

Fragenkatalog

Elektrotechnik I

Fragenquelle: Adalbert Prechtl, Vorlesungen über die Grundlagen
der Elektrotechnik – Band 1
ISBN: 3-211-82553-3

Ausgearbeitet: Wagner Markus
Waltl Michael
Zensch Roman

Inhaltsverzeichnis:

1	Zeit. Raum. Bewegung	3
2	Körper und Teilchen. Masse und Stoffmenge.....	7
3	Impuls und Kraft. Kraftfelder. Allgemeine Felder	9
4	Arbeit und Leistung. Energie. Wärme und Temperatur.....	13
5	Schwingungen und Wellen. Licht.....	17
6	Elektrische Ladungen. Ströme und Spannungen	21
7	Physikalische Größen, Einheiten und Dimensionen	29
8	Stromkreise und einfache Stromkreiselemente.....	39
9	Das elektrische Feld.....	55
10	Schaltungen mit Kondensatoren.....	75
11	Ergänzendes zum elektrischen Feld.....	79
12	Verteilte elektrische Ströme	85
13	Elementare Methoden der Berechnung elektrischer Felder	89
14	Globale und lokale Eigenschaften elektrischer Felder.....	99

1 Zeit. Raum. Bewegung

1.1 *Warum wurde die Definition der Zeiteinheit auf der Grundlage der Erdrotation aufgegeben?*

Weil der Sonnentag aufgrund der Schiefe der Ekliptik und der Ellipsenform der Erdbahn unregelmäßig ist.

1.2 *Welche Geräte werden heute zur Darstellung der Zeiteinheit verwendet? Warum gibt es gelegentlich Schaltsekunden?*

Zur Darstellung der Zeiteinheit werden entweder Cäsium-Atomuhren, die auf den Eigenschwingungen von Cäsiumatomen beruhen (TAI-Zeitskala) oder Uhren, die auf der Erddrehung beruhen (UT1-Zeitskala). Zusätzlich gibt es noch die koordinierte Weltzeit, die von allen Zeitzeichensendern ausgestrahlt wird verwendet. Diese verwendet Atomzeitsekunden, hält sich aber mit Einfügen oder Auslassen von Schaltsekunden mit der UT1 in Übereinstimmung.

1.3 *Warum gibt es unterschiedliche Geometrien? Welches Modell der physikalischen Geometrie verwenden wir im täglichen Leben und in der klassischen Physik?*

Im täglichen Leben und der klassischen Physik wird die euklidische Geometrie verwendet. Diese kann aber in manchen Fällen (zum Beispiel der Astronomie) nicht uneingeschränkt verwendet werden.

1.4 *Wie wurde früher und wie wird heute die Basiseinheit der Länge festgelegt?*

Im Zuge der französischen Revolution wurde ein Maßstab entworfen, der den zehnmillionsten Teil eines Viertels des Erdumfanges maß und den man „Meter“ nannte. Seit 1875 gibt es in Paris einen Maßstab aus einer Platin-Iridium-Legierung, der das Urmeter repräsentiert. Dies galt bis 1960, als das Meter als ein bestimmtes Vielfaches der Wellenlänge einer Krypton-Lampe definiert wurde. Im Jahr 1983 wurde dann das Meer über die Vakuumlichtgeschwindigkeit definiert und die Längeneinheit damit über die Zeiteinheit verknüpft.

1.5 Wozu dienen Koordinaten? Was ist eine Koordinatentransformation?

Koordinaten dienen dazu einen Punkt im Raum zu adressieren. Unter einer Koordinatentransformation versteht man die Umrechnung von Koordinaten zwischen Koordinatensystemen.

1.6 Wie konstruiert man ein kartesisches Koordinatensystem?

Man stellt sich 3 gerichtete Geraden vor, die paarweise senkrecht aufeinander stehen. Beim Schwenken der x-Achse zur y-Achse ergibt sich die z-Achse nach der Rechtsschraubenregel.

1.7 Wozu verwenden wir Vektoren? Was ist ein Ortsvektor?

Vektoren werden verwendet um gerichtete Größen zu beschreiben und mathematisch darzustellen. Ein Ortsvektor ist ein Vektor, der den gerichteten Abstand zwischen 2 Orten beschreibt.

1.8 Was bedeuten die Begriffe „Entwicklung (Zerlegung)“, „Komponenten“ und „Entwicklungskoeffizienten (Koeffizienten, Koordinaten)“ eines Vektors?

Unter „Entwicklung (Zerlegung)“ versteht man die Aufspaltung des Vektors in seine Komponenten, zum Beispiel im dreidimensionalen Raum in x-y-z-Richtungen. Unter den „Entwicklungskoeffizienten“ versteht man die Länge der Komponentenvektoren.

1.9 Was bedeutet „Bewegung“?

Unter Bewegung versteht man eine Ortsveränderung in der Zeit.

1.10 Was ist „Geschwindigkeit“, was „Beschleunigung“ und durch welche mathematischen Objekte werden diese Größen erfasst?

Unter Geschwindigkeit versteht man die Veränderung des Ortes in der Zeit, wobei zwischen Momentangeschwindigkeit (Ortsänderung in infinitesimaler Zeiteinheit) und Durchschnittsgeschwindigkeit (gemittelte Geschwindigkeit über einen gewissen Zeitraum)

unterschieden wird. Unter Beschleunigung versteht man die Änderung der Geschwindigkeit in der Zeit, auch hier kann zwischen Momentanbeschleunigung und Durchschnittsbeschleunigung unterschieden werden.

Beide Größen werden durch Vektoren erfasst, wobei die Richtung der Beschleunigung nicht notwendigerweise mit der Richtung der Geschwindigkeit zusammenfallen muss.

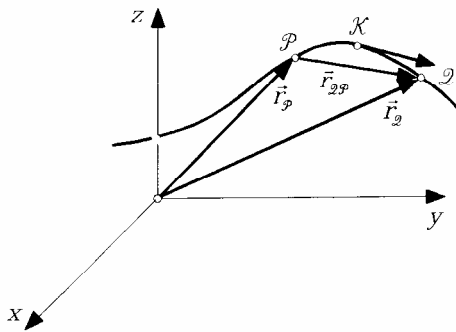


Abb. 1.11 Bewegung eines Objektes \mathcal{K} entlang einer gekrümmten Bahn

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

Beschleunigung:
$$\vec{a} = \lim_{t_Q \rightarrow t_P} \frac{\vec{v}_Q - \vec{v}_P}{t_Q - t_P}$$

2 Körper und Teilchen. Masse und Stoffmenge

2.1 Aus welchen Bestandteilen sind Atome aufgebaut? Wodurch unterscheiden sich Atome unterschiedlicher Elemente voneinander?

Atome bestehen aus Protonen, Neutronen (im Kern) und Elektronen (in der Hülle). Atome unterschiedlicher Elemente unterscheiden sich durch die Anzahl der Protonen (bzw. Elektronen im Grundzustand) voneinander.

2.2 Wodurch unterscheiden sich feste, flüssige und gasförmige Körper im Wesentlichen?

Sie unterscheiden sich durch die Anordnung ihrer Atome. Der Zusammenhalt der Atome nimmt dabei vom festen über den flüssigen zum gasförmigen Zustand ab. In fester Form sind die Atome meist in einer Gitterform zusammengehalten.

2.3 Was versteht man unter einer kristallinen Struktur? Wie groß sind etwa die Abstände benachbarter Gitterplätze?

Unter einer kristallinen Struktur versteht man eine kubische Anordnung. Kupfer enthält pro Kubikmillimeter etwa $85 \cdot 10^{18}$ Atome. Die Abstände kann man über die mittlere Größe von Atomen (etwa 10^{-10} Meter) errechnen.

2.4 Wie lautet das Trägheitsprinzip der klassischen Mechanik?

Ein bewegter Körper, der nicht beeinflusst wird, ändert seine Geschwindigkeit nicht. Das heißt, dass ein Körper, der eine gewisse Geschwindigkeit besitzt ohne Beeinflussung nie zum Stillstand kommt.

2.5 Worin äußert sich die Eigenschaft der „Masse“?

Durch Trägheit gegenüber Änderungen des Bewegungszustandes und durch Anziehung anderer Körper (Gravitation).

2.6 Wie heißt die Basiseinheit der Masse und wodurch ist sie festgelegt?

Die Basiseinheit der Masse ist 1kg (Kilogramm). Sie wird festgelegt durch einen Prototyp, der seit 1885 in Paris aufbewahrt wird.

2.7 Wie bestimmen Sie im Prinzip die Massendichte bei gleichförmiger und bei ungleichförmiger Massenverteilung?

Bei gleichförmiger Massenverteilung ist die Massendichte der Quotient aus Gesamtmasse zu Gesamtvolumen. Bei ungleichförmiger Verteilung kann man sich den Körper gedanklich in einzelne Teilkörper zerlegt denken und die Massendichte für jeden einzelnen Teilkörper berechnen.

2.8 Wie findet man bei bekannter, i.a. von Punkt zu Punkt in einem Körper veränderlicher Massendichte die Gesamtmasse des Körpers?

Indem man den Körper in Teilkörper zerlegt und die Teilmassen aufsummiert.

2.9 Was bedeutet die Einheit 1mol und wie hängt sie mit der Avogadro-Konstanten zusammen?

Die Einheit 1mol ist die (SI-)Einheit der Stoffmenge, sie ist die Menge von $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen. Die Avogadro-Konstante lautet $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

2.10 Warum müssen Sie bei der Angabe der Stoffmenge immer auch die Art der Substanz bzw. der Teilchen angeben?

Da es sich um Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen etc. handeln kann

3 Impuls und Kraft. Kraftfelder. Allgemeine Felder

3.1 Was verstehen Sie unter dem Impuls eines Körpers und wie hängt diese Größe mit der resultierenden Kraft auf den Körper zusammen? Welche Rolle spielt dabei der Begriff des Inertialsystems?

Der Impuls eines Körpers ist gleich der Masse mal der Geschwindigkeit des Körpers. Der Impuls ist eine vektorielle Größe, die in Geschwindigkeitsrichtung weist.

Die zeitliche Änderung des Impulses ist gleich der Kraft auf den Körper. Daraus ergibt sich nach Annahme einer während der Bewegung unveränderlichen Masse des Körpers die kinetische Grundgleichung „Masse mal Beschleunigung ist Kraft“, was jedoch nur richtig ist, wenn Beschleunigung und Kraft in einem Inertialsystem bestimmt werden.

3.2 Wie nennen wir die Einheit der Kraft und wie hängt diese mit den Einheiten der Zeit, Länge und Masse zusammen?

Die Einheit der Kraft wird „Newton“ (N) genannt. 1 N ist die Kraft, die einen Körper der Masse 1 kg die Beschleunigung 1 m/s^2 erteilt. $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$

3.3 Was müssen Sie bei der Anwendung der kinetischen Grundgleichung auf ausgedehnte Festkörper beachten?

Bei Körpern mit räumlicher Ausdehnung gilt die kinetische Grundgleichung ebenfalls: Die Gesamtkraft auf den Körper ist gleich der Masse des Gesamtkörpers mal der Beschleunigung des Massenmittelpunktes. Mit der Beschleunigung des Massenmittelpunktes ist aber die Bewegung des Körpers in der Regel noch nicht vollständig beschrieben, sodass weitere Gleichungen aufgestellt und weitere Größen (zum Beispiel Drehimpuls) eingeführt werden müssen.

3.4 Wie kommt man vom Gravitationsgesetz zum Begriff des Gravitationsfeldes?

Indem man einen Körper mit einer Masse im Raum festgehalten denkt und mit einem zweiten Testkörper mit einer Masse an jedem Ort die Gravitationskraft misst, ergibt sich der aus dem Gravitationsgesetz bekannte Ausdruck. Nachdem die Kraft proportional zur zweiten Masse ist, kann

man die Kraft auf dessen Masse beziehen und erhält damit eine massenbezogene Kraft an jedem Ort um den ersten Körper. Die Gesamtheit dieser Kräfte wird Gravitationsfeld (oder Schwerfeld) genannt.

3.5 Wie groß ist die elektrische Ladung eines Elektrons, eines Protons, eines Neutrons?

Elektron: negative Elementarladung $\sim -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Proton: positive Elementarladung $\sim 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Neutron: neutral, elektrisch nicht geladen

3.6 Was sagt das Coulomb-Gesetz aus? Geben Sie auch seine Voraussetzungen an.

Die Kraft zwischen 2 elektrisch geladenen Körpern ist proportional zu ihren Ladungen und indirekt proportional zum Quadrat ihres Abstandes. Die beiden Körper stoßen sich ab wenn sie gleichnamige Ladungen besitzen, sie ziehen sich an wenn sie ungleichnamige Ladungen besitzen.

Die Voraussetzung für das Coulomb-Gesetz ist, dass die Abmessungen der beiden Körper im Vergleich zu ihrem Abstand vernachlässigbar sind, dass der umgebende Raum leer ist und sich beide Körper in Bezug auf ein Inertialsystem in Ruhe befinden.

3.7 Wie kommt man vom Coulomb-Gesetz zum Begriff des elektrischen Feldes?

Analog zur Gravitation (Frage 3.4): Mit einer beweglichen Ladung wird die Kraft einer anderen Ladung auf diese Testladung an jedem Ort gemessen und auf die zweite Ladung bezogen. Diese ladungsbezogene Kraft ist dann das elektrische Feld an jedem Ort um die erste Ladung.

3.8 Welche Gemeinsamkeiten besitzen die Größen Masse und elektrische Ladung und wodurch unterscheiden sie sich?

Über beide Größen wird ein Kraftfeld erzeugt, das proportional zu dieser Größe ist (Masse \rightarrow Gravitationsfeld, elektrische Ladung \rightarrow elektrisches Feld). Der wichtigste Unterschied ist, dass die elektrische Ladung „polarisiert“ ist, es also positive und negative Ladungen gibt, was bei der Masse nicht der Fall ist.

3.9 Was versteht man unter physikalischen Feldern und wie werden sie mathematisch erfasst? Geben Sie Beispiele an für physikalische Felder mit Richtungscharakter und ohne Richtungscharakter.

Unter einem physikalischen Feld versteht man die Zuordnung einer Größe zu jedem beliebigen Punkt in einem Raum. Physikalische Felder werden mathematisch durch Vektorfelder (einfach gerichtete Größen), Skalarfelder (ungerichtete Größen) und Tensorfelder (mehrfach gerichtete Größen) dargestellt. Beispiele für physikalische Felder mit Richtungscharakter sind das Gravitationsfeld, das elektrische Feld, Geschwindigkeitsfelder und Strömungsfelder. Beispiel für ein physikalisches Feld ohne Richtungscharakter ist das Temperaturfeld.

3.10 Kann man Strömungen oder Flüssen immer eine lokale Geschwindigkeit zuordnen? Erläutern Sie den Sachverhalt anhand von Beispielen.

Grundsätzlich kann man Strömungen immer eine lokale Geschwindigkeit zuordnen. Dies ist jedoch nicht immer sinnvoll und zwar dann wenn sich die Strömung aus mehreren, einander überlagerten Teilströmen zusammensetzt und diese Details nicht interessieren oder weil die physikalische Begriffsbildung eine Zuordnung gar nicht zulässt. Beispiel für letzteres wäre ein Wärmestrom in einem Festkörper, der zwar mathematisch durch ein Vektorfeld der Wärmestromdichte beschrieben werden kann, ein zugehöriges Geschwindigkeitsfeld aber nicht ins Konzept passt. In diesem Fall spricht man dann statt Strömung von Fluss

4 Arbeit und Leistung, Energie, Wärme und Temperatur

4.1 Was bedeutet „Arbeit verrichten“, was „Leistung erbringen“ im physikalischen Sinn?

Physikalisch bedeutet „Arbeit verrichten“ Körper im Raum zu verschieben und in Verschiebungsrichtung Kraft aufzubringen. Physikalisch bedeutet „Leistung erbringen“ eine zeitbezogene Arbeit.

4.2 Wie berechnet man die Normalprojektion einer Kraft auf eine vorgegebene Richtung? Wie wird die Arbeit berechnet, die ein Kraftfeld bei Verschiebung eines Körpers entlang einer beliebigen Kurve verrichtet?

Die Normalprojektion einer Kraft auf eine vorgegebene Richtung berechnet man über ein Dreieck und die Winkelfunktionen Cosinus und Sinus. Dabei wird der Kraftvektor unter 90° mit der vorgegebenen Richtung geschnitten. Über das dabei entstehende Dreieck kann die Normalprojektion errechnet werden.

Die Arbeit entlang einer Kurve wird berechnet, indem die Kurve in (je nach Genauigkeit) beliebig viele Kurvenstücke zerlegt wird und jeweils mit der Normalkomponente der Kraft multipliziert wird. Die Summe über die komplette Kurve ist dann die resultierende Arbeit. Anstatt einer Aufsummierung kann auch ein Kurvenintegral über die Normalprojektionen gebildet werden.

4.3 Was versteht man unter einem „konservativen Kraftfeld“?

Unter einem konservativen Kraftfeld versteht man ein Kraftfeld, bei dem bei einem vollständigen Umlauf einer beliebigen Kurve innerhalb des Feldes die Arbeit in Summe gleich 0 wird.

4.4 Wie heißt die Einheit der Leistung und wie hängt sie mit anderen Einheiten zusammen? Was bedeutet 1 kWh?

Die Einheit der Leistung ist das Watt und entspricht 1 Joule pro Sekunde. 1 kWh ist die Einheit einer Arbeit/Energie und entspricht $3,6 \cdot 10^6$ Joule.

4.5 Was besagt das Prinzip der Erhaltung der Energie? Geben Sie ein Beispiel an. Welche Energieformen kennen Sie?

Das Prinzip der Erhaltung der Energie besagt, dass Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann. Es können nur verschiedene Energieformen (kinetische Energie, potentielle Energie, chemische Energie, etc.) ineinander umgewandelt werden.

Beispiel für das Prinzip der Energieerhaltung: Ein Körper liegt auf einer gewissen Höhe und fällt zu Boden. Hierbei wird die potentielle Energie des Körpers um die Höhendifferenz verringert und in kinetische Energie umgewandelt, welche den Körper zu Boden beschleunigt.

4.6 In welchen Einheiten werden Energieströme angegeben?

Joule pro Sekunden = Watt

4.7 Warum nimmt Wärme unter den Energieformen eine Sonderstellung ein?

Bei fast allen Energieumformungen tritt zusätzlich Wärme auf, meistens als „Verlust“. Außerdem kann Arbeit zwar in Wärme umgewandelt werden, Wärme aber nicht vollständig in Arbeit, was im zweiten Hauptsatz der Thermodynamik beschrieben ist.

4.8 Was beschreibt die physikalische Größe „Temperatur“?

Die Temperatur ist ein Intensitätsmaß für den Wärmezustand eines Körpers.

4.9 Wie ist die Einheit der thermodynamischen Temperatur erklärt? Wie hängen die thermodynamische Temperatur und die Celsius-Temperatur zusammen?

Die Einheit der thermodynamischen Temperatur (Kelvin) ist definiert als der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers.

Die Einheit Celsius ist gleich groß wie die Einheit Kelvin, ist jedoch um 273,15 Grad verschoben. Der absolute Nullpunkt liegt daher bei 0° Kelvin bzw. -273,15° Celsius.

4.10 Wie misst man die Temperatur von Körpern? Geben Sie Beispiele für dazu benutzte physikalische Effekte an.

Die Temperatur von Körpern wird über Thermometer gemessen, wobei dafür verschiedene physikalische Effekte wie zum Beispiel einer Volumsänderung, Änderung des elektrischen Widerstandes, thermoelektrischer Effekt usw. genutzt werden.

5 Schwingungen und Wellen. Licht

5.1 Was verstehen Sie unter eine Schwingung?

Unter einer Schwingung versteht man einen zeitlichen Vorgang, bei dem eine physikalische Größe zu- und abnimmt. Von einer periodischen Schwingung spricht man dann, wenn dieser Vorgang immer gleichartig abläuft.

5.2 Was bedeutet „Periodendauer“ und was „Frequenz“? Wie nennt man allgemein die Einheit der Frequenz und wie hängt sie mit der Basiseinheit der Zeit zusammen?

Unter der Periodendauer versteht man den Zeitabschnitt nach dem sich ein periodischer Vorgang wiederholt. Die Frequenz ist der Kehrwert der Periodendauer.

Die Einheit der Frequenz ist 1 Hz (Hertz), sie wird als der Kehrwert von 1 s (Sekunde) definiert:

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$$

5.3 Was ist eine harmonische Schwingung und wie kann man sie mathematisch darstellen? Was gibt die Amplitude einer harmonischen Schwingung an?

Eine harmonische Schwingung ist eine sinusförmige Schwingung. Sie hat die Form $u = \hat{u} \cdot \sin(\omega \cdot t)$, wobei \hat{u} die Amplitude der Schwingung angibt.

5.4 Wie hängt die Kreisfrequenz mit der Periodendauer und mit der Frequenz zusammen?

ω ... Kreisfrequenz

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi / T$$

5.5 Was verstehen Sie unter einer Welle? Geben Sie Beispiele an.

Eine Welle ist jedes beliebige Signal, das von einem Teil des Raumes zu einem anderen mit einer erkennbaren Geschwindigkeit übertragen wird. Das Signal kann dabei irgendein Merkmal einer

physikalischen Größe sein. Beispiele für Wellen sind Schallwellen, Wasserwellen und elektromagnetische Wellen. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Kompressionswellen (Longitudinalwellen), bei denen die Teilchen in Richtung der Wellenausbreitung schwingen und Scherwellen (Transversalwellen) bei der die Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen.

5.6 Wie groß ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im leeren Raum? Wie groß ist etwa die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in Luft und Wasser?

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im leeren Raum liegt bei etwa $3 \cdot 10^8$ m/s. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in Luft liegt bei etwa 340 m/s, in Wasser bei etwa 1460 m/s.

5.7 Was ist eine harmonische Welle und wie kann man sie mathematisch darstellen?

Eine harmonische Welle ist eine sinusförmige Welle. Sie hat die Form $u = \hat{u} \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t)$.

5.8 Was bedeutet „Wellenlänge“ und „Kreiswellenzahl“ und wie hängen diese beiden Größen zusammen? Durch welche Beziehung sind die Ausbreitungsgeschwindigkeit, die Wellenlänge und die Frequenz einer Welle im einfachsten Fall miteinander verknüpft?

In obiger Gleichung beschreibt $\omega (=2 \cdot \pi / T)$ die Wellenlänge und $k (=2 \cdot \pi / \lambda)$ die Kreiswellenzahl der Welle. Diese beiden Ausdrücke sind mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c verknüpft:

$$c = \omega / k = \lambda / T$$

5.9 Wie groß ist etwa die Wellenlänge und die Frequenz von sichtbarem Licht?

Die Wellenlänge von sichtbarem Licht erstreckt sich von etwa 380nm bis 780nm. Die entsprechenden Frequenzen können über obige Gleichungen errechnet werden. ($f = c/\lambda$)

5.10 Die Candela ist die Basiseinheit für welche physikalische Größe?

Candela ist die Einheit für die Lichtstärke einer Strahlungsquelle.

6 Elektrische Ladungen. Ströme und Spannungen

6.1 *Wie groß sind die elektrischen Ladungen eines Protons und eines Elektrons?*

Elektron: negative Elementarladung $\sim -1,6 \cdot 10^{-19}$ C

Proton: positive Elementarladung $\sim 1,6 \cdot 10^{-19}$ C

6.2 *Welche Erfahrung wird ausgedrückt, wenn wir sagen, die elektrische Ladung ist eine Erhaltungsgröße?*

Es kann elektrische Ladung einer Polarität weder erzeugt noch vernichtet werden. Man kann zwar genau entgegengesetzt gleich große Ladungen hervorbringen oder ausgleichen, aber insgesamt nie einen Überschuss produzieren.

