

Repetitorium ETfTI: Vorlesung 2

Rückblende: Die erste Vorlesung beinhaltet einen kurzen Überblick über die Geschichte der Elektrotechnik. Nach ersten lediglich punktuellen Ergebnissen in der Antike und dem Mittelalter begann diese im Jahr 1600 mit den Arbeiten des englischen Arztes William Gilbert. Eine lange Phase der Entwicklung elektrischer Apparate folgte, welche vor allem durch das intensive Interesse des Volkes an der Zuschaustellung von wissenschaftlichen und technischen Produkten und Phänomenen befeuert wurde („Wandermänner der Wissenschaft“). Erst im Jahr 1785 folgte das erste „echte“ wissenschaftliche Gesetz der Elektrotechnik: Das Coulombsche Gesetz. Dieses lautet in skalarer Form

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Hinweis zum Lernen: Dieses Gesetz gehört zur akademischen Allgemeinbildung. Das weiß man „um drei Uhr früh mit vier Promille“.

Die Konstante k hat den Wert $9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2(\text{As})^{-2}$. Dieses Gesetz stellt den Zusammenhang zwischen Ladung und Kraft her. Die formale Ähnlichkeit zum gut ein Jahrhundert älteren Gravitationsgesetz legt nahe, dass die elektrostatische Kraft ebenso eine Zentralkraft ist. Aufbauend auf den Entdeckungen Galvanis mit den Froschschenkeln entwickelte Alessandro Volta um 1800 die erste galvanische Batterie. Durch sie wurde die elektrotechnische Entwicklung von den seltsamen und allzu oft nicht gut reproduzierbaren Eigenheiten der Elektrostatik unabhängig. Außerdem legte sie nahe, dass elektrische und chemische Gegebenheiten auf ein und derselben Gesetzmäßigkeit beruhen. Massive Forderungen des Großbürgertums, der Industrie und der Kommunen führte zu intensiven Forschungen, um möglichst schnell praxisnahe Lösungen zu den Themen elektrische Maschinen, Bahn, Beleuchtung und Telekommunikation zu schaffen. Mit der Erfindung der Elektronenröhre im Jahr 1906 wurde die eigentliche Elektronik geboren. (Frühere Entdeckungen blieben weitgehend unbeachtet, da sie dem Zeitgeist widersprachen. Beispiel: Erfindung der Schottky – Diode durch Ferdinand Braun im Jahr 1874.) Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden Schaltkreise auf der Basis von Halbleitern industriell herstellbar und erlösten die Technik von den Nachteilen der Elektronenröhren.

Grundlegende Konzepte der Elektrotechnik

Wir wollen nun in der Vorlesung 2 die grundlegenden Modelle und Gesetze der Elektrotechnik kennenlernen. Dabei sollen Anschaulichkeit und Praxistauglichkeit absoluten Vorrang gegenüber wissenschaftlicher Präzision und umfassender Gültigkeit haben. Diese Sicht ist sowohl aufgrund der Ausrichtung des Repetitoriums als Vorbereitungs- und Begleitlehrveranstaltung zu den Übungen zulässig als auch wissenschaftsgeschichtlich begründbar: Immerhin wurden zwischen 1800 und 1865 alle bis heute relevanten Gesetze der Elektrotechnik gefunden und technisch umfassend angewendet, obwohl das Elektron erst 1897 nachgewiesen und die Quantenmechanik erst 1900 begründet wurde.

Die essentielle Grundlage der gesamten Elektrotechnik ist das Elektron. Wir definieren dieses Elementarteilchen aufgrund seiner Eigenschaften

- kugelförmig
- blau
- wütend

Diese Axiomatik mag befremdlich und natürlich scherzhaft klingen (ist auch so gemeint), genügt aber – wie wir zeigen werden – für unsere Zwecke vollständig.

