

## 27 Grundlagen der Elektrotechnik

### Vertiefung und Kompetenzüberprüfung

Martin Apolin (Stand April 2012)

#### Generator und Elektromotor

**A1 a** Erkläre möglichst einfach das Prinzip eines Generators.

**A1 b** Erkläre möglichst einfach das Prinzip eines Elektromotors.

**A1 c** Was stellen die Abbildungen dar? Ordne sie richtig zu und erkläre mit ihrer Hilfe, auf welchem Phänomen beide Geräte beruhen.

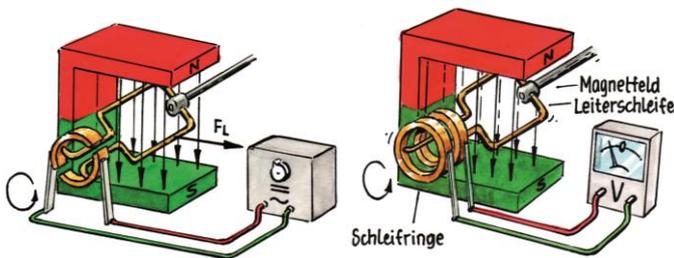


Abb. 1: Was ist was? Auf welchem Effekt beruhen beide Maschinen?  
(Grafik: Janosch Slama)

**A2** Welche der folgenden Aussagen sind richtig oder falsch und warum?

- a Ein Kraftwerk erzeugt elektrische Energie!
- b Ein Kraftwerk erzeugt Energie!
- c Die Haushalte brauchen immer mehr Strom!
- d Die Haushalte verbrauchen immer mehr Strom!

**A3** Erkläre, warum eine Leiterschleife, die in einem Magnetfeld rotiert, eine Induktionsspannung erzeugt. Verwende dazu Abb. 2 und die Begriffe elektromagnetische Induktion und magnetischer Fluss.

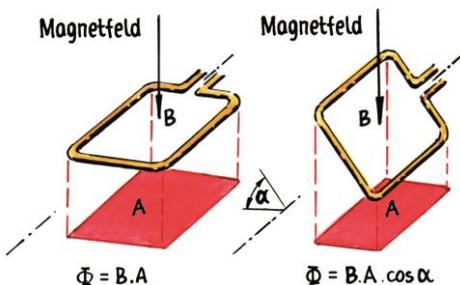


Abb. 2 zu A3 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 27.3, S. 4).

**A4 a** Leite die Gleichung für die Induktionsspannung einer rotierenden Leiterschleife ab (Abb. 2). Verwende dazu die Gleichungen für den magnetischen Fluss und für die Induktionsspannung  $U_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt}$  sowie den Zusammenhang zwischen Drehwinkel und Winkelgeschwindigkeit  $\alpha = \omega \cdot t$ .

**A4 b** Wie kann man die Induktionsspannung in der Leiterschleife erhöhen? Begründe mit Hilfe der in A4 a gefundenen Gleichung.

**A5** Abb. 3 stellt den Zusammenhang zwischen dem magnetischen Fluss durch eine rotierende Leiterschleife und der daraus resultierenden Induktionsspannung dar. Warum ist ausgerechnet dann der Betrag der Induktionsspannung am größten, wenn der magnetische Fluss null ist?

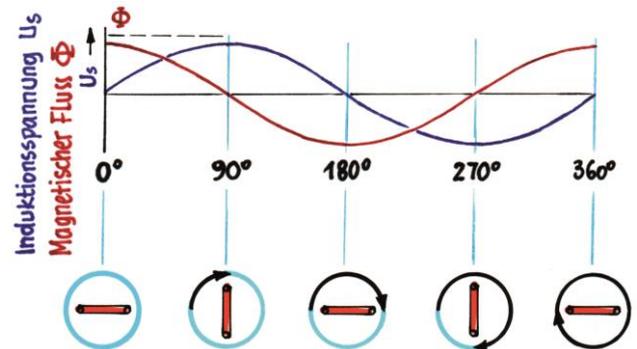


Abb. 3: Zusammenhang zwischen der Stellung der Leiterschleife, dem magnetischen Fluss und der Induktionsspannung  $U_{\text{ind}}$ . Auch wenn sie hier gleich hoch eingezeichnet sind:  $\Phi$  und  $U_{\text{ind}}$  haben natürlich völlig verschiedene Einheiten und Werte (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 27.4, S. 4).

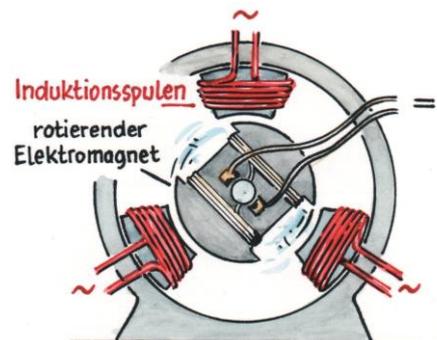


Abb. 4 zu A6 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 27.6, S. 5).

**A6** In Abb. 4 siehst du einen Großgenerator, der auf dem dynamo-elektrischen Prinzip beruht.

a Welche Unterschiede bestehen in seiner Bauweise im Vergleich mit dem Generator in Abb. 1?

**b** Was ist der Vorteil des Generators nach dem dynamo-elektrischen Prinzip im Vergleich mit dem „normalen“ Generator in Abb. 1?

**c** Wie ist es beim Starten eines dynamoelektrischen Generators (Abb. 4)? In diesem Fall arbeiten ja die Elektromagneten noch nicht und daher kann doch keine Induktion erzeugt werden! Und warum schaukelt sich im Betrieb die produzierte Stromstärke nicht immer weiter auf, quasi bis ins Unendliche?

**A7** Warum funktioniert eigentlich der Motor in Abb. 5? Fehlt da nicht ein Teil?



Abb. 5: Der einfachste Elektromotor der Welt besteht nur aus einer Batterie, einer Eisenschraube, einem Supermagneten und einem Stück Draht (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 27.12, S. 6).

