Konstanten

Avogadrokonstante : $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23} \frac{1}{mol}$

Gravitationskonstante : $G = 6{,}670 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$

Elementarladung : $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,C$

Elektr. Feldkonstante $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{Nm^2}{C} \text{ bzw } \frac{F}{m}\right]$

Lichtgeschwindigkeit $c_0 = 2{,}997 \cdot 10^{8} \frac{m}{s}$

mag. Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{kgm}{A^2s^2} \text{ bzw } \frac{Vs}{Am}\right]$

Ruhemasse des Elektron $m_e = 9{,}109 \cdot 10^{-31}\,kg$

Ruhemasse des Proton $m_p = 1{,}673 \cdot 10^{-27}\,kg$

Planck Konstante $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}\,Js$

Boltzmann Konstante $k = 1{,}380 \cdot 10^{-23}\,J/K$

Kugel $O = 4\pi r^2$

$V = \frac{4}{3}\pi r^3$

Einheiten

Zeit $[t] = 1s$

Geschwindigkeit $[v] = 1 \frac{m}{s}$

Beschleunigung $[a] = 1 \frac{m}{s^2}$

Kraft $[F] = 1 \frac{kgm}{s^2} = 1N$

Masse $[m] = 1kg$

Ladung $[Q] = 1As = 1C$

Arbeit $[A] = 1kg\frac{m^2}{s^2} = 1Nm = 1J$

Leistung $[P] = 1\frac{Nm}{s} = 1\frac{kgm^2}{s^3} = 1W$ $\quad 1W = \frac{1J}{s}$

Temperatur $[T] = 1K$ $\quad \vartheta = T - 273{,}15\,°C$

$[\vartheta] = 1°C$

Einheiten

Frequenz	$[f] = 1\frac{1}{s} = 1\,Hz$
Kreisfrequenz	$[\omega] = 1\frac{1}{s}$
Lichtstärke	$[\ \ ] = 1\,cd$
Raumladungsdichte	$[\varrho] = \frac{C}{m^3} = \frac{As}{m^3}$
Flächenladungsdichte	$[\sigma] = \frac{As}{m^2} = \frac{C}{m^2}$
Linienladungsdichte	$[\tau] = 1\frac{C}{m}$
elektr. Stromstärke	$[I] = 1\,A$
elektr. Spannung	$[U] = \frac{J}{C} = V$ $1V = 1\,\frac{kgm^2}{As^3}$
Leistung	$[P] = 1\frac{J}{s} = 1\,W$ $1W = 1\,VA$
Widerstand	$[R] = 1\frac{V}{A} = 1\,\Omega$
elektr. Feldstärke	$[E] = 1\frac{V}{m}$
elektr. Fluss	$[\Psi] = 1\,C$
elektr. Flussdichte	$[D] = 1\,\frac{C}{m^2}$
Kapazität	$[C] = 1\,\frac{C}{V} = 1\,F$
Stromdichte	$[J] = 1\,\frac{A}{m^2}$
Flächenstromdichte	$[K] = 1\frac{A}{m}$
Konduktivität	$[\gamma] = 1\,S/m$
Resistivität	$[\varrho] = 1\,\Omega m$
elektr. Moment	$[p] =$

1. Raum, Zeit, Bewegung

<u>Zeit</u> ist die Abfolge bzw. Dauer von Ereignissen, sie lässt sich mit Hilfe von Uhren messen.

Basiseinheit: Sekunde

TAI Internationale Atomzeitskala
UT1 Weltzeitskala
UTC Koordinierte Weltzeitskala (Zeitzeichensender)

Schaltsekunden

<u>Raum</u> ist verbunden mit Ausdehnung und Längen, Abstände die man messen möchte.
Im Bereich der gewöhnlichen Erfahrungen ist die <u>euklidische Geometrie</u> ein geeignetes mathem. Modell

Basiseinheit: Meter

<u>Koordinaten</u>

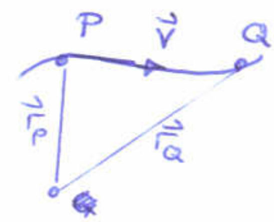
Paarweise aufeinander senkrechte Geraden
X-Achse zur y-Achse drehen → z-Achse in Rechtsschraube
Ein skaliertes Achsenkreuz nennt man ein <u>kartesisches Koordinatensystem</u>
Die Anzahl der Koordinaten die man zum Festlegen eines Ortes braucht nennt man <u>Dimension</u>

<u>Bewegung</u> Ortsveränderung in der Zeit

$$\vec{v} = \frac{\vec{r}_Q - \vec{r}_P}{t_Q - t_P}$$

<u>Beschleunigung</u> Zeitliche Änderungsrate der Geschwindigkeit

$$\vec{a} = \frac{\vec{V}_Q - \vec{V}_P}{t_Q - t_P}$$



2. Körper, Teilchen, Masse und Stoffmenge

Materielle Objekte bestehen aus Elementaren Teilchen (Atomen) die wiederum aus Protonen, Neutronen und Elektronen aufgebaut sind

Atome 10^{-10} m

Atomkerne 10^{-15} m

Festkörper sind Gebilde bei denen die Atome dichter gepackt sind und eine stärkere Bindung untereinander haben. Meist in Gitterstrukturen angeordnet

Schwach gebundene Elektronen bilden ein sogenanntes Elektronengas, dass durch eine geordnete Driftbewegung – die der Wimmelbeweg. überlagert ist – elektr. Strom transportieren kann.

Prinzip der Trägheit Wenn man einen Körper sich selbst überlässt, dann bewegt er sich geradlinig mit konst. Geschw.

Die Masse eines Körpers hängt nicht vom Ort ab. Das Gewicht (Gewichtskraft, Schwerkraft) ist die im Schwerefeld eines anderen Körpers von der Masse eines Körpers bewirkte Kraft

Einheit der Masse: Kilogramm

Die Masse ist Addititv $m(K_1 \cup K_2) = m(K_1) + m(K_2)$

Mittlere Massendichte $\rho = \frac{m}{V}$

3. Impuls, Kraft, Kraftfelder

Impuls $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$

kinetische Grundgleichung $\vec{F} = m\vec{a}$

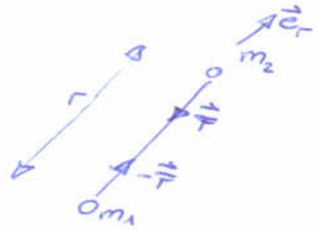
gültig wenn Masse konst. bleibt und in einem Inertialsystem

$$\vec{F} = \frac{m\vec{v}_a - m\vec{v}_e}{t_a - t_e}$$

3.2 Gravitationsgesetz, Grafitationsfelder

Gravitationsgesetz:

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{e}_r$$



Zwei Körper ziehen einander entlang ihrer Verbindungslinie an

Gravitationskonstante

$$G = 6{,}670 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$$

Voraussetzung
- Abmessungen ≪ Abstand
- kugelsymmetrisch und Bewegung vom Massenmittelpunkt weg.

Gravitationsfeld

$$\vec{f} = \frac{\vec{F}}{m_2} = -G \frac{m_1}{r^2} \vec{e}$$

$\vec{F} = \vec{f} \cdot m$ Kraft auf eine Masse m im Schwerefeld von m_1

Ein Körper K_1 mit Masse m_1 wirkt in den Raum, bringt man eine Masse m_2 an einem Punkt ein, so kann man die Kraft bestimmen
(Masse bezogene Kraft an jedem Ort durch m_1)

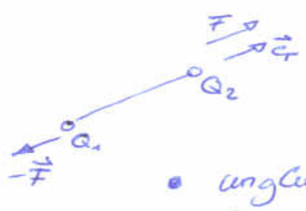
3.3 Das Coloumb-Gesetz, Elektrische Felder

elektr. Ladung erfasst den elektr. Zustand eines Körpers, wird in Vielfachen der Elementarladung gemessen.

$$\boxed{e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\, C}$$

Coulomb-Gesetz

$$\boxed{\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \vec{e}_r}$$



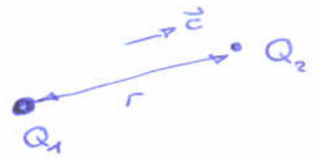
- ungleichnamige Ladungen ziehen einander an, gleichnamige stoßen einander ab.
- Abmessungen ≪ Abstand
- Raum sonst völlig leer (zumindest in großem Abstand)

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 8{,}987 \cdot 10^{9} \frac{Nm^2}{C^2}$$

3.3 Das Coulomb Gesetz, Elektr. Felder

Elektrische Feldstärke

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_2} \qquad E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{Q_1}{r^2}\,\vec{e}$$



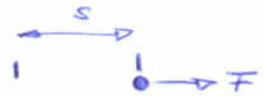
$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$$

Die Gesamtheit aller Feldstärkevektoren $\vec{E}$ nennen wir (vorerst) das elektr. Feld.

4. Arbeit und Leistung, Wärme und Temperatur

Physikalisch Arbeit verrichten heißt, beim Verschieben eines Körpers im Raum in Richtung der Verschiebung eine Kraft aufzubringen

$$A = F \cdot s$$

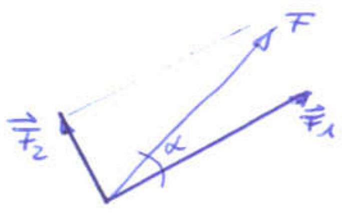


$$[A] = 1\,\mathrm{Nm} = 1\,\mathrm{J} = 1\,\frac{\mathrm{kgm}^2}{\mathrm{s}^2}$$

Joule
Newtonmeter

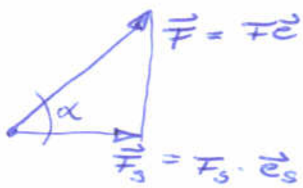
Berechnung kann umständlicher sein, wenn Kraft und Richtung der Verschiebung nicht übereinstimmen $\Rightarrow$ Zerlegung der Kraft in Teilkomponenten.

$$F_1 = F \cdot \cos(\alpha)$$
$$F_2 = F \cdot \sin(\alpha)$$



$$A = F_s \cdot s$$

Verschiebung entlang der Strecke s
wenn F in allgem. Lage



Eine ~~[illegible]~~ Kurve mit bekannten Kraftwerten in jedem Punkt muss in n Teilstücke zerlegt werden, die Normalprojektion der Kraft ermittelt und die Einzelarbeit aufsummiert werden um die verrichtete Arbeit bestimmen zu können.

Konservative Kraftfelder

Kraftfelder bei denen bei einem vollständigen Durchlauf jeder geschlossenen Kurve die Arbeit immer zu null wird heißen konservativ.

(Die Arbeit wird in dem Kraftfeld konserviert)

Leistung

$P = \frac{A}{t}$ $\qquad [P] = \frac{J}{s} = 1\,W$ $\qquad$ zeitbezogene Arbeit

Zeitintervall $\Rightarrow$ durchschnittl. / mittlere Leistung

ausreichend kleiner Zeitabschnitt $\Rightarrow$ Momentanleistung

$$1\,W = \frac{1\,J}{s} = 1\,\frac{Nm}{s} = 1\,\frac{kg\,m^2}{s^3} \qquad \text{Watt}$$

$1\,kW = 1000\,W$ $\qquad$ Kilowatt

$1\,J = 1\,Ws$ $\qquad$ Wattsekunde $\hat{=}$ Joule

$1\,kWh = 3{,}6 \cdot 10^6\,J$ $\qquad$ Kilowattstunde

4.2 Energie als Erhaltungsgröße

Energie = Arbeitsvermögen

Energie erfaßt als physikalische Größe die Eigenschaft von Systemen Arbeit zu verrichten zu können.

- mechanische Energie
- elektr. Energie
- chemische Energie
- Kernenergie
- Wärmeenergie

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden, sondern lediglich von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden (Erhaltungsgröße)

Energiestrom

pro Zeitintervall transportierte Energiemenge

In Watt ($\frac{J}{s}$) angegeben, oft auch direkt Leistung genannt

Wärme ist eine Energieform

Wärmemenge ein Energiebetrag

Temperatur ein Intensitätsmaß für den Wärmezustand eines Körpers

Wärme ist nichts anderes, als die kinetische Energie der ungeordneten Bewegungen aller Teilchen eines Körpers

Energieänderungen können immer additiv in Energieformen aufgespaltet werden (zB Wärme + chem. Energie etc)

4.3 Thermodyn. Temperatur

Sonderstellung der Wärme als Energieform:

Bei fast allen Energieumwandlungen tritt zusätzlich Wärme auf. Wärme kann nicht komplett in eine andere Energieform umgewandelt werden.