6.3 *Was sind Ionen?*

Atome sind grundsätzlich elektrisch neutral. Es kann jedoch vorkommen, dass Atome Elektronen verlieren bzw. dass sich zusätzliche Elektronen anlagern, wodurch das Atom in Summe geladen ist. Man spricht dann von einem Ion.

6.4 *Wie stellen Sie sich das „Elektronengas“ in einem metallischen Leiter vor?*

In Metallatomen sind bei der Kristallgitterbildung ein Teil der Elektronen nur mehr sehr schwach an den Kern gebunden, sodass sie sich im Gitter mehr oder weniger frei bewegen können. Man kann sich dann ein Gitter vorstellen, das mit mehr oder weniger frei beweglichen Elektronen durchsetzt wird. Diese Elektronen werden als Elektronengas bezeichnet.

6.5 *Was versteht man unter der „mittleren Ladungsdichte“?*

Unter mittlerer Ladungsdichte versteht man die volumsbezogene Ladung wenn die Ladung in diesem Volumen nicht gleichmäßig verteilt ist.

6.6 Wie kann man eine ungleichförmige Ladungsverteilung in einem Körper beschreiben?

Durch Zerteilung des Volumens in Einzelteile mit gleicher Ladungsdichte.

6.7 Wie sind Überschussladungen in einem Metallkörper angeordnet?

Überschussladungen sind (im Gleichgewichtszustand) bei Metallen in einer dünnen Schicht an der Leiteroberfläche verteilt angeordnet.

6.8 Was versteht man unter „Flächenladungsdichte“?

Unter der Flächenladungsdichte versteht man die flächenbezogene Ladung. Sie wird zur Beschreibung von einer an der Oberfläche konzentrierten Überschussladung (wie bei Metallen) verwendet.

6.9 Was ist ein elektrischer Strom? Wodurch wird die elektrische Leitfähigkeit im Wesentlichen bestimmt? Was versteht man unter einem Isolator?

Unter dem elektrischen Strom versteht man den Transport von Ladungsträgern. Die elektrische Leitfähigkeit wird im Wesentlichen bestimmt durch die Anzahl von vorhandenen freien Ladungsträgern. Unter Isolatoren versteht man Körper, die elektrischen Strom nicht leiten, sie haben keine freie Ladungsträger.

6.10 Was bedeutet „elektrischer Kontakt“?

Werden 2 Leiter miteinander in Berührung gebracht, so können von einem Körper zum anderen Ladungsträger (insbesondere Elektronen) übertreten. Die Körper befinden sich in elektrischem Kontakt.

6.11 Wie ist die elektrische Stromstärke erklärt?

Unter der elektrischen Stromstärke versteht man die momentane Transportrate und die Richtung des Transports von Ladungsträgern.

6.12 Was verstehen Sie unter der „Richtung“ des elektrischen Stromes? Was bedeutet „Bezugssinn“ und was „Richtungssinn“ des elektrischen Stromes?

Die Richtung des elektrischen Stromes ist Sache der Konvention. Ein positiver Strom bedeutet eine Ladungsverschiebung von positiven Ladungen in positiver Richtung, was einem Verschieben negativer Ladung in negativer Richtung völlig gleichwertig ist. Der Bezugssinn ist die angenommene Richtung, während der Richtungssinn die tatsächliche Verschiebungsrichtung der positiven Ladungsträger bezeichnet. In der Wahl des Bezugssinnes ist man komplett frei. Ergibt sich ein positives Vorzeichen für I , dann stimmt der Bezugssinn mit dem Richtungssinn des elektrischen Stromes überein.

6.13 Was verstehen Sie unter Gleichstrom und was unter Wechselstrom?

Von Gleichstrom spricht man dann wenn sich die Stromstärke mit der Zeit nicht ändert. Liegt ein periodischer Zeitverlauf mit Mittelwert Null vor, so spricht man von Wechselstrom.

6.14 Wie groß ist etwa die Driftgeschwindigkeit der Elektronen, wenn in einem Kupferdraht ein elektrischer Strom fließt?

Abschätzung Seite 60: Größenordnung etwa 0,1 mm/s

6.15 Warum können wir bei einem elektrischen Strom in Metallen den begleitenden Massentransport i.a. vernachlässigen? Warum kann der Massentransport bei Ionenleitung eine Rolle spielen?

Der Massentransport kann vernachlässigt werden, da die Masse der Elektronen sehr klein ist. Bei Ionenleitung kann der Massentransport aber eine Rolle spielen, da Ionen im Allgemeinen eine um viele Potenzen höhere Masse besitzen.

6.16 Was sind die wesentlichen Effekte elektrischer Ströme? Geben Sie jeweils Beispiele für ihre technische Nutzung an.

Chemische Wirkung: Elektrolyse, Galvanotechnik, Batterien, Akkumulatoren

Wärmeentwicklung: Lichterzeugung in Glühlampen, Wärmeerzeugung in Heiz- und Kochgeräten, Elektrowärmetechnik

Magnetische Erscheinungen: Elektrische Maschinen und Geräte, elektromechanische Energieumsetzung

6.17 Wie heißt die Basiseinheit der elektrischen Stromstärke und wie ist sie definiert? Welchen Wert besitzt die magnetische Feldkonstante?

1 Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen Stromes, der, durch zwei im Vakuum parallel im Abstand 1 Meter voneinander angeordnete geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigen Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge elektrodynamisch die Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N hervorrufen würde.

Magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ N/A²

6.18 Was verstehen Sie unter dem Begriff „elektrische Spannung“? Auf welche Weise lässt sich die elektrische Spannung als Kurvensumme darstellen?

Die einer orientierten Kurve momentan zugeordnete elektrische Spannung ist die Kurvensumme der elektrischen Feldstärke entlang dieser Kurve. Ihr Wert ist gleich der ladungsbezogenen Arbeit, die von den elektrischen Kräften beim Verschieben einer Testladung entlang der Kurve verrichtet wird.

6.19 Unter welchen Bedingungen kann man von der elektrischen Spannung zwischen zwei Punkten sprechen?

Wenn die Spannung für alle Kurven zwischen 2 Punkten denselben Wert ergibt, spricht man von der elektrischen Spannung zwischen diesen beiden Punkten.

6.20 Was bedeuten „Bezugssinn“ und „Richtungssinn“ im Zusammenhang mit der elektrischen Spannung?

Eine elektrische Spannung zwischen 2 Punkten wird immer mit einem Pfeil gekennzeichnet. Er gibt den Startpunkt der Kurve entlang der die Spannung berechnet wurde zum Endpunkt an. Diese Richtung nennt man Bezugssinn, er ist grundsätzlich frei wählbar. Der Richtungssinn gibt dagegen die physikalische Richtung der Spannung an. Ergibt sich bei der Berechnung eine positive Spannung, so stimmt der Bezugssinn mit dem Richtungssinn überein.

6.21 Wie nennt man die Einheit der elektrischen Spannung und wie ist sie erklärt?

$$1 \text{ V (Volt)} = 1 \text{ m}^2\text{kg/s}^3\text{A}$$

6.22 Wie werden Teilspannungen entlang einer Kurve zur Gesamtspannung zusammengesetzt? Welche Rolle spielt dabei der Bezugssinn?

Teilspannungen entlang einer Kurve können durch Summation zur Gesamtspannung zusammengesetzt werden. Wichtig ist dabei, dass für die Teilspannungen derselbe Bezugssinn gilt wie für die Gesamtspannung, ansonsten muss die betreffende Teilspannung mit einem negativen Vorzeichen belegt werden.

6.23 Was verstehen Sie unter Gleichspannung und was unter Wechselfpannung?

Von Gleichspannung spricht man wenn sich der momentane Spannungswert mit der Zeit nicht ändert. Liegt ein periodischer Zeitverlauf mit Mittelwert 0 vor, spricht man von Wechselfpannung.

6.24 Was ist eine Spannungsquelle und was bewirkt sie? Geben Sie Beispiele an.

Spannungsquellen sind Geräte, die an ihren Anschlüssen eine elektrische Spannung zur Verfügung stellen. Schließt man ein zu versorgendes Gerät an, so fließt elektrischer Strom. Eine kontinuierliche Ladungstrennung innerhalb der Spannungsquelle sorgt für die Aufrechterhaltung von Spannung und Strom.

Beispiele dafür sind elektrochemische Spannungsquellen (Batterien, Akkumulatoren), elektrische Umformgeräte (Netzgeräte, Frequenzumrichter) und elektromechanische Spannungserzeuger.

6.25 Wie nennt man Geräte zur Messung der elektrischen Spannung und zur Messung der elektrischen Stromstärke? Welche Bedingungen müssen diese Geräte erfüllen, damit die Zustände im zu messenden Stromkreis möglichst wenig gestört werden?

Voltmeter zur Spannungsmessung, Amperemeter zur Messung der Stromstärke.
Um das Untersuchungsobjekt möglichst wenig zu stören, soll der Strom durch ein Spannungsmessgerät und die Spannung an einem Strommessgerät möglichst gering sein.

6.26 Wie bestimmen Sie bei bekannten Werten von Strom und Spannung die Momentanleistung? Wie ist ihr Zusammenhang mit der umgesetzten Energiemenge?

Momentanleistung $P = U \cdot I$

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

6.27 Welche Rolle spielen bei der Berechnung der Leistung die Bezugssinne und Richtungssinne von Strom und Spannung?

Ergibt die obige Gleichung für P einen negativen Wert, so stimmt der Richtungssinn in diesem Augenblick nicht mit dem Richtungssinn für Strom und Spannung überein.

6.28 Was verstehen Sie unter einer Spannungs-Strom-Kennlinie?

Ein Diagramm, in dem auf der x-Achse die Spannung und auf der y-Achse der zugehörige Stromwert eines Verbrauchers aufgetragen wird.

6.29 Wie lautet das Ohmsche Gesetz im engeren und weiteren Sinn? Welche Rolle spielen die Bezugssinne von Strom und Spannung bei der Formulierung des Ohmschen Gesetzes?

$U = R \cdot I$ (Ohmsches Gesetz im engeren Sinn)

Im weiteren Sinn nennt man jede Gleichung mit Spannung und Strom auch „Ohmsches Gesetz“, nur hängt dann R im allgemein von U oder I ab.

Obige Gleichung stimmt genau genommen nur dann, wenn der Bezugssinn von Strom und Spannung gleichsinnig sind, ansonsten muss auf einer Seite der Gleichung noch ein negatives Vorzeichen vorgesehen werden.



Abb. 6.11 Schaltzeichen für elektrische Widerstände, Bezugssinne und Ohmsches Gesetz

6.30 Wie heißt die Einheit des elektrischen Widerstandes und wie ist sie erklärt?

1Ω (Ohm) = 1 V/A

7 Physikalische Größen, Einheiten und Dimensionen

7.1 Was verstehen Sie allgemein unter einer physikalischen Größe und wodurch unterscheiden sich physikalische Größen von gewöhnlichen Zahlen?

Eine physikalische Größe ist das Produkt aus einer Zahl und einer Einheit. Es gilt also

$$\text{Größenwert} = \text{Zahlenwert} \cdot \text{Einheit}$$

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

$$\text{Bsp.: } I = 5 \text{ A}$$

$$m = 3 \text{ kg}$$

Aufgrund der algebraischen Struktur der physikalischen Größen bildet jede Größenart für sich einen Modul über dem Körper der reellen oder komplexen Zahlen, also einen linearen Raum. Diese Struktur unterscheidet sie von den gewöhnlichen Zahlen.

7.2 Wie werden physikalische Größen dargestellt?

$$\text{Größenwert} = \text{Zahlenwert} \cdot \text{Einheit}$$

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

$$\text{Bsp.: } U = 12 \text{ V}$$

7.3 Was verstehen Sie unter der „Einheit“ einer physikalischen Größe? Auf welche Weise werden Basiseinheiten zu abgeleiteten Einheiten kombiniert?

Es handelt sich dabei um einen speziellen Größenwert derselben Art wie die jeweils darzustellende Größe. Jeder Größenwert ist einer Einheit zugeordnet, z.B. der Länge das Meter (1m), der Maße das Kilogramm (1kg) usw.

Die abgeleiteten Einheiten sind mit den Basiseinheiten und untereinander über Potenzprodukte verknüpft, in denen ausschließlich der Zahlenfaktor 1 vorkommt (kohärentes Einheitensystem).

Bsp.: Druck in Pascal

$$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$$

Potenzprodukt: $[G] = (1\text{m})^a(1\text{kg})^b(1\text{s})^c(1\text{A})^d(1\text{K})^e(1\text{mol})^f(1\text{cd})^g$

7.4 Was versteht man unter einer Einheitentransformation und wie ändert sich dabei der Zahlenwert eines Größenwertes? Worauf beruht diese Umrechnung?

Bei der Umrechnung von nicht mehr gebräuchlichen oder bei uns nicht üblichen Einheiten (z.B. $1\text{cal} = 4,19\text{ J}$ oder $1\text{in} = 25,4\text{mm}$) braucht man die Einheitentransformation.

$$[G]_{\text{alt}} = a[G]_{\text{neu}} \quad a \dots \text{Umrechnungsfaktor}$$

$$G = \{G\}_{\text{alt}}[G]_{\text{alt}} = a\{G\}_{\text{alt}}[G]_{\text{neu}} = \{G\}_{\text{neu}}[G]_{\text{neu}}$$

Mit der Einheit ändert sich der Zahlenwert der Größe gemäß

$$\{G\}_{\text{neu}} = a\{G\}_{\text{alt}}$$

also umgekehrt proportional zur Einheit.

$$\text{Bsp.: } W = 1\text{cal} = 4,19 \cdot 1\text{J} = 4,19\text{J}$$

Die Umrechnung beruht darauf, dass für den Größenwert selbst, der ja einen physikalischen Sachverhalt darstellt, die Einheitenwahl belanglos ist, d.h. ein Größenwert ist invariant gegenüber einer Einheitentransformation. $W = 1\text{cal}$ *gleichwertig* $W = 4,19\text{J}$

7.5 Was verstehen Sie unter einem kohärenten Einheitensystem?

In Bezug auf die SI-Einheiten bedeutet es, dass 7 unabhängige Basiseinheiten (m, kg, s, A, K, mol, cd) eingeführt wurden, mit welchen die Einheiten aller anderen Größenarten durch Potenzprodukte mit Zahlenfaktor 1 darstellbar sind. Die Gesamtheit aller auf diese Weise abgeleiteten Einheit zusammen

mit den Basisgrößen nennt man ein kohärentes Einheitensystem und spricht von kohärenten Einheiten.

7.6 Was ist der Unterschied zwischen „Dimension“ und „Einheit“ einer physikalischen Größe?

Unter der **Dimension** einer physikalischen Größe versteht man ihre Einheit ausgedrückt in Basisgrößen. Z.B. ist die Geschwindigkeit v ausgedrückt in Basisgrößen die Länge L durch die Zeit T .

$$\langle v \rangle = L \cdot T^{-1} \quad \langle \rangle \dots \text{spitze Klammern}$$

D.h. durch die Dimension wird eine physikalische Größe charakterisiert.

$$\text{Dimensionsprodukt: } \langle G \rangle = L^a M^b T^c I^d \Theta^e N^f J^g$$

Basisdimensionen: Länge, Masse, Zeit, elektrische Stromstärke, Temperatur, Stoffmenge und Lichtstärke

Die **Einheit** zu jeder physikalischen Größe wurde definiert (messen usw.) und ergibt zusammen mit dem Zahlenwert die physikalische Größe.

7.7 Welche Einheiten sind SI-Basiseinheiten und wie sind sie definiert? Welche abgeleiteten SI-Einheiten mit besonderem Namen und besonderem Zeichen kennen Sie?

Tabelle 1 SI-Basiseinheiten

Basisgrößen	SI-Basiseinheiten	
	Name	Zeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Elektrische Stromstärke	Ampere	A
Thermodynamische Temperatur	Kelvin	K

Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

Tabelle 2 Abgeleitete SI-Einheiten mit besonderen Namen (kohärente Einheiten)

Größe	SI-Einheit		Beziehung
	Name	Zeichen	
Ebener Winkel	Radian	rad	$1 \text{ rad} = 1 \text{ m/m}$
Raumwinkel	Steradian	sr	$1 \text{ sr} = 1 \text{ m}^2/\text{m}^2$
Frequenz	Hertz	Hz	$1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$
<i>Aktivität</i>	<i>Becquerel</i>	<i>Bq</i>	$1 \text{ Bq} = 1/\text{s}$
Kraft	Newton	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kgm/s}^2$
Druck, mech. Spannung	Pascal	Pa	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$
Arbeit, Energiemenge	Joule	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$
Leistung, Energiestrom	Watt	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$
<i>Energiedosis</i>	<i>Gray</i>	<i>Gy</i>	$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$
Elektrische Ladungsmenge	Coulomb	C	$1 \text{ C} = 1 \text{ As}$
Elektrische Spannung	Volt	V	$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$
Elektrische Kapazität	Farad	F	$1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$
Elektrischer Widerstand	Ohm	Ω	$1 \Omega = 1 \text{ V/A}$
Elektrischer Leitwert	Siemens	S	$1 \text{ S} = 1/\Omega = \text{A/V}$
Magnetischer Fluss	Weber	Wb	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs}$

Magnetische Flussdichte	Tesla	T	$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2 = 1 \text{ Vs/m}^2$
Induktivität	Henry	H	$1 \text{ H} = 1 \text{ Wb/A} = 1 \text{ Vs/A}$
Celsius-Temperatur	Grad Celsius	°C	$1 \text{ }^\circ\text{C} = 1 \text{ K}$
<i>Lichtstrom</i>	<i>Lumen</i>	<i>lm</i>	$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd sr}$
<i>Beleuchtungsstärke</i>	<i>Lux</i>	<i>lx</i>	$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$
Äquivalentdosis	Sievert	Sv	$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$

7.8 Wie heiße die international festgelegten Vorsätze, welche Zeichen werden dafür verwendet und welche Zahlenfaktoren kürzen sie ab? In welchem Sinn nimmt das Kilogramm bezüglich der Vorsatzzeichen eine Sonderstellung ein?

Tabelle 3 International festgelegte Vorsatzzeichen

Faktor	Vorsatz	
	Name	Zeichen
10^{-24}	Yocto	y
10^{-21}	Zepto	z
10^{-18}	Atto	a
10^{-15}	Femto	f
10^{-12}	Piko	p
10^{-9}	Nano	n
10^{-6}	Mikro	μ
10^{-3}	Milli	m
10^{-2}	Zenti	c
10^{-1}	Dezi	d

10^1	Deka	da
10^2	Hekto	h
10^3	Kilo	k
10^6	Mega	M
10^9	Giga	G
10^{12}	Tera	T
10^{15}	Peta	P
10^{18}	Exa	E
10^{21}	Zetta	Z
10^{24}	Yotta	Y

Kilogramm ist aus historischen Gründen bereits mit einem passenden Vorsatz ausgestattet. kilo = 1000; kg = 1000g

7.9 Warum sind Einheiten, die aus kohärenten SI-Einheiten mit Vorsätzen gebildet werden keine kohärenten Einheiten des SI?

Weil die abgeleiteten Einheiten mit den Basiseinheiten und untereinander über Potenzprodukte verknüpft sind, in denen ausschließlich der Zahlenfaktor 1 vorkommt (kohärentes Einheitensystem).
Sonst keine Umrechnung möglich.

Bsp.: $1\text{kN} \neq (1\text{m})^1(1\text{kg})^1(1\text{s})^{-2}$ oder $1\text{kN} \neq (1\text{m})^1(1\text{kg})^1(1\text{ks})^{-2}$

7.10 Welche gebräuchlichen Einheiten außerhalb des SI kennen Sie?

Tabelle 4 Gebräuchliche Einheiten außerhalb des SI (nichtkohärente Einheiten)

Größe	Einheit	Beziehung
-------	---------	-----------

	Name	Zeichen	
Ebener Winkel	Grad	°	$1^\circ = (\pi/180)\text{rad}$
	Minute	'	$1' = (1/60)^\circ$
	Sekunde	''	$1'' = (1/60)'$
Fläche	Ar	a	$1 \text{ a} = 10^2\text{m}^2$
	Hektar	ha	$1 \text{ ha} = 10^4\text{m}^2$
Volumen	Liter	l	$1 \text{ l} = 1 \text{ dm}^3$
Zeit	Minute	min	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$
	Stunde	h	$1 \text{ h} = 60 \text{ min}$
	Tag	d	$1 \text{ d} = 24 \text{ h}$
	Gemeinjahr	a	$1 \text{ a} = 8760 \text{ h}$
Masse	Tonne	t	$1 \text{ t} = 10^3\text{kg}$
	atomare Masseneinheit	u	$1 \text{ u} \approx 1,661 \cdot 10^{-27}\text{kg}$
Druck	Bar	bar	$1 \text{ bar} = 10^5\text{Pa}$
Energie	Elektronvolt	eV	$1 \text{ eV} \approx 1,602 \cdot 10^{-19}\text{J}$

7.11 Welche Werte besitzen die folgenden physikalischen Konstanten (auf jeweils drei Stellen gerundet): Vakuumlichtgeschwindigkeit, Elementarladung.....

Tabelle 5 Einige physikalische Konstanten. Die Unsicherheit bezieht sich jeweils auf die beiden letzten angegebenen Stellen.

Name	Wert	Unsicherheit
Lichtgeschwindigkeit im leeren Raum	$c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ $\approx (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})$	± 0

Elementarladung	$e = 1,602\ 189\ 2 \cdot 10^{-19}\ \text{As}$	± 46
<i>Ruhemasse des Elektrons</i>	$m_e = 9,109\ 534 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}$	± 47
<i>Ruhemasse des Protons</i>	$m_p = 1,672\ 648\ 5 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$	± 86
Magnetische Feldkonstante	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \text{Vs}/(\text{Am})$	± 0
Elektrische Feldkonstante	$\epsilon_0 = (\mu_0 c_0^2)^{-1} =$ $= 8,854\ 188 \cdot 10^{-12}\ \text{As/Vm}$	± 0
Avogadro-Konstante	$N_A = 6,022\ 135\ 8 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$	± 41
<i>Boltzmann-Konstante</i>	$k = 1,380\ 662 \cdot 10^{-23}\ \text{Js}$	± 44
<i>Planck-Konstante</i>	$h = 6,626\ 176 \cdot 10^{-34}\ \text{Js}$	± 36
<i>Magnetisches Moment des Elektrons</i>	$\mu_e = 9,284\ 832 \cdot 10^{-24}\ \text{Am}^2$	± 36
Nullpunkt Grad Celsius	$0\ ^\circ\text{C} = 273,15\ \text{K}$	± 0
Tripelpunkt des Wassers	$0,01\ ^\circ\text{C} = 273,16\ \text{K}$	± 0
Absoluter Nullpunkt	$0\ \text{K} = -273,15\ ^\circ\text{C}$	± 0

7.12 Was müssen Sie beim Ausführen von Operationen mit additivem Charakter bezüglich physikalischer Größen beachten?

Dass sie nur innerhalb der gleichen Größengattung gelten.

Bsp.: $m + s$ nicht möglich; $m + m$ oder $s + s$ möglich

7.13 Was versteht man unter einer Größengleichung? Welchen Vorteil bietet die konsequente Verwendung kohärenter Einheiten?