**A8** Schätze die Leistung einer Turbine in einem Laufkraftwerk der Donau ab (Abb. 6). Nimm den Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterwasser mit 11 m an und die Durchflussmenge mit  $350 \text{ m}^3/\text{s}$ . Nimm an, dass 10 % der potenziellen Energie des Wassers bei der Umwandlung in elektrische Energie in Form von Wärme verloren gehen.

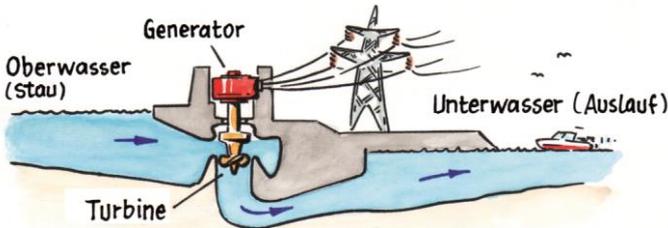


Abb. 6: Das Donauwasser betreibt Turbinen, die wiederum mit Generatoren verbunden sind. Die Achsen der Generatoren stehen senkrecht (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 27.10, S. 6).

**A9** Könnte man nicht einfach, um den steigenden Strombedarf in Österreich zu decken, mehr Donaukraftwerke bauen? Verwende für deine Begründung Abb. 7!



Abb. 7: Querschnitt durch die Staustufen der Donau. Das Gefälle ist stark übertrieben dargestellt (Quelle: Wikipedia).

**A10** Die Hainburger Au (Abb. 8; siehe auch Antwort zu A9) ist eine naturbelassene Flusslandschaft an der Donau nahe Hainburg in Niederösterreich, östlich von Wien. Anfang 1983 hatte der WWF Österreich seine Kampagne „Rettet die Auen“ gestartet und mit Hilfe einiger Medien begonnen, die Öffentlichkeit auf die drohende Zerstörung eines Teils der Donauauen durch ein dort geplantes Wasserkraftwerk aufmerksam zu machen.



Abb. 8: Die Hainburger Au östlich von Wien (Foto: Wolfgang Glock; Quelle: Wikipedia).

Am 8. Dezember 1984 organisierte die Österreichische Hochschülerschaft einen Sternmarsch, an dem etwa 8000 Menschen teilnahmen. Mehrere hundert Personen blieben in der Au und erzwangen die Einstellung der Rodungsarbeiten. Nachdem die Au zum Sperrgebiet erklärt worden war, kam es am 19. Dezember 1984 zu einem umstrittenen Polizeieinsatz, bei dem unter Schlagstockeinsatz eine Fläche von der Größe von zwei Fußballfeldern mit Absperrungen eingefasst und unter Polizeibewachung gerodet wurde. Bei den Zusammenstößen zwischen 800 Polizeibeamten und etwa 3000 Aubesetzern wurden auf Seiten der Umweltschützer nach offiziellen Angaben knapp 20 Personen verletzt. Am Abend desselben Tages demonstrierten in

Wien rund 40.000 Menschen gegen das Vorgehen der Regierung und gegen den Kraftwerksbau.

Ab 21.12.1984 verhängte die Bundesregierung einen Rodungsstopp. Das 1985 durchgeführte Konrad-Lorenz-Volksbegehren, das unter anderem ein Verbot von Großkraftwerken wie Hainburg und die Errichtung eines Nationalparks im Gebiet von Hainburg verlangte, wurde von über 350.000 Personen unterzeichnet. Der Verwaltungsgerichtshof hob den Wasserrechtsbescheid auf. Seit 1996 gehört das Gebiet der Hainburger Au zum Nationalpark Donau-Auen.

Begründe, warum die Hainburger-Au-Besetzung sowohl umweltpolitisch als auch demokratiepolitisch für Österreich von großer Bedeutung war! Überlege, warum die Interessensbereiche von Ökologie und Ökonomie meistens sehr schwer unter einen Hut zu bringen sind.

**A11** Was versteht man unter dem Wirkungsgrad? Wie groß kann dieser maximal sein und warum wird dieser maximale Wert in der Praxis nicht erreicht? Vervollständige Tabelle 1!

Gerät	aufgewendete Energie	Nutzenergie	Wirkungsgrad in %
Elektromotor		mechanisch	90 - 99,5
Fahrraddynamo			20 - 65
Generator			95 - 99,5
Transformator	elektrisch		50 - 99,8

Tabelle 1 zu A11

**A12** Auf Wikipedia (Stand 13.4.2012) findet man zum Thema Wirkungsgrad von Elektromotoren den Satz „Technologisch veraltete Elektromotoren führen zu einem erhöhten Energieverbrauch“. Kommentiere dieses Zitat. Wie könnte man den Satz besser formulieren?

**A13** Eine Straßenbahn hat einen Stromabnehmer, ein Oberleitungsbus (O-Bus) jedoch zwei. Warum ist das so?



Abb. 9: Links: eine Straßenbahn (Bild: Georingler); rechts: ein alter O-Bus (Bild: Harold17; Quellen: Wikipedia).

**A14** Beim Fahrrad führt eine Leitung vom Dynamo (siehe Abb. 10) zur Lampe, aber keine zurück. Warum brennt die Lampe trotzdem, wenn doch der Stromkreis scheinbar nicht geschlossen ist?



Abb. 10: Ein moderner Fahrraddynamo, ein sogenannter Seitenläufer (Foto: Tympanus; Quelle: Wikipedia)

**A15** Überlege, wo im Haushalt überall Elektromotoren verwendet werden.

**Die Leistung des Wechselstroms**

**A16** Welchen Wert kannst du für die maximale Spannung zwischen den Polen einer Steckdose feststellen? Begründe deine Antwort und mache eine Skizze des Spannungsverlaufes!

**A17** Wie hängt die Stromleistung von der Frequenz des Wechselstroms ab? Anders gefragt: Wie würde sich die Leistung verändern, wenn sich die Frequenz des Wechselstroms veränderte?

