})$$

Je mehr Strom pro angelegter Spannung fließt, desto kleiner ist der Widerstand eines Leiters.

Ursache des Widerstandes R eines Leiters ist die Reibung, die die Ladungsträger (z.B. im Metall Elektronen) beim Fluss durch den Leiter erfahren.

Wenn der Widerstand R konstant ist (d.h. nicht von U oder I abhängt), nennt man

$$U = R \cdot I$$

das **Ohmsche Gesetz**. Dies gilt häufig für Metalle, wenn die Temperatur konstant gehalten wird.

Widerstand R eines drahtförmigen Leiters:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}$$

ℓ, A Länge bzw. Querschnitt des Drahtes,

ρ : spezifischer Widerstand (besser: Resistivität): Materialkonstante, temperaturabhängig

$\sigma = 1/\rho$: elektrische Leitfähigkeit.

Stromarbeit:

Wenn ein Strom I während der Zeit Δt durch einen Leiter (Widerstand R) fließt $\rightarrow$ Ladung $\Delta Q = I \cdot \Delta t$ wird transportiert.

Wegen Reibung muss Arbeit W aufgewendet werden (von der Spannungsquelle).

Arbeit wird umgewandelt in Joulesche (Reibungs-) Wärme:

$$W = \Delta Q \cdot U = I \cdot \Delta t \cdot U.$$

Leistung:

$$P = \frac{W}{\Delta t} = I \cdot U = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R.$$

Ein Ladungsträger (Ladung q , Masse m) durchlaufe im Vakuum die elektrische Spannung U : Er wird beschleunigt, da keine Reibung vorhanden.

Nach Durchlaufen der Spannung U hat er die kinetische Energie $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow$

$$W_{\text{pot}} = q \cdot U = \frac{1}{2}mv^2.$$

Geschwindigkeit nach Durchlaufen von U :

$$v = \sqrt{2 \frac{q}{m} \cdot U}.$$

Nach Aufprall auf Platte (z.B. Anode bei Elektronen) wird kinetische Energie (hauptsächlich) in Wärme umgewandelt.

Analogie zur Mechanik:

Körper der Masse m durchfällt Höhe h ("Freier Fall"). Dabei wird potentielle Energie $m \cdot g \cdot h$ in kinetische Energie $\frac{1}{2}mv^2$ und beim Aufprall in Wärme umgewandelt.

Spannungsabfall:

Fließt ein Strom I durch einen „Widerstand R “ (Leiter mit elektrischem Widerstand R), so erzeugt er zwischen den Enden von R den Spannungsabfall

$$U = R \cdot I.$$

Spannungsquellen (z.B. Batterie):

Umwandlung nichtelektrischer (z.B. **chemischer**) **Energien** → **elektrische Energien**.
Getrennte Ladungsträger (positive bzw. negative) werden **an den beiden Polen** “zur Verfügung gestellt”.

Ladungsträgertransport in Batterie erfährt auch **Reibung**, also bei Strom I Spannungsabfall $U_i = R_i \cdot I$ am **sog. Innenwiderstand R_i** .

Die an den Klemmen zur Verfügung stehende Spannung wird also um $U_i = I \cdot R_i$ herabgesetzt.

Kirchhoff-Regeln

ermöglichen die Berechnung von Strömen und Spannungen in verzweigten Stromkreisen (Netzwerken):

Knotenregel (1. Kirchhoffsche Regel)

In einem Verzweigungspunkt gilt: Die Summe der **zufließenden Ströme** ist gleich der Summe der **abfließenden**.

Maschenregel (2. Kirchhoffsche Regel)

Geschlossene Masche: Die Summe der **Spannungsabfälle** ist gleich der Summe der „**eingepprägten**“ **Spannungen** (z.B. Batteriespannungen).

⇒

Berechnung von Serienschaltung, Parallelschaltung, Wheatstone-Brücke, Potentiometerschaltung.