Das Elektron muss kugelförmig sein, da es sonst eine innere Inhomogenität aufweisen würde. Daraus würde eine Richtungsabhängigkeit seiner Wirkungen folgern, welche niemals beobachtet wurde. Der Durchmesser des Elektrons beträgt übrigens $5,6 \cdot 10^{-15}$ m.

Es muss blau sein, da es die negative Elementarladung trägt. Und „negativ“ wird in Assoziation zur Temperatur mit blau (wie eine dicke Eisschicht) gekennzeichnet, genauso wie „positiv“ in Assoziation zu einem glühenden Gegenstand rot gekennzeichnet wird.

Warum es wütend ist, ist unbekannt. Möglicherweise hat ihm jemand das letzte Tiramisu weggegessen oder seine Freundin ist fremdgegangen, wir wissen es nicht. Aber wir können das Ausmaß seiner Wut, also seiner Ladung, recht genau angeben:

Die elektrische Elementarladung hat den Wert $1,6 \cdot 10^{-19}$ As

„As“ ist die Kurzschreibweise von Amperesekunden. Was das ist, ist vorerst ohne Bedeutung. Die Einheit „Sekunden“ kennen wir, das ist die durchschnittliche Dauer eines menschlichen Herzschlages. (Die genauere Definition lese man in der Literatur nach.)

Die relevante Konsequenz der elektrischen Elementarladung des Elektrons ist die abstoßende Kraft, die Elektronen aufeinander ausüben. (Diese ist wie die Gravitation unendlich weit wirksam, im Gegensatz zu den starken und schwachen Kräften.) Daher sind äußere Einwirkungen erforderlich, um mehrere Elektronen in einem Gebiet zusammenzuhalten. Gibt man ihnen die Möglichkeit, werden sie versuchen, sich möglichst weit voneinander zu entfernen.

Materialien durch oder entlang dieser sich Elektronen frei bewegen können, nennt man elektrische Leiter. Materialien, die Elektronen ortsfest halten, nennt man Isolatoren.

Wenn sich nun Elektronen auf der Flucht vor den vielen anderen, die genauso kugelförmig, blau und wütend sind, durch einen elektrischen Leiter bewegen, hat diese Bewegung Auswirkungen. Diese dienen zur Beschreibung und Quantifizierung des elektrischen Stroms und werden natürlich auch intensiv technisch genutzt.

Allgemeine Definition des elektrischen Stroms: Der elektrische Strom I ist die Bewegung von Ladungsträgern durch einen elektrischen Leiter.

Wenn pro 1 Sekunde $6 \cdot 10^{18}$ Elektronen durch einen elektrischen Leiter fließen, ergibt sich ein Strom von 1 Ampere.

Mathematisch

$$I = \frac{Q}{t}$$

Wobei I der Strom in Ampere, Q die Ladungsmenge in Amperesekunden und t die Zeit in Sekunden ist.

Die praktischen Auswirkungen des elektrischen Stroms ermöglichen mehrere praktische Realisierungen der Messung:

- Wenn zeitlich konstanter elektrischer Strom durch einen Leiter fließt, entsteht ein zeitlich konstantes Magnetfeld. Wir werden diesen Effekt später noch genauer beschreiben, an dieser Stelle möge die Angabe des Zahlenwertes genügen:

Wenn zwei sehr dünne im Abstand von 1m parallel montierte elektrische Leiter der Länge 1m von jeweils einem Strom von 1 Ampere durchflossen werden, üben die beiden Leiter eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7} \text{N}$ aufeinander aus.

Hinweise: Die physikalische Definition ist etwas präziser, was auf Kosten der Anschaulichkeit geht. Wir begnügen uns mit dieser Formulierung.

Die Richtung der Kraftwirkung ist natürlich von der Polarität abhängig. Auch davon später mehr.

Natürlich sind $0,2 \mu\text{N}$ sehr wenig. Man behilft sich mit längeren Leitungen, geringeren Abständen und weitaus höheren Strömen, um praktikable Werte zu erzielen.