Thermodyn. Temperaturskala

1 Kelvin   1K ist als 273,16 Teil des Trippelpunkt von Wasser Definiert $[T] = K$

$[\vartheta] = °C$

$$\vartheta = T - 273{,}15\ K$$

Temperaturmessung:
- Thermometer (Ausdehnung)
- Widerstandsthermometer (Leitfähigkeit)
- Thermoelement

5. Schwingungen, Wellen, Licht.

5.1 Periodische Vorgänge

Wenn sich ein Vorgang in bestimmten Zeitabständen (Periodendauer) immer wieder gleichmässig wiederholt nennt man ihn periodisch

Frequenz f

$$f = \frac{1}{T} \qquad [f] = \frac{1}{s} = 1\,Hz$$

wobei T Periodendauer

Schwingung:

Zeitlicher Vorgang bei dem eine physik. Größe zu und abnimmt.

periodische Schwingung

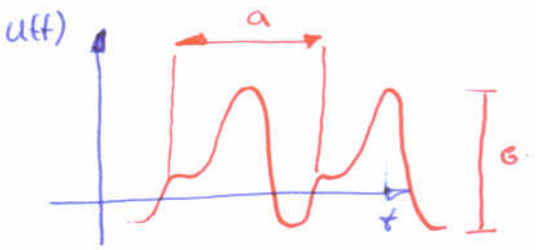
Es kommt die Forderung der Periodizität des Vorganges hinzu.

a Periodendauer, Schwingungsdauer

Kürzester Intervall nach dem sich der Vorgang wiederholt

b Schwingungsbreite, Schwankung

Differenz zwischen Größtwert und Kleinstwert der phys. Größe



Harmonische Schwingungen:

Mathematische Erfassung mittels Kreisfunktion (sin, cos)

$u = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$

$\omega = 2\pi f$ Kreisfrequenz

φ Nullphasenwinkel

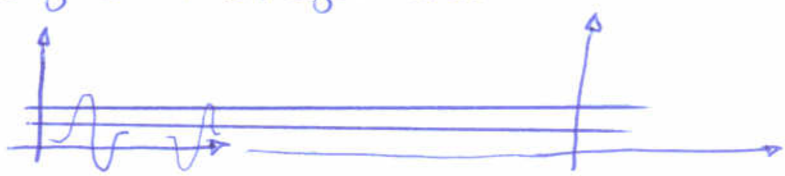
$\hat{u}$ Amplitude, Scheitel-, Spitzenwert

5.2 Wellenerscheinungen

- Longitudinalwellen (Kompressionswellen)
  Teilchen Schwingen in Richtung der Wellenausbreitung
- Transversalwellen (Scherwellen)
  Schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung
  ZB. Seilwellen, elektromag. Wellen, ...
- Ausbreitungsgeschw. Luft $340 \frac{m}{s}$, Wasser $1460 \frac{m}{s}$

Wellenbegriff

Eine Welle ist jedes beliebige Signal, das von einem Teil des Raumes zu einem andren mit einer erkennbaren Geschwindigkeit übertragen wird.



Laufzeit $t = \frac{x}{c_0}$

c_0 Ausbreitungsgeschwindigk.
x Strecke die von der Welle überwunden werden muss

Fortschreitende Wellen sind immer mit einem Energiefluss verknüpft.

Harmonische Wellen (Sinuswellen)

Wird an einem festen Punkt der zeitliche Verlauf des Signals verfolgt und ist dieser Periodisch $\Rightarrow$ periodische Welle

Ist sie überdies noch harmonisch und ~~der~~ der Wert der Amplitude ändert sich nicht kann sie durch sin, cos Funktionen Mathematisch beschrieben werden

$\cancel{w = \hat{w} \sin(\omega t}$ $\boxed{w = \hat{w} \sin(kx - \omega t)}$

$\hat{w}$ Amplitude

ω Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

Kreiswellenzahl k

Wellenlänge λ (räumliche Periode)

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$c = \frac{\omega}{k} = \lambda f = \frac{\lambda}{T} \qquad [c] = \frac{m}{s}$$

Quotient aus räumlicher und zeitlicher Periode
Produkt aus Wellenlänge und Frequenz

5.3 Das elektromag. Frequenzspektrum

Sichtbares Licht λ = 380nm ... 780nm

Strahlungsleistung: Energiefluss der ausgestrahlten elektromag. Welle
~~Wa~~ In Joule/sec, Watt angegeben

Strahlstärke:

Ist die Strahl~~stärke~~lung nach verschiedenen Raumrichtungen unterschiedlich, so kann für jede Richtung eine Raumwinkel bezogene Strahlstärke angegeben werden.
Watt/Steradiant

Einheit für die Lichtstärke

Candela cd.

Die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung die von einer Strahlungsquelle mit monochromatischer Strahlung einer bestimmten Frequenz ausgesendet wird und deren Strahlstärke in dieser Richtung einen bestimmten Wert beträgt.

6. Elektr. Ladung, Ströme und Spannungen.

6.1 Die elektr. Ladung

- elektr. Ladung ist immer an Ladungsträger gebunden
- Sie tritt in vielfachen der Elementarladung auf
- Ladung kann weder erzeugt noch vernichtet werden
  Die Ladung ist eine Erhaltungsgröße
  pos. und neg. Ladungen im Universum scheinbar ausgeglichen

Ladungsträger

Ionen sind elektr. geladene Atome, diese sind ebenfalls wie Elektronen Ladungsträger

Metallische Festkörper:

Teile der Elektronen sind nur mehr schwach an das Atom gebunden => Elektronengas
Dieses ermöglicht Ladungstransport

$\rightarrow \boxed{\text{Metall}} \rightarrow$

Makroskopische Körper sind in einem hohen Maß elektr. neutral

Raumladungen

elektr. Ladungsdichte / Raumladungsdichte

$$\rho = \frac{Q}{V} \qquad [\rho] = \frac{C}{m^3}$$

Flächenladungen

Flächenladungsdichte

$$\sigma = \frac{Q}{A} \qquad [\sigma] = \frac{C}{m^2}$$

Sind die überschüssigen Ladungsträger über den Körper gleichmäßig verteilt spricht man von einem „gleichförmig elektr. geladenen Körper".
In Metallen finden wir die elektr. Überschussladungen im Gleichgewichtszustand nie im Körperinneren, sondern in sehr dünnen Schichten an der Körperoberfläche verteilt.

6.2 Der elektr. Strom

elektr Strom: Transport von elektr. Ladung bzw. Bewegung von Ladungsträgern

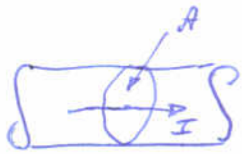
Alle Substanzen sind mehr oder weniger leitfähig

gute Leiteigenschaften => <u>Leiter</u>
sehr schlechte Leiteigenschaften => <u>Isolator</u>

Können von einem Körper in den anderen elektr. Ladungen übertreten, so befinden sie sich in <u>elektr. Kontakt</u>

<u>Die elektr. Stromstärke</u>

$$I = \frac{Q}{t} \qquad [I] = \frac{C}{s} = A$$



Während der Beobachtungszeit Strom unverändert

<u>Bezugssinn</u> ist frei gewählt und dient als Bezugsrichtung für eine pos. angenommene Durchtrittsrichtung

<u>Richtungssinn</u> Tatsächliche Durchtrittsrichtung

Die elektr. Stromstärke an einem Flächenstück A ist der Ladungsstrom durch A

$$\boxed{I(A) = \dot{Q}(A)}$$

Gleichstrom: keine Änderung der Stromstärke

Wechselstrom: zeitlich periodischer Verlauf mit Mittelwert Null der Stromstärke

Elektr. Strom bedeutet, dass der inneren Bewegung des Elektronengases eine äußere gerichtete Bewegung überlagert ist. (Drift)

Transport- / Driftgeschwindigkeit $\approx 0{,}1 \ \frac{mm}{s}$

Mit dem Ladungstransport tritt auch immer ein Massetransport auf, bei metallischen Leitern ist er vernachlässigbar, da die Elektronenm. nur zu einem sehr geringen Massestrom führt (unmessbar klein)

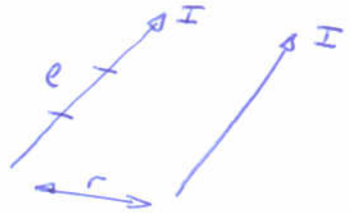
Auswirkungen des Stromes:

- Magnetfelder (elektromech. Energieumsetzung)
- Erwärmung der Leiter bei Stromdurchgang (Heiz u. Kochgeräte)
- chemische Wirkung des Stromes (Elektrolyse, Galvanotechn.)

Das Ampere

Die Basiseinheit 1 Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen Stromes, der durch zwei im Vakuum parallel, im Abstand von einem Meter voneinander angeordn., geradlinigen, unendlich langen Leitern von vernachlässigbarem Kreisquerschnitt fließend zwischen diesen Leitern je Meter eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde

$$\frac{F}{l} = \mu_0 \ \frac{I_1 \ I_2}{2\pi r}$$



magn. Feldkonstante

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \ \frac{kg \ m}{A^2 s^2}$$

6.3 Die elektr. Spannung

$$U(e) = A(e)/Q = \sum_{k=1}^{n} \vec{E}_{sk} \cdot s$$

Spannung ist gleich der ladungsbezogenen Arbeit

$$[U] = \frac{J}{C} = V$$

$$\boxed{1\,J = 1\,\frac{kg\,m^2}{s^2} = 1\,Nm = 1\,Ws = 1\,VAs \qquad 1\,W = 1\,VA}$$

wichtige Zusammenhänge

Bezugssinn: Die Spannung ist immer einem frei wählbaren Durchlaufsinn zugeordnet

Richtungssinn: pos. Vorzeichen wenn Richtungs und Bezugssinn übereinstimmen, andernfalls neg. Vorzeichen aus der Analyse

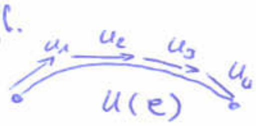
Eigenschaften der Spannung

Sie erfaßt gleichzeitig alle entlang einer Kurve e und in deren Richtung weisenden potentiell vorhandenen Kräfte

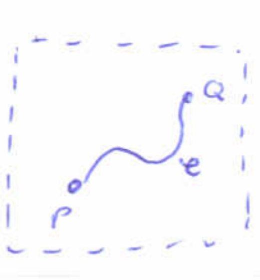
Sie läßt sich prinzipiell über die ladungsbez. Arbeit bestimmen

Gesamtspannung ist Summe der Teilspannungen wenn diese nicht vom Verlauf der Kurve abhängt.

$$U(e) = \sum_k U_k \qquad U(e) = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$



Einheit Volt: $1\,V = 1\,\frac{m^2\,kg}{A\,s^3}$



Wenn die Spannung zwischen zwei Punkten P, Q nicht vom Verlauf der Kurve e abhängt kann man von der Spannung zwischen den Punkten sprechen

e verläuft dabei in einem räumlich begrenzten Bereich

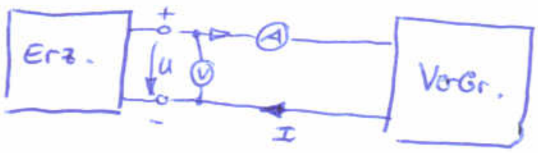
6.4 Die elektr. Leistung

Spannungsquellen legen an den Anschlussklemmen eine Spannung an, die aufgrund eines ladungstrennenden Mechanismus im Innern aufrecht erhalten wird. (Ursprung elektr. Energie)

*

Ursachen für elektr. Spannungen

1. Elektr. Ladungen
2. Zeitlich veränderliche Magnetfelder (Induktion)



Ⓐ Amperemeter

Ⓥ Voltmeter

Energiemenge W während $t = 0 \ldots t$ von der Quelle an den Verbraucher abgegeben

$Q = I \cdot t$ verschoben

$A = U I t$ Arbeit verrichtet, diese muss von der Quelle aufgebracht werden

$$W = U \cdot I \cdot t$$

Leistung:

$$P = \frac{W}{t} = U \cdot I \qquad [P] = 1\,\mathrm{VA} = 1\,\mathrm{W}$$

* Beispiele für Spannungsquellen
  - elektr. Umformgeräte (Netzgerät, Freq.-umrichter)
  - elektrochem. Spannungserzeug. (Batterien, Akkus)
  - elektromechan. Spannungserz. (rotierende elektr. Maschinen)