Leitungsmechanismen des elektrischen Stroms

a) Leitfähigkeit von Metallen

- Atome des metallischen Festkörpers geben ein oder mehrere Elektronen an gemeinsames „**Elektronengas**“ ab.
- Diese Elektronen sind **frei beweglich**, aber **Reibung**: Stöße mit Kristallgitterionen.
- Wie Gasmoleküle machen Elektronen „unregelmäßige Bewegungen“. Bei Anlegen einer Spannung wird **Driftbewegung** überlagert in Richtung der positiven Spannung.
- Driftgeschwindigkeit liegt nur in Größenordnung
$$v_{\text{Drift}} \approx 0,1 \text{ mm/s.}$$
- Mit **wachsender Temperatur wächst Widerstand R** (bzw. von ϱ) des Leiters. Wärmebewegung des Kristallgitters wird „stärker“ und damit auch Behinderung des Elektronenstroms.

- Bei sehr tiefen Temperaturen wird Widerstand plötzlich „unendlich“ klein: **Supraleitung** (quantenmechanisch zu erklären).

b) Leitfähigkeit von Halbleitern

- Leitfähigkeit zwischen denen von Metallen und Nichtleitern.
- Typische Halbleiter sind Elemente der IV. Gruppe des Periodensystems: Germanium (**Ge**) und Silizium (**Si**).
- Kristalle haben **Diamantstruktur** (jedes Atom hat vier enge Nachbarn). Ge, Si haben jeweils vier Elektronen in äußerster Schale, zwei Atome im Kristall „haben jeweils zwei Elektronen gemeinsam“ (lokale Bindung).
- Bindung führt zu Edelgaskonfiguration mit acht Elektronen in äußerster Schale. Alle Elektronen werden also zur Bindung benötigt, es gibt **keine freien Elektronen** zum Ladungstransport.
- Durch Energiezufuhr werden **einige Elektronen durch Aufbrechen von Bindungen** freigesetzt.
- Bei Anlegen einer Spannung führen diese Elektronen und die positiven Löcher zu einem geringen Strom.
- Bei zunehmender Temperatur werden durch erhöhte Schwingungsenergie der Atome im Kristallgitter mehr Bindungen aufgebrochen, und Leitfähigkeit nimmt stark (exponentiell) zu.
- Leitfähigkeit lässt sich auch durch eine (geringe) **Dotierung** mit z.B. **Arsen** (5 Elektronen in der äußersten Schale → n-Leiter) oder **Indium** (3 Elektronen → p-Leiter) erhöhen.

Halbleiterdiode:

n- und p-Leiter werden zusammengebracht (**p-n-Übergang**).

Elektronen und Löcher diffundieren wechselseitig in die Randzonen und rekombinieren: **Es ergibt sich Übergangszone ohne Ladungsträger**.

Legt man Spannung an mit $\oplus$ -Pol an n- und $\ominus$ -Pol an p-Leiter
→ **Verarmungszone wird breiter** (Widerstand wird größer, es fließt praktisch kein Strom: **Sperrichtung der Diode**).

Umgekehrte Spannung: Strom nimmt exponentiell mit Spannung zu (**Durchlassrichtung** der Diode).

c) Leitfähigkeit von Elektrolyten, Elektrolyse

- Elektrolyte: wässrige Lösungen von Säuren, Basen und Salzen.
- Durch elektrolytische **Dissoziation** (Hydratisierung) elektrische Ladungsträger: **positive Kationen und negative Anionen**.
- **Elektrische Spannung** an 2 Elektroden im Elektrolyten: Kationen wandern zur Kathode ($\ominus$ -Pol), Anionen zur Anode ($\oplus$ -Pol), man hat zwei Teilströme, deren Beträge sich zum Gesamtstrom addieren.
- Anionen geben negative Ladung an Anode ab und werden abgeschieden. Diese negative Ladung wandert über äußere Spannungsquelle zur Kathode und scheidet dort Kationen ab (die Kationen nehmen die negative Ladung auf und werden neutralisiert (evtl. Sekundärreaktionen)).
- Der elektrische Strom (**Ladungstransport**) ist mit einem großen **Massentransport gekoppelt**.

1. Faradaysches Gesetz:

Abgeschiedene **Massen** sind **proportional zu der transportierten Ladung**.

