

# **Übungsfragen und Übungsbeispiele**

**zu**

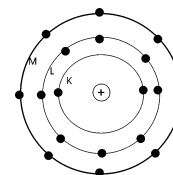
## **Grundlagen der Elektrotechnik**

### **Teil 01: Grundbegriffe der Elektrizität**

**Version 10.0**

**02. Oktober 2019**

Version 10.0 Übernahme und neue Ordnung der Beispiele aus ähnlichen Lehrveranstaltungen



**A1. Erklären Sie in groben Zügen das Bohr/Sommerfeld'sche Atommodell!**

**Bestandteile Atomkern: Protonen (+Ladungen) und Neutronen,**  
**Bestandteile Hülle: Elektronen (-Ladungen) in Schalen.**  
**Jede Schale kann max.  $2n^2$  Elektronen aufnehmen, d.h. 2, 8, 18, 32, 50, ... Die Elektronen in der**  
**äußersten besetzten Schale heißen Valenzelektronen. Diese sind primär wichtig für alle Interaktionen /**  
**Reaktionen. Teilweise tragen diese Ladungen (+, -)**

**A2. Wie heißen die kleinsten Ladungsträger? Wie groß ist deren Ladung?**

**Elektronen: tragen kleinste negative Ladung  $-e$ ;  $e = 1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{C} = 0,16 \text{aC} = 0,16 \text{aC}$**   
**Protonen: tragen kleinste positive Ladung  $+e$ ;**  
**Ionen: Atome oder Moleküle mit Protonenüberschuss (+) bzw. Elektronenüberschuss (-)**  
**Molekül: Kombination von Atomen im Verbund: keine allgemeine Aussage über Ladungszustand!**

**A3. Können Ladungen erzeugt werden?**

**Nein, Sie können nur getrennt werden. (Elektron vom Atomkern / Molekül)**

**A4. Was ist die Coulomb'sche Kraft?**

**Kraftwirkung einer elektrischen Ladung auf eine andere Ladung.**

**A5. In welche Richtung wirken Kräfte zwischen den Ladungsträgern?**

**Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab (+/+ oder -/-), ungleichnamige Ladungen ziehen sich an (+/-, -/+)**

**A6. Was ist der Unterschied zwischen einem Elektron und einem geladenem Ion mit der Ladung  $-e$ ?**

**Ladung = gleich, Unterschied in Masse und Beweglichkeit! ION = Atom bzw. Molekül mit Elektronenüberschuss,  $>1$  Elektron mehr als Protonen.**

**A7. Was sind Valenzelektronen?**

**Elektronen in der äußersten noch besetzten Schale (bei  $0^\circ \text{K}$ )**

**A8. Was kann mit den Valenzelektronen bei einer Erhöhung der Temperatur passieren?**

**Mehr Temperatur = mehr Schwingungsenergie. Die Valenzelektronen lösen sich leichter vom Atom ab bzw. gelangen in „höhere“ Schalen und bilden damit „freie“ Elektronen = Leitungselektronen = Ladungsträger.**

**A9. Was sind Leitungselektronen?**

**Elektronen, die zur Leitung des Stroms zur Verfügung stehen, meist im Leitungsband (oberhalb des Valenzbandes). Sie werden z.B. durch Energiezufuhr vom Valenzband in das Leitungsband gehoben oder sind durch die Atomanordnung (Metalle: Gitterstruktur) nicht fest an einen Atomkern gebunden. Bei Metallen gilt: alle Valenzelektronen sind Leitungselektronen!**

**A10. Wodurch werden aus Valenzelektronen Leitungselektronen?**

**Energiezufuhr (z.B. Wärme, Strahlung, ...) bzw. besondere Anordnung (Gitterstruktur der Metalle)**

**A11. Wer ist für den Stromtransport in Metallen zuständig?**

**"Elektronengas", d.h. Leitungselektronen = alle Valenzelektronen. Durch die Gitterstruktur sind diese nicht fix an einen Atomkern gebunden, sondern bewegen sich wirt zwischen den gitterförmig angeordneten Atomkernen umher. Ohne Kräftegleichgewichte zu verletzen, bewegen sie sich bei Anliegen einer Spannung tendenziell in eine Richtung.**

**A12. Wie groß ist die Anzahl der Leitungselektronen in  $1 \text{ cm}^3$  Aluminium? Welche Ladung stellt dies dar?**

**Anm.: Aus Periodensystem ([www.periodensystem.info](http://www.periodensystem.info) ...): rel. Atommasse = 26,981539 g/mol, Dichte 2,70 g/cm<sup>3</sup>, Elektronen: K:2, L:8, M:3, Anzahl der Atome pro mol =  $6,022 \cdot 10^{23}$  /mol (Avogadro - Konstante)**

**Anzahl der Atome pro g  $N_g = 6,022 \cdot 10^{23} / \text{mol} / 26,981539 \text{ g/mol} = 2,232 \cdot 10^{22}$  Atome / g**

**Anzahl der Atome pro cm<sup>3</sup>  $N_{\text{cm}^3} = \text{Dichte} \cdot N_g = 2,70 \text{ g} / \text{cm}^3 \cdot 2,232 \cdot 10^{22} / \text{g} = 6,026 \cdot 10^{22}$  Atome/cm<sup>3</sup>**

**Jedes Atom besitzt 3 Valenzelektronen -> Leitungselektronendichte =  $\rho_e = 1,81 \cdot 10^{23}$  Leitungselektronen/cm<sup>3</sup>**

**In  $1 \text{ cm}^3$  Aluminium stehen  $1,81 \cdot 10^{23}$  Elektronen zu Verfügung = 29000C = 29 kC Ladung!**

**A13. Gold besitzt folgende Elektronenverteilung in seinen 6 Bändern: K:2 L:8 M:18 N:32 O:18 P:1. Wie viele Valenzelektronen und Protonen besitzt ein neutrales Gold - Atom?**

**Anzahl der Protonen = Anzahl der Elektronen =  $2+8+18+32+18+1 = 79$ ; Valenzelektronen: 1 (äußerstes Band/Schale)**

A14. Von welchen Parametern hängt die Leitungselektronendichte in Metallen ab?