**A18** Warum hat der Wechselstrom eine Frequenz von 50 Hz und nicht irgendeine andere?

**A19** In Abb. 11 siehst du mögliche Verläufe der Leistungskurve beim Wechselstrom. Ordne diese richtig zu: 1) reiner Ohm'scher Widerstand, 2) rein kapazitiver Widerstand; 3) rein induktiver Widerstand; 4) Mischung von Widerständen.

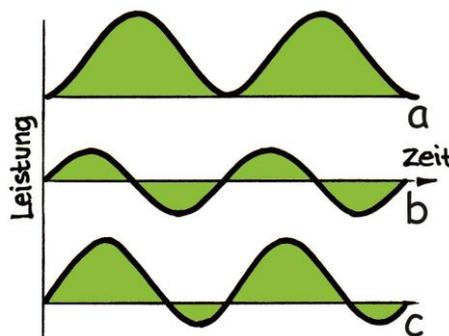


Abb. 11 zu A19 (Grafik: Janosch Slama)

**A20** Die Leistung des Wechselstroms ergibt sich aus  $P = U_{eff} I_{eff} \cos \varphi$ . Gibt der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  den Wirkungsgrad eines Motors an? Er kann Werte von 0 bis 1 annehmen. Überlege mit Hilfe von Tabelle 1!

**A21** In Abb. 12 siehst du das Typenschild eines Elektromotors. Wie groß ist die Stromleistung? Wie groß ist die Leistung, die der Motor aufnehmen kann? Wie groß ist die mechanische Leistung, die der Elektromotor abgeben kann? Verwende dafür Tabelle 1!

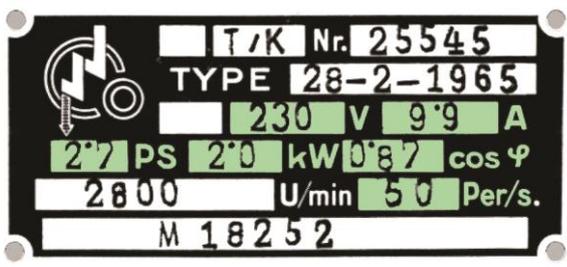


Abb. 12: Das Typenschild eines Elektromotors (Foto: Theodor Duenbostl).

**A22 a** Was versteht man unter Kilowattstunden (kWh)? Rechne kWh in Joule um!

**A22 b** In Tabelle 2 siehst du die maximale Leistung der Donaukraftwerke und die durchschnittliche Stromarbeit, die sie im Laufe eines Jahres aufbringen. Rechne mit diesen beiden Werten die Auslastung der Kraftwerke aus und vervollständige die Tabelle. Ein Watt entspricht einem Joule pro Sekunde.

Kraftwerk	max. Leistung in MW	GWh/Jahr	Auslastung
Jochenstein	132,0	850,0	
Aschach	324,0	1662,0	
Ottensheim-Wilhering	179,0	1134,9	
Abwinden-Asten	168,0	995,7	
Wallsee-Mitterkirchen	210,0	1318,8	
Ybbs-Persenbeug	236,5	1335,9	
Melk	187,0	1221,6	
Altenwörth	328,0	1967,6	
Greifenstein	293,0	1717,3	
Freudenau	172,0	1052,0	

Tab. 2 zu A22 b (Quelle: Wikipedia)

**A23** Bei Filmaufnahmen werden die Lampen meistens mit Gleichstrom betrieben. Was könnte der Grund dafür sein? Verwende für deine Erklärung Abb. 11!

**Der Transformator**

**A24 a** Warum wird die Spannung in Überlandleitungen auf mindestens 220 kV hinauftransformiert, um den Strom zu den Haushalten zu übertragen, und dort wieder hinuntertransformiert? Warum überträgt man den Strom nicht gleich mit einer Spannung von 230 V? Verwende für deine Erklärung die Formel für die Leistung  $P = U \cdot I$  und für den Ohm'schen Widerstand  $R = U/I$  beziehungsweise  $U = I \cdot R$ .

**A24 b** Berechne das Verhältnis der Leistungsverluste in den Leitungen, wenn du 230 V bzw. 220.000 V verwendest. Verwende dazu das Ergebnis aus A24 a.

**A25** Nimm an, jede Turbine von Ybbs-Persenbeug (Leistung 3,4 MW; siehe A8) hat einen eigenen Trafo, der mit nur 2 % Verlust arbeitet. Wie viel Watt entspricht das? Wie schnell könnte man damit einen Liter Wasser zum Kochen bringen? Was folgt daraus? Hilfe: Die spezifische Wärmekapazität von Wasser beträgt  $4190 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  (siehe Kap. 11.3, BB5).

**A26** Warum kann ein Vogel gefahrlos auf einer Hochspannungsleitung sitzen?



Abb. 13 (Grafik: Janosch Slama)

**A27** Warum und mit welcher Tonhöhe brummt ein Transformator?

**A28** In Nassräumen verwendet man oft so genannte Trenntrafos, etwa für die Rasiersteckdose. Wie funktionieren diese? Erkläre mit Hilfe der Abbildung!

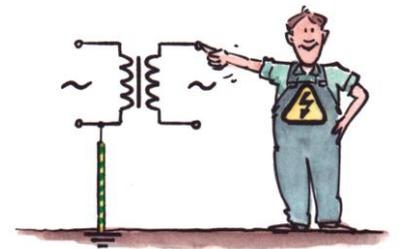


Abb. 14 (Grafik: Janosch Slama)

## Strom im Haushalt und Stromunfälle

**A29** Man liest oft, der Stromfluss in den Nervenfasern ist mit Gleichstrom vergleichbar! Ist das richtig oder falsch? Hilf dir mit der Abbildung!

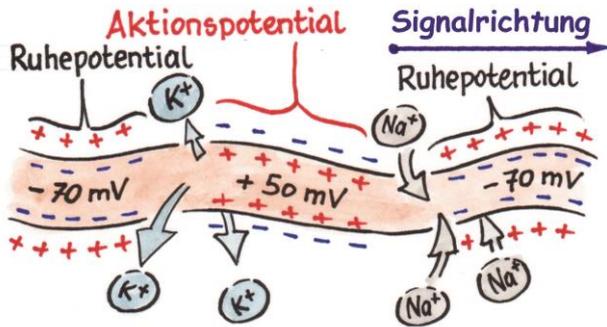


Abb. 15: Ausbreitung eines elektrischen Impulses in der Nervenfaser. Die Änderung der Spannung erfolgt durch die Diffusion von  $Na^+$  und  $K^+$  (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 24.2, S. 90, BB6).