Alle Gleichungen einer physikalischen Theorie sind Größengleichungen. Die Größen erscheinen darin als Konstanten oder Variablen und werden durch Größensymbole (Formelzeichen) repräsentiert.

Wichtig ist, dass die Größengleichungen unabhängig von den gewählten Einheiten gelten. Wenn einer

Konstanten oder Variablen ein bestimmter Wert zugeteilt wird, dann ersetzt man das entsprechende Formelzeichen durch eine Größendarstellung, also als Produkt von Zahlenwert und Einheit.

Man erspart sich das Mitschleppen der Einheiten, wenn man konsequent die kohärenten SI-Einheiten verwendet. Geringere Sicherheit beim Rechnen!!!

7.14 Warum muss der Definitionsbereich von Funktionen wie $\sin()$, $\ln()$, usw. immer aus Größen der Dimension 1_D bestehen? Welche Dimension ist den Größen des Wertebereichs dieser Funktionen zugeordnet?

Definitions- und Wertebereich müssen von der Dimension 1 sein, da es mathematisch so definiert ist (Taylor Reihe!).

7.15 Wozu dienen Zahlenwertgleichungen und was ist bei ihrer Verwendung zu beachten?

Wenn man eine Formel in einem speziellen Fall immer auf die gleiche Weise auswerten muss, ist es bequem sich eine Beziehung zwischen den Zahlenwerten allein zurechtzulegen.

Nur in speziellen Fällen verwenden und immer die gewählte Einheit als Index angeben!

8 Stromkreise und einfache Stromkreiselemente

8.1 *Wie lässt sich der Satz von der Erhaltung der elektrischen Ladung allgemein formulieren?*

Die elektrische Ladung ist eine Erhaltungsgröße. Das heißt, es kann nie Ladung zerstört oder erzeugt werden, es können sich lediglich (gleich große) positive und negative Ladungen gegenseitig ausgleichen oder trennen.

8.2 *Was verstehen Sie unter konzentrierten Stromkreiselementen? Geben Sie Beispiele an.*

Unter konzentrierten Stromkreiselementen versteht man Elemente eines Stromkreises, bei denen man ihr elektrisches Verhalten durch den durch sie fließenden Strom und an sie anliegende Spannung vollständig beschreiben kann. Beispiele sind ohmsche Widerstände, Dioden, Kondensatoren, Spulen, Transistoren, etc.

8.3 *Was ist eine elektrische Schaltung?*

Unter einer elektrischen Schaltung versteht man eine Verknüpfung von Stromkreiselementen.

8.4 *Was bedeutet der Begriff „Knoten“ in einer elektrischen Schaltung?*

Unter einem Knoten versteht man eine elektrisch leitende Verbindung zwischen mehreren Anschlüssen oder Strombahnen.

8.5 *Wie lautet die erste Kirchhoff-Regel? Unter welchen Voraussetzungen gilt sie?*

1. Kirchhoff-Regel: „In jedem Knoten einer elektrischen Schaltung ist zu jedem Zeitpunkt die Summe der abfließend gezählten Ströme gleich der Summe der zufließend gezählten Ströme.“

Sie gilt unter der Voraussetzung, dass in den Knoten keine positiven oder negativen Überschussladungen vorhanden sind.

8.6 Wozu dienen Ersatzschaltungen?

Zur Vereinfachung von komplizierten Stromkreiselementen können diese auch durch eine Kombination von einfachen (möglichst idealen) Elementen dargestellt werden. Diese Darstellung wird „Ersatzschaltung“ genannt.

8.7 Mit welchem Argument lässt sich die 1. Kirchhoff-Regel auf Schaltungsteile und auf ganze Schaltungen verallgemeinern und wie lautet diese Verallgemeinerung?

Definitionsgemäß gibt es in keinem konzentrierten Stromkreiselement insgesamt Überschussladungen. Dadurch gelten die Voraussetzungen der ersten Kirchhoff-Regel auch für konzentrierte Stromkreiselemente, ganze Schaltungen und Schaltungsteile.

Erweiterung der ersten Kirchhoff-Regel: „An jedem konzentrierten Stromkreiselement und für jede Zusammenschaltung solcher Elemente ist zu jedem Zeitpunkt die Summe der abfließend gezählten Ströme gleich der Summe der zufließend gezählten Ströme.“

8.8 Welche Rolle spielen die angenommenen Bezugssinne bei der Anwendung der 1. Kirchhoff-Regel?

Die angenommenen Bezugssinne haben Auswirkung auf das Vorzeichen (positiv oder negativ) der Ströme. Stimmt der Bezugssinn und der Richtungssinn eines Stromes überein, dann hat der Strom eine positive Stromstärke, ansonsten eine negative.

8.9 Warum ergeben sich bei der Anwendung der 1. Kirchhoff-Regel unter Umständen voneinander abhängige Gleichungen?

Da Ströme von Knoten sich wieder aufteilen können, und sie somit von den Beziehungen von den vorhergehenden Knoten abhängig sind.

8.10 Welche Beziehung liefert die 1. Kirchhoff-Regel bei der Analyse von Schaltungen?

Die Beziehung zwischen den Strömen in der Schaltung.

8.11 Wie wird die elektrische Spannung zwischen 2 Anschlüssen eines konzentrierten Stromkreiselements definiert? Unter welcher Voraussetzung ist dies sinnvoll?

Die Anschlussspannung eines konzentrierten Stromkreiselements ist die Spannung, die einer orientierten, außerhalb (!) des Elementes verlaufenden (gedachten) Verbindungslinie zwischen 2 Anschlusspunkten/Polen zugeordnet ist.

Diese Festlegung ist sinnvoll, wenn die Spannung nicht davon abhängt wie diese Verbindungslinie verläuft und wie lang sie ist. Dies wird jedoch als eine bestimmende Eigenschaft konzentrierter Stromkreiselemente angenommen.

8.12 Was bedeutet der Begriff „Masche“ in einer elektrischen Schaltung?

Eine einheitlich orientierte, geschlossene Kurve, die zwei oder mehrere Anschlusspunkte miteinander verbindet.

8.13 Wie lautet die zweite Kirchhoff-Regel? Unter welchen Voraussetzungen gilt sie?

2. 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.“

Sie gilt unter der Voraussetzung, dass das elektrische Feld außerhalb der Stromkreiselemente konservativ ist, weil dann entlang der Kurve keine Arbeit verloren geht (Summe der bei der Verschiebung einer Testladung an den Feldlinien verrichtete Arbeit gleich Null). Aus der Beziehung von Spannung = Arbeit/Ladung ergibt damit auch die Summe der Spannungen entlang der Kurve gleich Null.

8.14 Welche Rolle spielen die angenommenen Bezugssinne bei der Anwendung der 2. Kirchhoff-Regel?

Die gewählten Bezugssinne haben Auswirkung auf das Vorzeichen der berechneten Spannungen. Stimmt der Bezugssinn und der Richtungssinn einer Spannung überein, dann ist die Spannung positiv, ansonsten negativ.

8.15 Warum ergeben sich bei der Anwendung der 2. Kirchhoff-Regel unter Umständen voneinander abhängige Gleichungen?

8.16 Welche Beziehungen liefert die 2. Kirchhoff-Regel bei der Analyse von Schaltungen?

Die Beziehungen zwischen den Spannungen in einer Schaltung.

8.17 Warum reichen die beiden Kirchhoff-Regeln allein zur vollständigen Analyse von Schaltungen im allgemeinen nicht aus?

Weil die Kirchhoff-Regeln nur die Beziehungen zwischen den Strömen und den Spannungen einer Schaltung untereinander (!) liefern, nicht jedoch die Beziehung von Spannungen und Strömen zueinander. Für diese Beziehungen werden Bauteilgleichungen der Stromkreiselemente benötigt.

8.18 Was verstehen Sie unter einem elektrischen Widerstand als einem idealen Stromkreiselement?

Darunter versteht man ein konzentriertes Stromkreiselement, bei dem die Spannung an den Anschlüssen und der Strom durch das Element proportional sind.

8.19 Wie lautet die beschreibende Gleichung (Elementgleichung) für ideale Widerstände? Was müssen Sie bei der Angabe hinsichtlich der Bezugssinne beachten?

$U = R \cdot I$ (Ohmsches Gesetz)

Zu beachten ist, dass dies nur gilt wenn Spannung und Strom gleich orientiert sind, ansonsten ist das Vorzeichen umzudrehen:

$$(U = -R \cdot I)$$

8.20 Wie ist der elektrische Leitwert erklärt und welche Einheit besitzt er im Internationalen Einheitensystem?

Der elektrische Leitwert ist der Kehrwert des elektrischen Widerstandes.

$$1 \text{ S (iemens)} = 1/\text{Ohm} = 1 \text{ A/V} = 1 \text{ A/(J/C)} = 1 \text{ A}/((\text{kgm}^2/\text{s}^2)/(\text{As})) = 1 \text{ A}/(\text{kgm}^2/\text{As}^3)$$

$$1 \text{ S} = 1 \text{ A}^2\text{s}^3/\text{kgm}^2$$

8.21 Was verstehen Sie unter dem Begriff Joule-Verluste? Wie berechnen Sie die Joule-Verluste elektrischer Widerstände?

Der Joule-Verlust (=Joule-Wärme) ist die an einem Widerstand umgesetzte Wärme beim Durchfluss eines elektrischen Stromes.

$$W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = U^2/R \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t$$

8.22 Wodurch sind ideale Spannungsquellen gekennzeichnet? Was unterscheidet reale von idealen Spannungsquellen? Geben Sie U-I-Kennlinien an!

Eine ideale Spannungsquelle liefert eine Spannung, die unabhängig vom durchfließenden (in der Regel „entstehenden“) Strom ist. Bei einer realen Spannungsquelle sinkt die Spannung bei steigendem Strom. Eine reale Spannungsquelle wird in der Regel durch ein Ersatzschaltbild mit einer idealen Spannungsquelle und einem seriellen Innenwiderstand dargestellt.

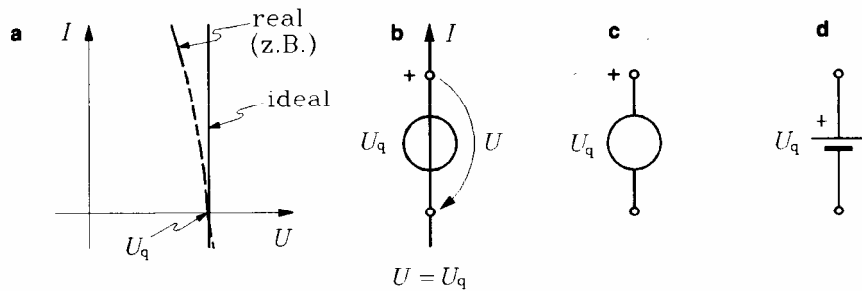


Abb. 8.9 Kennlinien und gebräuchliche Schaltzeichen für Spannungsquellen. **a** Reale Kennlinie einer Gleichspannungsquelle (Beispiel) und Idealisierung. **b** Bevorzugt anzuwendendes Schaltzeichen für ideale Spannungsquellen. **c** Ausweichsymbol. **d** Häufig als Symbol für reale Gleichspannungsquellen verwendet. Für die Darstellung elektromechanischer Generatoren gibt es eigene Schaltzeichen

8.23 Was verstehen Sie unter „Quellenspannung“?

Unter Quellenspannung versteht man die (vom Strom unabhängige) Spannung einer idealen Spannungsquelle.

8.24 Wie berechnen Sie die von einer idealen Spannungsquelle momentan abgegebene Leistung? Welche Rolle spielen dabei die angenommenen Bezugssinne?

$$P = U_q \cdot I$$

Der Bezugssinn spielt eine Rolle beim Vorzeichen der berechneten Leistung. Obige Gleichung stimmt, wenn Strom und Spannung im Erzeugerbezugssystem (siehe unten) orientiert sind. Wenn nicht, dreht sich das Vorzeichen bei obiger Gleichung um:

$$P = - U_q \cdot I$$

8.25 Was unterscheidet den Pluspol einer Spannungsquelle vom Minuspol und wie hängen diese Beziehungen mit dem Richtungssinn der Quellenspannung zusammen?

Der Pluspol ist der Anschlusspunkt, an dem ein positiver Ladungsüberschuss auftritt. Der andere Pol wird Minuspol bezeichnet. Der Richtungssinn der Quellenspannung weist immer vom Plus- zum Minuspol.

8.26 Was ist ein Zweipol?

Ein Zweipol ist ein Anschlusspaar zwischen dem ein Stromkreiselement oder eine Schaltung liegt.

8.27 Was bedeuten „Erzeugerbezugssystem“ und „Verbraucherbezugssystem“?

Unter „Erzeugerbezugssystem“, bei dem Strom und Spannung nicht(!) gleich orientiert sind, versteht man den Bezugssinn, bei dem ein positiver Leistungswert am Zweipol bedeutet, dass Leistung abgegeben wird. Unter „Verbraucherbezugssystem“ (Strom und Spannung sind gleich orientiert) versteht man das Bezugssystem, bei dem ein positiver Leistungswert am Zweipol bedeutet, dass Leistung aufgenommen wird.

8.28 Wodurch unterscheidet sich die EMK einer Spannungsquelle von deren Quellenspannung?

Die Richtung der EMK (= Elektromotorische Kraft) weist immer vom Minus- zum Pluspol einer Spannungsquelle und hat daher den umgekehrten Richtungssinn der Quellenspannung. Ansonsten haben jedoch EMK und Quellenspannung dieselbe Bedeutung (ihre Beträge sind gleich), sie können gegeneinander ersetzt werden.

8.29 Wodurch sind eine ideale Gleichspannungsquelle und eine ideal sinusförmige Wechselspannungsquelle charakterisiert?

Sie sind unabhängig von der Stromstärke der Spannungsquelle.

8.30 Was verstehen Sie unter einer spannungsgesteuerten bzw. stromgesteuerten Spannungsquelle?

Darunter versteht man eine Spannungsquelle, bei der die Quellenspannung vom Augenblickswert einer Spannung („spannungsgesteuert“) oder eines Stromes („stromgesteuert“) in einem anderen Zweig der Schaltung abhängt.

8.31 Wodurch sind ideale Stromquellen gekennzeichnet? Was unterscheidet reale von idealen Stromquellen? Geben Sie U-I-Kennlinien an.

Ideale Stromquellen liefern einen Quellenstrom, der unabhängig von der Anschlussspannung ist. Bei einer realen Stromquelle verändert sich der Strom in Abhängigkeit der Anschlussspannung.

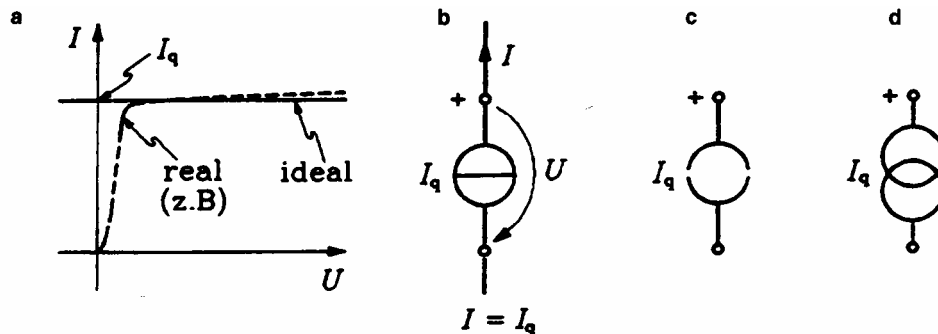


Abb. 8.12 Kennlinien und gebräuchliche Schaltzeichen für Stromquellen. a Reale Kennlinie einer Gleichstromquelle (Beispiel) und Idealisierung. b Bevorzugt anzuwendendes Schaltzeichen für ideale Stromquellen. c und d Ausweichsymbole

8.32 Welche Bedingungen muss der angeschlossene Stromkreis erfüllen, damit das Modell der idealen Stromquelle anwendbar ist?

Durch diesen angeschlossenen Stromkreis muss ein Strom fließen können.

8.33 Was verstehen Sie unter „Quellenstrom“?

Unter dem Quellenstrom versteht man die (von der Anschlussspannung unabhängige) Stromstärke einer idealen Stromquelle.

8.34 Wie hängen Pluspol und Minuspol einer Stromquelle mit dem Richtungssinn des Quellenstroms zusammen?

Der Quellenstrom fließt innerhalb (!) der Stromquelle immer vom Minus- zum Pluspol.

8.35 Wodurch wird die Anschlussspannung einer idealen Stromquelle bestimmt?

Da der Quellenstrom ist von der Anschlussspannung unabhängig ist, wird diese nur von der äußeren Beschaltung bestimmt.

8.36 Wie berechnen Sie die von einer idealen Stromquelle momentan abgegebene Leistung?

$P = U \cdot I$ (im Erzeugerbezugssystem)

8.37 Wodurch sind eine ideale Gleichstromquelle und eine ideal sinusförmige Wechselstromquelle charakterisiert?

Sie sind charakterisiert durch einen von der Anschlussspannung unabhängigen Quellenstrom.

8.38 Was verstehen Sie unter einer spannungsgesteuerten bzw. stromgesteuerten Stromquelle?

Darunter versteht man eine Stromquelle, bei der der Quellenstrom vom Augenblickswert einer Spannung („spannungsgesteuert“) oder eines Stromes („stromgesteuert“) in einem anderen Zweig der Schaltung abhängt.

8.39 Worin besteht die Ventileigenschaft einer Diode? Was verstehen Sie unter „Sperrrichtung“ und „Durchlassrichtung“?

Die Ventileigenschaft einer Diode besteht darin, dass ein Strom in eine Richtung (fast) ungehindert fließen kann während der Stromfluss in der anderen Richtung (fast komplett) gesperrt ist. Ersteres nennt man die „Durchlassrichtung“, zweiteres die „Sperrrichtung“. Dieser Effekt wird durch die Ausnutzung von physikalischen Effekten an einem pn-Übergang (Übergang von positiv zu negativ dotiertem Halbleiter) erreicht.

8.40 Wodurch ist eine Diode gekennzeichnet? Geben Sie die zugehörige U-I-Kennlinie an.

Ideale Diode (Abb.8.13a), einfachste Ersatzschaltung (Abb.8.14a, nächste Frage), realistischere Ersatzschaltung (Abb.8.14b, nächste Frage)

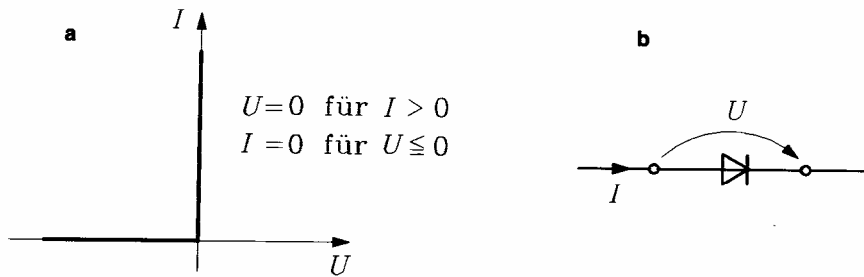


Abb. 8.13 Ideale Diode. **a** Spannungs-Strom-Kennlinie einer idealen Diode. **b** Schaltzeichen und Bezugssinn für Strom und Spannung (Der hohle Pfeil gibt die Durchlaßrichtung an). Dasselbe Symbol wird auch für „reale“ Dioden verwendet

8.41 Was versteht man unter der Schwellenspannung einer Diode? Welchen Richtwert können Sie dafür angeben und wie können Sie die Existenz der Schwellenspannung in einer Ersatzschaltung und der zugehörigen U-I-Kennlinie berücksichtigen?

Unter der Schwellenspannung einer Diode versteht man die Spannung, die an eine Diode in Durchlassrichtung angelegt werden muss, damit die Diode „leitet“. Ab dieser Spannung kann der Strom durch die Diode (fast) ungehindert fließen, die Anschlussspannung verändert sich bei Vergrößerung des Stromes nicht mehr (wesentlich).

Als Richtwert für die Schwellenspannung kann bei Si-Dioden etwa der Wert 0,7V angenommen werden. Dieser wird jedoch bei zunehmender Temperatur kleiner.

Die Existenz der Schwellenspannung kann in einer Ersatzschaltung durch eine Reihenschaltung einer idealen Diode und einer Spannungsquelle (mit Quellenspannung = Schwellenspannung der Diode) berücksichtigt werden.

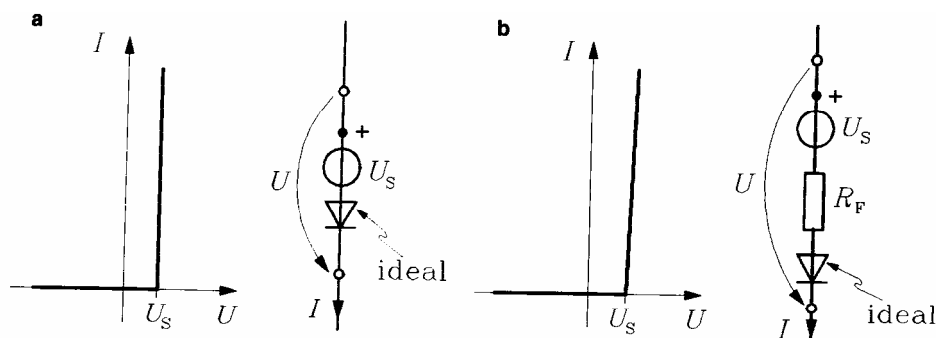


Abb. 8.14 Einfachste Ersatzschaltungen für Dioden. **a** Nachbildung der Schwellenspannung. **b** Nachbildung der Schwellenspannung und des Bahnwiderstandes

8.42 Welche typischen Werte besitzt der Bahnwiderstand einer Diode?

Der Bahnwiderstand liegt bei Strömen von etwa 1A bei etwa 0,1Ohm, bei Strömen im Bereich von 0,10mA bei etwa 10Ohm.

8.43 Durch welche Ersatzschaltung können Sie die Schwellenspannung und den Bahnwiderstand einer Diode näherungsweise berücksichtigen und wie sieht die zugehörige U-I-Kennlinie aus?

Durch Zuschaltung eines ohmschen Widerstandes in Reihe zur idealen Diode und idealen Spannungsquelle.

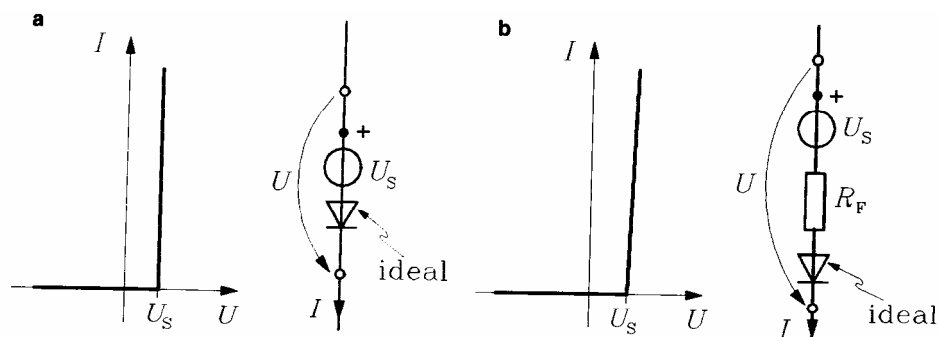


Abb. 8.14 Einfachste Ersatzschaltungen für Dioden. **a** Nachbildung der Schwellenspannung. **b** Nachbildung der Schwellenspannung und des Bahnwiderstandes

8.44 Unter welchen Umständen können Sie die Schwellenspannung bzw. den Bahnwiderstand einer Diode vernachlässigen?

Die Schwellenspannung bzw. der Bahnwiderstand sind in einer Näherung vernachlässigbar wenn ihre Größen für das Verhalten der Schaltung nur eine sehr geringe Bedeutung haben.