Anzahl der Valenzelektronen d.h. Besetzung der äußersten Schale und Dichte der Atome.

A15. Wie hängt die Stromrichtung mit der Bewegungsrichtung der Ladungsträger zusammen?

Bewegung der positiven Ladungsträger = Stromrichtung, negative Ladungsträger entgegen gesetzte Richtung.

A16. Was ist die Driftgeschwindigkeit? Wie hängt diese mit der Stromstärke zusammen?

Geschwindigkeit, mit der sich Ladungsträger durchschnittlich bewegen (z.B. das Elektronengas entgegen der Stromrichtung). Die Stromstärke ist proportional zur Driftgeschwindigkeit (\* Ladungsträgerdichte \* Querschnitt \* Elementarladung).

A17. Die Ladung eines Elektrons ist  $-e$ , wobei  $e=1,602176634 \cdot 10^{-19} C$ . Wie viele Elektronen fließen ca. durch einen Metallleiterquerschnitt, wenn 10 Sekunden lang ein Strom von 0,2 mA Strom fließt?

Ladung = Stromstärke \* Zeit =  $0,2 \cdot 10^{-3} A \cdot 10s = 2 \cdot 10^{-3} C = n \cdot e!$ , daher:  $n = 2 \cdot 10^{-3} C / 1,6 \cdot 10^{-19} C = 1,25 \cdot 10^{16}$  Elektronen

A18. Durch eine Halbleiterdiode fließt ein Strom von 1 A. Im Halbleitermaterial ( $A = 1 \text{ mm}^2$ ) sind  $\rho_+ = 10^{14}/\text{cm}^3$  freie positive und  $\rho_- = 10^6/\text{cm}^3$  freie negative Ladungsträger vorhanden. Die mittlere Geschwindigkeit der negativen Ladungsträger ist ca. 3x so groß wie die der positiven. Wie groß sind die Geschwindigkeiten?

$$I = A \cdot e \cdot (\rho_+ \cdot v_+ + \rho_- \cdot v_-) = A \cdot e \cdot (\rho_+ \cdot v_+ + \rho_- \cdot 3 \cdot v_+) = v_+ \cdot A \cdot e \cdot (\rho_+ + 3 \cdot \rho_-), \text{ d.h.}$$

$$v_+ = \frac{I}{A \cdot e \cdot (\rho_+ + 3 \cdot \rho_-)} = \frac{1A}{1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot (10^{14} / \text{cm}^3 + 3 \cdot 10^6 / \text{cm}^3)} \cdot \frac{10^6 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-6} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (10^{14} + 3 \cdot 10^6) \cdot 10^6} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 62500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_+ = 62500 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 62,5 \frac{\text{km}}{\text{s}} \quad v_- = 3 \cdot v_+ = 187,5 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

ANMERKUNG: Hier könnte man auf Grund der extrem unterschiedlichen Dichte und nur 3x so großen Driftgeschwindigkeit die negativen Ladungsträger vernachlässigen!

A19. Welche Ladungsmenge (in C) wird transportiert, wenn eine Glühbirne mit 2,4 A betrieben wird und 1 min lang leuchtet?

$$2,4A \cdot 60s = 144As = 144C$$

A20. Welche Ladungsmenge wird transportiert, wenn das Autolicht (Spannung 12V, Leistung 50W) über Nacht 10 Stunden eingeschaltet bleibt? Wie viel elektrische Energie wird dabei verbraucht? (Anm.:  $P = U \cdot I$ )

Ladungsmenge = Strom \* Zeit --> zuerst die Stromstärke I berechnen, daraus dann Q!

$$P = U \cdot I, \text{ daher: } I = \frac{P}{U} = \frac{50W}{12V} = 4,17 \frac{VA}{V} = 4,17A \quad \text{Ladungsmenge: } Q = I \cdot t = 4,17A \cdot 10h \cdot \frac{3600s}{1h} = 150kC$$

$$\text{Energie (Arbeit): } W = P \cdot t = 50W \cdot 10h = 0,5kWh = 1,8MJ$$

$$\text{Kontrollmöglichkeit: Energie = Ladung * Spannung: } W = Q \cdot U = 150kC \cdot 12V = 1,8MJ ! \text{ Stimmt so.}$$

A21. Wie viele Elektronen könnte man in einem Leiterquerschnitt (Metall) in 1,6 s vorbeifließen zählen, wenn 10 mA Strom fließen?

$$Q_{ges} = I \cdot t = 0,01A \cdot 1,6s = 0,016C \quad \text{Diese Ladung wird ausschließlich von Elektronen transportiert (Metall!), daher:}$$

$$Q_{ges} = n \cdot e \quad \text{und} \quad n = \frac{Q_{ges}}{e} = \frac{1,6 \cdot 10^{-2} C}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 10^{17} \text{ Elektronen}$$

A22. In einem Halbleiter bewegen sich in 1 Sekunde  $20 \cdot 10^9 / s$  positive und  $5 \cdot 10^9 / s$  negative kleinste Ladungsträger in entgegen gesetzte Richtungen. Wie groß ist die Stromstärke ( $e=1,60218 \cdot 10^{-19} C$ )?