- Wenn elektrischer Strom durch eine elektrisch leitende Flüssigkeit (Elektrolyt) fließt, kommt es zu elektrochemischen Reaktionen. Wichtig ist unter anderem die Abscheidung von Metall aus seiner wässrigen Lösung. Eine spezielle Reaktion wurde lange Zeit für die Definition des elektrischen Stroms herangezogen:

Ein elektrischer Strom von 1 Ampere scheidet aus einer Silbernitratlösung innerhalb von 1 Sekunde eine Stoffmenge von 1,118mg Silber ab.

Auch hier ist die „offizielle“ Definition detaillierter, für unsere Zwecke genügt die genannte Formulierung.

Hinweis zur Besprechung: Es ist nach Wahl der Hörerin / des Hörers eine der drei genannten Definitionen, jedenfalls aber samt Zahlenwerten anzugeben!

Nun wollen wir uns einige Gedanken über die Eigenschaften der Materialien machen, durch die sich Elektronen bewegen können.

Ideale Leiter (Supraleiter) sind technisch aufwändig zu betreiben. Bei Isolatoren ist die Situation besser: Die Eigenschaften von Teflon, manchen Keramiken und natürlich trockenen inerten Gasen liegen sehr nahe am Ideal. Die Eigenschaften der weitaus meisten Materialien liegen dazwischen: Man kann sich das so vorstellen, dass in jedem realen Werkstoff eine gewisse Anzahl an Elektronen frei beweglich ist. Andere Elektronen sind Teil der Atomrümpfe und „normalerweise“ unbeweglich. Wird nun an das Material ein elektrisches Feld angelegt, so bewegen sich die freien Elektronen dementsprechend. Dabei stoßen sie allerdings an die weitgehend ortsfesten Atomrümpfe und werden dadurch gestreut. In der Folge können sich die Elektronen nicht so leicht bewegen, wie es dem treibenden Feld entsprechen würde. Diese Eigenschaft der Materialien, die Bewegung der Elektronen zu behindern, nennt man „elektrischer Widerstand“. (Dieses kurz beschriebene Modell wird nach seinem Erfinder Drude – Modell bezeichnet. Es stammt aus der Zeit vor der Entdeckung der Quantenmechanik und liefert daher quantitativ falsche Ergebnisse. Als einfache Vorstellung genügt es allerdings, da es sowohl den elektrischen Widerstand als auch dessen Temperaturabhängigkeit erklären kann.)

Wir definieren den elektrischen Widerstand R mit seiner Einheit Ohm $[\Omega]$ über Materialkonstanten:

Ein Kupferdraht von 1mm^2 Querschnitt und 1m Länge hat einen elektrischen Widerstand von $17\text{m}\Omega$.

Hinweis zur Besprechung: Diese Definition ist samt Zahlenwerten anzugeben!

Der spezifische Widerstand von reinem Kupfer beträgt also

$$17m\Omega \frac{mm^2}{m}$$

Hinweis für Interessierte: Diese Angabe des „spezifischen Widerstandes“ eines Materials ist in der Technik üblich. In der Physik achtet man darauf, erstens ausschließlich SI – Grundeinheiten zu verwenden (also keine mm^2) und gleiche Einheiten zu kürzen (als keine mm^2/m). In der Folge wird in der Physik der spezifische Widerstand in der Einheit Ωm angegeben, worauf sich die entsprechenden Zahlenwerte um 10^6 verschieben:

Der spezifische Widerstand von reinem Kupfer beträgt in der Physik also $17n\Omega m$.