**A30** Warum ist Strom für uns eigentlich gefährlich? Was passiert dabei im Körper?

**A31** Welche Maßnahmen gibt es, um Stromunfällen vorzubeugen?

**A32** Wie funktioniert ein Defibrillator? Wann wird er eingesetzt? Verwende für deine Erklärung Abb. 16.

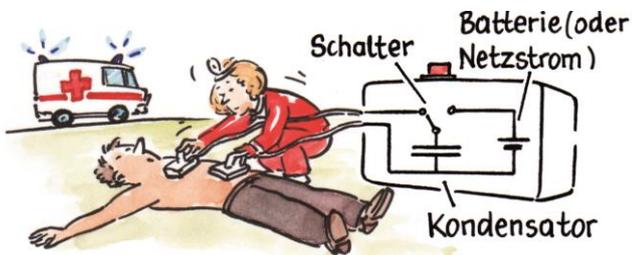


Abb. 16: Schaltskizze für einen Defibrillator (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 24.8, S. 93, BB6).

**A33** Erkläre mit Hilfe der Abbildung die Funktionsweise eines Fehlerstromschutzschalters.

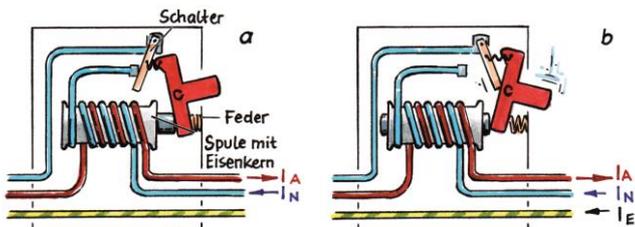


Abb. 17: Funktionsweise eines FI-Schalters (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 27.38, S. 13).

**Hilfe zu A1 a:** Ein Generator wandelt mechanische Energie in elektrische Energie um.

**Hilfe zu A1 b:** Ein Elektromotor wandelt elektrische Energie in mechanische Energie um.

**Hilfe zu A1 c:** In Abb. 1 ist links ein Motor zu sehen und rechts ein Generator. Beide Maschinen nutzen die Lorentzkraft aus. Beim Generator links bewirken die fließenden Ladungen eine Lorentzkraft, die die Wicklung in Drehung versetzt. Beim Motor rechts bewirkt die Drehung der Wicklung, dass sich die Schleife und somit auch die Ladungen durch das Magnetfeld bewegen. Dadurch entsteht wiederum eine Lorentzkraft, die die Ladungen verschiebt und somit eine Induktionsspannung hervorruft.

**Hilfe zu A2:** Energie wird nicht erzeugt oder vernichtet, sie kann nur umgewandelt werden. Das ist die Kernaussage des Energieerhaltungssatzes (siehe Kap. 8.6, BB5). Deshalb kann man zwar elektrische Energie erzeugen, indem man sie zum Beispiel aus mechanischer Energie umwandelt (hier bleibt die Energie erhalten), man kann aber keine Energie erzeugen (hier würde ja Energie dazukommen). Deshalb ist Antwort a richtig und b falsch.

Es wird immer mehr Strom in Haushalt gebraucht (im Sinne von benötigt). Es wird aber dabei kein Strom verbraucht, also es fließen salopp gesagt nicht mehr Ampere hinein als hinaus. Es wird lediglich die Energie des Stroms in andere Energieformen umgewandelt, etwa mechanische Energie (Motoren) oder Wärme. Daher ist c richtig und d falsch!

**Hilfe zu A3:** Den Effekt, dass ein veränderliches Magnetfeld einen Strom hervorruft, nennt man elektromagnetische Induktion oder kurz Induktion. Man sagt auch, Strom wird durch ein veränderliches Magnetfeld induziert, das bedeutet so viel wie ausgelöst oder hervorgerufen. Man spricht daher vom Induktionsstrom.

Der magnetische Fluss ist das Produkt von magnetischer Induktion und davon durchsetzter Fläche:  $\Phi = B \cdot A$ . Allgemein kann man nun sagen: Wenn sich in einer Leiterschleife irgendwie der magnetische Fluss verändert, dann wird in ihr eine Spannung induziert.

Wenn man die Leiterschleife kippt, verringert sich der magnetische Fluss, weil sich die „effektive“ Fläche verringert. Man kann sich diese als „Schattenfläche“ vorstellen.

**Hilfe zu A4 a:** Der magnetische Fluss durch eine Leiterschleife ist  $\Phi = B \cdot A$ . Das gilt aber nur, wenn das Magnetfeld senkrecht zur Leiterschleife steht. Für einen beliebigen Win-

kel  $\alpha$  gilt  $\Phi = B \cdot A \cdot \cos \alpha$  (siehe Abb. 2). Weil sich die Leiterschleife kontinuierlich dreht, gilt weiters  $\alpha = \omega \cdot t$ . Das kann man nun in das Induktionsgesetz einsetzen. Um die Induktionsspannung ausrechnen zu können, muss man den Differenzialquotienten nehmen:

$$U_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(BA \cos \alpha)}{dt} = -BA \frac{d(\cos \omega t)}{dt} = BA \omega \sin \omega t$$

**Hilfe zu A4 b:** Man kann die magnetische Induktion ( $B$ ) des Magneten erhöhen (also einen stärkeren Magneten nehmen), man kann die Fläche der Leiterschleife ( $A$ ) vergrößern, man kann die Winkelgeschwindigkeit ( $\omega$ ) erhöhen, also die Rotationsgeschwindigkeit der Leiterschleife, und man kann die Anzahl der Leiterschleifen erhöhen, indem man eine Spule nimmt. Die berechnete Induktionsspannung gilt ja für jede einzelne Leiterschleife.