Achtung: positive und negative Ladungsträger haben unterschiedliche Vorzeichen in der Ladung. Wenn sich diese in unterschiedliche Richtungen bewegen, tragen beide gleich (positiv) zur Stromstärke bei!

$$I = e \cdot (n_p + n_n) = 1,602182 \cdot 10^{-19} C \cdot (20 + 5) \cdot 10^9 / s = 4 \cdot 10^{-9} As / s = 4nA$$

A23. Was versteht man unter einem „Leiter“?

überall gleiches Material

lang, dünn, d.h. nur 1 Dimension, Strom fließt im gesamten Leiter überall gleich in Richtung des Leiters.

A24. Wovon hängt die maximale Stromstärke in einem Leiter ab?

Geometrie (Querschnittsfläche) und maximale erlaubte Stromdichte.

A25. Wie hängt die Stromstärke mit den mittleren Driftgeschwindigkeiten zusammen?

Stromstärke ist proportional zur mittleren Driftgeschwindigkeit (\* Ladungsträgerdichte)

A26. Wie groß ist die mittlere Driftgeschwindigkeit in einem Aluminiumdraht von 1 mm<sup>2</sup> Querschnittsfläche für 1 A Stromstärke (Leitungselektronendichte =  $\rho_e = 1,81 \cdot 10^{23} / \text{cm}^3$ )?

aus:  $I = e \cdot (\rho_+ \cdot v_+ \mp \rho_- \cdot v_-) \cdot A$  folgt für  $\rho_+ = 0$ :  $v = \frac{I}{e \cdot \rho_e \cdot A} = \frac{1A}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{C} \cdot 1,81 \cdot 10^{23} / \text{cm}^3 \cdot 1 \text{mm}^2}$

$$v = \frac{1A \cdot 1 \text{cm}^3 \cdot 10^3 \text{mm}^3 / 1 \text{cm}^3}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{As} \cdot 1,81 \cdot 10^{23} \cdot 1 \text{mm}^2} = 0,0345 \text{mm} / \text{s}$$

A27. Wie hängen bei einem konstanten Gleichstrom die mittlere Ladungsträgergeschwindigkeit und der Leiterquerschnitt zusammen?

Je größer der Querschnitt, desto kleiner die Driftgeschwindigkeit bei gleich bleibender Stromstärke.

A28. Welche(r) physikalische(n) Parameter änder(n/t) sich in einem Leiter bei der Erhöhung der Stromstärke?

Ladungsträger bewegen sich schneller -> höhere Driftgeschwindigkeit -> höhere Stromdichte -> Erwärmung!

A29. Welche Größe ist die Beanspruchungsgröße eines Leitermaterials?

Stromdichte, d.h. Strom pro Querschnittsfläche.

A30. Wie groß darf die maximale Stromdichte in Metallleitern etwa sein?

einige wenige A pro mm<sup>2</sup> (z.B. 5 A/mm<sup>2</sup>).

A31. Bei Metallen sind die Stromdichten immer wesentlich kleiner als 100 A/mm<sup>2</sup>. Wie groß ist die maximale Driftgeschwindigkeit (Leitungselektronendichte im Bereich 10<sup>23</sup>/cm<sup>3</sup>)?

Stromdichte = Strom pro Fläche. In Metallen: nur Leitung durch Elektronen! Daher:  $J < 100 \text{A} / \text{mm}^2 = e \cdot \rho \cdot v$

$$v < \frac{J}{e \cdot \rho} = \frac{100 \text{A} / \text{mm}^2 \cdot 1000 \text{mm}^3 / \text{cm}^3}{1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{As} \cdot 10^{23} / \text{cm}^3} = 6,25 \frac{\text{mm}}{\text{s}} < 1 \text{cm} / \text{s}$$

A32. Ein Gleichstrom von 0,5 kA soll über eine Freilandleitung übertragen werden, deren zulässige maximale Stromdichte 2 A/mm<sup>2</sup> nicht überschritten werden darf. Wie groß muss der Leitungsquerschnitt sein?

Stromdichtedefinition:  $J = I / A$ , daher:  $A = \frac{I}{J} = \frac{500 \text{A}}{2 \text{A} / \text{mm}^2} = 250 \text{mm}^2 \cdot \frac{1 \text{cm}^2}{100 \text{mm}^2} = 2,5 \text{cm}^2$

A33. Metalle haben in der Größenordnung von 10<sup>23</sup> freie Elektronen pro cm<sup>3</sup>. Wie groß ist die maximale Driftgeschwindigkeit, wenn die Stromdichte unter 10 A/mm<sup>2</sup> liegen muss?

Metalle: nur e – Leitung!, Daher:  $J = e \cdot \rho \cdot v$  und somit:  $v = \frac{J}{e \cdot \rho} = \frac{10 \text{A} / \text{mm}^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{As} \cdot 10^{23} / \text{cm}^3}$

$$v_{\text{max}} = \frac{10 \text{A} / \text{mm}^2 \cdot 1000 \text{mm}^3 / \text{cm}^3}{1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{As} \cdot 10^{23} / \text{cm}^3} = 0,625 \frac{\text{mm}}{\text{s}} < 1 \text{mm} / \text{s}$$

A34. Wie groß ist die mittlere Driftgeschwindigkeit in einem Aluminiumdraht von 2,5 mm<sup>2</sup> Querschnitt bei 0,0725 kA Stromstärke ( $e=1,60218 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ,  $\rho_e=1,81 \cdot 10^{23} / \text{cm}^3$ )?