8.45 Wie nennt man das Zusammenbrechen des Sperreffekts einer Diode?

Das Zusammenbrechen des Sperreffekts wird als „Durchbruch“ bezeichnet. Dies passiert wenn die Anschlussspannung in Sperrrichtung einen gewissen Wert übersteigt. Danach fließt auch in Sperrrichtung ein gewisser Strom.

8.46 Welche Bedingung kennzeichnet eine direkte Reihenschaltung von Widerständen?

Der Strom durch die Widerstände ist gleich.

8.47 Wie berechnen Sie den Ersatzwiderstand einer Reihenschaltung von Widerständen? Wie berechnen Sie den Ersatzleitwert einer Reihenschaltung von Widerständen aus den Einzelleitwerten?

Der Ersatzwiderstand einer Reihenschaltung von Widerständen ist die Summe der Einzelwiderstände. Der Kehrwert des Ersatzleitwertes ist gleich der Summe der Kehrwerte der Einzelleitwerte.

8.48 Welche Bedingung kennzeichnet eine direkte Parallelschaltung von Widerständen?

Die Spannung an den Widerständen ist gleich.

8.49 Wie berechnen Sie den Ersatzwiderstand einer Parallelschaltung von Widerständen? Wie berechnen Sie den Ersatzleitwert einer Parallelschaltung von Widerständen aus den Einzelleitwerten?

Der Kehrwert des Ersatzwiderstandes ist gleich der Summe der Kehrwerte der Einzelwiderstände. Der Ersatzleitwert ist gleich der Summe der Einzelleitwerte.

8.50 Wie lautet die Spannungsteilerregel?

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

Bsp.: U_1 an R_1 , U_2 an R_2

$$R_1/R_2 = U_1/U_2$$

$$R_1/(R_1+R_2) = U_1/(U_1+U_2)$$

...

8.51 Wie lautet die Stromteilerregel?

„Die Ströme in zwei Zweigen, an denen die gleiche Spannung liegt, verhalten sich wie die Leitwerte der Zweige und umgekehrt wie die Widerstandswerte der Zweige. Ein Teilstrom verhält sich zum Gesamtstrom wie der Widerstand des anderen Zweiges zum Ringwiderstand der Masche, in der die Stromaufteilung erfolgt.“

Bsp.: I_1 durch R_1 , I_2 durch R_2

$$R_1/R_2 = I_2/I_1 (=G_2/G_1)$$

$$R_1/(R_1+R_2) = (I_1+I_2)/I_2$$

...

8.52 Was müssen Sie bei der Anwendung der Spannungsteilerregel und der Stromteilerregel im speziellen beachten?

Bei der Anwendung der beiden Regeln ist zu beachten, dass an beiden Widerständen der selbe Strom bzw. die selbe Spannung anliegt, weil sich ansonsten bei der Herleitung die Spannung aus der Gleichung nicht herauskürzt bzw. sich die Stromaufteilung ändert.

8.53 Lassen sich die Spannungsteilerregel und die Stromteilerregel auf mehr als zwei Widerstände erweitern? Zeigen Sie, dass die Kombination von jeweils zwei (Ersatz-)Widerständen bereits den allgemeinen Fall erfasst.

Die Spannungs- und Stromteilerregel lassen sich auch auf mehr als zwei Widerstände erweitern, da ja jeder Widerstand als Ersatzwiderstand von mehreren anderen Widerständen aufgefasst werden kann.

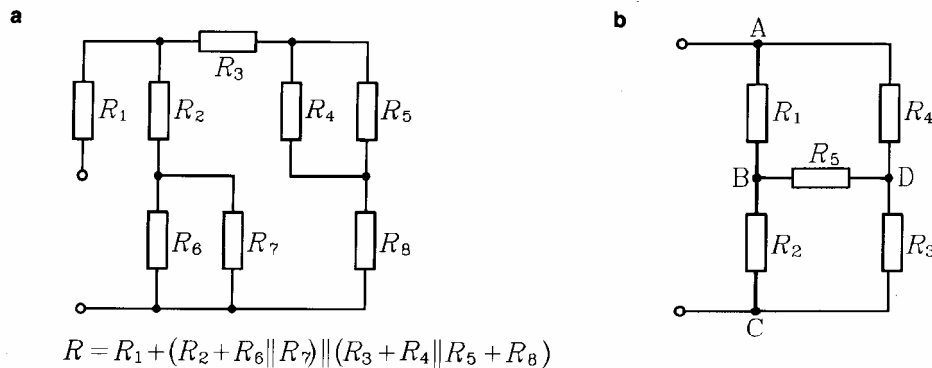
Parallelschaltung der Widerstände $R_1 = R_{11}+R_{12}$ und $R_2 = R_{21}+R_{22}$:

$$\text{Stromteilerregel: } I_1/I_2 = R_2/R_1 = (R_{21}+R_{22})/(R_{11}+R_{12})$$

$$\text{Berechnung über Masche: } I_1 \cdot (R_{11}+R_{12}) = I_2 \cdot (R_{21}+R_{22}) \rightarrow I_1/I_2 = (R_{21}+R_{22})/(R_{11}+R_{12})$$

-> Die Stromteilerregel gilt für beliebige Widerstände wenn man sie auf 2 Ersatzwiderstände vereinfachen kann. (analog auch die Spannungsteilerregel)

8.54 Welche Kombination von Widerständen nennt man „Brücke“? Wie lautet die Abgleichbedingung für eine Widerstandsbrücke?



$$R = R_1 + (R_2 + R_6 \parallel R_7) \parallel (R_3 + R_4 \parallel R_5 + R_8)$$

Abb. 8.18 Widerstandsschaltungen. **a** Ersatzwiderstand durch Reihen- und Parallelkombination von Einzelwiderständen direkt berechenbar. **b** Ersatzwiderstand nicht nach dieser Methode berechenbar

Unter Abgleichbedingung versteht man das Verhältnis der Widerstände wenn durch R_5 kein Strom fließt $\rightarrow R_1/R_2 = R_4/R_3$

8.55 Wie lässt sich eine Spannungsquelle mit Innenwiderstand im einfachsten Fall durch eine Ersatzschaltung idealer Elemente darstellen?

Eine Spannungsquelle mit Innenwiderstand lässt sich im einfachsten Fall durch eine Serienschaltung von einer idealen Spannungsquelle und einem ohmschen Widerstand ersatzweise darstellen.

8.56 Was verstehen Sie unter der Leerlaufspannung und dem Kurzschlussstrom einer Spannungsquelle mit Innenwiderstand?

Unter der Leerlaufspannung versteht man die Spannung an den Klemmen einer Spannungsquelle mit Innenwiderstand, wenn die Klemmen „offen“ sind, also wenn kein Strom durch die Quelle fließt.

Unter dem Kurzschlussstrom einer Spannungsquelle mit Innenwiderstand versteht man den Strom, der fließt, wenn die Klemmen kurzgeschlossen werden, also keine Spannung an den Klemmen anliegt.

8.57 Wie lautet die beschreibende Gleichung (Elementgleichung) einer idealen Spannungsquelle mit Innenwiderstand? Geben Sie die zugehörige U-I-Kennlinie an.

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

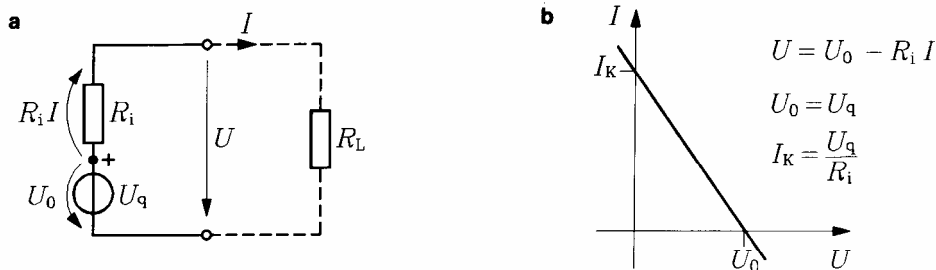


Abb. 8.21 Spannungsquelle mit Innenwiderstand. **a** Ersatzschaltung. **b** Spannungs-Strom-Kennlinie einer Gleichspannungsquelle

Unter welchen Bedingungen sind eine ideale Spannungsquelle mit Innenwiderstand und eine ideale Stromquelle mit einem Parallelwiderstand bezüglich der Ausgangsklemmen äquivalent?

Sie sind äquivalent wenn ihre Leerlaufspannung und ihr Kurzschlussstrom gleich sind.

8.58 Ist das Modell der idealen Spannungsquelle mit einer direkten Parallelschaltung zweier solcher Elemente (ohne Reihenwiderstand) verträglich? Gibt es bei einer Reihenschaltung Probleme?

Die direkte Parallelschaltung zweier idealer Spannungsquellen ist im allgemeinen nicht möglich, weil $U_{q1} = U_{q2}$ (Maschenregel) erfüllt sein muss.

Bei der Reihenschaltung gibt es hingegen keine Probleme. Die beiden in Reihe geschalteten Spannungsquellen können auch ersatzweise als eine Spannungsquelle dargestellt werden, wobei sich die Quellenspannung aus der Summe der Einzelquellenspannungen ergibt.

8.59 Ist das Modell der idealen Stromquelle mit einer direkten Reihenschaltung zweier solcher Elemente (ohne Parallelwiderstand) verträglich? Gibt es bei einer Parallelschaltung Probleme?

Die direkte Reihenschaltung zweier idealer Stromquellen ist im allgemeinen nicht möglich, weil $I_{q1} = I_{q2}$ (Knotenregel) erfüllt sein muss.

Bei der Parallelschaltung gibt es wie bei der Reihenschaltung von idealen Spannungsquellen keine Probleme.

9 Das elektrische Feld

9.1 *Wie lassen sich elektrische Spannungsverteilungen im Prinzip mit Testladungen ausmessen?*

Die Anwesenheit elektrisch geladener Körper in einem Raum bezeichnen wir als „elektrisches Feld“. Es werden Kräfte zwischen Körper übertragen. Verschieben wir nun ein elektrisch geladenes Testkörperchen entlang irgendwelcher Kurven, so wird Arbeit verrichtet. Bestimmen wir nun die einzelnen von den Feldkräften verrichteten Arbeiten, und dividieren sie durch die Ladung des Testkörpers erhalten wir die Spannung.

Vorraussetzung für dieses Gedankenexperiment ist jedoch, dass die sich in dem Raum befindenden elektrischen Ladungen ihren Ort nicht ändern.

Die so ermittelte Spannungsverteilung kann zur Beschreibung des vorhandenen elektrischen Feldes verwendet werden.

9.2 *Durch welche allgemeinen Eigenschaften sind elektrische Spannungen gekennzeichnet?*

- sie besitzen eine Orientierung, d.h. sie sind mit einem Durchlaufsinn versehener Kurven gekennzeichnet
- werden in Volt(V) angegeben
- geben jeweils den Gesamtwert des elektrischen Feldes an
- entspricht der Darstellung als ladungsbezogenen Arbeit bzw. als Kurvensumme
- Gesamtspannung ist die Summe aller Teilspannungen gleichen Bezugssinnes, bei entgegengesetzten Bezugssinn wird ihr Vorzeichen umgekehrt.
- die elektrische Umlaufspannung ist gleich Null (nur im elektrostatischen und quasielektrostatischen Fall)

9.3 Welche speziellen Eigenschaften besitzen elektrische Spannungsverteilungen im elektrostatischen und im quasielektrostatischen Fall?

Sie gelten unter den Voraussetzungen einer verschwindend oder zumindest vernachlässigbaren zeitlichen Änderungsrate des magnetischen Flusses.

Gilt insbesondere, wenn sich die Verteilung der elektrischen Ladungen im Raum mit der Zeit nicht ändern und überhaupt keine Magnetfelder vorkommen.

Dann spricht man von der Elektrostatik. Stimmen diese Voraussetzungen nur näherungsweise, dann spricht man von der Quasi – Elektrostatik.

9.4 Wie lautet der Satz der elektrischen Umlaufspannung?

Sei A irgendein beliebiges Flächenstück ∂A seine Randkurve, so gilt für die zugeordnete Umlaufspannung: $U(\partial A) = 0$

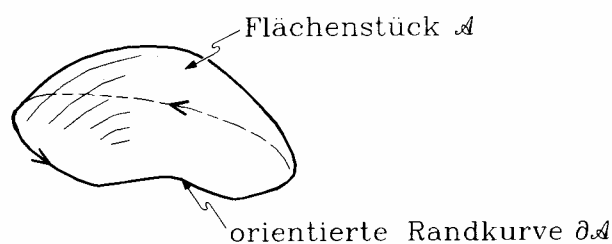


Abb. 9.1 Einfach zusammenhängendes Flächenstück A und Randkurve ∂A mit (innerer) Orientierung

9.5 Wie hängt der Satz von der elektrischen Umlaufspannung mit der zweiten Kirchhoff – Regel zusammen?

Die zweite Kirchhoffregel besagt, dass für jede Einheitlich orientierte Kurve die Summe aller Teilspannungen zu jedem Zeitpunkt gleich Null ergibt. Sie ist speziell auf das Anwenden in Schaltungen zugeschnitten.

Betrachtet man die zweite Kirchhoffregel allgemein, so stößt man dabei auf den Satz der Umlaufspannung, welcher besagt, dass die Summe der Teilspannung entlang einer geschlossenen Kurve (Randkurve einer Fläche) gleich Null ergibt.

9.6 Mit welcher Argumentation folgt aus der Gültigkeit des Satzes von der elektrischen Umlaufspannung die Wegunabhängigkeit der elektrischen Spannung?

Wenn eine Kurve K einen Ort P mit einem Ort L verbindet, so hängt die zugeordnete Spannung nicht vom Verlauf der Kurve sondern nur von den Orten P und L ab. Wichtig für das Vorzeichen ist jedoch die Orientierung der Kurve.

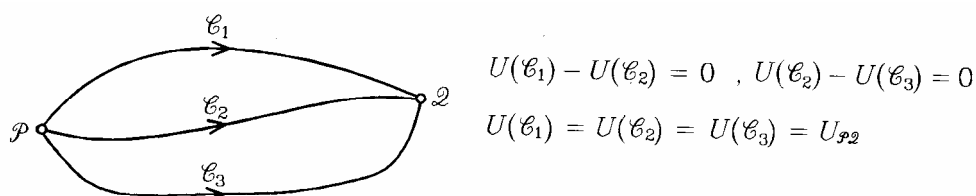


Abb. 9.2 Ist die elektrische Umlaufspannung stets gleich Null, so hängt die Spannung zwischen zwei festen Orten P und L nicht vom Verlauf der Verbindungslinie ab

9.7 Unter welchen Bedingungen existiert ein elektrostatisches Potential?

Es wird jedem beliebigen Ort P in einem Raum der Wert $\varphi(P)$ einer physikalischen Größe φ zugeordnet, die wir elektrisches Potential nennen.

Mathematisch gesehen ist das elektrische Potential ein skalares Feld.

Existiert nun ein Bezugspunkt, so hat jeder Ort P im elektrischen Feld einen eindeutigen Wert $\varphi(P)$, gemessen in Volt.

9.8 Wie hängen das elektrostatische Potential und die elektrische Spannung zusammen?

Die Spannung zwischen zwei Punkten P und L kann als Differenz der Potentialwerte $\varphi(P)$ im Anfangspunkt minus den Potentialwert $\varphi(L)$ im Endpunkt berechnet werden.

$$U_{P,L} = \varphi(P) - \varphi(L)$$

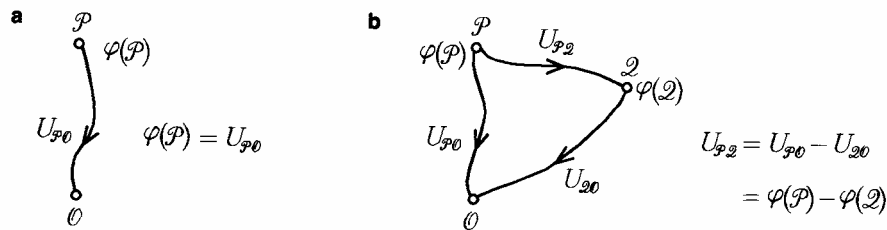


Abb. 9.3 **a** Das elektrische Potential $\varphi(P)$ eines Ortes P ist die Spannung zwischen P (Anfangspunkt) und einem Bezugspunkt 0 (Endpunkt). **b** Die Spannung zwischen zwei Punkten lässt sich als Potentialdifferenz darstellen

9.9 Welche SI – Einheit ist dem elektrischen Potential zugeordnet?

Einheit: [V] ... Volt

→ da $U_{P,L} = \varphi(P) - \varphi(L)$

9.10 Durch welche Art von Feld lässt sich das elektrostatische Potential erfassen?

Man kann das elektrische Potential mittels Messsonden messen, oder man kann es berechnen.

9.11 Warum stellt ein stromfreier, elektrisch leitender Körper einen Bereich konstanten Potentials dar?

Wenn in einem Körper kein Strom fließt, d.h. es wandern keine Ladungsträger, sind keine Feldkräfte vorhanden. Das bedeutet, dass in einem beliebigen Kurvenstück in diesem Leiter keine elektrische Spannung vorhanden ist. Dadurch sind auch keine Potentialunterschiede in diesem Körper vorhanden, → $\varphi(P) = \text{const.}$ und $\Delta\varphi = 0$

Wenn nun in einem Körper Strom fließt, sind Feldkräfte vorhanden. Das heißt, dass die Spannung entlang eines beliebigen Kurvenstückes ungleich Null ist → $\varphi(P) \neq \text{const.}$ und $\Delta\varphi \neq 0$

9.12 Was verstehen Sie unter einer Potentialfläche?

Betrachtet man zwei Körper konstanten Potentials. So besitzen sie an ihrer Oberfläche sowie in ihren gesamten Körpern das Potential φ_0 bzw. φ_n .

Wie verteilt sich nun das Potential im Raum?

Bildet man die Differenz beider Potentiale $\Delta\varphi = \varphi_n - \varphi_0$, und teilt dieses wiederum in k gleich große Anteile auf, so erhält man lauter einzelne Potentialstärke von $\varphi_k = \varphi_0 + k \cdot \Delta\varphi$. Sucht man nun den Abstand eines solchen Potentials, so erhält man lauter Raumhüllen um den jeweiligen Körper mit konstantem Potential.

Eine solche Raumhülle bezeichnet man als Potentialfläche oder auch als Äquipotentialfläche. Potentialflächen sind immer geschlossene Flächen, auch wenn sie sich manchmal erst in der Unendlichkeit schließen. Zwei unterschiedliche Potentialflächen können sie auch nicht überschneiden, da sonst das Potential des Teilchens am Schnittpunkt nicht eindeutig definiert wäre.

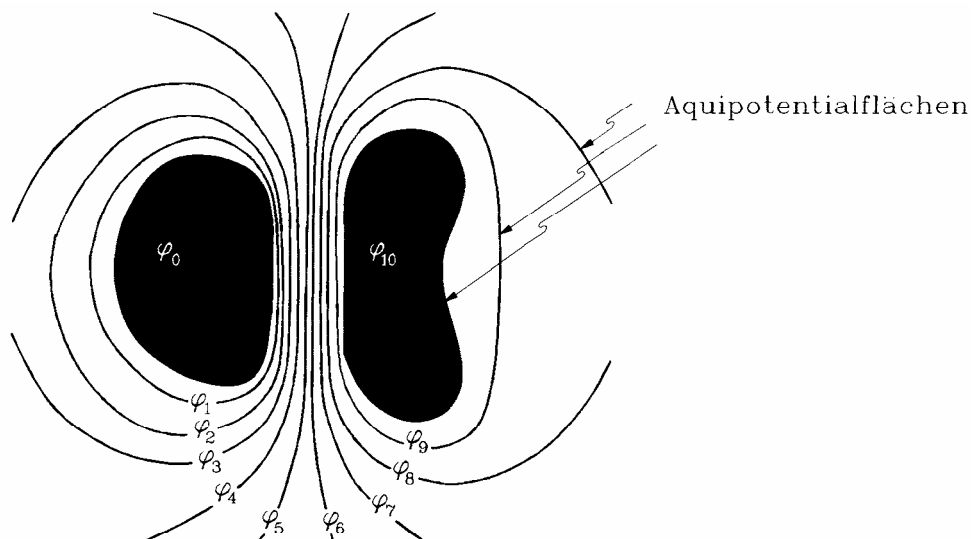


Abb. 9.4 Schnitt durch zwei elektrisch geladene, leitfähige Körper. Die Äquipotentialflächen sind innerhalb eines begrenzten Bereiches als Schnittlinien mit der Zeichenebene dargestellt

9.13 Auf welche Art wird im Bild der Potentialfläche die Wegunabhängigkeit der elektrischen Spannung erfasst?

Betrachtet man die Potentialdifferenz (Spannung) zwischen zwei Orten. Nun werden entlang der Kurvenstücke alle abnehmenden Potentiale von einer Potentialfläche zur anderen positiv gezählt, und die andern umgekehrt. Bildet die Kurve einen geschlossenen Umlauf, so erhält für die Umlaufspannung gleich null.

Den Weg welchen man zwischen zwei Orten nimmt ist daher völlig egal, da die Potentialdifferenz vom Ort der Punkte und nicht vom Weg zwischen ihnen abhängt.

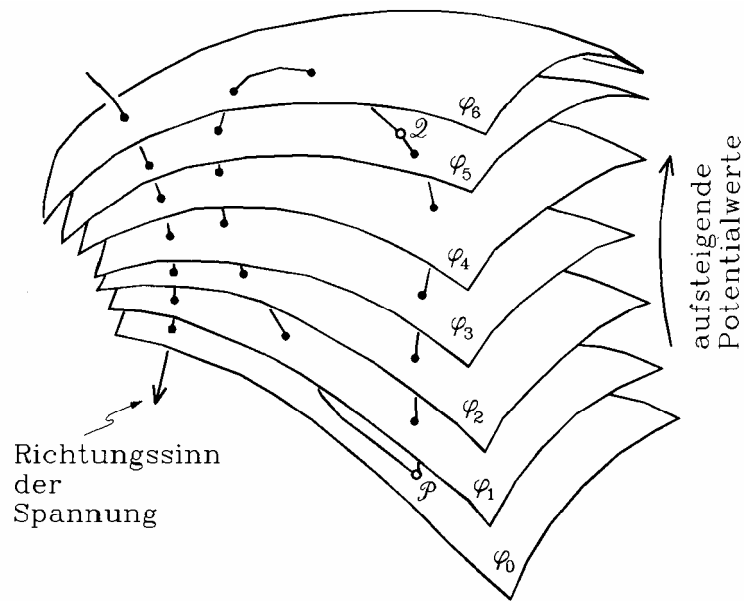


Abb. 9.5 Ausschnitt aus einem System von Potentialflächen. Die elektrische Spannung entlang eines Weges zwischen den Orten \mathcal{P} und \mathcal{Q} läßt sich durch gerichtetes Abzählen der durchstoßenen Potentialflächen bestimmen

9.14 Wie lässt sich im elektrostatischen Fall aus dem Bild der Potentialflächen der Begriff der elektrischen Feldstärke ableiten?

Die elektrische Feldstärke ist ein lokales Maß für die Intensität des elektrischen Feldes. Man durchstößt nun senkrecht aufeinander folgende Potentialflächen in Richtung steigenden Potentials. Je größer die Anzahl der Potentialflächen bei gleich bleibenden Potentialunterschied desto größer ist die elektrische Feldstärke und umgekehrt. Die elektrische Feldstärke ist also ein Maß für die Dichte des elektrischen Feldes.