Die Definition der Triebkraft der elektrischen Aktivitäten – der elektrischen Spannung – ist leider etwas komplizierter:

Inzwischen sollte klar sein, dass die wichtigste Eigenschaft der Elektronen ihre gegenseitige Abstoßung ist, also ihre Kraftwirkung (Coulombsches Gesetz). Wenn eine Kraft F über einen Weg s wirkt, so kann die Arbeit W geleistet werden:

$$W = F \cdot s$$

Diese einfache – schon aus der Sekundarstufe bekannte – Gleichung ist allerdings nur ein Spezialfall. Sie gilt ausschließlich, wenn die Kraft genau in Richtung des Weges wirkt. Gelten Zwangsbedingungen (wie beispielsweise beim Kreuzen in der Schifffahrt), so muss die Gleichung vektoriell dargestellt werden:

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s}$$

Wieder ist die Arbeit als Skalarprodukt eine skalare Größe. Allerdings gilt diese Gleichung nur, solange die Kraft konstant und der Weg geradlinig sind. Im Fall von veränderlichen Kräften und gekrümmten Wegen teilt man die gesamte Arbeit in infinitesimal kleine Schritte auf, die dann aufsummiert werden:

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

Doch dieses Integral ist zwar physikalisch sinnvoll, mathematisch aber aussageelos. Die genannten Kräfte und Wegstücke müssen, um mathematisch fassbar zu werden, selbst Funktion eines Parameters sein. Üblicherweise und bei Bewegungen intuitiv ist die Zeit: Zum Zeitpunkt t_1 wirkt die Kraft \vec{F}_1 und es beginnt das Wegstück $d\vec{s}_1$ etc. Es wird allerdings sinnvoll sein, die Kraft nicht als Funktion der Zeit sondern besser als Funktion des Ortes anzugeben, wobei der Ort eine Funktion der Zeit ist. Also schreibt man korrekt

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \overrightarrow{F(s(t))} \cdot \overrightarrow{ds(t)}$$

Das würde schon Sinn machen, ist nur mathematisch nicht lösbar. Wir verwenden daher einen Trick, für den uns die Mathematiker zu Recht mit einem „nassen Tuch prügeln“ würden. Aber der Trick funktioniert und wie man ihn korrekt argumentiert, fragt Ihr die Mathematik – Professoren. Wir erweitern den Integralausdruck mit dt:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \overrightarrow{F(s(t))} \cdot \frac{d\overrightarrow{s(t)}}{dt} \cdot dt$$

Und so formuliert ist der Ausdruck mathematisch korrekt und physikalisch sinnvoll. Man nennt diesen Ausdruck Linienintegral 2. Art. (Es gibt natürlich auch ein Linienintegral 1. Art, das vor allem zur Berechnung der Länge von gekrümmten Linien verwendet wird. Für uns ist es ohne Bedeutung.)

Zum besseren Verständnis ein Beispiel:

Eine Katze der Masse m läuft spiralförmig um einen Baum mit Radius 1 Meter bis in eine Höhe von h Metern, wofür sie u Sekunden benötigt. Berechne die Arbeit, die die Katze im Gravitationsfeld der Erdoberfläche dazu leisten muss:

Als erstes stellen wir die Bahnkurve als Funktion der Zeit dar. Offensichtlich besteht diese aus einer Kreisbahn, also der Überlagerung einer Sinus- und einer Kosinus - Schwingung. In der z - Achse bewegt sie sich linear. Die einzelnen Komponenten der Bewegung lauten daher

$$x = \cos(2\pi t)$$

$$y = \sin(2\pi t)$$

$$z = \frac{h}{u} t$$

Die Bahnkurve lautet in einem Vektor zusammengefasst daher:

$$\vec{s}(t) = \left(\cos(2\pi t), \sin(2\pi t), \frac{h}{u} t \right)$$

Im Gravitationsfeld an der Erdoberfläche beträgt die Gewichtskraft

$$\vec{F} = (0, 0, mg)$$

(g = Erdbeschleunigung, ungefähr 10m/s^2)

Da die Gewichtskraft eine Zentralkraft ist, verschiebt sie den Probekörper nicht seitlich. (Sonst müssten wir die ganze Zeit zur Seite hüpfen, um am Platz zu bleiben.)