Metalle: nur e – Leitung!, Daher:  $I = J \cdot A = e \cdot \rho \cdot v \cdot A$  und:  $v = \frac{I}{e \cdot \rho \cdot A} = \frac{0,0725 \text{kA}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{C} \cdot 1,81 \cdot 10^{23} / \text{cm}^3 \cdot 2,5 \text{mm}^2}$

$$v = \frac{72,5 \text{A}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{As} \cdot 1,81 \cdot 10^{23} \cdot 10^6 / \text{m}^3 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \text{m}^2} = 0,001 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1 \text{mm} / \text{s}$$

A35. *Wie groß ist die mittlere Driftgeschwindigkeit in einem Kupferdraht von 2,5 mm<sup>2</sup> Querschnitt bei 12 A Stromstärke ( $e=1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,  $\rho_e=8,47 \cdot 10^{19} / \text{cm}^3$ )?*

**Metalle: nur e – Leitung!, Daher:**  $I = J \cdot A = e \cdot \rho \cdot v \cdot A$  **und:**  $v = \frac{I}{e \cdot \rho \cdot A} = \frac{12 \text{ A}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 8,48 \cdot 10^{19} / \text{cm}^3 \cdot 2,5 \text{ mm}^2}$

$$v = \frac{12 \text{ A}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 8,48 \cdot 10^{19} \cdot 10^6 / \text{m}^3 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 0,34 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 34 \text{ cm/s}$$

A36. *Ein großer Teil von New York wurde bis in das 21. Jahrhundert über eine Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) mit  $P=750 \text{ MW}$  und  $U=500 \text{ kV}$  versorgt. Wie groß muss der Leitungsquerschnitt sein, wenn die maximale Stromdichte von 5 A/mm<sup>2</sup> nicht überschritten werden darf? (Anm.:  $P=U \cdot I$ )*

$$I = \frac{P}{U} = \frac{750 \cdot 10^6 \text{ W}}{500 \cdot 10^3 \text{ V}} = 1,5 \cdot 10^3 \frac{\text{VA}}{\text{V}} = 1,5 \text{ kA} \quad \text{daraus: } A = \frac{I}{J} = \frac{1500 \text{ A}}{5 \text{ A/mm}^2} = 300 \text{ mm}^2 = 3 \text{ cm}^2$$

A37. *Wie lautet der Zusammenhang zwischen Strom und Stromdichte in integraler Form?*

**Strom = INTEGRAL(Fläche) von  $J \cdot dA$**   $I = \int J \cdot dA$

A38. *Was ist ein „Erzeuger“? Beispiele!*

Liefert Energie, die zum Aufrechterhalten eines Stromkreises notwendig ist, z.B. Batterie, Akku, Generator, Dynamo, Brennstoffzelle, Solarzelle,...

A39. *Was ist ein „Verbraucher“? Beispiele!*

Wandelt elektrische Energie in andere Energieformen um, z.B. mechanisch (Motor, Magnet, ...), thermisch (Verlustwärme!, Heizung, ...), optisch (Glühlampe, Leuchtdiode, ...), ...

A40. *Was versteht man unter dem Begriff Energie? Wie ist die elektrische Energie definiert?*

Energie = Arbeit. 1 J = Arbeit, um eine Kraft von 1 N 1 Meter zu bewegen.

A41. *Warum braucht man eine Hin- und eine Rückleitung zwischen Erzeuger und Verbraucher?*

Stromkreislauf muss geschlossen sein! "Verbrauchte" Ladungen (mit niedrigerem Energieniveau) werden wieder zum Erzeuger zurücktransportiert. Ladungen können NICHT erzeugt werden, nur transportiert!

A42. *Was sind „Energieniveau“ und „Potential“?*

Energieniveau: Energie, die ein Teilchen besitzt. Interessant bei Verlust / Zuwachs von Energie (Differenz). Potential: Auf Ladung bezogene Energie (W/Q), damit Vorzeichen eliminiert!

A43. *Wie wird eine Potentialdifferenz genannt?*

Spannung.

A44. *Gibt es ein vordefiniertes Potential mit Wert 0V?*

Nein, das 0 - Potential kann beliebig festgesetzt werden (z.B. im Unendlichen, bestimmter Punkt in der Schaltung ...)

A45. *Welche Energieränderung erfährt eine Ladung (1C), die sich über einen Widerstand bewegt, an welchem die Spannung 5V abfällt?*

Potentialdifferenz = -5 V (Spannungsabfall, Verbraucher!), d.h. bei 1 C ist die Energiedifferenz -5 J! Das negative Vorzeichen kommt daher, dass sich der Widerstand dabei erwärmt, d.h. dass die elektrische Energie zugunsten der thermischen kleiner wird.

A46. *Wie wird die elektrische Leistung berechnet?*

geleistete Arbeit / Zeit = Energiedifferenz / Zeit = Spannung \* Ladung / Zeit = Spannung \* Strom

A47. *Was ist der Wirkungsgrad bei einem Energieumwandler (Gleichung, Beispiele)?*

Verhältnis zwischen nutzbarer Energie zu aufgenommener Energie. Z.B.: el. Motor nimmt 1kW Leistung auf, gibt aber nur 0,7 kW mechanische Leistung ab: Wirkungsgrad = 70 % =  $P_{\text{Nutz}} / P_{\text{aufgen.}}$

A48. Ein Durchlauferhitzer ist für eine Durchflussmenge von 0,05 l Wasser pro Sekunde zu dimensionieren. Das Wasser mit  $c = 4187 \text{ J / (kg} \cdot \text{K)}$  soll dabei um  $40^\circ$  erhitzt werden. Wie groß muss die Anschlussleistung sein, wenn ein Wirkungsgrad von 90 % angenommen wird?