2. Faradaysche Gesetz:

Durch gleiche Ladungen Q abgeschiedenen Massen verschiedener Stoffe verhalten sich wie ihre Äquivalentmassen (molare Masse M /Wertigkeit z).

- Zusammengefasst: Zur Abscheidung einer Masse m eines Stoffes braucht man eine transportierte Ladung

$$Q_m = \frac{m}{M} \cdot z \cdot F.$$

Faraday-Konstante

$$F = N_A \cdot q_{\text{el}} = 96.487 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$$

- **Elektrolyte** sind **ohmsche Leiter**, d.h. Strom I und Spannung U sind proportional zueinander. Beweglichkeit der Ionen wird gehemmt durch die Viskosität. Dadurch bedingt wird **bei wachsender Temperatur Widerstand kleiner**.

d) Elektrizitätsleitung im menschlichen Organismus

Menschlicher **Organismus** ist relativ **guter Leiter**: ca. 70% Wasser und zahlreiche Ionen: Widerstand zwischen den Händen (je nach Hautfeuchtigkeit) **1–5 kΩ**.

Gefahren für Organismus nicht so sehr in der Jouleschen Wärmeentwicklung (dafür hohe Ströme nötig), sondern eher Wirkungen des Stroms auf **erregbare Strukturen** wie Herzmuskel und Nervenfasern.

Jedes Ein- und Ausschalten des Stromes kann Herzmuskel-Kontraktion verursachen. **Besonders gefährlich** ist der in die Steckdosen gelieferte **Wechselstrom von 50 Hz** (Verkrampfung des Muskels, Herzflimmern).

Hochfrequenter Wechselstrom ist weniger gefährlich, da Reizleitung (erfolgt über Stofftransport, s.u.) der Stromänderung nicht folgen kann.

Für Gefährlichkeit ist auch **Dauer Δt des Elektroschocks** von Bedeutung: Maximaler Strom $I_{\max}$, der (bei 50 Hz) gerade noch kein Herzflimmern verursacht:

$$I_{\max} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \text{ A s}^{1/2}.$$

Bei $U = 230 \text{ V}$ zwischen den Händen, $R = 1 \text{ k}\Omega \Rightarrow I = U/R = 230 \text{ mA}$: Schockdauer darf nur **$\Delta t = 0,25 \text{ s}$** sein .

Fehlerstromschutzschalter

Spezielle Sicherungen insbesondere für Feuchträume **schalten** bei Berührung von Netzspannung diese so **schnell ab**, dass Körper nicht zu Schaden kommt.

Besondere Vorsicht bei Operationen:

Bei direktem Stromkontakt mit Körperinneren (Mikroschock) ist elektrischer Widerstand wesentlich geringer (kein Hautwiderstand). Schon **10.000mal kleinere Spannungen können gefährlich werden**. Saubere **Erdungen** sind notwendig.

Spannungsquellen (Stromquellen)

Spannungs(Strom-)quellen stellen an den beiden Polen **positive bzw. negative Ladungen getrennt** “zur Verfügung” .

Um Ladungen gegen **abstoßende Kräfte** dorthin zu bringen, ist **Arbeit** notwendig. Arbeit wird z.B. durch **chemische Energien** aufgebracht.

Beispiel **galvanische Elemente**:

Taucht man zwei verschiedene Metalle in einen gemeinsamen Elektrolyten, so gehen von jeder Elektrode positive **Metallionen in Lösung**.

Elektroden selbst bleiben negativ geladen zurück. Es entsteht **elektrische Doppelschicht** aus positiven Ionen außerhalb der Metalloberfläche im Elektrolyten und Elektronen innerhalb der Metalloberfläche. Die Folge ist eine **Spannung zwischen der Metallelektrode und dem Elektrolyten**.

Für die andere Elektrode aus einem anderen Metall gilt das gleiche. Allerdings wird ihre Spannung gegenüber dem Elektrolyten aufgrund ihrer **anderen Lösungstension** größer (wenn mehr Metallionen gelöst werden) oder kleiner (bei weniger Metallionen) als bei der ersten Elektrode sein.