Damit können wir schon das Linienintegral aufstellen:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \overrightarrow{F(s(t))} \cdot \frac{d\overrightarrow{s(t)}}{dt} \cdot dt = \int_0^u (0, 0, mg) \cdot \frac{d\left(\cos(2\pi t), \sin(2\pi t), \frac{h}{u} t\right)}{dt} \cdot dt$$

Wegausdruck differenzieren (wir erinnern uns: Das Differenzieren von Vektoren erfolgt komponentenweise)

$$W = \int_0^u (0, 0, mg) \cdot \left(-2\pi \sin(2\pi t), 2\pi \cos(2\pi t), \frac{h}{u} \right) \cdot dt$$

Skalarprodukt bilden. Beachte, dass die x und y Komponenten der Bewegung deshalb wegfallen, weil es sich um eine Zentralkraft handelt!

$$W = \int_0^u mg \frac{h}{u} \cdot dt = \frac{mgh}{u} \cdot \int_0^u dt = \left(\frac{mgh}{u}\right) \cdot t \Big|_0^u = \left(\frac{mgh}{u}\right) \cdot (u - 0) = m \cdot g \cdot h$$

Das entspricht (warum wohl) genau dem aus der Sekundarstufe bekannten Gesetz von der potentiellen Energie:

$$W_p = m g h$$

In der Praxis tut man sich das Rechnen mit Vektoranalysis nicht an, wenn es nicht nötig ist. Offenbar haben Zentralkraftfelder die Eigenschaft, dass sie sich statt durch vektorielle Größen viel bequemer durch das skalare Potential beschreiben lassen. Dazu gibt es zwei Sichtweisen: In der Sekundarstufe definiert man das Potential Φ (phi) als Energie W bezüglich der Einheitsmasse 1kg bzw. der Einheitsladung 1As:

$$\Phi = \frac{W}{1kg} \text{ bzw. } \Phi = \frac{W}{1As}$$

Das ist natürlich zulässig, aber nicht sauber, da das Kraftfeld auch dann existiert, wenn gerade kein Probekörper zu Hand ist. Im tertiären Bereich definiert man daher das Potential als Eigenschaft eines Zentralkraftfeldes:

Das Potential ist die Fähigkeit eines Zentralkraftfeldes, Arbeit zu leisten.

Hinweis zum Lernen: Diese Definition gehört zur akademischen Allgemeinbildung. Das weiß man „um drei Uhr früh mit vier Promille“.

Wir erinnern uns an die elementare Definition der Arbeit:

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s}$$

Hinweis zum Lernen: Üblicherweise wird Energie als Fähigkeit Arbeit zu leisten definiert. Wir machen hier Elektrotechnik, da nehmen wir das nicht so genau. Bei mir ist Energie gleich Arbeit.

Unmittelbar einsichtig sollte sein, dass die Arbeit genau dann 0 ist, wenn Kraft und Weg aufeinander orthogonal stehen. (Versuche einmal, einen Zug normal zu den Schienen zu ziehen...). Bewegt man daher eine Masse bzw. Ladung im konstanten Abstand zum Kraftzentrum, also auf einer Kugeloberfläche, wird dabei keine Arbeit verrichtet.

Kugeloberflächen, in deren Zentrum das Kraftzentrum eines Zentralkraftfeldes ist, sind Äquipotentialflächen. Die Bewegung von Massen bzw. Ladungen auf diesen Flächen verläuft ohne Arbeit.

Konsequenz 1: Lediglich Bewegungen zwischen den Äquipotentialflächen („Höhe“) benötigen oder leisten Arbeit.

Konsequenz 2: Bewegungen entlang beliebiger (!) geschlossener Linien verändern die Energie nicht. Daher nennt man Zentralkraftfelder auch konservativ. Linienintegrale 2. Art entlang geschlossener Bahnen nennt man auch Ringintegrale und schreibt

$$\oint \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

Konservative Kraftfelder verändern die Energie von in ihnen auf geschlossenen Bahnen (Anfangspunkt = Endpunkt) bewegten Massen bzw. Ladungen nicht. Elektrostatische Felder und Gravitationsfelder sind konservative Kraftfelder.