Ihr Wert lässt sich im elektrostatischen und quasielektrostatischen Fall wie folgt berechnen:

$$\vec{E} = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l} \vec{e}_l \quad \text{oder} \quad \vec{E} = -\frac{d\varphi}{dl} \vec{e}_l$$

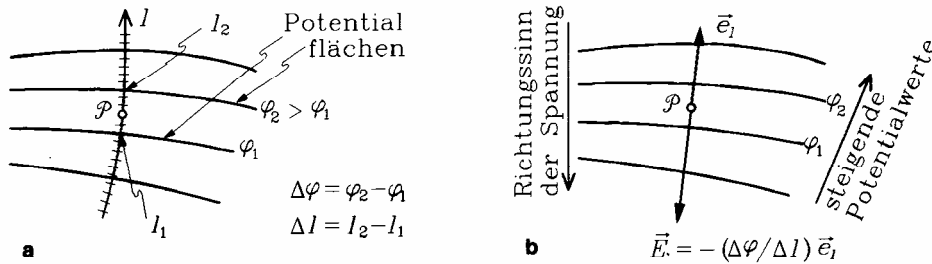


Abb. 9.6 Einem System von Potentialflächen läßt sich als lokales Maß für die Intensität des elektrischen Feldes die elektrische Feldstärke zuordnen

9.15 Welche Art von Feld verwenden wir zur mathematischen Darstellung der elektrischen Feldstärke?

Man verwendet dazu ein konservatives Kraftfeld. D.h. wenn man einen Testkörper an dem die elektrischen Feldkräfte angreifen in diesem Feld bewegt, und wieder zum Ausgangspunkt zurückkehrt ist die verrichtete Arbeit gleich null.

9.16 Welche SI – Einheit ist der elektrischen Feldstärke zugeordnet?

$[E] = V/m$

9.17 Was verstehen Sie unter einem homogenen elektrischen Feld?

Betrachtet man zwei Platten mit unterschiedlichem Potential, so entstehen zwischen den Platten Potentialflächen. Besitzen beide Platte eine ebene Oberfläche so Verlaufen die Potentialflächen ($\Delta\psi = \text{const.}$) parallel zueinander. Man bezeichnet dies als homogenes elektrisches Feld.

Besitzt aber eine der beiden Platten einen Wulst, sodass die Potentialflächen an dieser Stelle nicht mehr bei $\Delta\psi = \text{const.}$ den gleichen Abstand zueinander besitzen sondern sie unregelmäßige Abstände aufweisen so wird dies als inhomogenes elektrisches Feld bezeichnet.

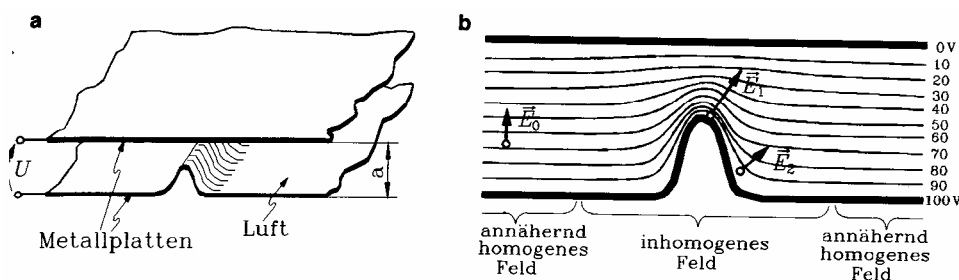


Abb. 9.7 Zwischen zwei Metallplatten liegt die elektrische Spannung U . **a** Die untere Platte besitzt einen durchgehenden Wulst. **b** Ausschnitt aus der Verteilung des elektrischen Feldes. Die Plattenränder sind als weit entfernt angenommen

9.18 Wie hängt das elektrostatische Potential mit dem Begriff der potentiellen Energie zusammen?

Man kann jedem Körper an jeden Ort in einem konservativen Kraftfeld eine gewisse potentielle Energie zuordnen. Sie ist gleich jener Arbeit die verrichtet werden muss um den Körper von einem Bezugspunkt an den zu betrachteten Ort zu bringen, egal auf welchem weg. Aufgrund der Energieerhaltung wird diese Arbeit im Kraftfeld als Energie gespeichert.

Wenn man nun die benötigte Energie durch die Ladung des Körpers dividiert, so erhält man das elektrostatische Potential.

9.19 Warum ist die Festlegung der Feldstärke als ladungsbezogenen Kraft allgemeiner als die über das Potential?

Sie ist allgemeiner, da sie nicht nur für den elektrostatischen und quasielektrostatischen Fall gültig ist. Sie ist ebenso wie der Begriff der Spannung, als dessen Repräsentanten wir die elektrische Feldstärke haben, allgemein gültig.

9.20 Wie lässt sich die elektrische Spannung allgemein als Kurvensumme der elektrischen Feldstärke darstellen?

Einen Wert E der elektrischen Feldstärke kann man stets in einem Punkt, durch seinen Betrag und seiner Richtung angeben. Wenn man entlang einer Kurve das Produkt aus Feldstärke und Länge des Wegstückes summiert, so erhält man die Spannung. Wobei für den Wert der Feldstärke nur die Normalprojektion des elektrischen Feldes auf die Richtung des Weges verwendet werden darf.

Da $E = \Delta \psi / \Delta l$ folgt daraus $\Delta \psi = E \cdot \Delta l$. Da die Spannung die Summe der einzelnen Potentialunterschiede ist muss man alle Teilpotentiale der gesamten Kurve addieren. Als Ergebnis erhält man die Spannung zwischen den Anfangs- und Endpunkt der Kurve.

$$U(K) = \sum_{k=1}^n E_{s_k} \cdot s_k \quad \text{oder} \quad U(K) = \int_K E_s \cdot ds$$

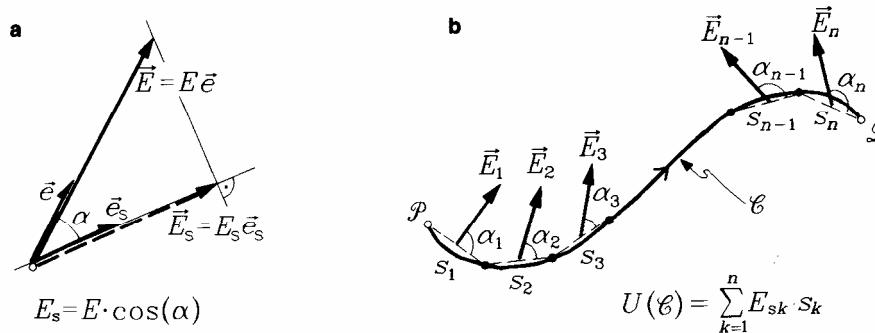


Abb. 9.8 Die einer Kurve \mathcal{C} zugeordnete elektrische Spannung $U(\mathcal{C})$ lässt sich als Kurvensumme der elektrischen Feldstärke darstellen. **a** Normalprojektion der Feldstärke auf eine vorgegebene Richtung. **b** Zerlegung und Bildung der Kurvensumme

9.21 In welchem Sinn sprechen wir von einem „elektrischen Fluss“?

Wenn man zwei elektrische geladene Körper annähert, beeinflussen diese sich gegenseitig, indem die Wechselwirkung von Punkt zu Punkt übertragen wird. Dabei ist zu beachten, da sich positive und negative Ladungen anziehen, verteilen sich die Ladungen auf beiden Körper so, dass sich die positiven des einen und die negativen des anderen Körpers einander zuwenden. Die so entstandene Wechselwirkung bezeichnet man als so genannten elektrischen Fluss.

Das Wort Fluss hat aber in dieser Beziehung einen anderen Sinn. Und zwar denjenigen, dass sich die Feldlinien von den positiven Elektronen des einen Körpers zu den negativen Elektronen des anderen hinbewegen (fließen),

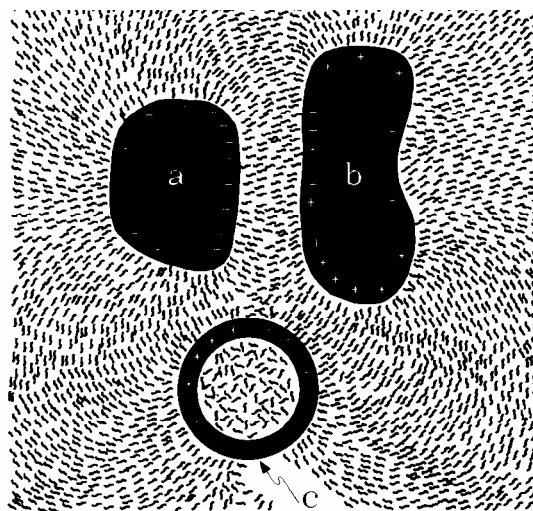


Abb. 9.9 Durch Faserstaub kann man das elektrische Feld zwischen geladenen Metallfolien a und b sichtbar machen. a trägt eine negative Überschussladung, b die entgegengesetzt gleich große, positive. c ist insgesamt ungeladen

9.22 Was versteht man unter „Quellen“ und „Senken“ des elektrischen Flusses? Durch welche physikalische Größe werden sie beschrieben?

Als Quelle versteht man den Ort an dem der elektrische Fluss entspringt. Per Konvention entspringt der elektrische Fluss bei den positiv geladenen Ladungsträgern. Logischerweise, muss er auch wieder verschwinden, und zwar in den negativ geladenen Ladungsträgern, den Senken.

Jeder elektrische Fluss benötigt genau gleiche viele Quellen wie Senken, um wieder komplett zu verschwinden.

Die Quellen und Senken werden wie die Ladungsträger durch ihre Ladung Q beschrieben.

Ladung für \rightarrow neg. Ladungsträgern: $Q = -e$
 \rightarrow pos. Ladungsträgern: $Q = e$ $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{As}$

9.23 Was bedeutet „Influenz“?

Auf einem elektrisch ungeladenen Leiter ordnen sich die Ladungsträger zu einer neuen Verteilung, wenn er in die Nähe eines elektrisch geladenen Körpers gebracht wird. Es kommt dabei zu Bildung von Überschussladungen verschiedenen Vorzeichens auf unterschiedlichen Teilen der Oberfläche. Man nennt diese Erscheinung „Influenz“. Sie folgt aus der Tatsache, dass sich ungleichnamige Ladungen anziehen und gleichnamige abstoßen.

9.24 Wie lässt sich der elektrische Fluss mit Hilfe von Doppelscheibchen im Prinzip quantitativ erfassen?

Wir bringen zwei elektrische verbundenen Metallscheiben in elektrisches Feld zweier geladener Körper ein. An der dem negativen Körper zugewandten Seite, werden sie nun die positiven Ladungsträger der beiden Metallscheiben anordnen und umgekehrt. Jetzt können wir die Scheibchen im elektrischen Feld trennen, und ihre Ladung mit speziellen Messgeräten messen.

Durch mehrmaliges Wiederholen, kann man die beste Lage bestimmen, für welche der Betrag der influenzierten Spannung am höchsten ist.

Messen wir so die Ladungsmengen $+Q$ und $-Q$, so sind diese gleich dem Wert des unterbrochenen elektrischen Flusses.

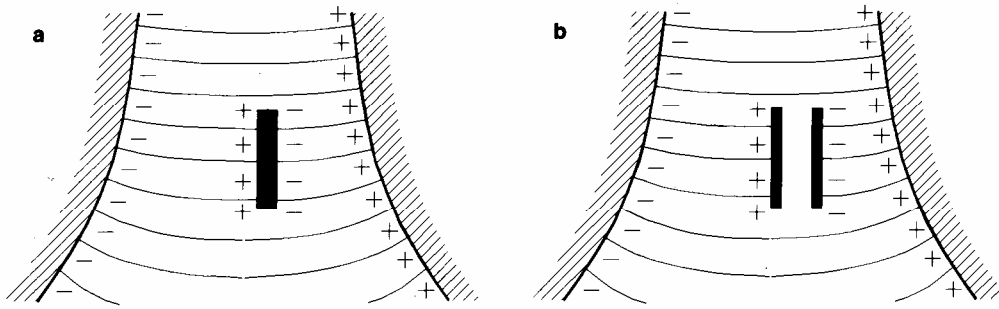


Abb. 9.11 Der elektrische Fluß läßt sich über die Influenzladungen in einem Doppelscheibchen bestimmen. **a** Die beiden Scheibchen stehen in elektrischem Kontakt. **b** Die Scheibchen werden im Feld getrennt. Beim Herausnehmen können sich die Ladungen nicht mehr ausgleichen

9.25 Auf welche Weise erfasst das Bild der Flußröhren eine elektrische Flußverteilung?

Die Quellen (und Senken = negative Quellen) des elektrischen Flusses sind die elektrischen Ladungen. Befindet sich auf einem Teil der Oberfläche eine Quelle, entspringt dort der Fluss, eine Senke, so verschwindet dort der Fluss. Man kann sich nun den elektrischen Fluss als Flußröhre vorstellen, welche bei jeder Quelle (pos. geladener Ladungsträger) beginnen, und bei jeder Senke (eng. geladener Ladungsträger) enden.

Die Annahme der Flussrichtung von der positiven zur negativen Ladung, ist reine Konvention.

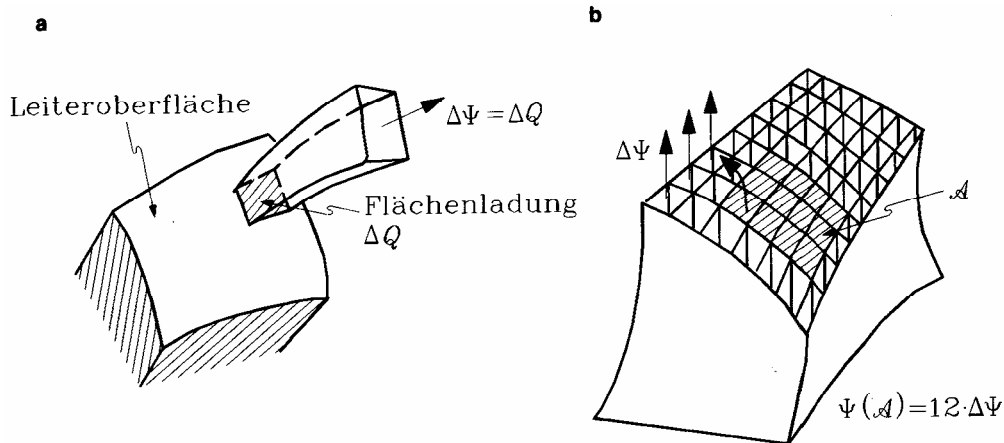


Abb. 9.12 Die Verteilung des elektrischen Flusses im Raum kann man sich als ein System aneinandergelegter Flußröhren vorstellen. **a** Entspringt an einer Leiteroberfläche eine Flußröhre, so sitzt dort eine positive Flächenladung. **b** Ausschnitt aus einer Flußverteilung. Der einem Flächenstück A zugeordnete Fluß läßt sich bestimmen durch Abzählen der durchsetzenden Flußröhren

9.26 Welche SI – Einheit ist dem elektrischen Fluss zugeordnet?

Einheit: $[\Psi] = 1[C] = 1[As]$

9.27 Wie lautet der Satz vom elektrischen Hüllenfluss?

Ein durch die geschlossene Oberfläche ∂V eines Raumeils V austretender elektrischer Fluss $\Psi(V)$ ist gleich der im Raumeil V befindlicher Ladungsmenge $Q(V)$.

Kurz: „Der elektrische Fluss nach außen durch eine Hülle ist gleich der eingeschlossenen Ladung.“

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

9.28 Warum enthält eine elektrische Flussverteilung eine vollständige Information über die elektrische Ladungsverteilung?

Da der elektrische Fluss zwischen einem positiven und einem negativen Ladungsträger auftritt, kann man aufgrund der Richtung des elektrischen Flusses auf die Art der Ladung eines Ladungsträgers schließen. Die Ladungsdichte (Linienladungs-, Flächenladungs- oder Raumladungsdichte) gibt darüber hinaus noch Auskunft über den Wert der Ladung.

9.29 Was verstehen Sie unter den Begriffen Punktladung, Linienladung, Flächenladung und Raumladung? Wie werden diese mathematisch erfasst?

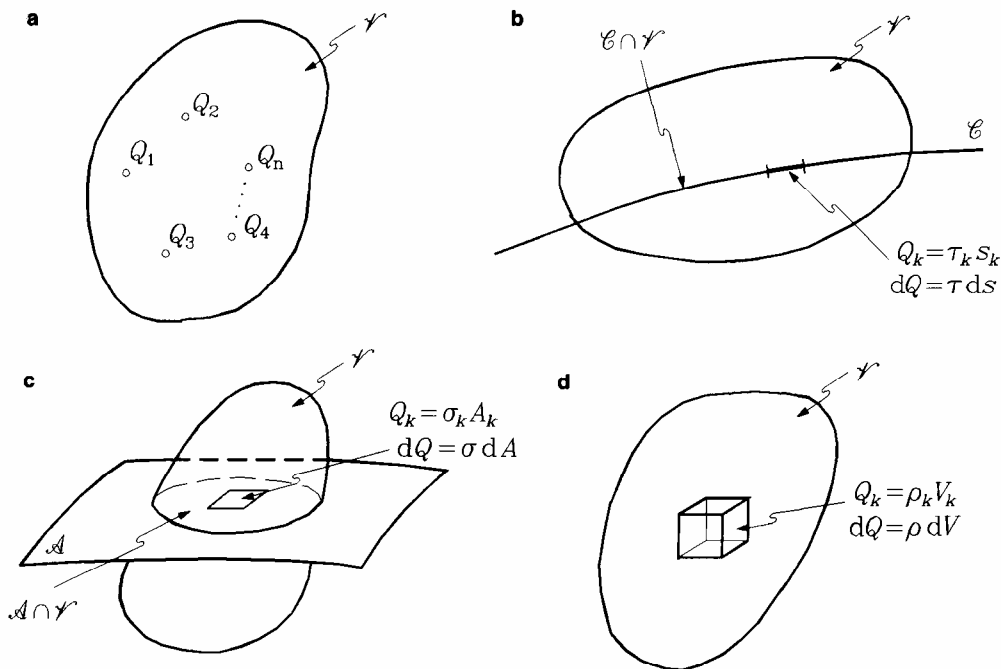


Abb. 9.13 Ladungsverteilungen im Raum. **a** Punktladungen, **b** Linienladung, **c** Flächenladung, **d** Raumladung

→ Punktladung: Die einzelnen Ladungen sind an einzelnen Punkten konzentriert. Man erhält ihre Gesamtladung durch Summation der Einzelladungen.

→ Linienladungen: Man stellt sich die Ladungen entlang einer Linie verteilt vor. Die Kurve muss nicht unbedingt gleich verteilte Ladung besitzen. Zur Bestimmung der gesamten Ladung zerlegt man die Kurve in Teilstücke, und summiert die ihre Ladung zum.

→ Flächenladung: Wie bei Linienladungen, nur dass wir hier eine Fläche betrachten. Zur Bestimmung der gesamten Ladung, zerlegen wie die Fläche in Teilflächen, und summiert ihre Ladung.

→ Raumladung: Wie bei Flächenladungen, nur dass hier die Ladung über ein Volumen verteilt ist. Hierbei wird zur Bestimmung der gesamten Ladung die Summe aller Teilladungen von Teilvolumina gebildet.

9.30 Was beschreibt die elektrische Flussdichte?

Eine elektrische Spannung ist immer einer Kurve im Raum zugeordnet, und ein elektrischer Fluss immer einer Fläche. Die elektrische Flussdichte, ist der lokale Repräsentant des elektrischen Flusses. Sie beschreibt die Ladung pro Fläche in Normalrichtung e .

$$\vec{D} = \frac{Q_i}{A} \vec{e} \quad \text{oder} \quad \vec{D} = \sigma_i \vec{e}$$

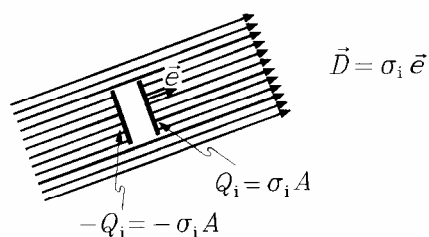


Abb. 9.15 Die elektrische Flußdichte wird über die influenzierbare Flächenladungsdichte festgelegt

9.31 Welche Art von Feld verwenden wir zur mathematischen Darstellung der elektrischen Flussdichte?

Ein homogenes Feld.

9.32 Welche SI – Einheit ist der elektrischen Flussdichte zugeordnet?

Einheit: $[D] = 1 \text{ As/m}^2$

9.33 Wie lässt sich der elektrische Fluss allgemein als Flächensumme der elektrischen Flussdichte darstellen?

Eine Fläche A wird in kleinere Ebenstückchen mit den Flächeninhalten A_1, A_2, \dots eingeteilt. Man bestimmt nun für jedes Flächenelement die Richtung der Flächennormalen, die auf die gleiche Seite wie der Durchtrittssinn von A (äußere Orientierung) weist. Der Fluss durch ein Flächenelement ist nun das Produkt aus Flächeninhalt und Normalprojektion der Flussdichte. Summiert man nun über alle Teilflächen erhält man den gesamten Fluss einer Oberfläche.

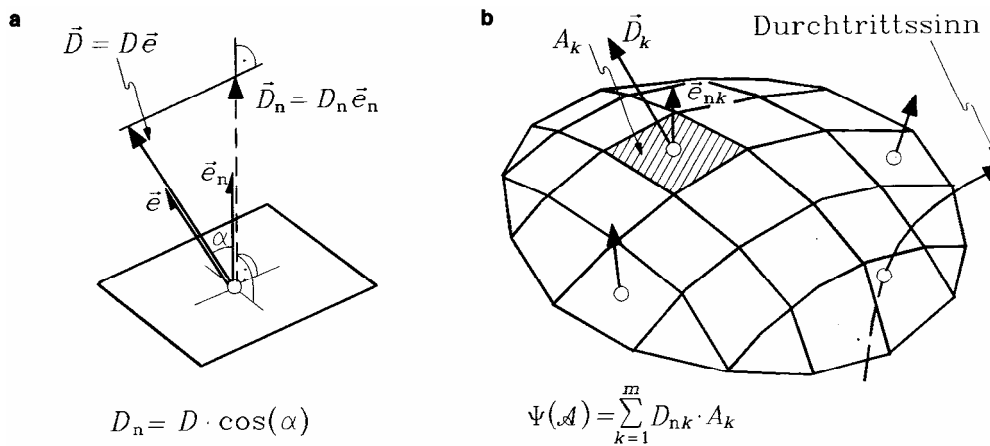


Abb. 9.16 Der einer Fläche \mathcal{A} zugeordnete elektrische Fluß $\Psi(\mathcal{A})$ läßt sich als Flächensumme der elektrischen Flußdichte darstellen. **a** Normalprojektion der Flußdichte auf die Normalenrichtung. **b** Zerlegung der Fläche und Bildung der Flächensumme

9.34 Welches elektrische Feld stellt sich in der Umgebung einer einzelnen Punktladung im leeren Raum ein? Geben Sie Formeln an für die elektrische Feldstärke und für die elektrische Felddichte?