Erforderliche Leistung = Energie pro Zeit.  $P = W / t$  Aufheizenergie pro Sekunde = Energie um 0,05 l Wasser um  $40^\circ$  zu erhitzen! Die erforderliche Heizleistung ist daher:

$$P = c \cdot m \cdot \Delta T / t = 4187 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,05 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 40^\circ\text{C} = 8,374 \text{kJ} / \text{s} = 8,374 \text{kW} = P_{\text{Nutz}}$$

Die elektrische Anschlussleistung muss entsprechend höher sein!  $P_{\text{Nutz}} = \eta \cdot P_{\text{el}}$ , daher:  $P_{\text{el}} = \frac{P_{\text{Nutz}}}{\eta} = \frac{8,374 \text{kW}}{90\%} = 9,3 \text{kW}$

A49. Ein Kran soll ein Maximalgewicht von 11 t mit 20 cm/s heben können. Wie groß muss die Motorleistung sein, wenn gilt  $\eta_{\text{Motor}}=98\%$  und  $\eta_{\text{Mechanisch}}=60\%$ ? ( $g=9,81 \text{m/s}^2$ )

zu verrichtende Arbeit = Gegenkraft zur Schwerkraft:  $F_g = 11 \text{t} \cdot g = 11000 \text{kg} \cdot 9,82306 \text{m} / \text{s}^2 = 108 \text{kN}$

Arbeit = Kraft \* Weg, Leistung = Kraft \* Weg / Zeit = Kraft \* Geschwindigkeit!

$$P = F_g \cdot v = 108 \text{kN} \cdot 0,2 \text{m} / \text{s} = 21,61 \text{kW} = P_{\text{Nutz}}$$

Die Nutzleistung wird aus der Primärleistung berechnet zu:

$$P_{\text{Nutz,Motor}} = P_{\text{elektrisch}} \cdot \eta_{\text{Motor}} \quad P_{\text{Nutz,Mechanisch}} = P_{\text{Motor}} \cdot \eta_{\text{Mechanisch}} \quad \text{daher:}$$

$$P_{\text{elektrisch}} = \frac{P_{\text{Nutz,Mechanisch}}}{\eta_{\text{Motor}} \cdot \eta_{\text{Mechanisch}}} = \frac{P_{\text{Nutz,Mechanisch}}}{\eta_{\text{ges}}} = \frac{21,61 \text{kW}}{98\% \cdot 60\%} = \frac{21,61 \text{kW}}{58,8\%} = 36,752 \text{kW}$$

A50. Wirkungsgrade im Kraftwerk:

Energie der Kohle geht zu 95 % an den Kessel (Kesselwirkungsgrad),

thermischer Wirkungsgrad (< Carnot – Wirkungsgrad) = 50 %,

Turbine, Dampfleitungen: Wirkungsgrad = 0,85,

Generator (elektr. Maschine): Wirkungsgrad = 0,98,

Eigenverbrauch des Kraftwerks: 6 %.

Wie hoch ist der Gesamtwirkungsgrad?

Selbst ohne die Prozesse zu kennen (Kohle -> Kessel -> Druck -> Turbine -> Generator -> Eigenverbrauch -> Netz), kann der Gesamtwirkungsgrad bestimmt werden (Multiplikation der Einzelwirkungsgrade). ACHTUNG: Eigenverbrauch = Verlust!

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{Kessel}} \cdot \eta_{\text{Thermisch}} \cdot \eta_{\text{Turbine}} \cdot \eta_{\text{Generator}} \cdot \eta_{\text{Eigenverbrauch}} = 95\% \cdot 50\% \cdot 0,85 \cdot 0,98 \cdot (1 - 6\%) = 37\%$$

Vergleich: Brennstoffzellen: 30 - 60 %, Solarzellen: bis 25 %

A51. Ein Wasserkocher hat die elektrische Anschlussleistung (Nennleistung) von 1,2 kW und einen Wirkungsgrad von 75 %. Wie lange braucht er, um 1 l (~1kg) Wasser mit  $20^\circ\text{C}$  zum kochen ( $100^\circ\text{C}$ ) zu bringen (Anm.: spezifische Wärmekapazität des Wassers:  $c = 4187 \text{ J / (kg} \cdot \text{K)}$ )?

Erforderliche thermische Energie:  $W_{\text{th}} = c \cdot m \cdot \Delta T = 4187 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1 \text{kg} \cdot 80^\circ\text{C} = 334960 \text{J} \approx 335 \text{kJ} = W_{\text{Nutz}}$

erforderliche el. Energie:  $W_{\text{th}} = \eta \cdot W_{\text{el}}$ , daher:  $W_{\text{el}} = \frac{W_{\text{th}}}{\eta} = \frac{335 \text{kJ}}{75\%} = 447 \text{kJ} = P_{\text{el}} \cdot t$

Energie = Leistung \* Zeit -> Zeit = Energie / Leistung  $t = \frac{W_{\text{el}}}{P_{\text{el}}} = \frac{447 \text{kJ}}{1,2 \text{kW}} = 372,5 \text{s} = 6' 12,5 \text{s}$