6.5 Der elektr. Widerstand / Ohmsches Gesetz

Elektr. Widerstand für dauernd passiv wirkende Elemente

$$R = \frac{U}{I}$$

Das Ohmsche Gesetz (enger Sinn)

Sind Strom und Spannung direkt proportional mittels einem Widerstand R verknüpft so gilt

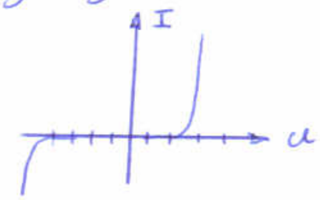
$$\boxed{U = R \cdot I}$$

Linearer Zusammenhang zw. U und I, Gerade durch den Ursprung.

$$[R] = \frac{V}{A} = 1\,\Omega$$

Strom - Spannung Kennlinie

Jeder U. und I Wert wird als Punkt in ein Diagramm eingetragen

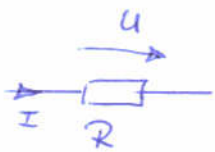


Ohmsches Gesetz im weiteren Sinn

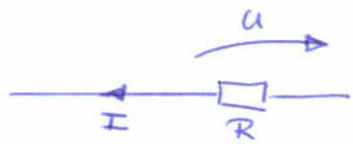
Jede Gleichung der Form $U = RI$

$R \sim U$ und I $\Rightarrow$ nichtlinearer Widerstand

Bei der Anwendung des Ohmschen Gesetz muss man immer Bezugssinn von Strom und Spannung angeben



$U = RI$



$U = -RI$

7. Physikalische Größen, Einheiten und Dimensionen

7.1 Größenarten und Einheiten

Physikalische Größenwerte beschreiben prinzipiell messbare Eigenschaften in Zusammenhang mit einer „Anwendung".
Zum Unterschied zu den „normalen Zahlen" sind sie untereinander zwar multiplikativ aber nicht additiv verknüpft

Darstellung der Größenwerte

Größenwert = Zahlenwert · Einheit

$$G = \{G\} \cdot [G]$$

- physik. Größe ist genau einer Größenart zugeordnet
- Operationen von additivem Charakter sind nur innerhalb einer Größenart ausführbar

$[G]$ steht für die gewählte Einheit, es handelt sich um einen speziellen Größenwert derselben Art wie die jeweils darzustellende Größe

Jede Größenart ist einer Einheit zugeordnet

In Physik und Technik beschränkt man sich auf 7 unabhängige Einheiten die Basiseinheiten

Abgeleitete Einheiten werden aus Potenzprodukten der Basiseinheiten gebildet (im Int Einheitensystem)

$$[G] = (1m)^{\alpha}\,(1kg)^{\beta}\,(1s)^{\gamma}\,(1A)^{\delta}\,(1K)^{\varepsilon}\,(1mol)^{\zeta}\,(1cd)^{\eta}$$

Häufig gebrauchte Einheiten werden durch eigene Zeichen abgekürzt

Einheitentransformation

$$[G_{alt}] = a\,[G_{neu}] \qquad a \ldots \text{Umrechnungsfaktor}$$

$$G = \{G_{alt}\} \cdot [G_{alt}] = \{G_{alt}\}\, a \cdot [G_{neu}] = \{G_{neu}\}\,[G_{neu}]$$

ein Größenwert ist invariant gegenüber Einheitentransformation

7.2 Größengattungen und Dimensionen

Um die universellen Konstanten auf ein Minimum zu beschränken werden sieben Basisgrößen eingeführt und alle abgeleiteten Größen als Potenzprodukte dargestellt. Man nennt dies ein kohärentes Einheitensystem

In den Einheitengleichungen erscheint als Zahlenwert immer nur die „1“

Nachteil: Mehrdeutigkeit der Einheiten ($Nm = J$)

Vorteil: eindeutige Zusammenfassung unterschiedlicher Größenarten zu Größengattungen.

Die physikalische Dimension legt fest zu welcher Größengattung eine Größe gehört

Dimensionsprodukt aus den Basisdimensionen

$$\langle G \rangle = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\varepsilon} N^{\zeta} J^{\eta}$$

Länge, Masse, Zeit, Stromst., Temperatur, Stoffmenge, Lichtstärke

7.3 Das Internationale Einheitensystem

Basiseinheiten
- Meter
- Kilogramm
- Sekunde
- Ampere
- Kelvin
- Mol
- Candela

Abgeleitete Einheiten über Potenzprodukte der Basiseinheiten verknüpft, in denen ausschließlich Zahlenfaktor 1 vorkommt
$\Rightarrow$ kohärentes Einheitensystem

Vorsatzzeichen bilden mit dem Einheitenzeichen eine neue Einheit (nur immer max 1 Vorsatzzeichen)

Kilogramm hat Sonderstellung aus historischen Gründen

Die mit Vorsätzen gebildeten Einheiten sind keine kohärenten Einheiten

Alle Gleichungen einer respektablen physik. Theorie sind Größengleichungen. Die Größen erscheinen darin als Konstante oder Variablen und werden durch Größensymbole repräsentiert.

Funktionen (die mittels Reihen arbeiten) dürfen als Dimension nur 1 haben

Zahlenwertgleichungen für Fälle bei denen immer gleich ausgewertet wird

8. Stromkreise und einfache Stromkreiselemente

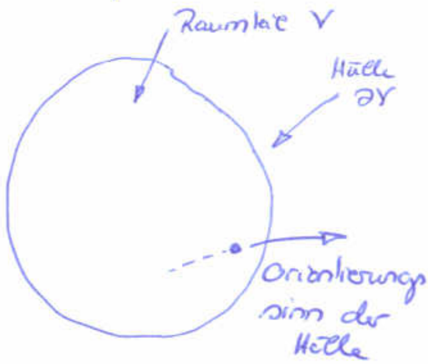
Elektrischer Strom: Ladungsträgertransport im Körperinneren, wird quantitativ durch die einem Flächenstück zugeordnete elektr. Stromstärke erfaßt

Ladung kann nicht erzeugt oder zerstört werden (nur Ladungstrennung, ...) sie ist eine Erhaltungsgröße

Formulierung des Erhaltungssatzes

Ein durch die geschlossene Oberfläche ∂V eines Raumteils V austretender elektr. Strom $I(\partial V)$ ist gleich der negativen Änderungsrate $\dot{Q}(V)$ der im Raumteil V befindlichen Ladungsmenge $Q(V)$

$$\boxed{I(\partial V) = -\dot{Q}(V)}$$



Die erste Kirchhoff-Regel (Knotenregel)

Elektrotechn. Systeme sind in fast allen Fällen aus einzelnen Elementen (Spulen, Kond., Widerständen, ...) aufgebaut oder lassen sich mittels Ersatzschaltungen beschreiben.

Elektrische Schaltung: funktionsgerechte Verknüpfung der Einzelelemente

Knoten: mehrere Anschlüsse oder Strombahnen die leitend miteinander verbunden sind in einem Punkt

Unter der Annahme, dass es in einem Knoten keine posit. oder negativen Überschussladungen (mobile) gibt kann man den Satz von der Ladungserhaltung in folgender Form angeben.

In jedem Knoten einer elektr. Schaltung ist zu jedem Zeitpunkt die Summe der abfließenden gezählten Ströme gleich der Summe der zufließend gezählten Ströme

$$\downarrow \sum I = \uparrow \sum I$$

Eine Zusammenfassung von Funktionselementen in denen Strom fließen kann nennt man Stromkreis

Die Funktionselemente nennt man Stromkreiselemente

Das elektr. Verhalten von Stromkreiselementen ist meistens vollständig beschreibbar durch die an den Polen fließenden Ströme und den anliegenden Spannungen. Solche Elemente nennt man konzentrierte Stromkreiselemente

Mit diesen lassen sich komplexere Elemente in Ersatzschaltungen beschreiben

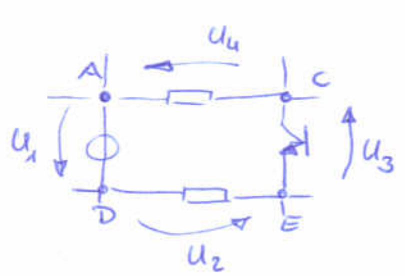
Als Erweiterung der ersten Kirchhoffregel gilt allgemeiner, dass in keinem konzentr. Stromkreiselement ein Ladungsüberschuss sein kann (Def. gemäß), somit kann sie für jede Zusammenschaltung solcher Elemente, oder Schaltungsteile angewandt werden

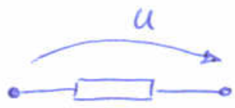
Die Anwendung der ersten Kirchhoff Regel liefert die Beziehungen zwischen den Strömen in einer Schaltung.

Die zweite Kirchhoff-Regel (Maschenregel)

Anschlussspannung: Jene Spannung, eines konzentrierten Stromkreis-elements, die einer orientierten außerhalb jedes Elementes verlaufenden (gedachten) Verbindungslinie zwischen zwei Anschlusspunkten (Polen) zugeordnet ist.

Außerhalb der Elemente, wo wir voraussetzen, dass dort keine zeitlich veränderlichen Magnetfelder sind.





$U_{AD} = U_1$

$U_{DA} = U_2 + U_3 + U_4 \qquad U_{DA} = -U_{AD}$

aufgrund der Wegunabhängigkeit der Spannung

$\Rightarrow U_1 + U_2 + U_3 + U_4 = 0$

Zweite Kirchhoff Regel

Für jede einheitlich orientierte, geschlossene Kurve, die zwei oder mehrere Anschlusspunkte einer Schaltung miteinander verbindet, ist zu jedem Zeitpunkt die Summe der Teilspannungen gleich Null

$$\circlearrowleft \sum U = 0$$

Für einen vollständigen Umlauf ist die Summe der Spannungen gleich Null.

Die zweite Kirchhoff-Regel ist ein Ausdruck für die Energieerhaltung in einem konservativen Kraftfeld.

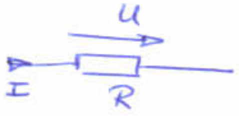
! Masche: einheitlich orientierte geschlossene Kurve

8.4 Stromkreiselemente

Darstellung von Stromkreiselementen durch eine idealisierte Form, der idealen Stromkreiselemente (bzw. Kombinationen davon), sodass ihr Verhalten durch Spannungen, Ströme und deren Änderungsraten angebbar ist.

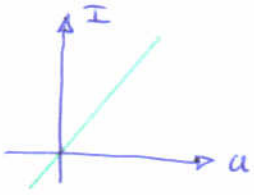
Widerstände

Ideale Stromkreiselemente, deren wesentliche bzw. einzige Eigenschaft der elektr. Widerstand ist.



$$\boxed{U = R \cdot I}$$

Ohmsches Gesetz mit konst. Widerstand R



Temperaturabhängiger Widerstand

$$R = R_0 (1 + \alpha \vartheta)$$

ohmscher Widerstand (Resistanz) R
ohmscher Leitwert (Konduktanz) G

$$\boxed{G = \frac{1}{R}}$$

$[R] = 1\,\Omega$ Ohm

$[G] = 1\,\Omega^{-1} = 1\,S$ Siemens

Leistung: $\boxed{P = U \cdot I = I^2 R = \frac{U^2}{R}}$

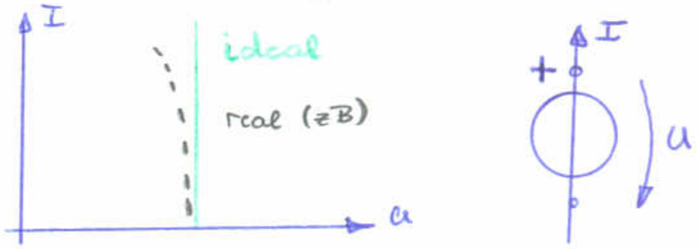
Leistung wird direkt in Wärme umgesetzt
⇒ Joule Wärme, Joule Verlust

Spannungsquellen

Eine ideale Spannungsquelle ist ein ~~Stromquelle~~ Stromkreiselement, dessen Anschlussspannung – Quellenspannung U_q – unabhängig vom gerade durch das Element fließenden Strom ist.

Strom-Spannungs~~quelle~~kennl. einer Idealen Gleichspannungsquelle

$U_q = const.$

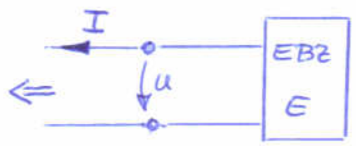


Plus Pol: Anschlusspunkt, an dem pos. Ladungsüberschuss
Minus Pol: ——"—— neg. Ladungsüberschuss

Der Richtungssinn der Quellenspannung U_q weist vom Plus-Pol zum Minus-Pol

Bezugssinn der Anschlussspannung ist frei wählbar
Zweckmäßig ist es gleich dem Richtungssinn zu wählen.