Hinweis zum Lernen: Dieses Gesetz gehört zur akademischen Allgemeinbildung. Das weiß man „um drei Uhr früh mit vier Promille“.

Die Null – Energie, also der absolute energetische Zustand einer Masse oder Ladung kann nicht objektiv angegeben werden, nur die Änderung als Funktion des Abstandes zum Kraftzentrum. Sollte ein „absolutes“ Potential anzugeben sein, hilft man sich im Gravitationsfeld mit dem Bezugspunkt der Erdoberfläche oder eines unendlich entfernten Punktes. In der Elektrotechnik bezieht man ganz praktisch das Potential entweder auf einen vom Konstrukteur des Gerätes definierten Punkt der Schaltung und kennzeichnet diesen mit dem Symbol . Diese Methode ist vor allem in der Elektronik üblich. Oder man bezieht auf das Potential des Erdbodens, welches durch in die Erde gesteckte Metallstäbe oder Metallbänder zugänglich ist und kennzeichnet dies mit dem Symbol . Diese Methode ist vor allem in der Elektrik üblich. Sonst muss eben angegeben werden, zwischen welchen Punkten der elektrischen Schaltung der Potentialunterschied zu bestimmen ist.

Damit ergibt sich die Definition der elektrischen Spannung:

Die elektrische Spannung U ist der Unterschied zwischen den elektrischen Potentialen Φ an zwei Stellen eines elektrischen Aufbaus.

Diese Potentialdifferenz bewirkt, dass zur Bewegung elektrischer Ladungen im elektrostatischen Feld Arbeit geleistet oder benötigt wird: Um eine Ladung von 1As über eine Spannung (=Potentialdifferenz) von 1V zu bewegen muss 1J = 1Ws Arbeit geleistet oder frei werden.

$$1V = \frac{1Ws}{1As}$$

Hinweis zum Lernen: Diese Gesetz muss vollständig, also inklusive der Definition des elektrischen Potentials wiedergegeben werden! Die einfache Definition „Spannung ist gleich Potentialdifferenz“ zieht unweigerlich die Zusatzfrage nach sich: „Was ist Potential?“:

Damit haben wir die drei elektrischen Grundgrößen Spannung, Strom und Widerstand definiert.

Nochmals kurz zusammengefasst:

Elektrischer Strom	Formelzeichen I	Einheit Ampere [A]
Elektrischer Widerstand	Formelzeichen R	Einheit Ohm [Ω]
Elektrische Spannung	Formelzeichen U	Einheit Volt [V]

Die logische Frage ist, ob diese drei Grundgrößen einen Zusammenhang haben. Der deutsche Physiker Georg Ohm fand im Jahr 1825 experimentell den Zusammenhang

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

Hinweis zum Lernen: Bitte nicht die bekannten Eselsbrücken rund um den Schweizer Kanton Uri verwenden. Da irrt man sich leicht und zeigt außerdem, dass man es nicht verstanden hat!

Dieses berühmte Ohmsche Gesetz ist intuitiv nachvollziehbar: Man lege eine definierte Spannung an einen Widerstand an. Die Elektronen versuchen nun, so gut es ihnen gelingt, vom Minus - Pol zum Plus - Pol zu gelangen, werden dabei aber durch den Widerstand behindert.

Quizfrage: Wenn bei gleicher Spannung der Widerstand steigt, kommen dann mehr oder weniger Elektronen pro Zeiteinheit durch?

Andere Quizfrage: Wenn bei gleichem Widerstand die Spannung (Triebkraft) erhöht wird, kommen dann mehr oder weniger Elektronen pro Zeiteinheit durch?

Hinweis für Interessierte: Zu meiner Zeit nannte man die nicht belastete Spannung an einer galvanischen Zelle oder auch einem magnetischen Generator auch elektromotorische Kraft, kurz EMK. Diese Bezeichnung ist irreführend, da eine Kraft der Quotient von Arbeit und Weg ist, während eine Spannung der Quotient von Arbeit und Ladung ist. Daher ist diese Bezeichnung heute weitgehend historisch und wird eigentlich nur mehr in der Elektrochemie verwendet.