A52. Ein Wasserkocher braucht zum Erwärmen von 1l Wasser (=1kg) von  $14^\circ\text{C}$  auf  $100^\circ\text{C}$  6 Minuten bei einer Leistungsaufnahme von 1200 W. Wie groß ist sein Wirkungsgrad (Anm.: spezifische Wärmekapazität des Wassers:  $c = 4187 \text{ J / (kg} \cdot \text{K)}$ )?

abgegebene thermische Energie:  $W_{\text{th}} = c \cdot m \cdot \Delta T = 4187 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1 \text{kg} \cdot (100^\circ - 14^\circ) \text{K} = 360 \text{kJ} = W_{\text{Nutz}}$

aufgenommene el. Energie  $W_{\text{el}} = P_{\text{el}} \cdot t = 1,2 \text{kW} \cdot 6' \cdot \frac{60 \text{s}}{1'} = 432 \text{kJ} = \frac{W_{\text{Nutz}}}{\eta}$ , daher:  $\eta = \frac{W_{\text{Nutz}}}{W_{\text{el}}} = \frac{360 \text{kJ}}{432 \text{kJ}} = 83,35\%$

A53. Eine Pumpe (Wirkungsgrad  $\eta=50\%$ ) soll mit einer Bohrmaschine (Wirkungsgrad  $\eta=60\%$ , Leistung 200W) einen überschwemmten Keller auspumpen (10.000 l Wasser, Pumphöhe = 2,5m). Wie lange braucht man dazu? Wie groß ist der Gesamtwirkungsgrad?

$$\text{Gesamtwirkungsgrad} = \eta_{ges} = \eta_{Pumpe} \cdot \eta_{Bohrmaschine} = 50\% \cdot 60\% = 0,5 \cdot 0,6 = 0,3 = 30\%$$

$$\text{Erforderliche Energie} = \text{Nutzenergie} = \text{Pot. Energie des Wassers } W_{Nutz} = m \cdot g \cdot h = 10^4 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 2,5 \text{ m} \approx 250 \text{ kJ}$$

$$\text{erf. el. Energie} = W_{el} = \frac{W_{Nutz}}{\eta} = \frac{250 \text{ kJ}}{30\%} = \frac{250 \text{ kJ}}{0,3} = 833 \text{ kJ} = P_{el} \cdot t_{ges} \quad \text{daher: } t_{ges} = \frac{W_{el}}{P_{el}} = \frac{833 \text{ kJ}}{200 \text{ W}} = 4167 \text{ s} = 69'$$

A54. Die Heizspirale einer Kochplatte ist für 220 V dimensioniert. Durch eine Erhöhung der Spannung im Versorgungsnetz wird die Betriebsspannung auf 235 V erhöht. Um wie viel Prozent steigt dabei die Leistung?

$$\text{Leistung P is proportional zu } U^2. \text{ Daher: } \frac{P_1}{P_2} = \frac{U_1^2}{U_2^2} = \frac{235^2}{220^2} = 1,141 \rightarrow \text{Erhöhung um } 14,1\%$$

A55. Was ist eine Anode, was eine Kathode?

Beides Elektroden: Leitungsanschluss eines nicht-metallischen Mediums;

Anode = Elektronen gehen vom Nicht-Metall ins Metall über= Elektronenüberschuss im Metall (- Pol)

Anionen wandern zur Anode, Kationen zur Kathode!

Kathode: Elektronen gehen vom Metall ins Nicht-Metall über= Elektronenmangel (+ Pol).

A56. Wie viel Strom liefert eine Autobatterie (12V), wenn sie in 10 Stunden 2,16 MJ Energie abgibt?

$$\text{Energie W: } W = P \cdot t = (U \cdot I) \cdot t = U \cdot (I \cdot t) = U \cdot Q \quad 2,16 \text{ MJ} = 12 \text{ V} \cdot Q, \text{ daher: } Q = 180 \text{ kC} = 180 \text{ kAs}$$

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{180 \text{ kAs}}{10 \text{ h} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}} = 5 \text{ A}$$

A57. Ein Mobiltelefon braucht im Standby – Betrieb durchschnittlich 10 mW Leistung. Der Akku (3,6V) liefert max. 1200 mAh. Wie groß ist die maximale gelieferte Ladungsmenge (in C) bzw. Energiemenge des Akkus? Wie groß ist der Energieverbrauch pro Stunde? Wie lange funktioniert das Telefon im Standby – Betrieb?

$$\text{Ladungsmenge} = \text{Strom} \cdot \text{Zeit! } Q = 1200 \text{ mAh} = 1,2 \text{ Ah} \rightarrow \text{umrechnen in C: } Q = 1,2 \text{ Ah} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 4320 \text{ As} = 4320 \text{ C}$$

$$\text{Energiemenge } W = Q \cdot U = 4320 \text{ C} \cdot 3,6 \text{ V} = 15,552 \text{ kJ}$$

$$\text{Stromverbrauch: aus der Leistung } P = U \cdot I \rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{10 \text{ mW}}{3,6 \text{ V}} = 2,78 \text{ mA}$$

$$\text{Energieverbrauch in 1 Stunde: } W = P \cdot t = 10 \text{ mW} \cdot 3600 \text{ s} = 36 \text{ J}$$

$$\text{Standbyzeit} < \text{Gesamtenergie} / \text{Energie/Stunde: } t_s = \frac{W_{ges, Akku}}{W_s / h} = \frac{15552 \text{ J}}{36 \text{ J/h}} = 432 \text{ h} \approx 18 \text{ Tage} \approx 2,5 \text{ Wochen}$$