Elektrode mit geringerer Lösungstension wird **$\oplus$ -Pol** des Elements.

Zwischen Elektroden herrscht also **Spannungsdifferenz** → Nutzung als Spannungs- bzw. Stromquelle.

Daniell-Element:

Cu- bzw. Zn-Elektrode in Elektrolyten mit Sulfat-Ionen:

$U = 0,34 \text{ V (Cu}^{++}/\text{Cu)} - (-0,76 \text{ V (Zn}^{++}/\text{Zn)}) = 1,10 \text{ V}$
(Einzelspannungen gegenüber einer „Normalelektrode“).

Konzentrationselement:

Zwei gleichartige Elektroden (z.B. Ag), in gleichen Elektrolyten **verschiedener Konzentration (c_1, c_2)** (z.B. NaCl in wässriger Lösung).

Beide Elektrolyte sind durch **ionenselektiv-permeable Membran** voneinander getrennt (lässt nur positive Na-Ionen, nicht aber negative Cl-Ionen hindurch).

Aufgrund des Konzentrationsunterschiedes diffundieren Na^+ -Ionen durch Membran, während Cl^- -Ionen zurückbleiben $\Rightarrow$ **Membranspannung** (Konzentrationspotential, eigentlich Potentialdifferenz) U_m .

Nach der **Nernstschen Formel** hat man:

$$\begin{aligned} U_m &= \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \ln(c_1/c_2) \\ &= \frac{1}{z} 0,026 \text{ V} \ln(c_1/c_2) = \frac{1}{z} 59 \text{ mV} \lg(c_1/c_2) \end{aligned}$$

Reizleitung über Nervenfasern

- Ruhepotential einer Nervenfaser ist **Membranspannung**.
- **Innerhalb Zellmembran: hauptsächlich K^+ -Ionen**,
außerhalb: hauptsächlich Na^+ - und Cl^- -Ionen.
- Permeabilität ist für K^+ -Ionen wesentlich größer als für Na^+ -Ionen, d.h. **K^+ -Konzentrationen bestimmen** im Wesentlichen das **Ruhepotential von -70 mV** (innen negativ gegenüber außen).
- Durch physikalisch/chemische Einflüsse (**Reize**), die stark genug sind, die Membran bis auf einen Wert von **-50 mV (Schwellenpotential)** zu depolarisieren, werden Na^+ -Transportkanäle geöffnet.
- **Na^+ -Ionen strömen dann in Nervenzelle** ein und bewirken Polaritätsumkehr auf $+40$ mV (innen gegenüber außen), d.h. insgesamt ist Spannung um $+110$ mV geändert worden (**Aktionspotential**).
- Anschließend werden Na^+ -Kanäle wieder geschlossen, K^+ -Ionen diffundieren (auch unter dem Einfluss von Ionenpumpen) nach außen, bis Gleichgewicht wieder erreicht ist (**Repolarisation**).
- Reizleitung über Nervenfaser wird durch **Fortpflanzung des Aktionspotentials** entlang der Nervenfaser bewirkt. Der Aufbau des Aktionspotentials durch Einstömen der Na^+ -Ionen erfolgt senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung durch die Zellmembran.

Das Magnetfeld

Ein Permanentmagnet oder ein stromdurchflossener Leiter üben Kräfte (bzw. Drehmomente) aus auf andere Magnete (z.B. Kompassnadel).

Die Kraft-(Drehmoment-)Wirkung wird beschrieben durch neue Größe **Magnetfeldstärke H** .

Es gibt **Nord-** bzw. **Südpol**: Abstoßung zwischen gleichnamigen und Anziehung zwischen ungleichnamigen Polen.

Unterschiede zum elektrischen Feld:

- Es gibt **Keine magnetischen Monopole** (isolierte Nord- oder Südpole), nur Dipole.
- Die **Magnetische Feldlinien** sind in sich geschlossen.