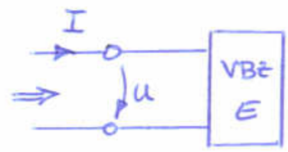
Erzeugerbezugssystem



$P = U \cdot I$

Leistung wird abgegeben

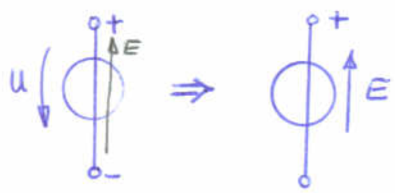
Verbraucherbezugssystem



$P = U \cdot I$

Leistung wird aufgenommen

Elektromotorische Kraft



Funktion einer Spannungsquelle durch kontinuierliche Ladungstrennung

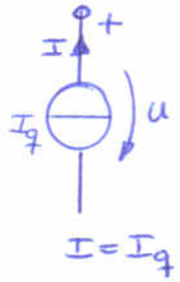
Gesamtwirkung der inneren Kräfte die zur Ladungstrennung entlang eines inneren Weges auftreten fasst man zur elektromotorischen Kraft (EMK) zusammen

! Richtungssinn vom Minus- → Pluspol

Stromquellen

Eine ideale Spannungsquelle ist ein Stromkreiselement, bei dem der durchfließende Strom – Quellenstrom I_q – unabhängig von der Anschlussspannung ist.

Ideale Gleichstromquelle $I_q = const$



Der Strom fließt im Inneren des Elements immer vom Minuspol → Pluspol, dies ist der Richtungssinn des Quellenstrom. Bezugssinne sind wiederum frei wählbar, jedoch sinnvollerweise wird der Bezugssinn von I gleich dem Richtungssinn von I_q gewählt.

Vergleiche auch Erzeuger-Bezugssystem und Verbraucher-Bezugssystem.

Anmerkungen zu Strom- und Spannungsquellen

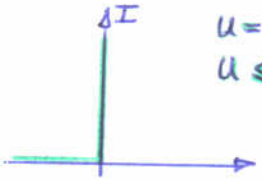
Gleichstromquellen $I_q = const$
Gleichspannungsquellen $U_q = const$

~~Wechsel~~
ideal sinusförm. Wechselspannungsquelle U_q } sin-förmig
Wechselstromquelle I_q

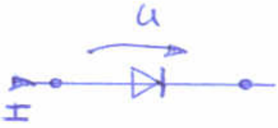
Spannungs und Stromquellen können auch von dem Augenblickswert eines anderen Zweiges abhängen
⇒ gesteuerte Quellen

Dioden

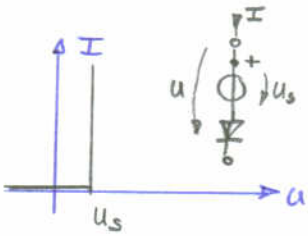
Während der Strom in der einen Richtung (Durchlassrichtung) nahezu ungehindert fließen kann, wird dem Stromfluss in der anderen Richtung (Sperrrichtung) ein sehr großer Widerstand entgegen gesetzt.

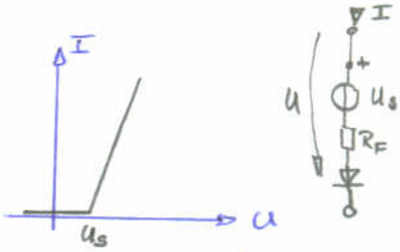


$u = 0$ für $I > 0$
$u \leq 0 \Rightarrow I = 0$



ideale Diode





reale Diodenkennlinien besser angenähert

Für einen merklichen Strom in Durchlassrichtung brauchen wir einen Mindestwert der Anschlußspannung (Schwellspannung U_S)

Wenn die Anschlussspannung in Sperrichtung einen bestimmten Wert übersteigt kommt es zum Durchbruch

Die <u>Schwellspannung</u> lässt sich durch das Einfügen einer passenden Spannungsquelle und einer idealen Diode nachbilden, mit einem Längswiderstand kann man auch berücksichtigen, dass die Anschlussspannung mit steigendem Strom wächst

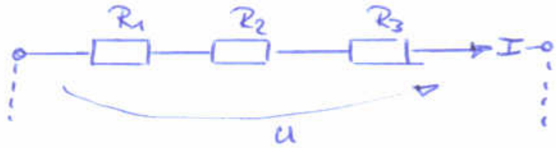
Siliziumdioden	Germaniumdioden
$U_S = 0{,}7\,V$	$U_S = 0{,}3\,V$
$R_F = 0{,}1 \ldots 10\,\Omega$	$R_F = 0{,}1 \ldots 10\,\Omega$

8.5 Berechnung einfacher Schaltungen

Reihenschaltung von Widerständen

Zwei oder mehrere Widerstände werden direkt hintereinand. geschaltet => Reihen- oder Serienschaltung

Zwischen den Anschlüssen liegt die Spannung U und durch alle fließt der Strom I



$$U_1 + U_2 + U_3 = U$$

$$R_1 I + R_2 I + R_3 I = U$$

$$I(R_1 + R_2 + R_3) = R I$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

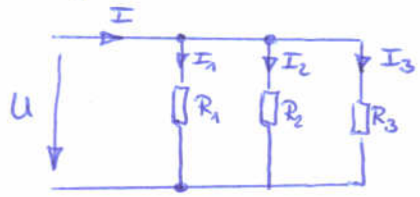
Ersatzwiderstand:

$$\boxed{R = \sum_i R_i}$$

$$\boxed{\frac{1}{G} = \sum_i \frac{1}{G_i}}$$

Parallelschaltung von Widerständen

An jedem der Elemente liegt die gleiche Spannung an



$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \qquad I_2 = \frac{U}{R_2} \quad \dots$$

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

$$I = \frac{U}{R} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) U$$

Ersatzwiderstand

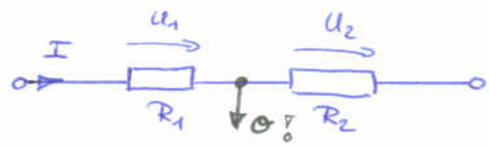
$$\boxed{G = \sum_i G_i}$$

$$\boxed{\frac{1}{R} = \sum_i \frac{1}{R_i}}$$

Spannungsteiler- und Stromteilerregel

Spannungsteilerregel

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \qquad \frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R_1+R_2} \qquad \frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{R_1+R_2}$$

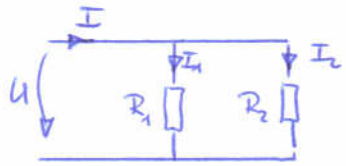


Fließen durch zwei Widerstände gleiche Ströme, so verhalten sich die Spannungen wie die entsprechenden Widerstandswerte

Stromteilerregel

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{G_1}{G_2} = \frac{R_2}{R_1} \qquad \frac{I_1}{I} = \frac{R_2}{R_1+R_2} \qquad \frac{I_2}{I} = \frac{R_1}{R_1+R_2}$$

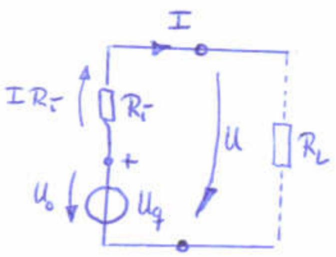
Die Ströme in zwei Zweigen an denen die gleiche Spannung liegt verhalten sich wie die Leitwerte der Zweige und umgekehrt wie die Widerstandswerte



Spannungsquelle mit Innenwiderstand

Reale Spannungsquellen haben meist die Eigenschaft, dass die Anschlussspannung mit zunehmendem Laststrom kleiner wird.

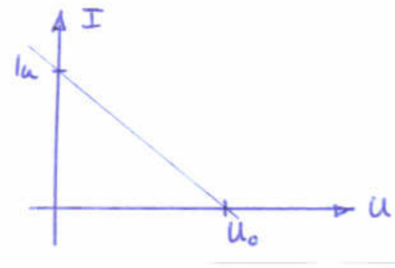
näherungsweise Nachbildung mittels Innenwiderstand



$$U = U_0 - I \cdot R_i$$

Leerlaufspannung: $R_L \to \infty$ $\quad U = U_q$

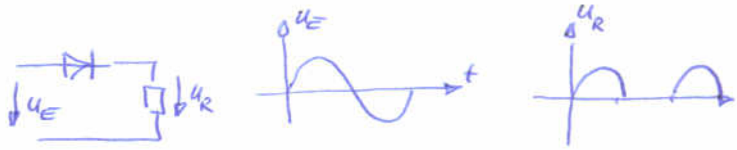
Kurzschlussstrom: $R_L \to 0$ $\quad I_k = \frac{U_0}{R_i}$



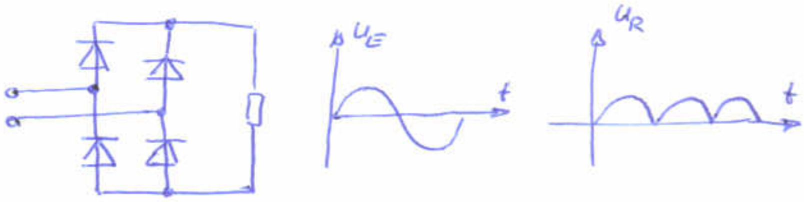
Schaltungen mit Dioden

Man nimmt einen Diodenzustand an, die folgende Analyse zeigt dann ob die Annahme richtig oder falsch war.

Einweggleichrichter



Vollweggleichrichter



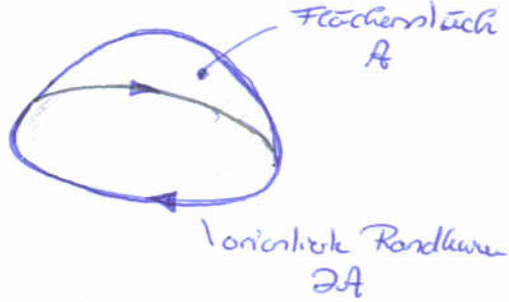
9. Das elektr. Feld

Eigenschaften der elektr. Spannung

- elektr. Spannungen sind immer orientierten Kurven C zugeordnet
- Ihre Werte $U(C)$ werden in Volt gemessen (Ladungsbez. Arbeit)
- Gesamtspannung = Summe der Teilspannungen

Sei A irgendein beliebiges Flächenstück und ∂A seine Randkurve, für die Umlaufspannung gilt dann

$$U(\partial A) = 0$$



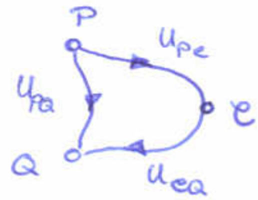
Voraussetzung:

keine Änderung der Verteilung elektr. Ladungen im Raum und mit der Zeit, sowie keine Magnetfelder

$\Rightarrow$ Elektrostatik, Quasi-Elektrostatik

Das elektr. Potential

Wesentliche Forderung aus dem verschwinden der elektr. Umlaufspannung ist die Wegunabhängigkeit der Spannung



$$U_{PQ} = U_{PE} + U_{EQ}$$

$$U_{PQ} + U_{PE} + U_{EQ} = 0$$

Durch die Festlegung eines festen Ortes O als Bezugspunkt kann jedem beliebigen Ort P der Wert $\varphi(P)$ einer physik. Größe φ zugeordnet werden. Dies nennt man das elektr. Potential (wobei P Anfangspunkt und O Endpunkt

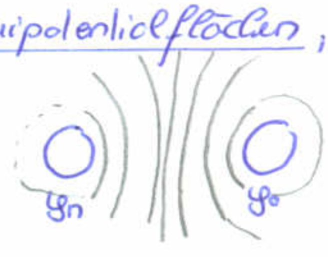
Somit besitzt jeder Ort P im elektr. Feld einen eindeutigen Wert $\varphi(P)$, gemessen in Volt (Skalarfeld)

Bei bekanntem Potential kann die Spannung zwischen zwei Punkten ermittelt werden

$$U_{PQ} = \varphi(P) - \varphi(Q)$$

Ein stromfreier elektr. leitfähiger Körper ist ein Bereich konstanten elektr. Potential (Da kein Strom im Körper ⇒ kein $\vec{E}$ Feld, und somit keine Spannung an einem Kurvenstück C im Körper)

Flächen gleichen Potentials nennt man Äquipotentialflächen, diese Flächen sind immer geschlossene Flächen



Zwei Potentialflächen mit unterschiedlichen Potentialwerten können einander nie schneiden

$\varphi_n > \varphi_0$

Mathematische Darstellung des elektr. Potentials φ mittels Skalarfeldern

Die SI-Einheit des elektr. Potentials $[\varphi] = V$

Die elektr. Feldstärke

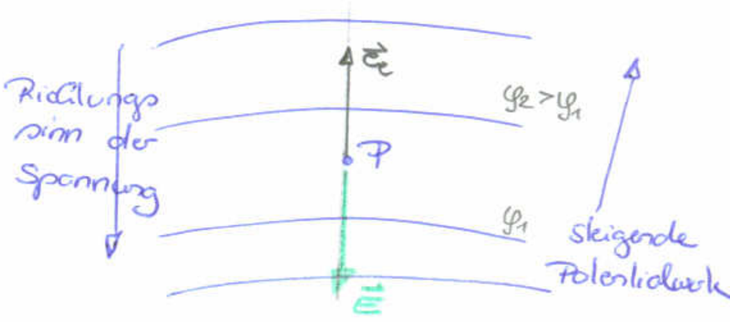
Ist ein lokales Maß für die Intensität des elektr. Feldes.