Es stellt sich um einen Punktladung im leeren Raum ein nach allen Richtungen gleichmäßig verteiltes elektrisches Feld ein. Diese gleichmäßige Verteilung auf alle Raumrichtungen bedeutet, dass ein in der Punktladung zentriertes Raumsegment mit dem Raumwinkel Ω als Flußröhre den elektrischen Fluß $\Delta\Psi = Q \cdot \Omega / 4\pi$ führt. Im Abstand r vom Zentrum hat die Querschnittsfläche dieser Flußröhre den Inhalt $\Delta A = r^2 \cdot \Omega$ also beträgt dort die Flussdichte $D = \Delta\Psi / \Delta A = Q / (4\pi r^2)$, und sie ist radial nach außen gerichtet:

elektrische Flussdichte:
$$\vec{D} = \frac{Q}{4\pi r^2} \vec{e}_r$$

elektrische Feldstärke:
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} * \frac{Q}{r^2} \vec{e}_r$$

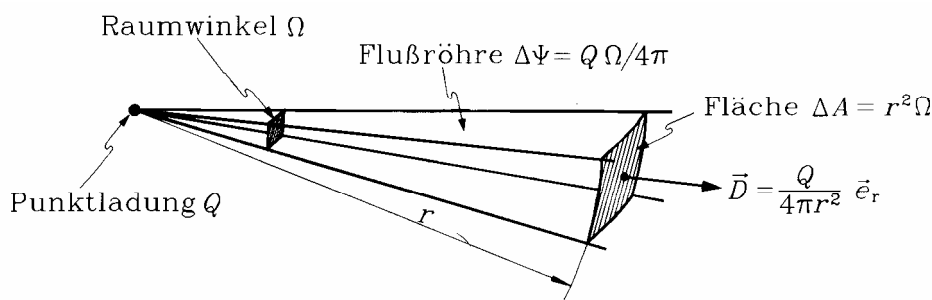


Abb. 9.17 Ausschnitt der Flußverteilung um eine einzelne Punktladung im leeren Raum. Dargestellt ist eine Flußröhre mit dem Raumwinkel Ω

9.35 Wie lautet die Verknüpfungsbeziehung zwischen der elektrischen Feldstärke und der elektrischen Flussdichte im leeren Raum?

Die elektrische Flussdichte und die elektrische Feldstärke passen im leeren Raum genau dann zusammen, wenn gilt:

$$D = \epsilon_0 \cdot E$$

Die Konstante ϵ_0 nennt man elektrische Feldkonstante oder Influenzkonstante. Ihr Wert beträgt: $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm oder [F/m] ... Farad pro Meter

9.36 Welchen Wert besitzt die elektrische Feldkonstante

Ihr Wert beträgt: $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm oder [F/m] ... Farad pro Meter

9.37 Was bedeutet die Verknüpfungsbeziehung im leeren Raum geometrisch für die Bilder Potentialflächen und Flussröhren?

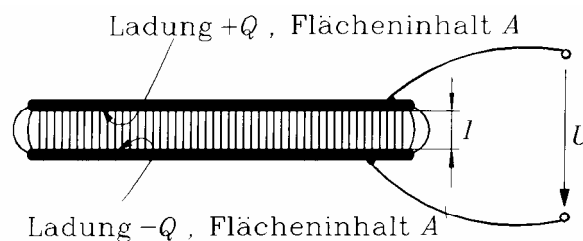


Abb. 9.18 Schnitt durch zwei planparallele, entgegengesetzt gleich groß geladene Metallplatten. Zwischen den Platten bildet sich ein homogenes elektrisches Feld aus

$$\frac{Q}{A} = \epsilon_0 \frac{U}{l}$$

Für den leeren Raum hat man damit die universelle Proportionalität der elektrischen Flussdichte D zur elektrischen Feldstärke E über die elektrische Feldkonstante.

Im elektrostatischen Feld haben wir die Spannungsverteilung als Potentialflächen eingeführt, wobei der Vektor E der elektrischen Feldstärke immer senkrecht darauf steht. Sind D und E nun gleichgerichtet, so heißt das dass die Potentialflächen von den Flussröhren im leeren Raum stets senkrecht durchsetzt werden.

Da auch die Oberflächen stromloser Leiter Potentialflächen sind, werden sie von den Flussröhren im

leeren Raum senkrecht getroffen. An den Enden der Flussröhre sitzen positive bzw. negative Ladungen von genau dem Ausmaß, wie die Röhre des elektrischen Flusses führt.

9.38 Wie ist der Begriff der Kapazität einer Zweileiteranordnung erklärt? Geben Sie auch die Voraussetzungen dafür an?

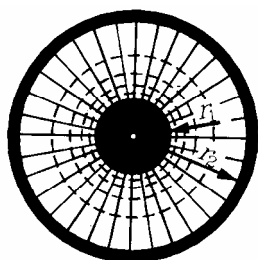


Abb. 9.20 Schnitt durch einen Kugelkondensator. Die Feldkonfiguration im Bereich $r_1 \leq r \leq r_2$ entspricht der einer Punktladung im Zentrum. Im Außenraum gibt es kein elektrisches Feld

Man ersetzt die Punktladungen durch eine konzentrische Metallkugel, mit dem Radius r_1 , auf deren Oberfläche die Ladungsmenge Q gleichmäßig verteilt ist. Nun umgibt man die Kugel mit einer konzentrischen Metallkugelschale, mit dem inneren Radius r_2 , welche die entgegengesetzt gleich große Überschussladung $-Q$ besitzt, ändert sich nichts. Die Konfiguration des Feldes der Punktladung bleibt die der einzelnen Punktladung im leeren Raum. Im Außenraum verschwindet allerdings das elektrische Feld, weil der Fluss durch die an der Innenfläche befindliche Ladung $-Q$ genau kompensiert wird. Das bezeichnet man als typische Zweileiteranordnung.

Die Spannung zwischen den beiden Leiter ergibt sich, wenn wir den Bezugssinn von innen nach außen annehmen als Potentialdifferenz zu:

$$U = \frac{Q}{\epsilon_0 4\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Daraus folgt nun mit $C = Q/U$ die Formel für die Kapazität des Kugelkondensators zu:

$$C = \epsilon_0 * \frac{4\pi r_1 r_2}{r_2 - r_1}$$

9.39 Welche SI – Einheit ist der Kapazität zugeordnet?

Einheit: $1F = 1C/V = 1As/V$

9.40 Wie lauten die Formeln für die Kapazität eines leeren Plattenkondensators und eines leeren Kugelkondensators?

Plattenkondensator:
$$C = \varepsilon_r \frac{\varepsilon_0 A}{l}$$

Kugelkondensator
$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{4\pi r_1 r_2}{r_2 - r_1}$$

9.41 Was verstehen Sie unter einem „Kontinuumsmodell“?

Wenn man einen Körper vom makroskopischen Standpunkt aus betrachtet, d.h. man arbeitet auf der Basis von Längenskalen, bei der die Struktur der Materie nicht zutage tritt. Die physikalischen Felder erscheinen dann als räumlich kontinuierlich, abgesehen von einzelnen Punkten, Kurven oder Flächen.

9.42 Was ist ein „Dielektrikum“?

Als Dielektrikum bezeichnet man in dem Zusammenhang mit elektrischen Felder und Kondensatoren das Isoliermaterial (z.B. Luft) zwischen zwei Platten.

9.43 Was bedeutet „elektrische Polarisierung“?

Bringt man in das elektrische Feld zweier Metallplatten einen elektrischen Leiter ein, so ordnen sich seine positiven Ladungsträger in Richtung der negativ geladenen Metallplatte, und umgekehrt. Dadurch erfolgt eine Verkürzung der Flussröhren, was bewirkt, dass die Spannung absinkt, da anstatt des Abstandes l nun nur mehr der Abstand $l-d$ als wirksame Länge der Flussröhren auftritt.

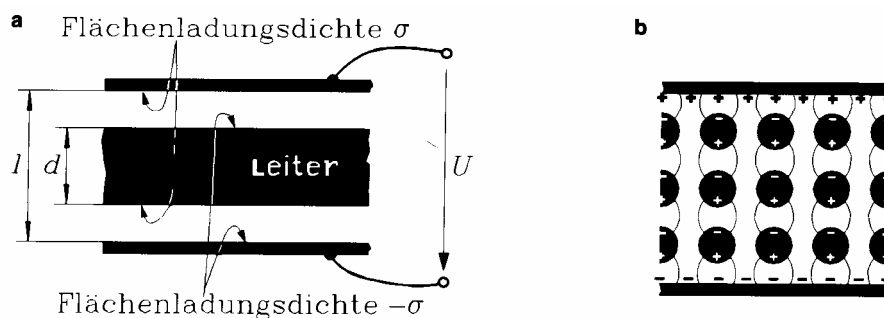


Abb. 9.22 **a** Bringt man einen Leiter zwischen zwei entgegengesetzt gleich groß geladene Metallplatten, so sinkt bei gleichbleibender Ladung die Spannung im Verhältnis $(l-d)/l$. **b** Die Influenz einer Anordnung von Metallkugeln gibt ein grobes Bild der elektrischen Polarisierung in einem Dielektrikum

9.44 Unter welchen Umständen bezeichnet man ein Dielektrikum als isotrop?

Wenn die elektrische Flussdichte D in jedem Feldpunkt mit der elektrischen Feldstärke E übereinstimmt, so spricht man von einem isotropen Dielektrikum.

9.45 Wie lautet die Verknüpfungsbeziehung zwischen elektrischer Feldstärke und elektrischer Flussdichte in isotropen Dielektrika?

Sie lautet: $D = \epsilon \cdot E$

Die Größe ϵ wird als Permittivität bezeichnet. Sie wird üblich aus dem Produkt $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$ berechnet. Wobei ϵ_0 die elektrische Feldkonstante ist, und ϵ_r die Permittivitätszahl ist. Ihr Wert hängt von der Art des Stoffes ab.

9.46 Welche SI – Einheiten sind der Permittivität und der Permittivitätszahl zugeordnet?

Einheit der Permittivität: $1 \text{As/Vm} = 1 \text{F/m}$

Einheit der Permittivitätszahl: sie besitzt keine Einheit

9.47 Wann bezeichnet man ein Dielektrikum als linear, und wann als nichtlinear?

Bei nichtlinearen ändert sich sein Permittivität durch zum Beispiel Temperatur, Druck, Stärke des elektrischen Feldes, usw. Stoffe bei denen das elektrische Feld, sowie die elektrische Flussdichte proportional zueinander sind heißen lineare Dielektrika.

9.48 Was verstehen Sie unter „Dielektrizitätskonstante“ und was unter „Dielektrizitätszahl“?

Bei linearen Dielektrika bezeichnet man die Permittivität als Dielektrizitätskonstante, und die Permittivitätszahl als Dielektrizitätszahl.

9.49 Welchen Wert besitzt die Dielektrizitätszahl von Luft unter normalen Bedingungen?

$\epsilon_r = 1,00059$ also ungefähr 1

9.50 Wie beschreiben Sie ein lineares homogenes isotropes Dielektrika?

→ linear: es ändert sich die Permittivität nicht durch äußere Einflüsse, bzw. bleibt trotz Änderungen in einen Bereich der Toleranz

→ homogen: seine lokalen makroskopischen Eigenschaften sind auf den ganzen Körper gleich verteilt, d.h. er besitzt überall konstante Permittivität

→ isotrop: Die Richtung der elektrischen Flussdichte D stimmt in jeden Punkt mit jener des elektrischen Feldes überein.

10 Schaltungen mit Kondensatoren

10.1 Nach welchem Prinzip sind elektrische Kondensatoren aufgebaut?

Zwei gegeneinander elektrisch isolierte Leiter, Elektroden genannt, nach Grundmuster der Plattenanordnung(parallel), und dazwischen ein Dielektrikum. Die Elektroden sind jeweils mit einem der beiden äußeren Anschlüsse leitend verbunden, und können so über den Stromkreis entgegengesetzt gleich große Ladungen aufnehmen.

10.2 Wozu dient ein Dielektrikum in Kondensatoren?

Das Dielektrikum dient zur Isolierung, und sorgt für eine hohe Spannungsfestigkeit(verhindert elektrische Durchschläge) und erhöht die Kapazität.

10.3 Wie lautet die Grundgleichung von Kondensatoren und was müssen Sie bei ihrer Angabe hinsichtlich der Bezugssinne beachten?

Grundgleichung: $Q = C \cdot U$

Bezugssinn: Wenn der momentane Richtungssinn der Spannung mit dem Bezugssinn übereinstimmt(U ist positiv), dann trägt die mit Q gekennzeichnete Elektrode die positive Überschussladung Q , die andere Elektrode die entgegengesetzt gleich große Ladung $-Q$.

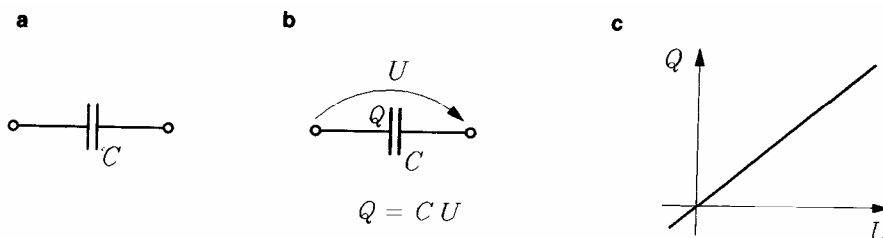


Abb 10.1 a Schaltzeichen für Kondensatoren, b Angabe der Bezugssinne für Anschlußspannung und Ladung, c Spannungs-Ladungs-Kennlinie des idealen Kondensators

10.4 Was bedeutet „Ein Kondensator ist geladen“?

Es bedeutet, dass die Ladungsdifferenz, also die Spannung, zwischen den zwei Platten des Kondensators so hoch ist, dass kein Strom mehr fließen kann.

Wenn man von der Ladung eines Kondensators spricht meint man damit natürlich immer die Ladung einer Platten. Die andere muss notwendigerweise immer die gleich große entgegen gesetzter Ladung tragen. Also ist der Kondensator insgesamt ungeladen!

10.5 Wodurch ist das Modell eines idealen Kondensators gekennzeichnet?

Es ist durch zwei Platten mit einem Dielektrikum dazwischen gekennzeichnet. Ebenfalls gilt für das Dielektrikum die Linearität, d.h. die Dielektrizitätskonstante ist von der Anschlussspannung unabhängig, und auch durch äußere Einflüsse wie Druck, Temperatur usw. bleibt sie in der Toleranz. Ebenfalls gilt die Beziehung von $Q = C \cdot U$.

10.6 Wie lautet die dynamische Gleichung idealer Kondensatoren?

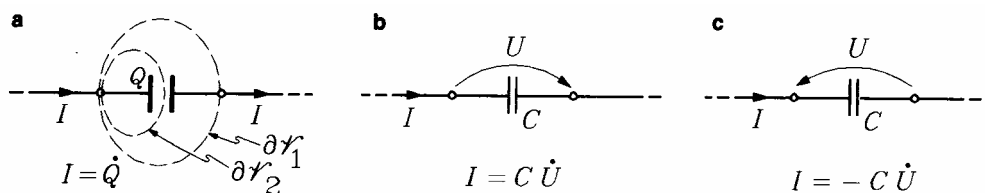


Abb 10.2 a Die zeitlich Änderungsrates der Ladung einer Kondensatorelektrode ist gleich dem zufließenden Strom. Bezugssinne von Strom und Spannung und zugehörige Elementgleichung im Verbraucherbezugssystem **b** und im Erzeugerbezugssystem **c**

$$I = C \cdot dU/dt$$

d.h.: An einem idealen Kondensator ist die Stromstärke proportional der zeitlichen Änderungsrate der Anschlussspannung. Der konstante Proportionalitätsfaktor ist die Kapazität des Kondensators.

10.7 Wie ist die Zeitkonstante einer R-C – Reihenschaltung erklärt und worin liegt ihre Bedeutung?

$$\tau = R \cdot C$$

R... Widerstand(e) über den/die sich der Kondensator auflädt

C... Kapazität des Kondensators

Sie gibt Auskunft über die Ladedauer des Kondensators. Man sagt, dass der Kondensator nach 5τ vollständig geladen ist.

Ebenfalls kann man mit ihre feststellen ob andere zeitliche Vorgänge im Bezug auf das Laden des Kondensators, schnell oder langsam ablaufen.

10.8 Wie lauten die Formel für die Ersatzkapazität einer direkten Parallelschaltung und einer direkten Reihenschaltung von Kondensatoren?

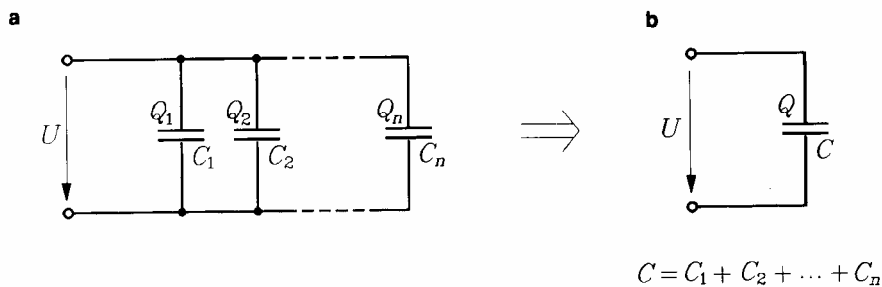


Abb. 10.8 Parallelschaltung von Kondensatoren. a Ursprüngliche Schaltung. b Ersatzkondensator

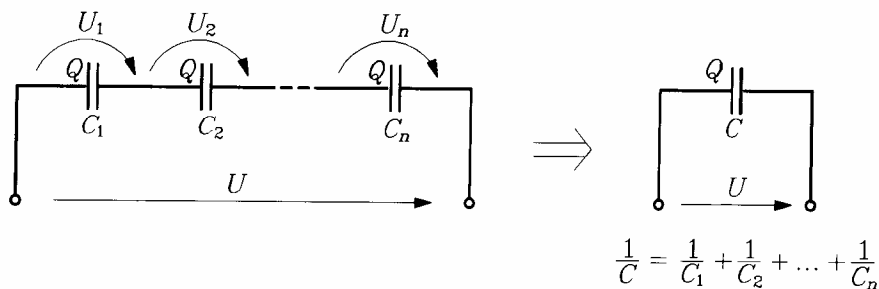


Abb. 10.9 Reihenschaltung von Kondensatoren. a ursprüngliche Schaltung. b Ersatzkondensator

10.9 Auf welche Weise lässt sich der Kapazitätsbegriff auf mehr als zwei Leiter erweitern?

Die Erweiterung des Kapazitätsbegriffes wird dadurch gemacht, indem man an jedem Anschlusspunkt einen Knoten zeichnet, und je zwei Knoten mit Kondensatoren verbindet.

10.10 Was bedeutet der Begriff „Teilkapazität“ und wie hängt er mit den elektrischen Flüssen zusammen?

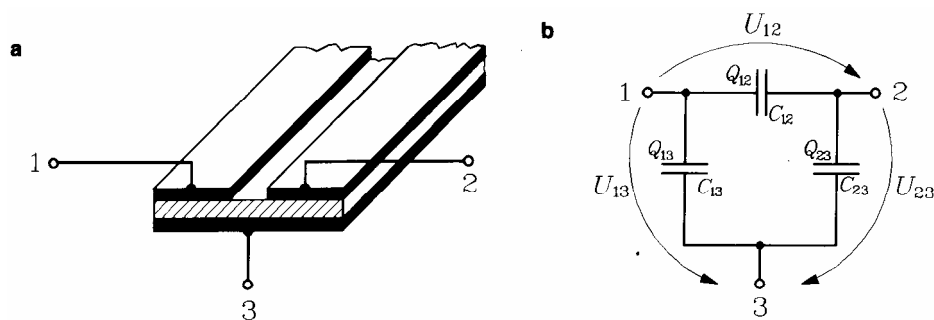


Abb. 10.10 Kapazitive Ersatzschaltung einer Dreileiteranordnung

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

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

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

Die Summanden der rechten Seiten der obigen Gleichungen stellen jeweils elektrische Teilflüsse in der ursprünglichen Anordnung dar. So ist z.B. $C_{12}U_{12}$ der elektrische Fluss vom Körper 1 zum Körper 2 usw.

Als Teilkapazität bezeichnet man die einzelnen Kapazitäten, welche sich zwischen den einzelnen Knoten befinden.

11 Ergänzendes zum elektrischen Feld

11.1 Was besagen die Sätze von den Extremwerten des elektrostatischen Potentials und der elektrischen Feldstärke?

→ In einem leeren, ladungsfreien Feldgebiet liegen die Extremwerte (Maxima und Minima) des elektrostatischen Potentials immer an den Randgebieten.

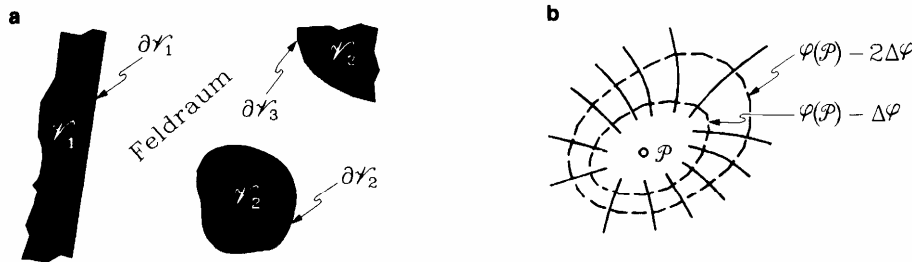


Abb. 11.1 a Schnitt durch eine Anordnung von Leitern. Die Ränder des sonst ladungsfreien Feldgebiets sind die Leiteroberflächen. b Gäbe es in einem inneren Feldpunkt \mathcal{P} ein lokales Maximum des elektrostatischen Potentials, so müßten in seiner unmittelbaren Umgebung Flußröhren entspringen. Dies steht im Widerspruch zur vorausgesetzten Ladungsfreiheit

→ In einem leeren, ladungsfreien Feldgebiet, liegen die Maximalwerte des Betrages der elektrischen Feldstärke (und damit auch der elektrischen Flussdichte) immer an den Rändern.

Wie groß ihre Maximalwerte sind kann man im Allgemeinen nicht so einfach zu rechnen. Es ist aber sehr hilfreich zu wissen, wo sie zu finden sind.

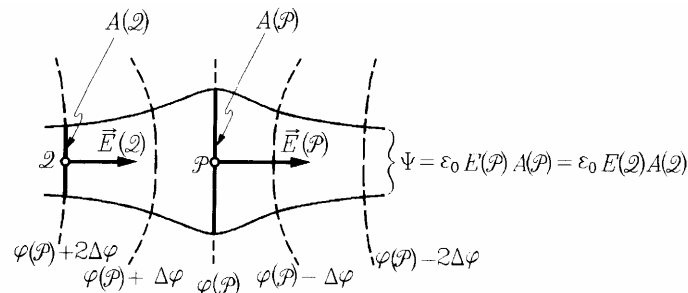


Abb. 11.2 Die Annahme, daß der Betrag der elektrischen Feldstärke in einem inneren Punkt \mathcal{P} des ladungsfreien Feldgebiets ein Maximum besitzt, führt auf einen Widerspruch

11.2 Wie sind die zu einem Vektorfeld gehörenden Vektorlinien erklärt und wie entstehen daraus Feldlinien?

Angenommen in einem räumlichen Bereich ist ein Vektorfeld gegeben, d.h. jedem Ort ist ein Vektor nach Betrag und Richtung zugeordnet. Mit Hilfe der Vektoren und der Richtung der Vektoren lässt sich nun einen ganze Kurvenschar darstellen, nämlich das zum Vektorfeld gehörende System von

Vektorlinien. Durch jeden Ort gibt es dann eine Kurve mit deren Verlauf man die Richtung des Vektors darstellen kann.