A58. Welche Energieerhöhung erhält eine Ladung von  $3 \cdot 10^{-4} \text{ C}$  beim Durchlaufen eines Erzeugers mit der Quellenspannung von 5 V?

$$\Delta W = Q \cdot \Delta U = 0,3 \text{ mC} \cdot 5 \text{ V} = 1,5 \text{ mJ}$$

A59. Wie viel Strom liefert ein Erzeuger, wenn er bei einer Spannung von 12 V in 10 s die Energie von 0,5 kJ abgibt?

$$W = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t, \text{ daraus: } I = \frac{W}{U \cdot t} = \frac{500 \text{ J}}{12 \text{ V} \cdot 10 \text{ s}} = 4,17 \frac{\text{J}}{\text{Vs}} = 4,17 \frac{\text{J}}{(\text{J/C}) \text{ s}} = 4,17 \frac{\text{C}}{\text{s}} = 4,17 \text{ A}$$

A60. Durch einen Autolüfter (12 V Netz) fließt während 4 Stunden der Strom von 2,5 A. Welche Energiemenge wird umgesetzt?

$$W = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t = 12 \text{ V} \cdot 2,5 \text{ A} \cdot 4 \text{ h} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 432 \text{ kJ}$$

A61. *Wodurch werden Ladungen in einem Leiter bzw. Verbraucher (Widerstand, ...) bewegt?*

Durch die Coulomb - Kraft, d.h. Kraft auf Ladung im elektrischen Feld

A62. *Was ist die elektrische Feldstärke?*

Kraft (Coulomb) als Ursache der Ladungsträgerbewegung bezogen auf die Ladung (Kraft pro Ladung)

A63. *Wie hängt die elektrische Feldstärke mit der Spannung zusammen?*

Feldstärke = Kraft / Ladung

Spannung = Potentialdifferenz = Energiedifferenz / Ladung

Energie = Arbeit = Kraft \* Weg

Spannung = Kraft \* Wegdifferenz / Ladung = Feldstärke \* Wegdifferenz!

Feldstärke = Spannung / Wegdifferenz  $E = U/l$

A64. *Wie groß ist die Kraft auf ein Elektron in einem 50 cm langen Leiter, an dem eine Spannung von 2V abfällt? ( $e=1,60218 \cdot 10^{-19}C$ )*

Kraft auf Ladung wird beschrieben durch die Feldstärke  $E$ :  $F = Q \cdot E$

Feldstärke  $E$  = Spannung pro Länge:  $E = \frac{U}{l} = \frac{2V}{0,5m} = 4V/m$ , daher:  $F = 1,6 \cdot 10^{-19}C \cdot 4V/m = 6,4 \cdot 10^{-19}N$

A65. *Ein Strom geht zuerst durch einen Leiter, dann durch eine Lampe und wieder zurück durch einen zweiten Leiter. Die Stromstärke beträgt  $I = 0,3A$ , die umgesetzte Energie in 1 s wird gemessen zu:*

*Wärmeenergie des 1. Leitungsstückes  $W_1 = 0,03J$ , Wärmeenergie des 2. Leitungsstückes  $W_2 = 0,06J$*

*Wärmeenergie+Lichtenergie der Lampe  $W_L = 1,71J$*

*Wie groß ist die angelegte Spannung? Welche Feldstärken treten in den Leitern auf, wenn  $L_1 = L_2 = 25cm$ ?*

*Welche Feldstärke tritt im Glühdraht der Lampe auf, wenn  $L_L = 1cm$ ?*

Umgesetzte Energie in 1 Sekunde entspricht der Leistung:  $P = W/t$ , daher:  $P_1 = 30mW, P_2 = 1,71W, P_3 = 60mW$

$U_1 = P_1 / I = 0,03W / 0,3A = 0,1V$   $E_1 = U_1 / l_1 = 0,1V / 0,25m = 0,4V/m$

$U_L = P_L / I = 1,71W / 0,3A = 5,7V$   $E_L = U_L / l_L = 5,7V / 0,01m = 570V/m$

$U_2 = P_2 / I = 0,06W / 0,3A = 0,2V$   $E_2 = U_2 / l_2 = 0,2V / 0,25m = 0,8V/m$

A66. *Ein Elektron wird in einem elektrischen Feld ( $6kV/cm$ ) um  $4mm$  in Richtung des höheren Potentials verschoben. Wie ändert sich dabei seine elektrische Energie? ( $e=1,60218 \cdot 10^{-19}C$ )*

$U = E \cdot l = 6kV/cm \cdot 0,4cm = 6000V/cm \cdot 0,4cm = 2400V$  Potential wird höher! Daher Spannungszunahme +

Energieveränderung:  $\Delta W = Q \cdot \Delta U = -e \cdot U = -1,6 \cdot 10^{-19}C \cdot 2400J/C = -3,84 \cdot 10^{-16}J$

Energie nimmt ab! Das ist richtig so, denn die Feldstärke  $E$  ist immer in Richtung vom höheren Potential zum niedrigerem Potential gerichtet. Die wirksame Kraft auf das (negativ geladene) Elektron zeigt somit vom niedrigeren Potential zum höheren Potential, also die angegebene Bewegungsrichtung -> Das Elektron bewegt sich in Richtung der Kraft, wirkt somit als Verbraucher, gibt elektrische Energie ab und verringert so seine elektrische Energie!