**Hilfe zu A5:** Die Induktionsspannung ist ja nicht ein Resultat des magnetischen Flusses, sondern der *Änderung* des magnetischen Flusses. Mathematisch gesagt gilt *nicht*  $U_{\text{ind}} = -\Phi$ , sondern  $U_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt}$ . Es kommt also auf die Steigung der Tangente an einem bestimmten Punkt der Kurve des magnetischen Flusses an, und nicht auf den Absolutwert an dieser Stelle. Der Betrag der Steigung der Tangente ist bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$  am größten (= größte Änderung des magnetischen Flusses = größte Induktionsspannung) und bei  $0^\circ$  und  $180^\circ$  null (= keine Änderung des magnetischen Flusses = keine Induktionsspannung).

**Hilfe zu A6 a:** Beim Generator in Abb. 1 rechts rotiert eine einzige Leiterschleife, beim Generator in Abb. 4 rotiert der Magnet. Außerdem wird bei Abb. 1 ein Permanentmagnet verwendet, bei Abb. 4 ein Elektromagnet.

**Hilfe zu A6 b:** Statt Permanentmagneten, die nur ein relativ schwaches Magnetfeld erzeugen, verwendet man bei Hochleistungsgeneratoren Elektromagnete. Der Clou an der Sache: Diese kann man mit dem Strom speisen, den der Generator selbst erzeugt.

**Hilfe zu A6 c:** Der Restmagnetismus des Eisenkerns genügt, um das Aufschaukeln zu starten. Dreht sich dann die Spule in dem schwachen noch vorhandenen Magnetfeld, so entsteht ein kleiner Induktionsstrom, der den Elektromagneten verstärkt und so weiter. Warum ist dieses Aufschaukeln nicht grenzenlos? Das Magnetfeld erreicht eine Sättigung, wenn alle Elementarmagnete des Kerns ausgerichtet sind.

Trotz Steigern der Stromstärke wären dann die Wärmeverluste so groß, dass keine weitere Steigerung der Magnetkraft möglich ist.

**Hilfe zu A7:** Der durch den Kurzschluss sehr hohe Strom fließt durch den Magneten. Dabei wird eine Lorentz-Kraft auf ihn ausgeübt. Der springende Punkt: Als Reaktion auf die Ablenkung des Stromes tritt eine Gegenkraft auf (3. Newton'sches Axiom). Die führt zu einem Drehmoment, das den Zylindermagneten in Rotation versetzt. Die Symmetrie der Konstellation wird dadurch nicht verändert, so dass die Bedingungen für eine kontinuierliche Bewegung, die Rotation, erhalten bleiben. Der Magnet wirkt also gleichzeitig auch als Leiterschleife. Deshalb hat dieser Motor quasi ein Element weniger als ein normaler Motor.

**Hilfe zu A8:** Wasser hat eine Dichte von etwa  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Die  $350 \text{ m}^3$  Wasser, die pro Sekunde durch jede Turbine fließen, haben daher eine Masse von  $350 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 = 3,5 \cdot 10^5 \text{ kg}$ . Im Wasser steckt die potenzielle Energie  $E_p = mgh = 3,5 \cdot 10^5 \cdot 9,81 \cdot 11 \text{ J} \approx 3,8 \cdot 10^7 \text{ J}$ . Nur 90 % oder  $3,42 \cdot 10^7 \text{ J}$  dieser freigesetzten Energie können für die Erzeugung des Stroms genutzt werden. Weil diese Energie jede Sekunde freigesetzt wird, beträgt die Leistung  $3,42 \cdot 10^7 \text{ J/s}$  oder  $3,42 \cdot 10^7 \text{ W}$ . Das sind also rund 34 Millionen Watt oder 34 Megawatt pro Turbine.

**Hilfe zu A9:** Die Leistung, die ein Kraftwerk erzeugt, hängt bei gleicher Durchflussmenge nur vom Höhenunterschied ab. Der Höhenunterschied kommt aber wiederum durch das Gefälle der Donau zu Stande. Würde man zwischen zwei bestehenden Kraftwerken ein neues bauen, dann würde sich der Höhenunterschied des Wasserstandes bei diesem und dem nachfolgenden Kraftwerken halbieren. Statt angenommen einmal 11 m hätte man dann zweimal 5,5 m Höhenunterschied. Die Leistung könnte dadurch *nicht* gesteigert werden, weil bei beiden Kraftwerken die Leistung ebenfalls halbiert wird. Es gäbe auf der Donau nur noch zwei sinnvolle Möglichkeiten für ein neues Kraftwerk: zwischen den Kraftwerken Melk und Altenswörth (dort befindet sich quasi noch eine Lücke) und nach dem Kraftwerk Freudenu in der Hainburger Au. Beide Projekte wurden aber aus Gründen des Umweltschutzes nicht umgesetzt. Das geplante Kraftwerk in Hainburg wurde etwa 1985 nach massiven Bürgerprotesten fallen gelassen (siehe A10).

**Hilfe zu A10:** Durch die Ereignisse von Hainburg hat sich in Österreich der Gegensatz zwischen „konservativen“ und

„grünen“ Ansichten relativ scharf herausgebildet, und der Umweltgedanke hat sich in allen parteipolitischen Programmen festgesetzt. Mit der Besetzung wurde klar, dass die österreichische Bevölkerung den Landschaftswert genauso hoch beurteilt wie die Versorgungssicherheit. Der ORF sprach seinerzeit vom „neuen Umweltbewusstsein der Österreicher“. Mit Hainburg wurde klar, dass man die Ressource Wasserkraft nicht vollständig ausreizen kann, weil sie mit Interessen des Erholungswerts wie auch des Tourismus in Konflikt kommt.