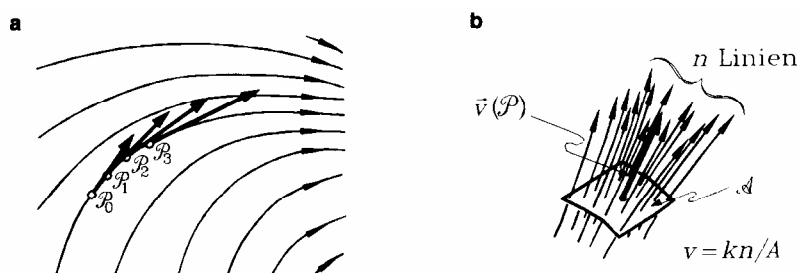


Abb. 11.3 **a** Jedem Vektorfeld ist eine Schar von Vektorlinien zugeordnet. **b** Durch die Verknüpfung der Liniendichte mit dem Vektorbetrag entsteht aus der Schar von Vektorlinien ein System von Feldlinien

Zum Erhalt der Feldlinien spannt man dazu in einen Ort ein Flächenstück mit dem Flächeninhalt A normal zur Feldrichtung. Die Flächendichte der gerichteten durchtretenden Vektorlinien ist proportional dem Betrag des Vektors. D.h. wenn das Flächenstück von n Vektoren gerichtet durchsetzt wird dann gilt:

$$v = k * \frac{n}{A}$$

mit einer für den gesamten Bereich Konstanten k .

11.3 Was sind elektrische Feldstärkelinien und elektrische Flussdichtelinien und wann sprechen wir einfach von elektrischen Feldlinien?

Die zur elektrischen Feldstärke gehörenden Feldlinien bezeichnet man als elektrische Feldstärkelinien.

Jene der elektrischen Flussdichte bezeichnet man als elektrische Flussdichtelinien.

Im leeren Raum und im Inneren eines linear homogen isotropen Dielektrikums die die Vektoren der elektrischen Feldstärke und der elektrischen Flussdichte über einem in ganzen Bereich konstanten Faktor proportional. Durch passende Wahl von k lassen sich dadurch die Flussdichtelinien und Feldstärkelinien in Übereinstimmung bringen, sodass zwischen ihnen nicht mehr unterschieden werden muss. Dann spricht man von elektrischen Feldlinien.

11.4 Welche geometrische Bedingung gilt für die Vektorlinien der elektrischen Feldstärke an der Oberfläche stromfreier Leiter? Wie ist sie zu begründen?

Die elektrischen Feldstärkelinien bilden immer einen rechten Winkel mit Oberfläche eines stromfreien Leiters.

Die Überschussladungen eines stromfreien Leiters stehen an der Leiteroberfläche zur Verfügung. Sie sind in der ersten oder zweiten Atomlage angeordnet. Knapp oberhalb der Oberfläche finden wir nie eine Tangentialkomponente des elektrischen Feldes, da sich die Überschussladungen sonst bewegen würden (\rightarrow es wäre ein Stromfluss notwendig!).

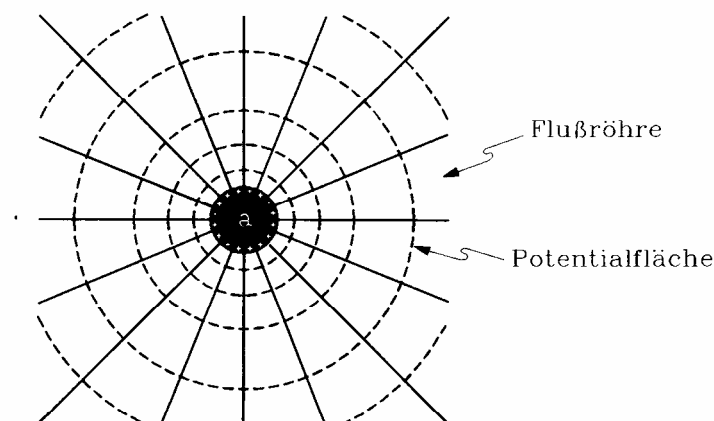


Abb. 11.5 Schnitt durch einen geladenen Leiter und das umgebende elektrische Feld. Dargestellt sind die Spuren der Flußröhren (ausgezogen) und der Potentialflächen (strichliert)

11.5 Warum verschwindet im ladungsfreien, einfach zusammenhängenden Hohlraum eines stromfreien Leiters das elektrische Feld?

Da sich die Überschussladungen auf beiden Körper verteilen, sie bleiben dennoch gleich erhalten, ändert sich der elektrische Fluss, und somit auch das elektrische Feld. Daraus folgt, dass das elektrische Feld nun beide Körper umschließt.

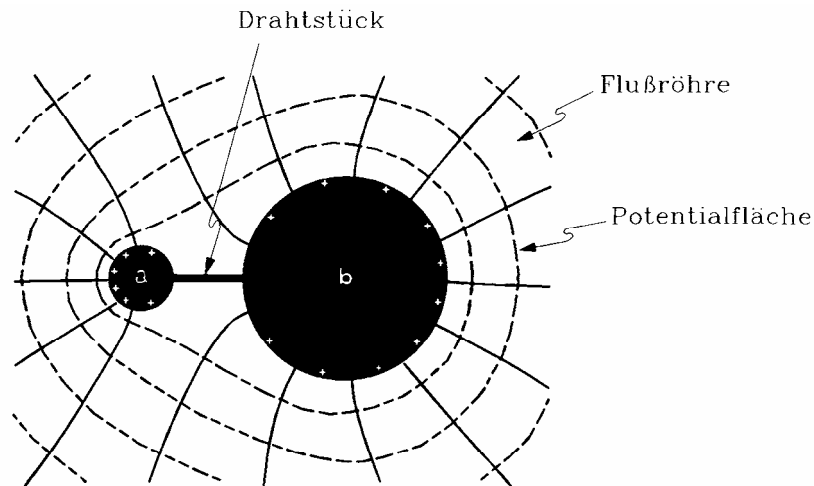


Abb. 11.7 Die beiden Leiter aus Abb. 11.6 werden über einen Draht leitend verbunden. a, b und das Drahtstück bilden zusammen einen einzigen stromfreien Leiter

11.6 Wozu dient ein Faraday – Käfig und wie funktioniert er?

Man betrachtet vorerst einen ladungsfreien Hohlraum. Der Leiter besitzt einen festen Wert des Potentials. Nun treten nach dem Satz von Extremwerten des Potentials dessen Maxima und Minima immer am Rand des Feldgebietes auf. Daher finden wir im inneren des Körpers keinen Ort, dessen Potential größer oder kleiner ist als jenes des Leiters. Demnach besitzt der gesamte Bereich ein konstantes Potential. Im ladungsfreien, einfach zusammenhängenden Hohlraum eines stromfreien Leiters gibt es kein elektrisches Feld. Man nennt diese Abschirmung auch elektrostatische Abschirmung. Genau nach diesem Prinzip funktioniert der Faraday – Käfig. Wichtig ist dabei, der Hohlraum muss ladungsfrei sein.

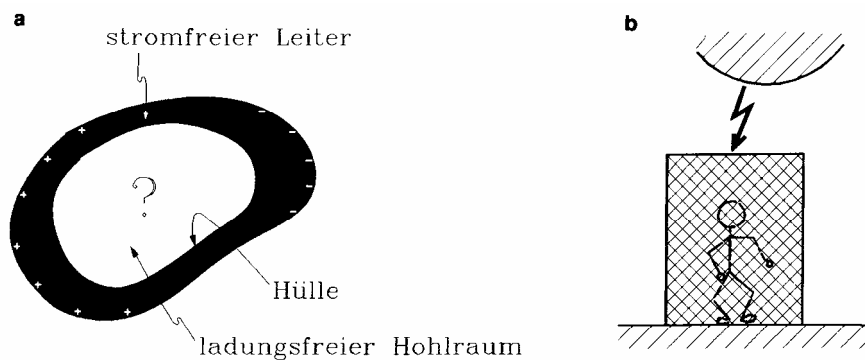


Abb. 11.9 Elektrisches Feld im Hohlraum eines Leiters. **a** Im ladungsfreien Hohlraum gibt es kein elektrisches Feld. **b** Ein Faraday-Käfig schirmt den umhüllten Raum gegen äußere Felder ab

11.7 Warum wirkt eine elektrostatische Abschirmung zwar von außen nach innen, i. a. nicht umgekehrt?

Bringt man in einem Hohlraum eine Punktladung ein, so ordnen sie die Ladung durch Influenz an der Innenseite des Hohlkörpers an. D.h. es entstehen nun im inneren des Hohlkörpers ein elektrisches

Feld, sowie der elektrische Fluss. Da am äußeren Rand sich die anderen Ladungsträger anordnen, besitzt man auch einen elektrischen Fluss nach außen. Die folgt unmittelbar aus dem Satz von Hüllenfluss. Daher funktioniert die elektrische Abschirmung i. a. nicht von innen nach außen.

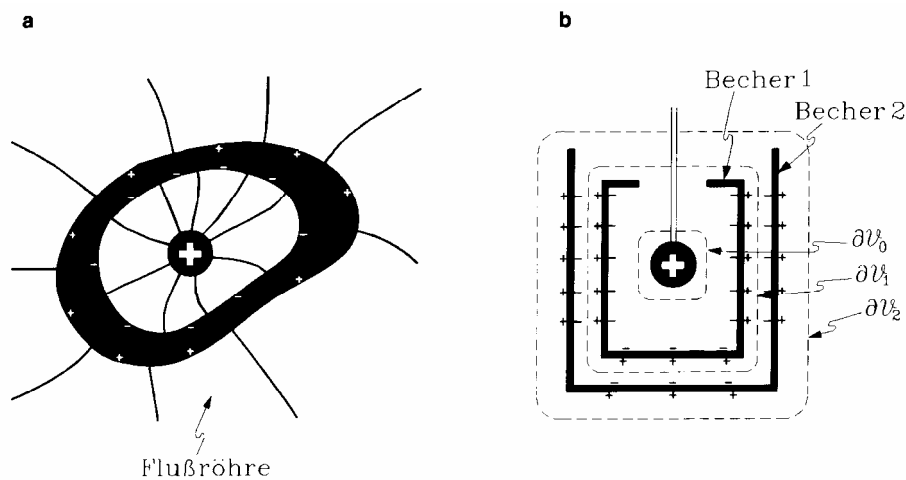


Abb. 11.10 Elektrisches Feld im Hohlraum eines Leiters. **a** Der elektrische Fluß einer Ladung wird an der leitfähigen Umhüllung zwar unterbrochen, er setzt sich aber i.a. außen fort. **b** Versuch mit zwei ungeladenen Metallbechern und einem geladenen Körper

11.8 Wie sind elektrostatische Bandgeneratoren grundsätzlich aufgebaut und wie funktionieren sie?

Legt man ein geladenes Metallplättchen auf die Oberfläche eines Leiters, so wandert die Ladung auf den Leiter. Dies geht so lange, bis beide Körper die gleiche Ladung besitzen. Das gleiche passiert auch beim Becher Versuch 1.

Streift man aber die Ladungen am Becherinneren ab, Versuch 2, so geht dies ewig lang. Durch das Eindringen des Ladungsträgers in den Hohlraum, ordnen sich die positiven Ladungsträger des Bechers außen an, durch Influenz, das heißt es kann immer mehr und mehr Ladung an der Becherinnerseite angebracht werden.

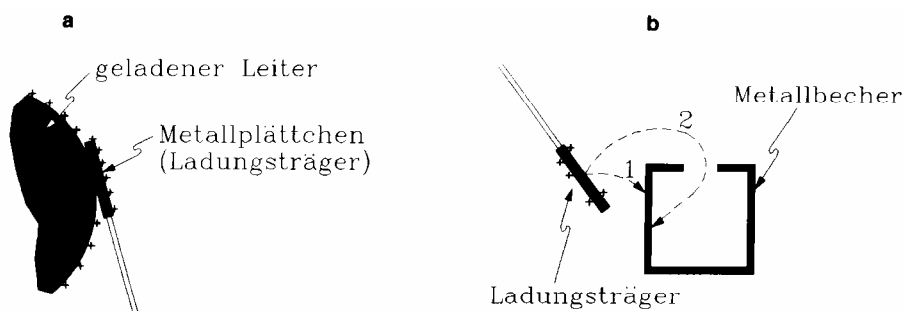


Abb. 11.11 Mit Hilfe eines Metallplättchens kann man elektrische Ladung von einem geladenen Leiter abschöpfen **a** und einem anderen Leiter zuführen **b**

Die Ladung wird über ein umlaufendes Band aus Seide, Gummi oder Kunststoff mit Hilfe eines Metallkammes, welcher an einer Hilfsspannungsquelle liegt, übertragen. Ein ähnlicher Kamm nimmt die Ladung im Inneren der Hohlkugel wieder ab und führt sie restlos der Kugeloberfläche zu. Bandgeneratoren werden für Spannungen bis 12MV gebaut. Eine Ausführung für 2MV ist etwa 2m

hoch, mit einem Kugeldurchmesser von 1m. Der entnehmbare Strom liegt in der Größenordnung von 0,1 mA, d.h. die abgebbare Leistung beträgt etwa 200W.

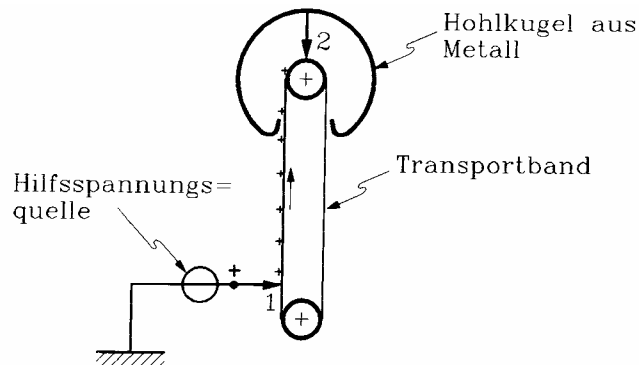


Abb. 11.12 Schema des Bandgenerators von van de Graaff

11.9 Welchen Wert besitzt das mittlere elektrische Erdfeld in Bodennähe nach Betrag und Richtung?

Richtung: von oben nach unten

Betrag: $E=130 \text{ V/m}$

11.10 Warum lässt sich das elektrische Erdfeld technisch nicht nutzen?

Der Boden ebenso wie der menschliche Körper ein sehr guter Leiter. Sind wir nun mit dem Boden in Kontakt so bilden wir eine gemeinsame Potentialfläche vom Scheitel bis zur Sohle welche null ist. Dies ist auch der Grund, warum man elektrische Felder nicht einfach mit einem gewöhnlichen Voltmeter ausmessen kann.

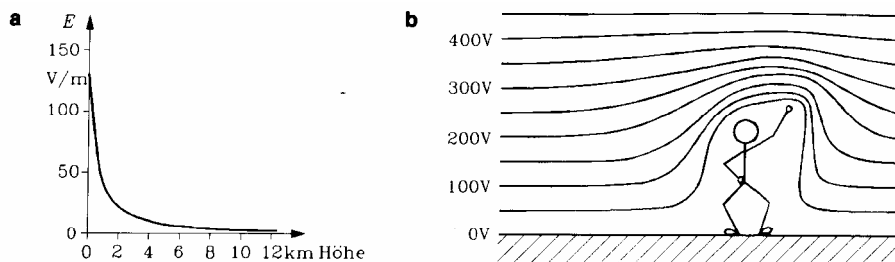


Abb. 11.13 a Verlauf der mittleren Stärke des elektrischen Erdfeldes mit der Höhe über dem Erdboden. b Die ursprünglich gleichförmige Potentialverteilung wird durch leitfähige Körper verzerrt

12 Verteilte elektrische Ströme

12.1 Welches geometrische Bild können Sie zur Veranschaulichung eines elektrischen Strömungsfeldes verwenden?

Man zerlegt einen elektrischen Leiter lückenlos in lauter kleine Strömungsröhren, welche alle den gleichen Betrag des Stromes besitzen. Je nach Wahl eines beliebig kleinen Stromquantums, kann die Struktur beliebig verfeinert werden. Will man nun den Gesamtstrom berechnen so muss nur die Anzahl der Strömungsröhren zählen.

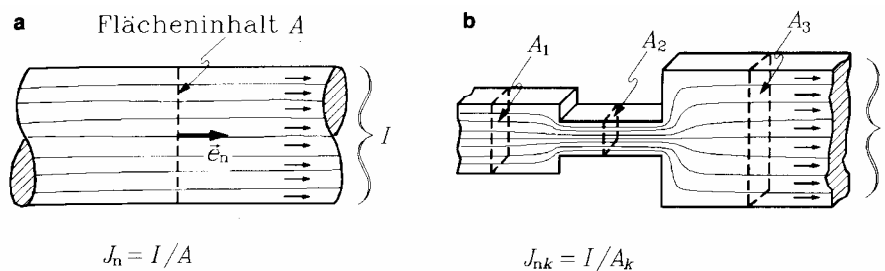


Abb. 12.1 a Gleichströme und Wechselströme niedriger Frequenz verteilen sich in einem Draht gleichförmig über den Querschnitt. b In der Umgebung sprunghafter Querschnittsänderungen ist die Stromverteilung inhomogen

12.2 Wie ist die elektrische Stromdichte erklärt?

Die lokale Beschreibung des elektrischen Strömungsfeldes erfolgt durch die elektrische Stromdichte, einer vektoriellen Größe. Betrachtet man ein kleines Flächenstückchen in einem elektrischen Strom. Die Stromstärke hat dann ihren Höchstwert, wenn das Flächenstück genau senkrecht in der Strömung liegt.

D.h. der Betrag J der Stromdichte in P ist gleich dem Quotienten I_0/A , und ihre Richtung ist die lokale Strömungsrichtung.

$$J = \frac{I_0}{A} \quad \vec{J} = J \cdot \vec{e}$$

12.3 Welche SI – Einheit ist der elektrischen Stromdichte zugeordnet?

Einheit: $[J] = A/m^2$

12.4 Was verstehen Sie unter einem homogenen, was unter einem inhomogenen elektrischen Strömungsfeld?

Ist die Stromdichte in einem gewissen Bereich räumlich konstant, so spricht man von einem homogenen Strömungsfeld. Ansonsten spricht man von einem inhomogenen Strömungsfeld.

12.5 Wie lässt sich die elektrische Stromstärke allgemein als Flächensumme der elektrischen Stromdichte darstellen?

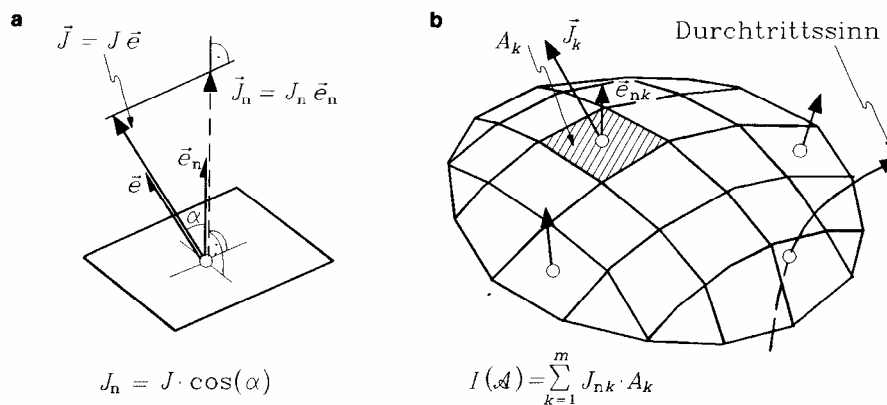


Abb. 12.2 Die einer Fläche \mathcal{A} zugeordnete elektrische Stromstärke $I(\mathcal{A})$ lässt sich als Flächensumme der elektrischen Stromdichte darstellen. **a** Normalprojektion der Stromdichte auf die Normalenrichtung. **b** Zerlegung der Fläche und Bildung der Flächensumme

Man verwendet hier ein ähnliches Bild wie bei der elektrischen Flussdichte. Man unterteilt eine Oberfläche in kleine Flächenstücke und berechnet den Normalwert J_n ihrer elektrischen Stromdichte. Der gesamte Strom ist nun die Summe der einzelnen Stromdichten mal der Fläche.

$$I(A) = \sum_{k=1}^m J_{nk} A_k \quad \text{oder} \quad I(A) = \int_A J_n dA$$

12.6 Wann spricht man von „Flächenströmen“?

In manchen Fällen sind elektrische Ströme in dünnen Schichten konzentriert, z.B. an der Oberfläche von Körper. Man spricht dann von Flächenströmen und benutzt für ihre lokale Erfassung die Flächenstromdichte.

12.7 Wie ist die elektrische Flächenstromdichte erklärt? Welche SI – Einheit ist ihr zugeordnet?

In einer Flächenstromverteilung kennt man am Ort P die Strömungsrichtung. Tritt durch ein senkrecht dazu stehendes, kurzes Kurvenstück der Länge s eine elektrischer Strom dann ist der Betrag der Flächenstromdichte gleich den Quotienten aus Stromstärke und Weglänge.

$$K = \frac{I_0}{s} \quad \vec{K} = K * \vec{e}$$

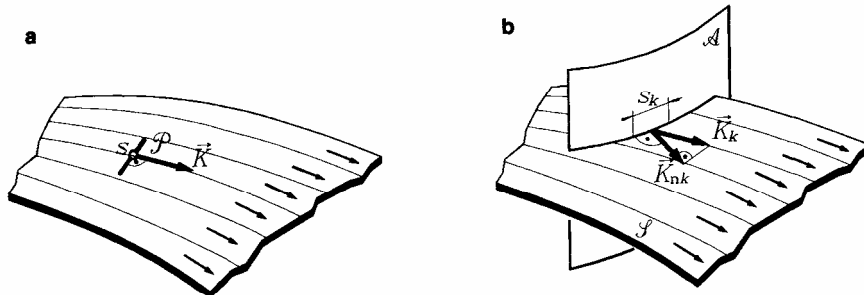


Abb. 12.3 a Ausschnitt einer Flächenstromverteilung. b Die Fläche \mathcal{A} wird von einer Flächenstromverteilung auf \mathcal{S} durchsetzt. Die Richtungen aller Vektoren \vec{K}_k und \vec{K}_{nk} liegen tangential zur Fläche \mathcal{S}

12.8 Was versteht man unter „Durchflutung“?

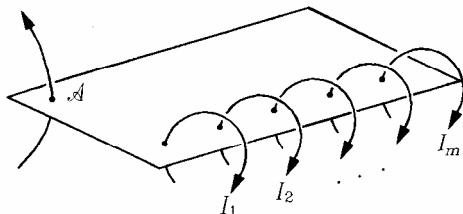


Abb. 12.4 Eine Fläche \mathcal{A} wird von einer Anzahl von Linienströmen durchsetzt

Man stellt den elektrischen Strom als Summe von Linienströmen dar, wobei Linienströme eine Anzahl stromdurchflossener Drähte repräsentieren. In diesem Zusammenhang nennt man den Gesamtwert $I(A)$ der Stromstärke auch die elektrische Durchflutung.

$$I(A) = \sum_{k=1}^m I_k$$

12.9 Wie lautet das Ohmsche Gesetz in vektorieller Form?

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \quad \text{oder} \quad \vec{J} = \gamma \vec{E}$$

E... elektrisches Feld

ρ ... spezifischer elektrischer Widerstand

J... elektrische Stromdichte

γ ... Konduktivität = $1/\rho$

12.10 Welchen Wert besitzt die elektrische Leitfähigkeit von Leitungskupfer bei 20°?

$$\rho = 1,78 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$$

$$\gamma = 56 \cdot 10^6 \text{ S/m}$$

13 Elementare Methoden der Berechnung elektrischer Felder

13.1 Was besagt das Überlagerungsprinzip für elektrische Felder und worauf müssen Sie bei seiner Anwendung im speziellen achten?