Die elektr. Feldstärke $\vec{E}$ ist eine gerichtete Größe, im elektrostat. bzw quasi-elektrost. Fall gilt

Je dichter die Potentialflächen beisammen $\Delta\varphi$ desto größer die Feldstärke

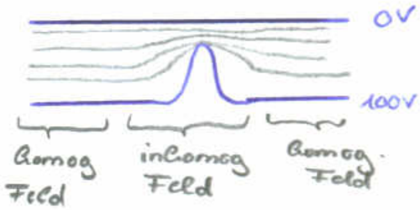
$$\vec{E} = \frac{-\Delta\varphi}{\Delta l}\,\vec{e}_e$$

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{dl}\,\vec{e}_e$$



$\Delta\varphi$ Potentialdifferenz
Δl Normalabstand
$\vec{e}_e$ Richtung steigender Potentialwerte in P im Sinne steigender Potentialwerte

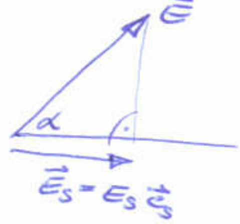
Die elektr. Feldstärke weist genau in die Richtung des größten Potentialabfalls



Bereiche gleichmäßiger Spannungsaufteilung nennt man ein homogenes elektr. Feld
Ist eine erhebliche Störung vorhanden,
von einem inhomogenen elektr. Feld

Darstellung der elektr. Spannung als Kurvensumme der elektr. Feldstärke

$$U(e) = \sum_{k=1}^{n} E_{sk}\cdot s_k$$



$$\boxed{U(e) = \int_e E_s\,ds}$$

Potentielle Energie: Jedem Ort kann innerhalb eines konservativen Kraftfeldes ein Wert (pot. Energie) zugeordnet werden, sie ist gleich der der Arbeit die verrichtet werden muss um den Körper vom Bezugspunkt an den betrachteten Ort zu bringen (Arbeit als Energie gespeichert)

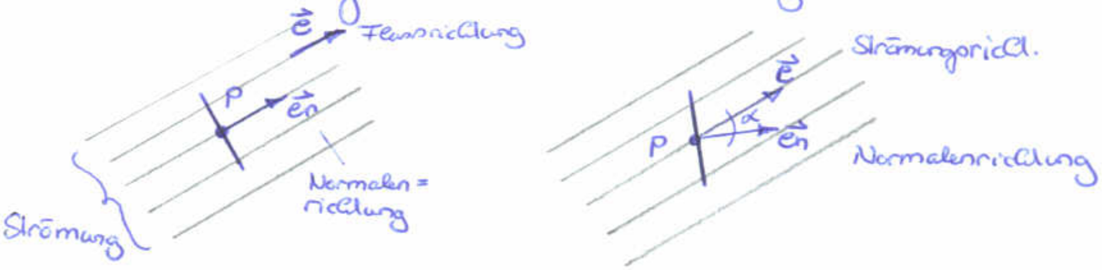
Def der elektr Feldstärke durch Ladungsbez Kraft allgemeiner weil nicht auf (Quasi) Elektrostatik begrenzt.

9.2 Der elektr. Fluss Influenz

Der elektr. Fluss ist kein Materiefluss wie z.B. der elektr. Strom, sondern eine physikalische Größe die mathem. Eigenschaften ähnlich einer Strömung besitzt

Der Fluss beginnt bei den pos. Überschussladungen und „fliegt" zu den negativen.

Ein in eine Strömung eingebrachtes Flächenstück A besitzt innerhalb des Strömungsgebietes jederzeit einen Wert $I(A)$ der Stromstärke, die auch von der Lage der Fläche abhängt.



$I(A) = I_0$ $\qquad$ $I(A) = I_0 \cos(\alpha)$

Maximale Stromstärke wenn Normalenrichtung in Strömungsrichtung. (kann zur Bestimmung der Flussrichtung verwendet werden)

Influenz

Wird ein elektr. ungeladener Körper in die Nähe eines geladenen gebracht, so ordnen sich die vorhandenen Ladungsträger neu an.

Diese Erscheinung nennt man Influenz

Durch ein Doppelplättchenexperiment lässt sich die lokale Richtung und der Wert des Flusses bestimmen

Der Wert $\underline{\Psi(A)}$ des <u>elektr. Flusses</u> an einem Flächenstück A ist gleich dem Wert der dort influenzierbaren elektrischen Ladung

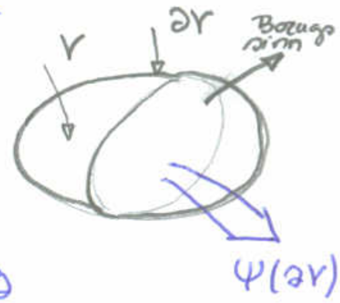
Quellen	des elektr. Flusses	pos elektr Ladungen
Senken		neg elektr Ladungen

Die Annahme der Flussrichtung von pos → neg Ladungen ist reine <u>Konvention</u>

Der Satz vom elektr. Hüllenfluss

Ein durch die geschlossene Oberfläche ∂V eines Raumteils V austretender elektr. Fluss $\Psi(\partial V)$ ist gleich der im Raumteil V befindlichen Ladungsmenge $Q(V)$

$$\Psi(\partial V) = Q(V)$$



Der Satz vom elektr. Hüllenfluss ist allgemeingültig

$\Psi(\partial V) = 0$ heißt nicht notwendigerweise, dass es keinen Fluss gibt (Ψ eintretend und austretend z.B. gleich groß)

Darstellung von Ladungsverteilungen

Punktladungen

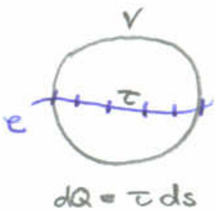
$$Q(V) = \sum_{k=1}^{n} Q_k$$

Linienladungen

$$Q(V) = \int_{e \cap V} \tau \, ds$$

Linienladungsdichte

$$\tau = \frac{dQ}{dA}$$

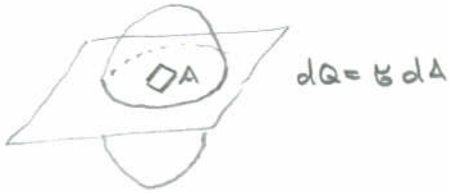


Flächenladungen

$$Q(V) = \int_{A \cap V} \sigma \, dA$$

Flächenladungsdichte

$$\sigma = \frac{dQ}{dA}$$

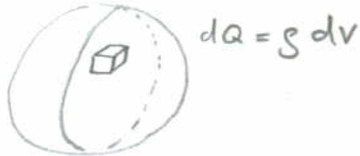


Raumladungen

$$Q(V) = \int_{V} \rho \, dV$$

Raumladungsdichte

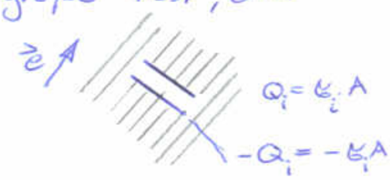
$$\rho = \frac{dQ}{dV}$$



Die elektr. Flussdichte

Wir legen eine gerichtete physikalische Größe fest, die elektr. Flussdichte,

$D = \sigma_i \vec{e}$



$$\vec{D} = \sigma_i \vec{e}$$

als die mit der lokalen Flussrichtung versehenen influenzierbaren Flächenladungsdichte σ_i an einem Testscheibchen in Normalstellung

Darstellung des elektr. Flusses als Flächensumme der elektr. Flussdichte

$$\Psi(A) = \sum_{k=1}^{n} D_{nk} \cdot A_k \qquad \Psi(A) = \int_A D_n \, dA$$

9.3 Verknüpfung elektr. Spannung und Flüsse
Die Kapazität

Die elektrische Feldkonstante

siehe Abb. 9.17 !

im leeren Raum

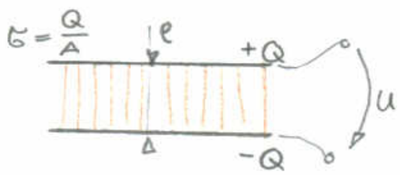
$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$$

elektr. Flussdichte und elektr. Feldstärke verknüpft

elektr. Feldkonstante, Influenzkonstante

$$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \qquad [\varepsilon_0] = \frac{As}{Vm} = \frac{F}{m}$$

Auf diesen Ausdruck kommt man wenn man das elektr. Feld und den Fluss in dem Raum vergleicht



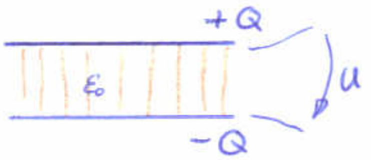
$$\frac{Q}{A} = \varepsilon_0 \frac{U}{l} \quad \hat{=} \quad D = \varepsilon_0 E$$

Für den leeren Raum haben wir die universelle Proportionalität der elektr. Flussdichte $\vec{D}$ zur elektr. Feldstärke $\vec{E}$ über die elektr. Feldkonstante ε_0

Im elektrostat. Fall sind $\vec{D}$ und $\vec{E}$ immer gleich gerichtet, das bedeutet dass die Potentialflächen von den Flussröhren immer senkrecht durchsetzt werden, da die $\vec{E}$ Vektoren senkrecht auf die Potentialflächen stehen.

Da die Oberflächen von stromlosen Leitern immer auch Potentialflächen darstellen werden sie von den Flussröhren im leeren Raum senkrecht getroffen.

Die Kapazität



$$\frac{Q}{A} = \varepsilon_0 \frac{U}{l} \qquad Q = \varepsilon_0 \frac{A}{l}\, U$$

Kapazität $\boxed{Q = C \cdot U}$ $\qquad [C] = 1\,\frac{C}{V} = 1F$

$$\boxed{1F = 1\,\frac{C}{V} = 1\,\frac{As}{V}}$$ Farad

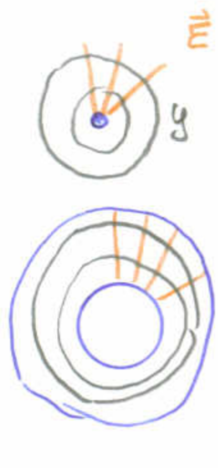
radialsymm. Feld einer Punktladung

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{Q}{r^2}\,\vec{e}_r \qquad \vec{D} = \frac{1}{4\pi}\,\frac{Q}{r^2}\,\vec{e}_r$$

Feldstärke — Flussdichte

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{Q}{r}$$

elektr. Potential



Es besteht kein Unterschied im Feld ob man eine Punktladung im leeren Raum betrachtet, oder eine Kugelanordnung mit $\pm Q$ auf den Platten aufgebracht

Schon bei durchaus üblichen Spannungen treten vor Spitzen hohe Spannungen auf

9.4 Dielektrika

Kontinuumsmodell:

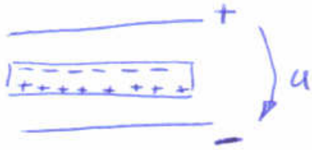
Betrachtet man einen Körper aus dem makroskopischen Standpunkt so, dass physikalische Felder räumlich kontinuierlich (bis auf wenige Punkte) erscheinen, so spricht man von einem Kontinuumsmodell

Dielektrika wird ein isolierendes Material im Zusammenhang mit elektr. Feldern genannt.

Makroskopisch finden wir in einem Dielektrikum im Vergleich zum leeren Raum bei gleichbleibender elektr. Flussdichte einen kleineren Wert der elektr. Feldstärke

Innerhalb der Aggregate kommt es zu einer Ladungsverschiebung
=> Polarisierung

Atome/Molek.