Die Ökonomie (Wirtschaft) ist die Gesamtheit aller Einrichtungen und Handlungen, die der Deckung des menschlichen Bedarfs dienen. Im Namen der Ökonomie werden oft Maßnahmen gesetzt, die den Naturraum stören oder negativ beeinflussen, also unökologisch sind. Die Begründung ist vereinfacht gesagt meist die, dass diese Maßnahmen ja nur im Sinne der Menschen getroffen werden. Oft stecken aber auch rein wirtschaftliche Interessen der Firmen dahinter, also Geld!

**Hilfe zu A11:** Der Wirkungsgrad ist allgemein das Verhältnis von Nutzenergie (z. B. der Energie des elektrischen Stromes) und der zugeführten oder aufgewendeten Energie (z. B. der mechanischen Energie des Wassers in einem Wasserkraftwerk), also  $\eta = \frac{P_{\text{Nutz}}}{P_{\text{aufgew}}}$ . Könnte die gesamte aufgewendete Energie genutzt werden, würde der Wirkungsgrad 100 % betragen. Das ist in der Praxis nicht zu erreichen, weil bei der Energieübertragung immer Wärmeverluste auftreten.

Gerät	aufgewendete Energie	Nutzenergie	Wirkungsgrad in %
Elektromotor	elektrisch	mechanisch	90 - 99,5
Fahrraddynamo	mechanisch	elektrisch	20 - 65
Generator	mechanisch	elektrisch	95 - 99,5
Transformator	elektrisch	elektrisch	50 - 99,8

Tab. 3

**Hilfe zu A12:** Energie bleibt immer erhalten und kann daher nicht verbraucht werden. Das besagt der Energieerhaltungssatz (siehe BB5, Kap. 9.6 bis 9.8). Man könnte den Satz zum Beispiel so formulieren: „Technologisch veraltete Elektromotoren führen zu größeren Leistungseinbußen.“ oder „Technologisch veraltete Elektromotoren haben einen geringeren Wirkungsgrad.“

**Hilfe zu A13:** Für einen geschlossenen Stromkreis braucht man zwei Pole, die miteinander verbunden sind. Beim O-Bus

stellen die beiden Oberleitungen die Pole dar. Bei der Straßenbahn sind die Schienen der zweite Pol. Das ist nur dann gefährlich, wenn man gleichzeitig Schienen und Oberleitung berührt. Das kommt im Normalfall nicht vor, höchstens, wenn man eine lange Metallstange trägt.

**Hilfe zu A14:** Der Strom wird über den Metallrahmen, über die Lampe verbunden sind, zurückgeleitet. Der Stromkreis ist somit doch geschlossen.

**Hilfe zu A15:** Beispiele für den Einsatz von Elektromotoren im Haushalt sind elektrischer Rasierapparat, Mixer, Pürierstab, Staubsauger, Waschmaschine, Geschirrspülmaschine (zum Antreiben der Sprüharme), Mikrowelle (zum Antreiben des Drehtellers), Motor im DVD/CD-Laufwerk, Heizlüfter, Ventilator (auch im PC) oder Kompressor im Eiskasten.

**Hilfe zu A16:** Eine Wechselspannung von  $\pm 325\text{ V}$  ist gleich effektiv wie eine Gleichspannung von  $230\text{ V}$  (Abb. 18). In beiden Fällen würde eine Birne gleich hell leuchten. Deshalb macht man sich das Leben leichter und gibt gleich die Effektivwerte an, nämlich  $230\text{ V}$ . Die Maximalwerte sind immer  $\sqrt{2}$ -mal so groß wie die Effektivwerte (also etwa 1,4-mal).

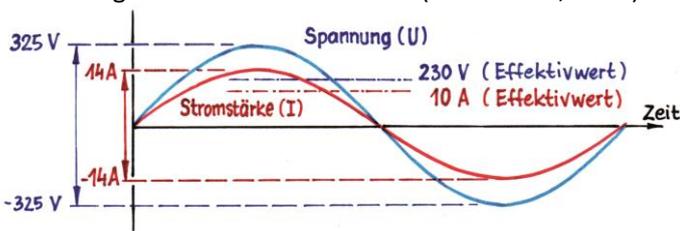


Abb. 18 zu A16 (Grafik Janosch Slama; siehe auch Abb. 27.19, S. 8, BB7)

**Hilfe zu A17:** Die Leistung des Wechselstroms ergibt sich aus  $P = U_{eff} I_{eff} \cos \varphi$  und hängt daher *nicht* von der Frequenz des Wechselstroms ab. Wäre die Frequenz größer oder kleiner, dann wären die Leistungshügel enger oder weiter, an der Leistung selbst würde das aber nichts ändern.

**Hilfe zu A18:** Im Prinzip könnte man Wechselstrom auch mit anderen Frequenzen produzieren, die Leistung würde sich dabei nicht ändern (siehe A17). Tatsächlich produzierten die ersten Kraftwerke Ende des 19. Jh. Wechselströme zwischen 25 und 133 Hz. Damit man aber die Stromnetze verbinden konnte, musste eine einheitliche Regelung getroffen werden. Damit das Licht nicht zu sehr flackert, sollten es mindestens 42 Hz sein. Andererseits wäre der Wirkungsgrad von Transformatoren bei 60 Hz besser. Die 50 Hz sind also gewissermaßen ein Kompromiss. In den USA haben sich aber 60 Hz durchgesetzt.

**Hilfe zu A19:** 1) zu a; 2) zu b; 3) zu b und 4) zu c

**Hilfe zu A20:** Bei einem rein Ohm'schen Widerstand ist  $\varphi = 0$  und  $\cos \varphi$  daher 1. Würde der Leistungsfaktor den Wirkungsgrad angeben, läge er in diesem Fall bei 100 %. Einen solchen Wirkungsgrad gibt es aber nicht (siehe auch A11). Andererseits wäre bei einem reinen Blindwiderstand  $\varphi = 90^\circ$  und  $\cos \varphi$  daher 0. Würde der Leistungsfaktor den Wirkungsgrad angeben, läge er in diesem Fall bei 0 %. Das ist aber auch nicht der Fall. Ein Kondensator nimmt etwa zunächst Energie auf und gibt sie dann wieder ab. Bei einem Wirkungsgrad von 0 % wäre die gesamte Energie in Wärme umgewandelt worden, was aber nicht der Fall ist. Formelmäßig kann man es so schreiben: Der Wirkungsgrad für elektrisch betriebene Geräte ist  $\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}}$ , während der Leistungsfaktor  $\cos \varphi = \frac{P_{el}}{U_{eff} I_{eff}}$  lautet.  $\eta$  ist also nicht  $\cos \varphi$ ! Der Wirkungsgrad gibt an, wie groß die Wärmeverluste sind. Der Leistungsfaktor gibt an, welche Leistung man dem Strom entnehmen kann. Im Leistungsfaktor ist aber der Wirkungsgrad noch nicht berücksichtigt.