Mit dem Ohmschen Gesetz ist das Verhalten des elektrischen Stromes bei der Zusammenschaltung einer Spannungsquelle und eines Widerstandes geklärt. Was ist aber, wenn in einer Schaltung mehrere Quellen und Widerstände verbaut sind?

Die beiden Kirchhoffschen Regeln wurden 1845 von Gustav Robert Kirchhoff entdeckt. Sie beschreiben jeweils den Zusammenhang zwischen mehreren elektrischen Strömen und zwischen mehreren elektrischen Spannungen in elektrischen Netzwerken. Aus heutiger Sicht sind sie logische Konsequenzen des Energieerhaltungssatzes (Energie kann niemals geschaffen oder vernichtet werden).

Hinweis zum Lernen: Die Begründung der Kirchhoffschen Regeln mit dem Energieerhaltungssatz ist für die Besprechung ausreichend. Natürlich kann man sie auch anders begründen (etwa mit dem Ladungserhalt, der Ringintegral etc.), aber warum unnötig kompliziert machen?

1. Kirchhoffsches Gesetz: $\sum (I_i) = 0$ (Stromrichtungen beachten!) Der Knotenpunktsatz: Die Summe aller Ströme in einem Knotenpunkt ist Null. Anders formuliert: Die Summe der zufließenden Ströme in einem elektrischen Knotenpunkt ist gleich der Summe der abfließenden Ströme.

2. Kirchhoffsches Gesetz: $\sum (U_i) = 0$ (Polarität beachten!) Der Maschensatz: Alle Teilspannungen in einem elektrischen Netzwerk addieren sich zu Null. Anders formuliert: Bei in Serie geschalteten Verbrauchern ist die Summe der Spannungsabfälle gleich der Versorgungsspannung.

Noch kurz zur elektrischen Energie W und Leistung P : Durch das SI - System sind die Zusammenhänge zwischen mechanischen und elektrischen Größen einfach:

Arbeit: $1 \text{ Joule} = 1 \text{ Newtonmeter (skalar)} = 1 \text{ Wattsekunde} = 1 \text{ Voltamperesekunde}$
Arbeit: $1 \text{ J} = 1 \text{ Nm (skalar)} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ VAs}$

Leistung: $1 \text{ J/s} = 1 \text{ Nm/s (skalar)} = 1 \text{ W} = 1 \text{ VA}$

Hinweise: Es gibt auch eine vektorielle Größe Nm . Sie wird für Moment und Drehmoment verwendet. Das hat mit der Arbeit nichts zu tun!

Bitte aufpassen: Bei den mechanischen Leistungsgrößen steht die Zeit im Nenner, bei den elektrischen Arbeitsgrößen steht die Zeit im Zähler. Da kann man sich leicht irren!

Ebenso aufpassen: Das Formelzeichen der Arbeit ist W , die Einheit der elektrischen Leistung ist das Watt, abgekürzt W .

Übungsbeispiele:

- Ein Proton und ein Elektron befinden sich in einem Abstand von 1m. Berechne die Anziehungskräfte aufgrund der a) Elektrostatik und der b) Gravitation. Diskutiere das Ergebnis.
- Durch einen Kupferdraht mit dem Querschnitt 1mm^2 fließen $6 \cdot 10^{20}$ Elektronen pro Sekunde. Berechne die Stromstärke. Welche der Angaben sind irrelevant?
- Zwei sehr dünne im Abstand von 1mm parallel montierte elektrische Leiter der Länge 10m werden von jeweils einem Strom von 100 Ampere durchflossen, Berechne die Kraft, die die beiden Leiter aufeinander ausüben.
- Eine Silbernitratlösung wird eine Stunde lange von einem Strom von 100A durchflossen. Berechne die Masse des abgeschiedenen Silbers.
- Schlage in einer geeigneten Tabelle den spezifischen Widerstand von reinem Aluminium nach. Welche andere ganz grundlegende physikalische Eigenschaft des Aluminiums könnte der Grund sein, dieses Metall trotz seines höheren spezifischen Widerstandes statt Kupfer als Leitmetall, beispielsweise in Hochspannungs – Freileitungen zu verwenden?
- Gib die Bewegungsgleichungen der folgenden Bewegungen als Funktion der Zeit an:
 - Eine Katze der Masse m läuft geradlinig, parallel zur x – Achse mit konstanter Geschwindigkeit v . Zu Beginn des Versuchs befindet sie sich am Punkt $(0,b,0)$.
 - Eine Bergdohle der Masse m fliegt einen Kreis mit einem Radius r in der $y - z$ – Ebene. Kreismittelpunkt ist $(0,0,c)$. Sie fliegt eine vollständige Runde und benötigt dazu u Sekunden.
 - Ein Stein der Masse m fällt von der Erdoberfläche beginnend mit dem Punkt $(0,0,0)$ in ein Loch der Tiefe h .
 - Gerlinde Kaltenbrunner (Masse m) steigt in der Zeit u auf einen kegelförmigen Berg. Der Radius des Basiskreises beträgt r , die Höhe des Kegels h . In jeder Zeitperiode t macht sie eine Umrundung.
 - Eine Katze läuft senkrecht einen Baum der Höhe h hinauf und benötigt dazu u Sekunden.
- Nun bestimme zu diesen Beispielen die geleistete Arbeit, sowohl durch Überlegen als auch mittels Linienintegrals.
- Es gibt ein elektrostatisches Feld. Im Abstand r_1 vom Kraftzentrum befindet sich eine Konduktorkugel, auf der sich $6 \cdot 10^{18}$ Elektronen befinden. Dann wird diese Konduktorkugel losgelassen und bewegt sich von selbst auf den größeren Abstand r_2 . Dabei leistet sie eine Arbeit von w Joule. Gib die elektrische Spannung zwischen r_1 und r_2 an. Welche Polarität hat das Kraftzentrum?
- Nenne die Grundgrößen der Elektrotechnik, deren Formelzeichen und Einheit.

- Elektrische Spannung: Nenne Definition (nicht über das Ohmsche Gesetz!), Formelzeichen und Einheit.
- Elektrischer Strom: Nenne Definition (nicht über das Ohmsche Gesetz!), Formelzeichen und Einheit.
- Elektrischer Widerstand: Nenne Definition (nicht über das Ohmsche Gesetz!), Formelzeichen und Einheit.
- Formuliere das Ohmsche Gesetz.
- Berechne den Widerstand, wenn bei einem Strom von 3A eine Spannung von 3V abfällt.
- Berechne den Strom, wenn an einem Widerstand von 5Ω eine Spannung von 10V abfällt.
- Berechne die Spannung, wenn durch einen Widerstand von 10Ω ein Strom von 5A fließt.
- Formuliere die Kirchhoffschen Regeln. Auf welchem physikalischen Grundprinzip beruhen diese?
- An eine Spannungsquelle mit 9V sind zwei in Serie geschaltete Widerstände angeschlossen. Am oberen Widerstand liegen 6V an. Berechne die Spannung am unteren Widerstand. Welches Gesetz verwendest Du zur Berechnung?
- In einen Stromknoten mit drei Leitungen fließen aus einer Leitung 2A hinein und aus einer anderen Leitung 3A hinein. Was geschieht in der dritten Leitung? Welches Gesetz verwendest Du zur Berechnung?
- Eine ideale elektrische Maschine zieht an der Erdoberfläche eine Masse von 100g in einer Sekunde 1m hoch. Berechne die elektrische Leistung dieser Maschine. Sie werde mit einer Spannung von 10V betrieben. Berechne die Stromaufnahme während der Aktivität.