Angenommen eine gewisse Verteilung elektrischer Ladungen erzeugt ein bestimmtes elektrisches Feld. Nimmt man weiter an, eine andere Ladungsverteilung bewirkt für sich allein in P die Feldstärke $E_2(P)$. Beide Ladungsverteilungen zusammen erzeugen dann in P die Feldstärke $E(P) = E_1(P) + E_2(P)$. Diese Erfahrungstatsache gilt auch für das Potential, und man bezeichnet es als Überlagerungs- oder Superpositionsprinzip.

Man muss dabei streng darauf achten, dass bei einer tatsächlichen Überlagerung die beiden Ladungsverteilungen nicht geändert werden.

13.2 Wie lauten den Formel für das Potential und die Feldstärke einer Ansammlung ruhender Punktladungen im leeren Raum?

$$\varphi(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{Q_k}{r_{Pk}} \quad \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{e_{Pk} Q_k}{r_{Pk}^2}$$

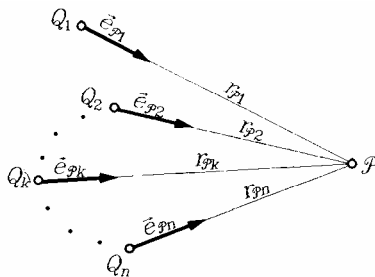


Abb. 13.1 Ansammlung von Punktladungen. Das elektrische Feld am Ort P ist zu berechnen

13.3 Wie sieht das elektrische Feld eines Paares gleich großer Punktladungen in ihrer näheren Umgebung und in großem Abstand davon aus?

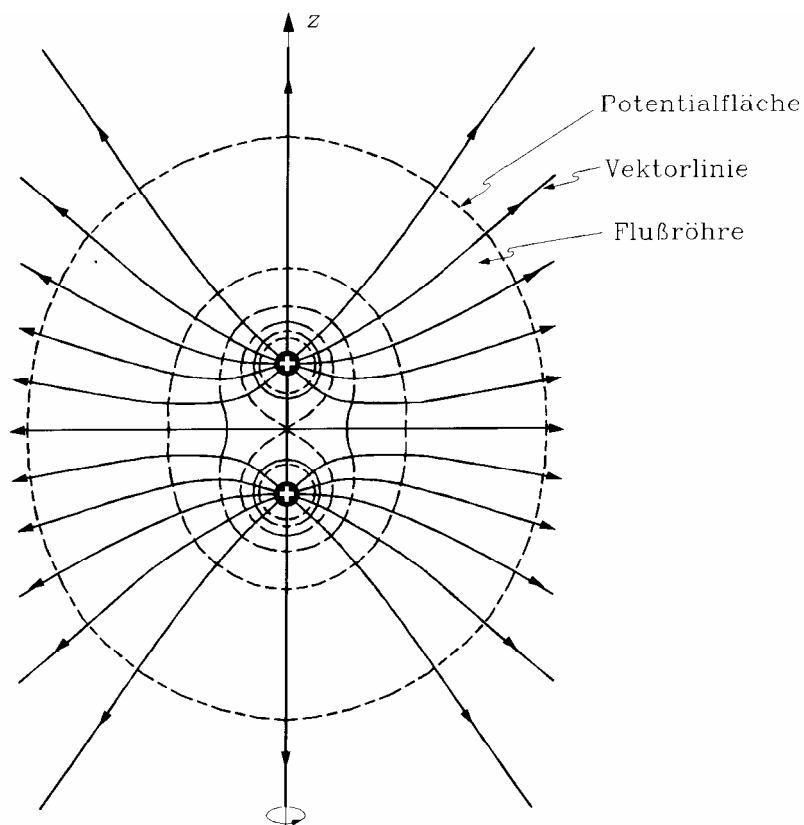


Abb. 13.3 Elektrisches Feld zweier gleich großer, positiver Punktladungen im Abstand l . Dargestellt sind Schnittlinien von Potentialflächen mit der Zeichenebene (strichliert, Potentialschritt $\Delta\varphi = Q/(4\pi\epsilon_0 l)$) und Vektorlinien der elektrischen Feldstärke (durchgezogen)

In näherer Umgebung sieht man je Punktladung ein elektrisches Feld. In weiter Ferne hingegen sieht man nur noch ein elektrisches Feld mit der Ladung $2Q$.

13.4 Welche Feldkonfiguration stellt sich in der Umgebung eines ungleichnamigen Punktladungspaars ein?

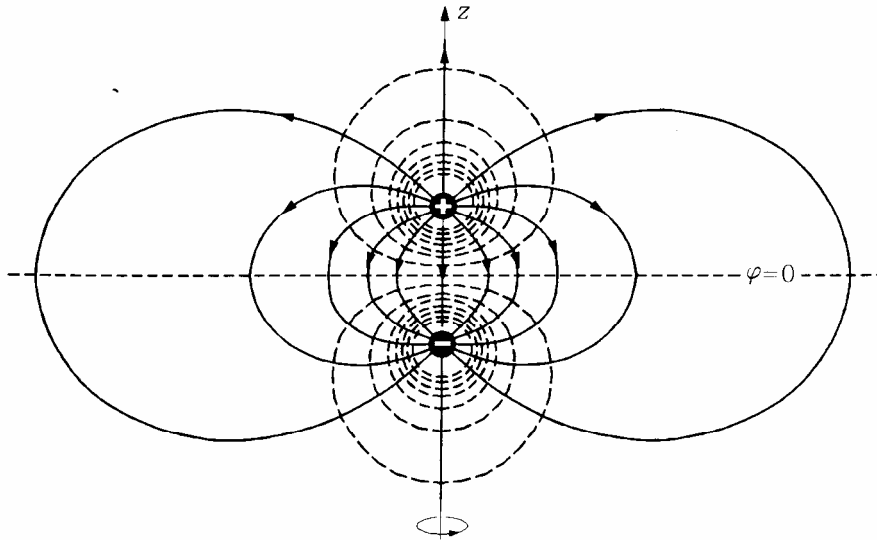


Abb. 13.5 Elektrisches Feld zweier entgegengesetzt gleich großer Punktladungen im Abstand l . Dargestellt sind Schnittlinien von Potentialflächen mit der Zeichenebene (strichliert, Potentialschritt $\Delta\varphi = Q/(8\pi\epsilon_0 l)$) und Vektorlinien der elektrischen Feldstärke (durchgezogen)

13.5 Wie ist das elektrische Moment zweier entgegengesetzt gleich großer Punktladungen erklärt?

Bedeutet \vec{l} den gerichteten Abstand der positiven von der negativen Ladung, so nennt man $\vec{p} = \vec{l}Q$ das elektrische Moment des Ladungspaars. Die Richtung des elektrischen Momentes weist stets von der negativen zur positiven Ladung.

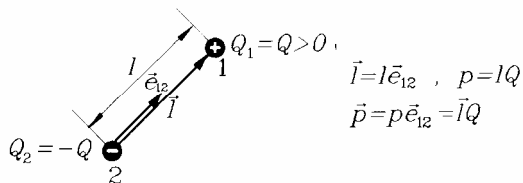


Abb. 13.6 Elektrisches Moment \vec{p} zweier entgegengesetzt gleich großer Punktladungen

13.6 Was verstehen Sie unter einem Punktdipol?

Man stellt sich den Dipol als punktförmiges Gebilde ohne räumliche Ausdehnung mit einer Richtung vor, d.h. der Dipol wird allein durch das elektrische Moment am Dipolort charakterisiert. Dieser Ort wird als Punktdipol bezeichnet.

13.7 Wie lauten die Formeln für das Potential und die Feldstärke eines Punktdipols in allgemeiner Lage?

$$\varphi(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_{P1}}{r_{P1}^2} \quad \vec{E}(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{3\vec{p}_{P1} - \vec{p}}{r_{P1}^3}$$

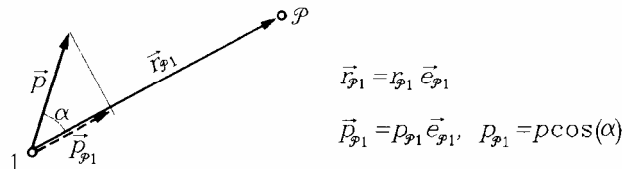


Abb. 13.9 Am Ort 1 sitzt ein elektrischer Dipol mit dem elektrischen Moment \vec{p} . Das elektrische Feld am Ort \mathcal{P} ist zu berechnen

13.8 Wie ist das elektrische Moment einer Ansammlung von Punktladungen erklärt und wann ist sein Wert unabhängig vom Bezugsort?

Das elektrische Moment einer Ansammlung von Punktladungen, ist durch die Summe der gerichteten Abstände mal den dazugehörigen Ladungen erklärt.

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

Es ist dann vom Bezugsort unabhängig, wenn die Gesamtladung gleich Null ist.

13.9 Unter welchen Umständen nimmt das elektrische Feld einer allgemeinen Ladungsverteilung den Charakter eines Dipolfeldes an?

Wenn entgegengesetzte Ladungen vorhanden sind. Das heißt man betrachtet das Feld einer Kombination aus negativen und positiven Ladungen. Besitzt man nur negative oder nur positive Ladungen, so kann man das elektrische Feld eines Ortes mit Hilfe des Überlagerungsprinzips ermitteln.

13.10 Wann sprechen wir von elektrischen Linienladungen? Geben Sie die allgemeinen Ausdrücke für das Potential und die Feldstärke einer Linienladung im leeren Raum an.

Ist entlang einer Kurve eine Überschussladung gleichmäßig verteilt, so spricht man von einer Linienladung.

Potential:
$$\varphi(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{\tau_k S_k}{r_{Pk}}$$

Feldstärke:
$$\vec{E}(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{e_{Pk} \tau_k S_k}{r_{Pk}^2}$$

13.11 Welche Gestalt besitzen die Potentialflächen und die Flussröhren in der Umgebung eines gleichförmig geladenen, geraden Stabes?

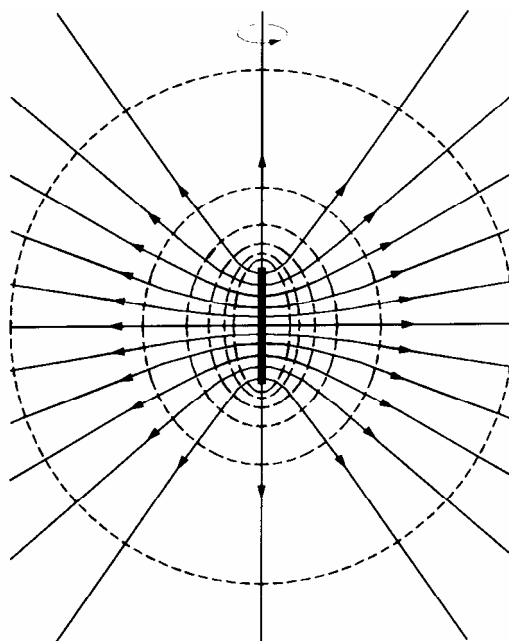


Abb. 13.13 Elektrisches Feld eines gleichförmig geladenen, dünnen Stabes. Die Potentialflächen werden durch eine Schar konfokaler gestreckter Rotationsellipsoide mit den Stabenden als Brennpunkten und der Stabachse als Rotationsachse gebildet. Dargestellt sind ihre Spuren (strichliert, Potentialschritt $\Delta\varphi = \tau/(8\pi\epsilon_0)$). Die Vektorlinien der elektrischen Feldstärke (durchgezogen) gehören zu einer Schar konfokaler Hyperbeln

13.12 Wie lauten die Formeln für Potential und Feldstärke einer gleichförmig geladenen Geraden (beidseitig unendlich ausgedehnt)? Welche Gestalt besitzen die zugehörigen Potentialflächen und Feldlinien?

Potential:
$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\rho_0}{\rho}$$

Feldstärke:
$$\vec{E} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \frac{\vec{e}_\rho}{\rho}$$

13.13 Was verstehen Sie unter einer Flächenladung? Geben Sie die allgemeinen Ausdrücke für das Potential und die Feldstärke einer Flächenladung im leeren Raum an.

Unter Flächenladung, versteht man die Ladung an der Oberfläche/Grenzfläche eines Körpers, welche an einer gewissen Fläche auftritt.

Potential:
$$\varphi(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{\sigma_k A_k}{r_{Pk}}$$

Feldstärke:
$$\vec{E}(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{\vec{e}_{Pk} \sigma_k A_k}{r_{Pk}^2}$$

13.14 Wie hängen die Werte der elektrischen Feldstärke im Raum zwischen und neben zwei parallelen gleichförmig geladenen Ebenen mit den Flächenladungsdichten zusammen, wenn die Ebenen gleich bzw. wenn sie entgegengesetzt gleich geladen sind?

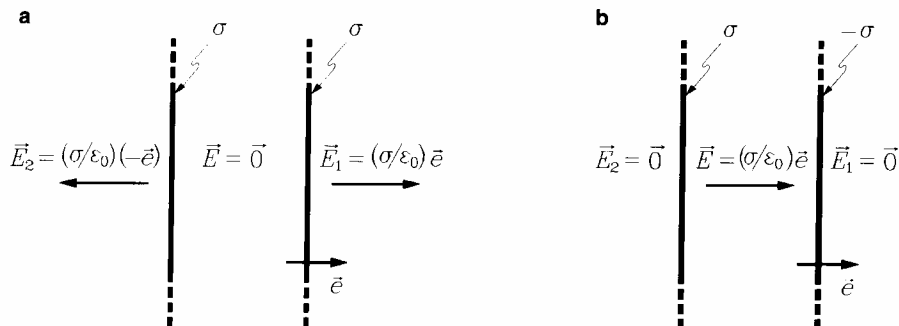


Abb. 13.20 Elektrisches Feld zweier paralleler Ebenen mit gleichen **a** bzw. mit entgegengesetzt gleichen **b**, gleichförmig verteilten Flächenladungen

13.15 Wie lauten die allgemeinen Ausdrücke für das Potential und die Feldstärke einer Raumladung?

Potential:
$$\varphi(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{\rho_k V_k}{r_{pk}}$$

Feldstärke:
$$\vec{E}(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{e_{pk} \rho_k V_k}{r_{pk}^2}$$

13.16 Wie verläuft die elektrische Feldstärke innerhalb und außerhalb einer gleichförmig elektrisch geladenen Vollkugel?

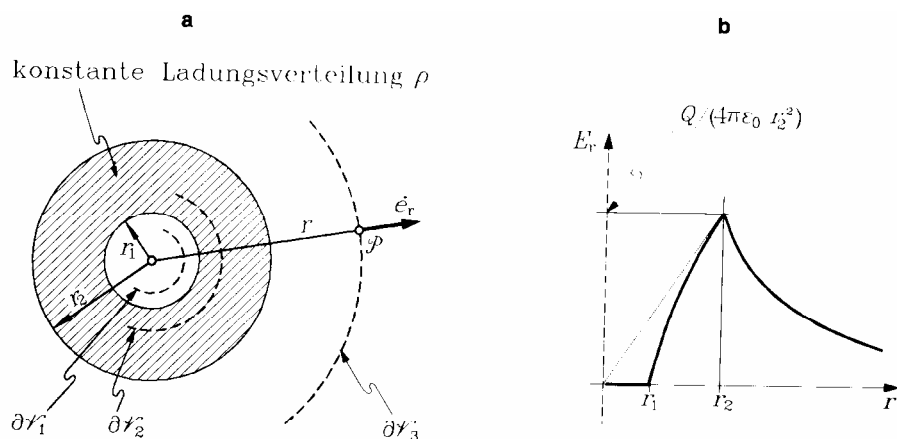


Abb. 13.22 Gleichförmig elektrisch geladene, dickwandige Kugelschale. **a** Im Bereich $r_1 \leq r \leq r_2$ ist die Ladungsdichte konstant. **b** Verlauf der elektrischen Feldstärke mit dem Abstand vom Zentrum

13.17 Auf welche Weise können Sie Ausschnitte bekannter Felder für die Ermittlung von Feldgrößen bei gegebenen Potential-Randwerten benützen? Geben Sie Beispiele an.

Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Die erste ist man bestimmt ein Feld derart, dass der Satz der Umlaufspannung, und der Satz vom Hüllenfluss erfüllt ist, und kann die lokalen Verknüpfungsbeziehungen verwenden.

Oder man verwendet die Eigenschaft, dass Äquipotentialflächen stets als Oberflächen stromfreier Leiter interpretiert werden können.

Nimmt man zum Beispiel das Feld einer Punktladung im leeren Raum. Die Potentialflächen sind hier konzentrische Kugeln. Wird das Innere einer solchen Kugel ausgefüllt, ändert sich an der Feldkonfiguration nichts. Wird zusätzlich der Raum außerhalb der zweiten Potentialfläche mit leitfähigem Material ausgefüllt, dann bleibt im leeren Zwischenraum weiterhin das Coulomb Feld erhalten.

13.18 Wie lautet die Formel für die längenbezogene Kapazität einer Koaxialleitung?

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(D/d)}$$

Wenn der Feldraum nicht leer ist, so wird ϵ_0 durch $\epsilon_0\epsilon_r$ ersetzt.

13.19 Wie lauten die Formeln für die längenbezogenen Kapazitäten einer Doppelleitung und einer Einfachleitung über dem Erdboden in der Näherung großer Abstände?

Doppelleitung:
$$C' = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln(2D/d)}$$

Einfachleitung:
$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(4h/d)}$$

13.20 Wie groß ist die maximale Feldstärke an einer insgesamt ungeladenen, leitfähigen Kugel, wenn diese in ein ursprünglich homogenes elektrisches Feld gebracht wird? Wo tritt dieser Maximalwert auf?

Die maximale Feldstärke tritt an der Oberfläche der Kugel auf. Sie beträgt $3 \cdot E_0$, also das dreifache der Homogenfeldstärke. Dies zeigt den meist ungünstigen Effekt der Feldstärkeerhöhung an metallischen Einschlüssen in Dielektrika.

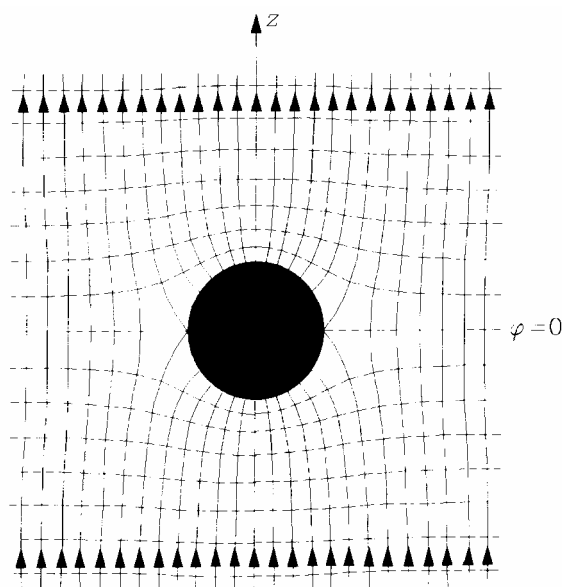


Abb. 13.25 Eine ungeladene, leitfähige Kugel (Radius a) wird in ein homogenes elektrisches Feld der Stärke E_0 gebracht. Der Schnitt zeigt die Spuren der Potentialflächen (strichliert, Potentialschritt $\Delta\varphi = E_0 a/2$) und die Vektorlinien der elektrischen Feldstärke

14 Globale und lokale Eigenschaften elektrischer Felder

14.1 Wie lautet der Satz von der Erhaltung der elektrischen Ladung? Gilt er allgemein?

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

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

Dies ist eine globale Eigenschaft, weil sie allgemein für ganze Raumeile und ihre Hüllen gilt.

14.2 Was verstehen Sie unter einer Sprungfläche?

Als Sprungfläche bezeichnet man jenen Grenzbereich zwischen zwei Körper an denen sich die Materialeigenschaften ändern.

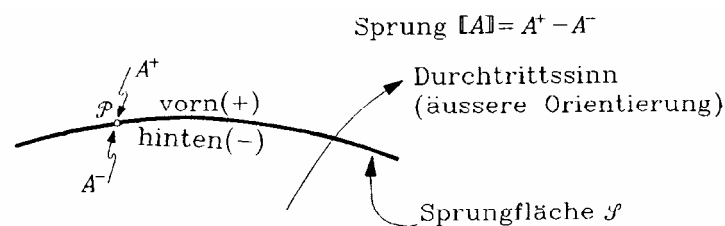


Abb. 14.1 An einer Sprungfläche \mathcal{S} besitzt eine Feldgröße A bei Annäherung an denselben Flächenpunkt von vorn und von hinten i.a. die unterschiedlichen Grenzwerte A^+ bzw. A^-

14.3 Wie wirkt sich der Satz von der Erhaltung der elektrischen Ladung an einer Sprungfläche aus?

Es folgt aus ihm, dass der Sprung der Normalenprojektion der elektrischen Stromdichte gleich ist der negativen zeitlichen Änderungsrate der Flächenladungsdichte.

Diese Eigenschaft elektrischer Strom-Ladungsverteilungen ist für alle Punkte einer Sprungfläche gültig, wenn es dort keinen Flächenstrom gibt.

Am direkten Übergang zwischen metallischen Leitern und für niederfrequente Vorgänge kann in der Regel die Änderung der Flächenladungsdichte vernachlässigt werden.

14.4 Wie lautet die lokale Kontinuitätsgleichung für die elektrische Ladung?

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

14.5 Welche Form nimmt der Satz vom elektrischen Hüllenfluss an Sprungflächen an?

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

14.6 Welches Verhalten des elektrostatischen Potentials an Sprungflächen folgt aus dem Satz von der elektrischen Umlaufspannung? Gilt dieser Satz allgemein?

Das Potential springt i. a. bei einer dünnwandigen Grenzfläche um einen gewissen Wert. Sie enthält einen Spezialfall, verschwindet nämlich an einer Sprungfläche die Kontaktspannung, so ist dort das elektrostatische Potential stetig.

Er gilt nur in konservativen Kraftfeldern und im elektrostatischen sowie im quasielektrostatischen Fall.

14.7 Wie verhält sich die elektrische Feldstärke an einer Sprungfläche?

An einer Sprungfläche ist die Tangentialkomponente der elektrischen Feldstärke stetig. Diese Sprungbedingung gilt auch für Flächen mit konstanter Kontaktspannung.

14.8 Wie verhält sich die elektrische Stromdichte speziell an der Grenzfläche eines Leiters zu einem Isolator?

Die elektrische Stromdichte ist an dieser Stelle stetig, d.h. der Sprung der Stromdichte ist gleich Null.

14.9 Durch welche Materialgleichungen werden isotrope Dielektrika und isotrope Leiter in einfachen Fällen beschrieben?

isotrope Dielektrika: $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$

isotrope Leiter: $\vec{J} = \gamma \vec{E}$

14.10 Warum gibt es beim stationären Stromübertritt an einer Kontaktfläche i. a. Flächenladungen?

In dieser Sprungbedingung setzt man die zeitliche Änderungsrate der Flächenladungsdichte gleich Null. Die Normalkomponente der Stromdichte ist dann stetig, ihre Tangentialkomponente hingegen unstetig.

$$\sigma = \|D_N\| = \epsilon_0 \|E_N\| = \epsilon_0 \left(\frac{1}{\gamma^+} - \frac{1}{\gamma^-} \right) J_N$$