**Hilfe zu A21:** Bei 230 Volt und 9,9 A ist die Leistung des elektrischen Stroms  $P = U \cdot I = 2277\text{ W}$ . Weil der Leistungsfaktor 0,87 beträgt, kann der Motor aber nur 1981 W an Leistung aufnehmen. Der Rest der Leistung wird also in den negativen Phasen wieder an das Netz abgegeben. Wenn der Motor einen Wirkungsgrad von angenommenen 95 % hat, können von diesen 1981 W wiederum 1882 W in mechanische Leistung umgesetzt werden, etwa 99 W beträgt die Wärmeleistung des Motors.

**Hilfe zu A22 a:** Die Energie, die im Strom steckt, wird in Kilowattstunden (kWh) angegeben. Darunter versteht man die Energie, die ein Gerät mit der Leistung von einem Kilowatt (1000 W) in einer Stunde umsetzt. Also gilt:  $1\text{ kWh} = 1000\text{ W} \cdot 3600\text{ s} = 3,6 \cdot 10^6\text{ J}$ .

**Hilfe zu A22 b:** Nehmen wir exemplarisch das Kraftwerk Jochenstein. Es hat eine Leistung von 132 MW, also  $132 \cdot 10^6\text{ J/s}$ . Ein Jahr hat  $3,15 \cdot 10^7\text{ s}$ . Daher könnte es im Jahr eine Stromenergie von  $132 \cdot 10^6\text{ J/s} \cdot 3,15 \cdot 10^7\text{ s} = 4,16 \cdot 10^{15}\text{ J}$  abgeben. Das entspricht  $4,16 \cdot 10^{15}\text{ J} / 3,6 \cdot 10^6\text{ J} = 1,16 \cdot 10^{12}\text{ Wh} = 1,16 \cdot 10^3\text{ GWh} = 1160\text{ GWh}$ . Abgegeben werden aber über das Jahr nur 850 GWh. Die Auslastung beträgt daher  $100 \cdot 850\text{ GWh} / 1160\text{ GWh} = 73\%$ . Auf diese Weise lassen sich auch die anderen Auslastungen berechnen.

Kraftwerk	max. Leistung in MW	GWh/Jahr	Auslastung
Jochenstein	132,0	850,0	73 %
Aschach	324,0	1662,0	59 %
Ottensheim-Wilhering	179,0	1134,9	72 %
Abwinden-Asten	168,0	995,7	68 %
Wallsee-Mitterkirchen	210,0	1318,8	72 %
Ybbs-Persenbeug	236,5	1335,9	64 %
Melk	187,0	1221,6	75 %
Altenwörth	328,0	1967,6	68 %
Greifenstein	293,0	1717,3	67 %
Freudenau	172,0	1052,0	70 %

Tab. 4 zu A22 b

**Hilfe zu A23:** Die Leistung des Stroms ist nicht konstant, sondern pulsiert. Dadurch werden die Lampen 100-mal pro Sekunde etwas heller und wieder dunkler. Wenn die Aufnahme­frequenz 24 Bilder pro Sekunde beträgt, kommt es dadurch zu einer Art Schwebung, die zu Helligkeitsschwankungen bei den Bildern führen könnte.

**Hilfe zu A24 a:** Man arbeitet deshalb mit extremen Hochspannungen, weil dann die Verluste wesentlich geringer sind. Es geht also weniger Energie durch Erwärmung verloren. Die Kraftwerksleistung ist  $P = U \cdot I$  und daraus folgt  $I = P/U$ . Ein Teil davon geht beim Transport verloren. Nennen wir sie die Verlustleistung  $P_V$ . Weil diese vom Widerstand der Leitungen abhängt, setzen wir das Ohm'sche Gesetz ein:  $P_V = U \cdot I = I \cdot R \cdot I = I^2 \cdot R$ . Nun kann man in diese Gleichung die Leistung des Kraftwerks einsetzen  $P_V = I^2 \cdot R = \frac{P^2}{U^2} \cdot R \sim \frac{1}{U^2}$ .

**Hilfe zu A24 b:** Aus A24 a folgt  $P_V \sim \frac{1}{U^2}$ . Für zwei verschiedene Betriebsspannungen gilt daher  $\frac{P_{V1}}{P_{V2}} = \frac{U_2^2}{U_1^2}$ . Wenn wir für  $U_1$  230 V annehmen und für  $U_2$  220.000 V, erhalten wir  $\frac{P_{V1}}{P_{V2}} = \frac{U_2^2}{U_1^2} = \frac{4,84 \cdot 10^{10}}{52.900} = 9,15 \cdot 10^5 \approx 10^6$ . Die Verlustleistung ist bei 230 V also rund eine Million Mal so groß wie bei Hochspannung.

**Hilfe zu A25:** Eine Turbine liefert etwa 3,4 MW, also  $3,4 \cdot 10^7$  W. Wenn beim Hochtransformieren 2 % verloren gehen, sind das  $6,8 \cdot 10^5$  W bzw. J/s. Wasser hat eine spezifische Wärmekapazität von  $4190 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Um 1 l Wasser von 20 auf 100 °C zu erwärmen, benötigt man daher  $3,35 \cdot 10^5$  J. Für die Zeit zur Erwärmung ergeben sich daher  $3,35 \cdot 10^5$

$\text{J}/(6,8 \cdot 10^5 \text{ J/s}) \approx 0,5$  s. Der Trafo wäre also ein prima Wasserkocher! Die Wärmeverluste sind gigantisch. Deshalb müssen Großtrafos sehr gut gekühlt werden. Meistens passiert das durch Öl, weil das gleichzeitig als Isolator wirkt.