Die Magnetische Feldstärke **H** wird definiert über das Drehmoment **M** auf einen “Probedipol” **m** :

$$M = m \cdot H \cdot \sin\alpha.$$

Im Zentrum eines **Solenoiden** (langgestreckte Spule) ist **M** proportional zu **$I, N, 1/\ell$** .
Man definiert einfach

$$H = N \cdot I / \ell.$$

Magnetfeldstärken werden also immer auf das Feld eines Solenoiden bezogen.

Weitere Definitionen:

- **Magnetische Kraftflussdichte** $\vec{B}$

$$\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H},$$

absolute Permeabilitätskonstante $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{V} \cdot \text{s} / \text{A} \cdot \text{m}$;

relative Permeabilität μ (dimensionslose Zahl) beschreibt die magnetischen Eigenschaften der Materie (im Vakuum $\mu = 1$).

- **Magnetischer Fluss** Φ

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos\phi$$

B bzw. Φ sind u.a. bei der Beschreibung der Induktion sehr nützlich.

Lorentz-Kraft:

Auf eine Ladung q , die sich mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$ durch ein $\vec{B}$ -Feld bewegt, wirkt die **Lorentz-Kraft**

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}.$$

$\vec{F}$ steht also immer senkrecht auf der momentanen Geschwindigkeit $\vec{v}$ des Ladungsträgers.

Die **Lorentz-Kraft** führt zu einer **Kreis- oder Spiralbahn** des Ladungsträgers im $\vec{B}$ -Feld.

Die Lorentz-Kraft $\vec{F}$ **leistet keine Arbeit**. Die Arbeit W ist nämlich

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} = F \cdot s \cdot \cos\alpha = 0.$$

Bewegte Ladungsträger stellen einen elektrischen Strom dar. Die **Lorentz-Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter** der Länge ℓ ist

$$\vec{F} = \ell \cdot \vec{I} \times \vec{B}.$$

Die elektromagnetische Induktion

Wird ein Leiter(draht) mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$ in einem $\vec{B}$ -Feld senkrecht zu den $\vec{B}$ -Feldlinien bewegt, so werden alle Leitungselektronen mitbewegt.

Damit wirkt aber **die Lorentz-Kraft** auf die (freien) Elektronen. Sie **bewegt die Elektronen** solange **zu einem Ende des Drahtes** hin bis das sich aufbauende elektrische Feld die gleiche (aber entgegengesetzte) Kraftwirkung hat wie die Lorentz-Kraft.

Die **Anhäufung von negativen Ladungen auf der einen Seite** des Leiters und von **positiven** (Elektronenverarmung) **auf der anderen** bedeutet:
⇒ Ein **elektrisches Feld** (elektrische Spannung) ist **induziert** (erzeugt) worden.

Allgemeiner gilt:

$$U_{\text{ind}} = -n \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -n \cdot \frac{d}{dt}(\mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} \cdot \vec{A})$$

$\vec{A}$: Flächenvektor.

Bei zeitlicher Änderung von H , A oder dem Winkel zwischen beiden **wird eine Spannung induziert** (schnelles Ein- oder Ausschalten von H erzeugt die größten Spannungen).

Als Folge von **in Leitern induzierter Spannungen**

⇒ fließen **Ströme**

⇒ und bilden sich **Magnetfelder**.

Diese Magnetfelder wechselwirken mit den ursprünglichen Magnet(B -)-Feldern. Dabei gilt die

Lenzsche Regel:

Die durch Induktionsvorgänge entstehenden Spannungen und **Folgerscheinungen** sind stets **so gerichtet, dass sie** den die Induktion **verursachenden Vorgang behindern**.

Bisher haben wir elektrische (elektrostatische) Felder kennengelernt, die ihren Ursprung in elektrischen Ladungen hatten. Deren Feldlinien begannen in positiven und endeten in negativen Ladungen.

Es gibt aber auch elektrische Wirbelfelder:

Jedes zeitlich veränderliche $\vec{B}$ -Feld erzeugt ein $\vec{E}$ -Feld mit geschlossenen Feldlinien.