Isotropes Dielektrikum $\vec{D}$ und $\vec{E}$ stimmen in jedem Punkt richtungsmässig überein

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$

ε Permittivität

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

ε_r Permittivitätszahl

Die Permittivitätszahl hängt von den Materialeigenschaften, Druck, Temperatur etc ab. Bei hohen Feldstärken kann ein nichtlineares Verhalten zu Tage treten.

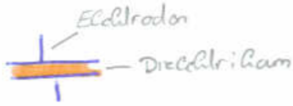
Anisotropes Dielektrikum Richtung von $\vec{E}$ und $\vec{D}$ stimmen im allgem. nicht überein

Homogener Körper die lokalen makroskopischen Materialeigensch. sind in jedem Körperpunkt dieselben.

10. Schaltungen mit Kondensatoren

10.1 Kondensatoren

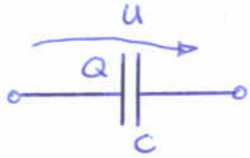
Konzentrierte Stromkreiselemente deren wesentliche Eigenschaft die Kapazität ist.



Elektroden: zwei elektr. isolierte Leiter

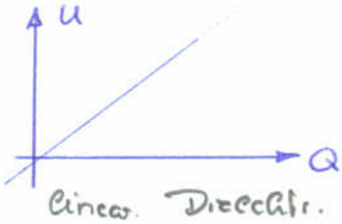
Dielektrikum: Bewirkt elektr. Isolierung, Spannungsfestigkeit und erhöht somit ($\varepsilon_r > 1$) die Kapazität

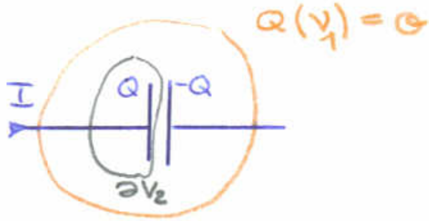
Niedrige Frequenzen => hoher Widerstand / Barriere
Hohe Frequenz => ungehindert



$$Q = C \cdot U$$

Modell des idealen Kondensator
Kapazität ist konst., die Kennlinie Q-U ist eine Gerade => Kennlinie eines idealen Kondensators mit konst. Kapazität





$I = \dot{Q}$

V_1: erweiterte 1. KH-Regel da $Q = 0$
Zufließender Strom = abfließender

V_2: Erhaltungssatz

$$I = \dot{Q}$$

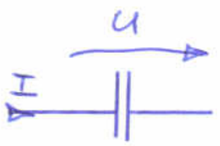
Ladung = Überschussladung auf der Elektrode

Bei konstanter Kapazität folgt

$$I = \dot{Q} \qquad Q = CU$$

$$\boxed{I = C \cdot \dot{U}}$$

An einem idealen Kondensator ist die Stromstärke proportional der zeitlichen Änderungsrate der Spannung



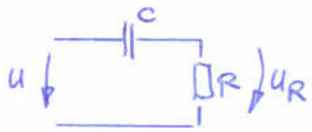
$I = C\dot{U}$
VBZ

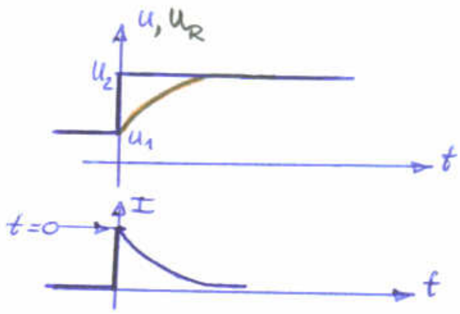
$I = -C\dot{U}$
EBZ

10.2 Berechnen einfacher Schaltungen

Zeitkonstante $\boxed{\tau = RC}$ $[\tau] = 1s$

mathematische Darstellung der Übergänge mittels Exponentialfunktion





$$U_C = U_2 - (U_2 - U_1) e^{-t/\tau}$$

$$I = \frac{U_2 - U_1}{R} e^{-t/\tau}$$

Als praktische Regel kann man den Umladungsvorgang als nach 5 Zeitkonstanten abgeschlossen betrachten.

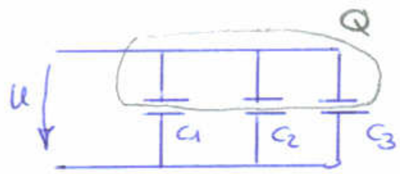
τ legt eine Scala fest, die zeigt ob Vorgänge schnell oder langsam verlaufen

Ist die halbe Periodendauer eines Rechtecksignals vernachlässigbar klein gegen die Umladezeit ⇒ Kondensatorspannung vernachlässigbar

$$\frac{T}{2} \ll 5\tau \qquad f = \frac{1}{T} \Rightarrow \frac{1}{10\tau} \ll f$$

Parallelschaltung und Reihenschaltung von Kondensatoren

Parallelschaltung



An jedem Kond. die gleiche Spannung

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_1 = C_1 U \qquad Q_2 = C_2 \cdot U \; \ldots$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

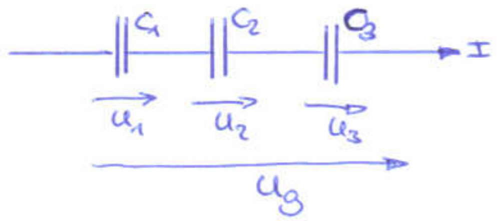
$$Q = U(C_1 + C_2 + C_3)$$

$$Q = C \cdot U$$

Ersatzschaltung

$$\boxed{C = \sum_i C_i}$$

~~[crossed-out word]~~ Reihenschaltung



$$U_g = U_1 + U_2 + U_3$$

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} \qquad U_2 = \frac{Q}{C_2}$$

$$U_g = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

$$U_g = \frac{1}{C} Q$$

$$\boxed{\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i}}$$

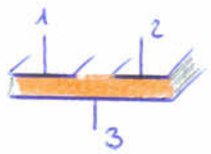
Ersatzschaltung

Teilkapazitäten

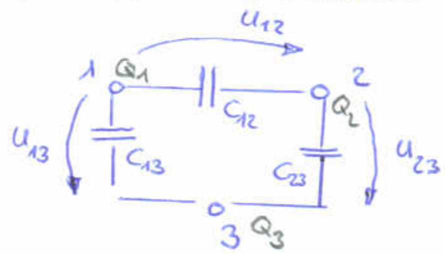
Erweiterung des Kapazitätsbegriff auf mehr als zwei Leiter

Jeder Leiter → ein Knoten

Je zwei Knoten über Kondensator verbunden



⟹



$$Q_1 = Q_{12} + Q_{13} = C_{12} U_{12} + C_{13} U_{13}$$

$$Q_2 = Q_{12} + Q_{23} = C_{12} U_{12} + C_{23} U_{23}$$

$$Q_3 = -Q_{13} + Q_{23} = -C_{13} U_{13} - C_{23} U_{23}$$

Da keine Überschussladungen $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$

Die rechten Seiten stellen die elektr. Teilflüsse in der urspr. Anordnung dar

Teilkapazitäten C_{12}, C_{13}, C_{23}

11. Ergänzungen zum elektr. Feld

Extremwerte des Potentials

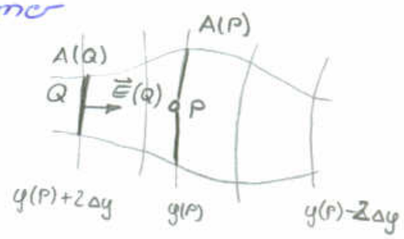
In einem leeren, ladungsfreien Feldgebiet liegen die Extremwerte (Max und Minima) des elektr. Potentials immer an den Rändern

Aus der Kenntnis der Potentialwerte an den Rändern kann man die Orte und Größen der Extrema des Potentials bestimmen

$\varphi(P)$ lok. Max ⇒ Fluss v. innen nach Außen, da aber keine Ladungen ⇒ Widerspr.

Extremwerte der elektr. Feldstärke

In einem leeren, ladungsfreien Feldgebiet liegen die Maximalwerte der elektr. Feldstärke (Betragsmäßig) und somit auch der elektr. Flussdichte im statischen Fall immer an den Rändern.



wenn lok. Maximum der elektr. Feldstärke ⇒ Potentialflächen dichter, Flussröhren darauf senkrecht ⇒ $A(Q) < A(P)$

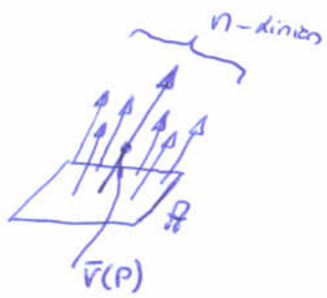
$$\left.\begin{array}{l} A(Q) < A(P) \\ \Psi = \varepsilon_0 E(P)\cdot A(P) = \varepsilon_0 E(Q)\, A(Q) \end{array}\right\} \Rightarrow E(P) < E(Q)$$

Vektorlinien

In einem räumlichen Bereich B ist ein Vektorfeld gegeben (in jedem Punkt ext. ein Vektor $\vec{v}(P)$)

Beginnt man bei einem Punkt P und geht man immer um ein kleines Stück in Richtung des Vektors weiter so ergeben sich durchgehende Linien ⇒ Vektorlinien

Um den Betrag v(P) darzustellen spannt man ein Flächenstück A normal zur Feldrichtung auf und legt fest: „Die Flächendichte der gerichteten durchtretenden Vektorlinien ist proport. dem Betrag des Vektors ⇒ System von Feldlinien



$v = \frac{kn}{A}$

Verknüpfung von Spannung und Fluss

lokal: $\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$

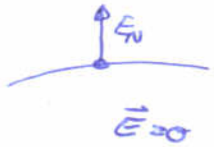
global $\vec{Q} = C\cdot U$

Die zur elektr. Feldstärke gehörenden Feldlinien nennen wir <u>elektr. Feldstärkelinien</u> (sie durchsetzen die Potentialflächen stets senkrecht)

Die Feldlinien der elektr. Flussdichte bezeichnen wir als <u>elektr. Flussdichtelinien</u>

Im leeren Raum und im Inneren eines linearen, homogenen isotropen Dielektrikums sind die $\vec{D}$ und $\vec{E}$ einander über einen ganzen Bereich mit einem Faktor proportional $\Rightarrow$ einfach nur <u>elektr. Feldlinien</u>

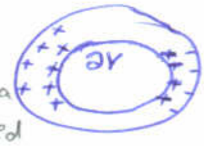
Die elektr. Feldstärkelinien bilden immer einen rechten Winkel mit den Oberflächen stromfreier Leiter (Fläche konst. Potential $\Rightarrow$ im inneren kein $\vec{E}$ Feld)



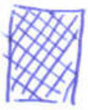
$E_t^+ = E_t^- = 0$

Im ladungsfreien, einfach zusammenhängenden Hohlraum eines stromfreien Leiters gibt es kein elektr. Feld

Maxima innen
am Rand ∂V
$\Rightarrow$ keine Potentialmaxima
im Innern $\Rightarrow$ kein Feld



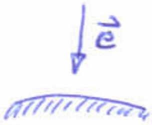
Anwendung: Farady-Käfig
Abschirmung



Drahtkäfig

<u>Mittleres elektr. Erdfeld in Bodennähe</u>

$E = 130 \frac{V}{m}$



$\vec{E} = E \cdot \vec{e}$

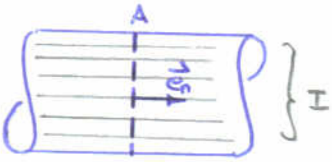
Das Feld lässt sich technisch nicht nutzen weil der Boden und der menschl. Körper, Geräte etc. stellen gute Leiter dar. Ist dieser Körper mit dem Boden in Kontakt, bilden sie mit dem Boden eine Potentialfläche

12. Verteilte elektr. Ströme

12.1 Das elektr. Strömungsfeld

Elektr. Ströme sind Elektronen/Ladungsträger mit einer resultierenden Drift- und Strömungsbewegung.
Im makroskopischen wird einem Flächenstück A eine elektr. Stromstärke $I(A)$ zugeordnet, somit ergibt sich ein Bild von aneinander gelegten Stromröhren (die alle den gleichen Wert der Stromstärke $I(A_x)$ repräsentieren)

Die lokale Beschreibung des elektr. Strömungsfeldes erfolgt durch die elektr. Stromdichte (vektorielle Größe)



$J_n = \frac{I}{A}$

$$J = \frac{I_0}{A}$$

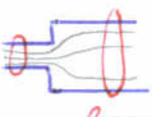
$$\vec{J} = J\vec{e}$$

I_0 ... Höchstwert der Stromstärke
A ... Fläche des betr. Bereich
$\vec{e}$ ... lokale Strömungsrichtung

$$[J] = \frac{A}{m^2}$$

Der Betrag J der Stromdichte $\vec{J}$ ist gleich dem Quotienten $\frac{I_0}{A}$ und ihre Richtung ist die lokale Strömungsrichtung

homogenes Strömungsfeld



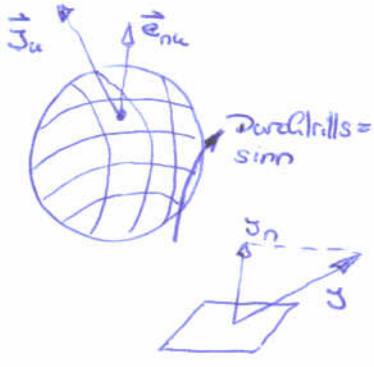
homogen

Die Stromdichte ist in einem Bereich räumlich konstant
Näherungsweise kann dies z.B. der Fall sein wenn sich der Leiterquerschnitt langsam ändert, oder die Abstände von den Sprungstellen groß genug sind.