**Hilfe zu A26:** Im Prinzip kann man hier von einer Parallelschaltung sprechen. Weil der elektrische Widerstand des Vogels so viel größer ist als der der Leitungen, fließt durch den Vogel praktisch kein Strom. Allerdings sind die Vögel einem sehr starken elektromagnetischen Feld ausgesetzt, das bei längerem Einwirken durchaus die Gesundheit beeinträchtigen kann.

**Hilfe zu A27:** Legt man an einen Ferromagneten ein äußeres magnetisches Feld an, so richten sich die Weiß'schen Bezirke neu aus. Durch das Drehen der Dipole ändert sich die Länge eines Metallstabes im Bereich von ca. 10 bis 30  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Man nennt diesen Effekt Magnetostriktion. Weil durch den Wechselstrom von 50 Hz in der Sekunde 100-mal umgepolt wird, beginnt der Eisenkern des Transformators daher mit 100 Hz zu schwingen. Diese Schwingung nehmen wir als „Netzbrummen“ wahr.

**Hilfe zu A28:** Der Trenntrafo hat ein Übersetzungsverhältnis von 1:1. Weil aber keiner der beiden Pole der Sekundärspule geerdet ist, kann man gefahrlos *einen* Pol berühren, weil der Stromkreis trotzdem nicht geschlossen ist. Man darf allerdings nicht gleichzeitig beide Pole berühren.

**Hilfe zu A29:** Die Ladungen und somit auch der Strom fließen *quer* zur Ausbreitungsrichtung des Signals. Es ist also anders als bei einem Gleichstromkreis, bei dem der Stromfluss parallel zum Leiter erfolgt. Man kann die Nervenleitung recht gut mit dem Abbrennen einer Zündschnur vergleichen. Wenn das Aktionspotenzial eine Muskelzelle erreicht, dann zieht sich diese zusammen. Darin liegt die große Gefahr, wenn man einen Stromschlag bekommt.

**Hilfe zu A30:** Erstens kann es zu Verbrennungen der Haut kommen. Wesentlich drastischer ist aber die Tatsache, dass der künstliche Stromfluss unsere natürlichen Stromflüsse im Körper vollkommen durcheinander bringt. Wenn bei einer Muskelfaser das Aktionspotenzial ausgelöst wird, dann zieht sie sich zusammen. Deshalb werden manchmal Menschen, die in den Stromkreis geraten, weggeschleudert, weil sich ihre Beinmuskeln unkontrolliert zusammenziehen, oder sie

können den Leiter aufgrund eines Muskelkrampfes gar nicht mehr loslassen.

Das mit Abstand am meisten gefährdete Organ ist der Herzmuskel. Bereits bei einem Fluss von 50 bis 100 mA durch den Körper (rund 1/1000 fließt davon durchs Herz) können die natürlichen Schrittmacher im Herz aus dem Rhythmus kommen. Besonders groß ist dabei die Gefahr bei Wechselstrom, wie er im Haushaltsnetz vorkommt, weil bei diesem die angelegte Spannung 100-mal pro Sekunde umgepolt wird. Das kann Herzflimmern verursachen. Dabei ziehen sich die verschiedenen Gebiete des Herzmuskels völlig unkontrolliert zusammen und es wird kein Blut mehr transportiert. Herzflimmern ist die häufigste Todesursache bei Elektrounfällen.

**Hilfe zu A31:** Maßnahmen, um Stromunfälle zu vermeiden: Niemals an elektrischen Geräten basteln oder sie reinigen, solange sie unter Spannung stehen. Solange kleine Kinder im Haus sind, alle Steckdosen durch eine Kindersicherung sichern. Defekte Elektroinstallationen sofort vom Fachmann reparieren lassen! Beschädigte elektrische Kabel dürfen nicht verwendet werden. Mit Isolierband zu flicken ist unzulässig. Keine am Netz hängenden elektrischen Geräte (Föhn, Radio) neben der Badewanne. Niemals in die Nähe von Hochspannungsleitungen begeben, etwa indem man auf einen Waggon klettert.

**Hilfe zu A32:** Der Defibrillator wird zum Beispiel bei Herzflimmern eingesetzt, indem man der betroffenen Person einen gezielten Elektroschock erteilt. Das Kernstück ist ein Kondensator, der zunächst aufgeladen wird. Es wird dabei nicht die Spannung, sondern die Ladeenergie angegeben, die maximal 360 J beträgt. Erstaunlich wenig! Der Trick besteht darin, dass diese in extrem kurzer Zeit abgegeben wird. Dadurch entsteht eine beachtlich hohe Stromleistung. Muskelfasern brauchen nach jedem Zusammenziehen eine kurze Pause. Durch den Stromstoß ziehen sich alle Herzmuskelfasern gleichzeitig zusammen, werden quasi „auf null gestellt“, und das Flimmern hört auf.

**Hilfe zu A33:** Wie „weiß“ der Fehlerstromschutzschalter (kurz FISS), dass Strom über den Schutzleiter abfließt oder über eine Person und somit Gefahr besteht? Sowohl Außenleiter als auch Neutraleiter sind mit gleicher Windungszahl über eine Spule gewickelt. Im Normalbetrieb verlaufen der Strom im Außenleiter ( $I_A$ ) und im Nulleiter ( $I_N$ ) gegenläufig und mit gleicher Stromstärke. Die magnetischen

Felder heben sich daher auf. Fließt jedoch ein Teil des Stroms über den Schutzleiter (die „Erdung“;  $I_E$ ) oder sonst irgendwie fehlerhaft ab (= Fehlerstrom), so überwiegt in der Spule der Außenleiterstrom und diese wird magnetisch. Ein beweglicher Eisenkern wird in die Spule gezogen, der Kipp-schalter geht nach unten und unterbricht den Strom.