Selbstinduktion:

Beim Abschalten eines Stromes durch eine Spule wird in der Spule selbst eine Spannung induziert (da B sich ändert). Nach dem Induktionsgesetz gilt:

$$U_{\text{ind}} = -L \cdot \frac{dI}{dt},$$

wobei die Selbstinduktion L von den Eigenschaften der Spule abhängt.

Als Folge der Selbstinduktion wird der Strom beim Öffnen des Schalters nicht sofort auf Null zurückgehen: Der aufgrund der (Selbst-)Induktion fließende Strom ist „dem Abschalten entgegengesetzt“.

Analog wird beim „Einschalten“ der Strom erst allmählich seinen vollen Wert erreichen.

Wechselstrom

Ein Wechselstrom ändert ständig seine Richtung (Vorzeichen). I.a. hat man sinusförmige Wechselströme und -spannungen:

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t + \phi)$$

$$U(t) = U_0 \cdot \sin \omega t.$$

In Deutschland erhält man „aus der Steckdose“ eine Wechselspannung von

$$U_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_0 = 230 \text{ V (früher 220 V)}$$

mit der Frequenz $f = 50 \text{ Hz}$ ($\omega = 2 \pi f = 314 \text{ Hz}$)
und der Scheitelspannung $U_0 = 325 \text{ V}$.

Die Effektivwerte U_{eff} , I_{eff} sind so definiert, dass gleich große Gleichspannungen bzw. -ströme dieselbe Leistung an einem ohmschem Widerstand liefern.

Die meisten Wechselstrom(-spannungs)messgeräte zeigen Effektivwerte an.

Wechselstromwiderstände:

Bei Gleichstrom hat man einen „ohmschen Widerstand“ R , der bei gegebener Spannung U den Strom $I = U/R$ zulässt.

Bei Wechselströmen gibt es zusätzlich
einen kapazitiven Widerstand (Kondensator) $R_{\sim} = R_C$ und
einen induktiven (Spule) Widerstand $R_{\sim} = R_L$.

Legt man an einen Wechselstromwiderstand $R_{\sim}$ eine Spannung

$$U(t) = U_0 \sin \omega t$$

so wird ein Strom $I(t)$ fließen:

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t + \phi)$$

Es ist also nicht nur die Amplitude I_0 von $R_{\sim}$ abhängig sondern zusätzlich auch die Phasenverschiebung ϕ ($I(t)$ ist i.A. nicht mehr im „Gleichtakt“ mit $U(t)$).

Wechselstromwiderstände:

$R_{\sim}$ sei der Quotient der Amplituden U_0 und I_0 : $R_{\sim} = U_0/I_0$.

Dann gilt:

- Bei einem rein ohmschen Widerstand ist

$$R_{\sim} = R \quad \text{und} \quad \phi = 0.$$

- Bei einem rein kapazitiven Widerstand ist

$$R_{\sim} = 1/\omega C \quad \text{und} \quad \phi = \pi/2,$$

d.h. der Strom eilt der Spannung um $T/4$ voraus.

- Bei einem rein induktiven Widerstand ist

$$R_{\sim} = \omega L \quad \text{und} \quad \phi = -\pi/2,$$

d.h. die Spannung eilt dem Strom um $T/4$ voraus.

Wechselstromwirkleistung (bewirkt Joulesche Wärme):

$$P_W = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \phi.$$

Bei rein kapazitiven oder induktiven Verbrauchern (Widerständen) ist

$$\cos \phi = 0 \quad (\phi = \pi/2 \text{ oder } = -\pi/2), \text{ d.h. } P_W = 0.$$

Die zum Aufbau von elektrischem oder magnetischem Feld notwendig gewesene Energie fließt in zweiter Halbphase wieder zurück in die „Steckdose“ (Spannungsquelle). Im Zeitmittel ist $P_W = 0$.