A67. *Welche Kraft wird auf ein Elektron in einer Vakuumröhre der Länge  $5cm$  ausgeübt, wenn die Spannung  $0,5kV$  abfällt? Wie groß ist dabei die Beschleunigung des Elektrons ( $m = 9,109534 \cdot 10^{-31}kg$ )? Wie groß ist seine Geschwindigkeit nach den  $5cm$ ? Wann kommt es da an? (Alles in der Annahme, das Elektron sei ungebremst!)*

Kraft -> über  $E$  mit der Spannung verknüpft!:  $E = U/l = 500V/5cm = 10kV/m$

Kraft (BETRÄGE!)  $F = e \cdot E = 1,6 \cdot 10^{-19}C \cdot 10kV/m = 1,6 \cdot 10^{-15}N$

Kinematik:  $F = m \cdot a$ , daher:  $a = \frac{F}{m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-15}N}{9,11 \cdot 10^{-31}kg} = 1,76 \cdot 10^{15}m/s^2 = 1,76km/\mu s^2$ : Pro Mikrosekunde

beschleunigt das Elektron auf ca.  $2km$  pro Mikrosekunde -> eher schnell unterwegs!  
Geschwindigkeit am Ende ??

WEG 1: Umweg Zeit:  $a(t) = a = const$ ,  $v(t) = \int a \cdot dt = a \cdot t$ ,  $s(t) = \int v \cdot dt = a \cdot \frac{t^2}{2}$ , damit die Zeit ausrechnen und in  $v$

einsetzen:  $t(s) = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}}$ , daher:  $v(s) = a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}} = \sqrt{2 \cdot s \cdot a} = \sqrt{2 \cdot 0,05m \cdot 1,75 \cdot 10^{15}m/s^2} = 13262000m/s$

WEG 2: Energiebetrachtung: elektrische Energie wird in Bewegungsenergie umgesetzt!



$$W_{el} = Q \cdot U = e \cdot U = W_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2}, \text{ daher: } v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 500 \text{ V}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 13262000 \text{ m/s}$$

**Einheitenbetrachtung dazu:**  $\sqrt{\frac{\text{C} \cdot \text{V}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{J}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 \cdot \text{m}}{\text{kg}}} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$v = 13262 \text{ km/s}$$

**Zeit: s. Weg 1:**  $t(s) = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,05 \text{ m}}{1,76 \cdot 10^{15} \text{ m/s}^2}} = 7,54 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 7,54 \text{ ns}$

**A68. Welche Größen werden durch die „Beweglichkeit“ miteinander verknüpft?**

**Feldstärke (Ursache der Ladungsbewegung) und Geschwindigkeit (Ergebnis):  $b = v/E$**

**A69. Wie nennt man den Zusammenhang zwischen Stromdichte und elektrischer Feldstärke?**

**Leitfähigkeit: Fähigkeit, bei Vorhandensein einer el. Feldstärke eine Stromdichte zu garantieren.**

**A70. Wovon hängt die Leitfähigkeit eines Materials ab?**

**Von der Ladungsträgerdichte und der Beweglichkeit der Ladungsträger.**

## Lösungswerte:

- A17.  $10^{16}$  Elektronen ( $1,25 \cdot 10^{16}$ )  
A18.  $v_+ = 62,415 \text{ km / s}$ ,  $v_- = 187,24 \text{ km / s}$   
A19.  $144 \text{ C}$   
A20.  $C = 150 \text{ kC}$ ,  $W = 1,8 \text{ MJ}$   
A21.  $10^{17}$   
A22.  $4 \text{ nA}$   
A26.  $0,0345 \text{ mm/s}$   
A30. einige wenige A pro  $\text{mm}^2$  (z.B.  $5 \text{ A/mm}^2$ ).  
A31.  $< 1 \text{ cm / s}$  (Abschätzungsaufgabe!)  
A32.  $2,5 \text{ cm}^2$   
A33.  $0,625 \text{ mm/s}$  (Abschätzungsaufgabe!)  
A34.  $1 \text{ mm/s}$   
A35.  $34 \text{ cm/s}$   
A36.  $3 \text{ cm}^2$   
A45.  $-5 \text{ J}$   
A48.  $9,3 \text{ kW}$   
A49.  $36,7 \text{ kW}$   
A50.  $37 \%$   
A51.  $6 \text{ min } 12 \text{ s}$   
A52.  $83,35 \%$   
A53.  $69 \text{ min} = \text{ca. } 11/4 \text{ Stunden}$   
A54. Erhöhung um  $14,1 \%$ !  
A56.  $5 \text{ A}$   
A57.  $432 \text{ Stunden} = 18 \text{ Tage}$   
A58.  $1,5 \text{ mJ}$   
A59.  $I = 4,17 \text{ A}$   
A60.  $432 \text{ kJ}$   
A64.  $6,4 \cdot 10^{-19} \text{ N}$   
A65.  $U_1 = 0,1 \text{ V}$ ,  $U_2 = 0,2 \text{ V}$ ,  $U_L = 5,7 \text{ V}$ ,  $U_{\text{ges}} = 6 \text{ V}$ ,  $E_1 = 0,4 \text{ V/m}$ ,  $E_2 = 0,8 \text{ V/m}$ ,  
 $E_L = 570 \text{ V/m}$   
A66.  $-3,84 \cdot 10^{-16} \text{ J}$   
A67.  $F = 1,6 \cdot 10^{-15} \text{ N}$ ,  $a = 1,76 \cdot 10^{15} \text{ m / s}^2 = 1,76 \text{ km / } \mu\text{s}^2$ ,  $v = 13253 \text{ km / s}$ ,  $t = 7,54 \text{ ns}$