Die elektr. Stromdichte ist der lokale Repräsentant einer elektr. Stromverteilung

Darstellung: elektr. Stromstärke als Flächensumme der elektr. Stromdichte

$$\boxed{I(\mathcal{A}) = \int_{\mathcal{A}} J_n \, dA}$$



$J_n = J\cos(\alpha)$

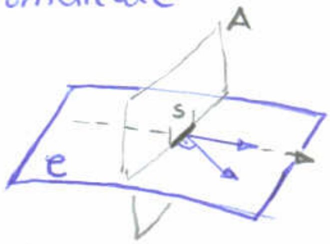
Flächenströme

Elektr. Ströme verlaufen in dünnen Schichten konzentriert

lokale Erfassung durch die Flächenstromdichte

$$k = \frac{I_0}{s}$$

$$\boxed{\vec{k} = k\,\vec{e}}$$

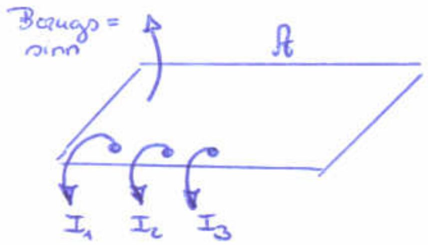


Steht die Fläche schief auf die Strömungsrichtung muss die entspr. Projektion gebildet werden

$$\boxed{I(A) = \int\limits_{A \cap e} k_n \, ds}$$

elektr. Stromstärke als Kurvensumme der elektr. Flächenstromdichte

Linienströme



$$\boxed{I(A) = \sum_{n=1}^{m} I_n}$$

In diesem Zusammenhang nennt man den Gesamtwert ~~[illegible]~~ $I(A)$ der Stromstärke auch die <u>elektr. Durchflutung</u>

12.2 Das lokale Ohmsche Gesetz

$$R = \rho \, \frac{l}{A}$$

ρ spezifischer elektr. Widerstand
Resistivität

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

γ elektr. Leitfähigkeit
Konduktivität

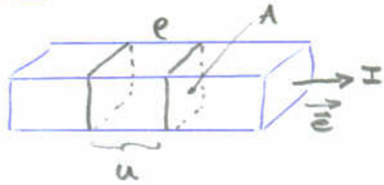
$\cancel{\gamma_{Cu} \approx 60 \cdot 10^6}$

Mit diesem Zusammenhang kann man den elektr. Widerst. von Drähten und anderen Körpern berechnen, sofern zumindest abschnittsweise ein <u>homogenes Strömungsfeld</u> vorliegt.

$$\gamma_{Cu} \approx 60 \cdot 10^6 \, \frac{S}{m}$$

Ohmsches Gesetz in der vektoriellen Form

$$\boxed{\vec{E} = \varrho \vec{J} \qquad \vec{J} = \gamma \vec{E}}$$



Vorausgesetzt ist Homogenität

$$U = RI = \varrho \frac{l}{A} I$$

$$\frac{U}{l} = \varrho \frac{I}{A}$$

isotrope Leiter

Richtungen der Stromdichte und der Feldstärke stimmen in jedem Punkt überein

Linear wirkend / lineare Leiter

Wenn die Konduktivität unabhängig vom Betrag der Feldstärke bzw Stromdichte ist.

Dichte der Joule Verluste

$$p = \frac{P}{V} \qquad \boxed{p = \varrho J^2 = \gamma E^2}$$

$$P = UI = I^2 R$$

$$\frac{P}{V} = \frac{R}{Al} \cdot I^2$$

$$p = \frac{\varrho \frac{l}{A}}{Al} \cdot I^2$$

$$p = \varrho \frac{I^2}{A^2} = \varrho J^2$$

Die Dichte der Joule-Verluste kann auch für inhomogene Strömungsfelder angegeben werden. Die Auswertung erfolgt dann Punkt für Punkt.

13. Elementare Methoden der Berechnung elektr. Felder

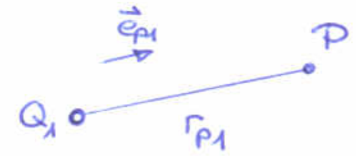
13.1 Punktladungen, Punktdipole

Für Feldstärke und Potentiale gilt das ~~Supper~~ Superpositionsprinzip (so lange es nicht dadurch zur Ladungsverteilungsänderung kommt)

Punktladung im leeren Raum erzeugt ein kugelsymm. Feld

$$\boxed{\varphi(P) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{Q_1}{r_{P1}} \qquad \vec{E}(P) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{\vec{e}_{P1}\,Q_1}{r_{P1}^2}}$$

Punktladung

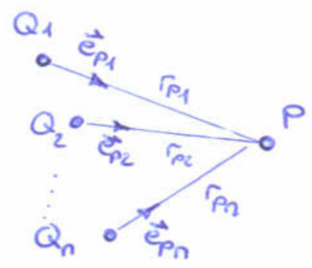


Ansammlung von Punktladungen

Befinden sich im sonst leeren Raum n Punktladungen so erhält man das elektr Feld am Ort P durch Summation der Einzelfelder

$$\boxed{\begin{aligned}\varphi(P) &= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{k=1}^{n}\frac{Q_k}{r_{Pk}}\\ \vec{E}(P) &= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{k=1}^{n}\frac{\vec{e}_{Pk}\,Q_k}{r_{Pk}^2}\end{aligned}}$$

Ansammlung von Punktladungen

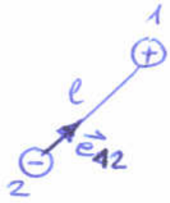


Elektr. Dipole

Betrachtet man entgegen gesetzt gleich große Punktladungen die nahe beieinander liegen (d.h. man betrachtet das Feld in einer gegenüber dem Abstand großen Entfernung) spricht man von einem <u>elektrischen Dipol</u> bzw von einem <u>elektr. Dipolfeld</u>

Elektrisches Moment

$$\boxed{\vec{p} = \vec{\ell} Q}$$



$Q_1 = Q > 0$

$\vec{\ell} = \ell \, \vec{e}_{12}$

$Q_2 = -Q$

$p = \ell Q$

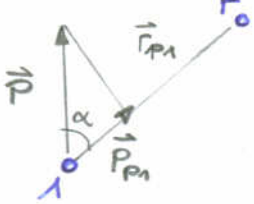
$\vec{p} = p \, \vec{e}_{12} = \vec{\ell} Q$

Die Richtung weist stets von der negativen zur positiven Ladung

Am ersten betrachtet man den Dipol als punktförmiges Gebilde ohne räumliche Ausdehnung aber mit einer Richtung (<u>Punktdipol</u>) charakterisiert durch das elektr. Moment $\vec{p}$.

Feld eines Punktdipol in allgemeiner Lage

$$\boxed{\varphi(P) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{p_{P1}}{r_{P1}^2} \qquad \vec{E}(P) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{3\vec{p}_{P1} - \vec{p}}{r_{P1}^3}}$$



$\vec{r}_{P1} = r_{P1} \vec{e}_{P1}$

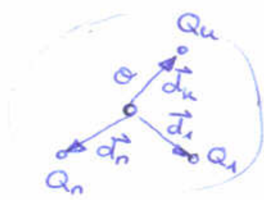
$\vec{p}_{P1} = p_{P1} \vec{e}_{P1} \qquad p_{P1} = p \cdot \cos\alpha$

$\vec{p}_{P1}$ Komponente von $\vec{p}$ in Richtung des Punktes 1

Elektrische Dipolfelder klingen schneller ab als Felder von Punktladungen.

<u>Definition des elektr. Moments $\vec{p}$ auf eine Ansammlung von Punktlad.</u>

$$Q = \sum_{k=1}^{n} Q_k \qquad \vec{p} = \sum_{k=1}^{n} \vec{d}_k Q_k$$



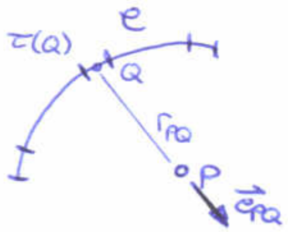
Das elektr. Moment einer Ladungsverteilung ist unabhängig vom Bezugsort, wenn die Gesamtladung gleich Null ist

13.2 Liniendipole, Linienladungen

Linienladung: elektr. Überschussladungen sind entlang einer Kurve im Raum kontinuierlich verteilt.

τ Linienladungsdichte $\quad [\tau] = 1\frac{C}{m}$

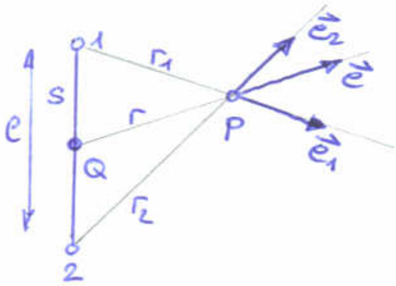
$$\varphi(P) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{u=1}^{n} \frac{\tau_u s_u}{r_{Pu}} \qquad \vec{E}(P) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{u=1}^{n} \frac{\tau_u s_u \vec{e}_{Pu}}{r_{Pu}^2}$$



$$\varphi(P) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_l \frac{\overset{\tau(Q)}{\tau}\, ds}{r_{PQ}} \qquad \vec{E}(P) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_l \frac{\vec{e}_{PQ}\, \tau(Q)\, ds}{r_{PQ}^2}$$

elektr. Feld einer Linienladung

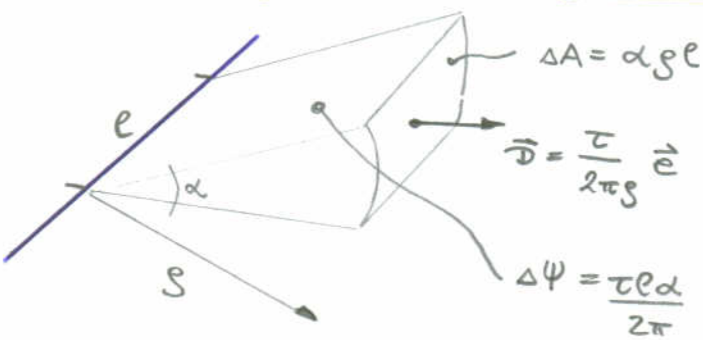
Gleichförmig elektr. geladener dünner Stab



$$\varphi = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0} \ln\left(\frac{L+l}{L-l}\right) \qquad L = r_1 + r_2$$

$$\vec{E} = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0} \frac{2l(\vec{e}_1 + \vec{e}_2)}{(L+l)(L-l)}$$

Beidseitig unendlich ausgedehnte, gleichförmig elektr. geladene Gerade

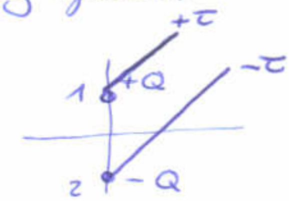


$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \ln\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)$$

$$\vec{E} = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \frac{\vec{e}_\rho}{\rho}$$

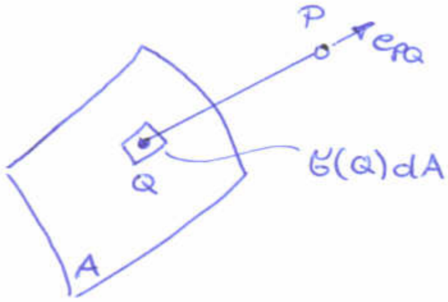
Elektrische Liniendipole

Zwei parallele Geraden im Abstand ℓ, gleichförmig geladen (mit entgegengesetzten Linienladungen $+\tau$ und $-\tau$



Derzeit weggeschaltet!