Wechselstromgenerator:

In einem $\vec{B}$ -Feld wird eine Spule gedreht (z.B. Dynamo). Die induzierte Wechselspannung ist

$$U_{\text{ind}} = -n \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -n \cdot B \cdot A \cdot \frac{d}{dt} \cos \omega t = -n \cdot B \cdot A \cdot \omega \sin \omega t$$

Transformator:

Zwei Spulen mit Windungszahlen n_1, n_2 sind auf ein Eisenjoch gewickelt. Die Wechselspannungen an Ein- und Ausgang verhalten sich wie

$$\frac{U_{\sim 1}}{U_{\sim 2}} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Wegen Energieerhaltung ist

$$\frac{I_{\sim 1}}{I_{\sim 2}} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Elektrischer Schwingkreis:

Parallelschaltung von Kapazität C und Induktivität L .

1. Aufladung von C aus Spannungsquelle (elektrische Feldenergie $W_0 = \frac{1}{2}CU_0^2$).
2. Entladung von C über L , in Induktivität wird B -Feld aufgebaut ($\frac{1}{2}CU_0^2 \rightarrow \frac{1}{2}LI_0^2$).
3. Strom fließt auch dann **weiter**, wenn C entladen ist (Selbstinduktion versucht, den Strom aufrechtzuerhalten), und lädt **Kondensator mit umgekehrter Polarität** wieder auf.
4. Vorgang beginnt von neuem.
Analogie mechanisches Pendel: Energie schwingt zwischen potentieller und kinetischer Form hin und her.
Hier: **Energie schwingt zwischen elektrischer (in Kapazität) und magnetischer Form (in Induktivität) hin und her.**

5. Der Strom ergibt sich zu

$$I = I_0 \sin \omega t \quad \text{mit} \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

(**Thomson-Gleichung**).

6. In Wirklichkeit hat man eine **gedämpfte Schwingung** wg. endlicher Widerstände und Abstrahlung (s.u.).

Elektromagnetische Wellen:

1. Der Schwingkreis wird derart „verbogen“ (Gedankenversuch), dass **Hertzscher Dipol** übrigbleibt.
2. Die Ladungen schwingen von einem Ende zum anderen. Sie bauen zeitlich veränderliche **elektrische Felder** auf.
3. Die elektrischen Felder werden „abgeschnürt“ und breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit c aus.
4. Mit der Bewegung der Ladungen im Dipol sind **$\vec{B}$ -Felder** verbunden, die ebenfalls **abgeschnürt** werden.
5. $\vec{B}$ senkrecht zu $\vec{E}$, beide **senkrecht** zur Ausbreitungsgeschwindigkeit $\vec{c}$
→ Diese **elektromagnetische Welle** ist (polarisierbare) Transversalwelle. Sowohl $\vec{E}$ als auch $\vec{B}$ genügen der Wellengleichung

$$u(x, t) = u_0 \sin \left(2\pi \frac{t}{T} \pm 2\pi \frac{x}{\lambda} \right)$$

mit $c = \lambda \cdot f = \lambda/T$,

Lichtgeschwindigkeit $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$,

Vakuum ($\epsilon = \mu = 1$): $c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$.

Magnetische Eigenschaften der Materie:

Das Verhalten von Materie im Magnetfeld wird durch die relative Permeabilität μ beschrieben. Die Kraftflussdichte B im materieverfüllten Raum ist

$$B = \mu\mu_0 H = \mu B_0 = (1 + \kappa) B_0,$$

κ : Suszeptibilität

wenn die Materie sich in einem Magnetfeld der Kraftflussdichte $B_0 = \mu_0 \cdot H$ befindet.

Prinzipiell unterscheidet man folgende Möglichkeiten:

Diamagnetismus ($\kappa < 0$, $\kappa \cong -10^{-5}$):

Resultierendes magnetisches Moment der Hüllelektronen ist 0. Durch äußeres Feld wird magnetisches Moment induziert (κ negativ wegen Lenzscher Regel).

Paramagnetismus ($\kappa > 0$, $\kappa \cong +10^{-5}$):

Hüllelektronen haben resultierendes magnetisches Moment. Dieses wird in äußerem Feld nur ausgerichtet.

Ferromagnetismus ($\kappa \gg 1$, $\kappa \cong +10^3$):

Ganze Kristallbereiche haben schon parallele magnetische Momente (Weiss'sche Bezirke). Diese werden im äußeren Feld in Feldrichtung geklappt.