13.3 Flächenladungen



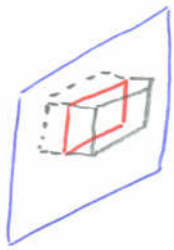
$$\varphi(P) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{k=1}^{n} \frac{\sigma_k A_k}{r_{Pk}}$$

$$E(P) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{k=1}^{n} \frac{\sigma_k(Q)\, A_k\, \vec{e}_{Pk}}{r_{Pk}^2}$$

$$\boxed{\varphi(P) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_A \frac{\sigma(Q)\, dA}{r_{PQ}} \qquad \vec{E}(P) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_A \frac{\vec{e}_{PQ}\, \sigma(Q)\, dA}{r_{PQ}^2}}$$

Feld von einer Flächenladung

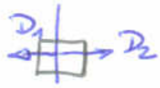
Anwendung des elektr. Hüllenflusses führt oft zu einer schnellen Lösung wenn hohe räumliche Symmetrie vorliegt.



unendlich ausgedehnte gleichf. geladene Schicht

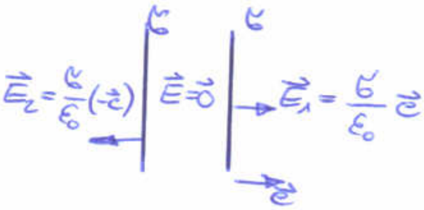
Gesamtladung $Q = \sigma A$

Gesamtfluss $D_1 A + D_2 A = \sigma A$

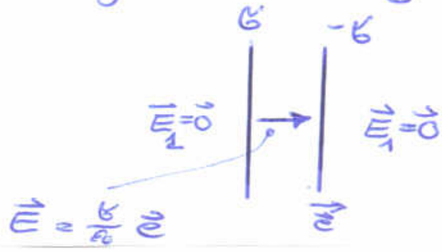


parallele Ebenen mit

entgegengesetzter Ladung



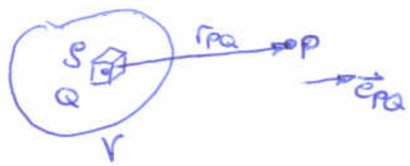
gleicher Ladung



13.4 Raumladungen

Raumladung: zumindest stückweise kontinuierliche dreidimension. Ladungsverteilung

ρ ... Raumladungsdichte



$$\boxed{\begin{aligned} \varphi(P) &= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_V \frac{\rho(Q)\,dV}{r_{PQ}} \\ \vec{E}(P) &= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_V \frac{\vec{e}_{PQ}\,\rho(Q)\,dV}{r_{PQ}^2} \end{aligned}}$$

Feld einer Raumladung

Ladungsorte = Quellpunkte, Orte P der Auswertung = Aufpunkte
Feldpunkte

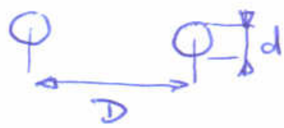
13.5 Verwendung von Ausschnitten bekannter Felder

Längenbezogene Kapazität einer Koaxialleitung

$$C' = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}$$

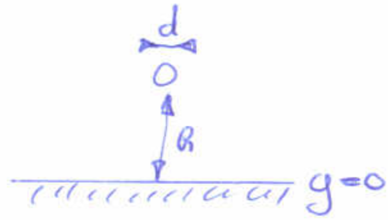
Längenbezogene Kapazität der Doppelleitung

$$C' \approx \frac{\pi\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{2D}{d}\right)} \qquad \left(\frac{d}{D}\right)^2 \ll 1$$



Einfachleitung über dem Erdboden

$$C' = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{4h}{d}\right)}$$



$$\left(\frac{d}{h}\right)^2 \ll 1$$

14. Globale und lokale Eigenschaften elektr. Felder

14.1 Der Satz von der Erhaltung der elektr. Ladung

Ein durch die geschlossene Oberfläche ∂V eines Raumteil V austretender elektr. Strom der Stärke $I(\partial V)$ ist gleich der neg. Änderungsrate $\dot{Q}(V)$ der im Raumteil V befindlichen Ladungsmenge $Q(V)$

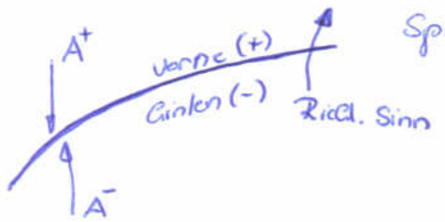
$$\boxed{I(\partial V) = -\dot{Q}(V)}$$

gilt allgemein für ganze Raumteile

Dabei handelt es sich um die globale Eigenschaft, als Repräsentant der Ladung im Raumteil ist es möglich mittels:

- Punktladungen → Summe der Punktladungen
- Linienladung → Kurvensumme d. Linienladungsd. τ
- Flächenladung → Flächensumme d. Flächenladd. σ
- Raumladung → Volumensumme d. Raumladungsd. ρ

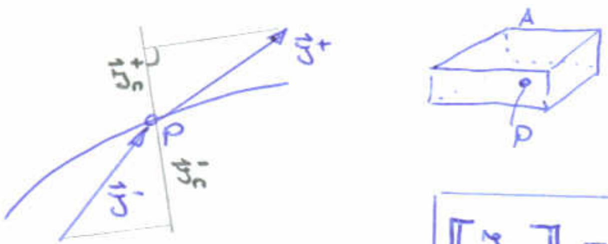
An einer Oberfläche / Grenzfläche zwischen zwei Körpern ändern sich i.A. die Materialeigenschaften mit entspr. Änderung der Feldwerte. Dies wird in einem Kontinuumsmodell mittels sprungartigen Unstetigkeiten beschrieben.



Sprung $[\![A]\!] = A^+ - A^-$

Sprungfläche

Stromdichte $\vec{J}$



$$I(\partial V) = J_n^+ A - J_n^- A$$

$$Q(V) = \sigma A$$

$$\boxed{[\![J_n]\!] = -\dot{\sigma}}$$

Der Sprung der Normalprojektion der elektr. Stromdichte ist gleich der neg. zeitlichen Änderungsrate der Flächenladungsdichte

Am direkten Übergang zwischen metallischen Leitern für niederfreq. Vorgänge kann man $\dot{\sigma}$ in der Regel vernachlässigen, daher nur mehr Stetigkeit der Normalprojektion J_n

Lokale Erhaltungsgleichung der elektr. Ladung

Kontinuitätsgleichung der Ladung

$$\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = - \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

14.2 Der Satz vom elektr. Hüllenfluss

Ein durch die geschlossene Oberfläche ∂V eines Raumteils V austretender elektr. Fluss $\Psi(\partial V)$ ist gleich der im Raumteil befindlichen Ladungsmenge $Q(V)$

$$\boxed{\Psi(\partial V) = Q(V)}$$

Elektr. Flussdichte $\vec{D}$

$$[\![D_n]\!] = \sigma$$

Der Sprung der Normalprojektion der elektr. Flussdichte ist gleich der Flächenladungsdichte

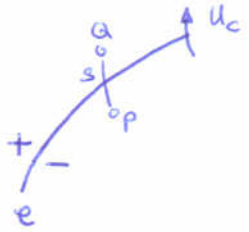
Lokale Form des Satzes vom elektr. Hüllenfluss

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = \rho$$

14.3 Der Satz von der elektr. Umlaufspannung

In der (Quasi)Elektrostatik ist die der Randkurve ∂A eines Flächenstücks A zugeordneten Umlaufspannung $U(\partial A)$ gleich Null.

$$\boxed{U(\partial A) = 0} \qquad \boxed{U(e) = \varphi_1(P) - \varphi_1(Q)}$$



Potential φ

$$[\![\varphi]\!] = 0$$

mit kleiner werdender Strecke s wird die Spannung gegen Null gehen. Allgemeiner könnte auch eine Spannung U_c an der Grenzfläche berücksichtigt werden

$$[\![\varphi]\!] = -U_c$$

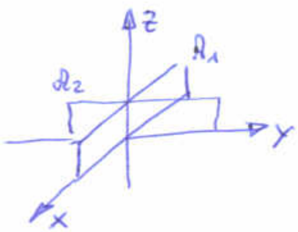
Verschwindet an einer Sprungfläche die Kontaktspannung so ist das elektr. Potential stetig

Elektr. Feldstärke $\vec{E}$

Voraussetzung: verschwindende Kontaktspannung

$$[\![\vec{E}_t]\!] = \vec{0}$$

An einer Sprungfläche ist die Tangentialkomponente der elektr. Feldstärke stetig.



$$U(\partial A_1) = E_x^+ l_x - E_x^- l_x = [\![E_x]\!] l_x = 0$$

$$U(\partial A_2) = E_y^+ l_y - E_y^- l_y = [\![E_y]\!] l_x = 0$$

Lokale Darstellung der elektr. Feldstärke durch das elektr. Potential

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \qquad E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} \qquad E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

Materialgleichungen

isotrope Körper

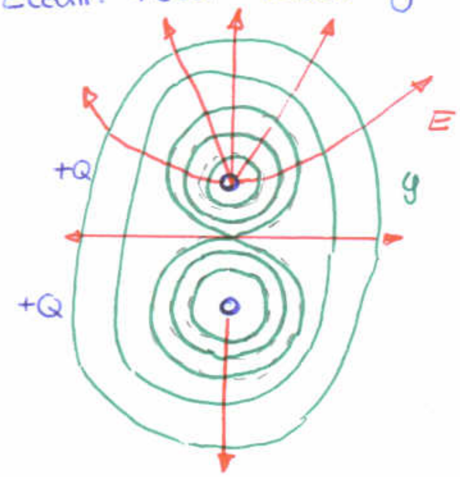
$$\boxed{\begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon \vec{E} \\ \vec{J} &= \gamma \vec{E} \end{aligned}}$$

isotrop. Dielektrika

isotrope Leiter

Die Feldstärke besitzt an der Oberfläche eines stromfreien Leiters höchstens eine Normalkomponente

Elektr. Feld zweier gleich großer Ladungen



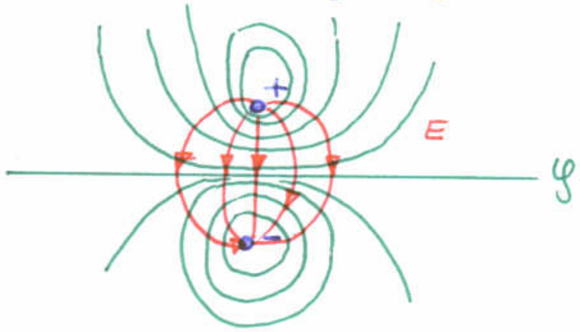
Nahfeld: Annähernd Feld einer Punktladung

Fernfeld: Annähernd Feld einer einz. Punktladung mit 2Q

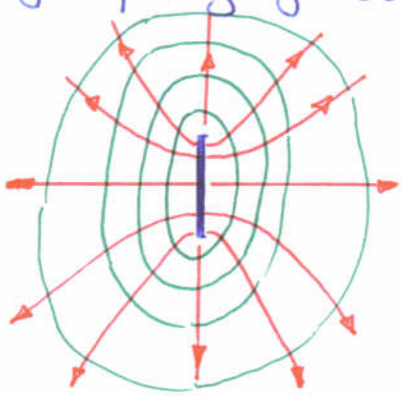
Dazwischen entsprechend deformiert

- Vektorlinien der elektr. Feldstärke
- Schnitt der Potentialflächen mit der Zeichenebene

Feld in der Umgebung eines ungleichen Ladungspaares



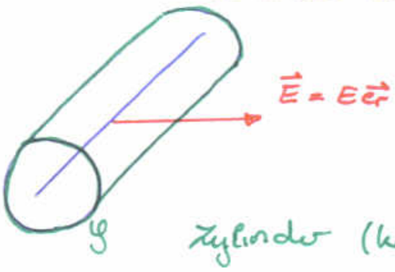
Potentialflächen und Flussröhren eines gleichförmig geladenen Stabes



Potentialflächen: Schar ~~[illegible]~~ konfokaler gestr. Rotationsellipsoide mit den Stabenden als Brennpunkte

Vektorlinien der elektr. Feldstärke gehören zu einer Schar konfokaler Hyperbeln

gleichförmig geladene Gerade
(unendl. ausgedehnt



Zylinder (koaxiale Kreiszylinder)